

**YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİNİN SiC VE Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PARÇACIK TAKVİYELİ  
ALÜMİNYUM ALAŞIMI ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**MEHMET FATİH AYCAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2010  
ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK  
Anabilim Dalı Başkanı

Mehmet Fatih AYCAN tarafından hazırlanan “Yaşlandırma Isıl İşleminin SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımı Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ  
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. İbrahim USLAN

Üye : Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Üye : Doç. Dr. Necip CAMUŞCU

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mehmet Fatih AYCAN

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Makine Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Nisan 2010

**M. Fatih AYCAN**

**YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİNİN SiC VE Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PARÇACIK TAKVİYELİ  
ALÜMİNYUM ALAŞIMI ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**ÖZET**

Birçok sanayi sektöründe geleneksel malzemelerin yerine kullanılmaya başlayan kompozit malzemelerin, farklı koşullarda sahip oldukları mekanik özelliklerin bilinmesi son derece önemlidir. Bu çalışmada seramik takviyeli yaşlandırılabilir 7xxx serisi alüminyum alaşımı esaslı kompozit malzemelerin, sıcak presleme yöntemi kullanılarak üretimleri yapılmıştır. Daha sonra farklı yaşlandırma koşullarında numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Numunelerde ana yapı olarak Al-3,5Cu-2,5Mg-5Zn alaşımı, takviye elemanı olarak SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramikleri kullanılmıştır. Alaşım, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve karma takviyeli olmak üzere farklı bileşimlerde toplam 12 adet numune türü hazırlanmıştır. Numuneler üretildikten sonra, numunelere ilk olarak çözeltiye alma ve su verme işlemleri, daha sonra ise doğal ve yapay olmak üzere farklı koşullarda yaşlandırma işlemleri uygulanmıştır. Yaşlandırma işlemleri süresince numunelerin sertlik değişimleri belirlenmiştir. Buna ek olarak, her koşul için elde edilen en yüksek sertlik değerlerinde; üç nokta eğme deneyi ile numunelerin akma dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca, numunelerin iç yapıları, ışık ve taramalı elektron mikroskopları yardımıyla incelenmiştir. Çalışmanın sonunda, doğal yaşlandırma işleminde yaşlandırma süresine bağlı olarak sertlik değerlerinin başlangıçta yükseldiği fakat daha sonra büyük ölçüde kararlı davranış sergilediği görülmüştür. Yapay yaşlandırma işlemlerinde ise numuneler yaşlandırma sıcaklığına göre farklı sonuçlar sergilerken, en iyi sonuçlar %20 SiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Eğme deneylerinde ise, yüksek sertlik değerlerinde genellikle düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmayla yaşlandırma işlemlerinin farklı bileşimlerdeki numunelerin mekanik özellikleri üzerinde oluşturduğu etkiler belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kompozit malzemeler, yaşlandırma işlemleri, mekanik özellikler

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Associate Professor Dr. Mustafa ÜBEYLİ  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – April 2010

**M. Fatih AYCAN**

**EFFECTS OF AGEING HEAT TREATMENT ON MECHANICAL  
PROPERTIES OF SiC AND Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PARTICLES REINFORCED  
ALUMINUM ALLOY COMPOSITES**

**ABSTRACT**

Composite materials, one group of advanced materials, are widely used in various applications. Particularly in structural applications, determination of the mechanical properties of composite materials is very crucial. In this study, the effect of main aging parameters on the mechanical properties of ceramic reinforced aluminum alloy composites produced by hot pressing method was investigated. Al-5Zn-3,5Cu-2,5Mg alloy as matrix and SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics materials as reinforcement were used in the production of samples. Totally, 12 compositions were prepared as alloy, composites reinforced with SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and hybrid in different reinforcement ratio. After the production of samples, firstly they were solutionized, and then both the artificial and natural aging processes were carried out. The hardness behaviors of samples were determined during the aging processes. Additionally, the yield strength of the samples having maximum hardness for different aging conditions was determined using three point bending experiments. Besides the microstructure of samples were observed by using optical and scanning electron microscopes. According to the experimental results in the naturally aged composites the hardness values depending the aging time arose in the beginning of the process but then it was seen that they had a stable behavior substantially. Furthermore in the artificially aged composites the different hardness behaviors were determined depend on different aging temperatures. Among the investigated samples, the composites with %20 SiC showed the best mechanical properties.

**Keywords:** Composite materials, aging process, mechanical properties

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, destekleyen değerli hocam ve danıőmanım Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ'ye, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. İbrahim USLAN'a, tecrübelerini ve desteğini esirgemeyen Öğretim Görevlisi Teyfik DEMİR'e, deneylerimde yardımcı olan meslektaőlarım Bayram GÜREL ve M. Yusuf ÜNGÖR'e, yine tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, çalıőmalarım sırasında maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen kıymetli aileme teőekkürü bir borç bilirim. 106M211 numaralı projesiyle őahsımı maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	8
3.1. Metal Esaslı Kompozitler	10
3.2. Alüminyum Esaslı Kompozitler	13
3.2.1. Alüminyum ve Özellikleri	13
3.2.2. Alüminyum Alaşımları	14
3.2.3. Alüminyum Alaşımlarında Dayanım Artışı	15
3.3. Seramik Takviyeler	18
3.3.1. Silisyum Karbür (SiC)	18
3.3.2. Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	19
3.4. Seramik Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitler	19
4. TOZ METALURJİSİ	24
4.1. Tozların Hazırlanması ve Karıştırılması	25
4.2. Tozların Sıkıştırılması	27
4.3. Tozların Sinterlenmesi	28
4.3.1. Katı Hal Sinterleme İşlemi ve Aşamaları	29
4.3.2. Sıvı Faz Sinterlemesi	31
4.3.3. Sıcak Presleme Yöntemi	32

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
5.1. Malzeme	35
5.2. Tozların Hazırlanması	36
5.3. Sıcak Presleme	37
5.4. Yoğunluk Ölçümleri	37
5.5. Isıl İşlemler	38
5.6. İç Yapıların İncelemesi	39
5.6.1. Işık Mikroskobunda Görüntüleme	39
5.6.2. SEM ve EDS Çalışmaları	39
5.7. Mekanik Testler	40
5.7.1. Sertlik Deneyleri	40
5.7.2. Üç Nokta Eğme Deneyleri	41
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	42
6.1. Toz Boyutları	42
6.2. Yoğunluk Ölçümleri	46
6.3. İç Yapıların İncelemesi	49
6.4. Sertlik Deneyleri	61
6.5. Üç Nokta Eğme Deneyleri	88
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	98
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	106



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 3.1	Alüminyum alaşımı çeşitlerinin kodlanması	14
Çizelge 3.2	Isıl işlem özelliğine göre alüminyum alaşımları	15
Çizelge 5.1	Üretimi yapılan deney numunelerinin takviye bileşimi	36
Çizelge 6.1	Kullanılan tozlara ait ortalama çap ölçüleri	45
Çizelge 6.2	Numunelere ait kuramsal ve deneysel yoğunluk değerleri	46
Çizelge 6.3	Numuneler için ideal yaşlandırma koşulları	84
Çizelge 6.4	Numunelerin akma dayanım değerleri için belirlenen standart sapma değerleri	88
Çizelge 6.5	7xxx serisi Al alaşımı ve SiC takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerinde akma dayanım değerleri	96
Çizelge 6.6	7075 Al alaşımı ve SiC takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerindeki akma dayanımları	97

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.1	Takviye elemanlarının ana yapı içerisindeki yerleşimi	12
Şekil 3.2	Çökeltme sertleştirme aşamaları	16
Şekil 3.3	Alüminyum esaslı kompozitten üretilen motor blok ve silindir gömlek	21
Şekil 3.4	Alüminyum esaslı kompozitler ile üretilen fren sistemi parçaları	22
Şekil 3.5	Yıllara göre değişen bir araç için kullanılan ortalama Al miktarı	23
Şekil 4.1	Toz karıştırma mekanizmaları	26
Şekil 4.2	Bilyalı değirmen tipi karıştırma ünitesi	26
Şekil 4.3	Sıkıştırma aşamaları	27
Şekil 4.4	Yüzey ve hacim taşınım mekanizmalarının çalışma prensibi	29
Şekil 4.5	Katı hal sinterleme aşamaları	30
Şekil 4.6	Sıvı faz sinterlemesinin şematik gösterimi	31
Şekil 4.7	Çift hareketli zımba yardımıyla sıkıştırma yapabilen sıcak presleme yöntemi	33
Şekil 4.8	Parça kesitinde oluşan yoğunluk dağılımları	34
Şekil 5.1	Yapay yaşlandırma işlemlerinin temsili gösterimi	38
Şekil 6.1	Takviye elemanı olarak kullanılan seramik tozlarına ait toz boyut dağılımları; a) SiC, b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42
Şekil 6.2	Ana yapıyı oluşturan Al ve Zn metal tozlarına ait toz boyut dağılımları; a) Al, b) Zn	43
Şekil 6.3	Ana yapıyı oluşturan Cu ve Mg metal tozlarına ait toz boyut dağılımları; a) Cu, b) Mg	44
Şekil 6.4	Numunelere ait bağıl yoğunluk değerleri	47

Şekil 6.5	Dağlama öncesi alınmış numunelere ait iç yapı görüntüleri (x 500), a) %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , b) %15 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , c) %5 SiC, d) %15 SiC, e) %10 SiC-%10 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50
Şekil 6.6	Farklı bileşimlere sahip numunelerin yaşlandırma işleminden sonra dağlama yapılarak alınan optik görüntüler (x 1000), a) Alaşım, b) %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , c) %15 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , d) %5 SiC, e) %15 SiC, f) %10 SiC-%10 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51
Şekil 6.7	200°C yapılan yaşlandırma işleminden sonra alınan numunelere ait SEM görüntüleri (x 500); a) Alaşım, b) %5 SiC, c) %15 SiC	52
Şekil 6.8	Doğal yaşlandırma işlemlerinden sonra alınan numunelere ait BSE görüntüleri (x 500); a) %5 SiC, b) %15 SiC	53
Şekil 6.9	200°C de yapılan yaşlandırma işleminden sonra alaşım numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi	54
Şekil 6.10	200°C de yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 SiC takviyeli numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi	55
Şekil 6.11	120°C de yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 SiC takviyeli numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi	56
Şekil 6.12	Çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra %5 SiC takviyeli numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi	57
Şekil 6.13	Çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi	58

Şekil 6.14	120°C de yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi	59
Şekil 6.15	SiC ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli kompozitlerde doğal yaşlanma davranışı, a) SiC takviyeli, b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli	63
Şekil 6.16	Karma kompozit numunelerde doğal yaşlanma davranışı	66
Şekil 6.17	Al alaşımının yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi	67
Şekil 6.18	SiC takviyeli kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi; %5 SiC, b) %10 SiC, c) %15 SiC	68
Şekil 6.19	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi; %5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , b) %10 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , c) %15 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	71
Şekil 6.20	Karma kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi, a) %0 SiC-%20 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , b) %5 SiC-%15 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , c) %10 SiC-%10 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , d) %15 SiC-%5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , e) %20 SiC-%0 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	74
Şekil 6.21	Numunelerin işlem görmemiş halde, çözeltiye alma ve su verme işlemleri sonunda ve yapay yaşlandırma işlemleri sonunda alınan sertlik değerleri; a) Tek çeşit takviye elemanı ile takviye edilen kompozitler, b) karma kompozitler	77
Şekil 6.22	Belirlenen yaşlandırma koşullarında tek çeşit seramik ile takviye edilen kompozit numunelere ait sertlik değişimleri; 120°C, b) 200°C	79

Şekil 6.23	Belirlenen yaşlandırma koşullarında karma seramik takviyeli kompozit numunelere ait sertlik değişimleri; a) 120°C, b) 200°C	80
Şekil 6.24	Alaşım numunede 120°C de yapılan yaşlandırma işlemi esnasında oluşan çökelti (x 5000)	82
Şekil 6.25	Takviye elemanları üzerinde oluşan parçacık kırılması (x 2000)	83
Şekil 6.26	SiC takviyeli kompozitlerin farklı yaşlandırma sıcaklıklarında ulaştıkları en yüksek sertlik değerleri	89
Şekil 6.27	SiC takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerindeki akma dayanımları	90
Şekil 6.28	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli kompozitlerin farklı yaşlandırma sıcaklıklarında ulaştıkları en yüksek sertlik değerleri	91
Şekil 6.29	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerindeki akma dayanımları	92
Şekil 6.30	Karma kompozitlerin farklı yaşlandırma sıcaklıklarında ulaştıkları en yüksek sertlik değerleri	93
Şekil 6.31	Karma kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerindeki akma dayanımları	94

## KISALTMALAR

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>MEK</b>	Metal esaslı kompozit
<b>AA</b>	Alüminyum alaşımları
<b>GP</b>	Guinier-Preston

## 1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesine paralel olarak geleneksel malzemelerin yetersiz kalması, insanları yeni malzemeler araştırmaya ve geliştirmeye mecbur bırakmaktadır. Geliştirilen malzemelerin hem beklenen özellikleri karşılayabilmesi, hem de ekonomik olarak geleneksel malzemelere oranla daha üstün konumda olmaları istenir. Bu sebeple geleneksel malzemelerin tek başlarına kullanımlarının uygun olmadığı durumlarda, farklı niteliklerdeki malzemeler belirli oranlarda ve koşullarda bir araya getirilerek kompozit malzemeler geliştirilmiştir. 1940'lı yıllarda İkinci Dünya Savaşı esnasında yalnızca askeri uygulamalar için denizcilik alanında kullanılan kompozit malzemeler, 2000'li yıllara gelindiğinde pek çok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır [1]. Günümüzde kompozit malzemeler başta uzay ve havacılık sanayi olmak üzere otomotiv sanayi, savunma sanayi, denizcilik alanı ve spor malzemeleri endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son yıllarda enerji kaynaklarının azalmasına bağlı olarak artan yakıt giderleri nedeniyle enerji tasarrufuna daha fazla önem verilmeye başlanmıştır. Bu durum geliştirilen malzemelerin tasarım ve üretimlerinde de ön plana çıkmaktadır. Bu noktada temel amaç; düşük ağırlıkta daha gelişmiş özelliklerde malzeme üretimi gerçekleştirmek olarak belirlenmiştir. Kompozit malzemelerin yaygınlaşmasıyla birçok geleneksel malzemenin alternatifleri bulunmuş ve kullanıma sunulmuştur. Bunun en somut örneklerinden biri, otomotiv endüstrisinde motor blok malzemesi olarak kullanılan dökme demirin yerini, seramik takviyeli alüminyum alaşımı esaslı kompozit malzemelere bırakmasıdır. Bu sayede yaklaşık 30 kg kadar daha hafif olan motor bloğu ile önemli ölçüde yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Imelinska ve arkadaşları otomotiv endüstrisinde kullanılan malzemeler üzerine yaptıkları çalışmada, bir otomobilde 100 kg'lık ağırlık düşüşünün 100 km'de yaklaşık 0,6 litre yakıt tasarrufuna, çevreye yayılan gaz salımlarında ise %20 azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir [2].

Kompozit malzemeler üretilirken ana yapı ve takviye elemanı olarak kullanılacak malzemelerin doğru olarak belirlenmesi, malzemenin başarımı açısından son derece önemlidir. Kompozitlerde ana yapı olarak genellikle metaller, seramikler ve polimerler, takviye elemanı olarak ise seramik malzemeler tercih edilmektedir. Ana yapı ve takviye elemanlarının birbirlerinin eksik yönlerini tamamlayarak daha üstün özelliklere sahip olacak şekilde seçilmeleri, kompozit malzemeler için önemli bir noktadır. Polimer esaslı kompozitler düşük sıcaklık ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalarda, seramik esaslı kompozitler yüksek sıcaklık uygulamalarında, metal esaslı kompozitler ise her iki kompozit türünün de kullanıldığı oldukça geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Kompozit numuneler arasında yüksek dayanım değerleri, düşük ağırlıkları, yüksek aşınma direnci ve yüksek korozyon dayanımları ile en çok tercih edilen türlerden biri metal esaslı kompozitlerdir. Metal esaslı kompozitler genel olarak seramik malzemeler ile takviye edilirken, ana yapı olarak en yaygın kullanılan malzeme alüminyum alaşımlarıdır. Alüminyum esaslı kompozitler sahip oldukları üstün özellikleri ile birçok uygulama alanında rahatlıkla kullanılabilirlerdir.

Bu çalışmada 7xxx serisi alüminyum alaşımı esaslı seramik takviyeli kompozit malzemelerin uygulanan farklı ısıl işlemler ile mekanik özelliklerinin değişimleri incelenmiştir. SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve her iki seramik türünün kullanıldığı karma kompozit numuneler sıcak presleme yöntemi kullanılarak üretilip farklı sıcaklıklarda yaşlandırma işlemi uygulandıktan sonra numunelerin sertlik değişimleri çıkarılmış ve bu sonuçlar yardımıyla en yüksek sertlik değerlerinde numunelerin dayanım değerleri belirlenmiştir. Buna ek olarak kompozit numunelerin mekanik özellikleri, takviye elemanlarının kullanılmadığı alaşım numunenin mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinin yanında ışık ve taramalı elektron mikroskopları yardımıyla numunelerin iç yapıları da incelenmiştir. On iki farklı bileşimde hazırlanan numuneler için en uygun takviye elemanı, takviye oranı ve yaşlandırma koşulu belirlenmiştir.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Ho Min ve arkadaşları [3], 7xxx serisi Al alaşımı (Al-7Zn-2,5Mg-1Cu) esaslı ve %5 SiC takviye oranına sahip numunelerde sinterlenme özellikleri ve takviye elemanın sertlik ve basma dayanımları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Numuneler azot gazı ortamında 620°C'de 10 dakika ile 240 dakika süreleri arasında sinterleme işlemlerine maruz bırakılmış ve daha sonra numunelere 475°C'de çözeltiye alma işlemi ile 175°C'de yaşlandırma işlemleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen ısıl işlemlerden sonra numunelere mikrosertlik ve basma deneyleri uygulanarak mekanik özellikler belirlenmiştir. SiC takviyeli kompozitlerin yaşlandırma işlemi sonrasında mikrosertlik değerlerinin alaşım numunelere göre daha düşük olduğu, diğer taraftan kompozit numunelerin basma dayanımlarının ise alaşım numuneye oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir [3].

El-Baradie ve arkadaşları [4], 7020 Al alaşımı esaslı %5 ve %10 SiC takviye oranlarında üretilen numunelerin doğal yaşlandırma ve 170°C'de yapay yaşlandırma işlemleri ile sertlik değişimlerini incelemiştir. Ayrıca uygulanan soğuk işlem ile oluşan deformasyon miktarlarının numunelerde sertlik değişimleri üzerindeki etkisi de gözlemlenmiştir. SiC takviyeli kompozitlerin alaşım numuneye göre her iki yaşlandırma koşulunda da daha erken en yüksek sertlik değerlerine ulaştığı ve artan deformasyon miktarı ile daha yüksek sertlik seviyeleri elde edilmiştir [4].

Sheu ve Lin [5], 7075 Al alaşımı ana yapıya sahip %5 - %40 aralığında farklı oranlarda SiC ile takviye edilen kompozit numunelere 80, 120 ve 200°C'de yaşlandırma işlemleri uygulayarak, takviye miktarına ve yaşlandırma sıcaklığına bağlı sertlik değişimlerini incelemiştir. %5 ve %10 gibi düşük takviye oranlarında elde edilen sertlik değişim eğrileri takviyesiz alaşım numune ile benzer davranış sergilerken yüksek takviye oranlarında ise alaşım numuneye göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. 80°C ve 120°C'de yapılan yaşlandırma işlemlerinde takviye oranları ile tutarsız sertlik değişimleri elde edilirken, 200°C'de yapılan yaşlandırma

işleminde artan takviye oranları sertlik değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Yaşlandırma işlemlerindeki sertlik artışları incelendiğinde en yüksek sertlik artışlarının takviye elemanı içermeyen alaşım numunelerde olduğu görülmüştür [5].

Sha ve Cerezo [6], 7050 Al alaşımının 121°C'de yaşlandırılması esnasında farklı yaşlandırma sürelerinde oluşan GP bölgelerinin ve yarı kararlı fazların yapılarını ve oluşma mekanizmalarını incelemiştir. Yaşlandırma işleminin başlangıç safhasında GPI bölgelerinin baskın faz olduğu belirlenirken ilerleyen yaşlandırma sürelerinde  $\eta'$  yarı kararlı fazın baskın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca alaşım içinde bulunan Mg, Zn ve Cu elementlerinin miktarlarının, oluşacak fazların yapısını ve oluşma mekanizmalarını ne şekilde belirlediği tespit edilmiştir [6].

Dasgupta ve Meenai [7], 7075 Al alaşımına yakın içerikte hazırlanan ana yapı ve %15 oranında SiC ile takviye edilen numunelere uygulanan farklı ısıl işlemler sonucunda sertlik, mekanik ve aşınma özelliklerini belirlemiştir. Yaşlandırma işlemi sonucunda SiC ile takviye edilen numunelerin alaşım numunelere oranla daha yüksek mukavemet ve aşınma özelliklerine sahip oldukları belirlenmiştir. Diğer taraftan uygulanan RRA işlemi ile kompozit numunelerde sertlik ve çekme dayanım değerleri azalırken, aşınma dayanım özellikleri yaşlandırma işleminde olduğu gibi artış göstermiştir [7].

Daouda ve Reif [8], A356 Al alaşımını ana yapıya ve farklı boyutlarda %5, %10 ve %20 oranlarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilen kompozit numunelerin 155°C'de yapılan yaşlandırma işlemi ile değişen sertlik davranışlarını incelemiştir. Mikrosertlik deneyleri sonucunda artan takviye oranı ile sertlik değerlerinin yükseldiği gözlemlenirken, yapı içerisindeki Mg elementinin varlığı, alaşımın yaşlanma davranışını ve beraberinde mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir [8].

Kiourtsidis ve arkadaşları [9], 2024 Al alaşımı esaslı SiC takviyeli farklı bileşimlerdeki kompozitlerin 177°C'de yapılan yaşlandırma işlemi ile sertlik değerlerinin değişimini incelemiştir. Alaşım, %8, %14, %19, %24 takviye oranlarında olmak üzere beş farklı bileşimde hazırlanan numunelerde yaşlanma esnasında oluşan çökelti tipleri ve bu çökeltilere bağlı sertlik davranışları belirlenmiştir. Kompozit numunelerin en yüksek sertlik değerleri, alaşım numuneye oranla daha yüksek olurken, artan takviye elemanına bağlı olarak da ulaşılan en yüksek sertlik seviyeleri yükselmektedir. Ayrıca bütün numunelerde en yüksek sertlik değerine ulaşmak için geçen yaşlandırma süresinin bütün numunelerde yaklaşık aynı olduğu belirlenmiştir [9].

Fan ve arkadaşları [10], 7150 Al alaşımının tek ve iki adımda yapılan yaşlandırma işlemleri ile sertlik ve elektrik iletkenliklerinin değişimlerini incelemiştir. İkinci adımda gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi ile elektrik iletkenliği önemli derecede artış göstermiştir. Ayrıca GPI bölgelerinin kararlılığı yapılan ikinci yaşlandırma işlemi ile artmıştır. Fakat ilerleyen yaşlandırma sürelerinde oluşan GPI ve GPII bölgeleri kaybolmaya başlamıştır. Numunelerde oluşan sertlik artışı GP bölgelerinin ve  $\eta'$  yarı kararlı fazların yapı içindeki miktarlarına dayandırılmıştır [10].

Berg ve arkadaşları [11], farklı ısıl işlem koşulları altında 7108 Al alaşımında oluşan GP bölgelerinin yapısını ve özelliklerini incelemiştir. İki tip GP bölgesi olduğu belirlenmiş olup GPI bölgelerinin oda sıcaklığından 150°C'ye kadar geniş bir yaşlandırma sıcaklık aralığında su verme sıcaklığından bağımsız olarak oluştukları, GPII bölgelerinin ise 70°C'den daha yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde oluştukları belirlenmiştir [11].

Guo ve Yuan [12], SiC ve grafit takviyeli 6013 Al alaşımı esaslı kompozitlerin doğal yaşlandırma ve yapay yaşlandırma işlemleri ile sertlik artışlarını incelemiştir. 191°C'de yapılan yapay yaşlandırma işleminde kompozit numuneler, 6013 Al alaşımına göre daha kısa zamanda en yüksek sertlik değerine ulaşmışlar, fakat

yapılan doğal yaşlandırma işleminde ise daha geç sürede kararlı hale geldikleri belirlenmiştir. SiC/Gr/6013Al kompozitlerin her iki yaşlandırma koşulunda da yapılarındaki grafitten dolayı 6013 Al alaşımına oranla daha düşük sertlik artışına sahip oldukları gözlemlenmiştir [12].

Shorowordi ve arkadaşları [13], alüminyum ana yapıya sahip B<sub>4</sub>C, SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramikleri ile takviye edilen kompozitlerde içyapı ve ara yüzey özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bunun yanında B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerde diğer kompozitlere göre daha iyi parçacık dağılımı elde edilirken, SiC takviyeli kompozitlerde ise Al ve SiC ara yüzeylerinde uzun yaşlandırma süreleri sonunda ara yüzey reaksiyonları sonucu oluşmuş bileşikler tespit edilmiştir. B<sub>4</sub>C ile takviye edilen kompozitlerde ise ara yüzeylerden uzak bölgelerde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al<sub>3</sub>BC şeklinde iki farklı bileşik türü belirlenmiştir, ayrıca B<sub>4</sub>C ve Al yapıları arasında çok kuvvetli bağ yapıları tespit edilmiştir [13].

Kumar ve Dwarakadasa [14], 7075 Al alaşımı ile eşdeğer biçimde hazırlanan ana yapıya %9 ve %18 oranlarında SiC seramik parçacıkları ilave edilerek üretilen kompozit numunelere yapay yaşlandırma işlemleri uygulayarak numunelerin sertlik davranışlarını ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Çekme akma dayanım değerleri incelendiğinde; en yüksek yaşlanma ve aşırı yaşlanma durumlarında çözeltiyeye alma işlemine oranla daha düşük akma dayanım değerleri elde edilirken, basma akma dayanım değerlerinde ise çözeltiyeye alma işlemi ve aşırı yaşlanma durumu sonunda daha yüksek değerlere ulaşılmıştır. 135°C’de yapılan yaşlandırma işleminde yaşlanma zamanına göre mikro sertlik değişimi ve akma dayanım değerlerinin değişimi incelendiğinde eğrilerin davranışı büyük ölçüde benzerlik gösterdiği belirlenmiştir [14].

Hong ve Gray [15], Al-Zn-Mg-Cu alaşımı esaslı %20 SiC takviyeli kompozit numunelerin farklı ısıtma koşullarında içyapı ve mikrokimyasal özellikleri konusunda çalışmalarda bulunmuştur. SiC/Al ara yüzeylerinde belirlenen MgO ve

ana yapı içerisinde bulunan  $Mg_2Si$  bileşikleri yapıdaki Mg miktarının azaldığına kanıt olarak gösterilmektedir. Yaşlandırma işlemleri ile birlikte alaşım numunede kompozit numunelere göre daha büyük çökeltilerin oluştuğu, ayrıca alaşım numunede yaşlanma kinetiğinin daha hızlı olduğu belirlenmiştir. Ana yapı ile takviye elemanlarının ara yüzeylerinde Mg ve Cu elementlerine ait gruplaşmalar gözlemlenirken, Zn elementinin oluşturulan gruplaşma içerisinde yer almadığı belirlenmiş ve takviye elemanlarının yakınında oluşan dislokasyon yoğunluklarının, oluşturulan gruplaşmalar ile etkileşim içerisinde olduğu belirlenmiştir [15].

Thomas ve King [16], toz metalurjisi ile üretilmiş 2124 alaşımı esaslı SiC parçacık takviyeli kompozitlerin altı farklı sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işlemlerindeki yaşlanma davranışlarını alaşım numuneyle karşılaştırmalı olarak sertlik ölçümleri ve Arrhenius analizlerini kullanarak incelemişlerdir. Kompozit numunelerde yayılım için gerekli aktivasyon enerjisinin, alaşım numunelere göre daha düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca GPB bölgelerinin kompozit numunelerde daha küçük boyutlarda oldukları; fakat S' çekirdeklenme ve büyümesinin ise daha fazla olduğu görülmüştür.  $110^{\circ}C$  ile  $210^{\circ}C$  arasında yapılan bütün yaşlandırma işlemlerinde de kompozitlerin sertliklerinin alaşıma göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir [16].

### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

Günümüzde mühendislik uygulamalarında kullanılabilir elli binden fazla malzeme bulunmaktadır. Bu malzemelerden bazıları yüzyıllardır kullanılırken, bazıları yakın zamanda mevcut malzemelerin çeşitli yollarla bir araya getirilmesi ile üretilerek, kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemeler olarak adlandırılan bu malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya gelerek daha iyi özelliklerde oluşturdukları malzemelerdir [1]. Geliştirilen malzemeler, geleneksel olarak tanımlanan malzemelerin kendilerine özgü özelliklerinden yararlanılarak daha iyi özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Kompozitler ana yapı ve takviye elemanı olmak üzere iki yapıdan oluşmaktadır. Ana yapı, kompozitin esas malzemesi olup bileşimin büyük çoğunluğunu oluşturan, ayrıca takviye elemanını çevreleyerek destek sağlayan yapıdır. Takviye elemanı ise ana yapının fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek ve malzemeye gelen yükü taşımak amacıyla yapıya ilave edilen kısımdır. Bu iki yapının birbiri ile uyumu kompozitin daha iyi özelliklere sahip olması için son derece önemli bir faktördür.

Kompozit malzemelerde ana yapı olarak genellikle metaller ve alaşımları, seramikler ve polimer malzemeler kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak ise seramik, karbon, cam, grafit gibi malzemeler tercih edilmektedir. Ana yapı ile takviye elemanın aynı malzemenin farklı fazlarından oluştuğu durumlarda bulunmaktadır. Bu duruma en güzel örnek karbon-karbon kompozitlerdir [17]. Takviye elemanları geometrilerine göre sürekli ve süreksiz takviye elemanları şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Sürekli takviye elemanları elyaf olarak tanımlanırken, kullandıkları kompozitlerde yöne bağlı özellikler görülmesine neden olurlar. Bunun yanında süreksiz takviye elemanları kırpıntı ve parçacık olmak üzere iki farklı şekilde kullanılmaktadır. Kırpıntı ve parçacık takviyeli malzemeler ise yapının her yerinde aynı özelliklerin görülmesini sağlamaktadır. Ana yapı içerisinde takviye elemanlarının düzenli dağılımı, malzemede mekanik ve fiziksel özelliklerin daha iyi olmasını sağlar, aksi halde yapı içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına veya

ayrışmalara neden olur [18]. Yapıda istenmeyen yığılmaların oluşması malzemenin özelliklerini olumsuz yönde etkileyeceği için, kompozit malzemelerde istenmeyen bir durumdur.

Gelişen teknoloji ile birlikte farklı ve daha iyi özelliklerde malzeme ihtiyacı da artmaktadır. Kompozit malzemeler son yıllarda başta otomotiv ve havacılık sanayi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mevcut malzemelere oranla daha yüksek mekanik dayanım, aşınma direnci, yorulma dayanımı, ısı dayanım ve korozyon dayanımına sahip olmaları tercih edilmelerinde etkili olmaktadır [18]. Kompozit malzemelerin dayanım özelliklerinin diğer malzemelere göre iyi olmasının yanında daha düşük ağırlıkta parça üretimine imkan veriyor olmaları, kompozit malzemeler için önemli bir avantajdır. Düşük ağırlıkta malzeme kullanılarak gerçekleştirilen parça üretimleri, beraberinde daha düşük enerji tüketimi sağlayan sistemlerin oluşmasına sebep olmaktadır [19].

Kompozit üretiminde ana yapı ve takviye elemanı olarak kullanılan birçok malzeme türü bulunmaktadır. Kompozit malzemeler; ana yapıda kullanılan malzeme türüne göre metal esaslı, seramik esaslı ve polimer esaslı kompozitler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Polimer esaslı kompozitler ucuz ve kolay ulaşılabilir malzemelerdir. Düşük dayanım değerlerine sahip polimer esaslı kompozitler düşük sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. Isı ve elektrik iletkenlikleri oldukça düşük olan kompozitler, davranışlarına göre termosetler ve termoplastikler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Takviye elemanı olarak genellikle elyaf yapıda cam, karbon ve organik malzemeler kullanılmaktadır. Polimer esaslı kompozitler havacılık sanayinde geniş kullanım alanına sahiptirler [18].

Çok sert ve kırılğan yapıda olan seramik malzemeler kompozit üretiminde genel olarak takviye elemanı olarak tercih edilmiş olsalar da, ana yapı olarak kullanıldığı pek çok uygulama vardır. Düşük ısı ve mekanik şok direncinin yanında seramikler düşük çekme dayanımına sahipken çok yüksek basma dayanımı ve esneklik sabiti

değerlerine sahiptir. Seramiklerin kompozit üretiminde hem ana yapı hem de takviye elemanı olarak kullanılmalarındaki en önemli özellikleri yüksek sıcaklıklara dayanabilme kabiliyetleridir [20]. Kompozit malzeme üretiminde en fazla kullanılan seramik türleri SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub>C tür.

Metal esaslı kompozit (MEK) malzemeler, yüksek elastik modül, dayanım, sertlik, korozyon dayanımı ve aşınma dayanımları ile kompozit malzemeler arasında polimer esaslı kompozitlerden sonra en fazla tercih edilen malzemelerdir. MEK'ler sahip oldukları üstün dayanım özellikleri ile otomotiv, uzay ve havacılık, savunma ve elektronik sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. MEK malzemelerde ana yapı metal ya da metal alaşımlarından oluşurken takviye elemanı genellikle seramik malzemelerden oluşmaktadır. Ana yapı olarak saf metalden ziyade daha iyi özelliklerde olan metal alaşımları kullanılmaktadır. Alüminyum, magnezyum, bakır ve titanyum ile bu malzemelerin alaşımları MEK'lerde ana yapı olarak kullanılan malzemelerdir. Ana yapı olarak kullanılacak malzemelerin düşük yoğunluk, yüksek tokluk ve mekanik özelliklere sahip olması istenir. Böylece daha düşük ağırlıklarda daha iyi özelliklerde malzeme üretimi sağlanmış olur.

### **3.1. Metal Esaslı Kompozitler**

1960'lı yıllardan itibaren kullanım alanları ve çeşitleri giderek artan MEK'ler, metal veya alaşımlarından oluşan ana yapı ile genellikle seramik takviye elemanı kullanılarak üretilen yüksek dayanım değerlerine sahip kompozitlerdir [21,22]. MEK tasarımında amaç, yüksek süneklığe ve şekillendirilebilirliğe sahip ana yapı ile yüksek elastik modüle ve rijitliğe sahip takviye elemanını tek yapıda birleştirmek, ayrıca yüksek ısı iletim katsayısına sahip ana yapı ile düşük ısıl genleşmeye sahip takviye elemanının mukavemet artırma kabiliyetinden yararlanmaktır [23].

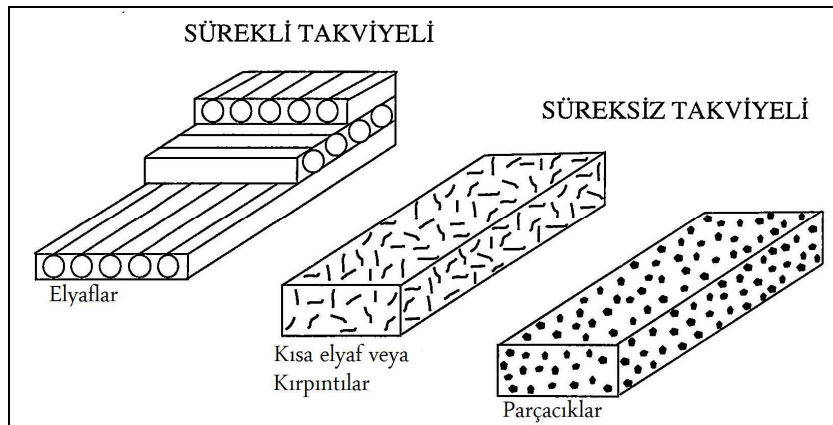
MEK'ler geleneksel malzemelerle kıyaslandıklarında; yüksek elastik modül, yüksek dayanım değerleri (mekanik, aşınma, sürünme, korozyon), yüksek sıcaklıklarda



kararlılık, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, düşük yoğunluk ve ısı şoklarına karşı düşük hassasiyet gibi birçok özellikleri ile daha üstün malzemeler olarak kabul edilirler [24]. Son yıllarda MEK'ler sahip oldukları özellikleri ile birçok endüstriyel uygulamada tekil malzemelerin yerine tercih edilmektedir. MEK'lerin endüstride kullanımlarının artmasıyla daha düşük enerji tüketim değerlerine ulaşılırken, daha yüksek kalitede parça üretimleri hız kazanmıştır. Ayrıca dünyada küresel ısınmanın nedenleri arasında gösterilen egzoz gaz salımları, araçlarda MEK'lerin kullanılmasıyla sürtünmenin azaltılmasına bağlı olarak büyük oranda azalma göstermektedir. Motor parçalarında sürtünme ve aşınmanın azaltılmasıyla ABD ekonomisinin yılda 120 milyar dolar kar ettiği açıklanmıştır [25].

MEK'lerde ana yapı için seçilen malzemeler, hafif metaller olarak da bilinen alüminyum, magnezyum, titanyum ve bu metallerin alaşımlarıdır. Ana yapı, takviye elemanlarını çevreleyerek onlara destek olmanın yanında, yapısal gerilmeleri takviye elemanlarına aktarabilecek mukavemet özelliklerine sahip olmalıdır. Ana yapının süneklik ve tokluk değerlerinin iyi olmasının yanında ıslatabilirliği ve takviye elemanı ile kimyasal bağ oluşturma kabiliyetinin yüksek olması istenir [9]. Yapılar arasında kimyasal uyumsuzluk söz konusu olması durumunda ara yüzeylerde bağ oluşumu mümkün olmaz ve ayrışmalar görülmeye başlar. Bu durum beklenen mukavemet değerlerinin elde edilememesine neden olmaktadır. MEK'lerde ara yüzeyde oluşan bağ oluşumunu artırmak için ıslatılabilirliği artırmak, kimyasal tepkimeleri kontrol etmek ve oksitlenmeyi azaltmak gerekmektedir [24,26]. Ana yapı ile takviye elemanının ısı genleşme katsayıları arasındaki fark da kompozitlerde fiziksel ve mekanik özellikler açısından önemlidir. Genleşme katsayıları birbirlerine yakın olması durumunda yapı içerisinde gerinim oluşma ihtimali azalmaktadır. Titanyum gibi yüksek mukavemet özelliklerine sahip metallerin ve alaşımlarının kullanıldığı kompozitlerde genleşme katsayıları arasındaki farkın büyük olmasına bağlı olarak oluşan yüksek kalıcı ısı gerilmeler sakıncalı olmaktadır [27].

MEK'lerde takviye elemanı olarak kullanılacak malzemenin doğru seçilmesi gerekmektedir. Seçilen takviye elemanı, ana yapı içerisinde çözünmeyecek ve ana yapı ile uyumlu ara yüzey oluşturabilecek bütüncül bir yapı oluşturması gerekmektedir. Metal veya alaşımları ile hazırlanan kompozitler, genellikle hareketli ve yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılan veya aşınma dayanım değerlerinin gerektiği uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirildiklerinden, takviye elemanı ile ana yapının kararlılıklarının yüksek olması gerekmektedir. MEK'lerde seramik malzemelerin takviye elemanı olarak kullanılması, metal malzemelere yüksek sıcaklıklarda kullanılma imkanı kazandırırken, aşınma dayanımlarını da büyük oranda artırmış olur. MEK'lerde takviye elemanı olarak karbür grubu seramiklerden SiC ve B<sub>4</sub>C, oksit grubu seramiklerden ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmaktadır [28,29]. Kompozit malzemelerde mukavemet özellikleri; kullanılan seramik malzemenin çeşidine, geometrisine ve miktarına bağlıdır. MEK'lerde kullanılan seramik takviye elemanları sürekli ve süreksiz takviye elemanları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sürekli takviye elemanı elyaflar, süreksiz takviye elemanları ise parçacık, kırpıntı (whisker) ve kısa elyaflar olarak ayrılmaktadır [30]. Sürekli takviye elemanları malzemede yöne bağlı malzeme özellikleri sağlarken, süreksiz takviye elemanları malzemeye yönden bağımsız özellikler kazandırır. Sürekli ve süreksiz takviye elemanlarının ana yapı içerisindeki yerleşimleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Takviye elemanlarının ana yapı içerisindeki yerleşimi [31]

Sürekli takviye elemanları genellikle yüksek aşınma dayanımı, yorulma dayanımı, kontrollü genişleme ve özgül malzeme özelliklerinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır [32]. Sürekli takviye elemanı olarak kullanılan elyaflar hacimce %80 oranına kadar kullanılırken, iyi mukavemet özelliklerinin elde edilmesine imkân vermektedir. Fakat üretimleri esnasında yaşanan zorluklar ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ekonomik sorunlardan dolayı kullanımları sınırlı kalmıştır [33].

## **3.2. Alüminyum Esaslı Kompozitler**

### **3.2.1. Alüminyum ve Özellikleri**

Alüminyum demirden sonra doğada en fazla rastlanan element olmasına rağmen, endüstriyel olarak kullanımı 1886 yılına kadar mümkün olmamıştır. İlk defa endüstriyel olarak kullanımı düşük yoğunluğuna bağlı olarak ağırlıktan kazanç sağlaması nedeniyle otomotiv sanayinde motor parçası yapımında olmuştur [34]. Alüminyum ve alaşımları sahip oldukları düşük ağırlık, üretilebilirlik, fiziksel özellikler, mekanik özellikler ve korozyon dayanımı ile birçok alanda ekonomik ve yüksek kalitede üretime imkân vermektedir [35].

Alüminyumun diğer mühendislik malzemeleri arasında yaygın olarak kullanılmasının temel sebepleri yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, kolay şekillendirilebilme kabiliyetleri, yüzeyinde oluşan oksit tabakası sayesinde yüksek korozyon dayanımı ve düşük ağırlık değerlerine sahip olmalarıdır. Doğada oksit olarak bulunan alüminyum, saflaştırma aşamalarından sonra daha yüksek korozyon dayanımı ve iletkenlik değerlerine sahip olmaktadır. Alüminyumun özellikleri yapılan alaşımla işlemleri ile geliştirilerek, daha fazla uygulama alanlarında rahatlıkla kullanılabilir.

### 3.2.2. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, oldukça iyi fiziksel özelliklere sahip olmasının yanında düşük mukavemet özellikleri ve yumuşak yapıda olması nedeniyle daha çok alaşım olarak kullanılmaktadır. Alüminyum, saf halde genellikle yüksek elektrik ve ısı iletkenliğinin önemli olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımlarında ilave eleman olarak Zn, Cu, Si, Mn ve Mg gibi elementler yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu elementlerin oldukça fazla kullanılmalarının nedeni alüminyum ile birlikte çökelme sertleşmesi mekanizması oluşturmalarıdır [36]. Mevcut alüminyum alaşımları içindeki ana alaşım elementine göre sınıflandırılmaktadır. Alüminyum alaşımlarında Al'dan sonra oran olarak en fazla bulunan ve alaşımın temel özelliklerinin belirlenmesinde etkili olan alaşım elementleri ana alaşım elementleri olarak tanımlanabilir. Alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementine göre sınıflandırılması Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Bakır, Çinko, Magnezyum, Silisyum ve Mangan alüminyum alaşımlarında ana alaşım elementi olarak kabul edilmektedir. Bunlar dışında daha birçok alaşım elementi, alaşımın özelliklerine önemli katkılarda bulunmaktadır.

Çizelge 3.3 Alüminyum alaşımı çeşitlerinin kodlanması [35,37]

<b>Ana Alaşım Elementi</b>	<b>Kodlama</b>
Al, %99,00 (en az)	1xxx
Bakır (Cu)	2xxx
Mangan (Mn)	3xxx
Silisyum (Si)	4xxx
Magnezyum (Mg)	5xxx
Magnezyum + Silisyum (Mg +Si)	6xxx
Çinko (Zn)	7xxx
Diğer	8xxx

7xxx serisi alüminyum alaşımları çinko esaslı olarak bilinen alaşımlar olmasına rağmen genellikle içerisinde bakır ve magnezyum elementleri de bulunmaktadır. Ana alaşım elementleri dışında yapı içerisinde lityum, krom, vanadyum ve demir gibi alaşım elementleri de bulunabilir. Yüksek dayanım ve düşük ağırlıkları nedeniyle 7xxx serisi alüminyum alaşımları başta uzay ve havacılık sanayi olmak üzere otomotiv ve savunma sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır [37].

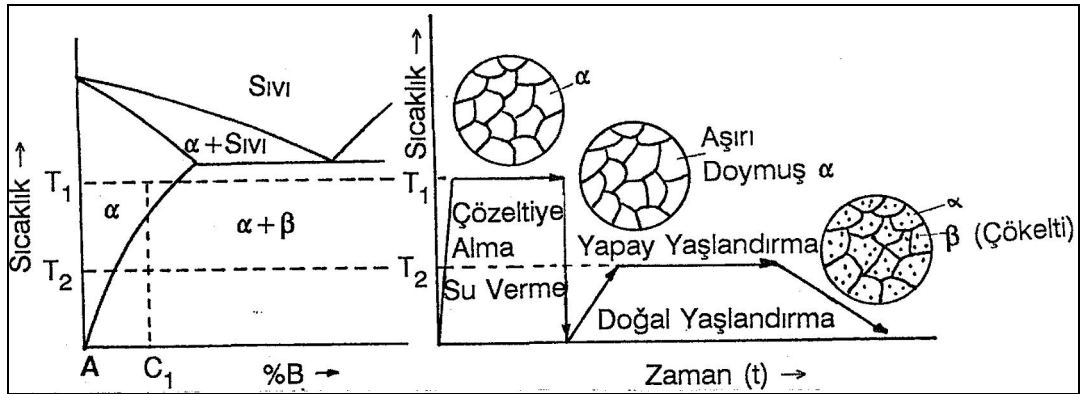
### 3.2.3. Alüminyum Alaşımlarında Dayanım Artışı

Endüstriyel olarak düşük dayanımları sebebiyle saf olarak kullanılmayan alüminyuma, daha iyi mukavemet özellikleri kazandırmak için farklı alaşım elementleri ilave edilerek alüminyum alaşımları üretilmektedir. Alüminyum alaşımları, içerisindeki alaşım elementlerinin türüne ve miktarına göre farklı mukavemet özellikleri göstermektedir. Bazı alüminyum alaşımlarının dayanım değerleri uygulanan ısıt işlemler ile bazıları ise soğuk şekillendirme işlemi ile daha yüksek seviyelere çıkartılabilir [34]. Isıt işlenebilen alüminyum alaşımları olarak bilinen alaşımlarda, uygulanan bir takım ısıt işlemler ile mukavemet özelliklerinde değişiklik olurken, ısıt işlenemeyen alaşımlarda ise uygulanan ısıt işlemler ile alaşım özelliklerinde herhangi bir değişiklik söz konusu olmamaktadır. Literatürde ısıt işlenebilen ve ısıt işlenemeyen alüminyum alaşımları olarak ayrılan alaşımlar Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Isıt işlem özelliğine göre alüminyum alaşımları [34]

Isıt İşlenebilen AA	Isıt İşlenemeyen AA
2xxx	1xxx
4xxx	3xxx
6xxx	5xxx
7xxx	

Isıl işlenebilen alüminyum alaşımlarında dayanım artışı, çökeltme sertleşmesi işlemi ile gerçekleşmektedir. Çökeltme sertleşmesi, ortamda bulunan en az iki farklı yapıdan yüksek sıcaklıklara çıkıldığında birinin diğeri içerisinde çözünmesi ve daha sonra sıcaklığın düşürülmesiyle çökeltmesi esasına dayanan ısıl işlem olarak tanımlanabilir. Çökeltme sertleşmesi, çözeltiliye alma, hızlı soğutma ve çökeltme olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir. Çözeltiliye alma işlemi alaşımın ötektik sıcaklığının altında tek fazlı bölgede gerçekleşen ısıtma işlemidir. Bu noktada bir süre beklenerek çözünmenin tamamen gerçekleşmesi ve homojenin yapının elde edilmesi sağlanır. Hızlı soğutma işleminde çözeltiliye alma işlemi için ısıtılan alaşım, ani soğutma yapmak için su verme işlemi ile oda sıcaklığına soğutulur. Böylece yapı içerisinde çözünen alaşım elementlerinin çökeltmesi engellenir ve oda sıcaklığında da çözeltilide kalması sağlanır. Çözelti, aşırı doymuş katı çözeltili durumundadır ve yapının mukavemet özellikleri yavaş soğuma sonunda elde edilen yapıya oranla daha yüksek olmaktadır. Çökeltme sertleşmesi işleminin ikili faz üzerinde temsili gösterimi ve işlem aşamaları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Çökeltme sertleşmesi aşamaları [39]

Çökeltme sertleşmesinin son aşaması, çökeltme veya yaşlandırma işlemi olarak bilinmektedir. Yaşlandırma işleminde su verme işlemi sonunda elde edilen aşırı doymuş katı çözeltilinin kararsız olmasından dolayı yapı içerisindeki ikinci faz zamanla çökeltir. Bu çökeltme, ilk duruma göre daha ince tanelerin daha homojen

yapıda dağılmasına bağlı olarak, dayanım ve sertlik değerlerinin ilk duruma oranla daha yüksek olmasını sağlar. Yaşlandırma işlemi su verme sıcaklığı ya da oda sıcaklığında oluyorsa doğal yaşlandırma olarak tanımlanırken, belli bir sıcaklık değerinde gerçekleştirilirse yapay yaşlandırma olarak tanımlanır. Yapay yaşlandırma işleminin yapılacağı sıcaklık değerleri alaşım içerisindeki elementlere ve miktarlarına göre belirlenir.

7xxx serisi alüminyum alaşımlarında çinko ile beraber magnezyum ve bakır da sıkça kullanılmaktadır. Magnezyum ve bakır, alüminyum içerisinde iyi çözünme kabiliyetine sahip elementlerdir ve yüksek çökelme sertleşmesine sebep olurlar [37]. Aşırı katı doymuş çözeltiden ikinci fazların ayrışması işleminin karmaşık ve eş zamanlı bir dizi işlemlerden oluştuğu bilinmektedir. 7xxx serisi bir alaşımda gerçekleşen ayrışma olayı genellikle aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir [37,4,10,11];



GP bölgeleri yapı içerisinde elastik gerilmelere sebep olan elementçe zengin atom kümelerinin dizilmesiyle oluşmaktadır. Oluşumlarının dislokasyon hareketini engellemesi, iç gerilmelere sebep olur, bu şekilde malzemenin mukavemeti ilk duruma göre artmış olur. Malzemede mukavemet özellikleri GP bölgeleri ve  $\eta'$  fazının miktarıyla orantılı olup, oluşan fazların miktarları ise 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında magnezyum ve çinko elementlerinin miktarlarına bağlıdır [33]. GP bölgeleri, ana faz ile bağdaşık ve küresel yapıda genellikle doğal yaşlandırma ve düşük sıcaklıklarda yapılan yapay yaşlandırma işlemleri esnasında oluşmaktadır. Bunun yanında  $\eta'$  fazı yarı bağdaşık yapıda geçiş fazı ve  $\eta$  bağdaşık olmayan denge fazları ise yüksek sıcaklıklarda yapılan yapay yaşlandırma işlemleri esnasında oluşmaktadır [4,11,41]. Yaşlandırma işlemi esnasında oluşan fazlar çok küçük boyutlarda olduğundan sadece geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak net olarak görülebilmektedir.

### 3.3. Seramik Takviyeler

Seramik malzemeler, endüstride yüksek basma, aşınma, korozyon, sertlik ve ısı dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir [35]. Seramikler; yapı sektöründe, fırın ve ocak gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında, otomotiv sanayinde motor parçaları üretimlerinde ve birçok elektriksel ekipman üretiminde kullanılmaktadır [42]. Seramik malzemeler sahip oldukları bu özellikler ile endüstride doğrudan kullanıldıkları gibi, metallerle birlikte kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak dolaylı biçimde de kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde seramik malzeme kullanımı, mevcut ana yapının mukavemet özellikleri başta olmak üzere birçok malzemeye özgü özellikleri iyileştirmektedir. Kompozitlerde beklenen özelliklerin elde edilebilmesi ana yapı ile takviye elemanı olarak kullanılan malzeme arasında fiziksel ve kimyasal uyum olması gerekmektedir. Fiziksel olarak; kullanılan malzemeler arasında süneklik-gevreklik özellikleri ile genleşme katsayıları gibi özelliklerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Kimyasal olarak ise; ana yapı ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey ilişkisi doğru olarak belirlenmelidir [43]. Bu sebeple farklı bileşimde ve özellikte birçok seramik çeşidi olmasına rağmen kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak en fazla tercih edilen seramikler  $B_4C$ ,  $AlN$ ,  $SiC$  ve  $Al_2O_3$ 'tür. Kompozitlerde seramik kullanılmasının mukavemet artışına sebep olması iki farklı biçimde açıklanmaktadır. Birincisi; ana yapı üzerine gelen yükün seramik parçacıklar ile taşınması şeklinde, diğeri ise seramik parçacıklarının ana yapı üzerinde dislokasyon yoğunluğunu artırmasıyla malzemede mukavemet artışı şeklindedir [32].

#### 3.3.1. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür oldukça sert yapıda olmasından dolayı endüstride genellikle aşındırıcı olarak kullanılmaktadır.  $SiC$ , doğada mevcut haliyle bulunmazken, silisyum dioksit ( $SiO_2$ ) ve kokun belli oranlarda birleşmesiyle üretilmektedir. Kübik  $\beta$  fazı ve hekzagonal  $\alpha$  fazı olmak üzere iki farklı kristal yapıda bulunmaktadır [44].



Silisyum karbür, metal esaslı kompozitlerde takviye elemanı olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Diğer takviye elemanları ile karşılaştırıldığında daha iyi mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlarken, ekonomik olarak da kullanımı daha uygundur. SiC, kompozitlerde rijitliğin, mukavemet özelliklerinin, aşınma dayanımının ve yorulma dayanımının artmasında önemli rol oynamaktadır [32].

### **3.3.2. Alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

Oksit yapıdaki seramik çeşitlerinden biri olan alümina, endüstride genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. Kimyasal olarak oldukça kararlı bir yapıda bulunan alüminanın, diğer malzemelerle tepkimeye girme eğilimi düşüktür [32]. Kırılma tokluğu, dayanımı ve rijitliği diğer takviye elemanları kadar iyi olmamasına rağmen, ekonomik olması ve orta seviyede mekanik dayanım ve aşınma dayanımı sağladığı için kompozit üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir [43].

### **3.4. Seramik Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitler**

Metal esaslı kompozitler arasında ana yapı malzemesi olarak en fazla tercih edilen alüminyum ve alaşımları, günümüzde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bunun temel sebepleri; alüminyumun iyi ıslatabilirlik ve takviye elemanı ile kuvvetli ara yüzey bağları oluşturabilme kabiliyetlerinin yüksek olmasıdır [45]. Bunların yanında dayanım/özgül ağırlık oranının yüksek olması, iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olması, korozyon dayanımının ve işlenebilirliğinin iyi olması alüminyum ve alaşımlarının diğer metallere oranla daha fazla kullanılmasının nedenleri arasında sayılabilir.

Alüminyum esaslı kompozitler konusunda devam eden çalışmaların büyük çoğunluğu; kolay uygulanabilir ve iyi özellikler elde edilebildiği için parçacık takviyeli alüminyum esaslı kompozitler ile ilgili olmaktadır. Saf metaller özelliklerinin alaşımlara göre daha düşük seviyelerde oldukları için ana yapı olarak

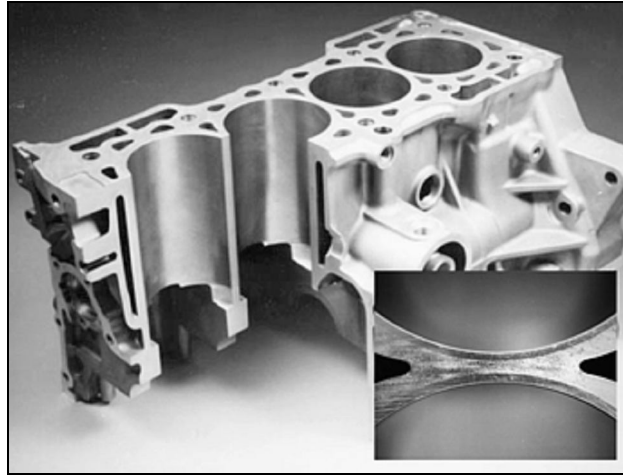
fazla tercih edilmemektedir. Geçmiş yıllardan beri ana yapı olarak en fazla kullanılan alüminyum alaşımları üç grupta toplanabilir [32].

- 6061, 2124 ve 7075 gibi işlem görmüş ticari alaşımlar ve alüminyum-silisyum ile alüminyum-magnezyum gibi döküm alaşımlar
- 8090 gibi hafif alüminyum-lityum alaşımlar
- Alüminyum-demir ile alüminyum-skandiyum gibi yüksek sıcaklık alaşımları

Alüminyum esaslı kompozitler konusunda daha yeni malzeme türlerinin bulunmasına yönelik araştırmalar yapmaktan ziyade, mevcut kompozit türlerinin çeşitli durumlardaki davranışlarının araştırılması konusunda çalışmalar yürütülmektedir. Yapılan araştırmalar, alüminyum esaslı kompozitler arasında ana yapı malzemesi olarak en iyi alaşımların işlem görmüş ticari alaşımlar oldukları belirlenmiştir [32].

Alüminyum esaslı kompozitler de diğer birçok MEK gibi genellikle seramik malzemeler ile takviye edilmiştir. Alüminyum SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>C, cam ve karbon arasında iyi ara yüzey oluşumu gözlemlenir. Son yıllarda ise bu malzemelere ilave olarak metalik camlar takviye elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır [46]. Alüminyum alaşımı esaslı ve seramik takviyeli kompozit malzemeler özellikle otomotiv endüstrisi ile uzay ve havacılık sanayi için son derece önemli malzemelerdir. Gelişen kompozit üretimleri ile daha önceleri kullanılan geleneksel malzemeler yerlerini bu malzemelere bırakmaktadır. Otomotiv endüstrisinde özellikle motor parçaları imalatında alüminyum esaslı kompozitler büyük bir ivme kazanmışlardır. 1983 yılı bu noktada dönüm noktası olmuştur. Toyota Motor, ürettiği dizel motorlarda ilk defa seramik takviyeli alüminyum esaslı kompozitten imal ettiği pistonları kullanmaya başlamıştır. Takviye olarak kesilmiş elyaf şeklinde seramik takviye elemanının kullanıldığı pistonlarda aşınma dayanımı ve ısıl yorulma dayanımı üst seviyelere çıkarılmıştır [47].

Geçmiş zamanlarda, yüksek dayanım ve düşük maliyetinden dolayı dökme demir çeşitleri motor blok üretiminde yaygın olarak kullanılmakta iken; son yıllarda çevre koşulları, performans, yakıt tasarrufu ve ekonomik sebeplerden dolayı demir dışı metallerin alaşım ve kompozitleri kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan en yaygın malzeme olarak alüminyum alaşımları ve magnezyum alaşımları göze çarpmaktadır [48,49]. Otomotiv endüstrisinde diğer motor parçalarına yataklık eden motor blok üretiminde genellikle alümina takviyeli alüminyum alaşımı esaslı kompozitler kullanılmaktadır [50,51]. Böylece dökme demirden üretilen motor bloklarına oranla %20 daha düşük ağırlık değerleri elde edilmiş olur [51]. Alüminyum alaşımı esaslı kompozitten üretilen dört silindirli bir motor bloğu ve silindir gömleğin görünümü Şekil 3.3'de verilmiştir. Benzer şekilde motor kapağı da alüminyum esaslı kompozitlerden üretilmeye başlanarak, bu sayede hem daha düşük ağırlık elde edilirken hem de daha iyi motor soğutması sağlanmaktadır.



Şekil 3.8 Alüminyum esaslı kompozitten üretilen motor blok ve silindir gömlek [32]

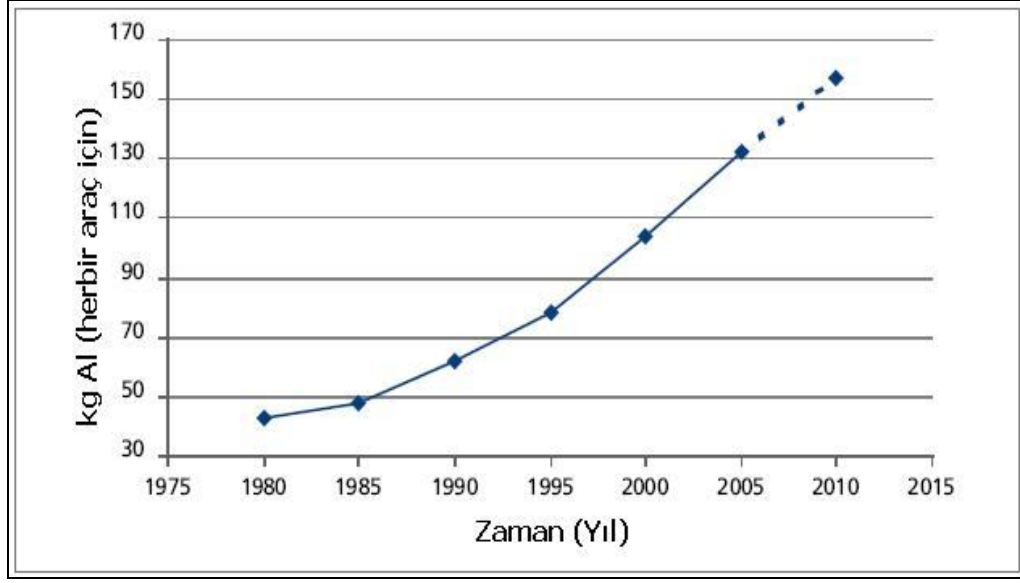
Silindir gömlekler de genellikle motor bloklarıyla benzer şekilde dökme demir kullanılarak üretilmekte iken son yıllarda daha hafif ve daha iyi özelliklere sahip Al-MEK ile üretilmeye başlanmıştır [32]. Silindir gömleklerin üretiminde hacimsel olarak %10–20 SiC ve/veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerin dökme demirlere oranla

çok daha iyi mekanik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Bunun yanında karbon ve  $Al_2O_3$  (alümina) takviyeli karma kompozitler de silindir gömlek üretiminde kullanılabilir [32]. Alüminyum esaslı kompozitler otomotiv parçalarından motor blok, biyel kolu, piston, silindir gömlek, supap, karbüratör, fren diskleri, fren balataları, kampanalar, kardan mili ve bazı dişliler gibi özellikle aşınma davranışının önemli olduğu durumlarda tercih edilmektedir [52,13]. Otomotiv endüstrisinde, alüminyum esaslı kompozitlerden üretilen fren sisteminin bazı parçaları Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.9 Alüminyum esaslı kompozitler ile üretilen fren sistemi parçaları [32]

Fakat son yıllarda yakıt tüketimi ve karbondioksit salımı gibi ekonomik ve çevresel faktörlerin daha fazla önem kazanmasından dolayı otomotiv endüstrisinde daha fazla Al-MEK kullanılmaya çalışılmaktadır. Avrupa Alüminyum Birliğinin 2005 yılı verilerine göre standart bir araçta yaklaşık 132 kg alüminyum ve/veya Al-MEK kullanılmaktadır [53].



Şekil 3.10 Yıllara göre değişen bir araç için kullanılan ortalama Al miktarı [53]

Otomotiv endüstrisinde alüminyum ve Al-MEK büyüyen bir pazar payına sahiptir. Yeni nesil otomobillerde çevre koşulları, yakıt ekonomisi ve performans gibi koşulların her geçen gün daha da önem kazanmasına paralel olarak, Al-MEK ile üretilen parça sayısının artış göstermesi beklenmektedir. Avrupa’da üretilen her bir araç için kullanılan ortalama Al ve Al-MEK’in yıllara göre değişimi Şekil 3.5’de belirtilmiştir. 1980’li yıllarda minimum seviyede olan Al ve Al-MEK kullanımı ilerleyen yıllarda büyük bir artış göstererek yirmi beş yılda yaklaşık dört katına çıkmıştır. Şekil 3.5’de belirtilen değerlere paralel olarak otomotiv sektöründe kullanılan toplam Al ve Al-MEK miktarı 1999 yılında 1,57 milyon kg iken, 2004 yılında bu değer 2,03 milyon kg’a çıkmıştır. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda 2010 yılında toplam tüketimin yaklaşık 3 milyon kg olması beklenmektedir [54].

#### 4. TOZ METALURJİSİ

Tozların bir dizi işlemde geçirilerek yararlı ve kullanılabilir mühendislik malzemeleri haline dönüştüren malzeme bilimine toz metalurjisi adı verilmektedir [55]. Toz metalurjisi, bilinen en eski imalat yöntemlerinden biri olmakla beraber günümüzde parça imalatı noktasında giderek önem kazanmaktadır. Toz metalurjisinin diğer üretim yöntemlerine göre en belirgin üstünlükleri; bazı yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin geleneksel yöntemler yerine yalnız toz metalurjisi yöntemiyle üretilebiliyor olması, imalattan sonra ikincil işlemlere ihtiyaç duyulmaması, parça imalatında malzeme kullanımının %100'e yakın olması, alaşım ve kompozit malzeme imalatına imkân veriyor olması ve kendinden yağlamalı yataklar gibi özellikli parçaların yalnızca toz metalurjisi ile imal ediliyor olması şeklinde sıralanabilir [56].

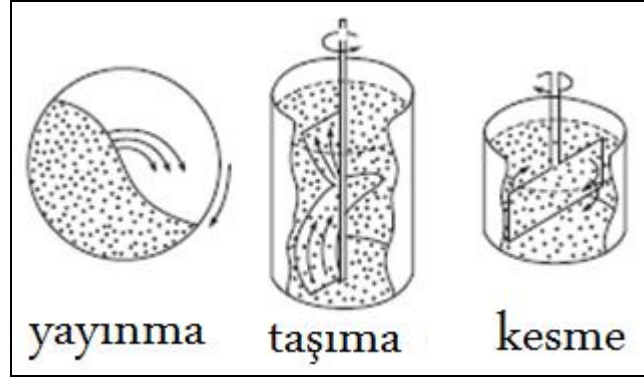
Toz metalurjisi yöntemi günümüzde sahip olduğu üstünlükler ile otomotiv endüstrisi başta olmak üzere uzay ve havacılık sanayi ile diğer birçok mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [57]. Kesici takım uçları, yataklar, filtreler, kilit parçaları, dişliler, kamlar ve segmanlar gibi motor parçaları toz metalurjisi yöntemiyle rahatlıkla üretilebilmektedir [58].

Toz metalurjisi hassas boyutlarda ve karmaşık geometrilerde seri parça imalatına imkân verirken, aynı zamanda ikincil imalat işlemlerine gerek bırakmayan bir üretim yöntemidir. Bu özellikleri ile toz metalurjisi yöntemi diğer geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında daha düşük maliyetlerde üretime imkân tanımaktadır. Toz metalurjisi yöntemi, metal alaşımı tozlarından parça üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca metal alaşım tozlarına farklı özelliklerde malzeme tozları ilave edilerek kompozit malzemelerden parça üretimi de başarıyla gerçekleştirilebilmektedir.

Toz metalurjisi yöntemi birbirinden farklı üretim yöntemlerini bünyesinde bulundurmaktadır. Bu yöntemler arasında soğuk presleme, sıcak presleme, soğuk izostatik presleme, sıcak izostatik presleme, haddeleme ve toz enjeksiyon kalıplama gibi yöntemler sayılabilir. Yöntemlerde üretim genellikle tozların hazırlanması ve karıştırılması ile başlar, sıkıştırma işlemi ile devam eder ve son olarak da sinterleme denilen pişirme işlemi ile son bulur.

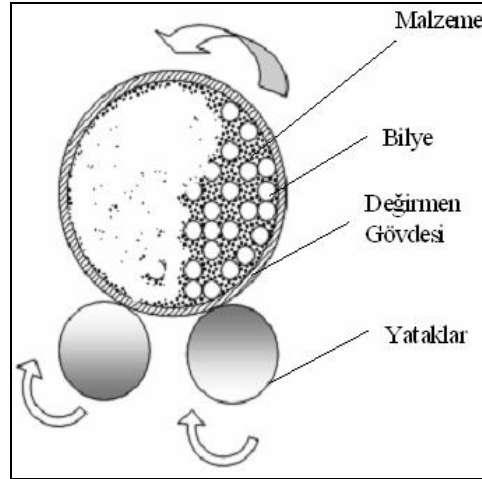
#### **4.1. Tozların Hazırlanması ve Karıştırılması**

Çeşitli toz üretim yöntemleri ile üretilen tozlar boyut analizi yapıldıktan sonra sıkıştırma ve sinterleme aşamaları için hazır hale gelmiş olur. Parça üretiminde kullanılacak tozlar, element tozları ise gerekli analiz ve ara işlemlerden sonra sıkıştırma safhası için kalıba konulurken, alaşım tozlarının homojen karışımın sağlanabilmesi için karıştırma üniteleri yardımıyla bir süre karıştırılmaları gerekmektedir. Toz metalurjisinde yayınma, konveksiyon ve kesme şeklinde üç farklı toz karıştırma mekanizması bulunmaktadır. Yayınma ile karışımında sabit hızda dönen silindir taze tozları ve tozlarda kesme düzlemlerini ortaya çıkarırken, böylece tozlar birbiri içerisinde karışmaya başlamış olur. Bu yöntemde karışım her parçacığın toz kütlesi içerisinde yapmış olduğu hareket ile gerçekleşmektedir. Taşıma ile karışım yönteminde karışım işlemi, tozlar hazne içerisinde bir noktadan bir başka noktaya taşınımı ile gerçekleşmektedir. Son olarak kesme ile karışım yönteminde ise sürekli ayrışma ve tozların kayma düzlemleri üzerinde akmaları ile karışım gerçekleşmiş olur [55]. Toz karıştırma mekanizmalarının genel görünümleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Toz karıştırma mekanizmaları [55]

Toz metalurjisi yönteminde karıştırma mekanizmaları farklı biçimlerde kullanan çok sayıda karıştırma yöntemi bulunsa da içlerinde en çok tercih edilenleri; tek eksenle karıştırma yapan bilyalı değirmen ve üç eksenle karıştırma yapan turbula tipi karıştırma yöntemleridir. Şekil 4.2’de bilyalı değirmen tipi karıştırıcının temsili görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.2 Bilyalı değirmen tipi karıştırma ünitesi [59]

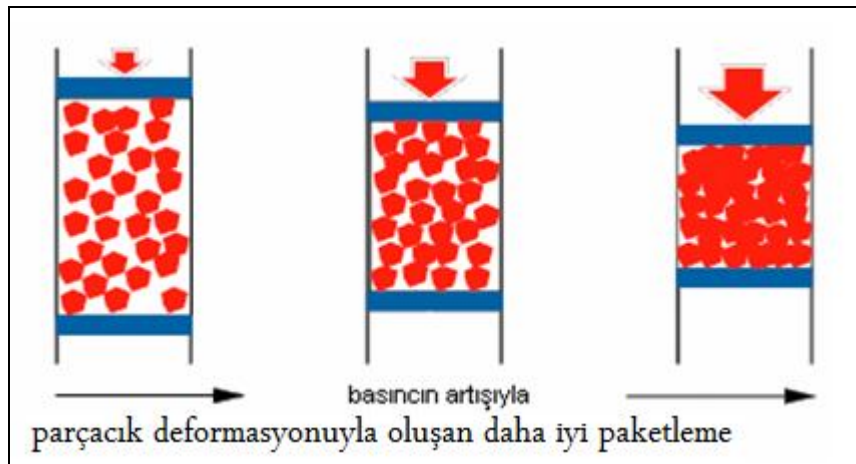
Karıştırma yöntemleri arasında en sağlıklı olanı; üç eksenle gerçekleştirilen karıştırma işlemi kabul edilirken, fakat pratikte en yaygın kullanılanı bilyalı değirmen tipi karıştırma yöntemidir. Bilyalı değirmen tipi karıştırma yöntemi



karıştırma yöntemini yanında mekanik alaşımlama amaçlıda kullanılabilir. Daha homojen bir karıştırma elde etmek için toz haznesine tozlarla beraber belli oranda bilyalar da ilave edilir. İlave edilen bilyeler tozlarla ve karıştırma haznesi ile tepkime vermeyecek şekilde seçilmektedir. Toz karıştırma aşamasında karıştırma parametreleri son derece önemlidir. Karıştırma esnasında tozlarda iş sertleşmesi, ufalanma ve boyutsal olarak ayrışmaların görülmesi sonraki süreçleri olumsuz etkilemektedir [55].

#### 4.2. Tozların Sıkıştırılması

Tozların sıkıştırılması işlemi üç aşamada incelenebilir. Birinci aşamada basıncın uygulanmaya başlamasıyla tozlar arasında yer değiştirme ve yeniden yerleşmeler gözlemlenir. İlk aşamada, toz tanelerinde bir takım ufak çaplı parçalanmalar ve kırılmalar gözlemlenmiş olsa da herhangi bir deformasyon söz konusu olmaz. Artan basınca paralel olarak, elastik ve plastik deformasyonların gözlemlendiği ikinci aşama başlar. Bu aşamada tozlar arasında kilitlemeler başlarken etkileşime bağlı olarak bağlar oluşabilir. Aynı zamanda toz taneleri arasındaki nokta teması bozulurken gözenekli yapı ortadan kaybolmaya başlar [60]. Şekil 4.3’de sırasıyla sıkıştırma aşamaları verilmektedir.



Şekil 4.3 Sıkıştırma aşamaları [60]

Sıkışmanın son aşamasında parçacık kırılması hızlanır ve plastik deformasyon sebebiyle boşluklar dolmaya başlar ve temas sayısında artış gözlenir. Bu sayede toz taneleri deformasyon sertleşmesine uğrar ve oluşan deformasyon sırasında meydana gelen soğuk kaynak sıkıştırma sonrası ham mukavemetin artmasına sebep olur [60].

Tozun şekli ve boyutu, sıkıştırma işleminin her anında önemli rol oynayan parametrelerdir. Tozların birbiri üzerinden ve sıkıştırma işleminin yapılacağı kalıbın duvarları üzerinde kayması, sıkıştırmanın ilerleyen aşamalarında boşlukların doldurulması ve tozların birbirine tutunması, doğrudan tozların şekline ve boyutuna bağlıdır. Üretim yöntemlerine göre karmaşık, süngerimsi, düzensiz, levha, küresel, dallı ve keskin köşeli şekillerde olabilir. Küresel şekilli tozlar diğer toz şekillerine göre daha iyi akıcılık ve paketlenme özelliği göstermektedir. Toz boyutları da en az toz şekilleri kadar sıkıştırma işleminde önemli rol oynamaktadır. Toz boyutu olarak ise daha iyi özelliklerin sağlanması için küçük boyutlarda tozlar tercih edilmektedir.

Sıkıştırma işlemi sonunda parça da bazı hataların oluşması söz konusu olabilir. Katmanlaşma ve geri yaylanma en fazla rastlanan hatalar olarak dikkat çekmektedir. Katmanlaşma, sıkıştırma basıncı ile aynı yönde oluşan çatlakların oluşturduğu kusurlar olarak tanımlanırken, geri yaylanma ise kalıp içerisinde sıkıştırılan malzemenin kalıptan çıkarılması ile boyutlarında meydana gelen değişme ve buna bağlı oluşan deformasyonlar olarak tanımlanmaktadır.

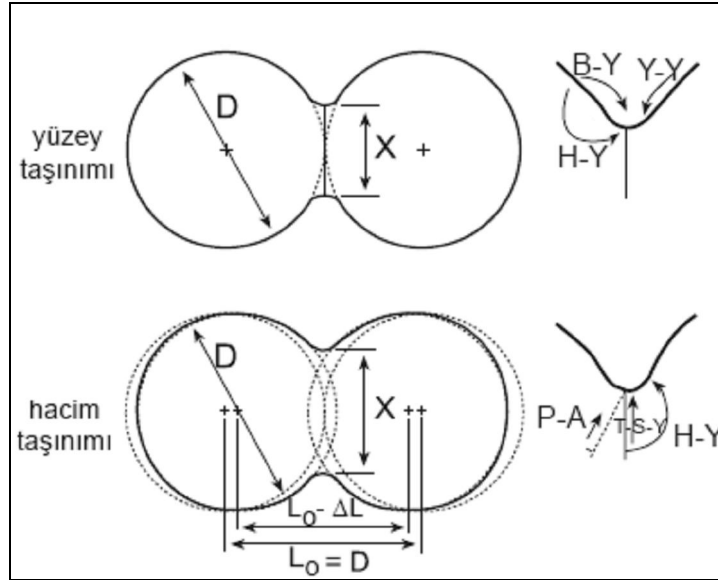
### **4.3. Tozların Sinterlenmesi**

Sıkıştırma sonrası birbiri ile yakın temas halinde olan toz taneleri arasında yüksek sıcaklık etkisi ile atom hareketleri oluşur ve bu hareketlere bağlı olarak taneler arasında kimyasal bağlar kurulur. Böylece tozlar arasındaki gözenekler yok olur ve tozlar tek bir yapı gibi davranmaya başlar. Ergime sıcaklığının altında gerçekleştirilen bu ısıtma işlemi sinterleme işlemi adı verilmektedir. Sinterleme sıcaklığı tek bileşenin bulunduğu durumlarda ergime sıcaklığının 2/3'ü veya 4/5'i

şeklinde belirlenirken, birden fazla bileşenin bulunduğu durumlarda ergime sıcaklığı en düşük olan elemente göre belirlenmektedir [59]. Tozların sinterlenmesi işlemi katı hal sinterleme ve sıvı faz sinterleme olmak üzere iki farklı yolla gerçekleşmektedir.

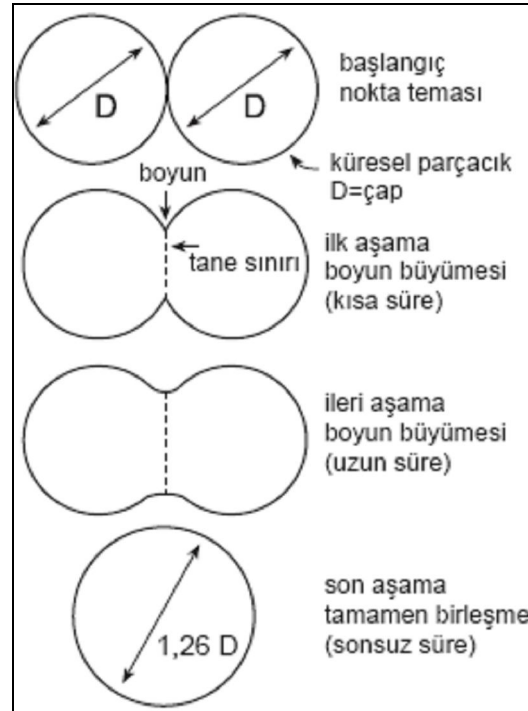
#### 4.3.1. Katı Hal Sinterleme İşlemi ve Aşamaları

Katı hal sinterlemesi, ergime sıcaklığının altında taneler arasında atomik düzeyde kütle transferi ile bağ oluşturma işlemi olarak tanımlanmaktadır [60]. Gerçekleşen kütle transferi, yüzey taşınım ve hacim taşınım olmak üzere iki mekanizma ile gerçekleşmektedir. İki taşınım mekanizması arasındaki fark taneler arasındaki boyun bölgesinin nereden doldurulmaya başlandığı ile ilgilidir. Yüzey taşınım mekanizmasında boyun bölgesi gözenek yüzeylerinden başlanarak doldurulurken, hacim taşınım mekanizmasında ise tane sınırlarındaki atomlar kullanılarak doldurma gerçekleştirilir [55]. Taşınım mekanizmalarının küresel yapıdaki tozlar arasında nasıl gerçekleştiği Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Yüzey ve hacim taşınım mekanizmalarının çalışma prensibi [55]

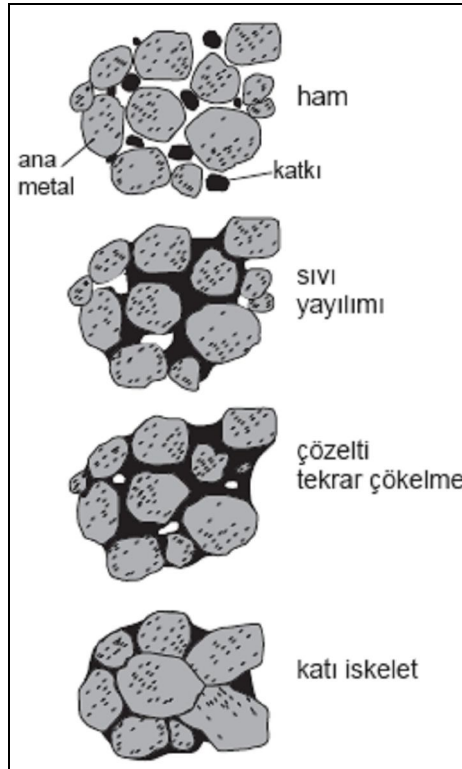
Katı hal sinterleme işlemi ilk, ileri ve son aşama olmak üzere üç kademe gerçekleşmektedir. Başlangıç aşaması olarak da bilinen ilk aşamada, tozlar nokta teması halindedir ve yüksek kılcal gerilmelere bağlı olarak taşınım miktarı fazladır. Boyun oluşumu bu aşamada başlar. İleri aşama; gözenek yuvarlaklaşması, tane büyümesi ve yoğunluk artışının görüldüğü aşamadır. Malzemenin özellikleri bu aşamada gelişmeye başlar ve malzemede mukavemet artışı görülür. Gözenekler tane sınırlarında girintili çıkıntılı biçimde bulunmaktadır. Yapıdaki gözeneklerin sayısı ve yapısı sinterleme hızını etkiler. Son aşamada ise gözenekler, kapalı ve küresel yapıdadır. Başlangıçtaki yüzey enerjisinin azalmasına bağlı olarak sinterleme hızı oldukça düşüktür. Toz taneleri oluşan boyunların ortandan kalkması ile tek ve büyük yapıda görülür [55]. Küresel tozlar arasında gerçekleşen katı hal sinterlemesinin aşamaları Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Katı hal sinterleme aşamaları [55]

### 4.3.2. Sıvı Faz Sinterlemesi

Sıvı faz sinterlemesi, sinterlemenin alt basamaklarından birisi olup ısıl çevrimin ilerleyen aşamalarında katı parçacıkların sıvı bir faz içerisinde yer alması esasına dayanır. Tanelerin sıvı bir faz ile temas halinde olması, taneler arası taşınım hızını yüzlerce kat artırmaktadır. Sıvı fazın etkisiyle artan taşınım hızı ve kılcal kuvvetlerin etkisiyle hızlı katılma ve sinterlenme gerçekleşir [56]. Burada önemli olan nokta tozların üretimi esnasında yüzeylerinin oksit tabakası ile kaplanmasına bağlı olarak sinterleme işleminin gerçekleşememe ihtimalinin bulunmasıdır. Sinterleme işleminin daha iyi ve daha hızlı gerçekleşmesi için yüzeydeki oksit tabakasının giderilmesi gerekmektedir [37]. Sıvı faz sinterlemesinde tozların tamamen ergimesine gerek kalmadan istenen geometride parça üretimi mümkün olmaktadır. Bu sebepten dolayı ticari üretimlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıvı faz sinterlemesinin aşamaları şematik olarak Şekil 4.6'da verilmiştir.



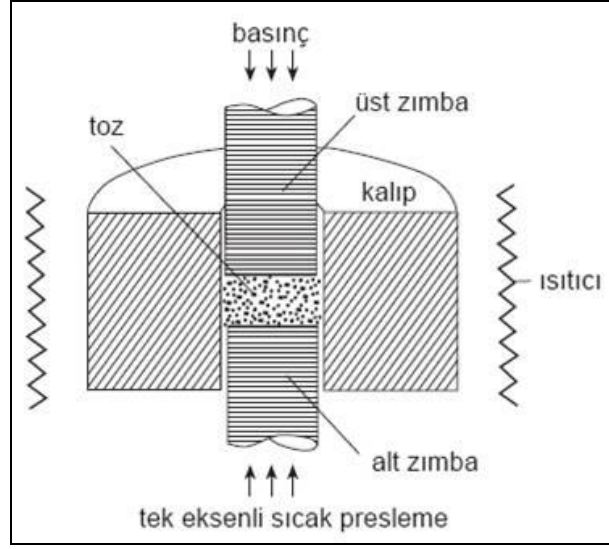
Şekil 4.6 Sıvı faz sinterlemesinin şematik gösterimi [55]

Sıvı faz sinterlemede ortamda sıvı faz oluşana kadar geçen sürede taneler arasında katı hal sinterlemesi ile bağlar oluşur. Sıvı fazın oluşması ile taneler yeniden yerleşmeye başlarken yoğunluk, ıslatma miktarının artmasına bağlı olarak artış gösterir. Sıvı faz, daha önce taneler arasında oluşan mekanik bağları ortadan kaldırır ve yeniden düzenlenmeyi sağlar. Ayrıca çökeltme olarak bilinen aşamada katı parçacıkların taşıyıcısı olarak görev yapar. Sıvı içinde çözünen katı parçacıklar, sıvı içinden yayınır ve daha büyük yapıdaki katı tanelerin üzerine çöker. Çökelmelerle beraber tane sayısı azalırken taneler büyümeye başlar, büyüyen taneler birbirlerine temas ettiği noktalarda kararlı boyunlar oluşur, böylece katı iskeletin oluşumu tamamlanmış olur [55,62].

#### **4.3.3. Sıcak Presleme Yöntemi**

Tam yoğunluk işlemleri olarak da bilinen üretim yöntemlerinden sıcak presleme yöntemi, hazırlanan tozların bir kalıp içerisinde eş zamanlı olarak sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinin uygulanmasıyla gerçekleşen parça imalat yöntemidir. Sıcak presleme yöntemi ile üretilen parçalarda, sıkıştırma ve sinterlemenin aynı anda gerçekleşmesine bağlı olarak parça yoğunluğu hesaplanan kuramsal yoğunluğa oldukça yakındır. Yöntemde yoğunluk, mukavemet ve yüzey pürüzlülüğü gibi parça özelliklerini belirleyen iki temel parametre; basınç ve sıcaklıktır. Yüksek sıcaklık ve basınç altında oluşacak oksitlenmeden sıcak tozları korumak için kontrollü bir atmosfere ihtiyaç vardır. Kontrollü atmosfer içinde ortamda nitrojen, hidrojen, azot veya bu gazların karışımları kullanılmaktadır.

Sıcak preslemede sıkıştırma işlemi, ısıtma işleminin uygulandığı bir fırın içinde, tek eksen boyunca tek veya iki hareketli zımba yardımıyla gerçekleştirilir. Şekil 4.7'de çift yönlü sıkıştırma yapabilen sıcak presleme yöntemi gösterilmektedir.

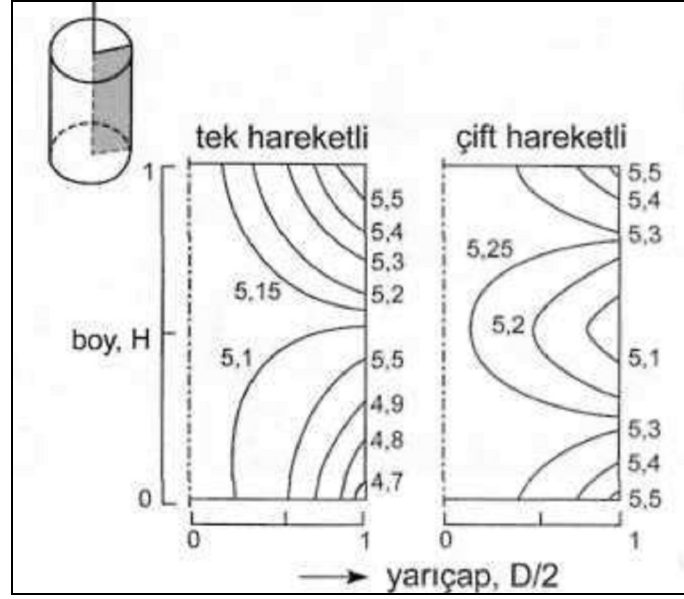


Şekil 4.7 Çift hareketli zimba yardımıyla sıkıştırma yapabilen sıcak presleme yöntemi [55]

Çift yönlü sıkıştırmanın olduğu sistemlerde tek yönlü sıkıştırılmalı sistemlere göre daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılmaktadır [61]. Tek yönlü sistemlerde zımbanın hareketi, tozlar arasında ve tozlarla kalıp duvarları arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan düzensiz basınç dağılımı, yoğunluk dağılımında düzensizliğe neden olmaktadır. Bu nedenle üretilen parçanın kalıp duvarlarına yakın bölgelerinde ve zimba ile temas eden yüzeye yakın bölgelerde daha yüksek yoğunluk değerleri elde edilmektedir. Tek yönlü ve çift yönlü sıkıştırmanın bulunduğu sistemler ile üretilen parçanın dikey kesitinde oluşan yoğunluk dağılımı Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Her iki yöntemde de yağlayıcı kullanılması sürtünme kuvvetlerini düşüreceği için mevcut yoğunluk değerlerinin yükselmesine sebep olacaktır.

Parçanın yoğunluk değerleri üzerinde etkili olan bir başka faktör ise kullanılan tozların boyutlarıdır. Toz boyutu, sıkıştırılabilirlik üzerinde önemli etkiye sahiptir. Küçük boyutlardaki tozlar yüksek yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle, yüksek sürtünme kuvvetlerinin oluşmasına sebep olurlar. Bu sürtünme kuvvetlerinden dolayı daha yüksek sıkıştırma basınçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sıkıştırılan tozun boyutu küçüldükçe ulaşılacak ham yoğunluk miktarlarında azalma gözlemlenir. Örneğin

3  $\mu\text{m}$  boyutunda tozlar %84 ham yoğunluğa ulaşırken, 20  $\mu\text{m}$  boyutunda tozlar ise %92 ham yoğunluğa ulaşabilmektedir [55]. Bu sebeple toz boyutları, parçaların yoğunluk analizleri yapılırken göz önünde bulundurulması gereken faktörlerin başında gelmektedir.



Şekil 4.8 Parça kesitinde oluşan yoğunluk dağılımları [55]

Daha homojen yoğunluk dağılımı ve buna bağlı olarak daha iyi mukavemet özellikleri elde edilebilmesi için tek yönde sıkıştırma değil, her yönde sıkıştırmanın olduğu izostatik sıkıştırma yöntemi tercih edilmelidir.



## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. Malzeme

Bu çalışmada piyasadan temin edilen %99,9 saflıkta ve ortalama 20 µm altı boyutlarda metal ve seramik tozları kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerde ana yapı, ağırlıkça Al, %5 Zn, %3,5 Cu, %2,5 Mg oranlarında bileşime sahip 7xxx serisi Al alaşımından oluşurken, takviye elemanı ise farklı oranlarda parçacık şeklinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC seramiklerinden oluşmaktadır. Kompozitler, aynı Al alaşımına sahip ana yapıda fakat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC olmak üzere üç farklı takviye yapısına sahip şekilde üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin bir kısmı her iki seramik takviyesini içeren karma kompozitlerdir. Tek çeşit seramik içeren kompozit numuneler %5, %10 ve %15 takviye oranlarında, karma yapıda olan kompozitler ise toplam takviye oranı %20 olacak şekilde hazırlanmıştır. Karma kompozitlerde takviye bileşimleri; %0 SiC-%20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %5 SiC-%15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %10 SiC-%10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %15 SiC-%5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %20 SiC-%0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olmak üzere beş farklı biçimde hazırlanmıştır. Bir tanesi takviye elemanının kullanılmadığı alaşım olmak üzere, farklı takviye oranlarında toplamda on iki numune bileşiminin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Ana yapı ile aynı bileşimde Al alaşımı numunelerin üretilmesiyle seramik takviyesinin alaşım üzerinde oluşturacağı katkı, karşılaştırılmalı olarak daha iyi incelenebilecektir. Üretilen deney numunelerinin kodlaması ve karşılık gelen bileşimleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Kodlamada belirtilen S harfi; SiC takviyesini, A harfi; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyesini ifade ederken, sayısal değerler ise numunelerde kullanılan takviye oranlarının ağırlıkça oranlarını ifade etmektedir.

Çizelge 5.1 Üretimi yapılan deney numunelerinin takviye bileşimi

Kodlama	SiC (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
S0A0	0	0
S0A5	0	5
S0A10	0	10
S0A15	0	15
S0A20	0	20
S5A0	5	0
S10A0	10	0
S15A0	15	0
S20A0	20	0
S5A15	5	15
S10A10	10	10
S15A5	15	5

## 5.2. Tozların Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan tozların boyutları ve boyut dağılımları, Malver Mastersizer lazer toz boyut ölçüm cihazı kullanılarak belirlendikten sonra ana yapıyı oluşturan metal tozları ile takviye elemanı olarak kullanılan seramik tozları çeşitli oranlarda karıştırılmıştır. Karıştırma haznesine toplam toz miktarıyla aynı hacme sahip mevcut karışım ile tepkime vermeyen zirkonyum oksit bilyeler ilave edilmiştir. Tozların karıştırılmasında bilyalı değirmen tipi karıştırma ünitesi kullanılmıştır.

İstenen bileşimlerde hazırlanan tozlar, toplam hacmin 2,5 katı büyüklükte bir toz haznesinde 18,5 Hz frekansta 2 saat süreyle karıştırma işlemine tabi tutulurken, tüm karışımlar için aynı karıştırma parametreleri kullanılmıştır. Karıştırma

parametrelerinden devir hızı, karıştırma haznesinin çevre uzunluğu göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu noktada merkezkaç kuvvetinin oluşturacağı etki göz önünde bulundurulmuş olmaktadır.

### **5.3. Sıcak Presleme**

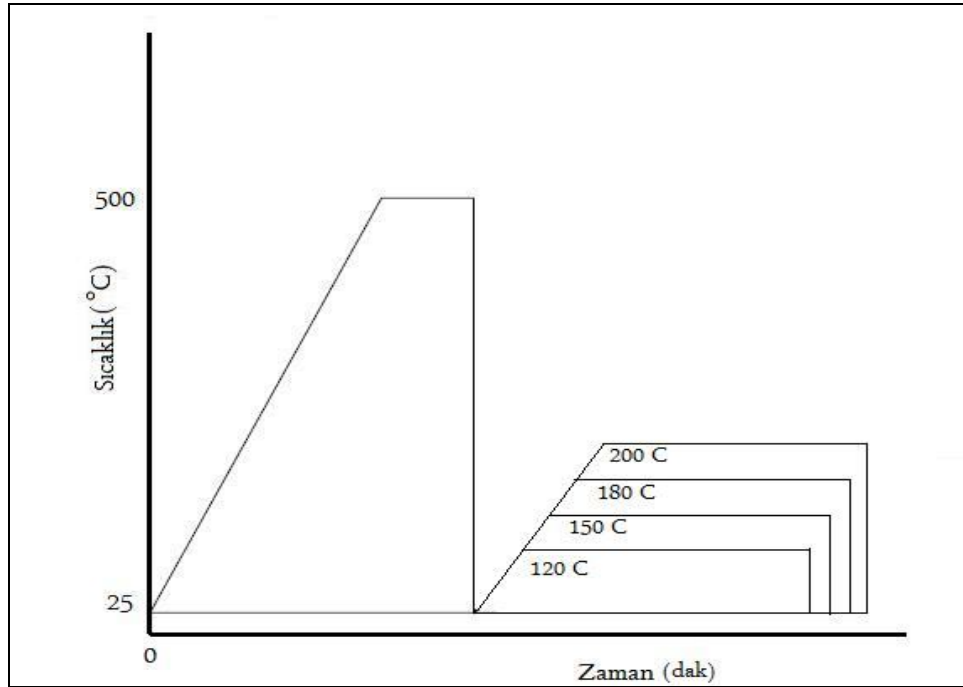
Bu çalışmada numunelerin üretilmesi; sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinin aynı anda gerçekleştirildiği sıcak presleme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sıcak pres, sıkıştırma işlemini 15 ton kapasiteli hidrolik ünite yardımıyla yaparken, ısıtma işlemini ise kalıbın dört tarafından eşit miktarda ısı veren toplam 11 kW güç üreten elektrik dirençleri ile yapmaktadır. Hazırlanan toz karışımları, sıkıştırılmak ve sinterlenmek üzere 50 x 70 mm ebatlarında sıcak pres kalıbına konulmuştur. Tozlar kalıba konulmadan önce yapışmanın engellenmesi için kalıp duvarları ve numune ile temas eden yüzeyler molykote yağı ile yağlanmıştır. Sıkıştırma işlemi ortalama 25 MPa basınç altında, sinterleme işlemi ise 535°C'de 30 dakika beklenerek gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma ve sinterleme koşulları tüm numuneler için aynı alınarak, numune üretim aşaması tamamlanmıştır.

### **5.4. Yoğunluk Ölçümleri**

Üretilen numunelerde gözenek oluşumunu incelemek için, numune yoğunlukları belirlenmiştir. Numunelerin yoğunluklarının belirlenmesinde sıvıların kaldırma kuvveti kanunu kullanılmıştır. İçerisi oda sıcaklığında su ile dolu dereceli kaba konulan numunelerin yükselttikleri su miktarlarının optik görüntüleri alınmış, daha sonra bu görüntüler kullanılarak numunelerin hacimleri sayısal olarak belirlenmiştir. Son aşamada ise numunelerin ağırlıkları hassas terazide ölçülerek, yoğunluklar matematiksel olarak hesaplanmıştır.

## 5.5. Isıl İşlemler

Sıcak pres ile üretilen numunelere dayanım değerlerinin artırılması için çökeltme sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Çökeltme sertleştirmesinin ilk aşamasında; 500°C’de 30 dakika süreyle çözeltiye alma işlemi uygulanmış, bu işlemden hemen sonra ikinci aşama olan oda sıcaklığında su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise numunelere birbirlerinden bağımsız doğal ve yapay olmak üzere iki farklı yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Doğal yaşlandırma işlemi 60 gün süreyle 25°C’de oda sıcaklığında gerçekleştirilirken, yapay yaşlandırma işlemleri ise 120, 150, 180 ve 200°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta ortalama 300 dakika süreyle yağ banyosunda gerçekleştirilmiştir. Yapılan yapay yaşlandırma işlemleri sonunda numunelere oda sıcaklığında su verme işlemleri uygulanmıştır. Numunelere uygulanan yapay yaşlandırma işlemlerinin sıcaklık zaman grafiği üzerinde temsili gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Yapay yaşlandırma işlemlerinin temsili gösterimi

Yapılan yaşlandırma işlemleri sonrasında, mekanik testlerin yapılmasına kadar geçen sürede numunelerde oluşacak doğal yaşlanmayı engellemek için numuneler  $-7^{\circ}\text{C}$ 'de soğuk ortamda bekletilmiştir.

## **5.6. İç Yapıların İncelemesi**

Numunelere uygulanan ısı işlemler sonunda numuneler üzerinde değişik noktalardan ışık ve taramalı elektron mikroskopları yardımıyla farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler yardımıyla ana yapı içerisinde takviye elemanlarının dağılımı, çökeltilerin dağılımı ve bileşim oranları belirlenmiştir.

### **5.6.1. Işık Mikroskopunda Görüntüleme**

Üretilen numunelere ısı işlem uygulanmadan önce ve yapay yaşlandırma işlemleri sonunda numuneler üzerinden içyapı görüntüleri alınmıştır. Optik görüntülerin alınabilmesi için numune yüzeyleri sırasıyla 180, 240, 600 ve 1000'lik zımparalar yardımıyla düzgün hale getirilmiştir. Düzgün hale getirilen yüzeylere daha sonra sırasıyla 6, 3 ve 1  $\mu\text{m}$  elmas çözeltiler ile parlatma işlemleri uygulanmıştır. Parlatılan numune yüzeyleri üzerinden, dağlama işlemi yapılmadan, seramik takviyelerinin optik görüntüleri alınmıştır. Dağlayıcı olarak; içerisinde suda çözdürülmüş NaOH ile  $\text{NH}_3$  ve HF bileşikleri bulunan Modified Keller çözeltisi kullanılmıştır. Dağlama işlemlerinden sonra numuneler üzerinden ise 500 ve 1000 büyütme oranlarında ana yapı odaklı içyapı görüntüleri Olympus marka ışık mikroskobu kullanılarak alınmıştır.

### **5.6.2. SEM ve EDS Çalışmaları**

Çözeltiye alma ve su verme işlemleri ile yapılan yapay yaşlandırma işlemlerinden sonra seçilen numunelere zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanarak, numuneler üzerinden çökeltileri gözlemlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yüksek büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. Taramalı

elektron mikroskopunda; ikincil elektron yöntemi (SEI) ve geri saçılımlı elektron yöntemlerinden (BSI) her ikisi de kullanılmıştır. Buna ilave olarak yapının belirli bölgelerinden enerji dağıtımli spektrometre (EDS) analizleri alınmıştır. EDS analizleri ile tane içlerinde ve tane sınırlarında oluşan çökeltilerin bileşimlerindeki elementlerin ağırlıkça oranları belirlenmiştir.

## **5.7. Mekanik Testler**

Yaşlandırma işlemleri esnasında ve sonunda numunelere çeşitli mekanik testler yapılmıştır. Yaşlandırma işlemleri süresince belirli aralıklarla numunelere sertlik deneyleri yapılmış, daha sonra elde edilen sertlik deney sonuçları göz önünde bulundurularak, numunelerin belirlenen koşullardaki dayanım değerlerini belirlemek için numunelere üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır.

### **5.7.1. Sertlik Deneyleri**

Doğal ve yapay yaşlandırma işlemlerine maruz bırakılan numunelerin mekanik özelliklerinin yaşlanma sıcaklığı ve yaşlanma süresine bağılı olarak sergilediğini davranışı belirlemek amacıyla, belirli zaman dilimlerinde Wilson Wolpert marka sertlik cihazı kullanılarak sertlik ölçümleri alınmıştır. Numuneler üzerinden sertlik ölçümleri alınmadan önce numunelerin her iki yüzeyine parlatma işlemi uygulanmıştır. ASTM E10-84 [63] standardına göre yapılan sertlik deneylerinde 187,5 kg yük ve 2,5 mm çapında bilye ile gerçekleştirilen Brinell Sertlik yöntemi kullanılmıştır. Doğal yaşlandırma işlemi süresince her üç günde bir, yapay yaşlandırma işlemlerinde ise her yarım saatte bir sertlik ölçümleri alınmıştır. Her ölçüm aralığında alınan üç sertlik ölçümünün ortalama değeri alınarak, her bir numuneye ait ilgili yaşlandırma koşulu için sertlik eğrileri elde edilmiştir. Numunelerin yaşlanma süresine bağılı olarak en yüksek sertlik değerleri belirlenerek üç nokta eğme deneylerine geçilmiştir.

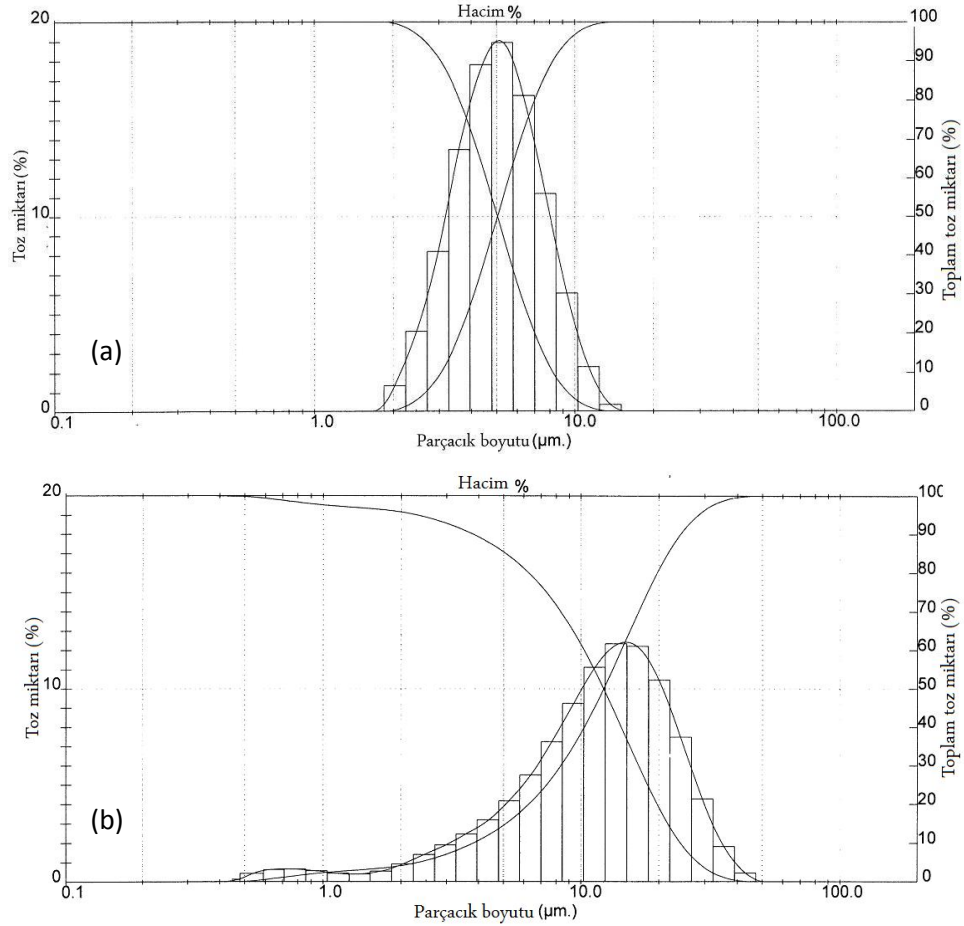
### 5.7.2. Üç Nokta Eğme Deneyleri

Sertlik deneyleri ile belirlenen yaşlanma süresine bağlı sertlik davranışları göz önünde bulundurularak, en yüksek sertlik değerinin elde edildiği süre sonunda yaşlandırılmış numunelerden birbiri ile eş geometride beş adet eğme deney numunesi hazırlanmıştır. Deney numuneleri yaklaşık 6 x 5 x 50 mm ebatlarında olacak şekilde hazırlanmıştır. Eğme deneyleri Instron marka çekme cihazında, iki destek arası mesafe 40 mm alınarak, 1 mm/dk ilerleme hızıyla ASTM B528-99 [64] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Her bir koşul için beş adet eğme deney numunesi test edilmiş ve elde edilen sonuçların standart sapması ve ortalaması hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonunda otuzdan daha büyük standart sapma değerlerine sahip numuneler için ilave deneyler yapılmıştır.

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

### 6.1. Toz Boyutları

Çalışmada numune üretim işlemlerine başlanılmadan önce kullanılacak tozların ortalama çapları ve boyut dağılımları Mastersizer marka lazer toz boyut ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Boyut analizleri sonucunda takviye elemanı olarak kullanılan SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik tozlarına ait boyut dağılım eğrileri Şekil 6.1’de verilmiştir.

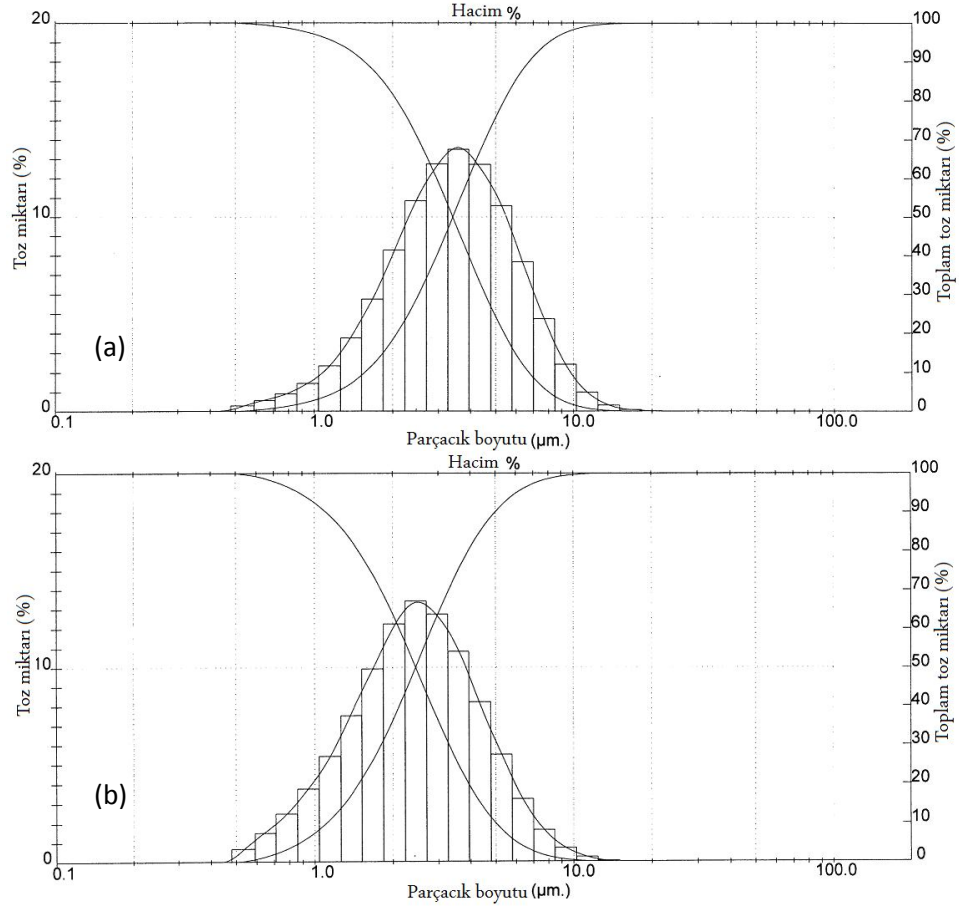


Şekil 6.1 Takviye elemanı olarak kullanılan seramik tozlarına ait toz boyut dağılımları;

a) SiC, b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



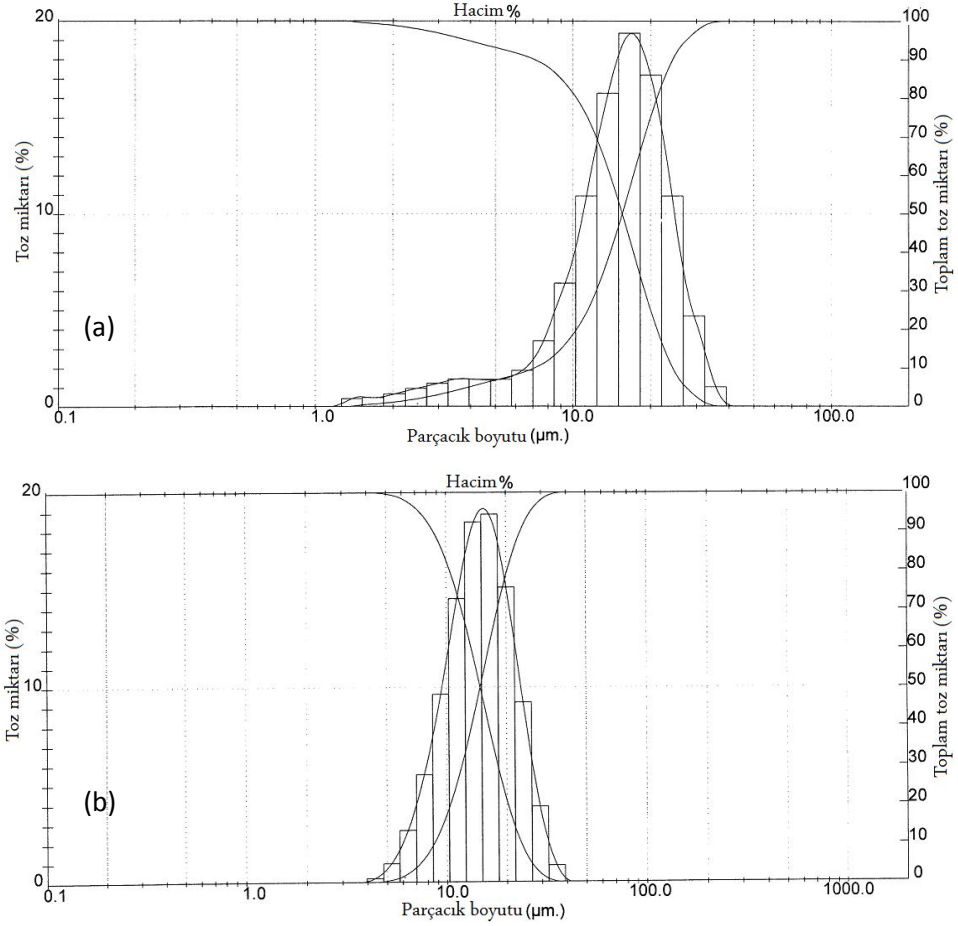
Şekil 6.1’de verilen seramik tozlarına ait boyut dağılımları incelendiğinde, SiC tozlarının ortalama boyutunun  $10\ \mu\text{m}$ ’nin altında olduğu ve büyük ölçüde normal boyut dağılımına sahip oldukları görülmektedir. Bunun yanında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozlarının, SiC tozlarına oranla daha büyük boyutlarda oldukları ve boyut dağılımlarının ise oldukça geniş aralıkta olduğu görülmektedir. Normal dağılımdan farklı bir eğriye sahip  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozları arasında,  $1\ \mu\text{m}$  ile  $40\ \mu\text{m}$  boyut aralığında toz tanelerinin olduğu yapılan analizlerle belirlenmiştir. Ana yapıyı oluşturan Al ve Zn metal tozlarına ait toz boyut dağılımları Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 Ana yapıyı oluşturan Al ve Zn metal tozlarına ait toz boyut dağılımları; a) Al, b) Zn

Alüminyum ve çinko metal tozlarının boyut dağılımlarının normal dağılım özelliği gösterdikleri belirlenmiştir. Boyut dağılım eğrileri olarak birbirlerine yakın davranış

sergileyen Al ve Zn metallere ait ortalama boyutlarının 3 µm seviyesinde oldukları görülmektedir. Ana yapıyı oluşturan diğer metal tozlarından Cu ve Mg tozlarına ait toz boyut dağılımları Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3 Ana yapıyı oluşturan Cu ve Mg metal tozlarına ait toz boyut dağılımları; a) Cu, b) Mg

Şekil 6.3’de verilen Cu ve Mg metallere ait toz boyutu dağılım eğrileri incelendiğinde, her iki tozun çalışmada kullanılan en yüksek toz boyutlarına sahip oldukları görülmektedir. Bakır ve magnezyum metal tozlarının ortalama boyutlarının 15 µm seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Bakırın, kullanılan diğer metal tozlarına oranla daha geniş toz boyut dağılımına sahip olduğu ve elde edilen eğrinin normal

dağılım eğrisinden farklı olduğu görülmektedir. Yapılan boyut analizleri ile belirlenen ortalama toz çapları Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Kullanılan tozlara ait ortalama çap ölçüleri

<b>Malzeme</b>	<b>Ortalama Toz Boyutu (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Al	3,41
Mg	14,75
Cu	15,55
Zn	2,45
SiC	5,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,24

Parçacık boyutu, toz metalurjisinin en önemli faktörlerinden biridir. Toz boyutu, tozların akış hızları ve paketlenmeleri üzerinde etkili olmasına bağlı olarak sinterleme sonrasında üretilen parçaların mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirmektedir. Tozlarda akış hızı, toz boyutu ile doğrudan ilgilidir. Tozlarda boyut küçüldükçe, yüzey alanı artacağı için tozlar arası sürtünme miktarı artar ve buna bağlı olarak akış hızında azalma gözlemlenir. Toz akış hızı ile ilişkili olarak kalıbın doldurulma yoğunluğu olarak tanımlanan görünür yoğunluk değerleri, geniş boyut dağılımına sahip tozlarda daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bunun sebebi olarak dağılım içerisinde bulunan küçük tozların büyük toz taneleri arasını dolduruyor olmalarıdır. Bunun dışında daha yüksek paketlenme özellikleri için küçük ve iri toz tanelerinden oluşan ikili toz bileşimleri hazırlanmaktadır [55].

Toz metalurjisinde toz boyutu kadar önemli olan bir diğer nokta ise tozların şekilleridir. Yüksek akış hızları ve paketlenme özelliği ile daha iyi yoğunluk değerleri için toz şekillerinin küresel olması istenir. Küresel yapıdaki tozlar birbiri üzerinden kolayca kayarken, pul şeklindeki tozlarda kayma olayı oldukça zor olmaktadır. Küresel tozların yüksek yerleşme kabiliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılması beklenir. Takviye

elemanı olarak kullanılan tozlardan; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlarının yaklaşık olarak küresel, SiC tozlarının ise keskin köşeli ve düzgün olmayan şekillerde olduğu içyapılar vasıtasıyla belirlenmiştir.

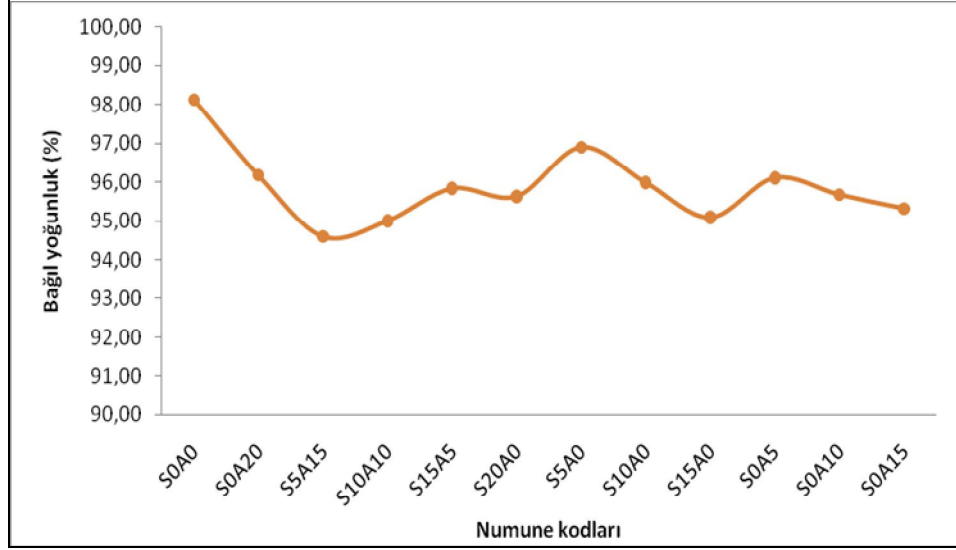
## 6.2. Yoğunluk Ölçümleri

Kompozit numunelerin üretilmesinden sonra numunelere herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmadan, sıvıların kaldırma kuvveti kullanılarak her bir numunenin deneysel yoğunluk değeri belirlenmiştir. Belirlenen deneysel yoğunluklar, daha önceden numune bileşimleri kullanılarak hesaplanan kuramsal yoğunluklar ile karşılaştırılmış ve her iki yoğunluk değeri kullanılarak numunelerin bağıl yoğunlukları belirlenmiştir. Numunelere ait kuramsal ve deneysel yoğunluklar Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Numunelere ait kuramsal ve deneysel yoğunluk değerleri

<b>Numune Kodu</b>	<b>Kuramsal Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Deneysel Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>
S0A0	2,833	2,780
S0A20	3,009	2,894
S5A15	2,983	2,822
S10A10	2,958	2,810
S15A5	2,932	2,810
S20A0	2,908	2,781
S5A0	2,852	2,764
S10A0	2,870	2,755
S15A0	2,888	2,746
S0A5	2,876	2,764
S0A10	2,919	2,793
S0A15	2,962	2,824

Numunelere ait deneysel yoğunluk ile kuramsal yoğunluğun birbirlerine göre yüzdesel durumunu gösteren bağıl yoğunluk değerleri Şekil 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.4 Numunelere ait bağıl yoğunluk değerleri

Elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, deneyler sonunda hiçbir numunede tam yoğunluğa ulaşamadığı görülmektedir. Bütün numunelerde aynı üretim koşulları kullanılmasına bağlı olarak, tam yoğunluğa ulaşılmamasında sıcaklık artış kontrolünün sağlanamaması bu durumun ortaya çıkmasında etkili olduğu düşünülebilir. Numunelerin bağıl yoğunlukları incelendiğinde en yüksek değere seramik takviyesi kullanılmadan alaşım olarak üretilen numunelerde rastlanmıştır. Takviye oranları ile bağıl yoğunluk değerleri arasında orana bağlı bir ilişki gözlemlenmemiştir. Fakat %5 - %10 - %15 takviye oranlarında silisyum karbür ve alümina takviyeli kompozitler ayrı olarak incelendiğinde artan takviye oranlarına bağlı olarak bağıl yoğunlukta azalma görülmektedir. Alaşım numuneden sonra en yüksek yoğunluk değerlerine, en düşük takviye oranına sahip numunelerde rastlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, artan takviye oranının numunelerde yoğunlaşma işlemini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

İyi sinterleme ve buna bağlı olarak iyi malzeme özellikleri için yapıda bulunan boşluk miktarı son derece önemlidir. Yapıda gözenek bulunması yoğunlaşma üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Yapıda boşluğın bulunma yerleri; yoğunlaşmanın hızlı, yavaş ve hatta olmaması noktasında belirleyici rol oynamaktadır. Sinterleme esnasında içyapı oluşumunun temel belirleyicisi sıcaklıktır. Sıcaklık artışı kontrol edilerek yapıda boşluk oluşumu da kontrol edilebilir. Yapıda boşluk tane sınırlarında ve tane içlerinde olmak üzere iki farklı yerde bulunabilir. Boşluklar tane sınırlarında olursa; yoğunlaşma olur, fakat boşluklar sinterleme esnasında tane sınırlarından tane içlerine kaymışsa; yoğunlaşma oluşumu engellenmiş olur [55]. Sıcaklığın kontrol edilmesinin en önemli olduğu aşama, boşlukların tane sınırlarından tane içlerine kaymaya başladığı zaman aralığıdır. Gerekli şartların sağlanması durumunda ince taneli ve boşluksuz yapı elde etmek mümkündür, diğer taraftan istenmeyen en kötü yapı ise iri taneli ve iri boşluklu yapıdır.

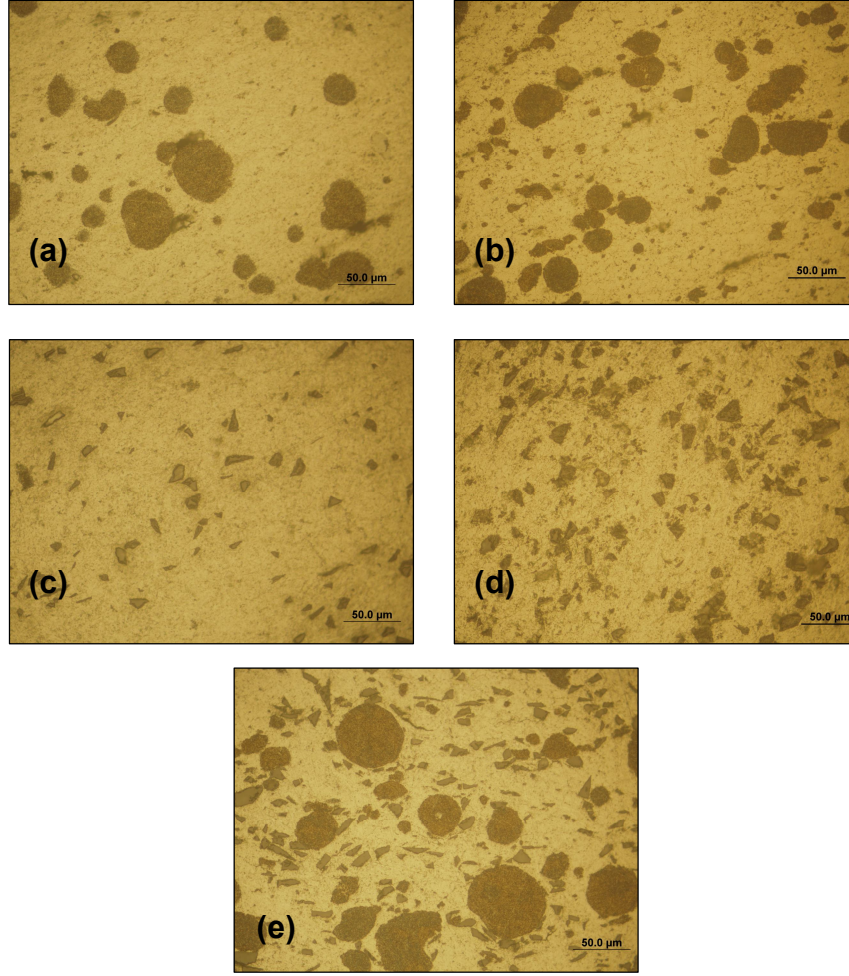
Seramik takviyeli numunelerdeki boşluk miktarı, alaşım numuneye oranla daha fazladır. Bunun sebebi olarak; takviye elemanları ile ana yapı ara yüzeylerinde tam anlamıyla bütünlük sağlanamaması nedeniyle oluşan ayrışmalar ve gerçekleşen bir takım tepkimelerin olması gösterilebilir. Bunun yanında alaşım ve kompozit numunelerin üretilmesi esnasında aynı üretim koşullarının kullanılmış olması da kompozit numunelerin daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olmalarında etkili olmuştur. Çünkü karışım tozların sinterlenmesinde yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılması için uzun sinterleme süreleri veya yüksek sinterleme sıcaklıklarının kullanılması gerekmektedir. İkili ve daha çoklu yapılarda bileşenlerin yayılım katsayıları arasında büyük farklar bulunuyorsa; oluşacak şişmelere bağlı olarak yapıda daha fazla boşluk oluşmaktadır [55]. Ayrıca, artan takviye oranı ile birlikte numunelerde boşluk bulunma eğilimi de artış göstermektedir.

### 6.3. İ Yapıların İncelemesi

Numunelerin üretim işlemleri tamamlandıktan sonra numuneler iç yapı incelemesi için hazır hale getirilmişlerdir. İç yapı incelemesi, optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılmak üzere iki farklı biçimde gerçekleştirilmiştir. Işık mikroskobu ile görüntüleme işlemi üretim aşamasından hemen sonra ve belirlenen yaşlandırma işlemlerinden sonra farklı büyütmelerde bütün numuneler için yapılırken, SEM görüntüleme işlemi ise çözeltiye alma ve su verme işlemleri ile belirlenen yaşlandırma işlemlerinden sonra yine belirlenen numuneler için yapılmıştır.

İç yapı incelemesinden önce gerçekleştirilen numune hazırlama aşamasında numune yüzeyleri sırasıyla P180, P240, P600 ve P1000 boyutlarında zımpara ile zımparalanmışlardır. Daha sonra 6 µm elmas çözeltiden başlanarak sırasıyla 3 µm ve 1 µm çözellilerle yüzeyler parlatılmıştır. Parlatma işlemlerinin ardından dağlama işleminden önce ve dağlama işleminden sonra optik görüntüleme işlemi yapılmıştır. Dağlama işleminden önce yapılan iç yapıların görüntülenmesi işleminde seramik parçacıkların geometrileri ve ana yapı içerisindeki dağılımları gözlemlenmiştir.

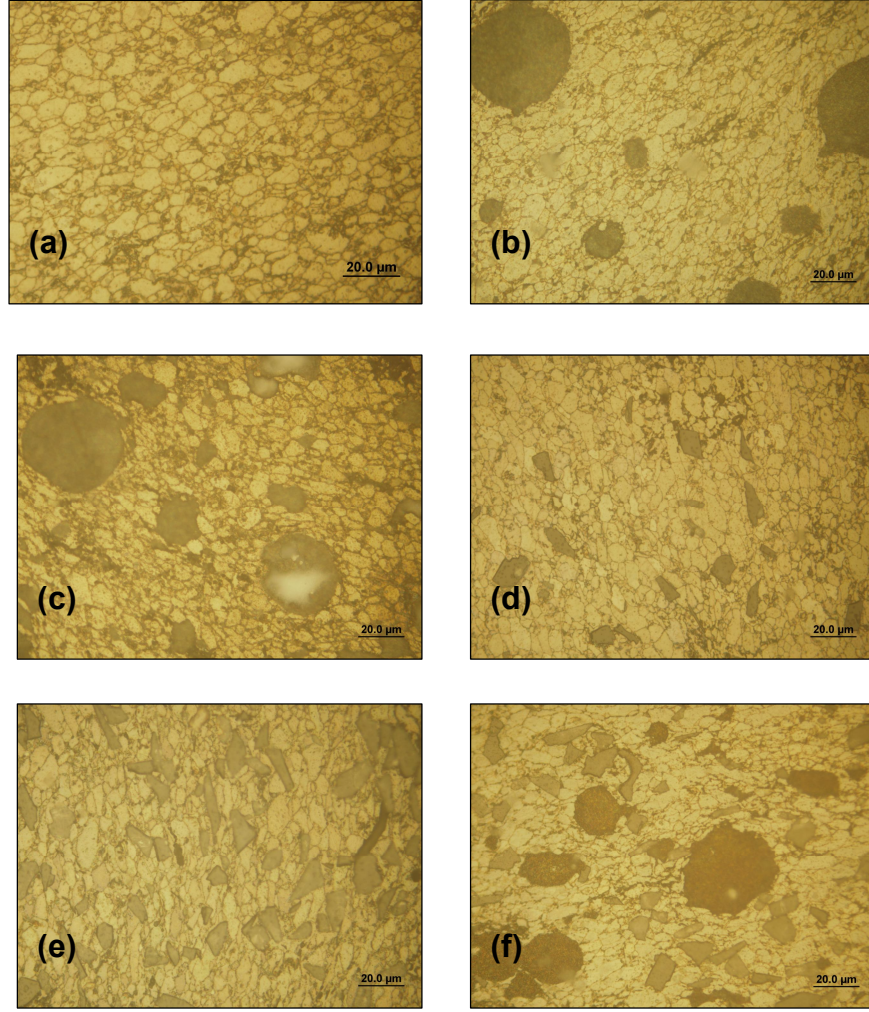
Dağlama işlemlerinden önce yapılan iç yapı görüntüleme çalışmalarında alınan bazı iç yapı görüntüleri Şekil 6.5’de verilmiştir. Yapılan gözlemlerde takviye elemanlarının ana yapıda büyük ölçüde homojen dağılım gösterdiği görülmüş ve kısmen gerçekleşen yığılmalar dışında belli bölgelerde yoğunlaşan seramik parçacık kümelenmesine rastlanmamıştır.



Şekil 6.5 Dağlama öncesi alınmış numunelere ait iç yapı görüntüleri (x500), a) %5  $Al_2O_3$ , b) %15  $Al_2O_3$ , c) %5 SiC, d) %15 SiC, e) %10 SiC-%10  $Al_2O_3$

Dağlama işlemi yapılmaksızın gerçekleştirilen optik görüntüleme işleminden sonra numune yüzeyleri belirlenen uygun bir dağlayıcı ile belirli sürelerde dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin yüzeylerinin dağlanmasında dağlayıcı olarak içerisinde; suda çözündürülmüş NaOH ile  $NH_3$  ve HF bileşiklerinin bulunduğu Modified Keller çözeltisi kullanılmıştır. Farklı numunelere ait dağlanmış haldeki ana yapının iç yapı görüntüleri Şekil 6.6'da verilmiştir. İç yapılar incelendiğinde, yapılan dağlama işlemlerinden sonra ana yapıda tane sınırları belirgin olarak gözlemlenebilmiştir.

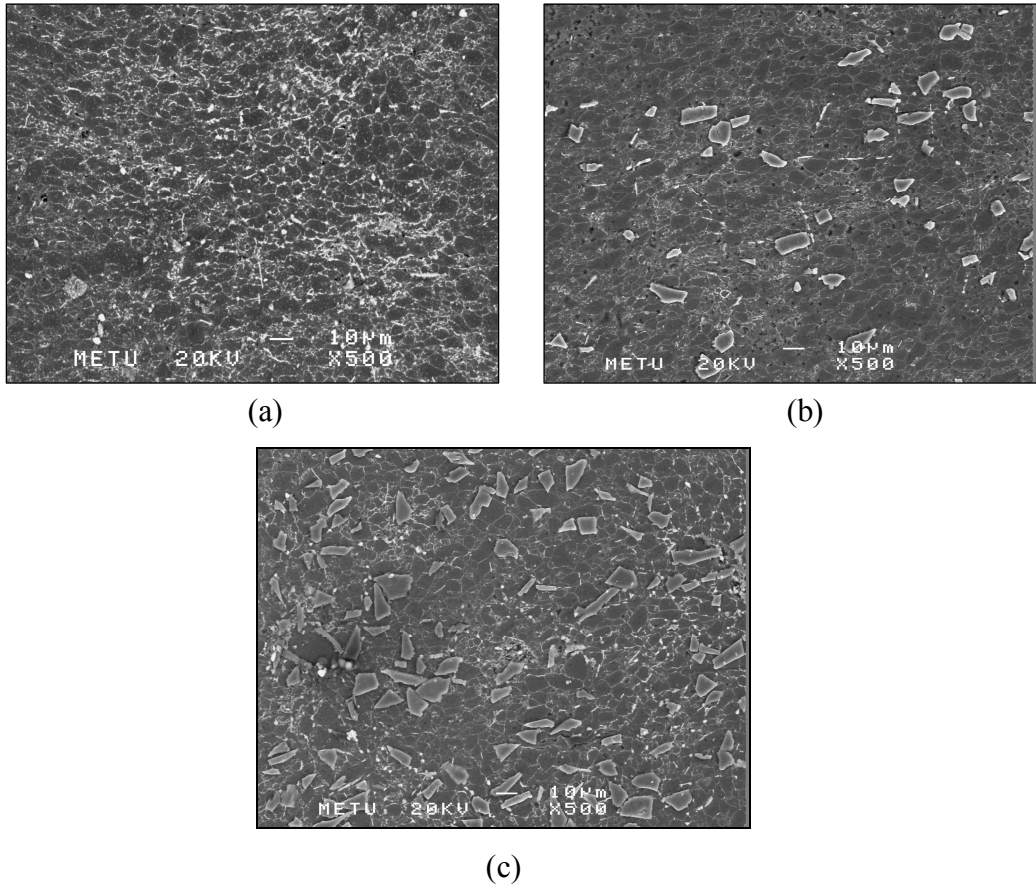




Şekil 6.6 Farklı bileşimlere sahip numunelerin yaşlandırma işleminden sonra dağlama yapılarak alınan optik görüntüleri (x1000), a) Alaşım, b) %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) %15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, d) %5 SiC, e) %15 SiC, f) %10 SiC-%10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

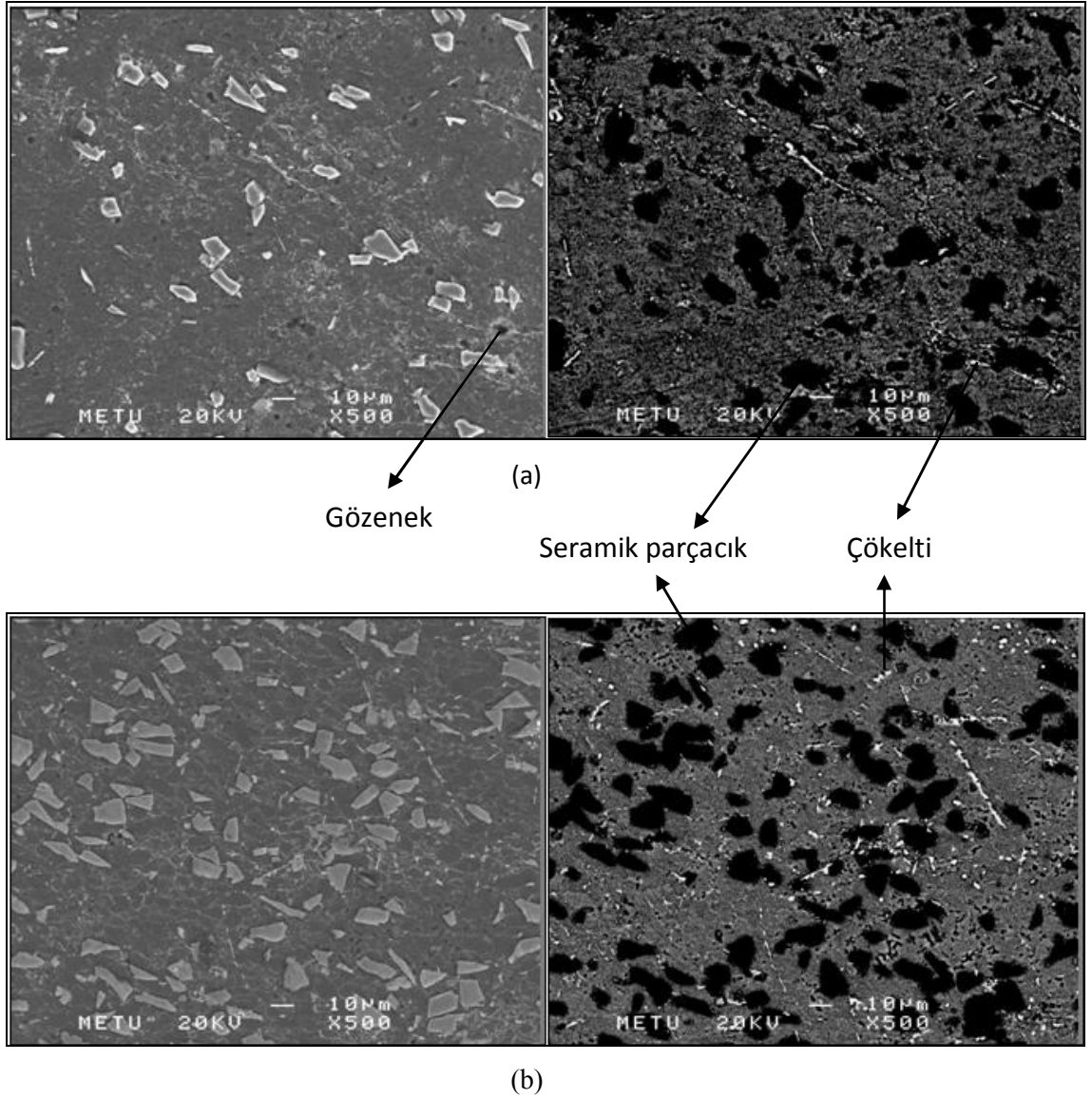
Genel olarak ışık mikroskobu ile yapılan çalışmada; ana yapı içerisinde seramik parçacıkların dağılımları, ana yapının tane sınırları ve takviye elemanlarının parçacık şekilleri gözlemlenmiştir. Ana yapıda yaşlandırma işlemlerine bağlı olarak oluşan çökeltilerin yerleri ve bileşimlerini oluşturan elementlerin ağırlıkça oranlarının belirlenmesi için ise numunelerin iç yapıları SEM yardımıyla incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobunda; ikincil elektron görüntüleme, geri saçınımlı elektron görüntüleme ve enerji dağıtımlı spektrometre yöntemleri kullanılarak iç yapılar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Seçilen numuneler için çözeltiye alma ve su verme

işlemleri ile 120°C ve 200°C'de yapılan yaşlandırma işlemlerinden sonra farklı büyütmelerde alınan SEI görüntüleri ile çöktillerin yerleri ve genel yapıları belirlenmiştir. 200°C'de yapılan yaşlandırma işleminde alaşım, %5 ve %10 SiC takviyeli numunelere ait ulaşılan en yüksek sertlik değerlerinde alınan iç yapı görüntüleri Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7 200°C'de yapılan yaşlandırma işleminden sonra alınan numunelere ait SEM görüntüleri (x500); a) Alaşım, b) %5 SiC, c) %15 SiC

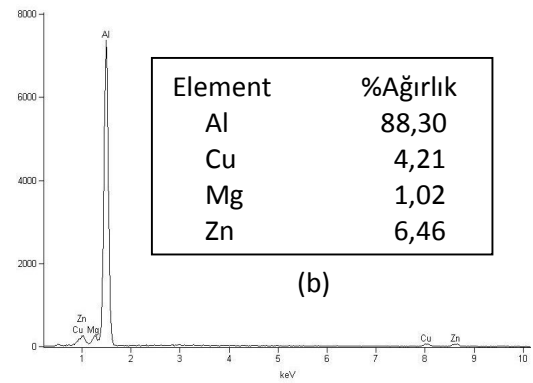
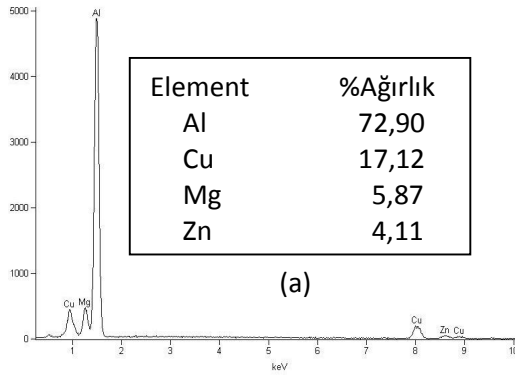
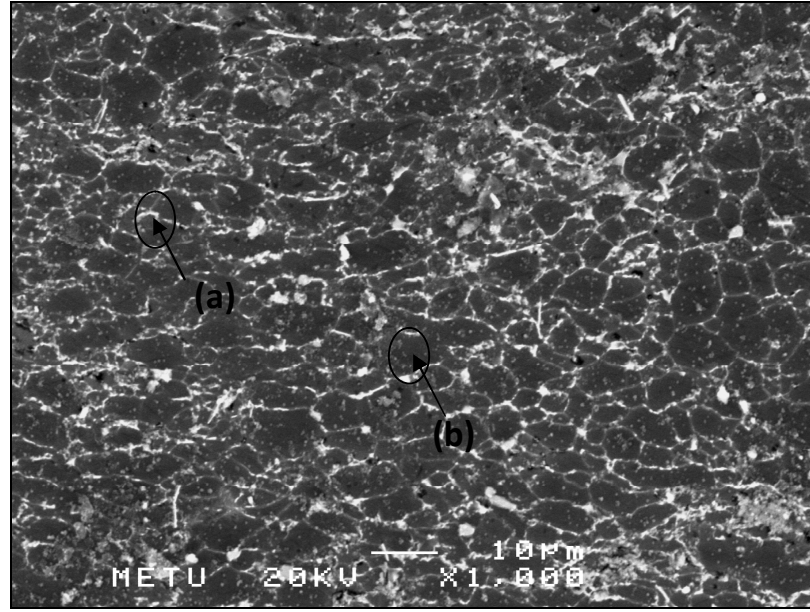
Tane sınırlarının ve buralarda oluşan çöktillerin daha iyi gözlemlenebilmesi için belirlenen numuneler üzerinden geri saçınım yöntemi kullanılarak iç yapı görüntüleri de alınmıştır. Doğal yaşlandırma işlemlerinden sonra %5 ve %15 SiC takviyeli numunelerden alınan BSE görüntüleri, SEI görüntüleri ile birlikte karşılaştırılmalı olarak Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8 Doğal yaşlandırma işlemlerinden sonra alınan numunelere ait BSE görüntüleri (x500); a) %5 SiC, b) %15 SiC

Aynı bölgeden alınan SEI ve BSE görüntüleri incelendiğinde, çözeltiliye alma ve su verme işlemlerinden sonra farklı sıcaklıklarda yapılan yapay yaşlandırma işlemleri ile ana yapıda oluşan çökeltilerin yapıları, dağılımları ve yerleri genel olarak görülmektedir. Beyaz kümeler şeklinde görüntülenen çökeltilerin, büyük ölçüde tane sınırlarında, kısmen de takviye elemanı ile ana yapı ara yüzeylerinde yoğunlaştıkları

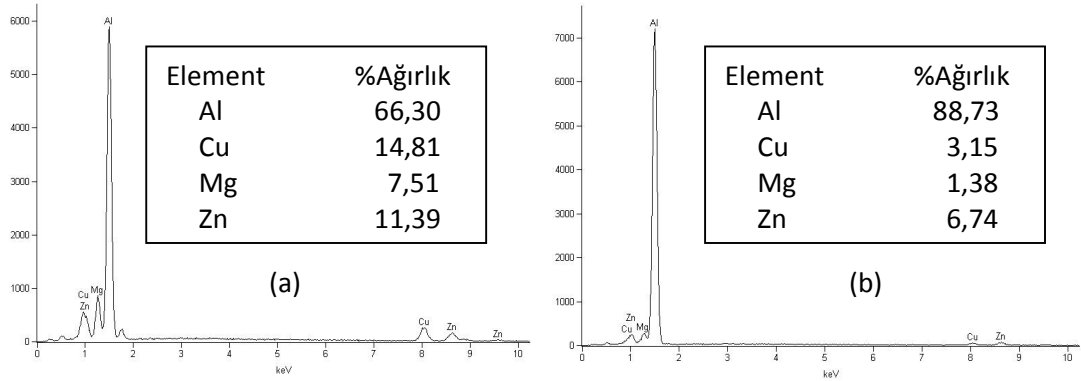
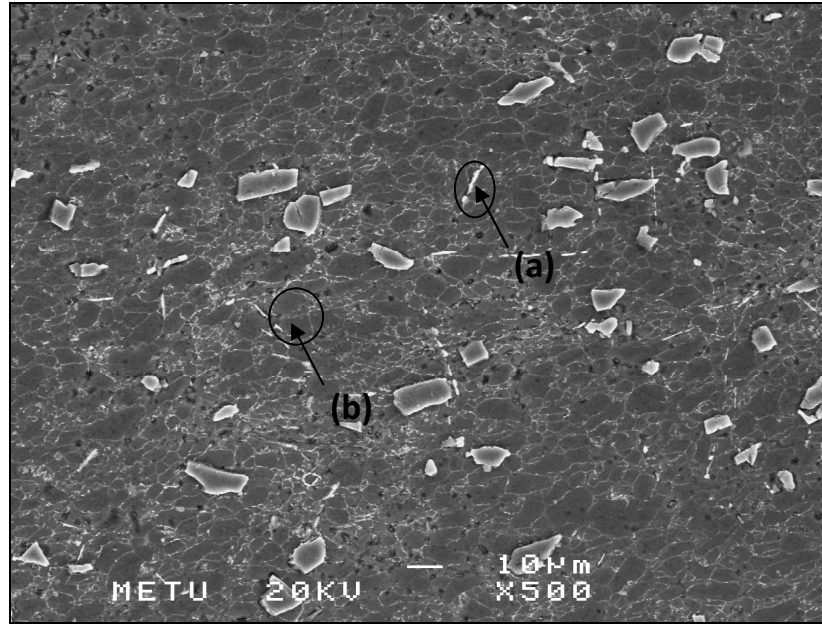
görülmektedir. Oluşan çökeltilerin bileşimlerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi için numunelerin belirli bölgelerinden Belirlenen numuneler için ana yapıda oluşan çökelti ve taneler üzerinden alınan EDS analizlerine ait dağılım sonuçları farklı ısıtım koşulları için aşağıda verilmiştir. 200°C’de 30 dakika süreyle yapılan yaşlandırma işleminden sonra alaşım numune üzerinden alınan EDS analiz sonucu Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.9 200°C de yapılan yaşlandırma işleminden sonra alaşım numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi

Alaşım numuneye göre SiC takviye elemanın etkisinin gözlemlenebilmesi için aynı yaşlandırma koşulunda %5 takviyeli numune üzerinden de analizler alınmıştır.

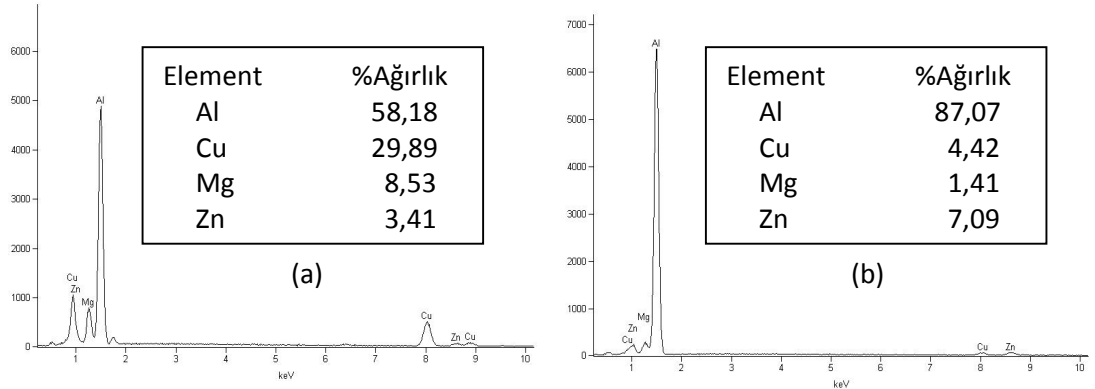
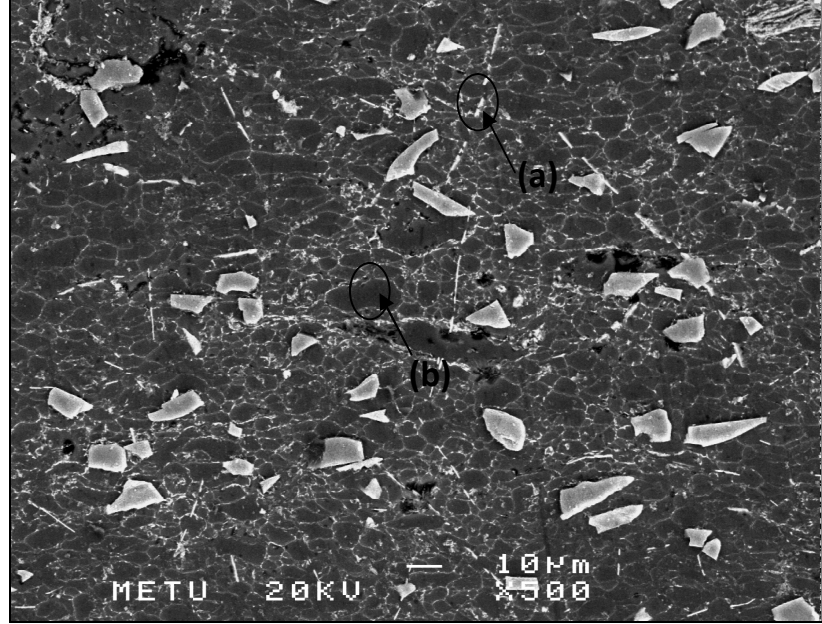
200°C’de 60 dakika süreyle yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 SiC takviyeli kompozit numune üzerinden alınan EDS analiz sonucu Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10 200°C de yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 SiC takviyeli numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi

Yaşlandırma sıcaklığının ana yapı üzerinde oluşturacağı etkinin gözlemlenebilmesi için Şekil 6.10’daki numune ile aynı bileşimdeki numune üzerinden farklı sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işleminden sonra analizler alınmıştır. 120°C’de 210 dakika

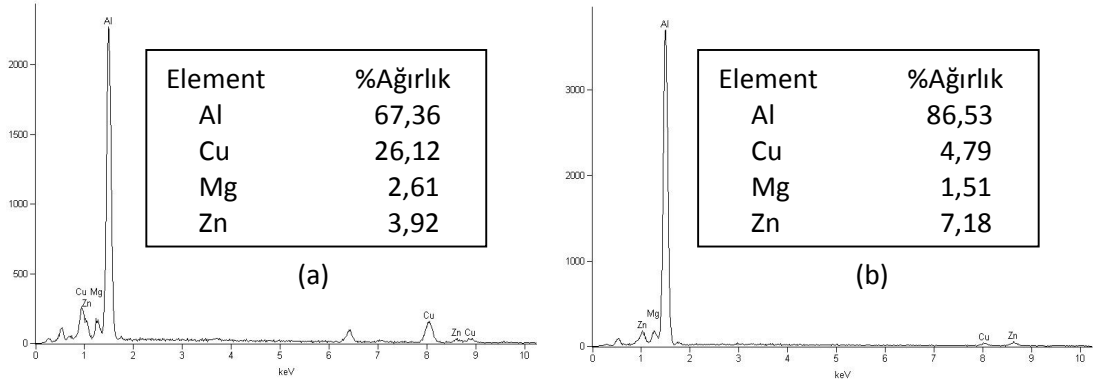
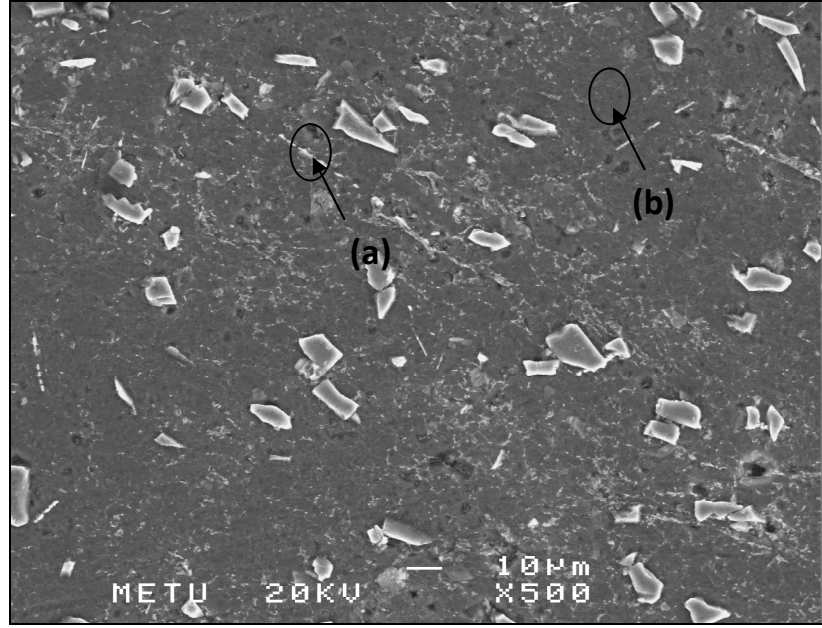
süreyile yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 SiC takviyeli kompozit numune üzerinden alınan EDS analiz sonucu Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11 120°C de yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 SiC takviyeli numunedeki çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de verilen 200°C ve 120°C’de yapılan yaşlandırma işlemleri sonucunda alınan analiz sonuçlarının incelenmesinden sonra yaşlandırma işlemlerinin etkisinin gözlemlenebilmesi için çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra aynı numune üzerinden analizler alınmıştır. Çözeltiye alma ve su

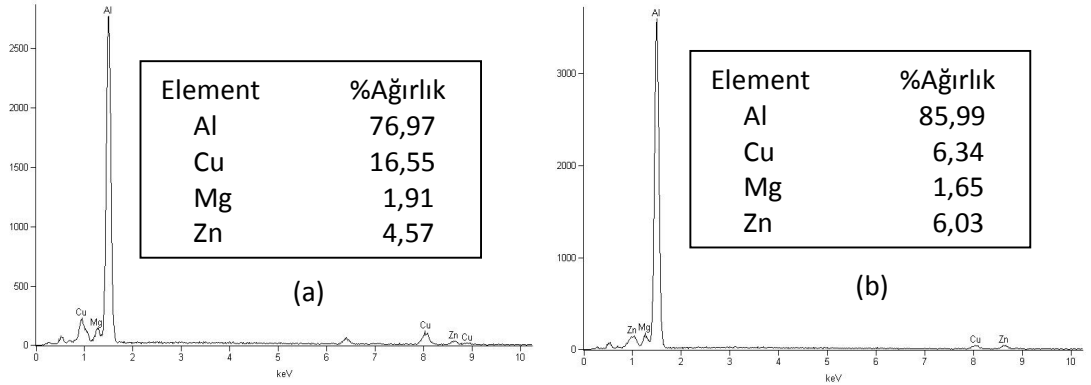
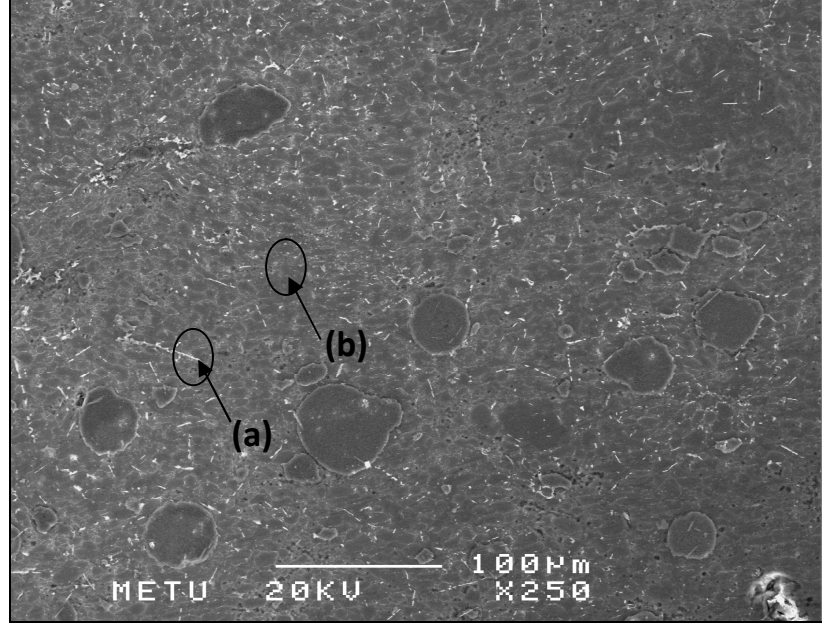
verme işlemlerinden sonra %5 SiC takviyeli kompozit numunede doğal yaşlandırma işlemine bağlı oluşan çökeltiler ve ana yapı üzerinden alınan EDS analiz sonucu Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.12 Çözeltiyeye alma ve su verme işlemlerinden sonra %5 SiC takviyeli numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi

Takviye türünün yapı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla Şekil 6.12’de verilen ısıtılma işlemi koşulu ile aynı koşulda alümina takviyeli numuneler üzerinden analizler alınmıştır. Çözeltiyeye alma ve su verme işlemlerinden sonra %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

takviyeli kompozit numunede doğal yaşlanmaya bağlı oluşan çökeltiler ve ana yapı üzerinden alınan EDS analiz sonucu Şekil 6.13’de verilmiştir.

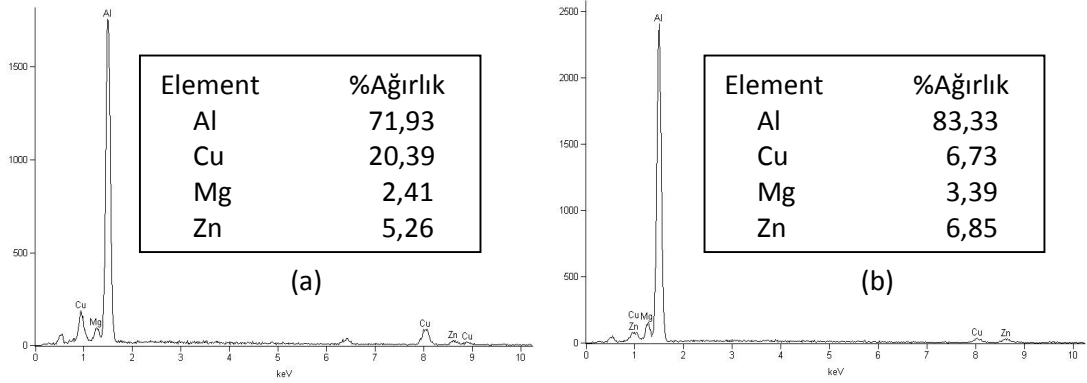
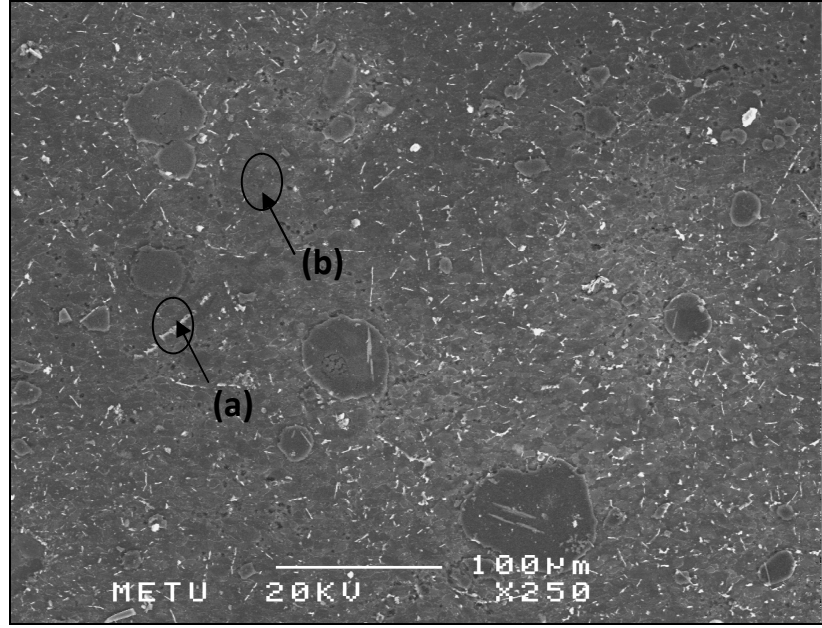


Şekil 6.13 Çözeltiyeye alma ve su verme işlemlerinden sonra %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numunede çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi

Çözeltiyeye alma ve su verme işlemlerinden sonra yapıda oluşan az miktarlardaki çökeltilerin büyük ölçüde doğal yaşlanmaya bağlı oluştuğu düşünülmektedir. Alümina takviyeli kompozit numuneler için yaşlandırma işleminin etkisinin gözlemlenebilmesi için 120°C’de yapılan yaşlandırma işleminden sonra numune



üzerinden analizler alınmıştır. Yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit numune üzerinden alınan EDS analiz sonucu Şekil 6.14'de verilmiştir.



Şekil 6.14 120°C'de yapılan yaşlandırma işleminden sonra %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numunedeki çökelti ve tane üzerinden alınan EDS analizleri; a) Çökelti, b) Tane İçi

Belirlenen numunelere ait EDS analiz sonuçları incelendiğinde, çökeltiler ve taneler üzerinden alınan ölçümlerde aynı elementlere ait farklı bileşim oranları

belirlenmiştir. Analizler sonunda ölçüm alınan bölgelerde Al, Cu, Mg ve Zn elementlerinin bulunduğu belirlenirken, zamanla oksitlenmeye bağlı olarak yapıda çok az miktarda O elementine de rastlanmıştır. Bu bölgelerden alınan analizlerde elementlere ait farklı bileşim oranlarına rastlanması, buralarda farklı yapılarının bulunduğunu göstermektedir. Her iki bölgeden alınan analiz sonuçlarına bakıldığında özellikle bazı elementlere ait oranlarda belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. En belirgin değişiklik alüminyum ve bakır ağırlık oranlarında görülmüştür. Bunun dışında diğer elementlere ait oranlarda da alınan bölgelere göre değişiklikler görülmektedir. Çökelti üzerlerinden alınan analizlerde, tane içlerinden alınan analizlere göre bakır oranlarının yüksek, alüminyum oranlarının ise daha düşük çıkması, çökeltilerin büyük ölçüde alüminyum ve bakırın oluşturduğu bileşikler oldukları tahmin edilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda, aynı elementlerin bulunduğu ana yapılarda Al ve Cu esaslı oluşan çökeltilerin  $Al_2Cu$  bileşiği oldukları belirlenmiştir [38,65].

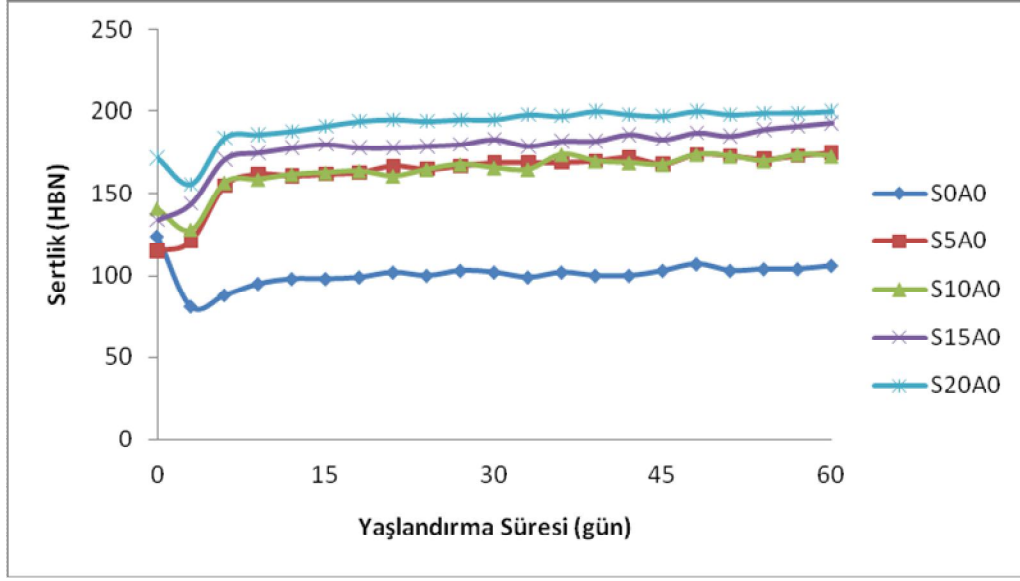
Benzer şekilde çökelti üzerinden alınan analizlerin bazılarında magnezyum ve çinko element oranlarının, tane içinden alınan analiz sonuçlarına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Mg ve Zn oranlarının yüksek olması, her iki elementin kendi aralarında veya diğer elementlerle oluşturduğu bileşiklerin de bölgede bulunduğu düşüncesinin oluşmasına sebep olmaktadır. Farklı alaşım gruplarında en çok rastlanan çökeltilerden sırasıyla Al-Cu-Mg alaşımlarında  $CuMgAl_2$ ; Al-Zn-Mg alaşımlarında  $MgZn_2$  bileşiklerinin de  $Al_2Cu$  bileşiği ile birlikte aynı ortamda bulunma olasılığı söz konusudur [66-69]. Birden fazla alaşım grubunun bir arada bulunması, çeşitli çökelti oluşma mekanizmalarının aynı ortamda bulunma olasılığını güçlendirmektedir. Bu şekilde farklı elementlerin aynı yapı içinde bir arada bulunmaları, oluşan çökelti çeşitlerinin de farklılaşmasına neden olmaktadır.

#### 6.4. Sertlik Deneyleri

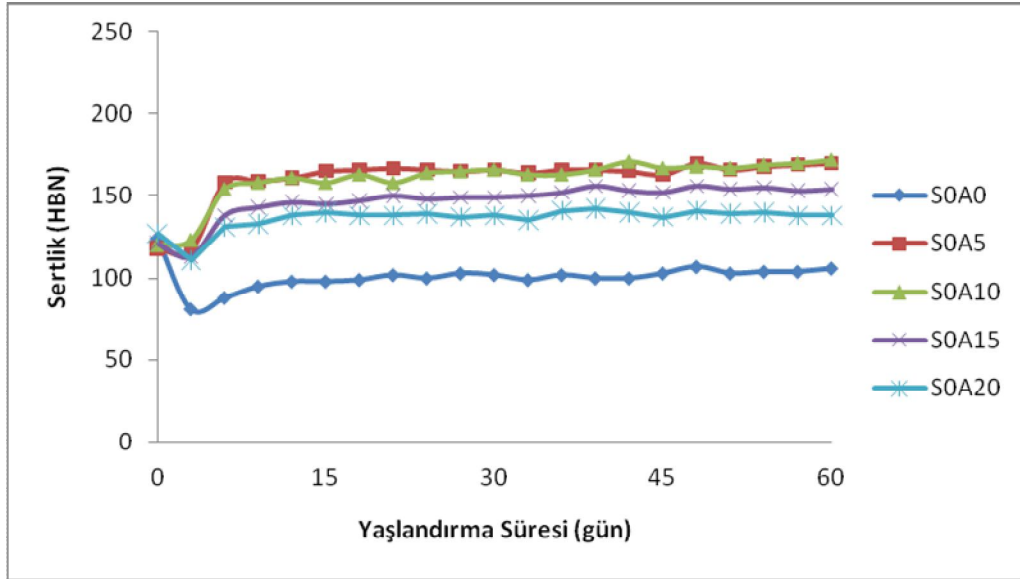
Üretilen kompozit numunelerin farklı yaşlanma koşullarında mekanik özelliklerinin belirlenmesi için sertlik ve üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Doğal yaşlandırma ve farklı sıcaklıklarda yapılan yapay yaşlandırma işlemleri süresince numunelerin sertlik değişimleri belirli zaman aralıklarında alınan sertlik ölçümleri ile belirlenmiştir. Yapay yaşlandırma işlemleri esnasında sertlik ölçümleri 30 dakika, doğal yaşlandırma işlemi esnasında ise 3 gün arayla alınmıştır. Yapılan sertlik deneyleri Brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler 187,5 kg basma yükü altında 2,5 mm çapında batıcı uç yardımıyla yapılmıştır.

Çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra yapılan doğal ve yapay yaşlandırma işlemleri süresince ölçülen sertlik değerlerinin değişimlerini gösteren sertlik eğrileri farklı gruplar halinde açıklanmıştır. Numuneler; SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve her iki seramik çeşidinin birlikte kullanıldığı karma seramik takviyeli olmak üzere üç kısımda incelenmiştir. Doğal yaşlandırma süresince numunelerin yaşlanma süresine bağlı sertlik değerleri belirlenmiştir. Doğal yaşlandırma işlemi 60 gün süreyle, yaklaşık 25°C oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlere ait doğal yaşlanma davranışları Şekil 6.15’de verilmiştir.

SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerde doğal yaşlanma davranışı incelendiğinde, takviye miktarları önemli olmaksızın kompozitlerin, alaşım numuneye göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Kompozit numuneler kendi içinde karşılaştırıldığında, SiC takviyeli kompozitlerde artan takviye miktarı ile sertlik değerlerinde yükselme görülürken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerde artan takviye oranı sertlik seviyesinin azalmasına neden olmaktadır. SiC takviye oranı en fazla olan S20A0 numunesi en yüksek sertlik değerlerine sahipken, en yüksek alümina takviye oranına sahip S0A20 numunesi en düşük sertlik değerlerine sahiptir.



(a)



(b)

Şekil 6.15 SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerde doğal yaşlanma davranışı, a) SiC takviyeli, b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli

Şekil 6.15’de verilen eğrilerde farklı takviye oranlarında farklı sertlik seviyelerinin elde edilmesinin yanında, bütün numunelerin benzer sertlik davranışları sergiledikleri görülmektedir. Bu sonuçlar ışığında, takviye çeşidinin ve takviye oranının,

numunelerin doğal yaşlanma karakterlerini etkilemediği, yalnızca ulaşılan sertlik seviyesini etkiledikleri anlaşılmaktadır. Takviye elemanlarının kullanılmadığı alaşım numune ile kompozit numunelerin benzer sertlik değişimleri göstermeleri bu duruma kanıt olarak gösterilebilir.

Sertlik eğrilerinin başlangıç değerleri, yapılan çözeltiyeye alma ve su verme işlemleri yapıldıktan sonra alınan sertlik değerleridir. Çözeltiyeye alma ve su verme işlemlerinden sonra alınan sertlik değerlerinin doğal yaşlandırma sürecinin başlangıç safhasında alınan sertlik değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat ilerleyen yaşlandırma sürelerinde sertlik değerlerinde belirgin artışlar görülmüş ve sertlik değerleri ilk değerlere oranla daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Yaşlandırma işlemlerinin başında gerçekleşen sertlik değerlerindeki belirgin değişme, ilerleyen zamanlarda görülmezken, aksine daha kararlı ve doğrusal bir davranış gözlemlenmiştir. SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilen numuneler karşılaştırıldığında ise SiC takviyeli numunelerin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilenlere oranla daha yüksek sertlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Aynı ana yapıya sahip farklı seramik türleri ile takviye edilen kompozit malzemelerde sertlik değerlerinin birbirinden farklı olması, seramik malzemelerin sertlik değerlerinin farklı olması ile açıklanabilir. Yaşlandırma işlemi oda sıcaklığında gerçekleştiği için takviye elemanları ile ana yapı ara yüzeylerinde kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi beklenmediği için, sertlik değerlerindeki farklılaşmada ana yapının etkisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bütün numunelerde benzer doğal yaşlanma davranışının görülmesi de bu durumu desteklemektedir.

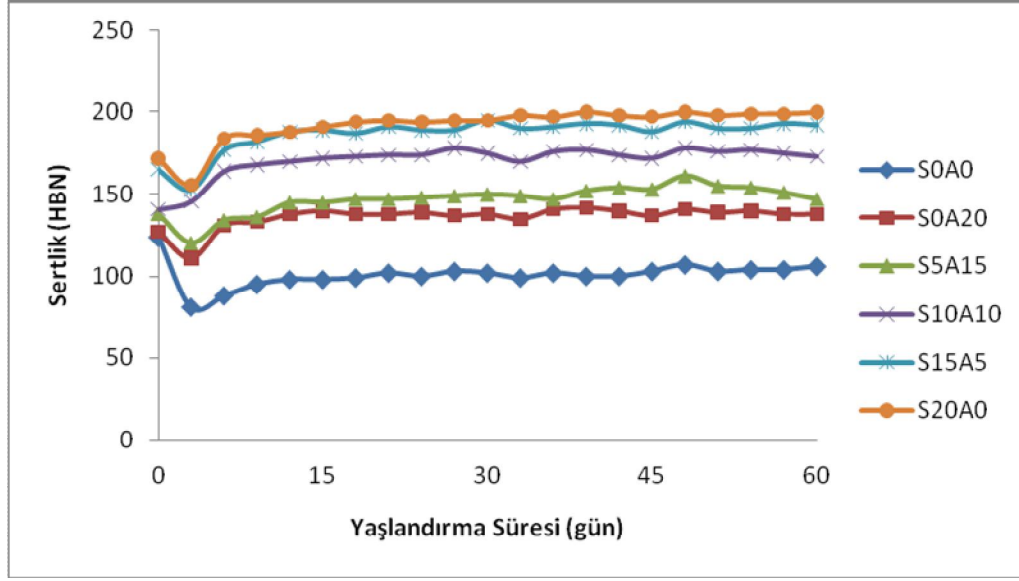
Bekheet ve arkadaşları [70], 2024 alüminyum alaşımı ve farklı oranlarda SiC ile takviye edilen kompozitlerin doğal yaşlandırma işlemi ile gösterdikleri sertlik değişimlerini incelemiştir. Numunelerin sertlik değerlerinin, başlangıç aşamasında belirgin artış gösterdiği ve ulaştıkları en yüksek sertlik değerlerinde sabit kaldıkları belirlenmiştir. Takviye oranlarındaki farklılığın, yaşlanma işlemi ile oluşan sertlik davranışını etkilemediği, sadece numunelerin ulaşabileceği sertlik seviyesini

değiştirdiği belirlenmiştir [70]. %5, %10 ve %20 takviye oranlarında hazırlanan numunelerin doğal yaşlandırma işlemi sonunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar ile büyük lde benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Takviye oranlarının, doğal yaşlandırma işleminde en yüksek sertlik değerine ulaşılması için gereken zamanı etkilediği, fakat yaşlanma davranışını etkilemediği daha önce yapılan çalışmalardan bilinmektedir [70]. Doğal yaşlandırma işleminde sertlik davranışlarının alaşım ve kompozit numunelerde büyük lde benzer olması, sertlik artışının takviye elemanlarının etkisi ile değil, ana yapının yaşlanma özelliği ile ilgili olduğunu göstermektedir. Bu durumda doğal yaşlandırma işleminde sertlik artışının sebebi olarak ise zeltiye alma işleminde sonra su verme işlemi ile oluşmaya başlayan, doğal ve düşük yapay yaşlandırma işlemleri esnasında oluşumları devam eden tutarlı GP bölgelerinin dislokasyon hareketlerine karşı set şeklinde davranması gösterilebilir [4,11]. Bu Şekilde bölgesel gerilmeler artacağı için malzemenin mekanik özelliklerinde artış gözlemlenmektedir.

zeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra sertlik değerlerinin önce azalması daha sonra tekrar yükselmeye başlaması; ani soğutma ile çarpılan Al kafes yapısının içinde hapsolan alaşım elementlerinin kafes dışına çıkması ile ortamda rahatlamının görülmesi ile açıklanabilir. Rahatlayan kafes yapısı sertlik değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. Sertlik değerlerinin bu Şekilde değişim sergilemesi zeltiye alma sıcaklığı, su verme işlemi için geçen süre ve su verme sıcaklığı ile doğrudan ilgilidir.

Her iki seramik çeşidinin aynı anda kullanıldığı ve toplam takviye oranının %20 olarak belirlendiği karma kompozit numunelerin doğal yaşlanmaya bağlı olarak gösterdikleri sertlik davranışları Şekil 6.16'da verilmiştir.

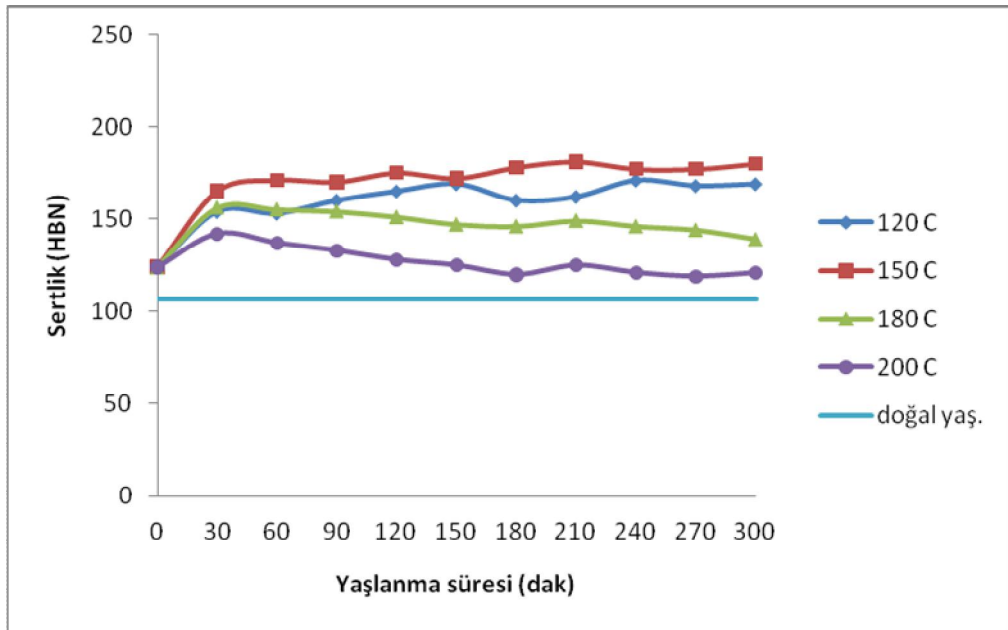


Şekil 6.16 Karma kompozit numunelerde doğal yaşlanma davranışı

Doğal yaşlanma davranışları incelendiğinde, karma kompozit numunelerin tamamının alaşım numuneye göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaştıkları görülmektedir. Sertlik değerlerindeki değişim, tek seramik takviyeli kompozit numuneler ile benzerlik göstermektedir. Çözeltiyeye alma ve su verme işlemlerinden sonra yaşlanma işleminin başlangıç safhasında en düşük seviyelere inen sertlik değerleri, kısa zaman sonra belirgin biçimde yükselmektedir. Yaşlanma işleminin başlangıcında görülen belirgin sertlik değişimleri, ilerleyen yaşlanma süresi ile birlikte daha kararlı bir davranış sergilemektedir. Çözeltiyeye alma ve su verme işlemleri ile aşırı doymuş katı çözeltinin oluşması, yapının kararsız davranış sergilemesine neden olmaktadır.

Kompozitler kendi aralarında karşılaştırıldığında artan SiC takviyesine bağlı olarak, numunelerin sertlik değerleri artış göstermektedir. Kompozit numuneler arasında en yüksek sertlik değeri; SiC takviye oranının en yüksek olduğu S20A0'da görülürken, en düşük sertlik değeri ise %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numunede görülmektedir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda; sertlik artışında baskın takviye çeşidinin SiC olduğu anlaşılmaktadır.

Çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra yapay yaşlandırma işlemleri 120, 150, 180 ve 200°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta  $\pm 2^\circ\text{C}$  sıcaklık kontrolü ile yağ banyosunda gerçekleştirilirken, numunelerin yaşlandırılması süresince 30 dakika zaman dilimlerinde numuneler üzerinden sertlik ölçümleri alınmıştır. Alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma sıcaklıklarında zamana bağlı gösterdiği sertlik davranışları, 60 gün süreyle yapılan doğal yaşlandırma işleminde elde edilen en yüksek sertlik değeri ile birlikte Şekil 6.17’de verilmiştir.



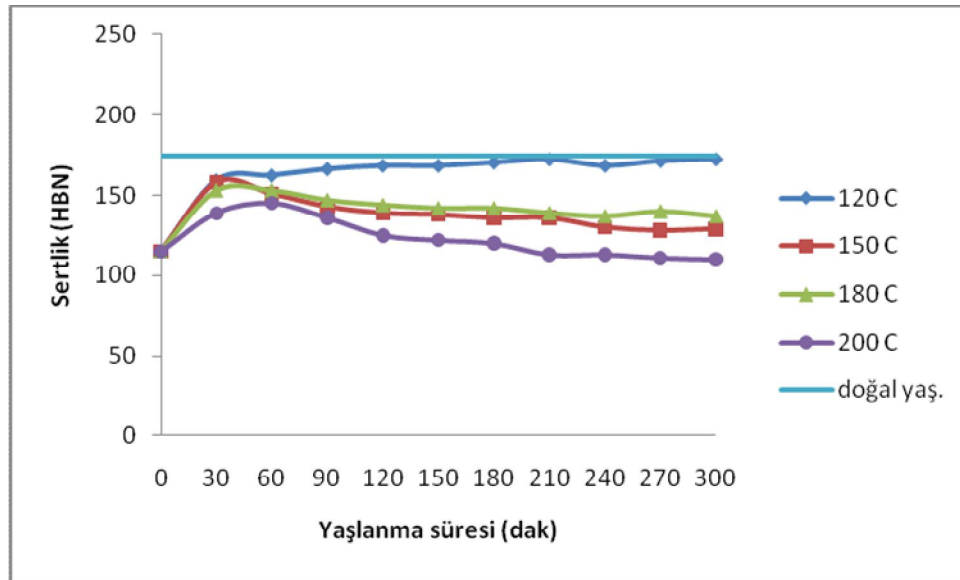
Şekil 6.17 Al alaşımının yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi

Al alaşımına ait sertlik değişim eğrileri incelendiğinde çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra alınan sertlik değerlerinin, bütün yaşlandırma koşullarında kısa zaman içerisinde belirgin biçimde yükseldiği belirlenmiştir. Düşük sıcaklık olarak kabul edilen 120°C ve 150°C’deki yaşlandırma işlemlerinde sertlik artışlarındaki yükselmenin devam ettiği görülürken, 180°C ve 200°C’deki yaşlandırma işlemlerinde ise sertlik değerlerinin zamanla azaldığı görülmektedir. Yaşlandırma



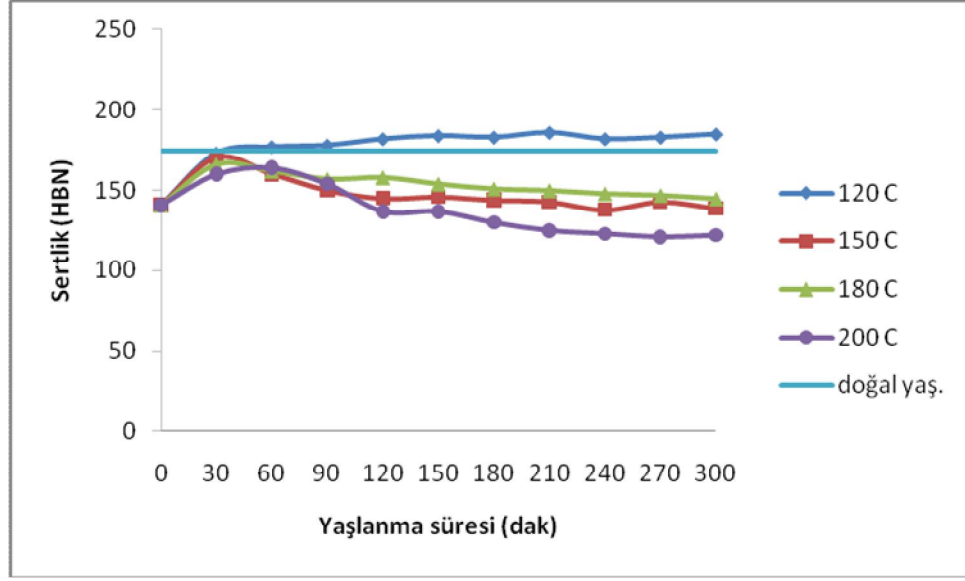
sıcaklıkları arasında en yüksek sertlik değerine 150°C’de 210 dakika sonunda ulaşılırken, en düşük sertlik değerleri, genel itibariyle 200°C’de yapılan yaşlandırma işleminde elde edilmiştir. Yapay yaşlandırma işlemleri ile belirlenen sertlik değişimlerinin, 60 gün süreyle gerçekleştirilen doğal yaşlandırma işleminde elde edilen en yüksek sertlik değeri ile karşılaştırıldığında daha yüksek oldukları görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda sertlik değerlerinin hızlı arttığı, fakat düşük sıcaklıklarda ulaşılan sertlik seviyesine ulaşamadığı daha önceki çalışmalardan bilinmektedir. Doğal yaşlandırma işlemi daha uzun sürelerde yapılmış olsaydı, daha yüksek değerlerin elde edilmesi söz konusu olacaktır.

Takviye elemanı olarak sadece SiC parçacıklarının kullanıldığı ve toplam takviye oranı %15’i geçmeyen numunelere ait farklı yaşlandırma koşullarındaki sertlik değişimleri, doğal yaşlandırma işlemi süresince elde edilen en yüksek sertlik değeri ile birlikte Şekil 6.18 de verilmiştir.

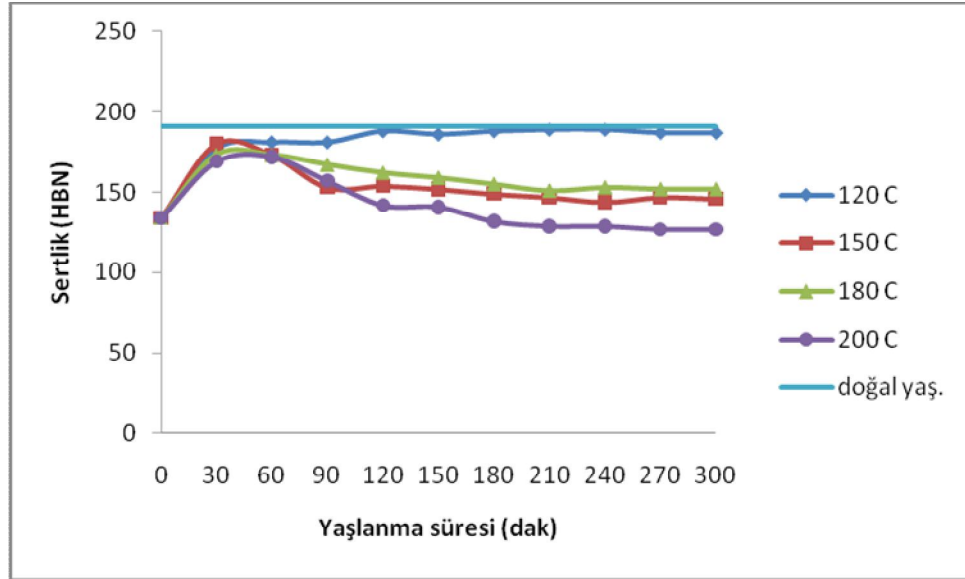


(a)

Şekil 6.18 SiC takviyeli kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi; a) %5 SiC, b) %10 SiC, c) %15 SiC



(b)



(c)

Şekil 6.18 (devamı) SiC takviyeli kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi; a) %5 SiC, b) %10 SiC, c) %15 SiC

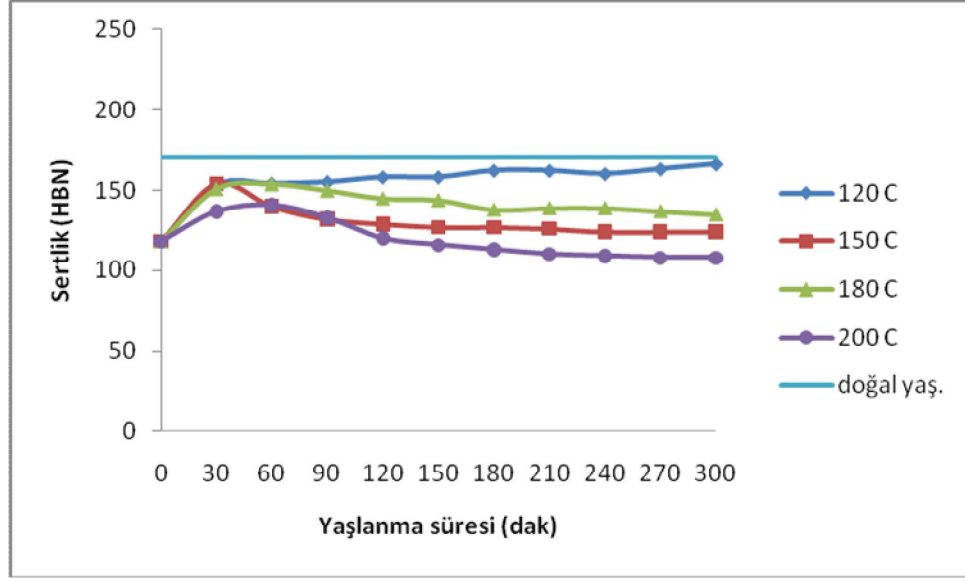
Dört farklı sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işlemlerinin herbirinde sertlik değerleri, çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra kısa zaman içinde yükselmeye başlamıştır. 120°C’de yapılan yaşlandırma işlemi dışında diğer koşullarda yaklaşık

aynı sürede en yüksek sertlik değerlerine ulaşılırken, ilerleyen yaşlandırma zamanına bağlı olarak sertlik değerlerinde azalma görülmektedir. 120°C’de ise sertlik değerleri, zamanla daha kararlı ve doğrusal davranış sergilemektedir. 300 dakikalık yaşlandırma zamanının sonunda; 200°C’de yapılan yaşlandırma işleminde, çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra elde edilen sertlik değerinden daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sertlik değerleri, doğal yaşlandırma işleminde elde edilen en yüksek sertlik değeri ile karşılaştırıldığında genel itibariyle daha düşük seviyede oldukları görülmektedir.

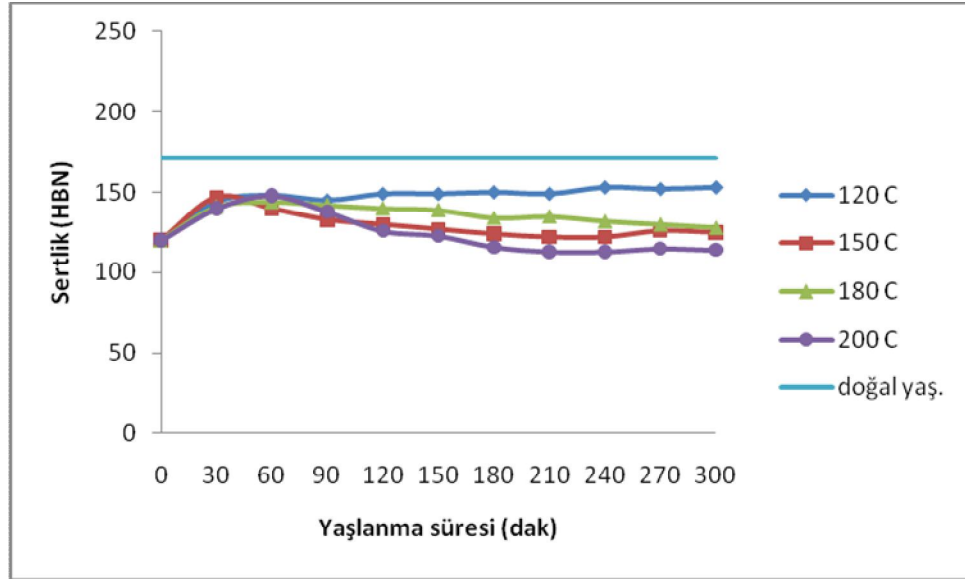
Sheu ve Lin [5], 7075 alüminyum alaşımının ve çeşitli oranlarda hazırlanan SiC takviyeli kompozitlerin, 120°C’de 100 saat süreyle yaptıkları yaşlandırma işlemi ile sertlik davranışlarını ve takviye oranının artması ile sertlik değerlerinin yükseldiğini belirlemiştir. Ayrıca, sertlik değişiminin başlangıçta az olduğunu fakat ilerleyen yaşlandırma sürelerinde daha belirgin sertlik artışlarının olduğunu belirlemiştir. Bunun dışında yüksek takviye oranlarında yaşlandırma işleminin etkisinin daha düşük olduğunu gözlemlemiştir. Benzer şekilde 200°C’de yapılan yaşlandırma işleminde ise sertlik değerlerinin başlangıçta, 120°C’de yapılan yaşlandırma işleminde elde edilen sertlik seviyesine oranla daha düşük bir sıcaklık aralığında azalma eğilimli olarak sabit kaldığını ve ilerleyen zaman içerisinde azalma gösterdiğini belirlemiştir [5].

Alümina takviyeli kompozit numunelere ait farklı yaşlandırma sıcaklıklarında elde edilen sertlik değişimleri, 60 gün süreyle yapılan doğal yaşlandırma işleminde elde edilen en yüksek sertlik değerleri ile birlikte Şekil 6.19’da verilmiştir.

Alümina takviyeli kompozit numuneler de yapılan yaşlandırma işlemlerinde genel olarak, SiC takviyeli olan kompozitlerle benzer davranış sergilemektedir. Benzer şekilde en yüksek sertlik değerlerine yaşlandırma işlemlerinin başlangıcında ulaşıp zamanla sertlik değerlerinde azalma gözlenirken, tüm koşullarda elde edilen sertlik değişimlerinin ise büyük ölçüde benzer oldukları görülmüştür.

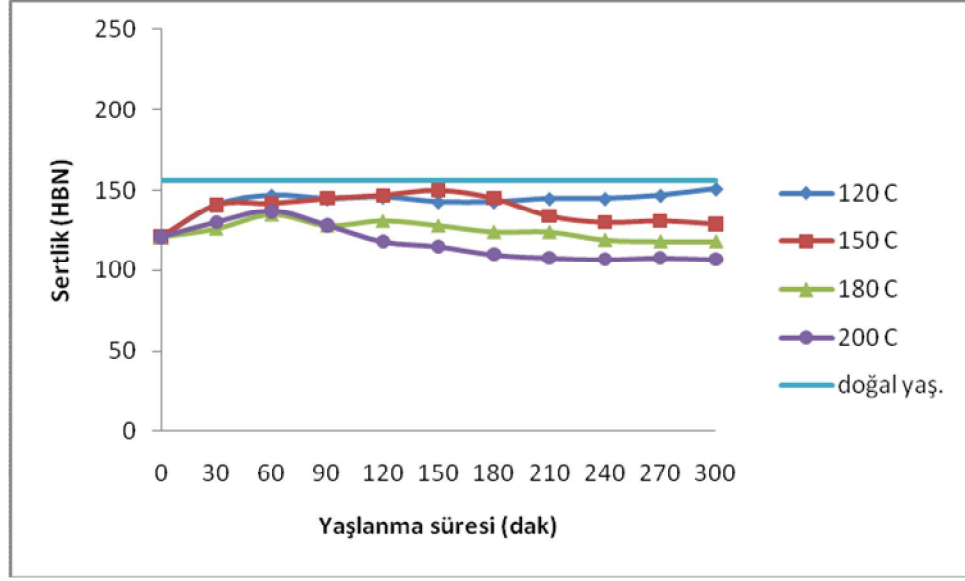


(a)



(b)

Şekil 6.19 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi; a) %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) %15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



(c)

Şekil 6.19 (devamı) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi; a) %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) %15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Diğer yandan, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde elde edilen sertlik değişimlerinin, doğal yaşlandırma işlemleri süresince ulaşılan en yüksek sertlik değerlerinden daha düşük seviyede olduğundan, SiC takviyeli numuneler ile benzerlik görülmektedir. SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitler arasındaki temel fark; SiC ile takviye edilen numunelerde, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilenlere göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmış olmasıdır.

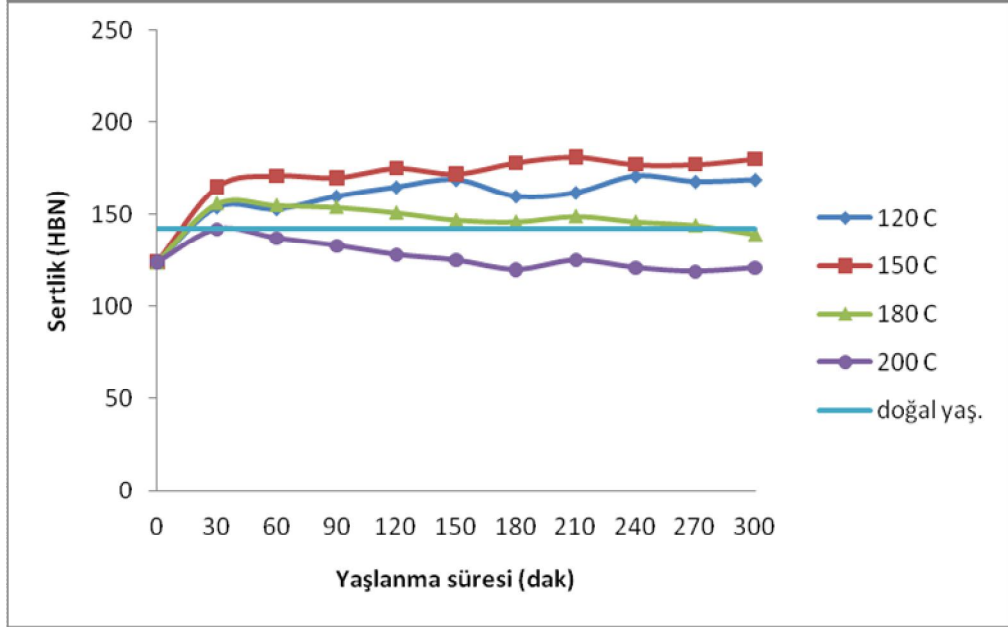
Salazar ve Barrena [71], 7005 alüminyum alaşımı ve %10 takviye oranına sahip AA7005-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit numunelerin 150°C’de yapılan yaşlandırma işlemleri ile sertlik davranışları belirlenmiştir. 1200 dakika süreyle yapılan çalışmada başlangıçta 200 dakikalık sürede hızlı sertlik artışının görüldüğü ve zamanla sertlik değerlerinde duraklama ve beraberinde azalma olduğu belirlenmiştir [71].

Kompozit malzemelerin farklı sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde farklı sertlik davranışları göstermelerinin temelinde, yapıda oluşan çökeltilerin miktarlarında görülen farklılık bulunmaktadır. Aynı ana yapıya ve takviye oranına

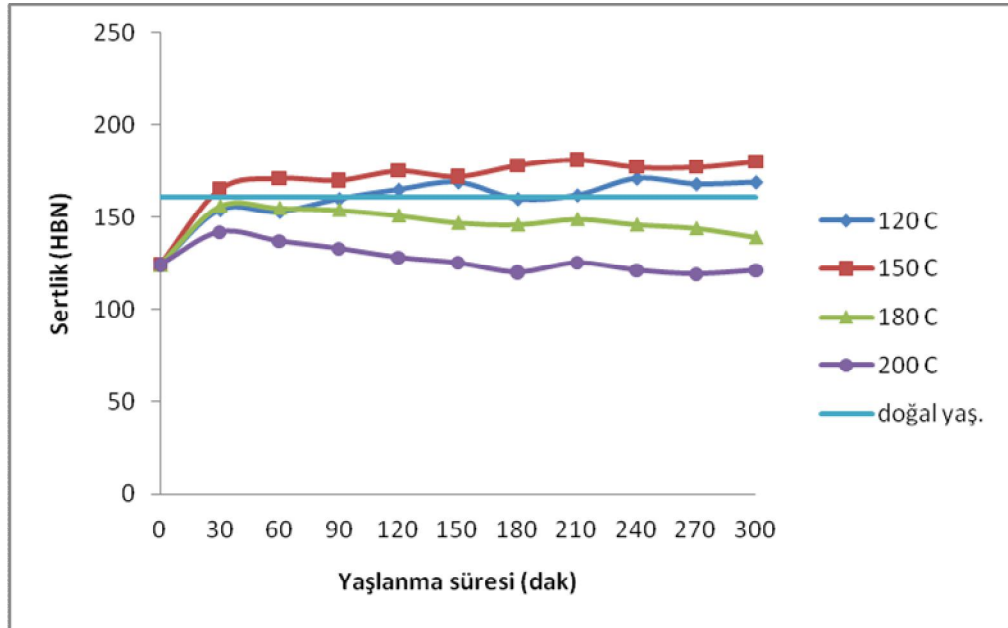
sahip kompozit malzemelerde sertlik davranışının yaşlandırma sıcaklığı ile belirgin değişiklikler göstermesi, sıcaklık faktörünün oluşacak fazların yapısında etkili olduğu kadar miktarında da etkili olduğu görülmektedir. Çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra, 200°C’de en yüksek sertlik değerinin elde edildiği durumda alınan SEM görüntülerinde yapıda oluşan çökeltiler Şekil 6.7’de gösterilmiştir. %5 oranında SiC ile takviye edilen kompozit numunenin üç farklı sıcaklık koşulunda elde edilen sertlik değişimleri göz önünde bulundurularak, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin görüldüğü 120°C’de oluşan çökeltilerin, 200°C’dekilerden daha fazla miktarda oldukları görülmektedir. Benzer şekilde en az çökelti miktarına ise sertlik değerinin en düşük olduğu, Şekil 6.12’deki çözeltiye alma ve su verme işlemleri sonunda alınan iç yapı görüntülerinde rastlanmıştır. Çözeltiye alma ve su verme işleminden sonra yapıda belirgin biçimde çökelti oluşması beklenmez, mevcut çökeltilerin büyük çoğunluğu işlem sonrası doğal yaşlanma sonucu oluşan çökeltilerdir.

Takviye elemanı olarak sadece tek bir seramik türünün kullanıldığı kompozit numunelere ait farklı sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde elde edilen sertlik değişimleri incelendikten sonra bu sonuçlar ışığında her iki seramik takviye elemanı ile takviye edilen karma kompozit numunelere ait sertlik değişimleri incelenmiştir. Üretilen karma kompozitlerde toplam takviye miktarı %20 olarak belirlenirken, buna göre beş farklı karma kompozit numune üretilmiştir. Karma kompozit numunelerin farklı yaşlandırma koşullarındaki sertlik değişimleri, yaşlandırma işlemlerinde elde edilen en yüksek sertlik değerleri ile birlikte Şekil 6.20’de verilmiştir.

SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye elemanlarından bir tanesinin kullanıldığı kompozit numuneler farklı sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde benzer sertlik değişimlerine sahipken, her iki takviye elemanının birlikte kullanıldığı karma kompozitlerde tek çeşit ile takviye edilenlere göre farklı sertlik davranışları gözlemlenmiştir.

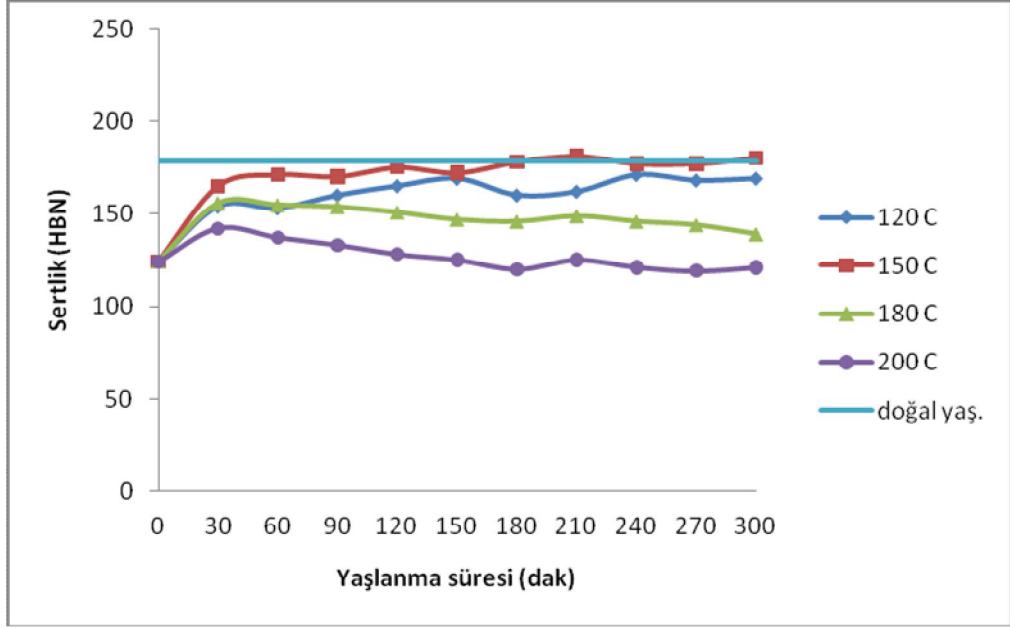


(a)

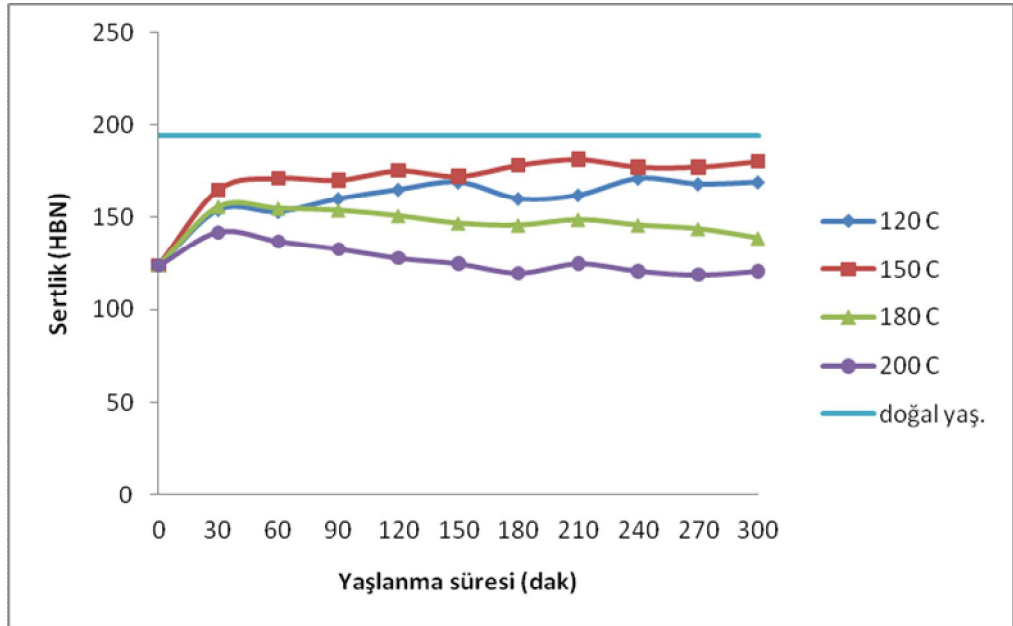


(b)

Şekil 6.20 Karma kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi, a) %0 SiC-%20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) %5 SiC-%15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) %10 SiC-%10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, d) %15 SiC-%5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e) %20 SiC-%0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



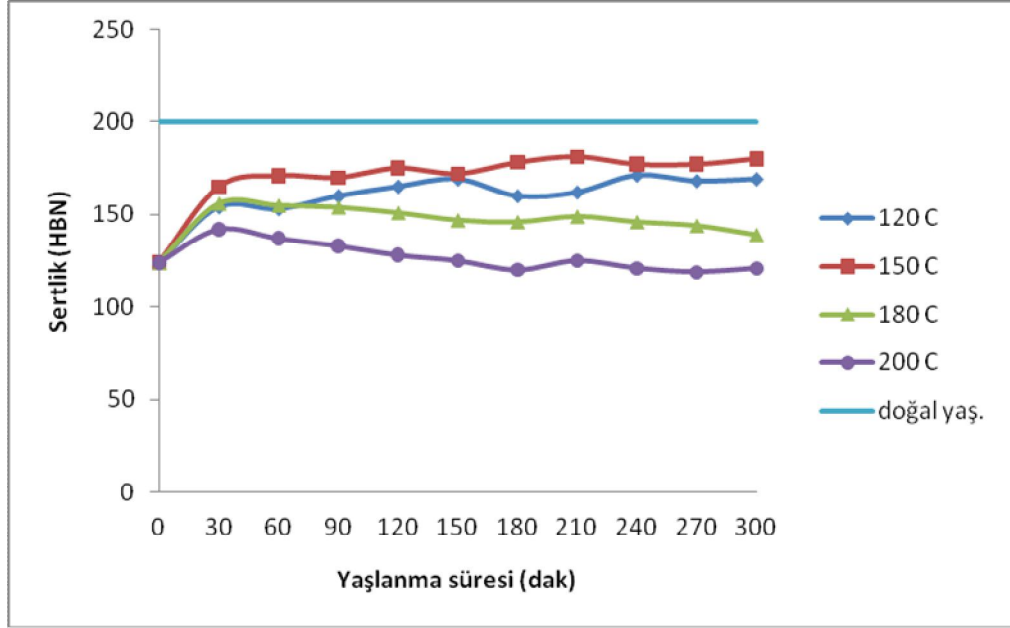
(c)



(d)

Şekil 6.20 (devamı) Karma kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi, a) %0 SiC-%20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) %5 SiC-%15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) %10 SiC-%10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, d) %15 SiC-%5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e) %20 SiC-%0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>





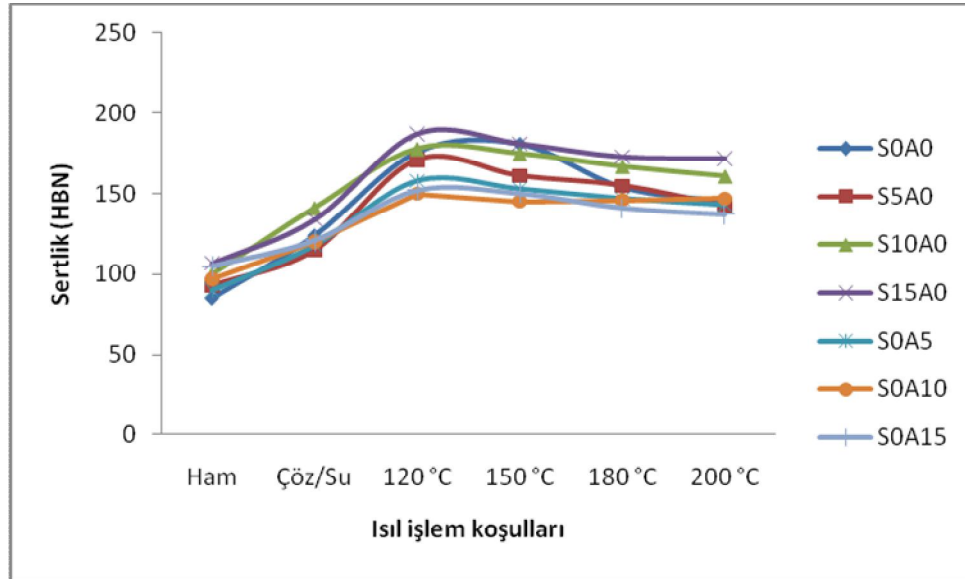
(e)

Şekil 6.20 (devamı) Karma kompozit numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde gösterdiği sertlik değişimi, a) %0 SiC-%20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) %5 SiC-%15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) %10 SiC-%10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, d) %15 SiC-%5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e) %20 SiC-%0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Karma kompozitlere ait sertlik değişim eğrileri incelendiğinde, koşullar arasında takviye oranı ile uyumlu bir sertlik davranışı bulunmamaktadır. Numunelerin en yüksek sertlik değerine ulaştıkları yaşlandırma süreleri birbirinden farklı olmakla beraber, en yüksek sertlik değerlerine de farklı yaşlandırma sıcaklıklarında ulaşmışlardır. Diğer taraftan karma kompozit numunelerde artan SiC oranı ile numunelerin ulaşabildikleri sertlik değerleri belirgin biçimde yükselmiştir. Numunelerin çözeltiye alma ve su verme işlemleri sonunda elde edilen sertlik seviyeleri, yapılan yaşlandırma işlemleri boyunca büyük ölçüde sabit kalmıştır. Ayrıca tek çeşit seramik ile takviye edilen kompozitlerin aksine farklı sıcaklıklarda elde edilen sertlik değerlerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları görülmektedir.

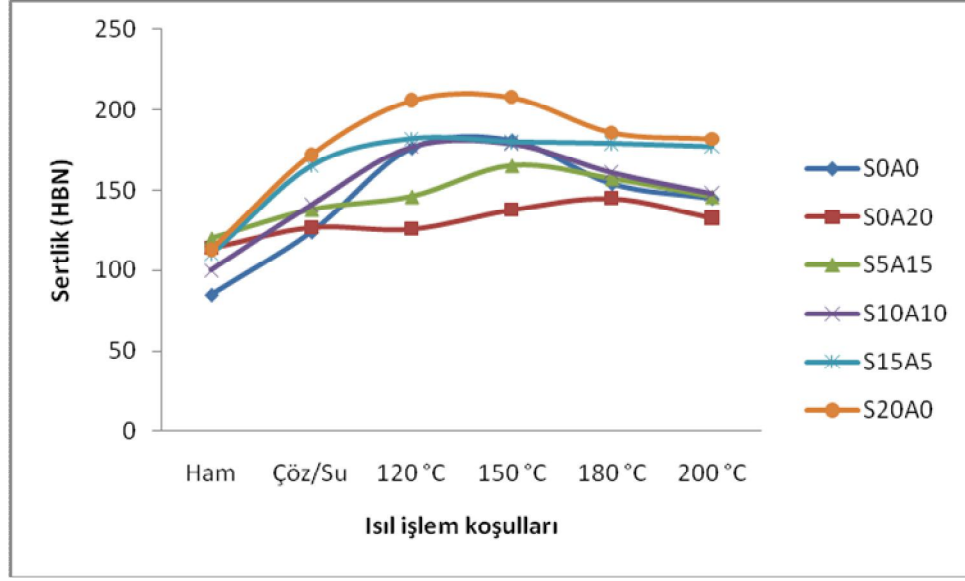
Numunelerin üretim aşamasından sonra, çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra ve yapılan yapay yaşlandırma işlemlerinden sonra alınan sertlik değerlerinin değişimleri Şekil 6.21’de verilmiştir. Numunelerin üretimlerinden sonra işlem

görmemiş halde (ham olarak) alınan sertlik değerlerinin, uygulanan çözeltiye alma ve su verme işlemleri ile yükseldiği görülmektedir. Uygulanan yapay yaşlandırma işlemleri ile sertlik değerleri daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Farklı sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde numuneler farklı en yüksek sertlik değerlerine ulaşırken, tek çeşit seramik ile takviye edilen numuneler benzer sertlik değişimleri sergilemiştir. Karma kompozit numunelerde sertlik değişimleri, tek çeşit takviyeli numuneler kadar uyumlu davranış sergilememektedir. Tek çeşit seramik takviyeli kompozitlerde ve alaşım numunede en yüksek sertlik değerlerine 120°C’de yapılan yaşlandırma işleminde elde edilmiştir. Karma kompozit numunelerde ise benzer durum görülmezken, aksine birçok numunede farklı yaşlandırma koşullarında aynı sertlik değerleri elde edilmiştir. Genel olarak, karma kompozit numunelerde karmaşık davranışlar gözlemlenmiştir.



(a)

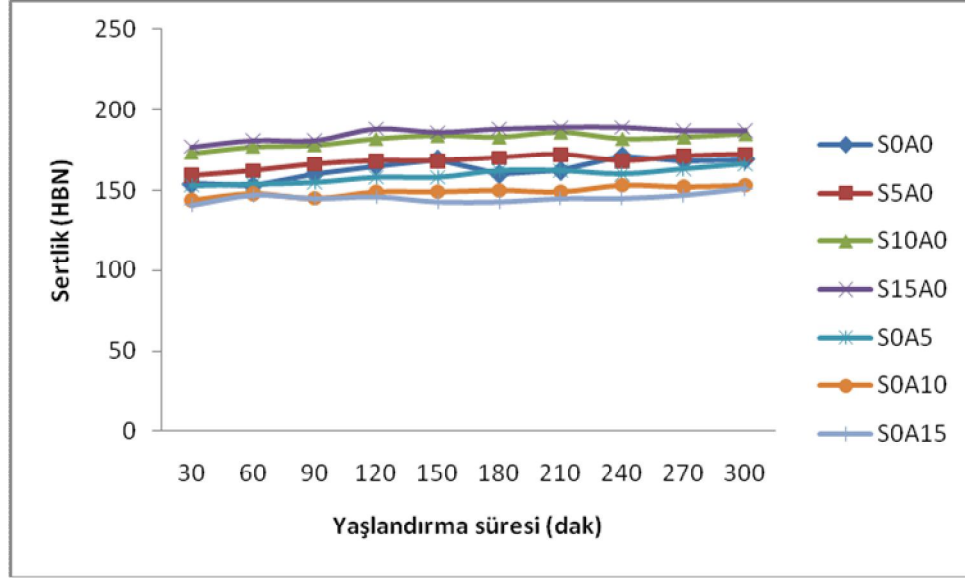
Şekil 6.21 Numunelerin işlem görmemiş halde, çözeltiye alma ve su verme işlemleri sonunda ve yapay yaşlandırma işlemleri sonunda alınan sertlik değerleri; a) Tek çeşit takviye elemanı ile takviye edilen kompozitler, b) karma kompozitler



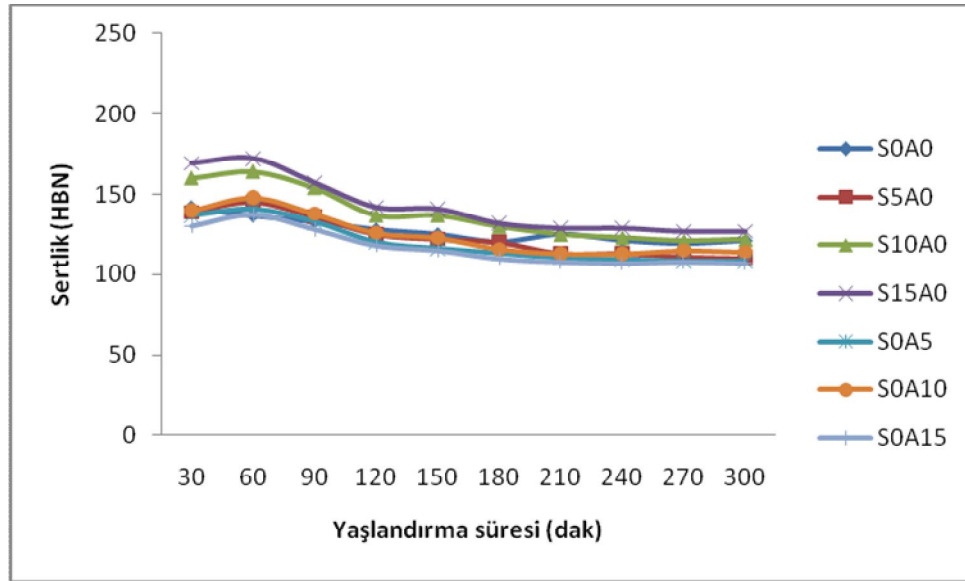
(b)

Şekil 6.21 (devamı) Numunelerin işlem görmemiş halde, çözeltiye alma ve su verme işlemleri sonunda ve yapay yaşlandırma işlemleri sonunda alınan sertlik değerleri; a) Tek çeşit takviye elemanı ile takviye edilen kompozitler, b) karma kompozitler

Numunelerin her biri için farklı yaşlandırma koşullarının sertlik değişimleri üzerindeki etkisinin incelenmesinden sonra, belirlenen yaşlandırma sıcaklıklarında numunelerin sertlik değişimlerinin birbirlerine göre durumları da karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Yapay yaşlandırma koşullarından en düşük sıcaklık değeri olan 120°C ve en yüksek sıcaklık değeri olan 200°C belirlenen yaşlandırma sıcaklıklarıdır. Bu sıcaklıkların belirlenmesinde sertlik değerleri arasındaki farkın en yüksek seviyede olması ve birbirlerine göre farklı değişim davranışı sergilemeleri etkili olmuştur. Tek çeşit seramik ile takviye edilen kompozit numunelere ait 120°C ve 200°C’de elde edilen sertlik değişimleri Şekil 6.22’de verilmiştir.



(a)



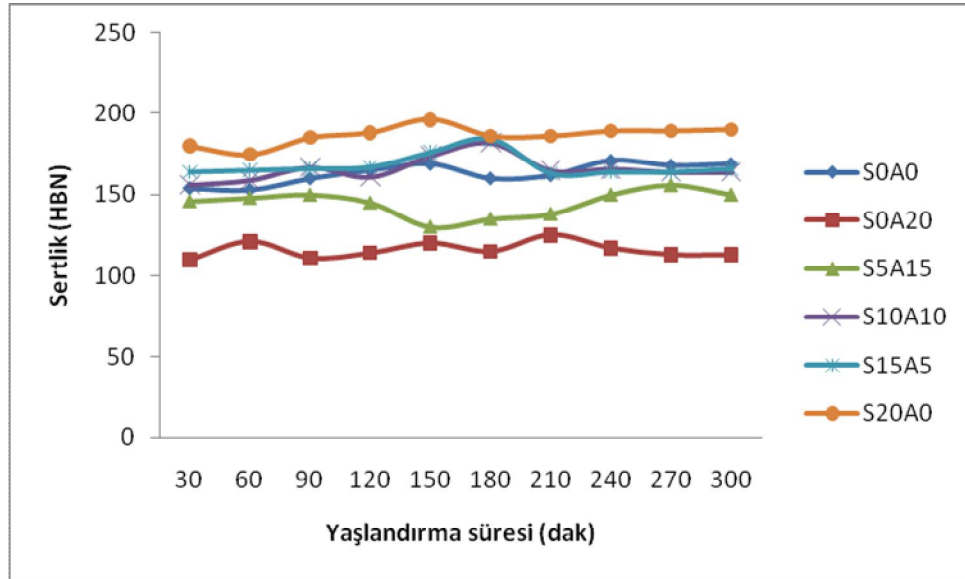
(b)

Şekil 6.22 Belirlenen yaşlandırma koşullarında tek çeşit seramik ile takviye edilen kompozit numunelere ait sertlik değişimleri; a) 120°C, b) 200°C

Tek çeşit seramik ile takviye edilen kompozit ve alaşım numunelerin 120°C ve 200°C'de yapılan yaşlandırma işlemlerindeki değişimler incelendiğinde, numunelerin 120°C'de elde edilen sertlik değerlerinin yaşlandırma işlemleri ile

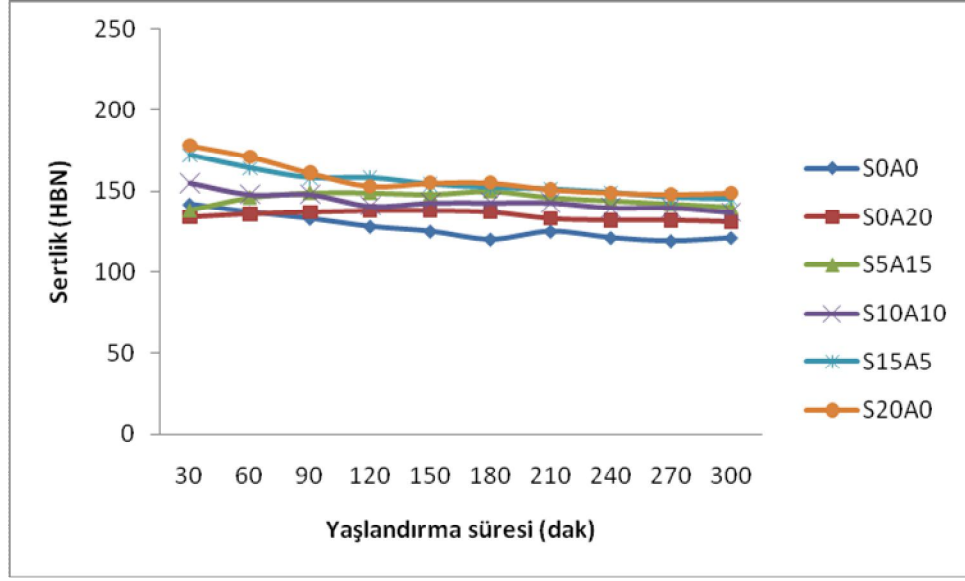
yüksek seviyelere ulaştıktan sonra kararlı davranış sergilerken, 200°C’de ise kısa zaman içinde yükselen sertlik değerlerinin ilerleyen yaşlandırma sürelerinde tekrar azalmaya başladığı görülmektedir. Sertlik değişimleri kendi içinde incelendiğinde, SiC takviyeli kompozitlerde artan seramik oranıyla sertlik seviyelerinin yükseldiği, fakat alümina takviyeli kompozitlerde artan takviye oranlarıyla sertlik seviyelerinin azaldığı görülmektedir. Diğer yandan, bütün numunelerin birbirleriyle benzer davranış sergilediği belirlenmiştir.

Tek çeşit seramik ile takviye edilen kompozitlerde olduğu gibi, karma kompozit numunelerin 120°C ve 200°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde gösterdikleri değişimler karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Numunelerin belirlenen yaşlandırma koşullarında sahip oldukları sertlik değişimleri Şekil 6.23’de verilmiştir.



(a)

Şekil 6.23 Belirlenen yaşlandırma koşullarında karma seramik takviyeli kompozit numunelere ait sertlik değişimleri; a) 120°C, b) 200°C



(b)

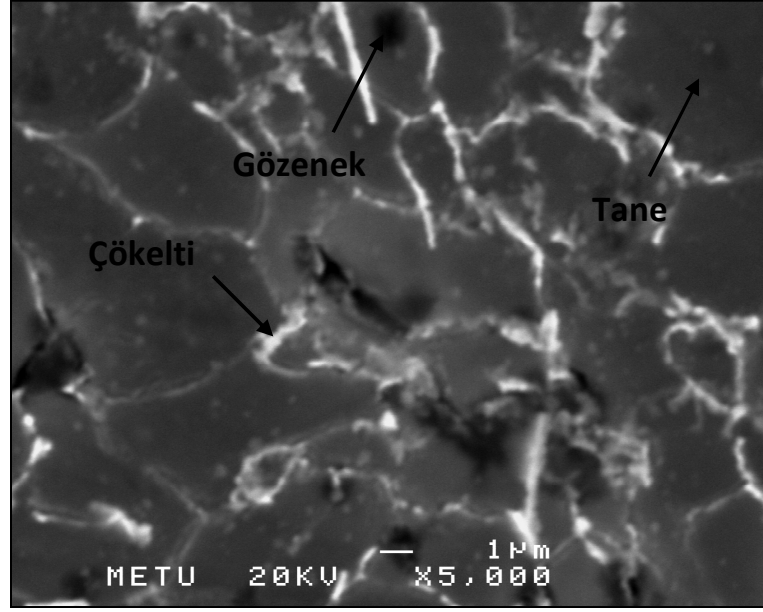
Şekil 6.23 (devamı) Belirlenen yaşlandırma koşullarında karma seramik takviyeli kompozit numunelere ait sertlik değişimleri; a) 120°C, b) 200°C

Karma kompozitlerin 120°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde farklı sertlik değişimleri gözlemlenirken, 200°C’de ise birbirleri ile uyumlu davranış sergiledikleri görülmektedir. 120°C’deki yaşlandırma işlemlerinde numunelerin belirgin sertlik artışları göstermediği, büyük ölçüde kararlı davranış sergiledikleri görülmektedir. Diğer yandan, 200°C’de ise numunelerin benzer sertlik davranışlarına sahip oldukları ve başlangıçta artan sertlik değerlerinin kısa zaman sonra azaldığı gözlemlenmiştir. Her iki yaşlandırma koşulunda sertlik seviyesinin SiC takviye oranıyla orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir.

7xxx serisi alüminyum alaşımları, yaşlanabilir alüminyum alaşımlarından olmaları sebebiyle çözeltiye alma ve su verme işlemlerinde sonra uygulanan yaşlandırma işlemleri ile sertlik davranışları belirgin biçimde değişmektedir. Çözeltiye alma işlemi ile ana yapıda oluşan aşırı doymuş katı çözeltiler, su verme işleminden sonra ikinci fazlar karışık bir dizi işlem ile çözeltiden ayrılmaya başlarlar. Ayrılma işlemi, kararlı fazların oluşmasına kadar geçen süre boyunca devam etmektedir. Fazların ayrışmasında ve denge fazların kurulmasında yapı içindeki element türleri, miktarları

ve işlemin yapıldığı sıcaklık belirleyici olmaktadır. Doğal yaşlandırma ve düşük sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemleri esnasında GP bölgeleri oluşurken, daha yüksek yaşlandırma sıcaklıklarında ise yarı kararlı  $\eta'$  ve kararlı  $\eta$  fazları oluşmaktadır. GP bölgeleri ve  $\eta'$  geçiş fazı yaşlandırma işlemlerinin başlangıç aşamalarında oluşurken,  $\eta$  denge fazı ise aşırı yaşlanma işleminde oluşmaktadır. Oluşan ikincil fazlar çökelti olarak tanımlanan ve ana yapıyı oluşturan elementlerin oluşturduğu bileşiklerdir [10]. Çökeltiler, numunelerin sertlik değerlerinin değişmesinde etkili olan temel faktördür. GP bölgelerinin ve geçiş fazlarının oluşması numunede sertlik değerlerinin yükselmesine sebep olurken, denge fazları ise sertlik seviyesinin azalmasına sebep olmaktadır. Yaşlandırma işlemlerinin başlangıcında yapıya büyük ölçüde homojen olarak dağılan ince fazlar ile yükselen sertlik değerlerinin, ilerleyen yaşlandırma sürelerinde ince fazların bir araya gelmesiyle kabalaşan taneler nedeniyle sertlik değerlerinde düşüşler görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde sertlik düşüşlerinin sebebi, çökeltilerin irileşmesi gösterilebilir.

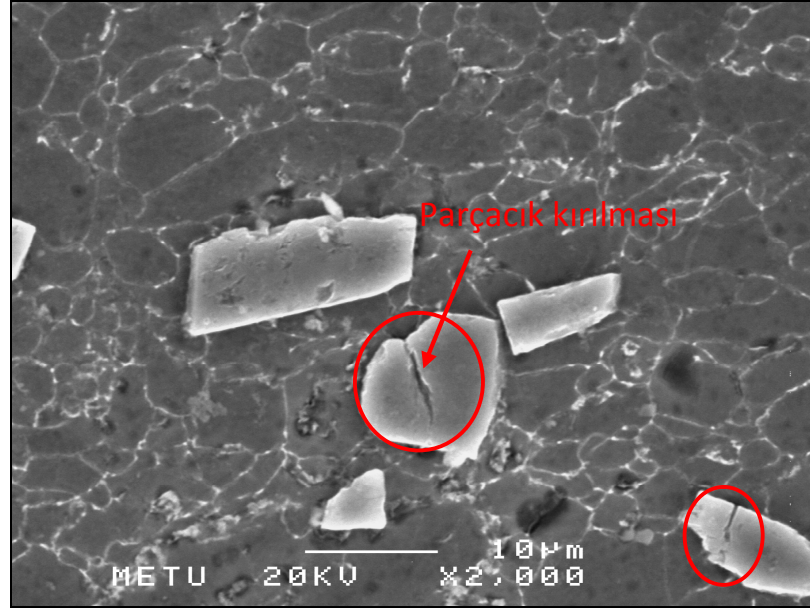
Çökeltiler ana yapıda çoğunlukla tane sınırlarında, numunenin kompozit numune olması durumunda ise takviye elemanları ile ana yapı arasında da oluşabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminden sonra alaşım numune üzerinden alınan SEM görüntüsü Şekil 6.24'de verilmiştir. Şekil 6.24'de verilen yüksek büyütmelerde alınan iç yapı görüntüsü incelendiğinde daha önce bahsedildiği gibi beyaz yapılar, yaşlandırma işlemi esnasında oluşan çökeltileri, gri bölgeler ise taneleri göstermektedir. Bunun yanında yapı üzerinde siyah olarak görünen kısımlar ise yapıda oluşan gözenekleri ifade etmektedir. Beklendiği gibi çökeltilerin büyük çoğunlukla tane sınırlarında oluştuğu görülmektedir. Tane sınırlarında oluşan çökeltiler oluştuğu bölgelerde gerinim değerlerinin ve buna bağlı olarak dislokasyon yoğunluklarını artırmaları yapının mukavemet özelliklerinin yükselmesine sebep olmaktadır.



Şekil 6.24 Alaşım numunede 120°C’de yapılan yaşlandırma işlemi esnasında oluşan çökeltiler (x5000)

Ana yapıda oluşan çökeltilerin dislokasyon hareketlerini engellemesine bağlı olarak yükselen mukavemet değerleri, ilave edilen seramik parçacıkların da yapı içerisinde dislokasyon hareketlerinin engelleyici etkisini artırmaları ile daha da yükselmektedir. Ana yapı olarak kullanılan Al alaşımının ısıl genleşme katsayısının seramik parçacıkların ısıl genleşme katsayısından yaklaşık altı kat daha fazla olması, iki yapı arasında su verme işleminden sonra ısıl uyumsuzluktan dolayı özellikle takviye elemanlarına yakın bölgelerde plastik gerinimler oluşmaktadır [4,8,12]. Seramik takviye elemanları ile ana yapının ısı iletim katsayıları arasındaki büyük fark yerel bölgelerde büyük gerilme değerlerinin oluşmasına neden olurken, parçacık çevresinde oluşan gerilme yoğunluğu, gevrek yapıdaki takviye elemanlarının üzerinde çatlak oluşmasına ve çatlakların ilerlemesiyle de kırılmaların oluşmasına neden olmaktadır. Takviye elemanları üzerinde oluşan parçacık kırılmasının SEM görüntüsü Şekil 6.25’de verilmiştir.





Şekil 6.25 Takviye elemanları üzerinde oluşan parçacık kırılması (x2000)

Meydana gelen parçacık kırılmaları, farklı bir gerilme yoğunluğu oluştururken bölgesel sünekleşmeye neden oldukları için dayanımın ve sünekliğin azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca kompozit malzemelerde dayanım ve süneklik değerlerini kontrol eden temel faktörlerden biri olmaktadır [72]. Daha önce yapılan çalışmalarda, parçacık kırılma mekanizmasının yalnızca yüksek dayanıma sahip metal esaslı kompozitlerde görüldüğü belirtilmesine rağmen, son yıllarda yapılan çalışmalarda bu durumun takviye oranına, plastik gerinim miktarına ve gerinim oranına bağlı olarak meydana geldiği anlaşılmıştır [72,73].

Seramik takviyeli kompozitlerde yaşlandırma işlemleri ile sertlik değerlerinde artışların görüldüğü belirlenmiştir. SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerde sertlik artışları incelendiğinde genel olarak SiC takviyeli kompozitlerde daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiş, ayrıca sertlik değerlerinin yaşlandırma süresi boyunca çok fazla azalma göstermediği belirlenmiştir. Diğer tarafta Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerde ise SiC takviyeli olanlara göre daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Farklı takviye elemanlarına sahip kompozitlerde farklı davranışların görülmesi, takviye

elemanlarının başta sertlik değerleri olmak üzere farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmaları ile açıklanabilir. Bunun yanında; alüminanın, magnezyum ve alüminyum alaşımlarında kararsız yapıda olduğu ve takviye elemanı ile ana yapı ara yüzeylerinde farklı kimyasal tepkimelerin meydana gelmesi, dayanım değerlerinin farklılık göstermesinde farklı sebeplerin de etkili olduğu belirlenmiştir. Alümina ve magnezyumun özellikle ara yüzeylerde kimyasal tepkimeye girmeleri sonucu ortamda MgO ve MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> bileşikleri oluşmaktadır. Oluşan bileşiklerin, ana yapıdan magnezyumun uzaklaşmasına neden olması ile ana yapının yaşlanmaya bağlı sertleşme kabiliyetinin düşmesine ve ara yüzey dayanımının azalmasına sebep olduğu anlaşılmıştır [74,75]. MgO bileşiğinin olduğu kimyasal tepkimeler yalnızca Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit malzemelerde alümina ve magnezyum arasında değil, benzer şekilde SiC takviyeli kompozitlerde ortamdaki oksijen ve ana yapıdaki magnezyum arasında da oluşabilmektedir [15]. Bu sonuçlar; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozitlerin, SiC takviyeli olanlara göre daha düşük sertlik değerlerine sahip olmalarını ve her iki kompozit türünde ilerleyen yaşlanma süresine bağlı olarak sertlik değerlerindeki azalmayı büyük ölçüde açıklanmış olmaktadır.

Numunelerin, farklı yaşlandırma koşullarında ve yaşlandırma sürelerinde en yüksek sertlik değerlerine ulaştıkları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, numunelerin farklı ideal yaşlandırma davranışlarına sahip olduklarını göstermektedir. Numunelerin yapay yaşlandırma işlemlerinde ulaştıkları en yüksek sertlik değerleri, bu değere ulaştıkları yaşlandırma sıcaklığı ve yaşlandırma süreleri Çizelge 6.3’de verilmiştir. Numuneler arasında en yüksek sertlik değerine, 204 HB ile S20A0 kodlu numunede rastlanmıştır. Çizelge genel olarak incelendiğinde, en yüksek sertlik değerlerine genellikle düşük sıcaklık değerleri olarak bilinen, 120°C ve 150°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde ve üçüncü saatten sonra elde edilmeye başlanmıştır. Yalnız, S0A20 numunesi diğerlerinden farklı olarak 180°C’de en yüksek sertlik değerine ulaşmıştır.

Çizelge 6.3 Numuneler için ideal yaşlandırma koşulları

Numune	En yüksek sertlik (HBN)	Yaşlandırma sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma süresi (dak)
S0A0	181	150	210
S5A0	172	120	210
S10A0	186	120	210
S15A0	189	120	210
S0A5	163	120	240
S0A10	153	120	240
S0A15	147	120	270
S0A20	144	180	180
S5A15	158	150	270
S10A10	180	120	180
S15A5	184	120	180
S20A0	204	150	270

İdeal yaşlandırma koşulları kullanılan takviye çeşidine ve takviye oranına göre değişkenlik göstermektedir. SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit numuneler kendi aralarında karşılaştırıldığında aynı yaşlandırma koşullarında en yüksek sertlik değerlerine aynı sürede ulaşırken, karma kompozit numuneler ise birbirlerinden farklı koşullarda en yüksek sertlik değerlerine ulaşmışlardır.

El-Baradie ve arkadaşları [4], yapmış oldukları çalışmada 7020 alüminyum alaşımı ve SiC takviyeli kompozitlerin 540°C’de yapmış oldukları çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra doğal ve yapay yaşlandırma işlemleri süresince numunelerin sertlik değişimlerini incelemişlerdir. Yapay yaşlandırma işlemleri 170°C’de 34 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada takviye oranları olarak %5 ve %10 oranları kullanılmıştır [4]. El-Baradie ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, numunelerin doğal yaşlandırma işleminin başlangıcında sertlik

değerlerinin yükseldiği ve kısa zaman içinde kararlı hale geldiği görülmektedir. Yapay yaşlandırma işleminde ise sertlik değerlerindeki artışın uzun süre devam ettiği ve en yüksek sertlik değerine ulaştıktan sonra tekrar azalmaya başladığı belirlenmiştir. Mevcut çalışmada doğal yaşlandırma işleminde elde edilen sertlik değişimleri, bu çalışmada elde edilen değişimler ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Yapay yaşlandırma işleminde ise, en yüksek sertlik değerine ulaştıkları yaşlandırma süreleri arasında farklılıklar görülürken, eğrilerin genel davranışlarının uyumlu oldukları görülmektedir. Bu çalışmadaki her iki yaşlandırma koşulunda da ulaşılan en yüksek sertlik değerleri, mevcut çalışmada ulaşılan değerlerden daha düşük seviyede kalmıştır.

7075 alüminyum alaşımı ve aynı alaşım esaslı SiC takviyeli kompozitlerin 120°C ve 200°C'de yapılan yaşlandırma işlemlerinde göstermiş oldukları sertlik değişimleri Cheu ve Lin tarafından incelenmiştir. 7075 alaşımının kontrol grubu olarak belirlendiği çalışmada, %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında SiC takviyeli kompozitlerin sertlik davranışları incelenmiştir [5]. 120°C'de yapılan yaşlandırma işleminde 200°C'de yapılan yaşlandırma işlemine göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Her iki koşulda da en yüksek sertlik değerlerine %40 takviyeli kompozitlerde ulaşılrken, bütün numunelerin benzer sertlik davranışı sergiledikleri görülmektedir. Düşük sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işleminde daha uzun zamanda en yüksek sertlik değerine ulaşılmıştır. 200°C'de yapılan yaşlandırma işleminde artan takviye oranıyla numunelerin ulaştıkları sertlik değerleri artış gösterirken, 120°C'de ise böyle bir durum görülmemektedir. Alaşım numunenin diğer numunelere oranla daha yüksek sertlik değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, takviye oranının kritik seviyeyi geçmesinden sonra sertlik değerlerinin yaşlandırma işlemleri ile değişmediği görülmektedir. Yüksek takviyeli numunelerin yaşlandırma işleminin başlangıç aşamasında sahip oldukları sertlik seviyesini bütün işlem boyunca korudukları belirlenmiştir.

Her iki koşulda elde edilen sertlik değışimleri mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar ile benzerlik taşımaktadır. 120°C’de yapılan yaşlandırma işlemi için, mevcut çalışmada daha erken en yüksek sertlik değerlerine ulaşan numunelerin ulaştıkları sertlik değerlerini ilerleyen yaşlandırma zamanlarında korudukları görülürken, bu çalışmada ise ulaşılan en yüksek sertlik değerlerinden sonra numunelerin sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca mevcut çalışmada artan takviye oranları ile sertlik değerlerinin yükselmesine rağmen, bu çalışmada farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. 200°C’de yapılan yaşlandırma işleminde ise, her iki çalışmanın büyük ölçüde benzer davranış gösterdikleri görülmektedir.

Sertlik deneyleri sonunda elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, uygulanan ısı işlemler sonunda numunelerin farklı sertlik davranışları sergiledikleri görülmüştür. Genel olarak en yüksek sertlik değerlerine %20 SiC takviyeli S20A0 numunesinde rastlanırken, benzer şekilde en yüksek sertlik değerlerine 120°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde ulaşılmıştır. Doğal yaşlandırma işlemlerinde ulaşılan en yüksek sertlik değerleri, tek çeşit seramik takviyeli kompozitlerde yapay yaşlandırma işlemlerinde elde edilen değerlerden daha yüksek seviyede oldukları belirlenmiştir. Karma kompozitlerde ise mevcut doğal yaşlandırma süresinde yapay yaşlandırma işlemlerine göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Takviye oranının artması numunelerde sertlik değerlerinin artmasına neden olurken, yaşlandırma sıcaklık değerlerinin artması ise ulaşılan sertlik seviyesini düşürmüştür. SiC takviyeli kompozitlerin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli olanlara oranla daha yüksek sertlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Karma kompozit numunelerde tek çeşit seramik takviyeli kompozitlere oranla daha karmaşık davranışlar gözlemlenmiştir. Karma kompozitlerde sertlik seviyesinin artmasında SiC takviye oranının etkili olduğu görülmektedir.

Sertlik davranışlarının farklı olmasında yaşlandırma sıcaklığı ve süresi, takviye elamanı ve takviye oranının etkili olduğu belirlenmiştir. Her numune farklı yaşlandırma sıcaklığında ve farklı yaşlandırma süresi sonunda en yüksek sertlik

değerine ulaşırken, ulaşılan sertlik değerleri de büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Buradan anlaşılacağı gibi ideal yaşlandırma sıcaklığının, her numune için farklı olduğu görülmüştür. Bütün numuneler için aynı ana yapının kullanılması ve aynı üretim ve deney parametrelerinin kullanılması, yaşlanma karakteristiğinin takviye elemanı ve takviye oranı ile ilişkili olduğu söylenebilir.

### 6.5. Üç Nokta Eğme Deneyleri

Üretilen numunelerin farklı koşullardaki sertlik davranışları belirlendikten sonra numunelere ait en yüksek sertlik değerlerinde üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerle numunelerin akma dayanımları belirlenmiştir. Eğme deneyleri, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve karma seramik takviyeli kompozit numuneler olmak üzere üç grupta gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda numunelerin akma dayanım değerleri belirlenirken, elde edilen standart sapma miktarları göz önünde bulundurulmuştur. Numunelerin standart sapma değerleri otuzdan daha yüksek çıktığı durumlarda deneyler, yeni deney numuneleri ile tekrarlanmıştır. Akma dayanımlarının belirlenmesinde numunelere ait standart sapma değerleri Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.4 Numunelerin akma dayanım değerleri için belirlenen standart sapma değerleri

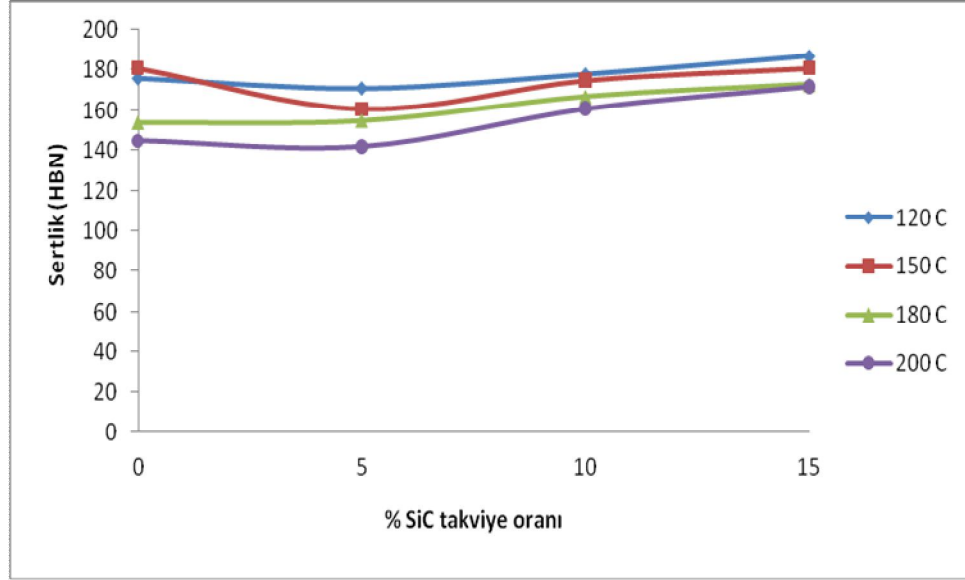
	<b>S5A0</b>	<b>S10A0</b>	<b>S15A0</b>	<b>S0A5</b>	<b>S0A10</b>	<b>S0A15</b>
120°C	0,6	22	8	26,7	11,5	20,1
150°C	6,5	10,6	29,5	29,4	6,6	5,1
180°C	1	15,1	5,1	26,6	1,5	21,1
200°C	29,5	27,4	15	21,7	27	22,8

	<b>S0A0</b>	<b>S0A20</b>	<b>S5A15</b>	<b>S10A10</b>	<b>S15A5</b>	<b>S20A0</b>
120°C	29,4	3,2	23	26,7	13,6	20
150°C	29,4	8,1	4,6	13	6	18
180°C	29,9	8,9	17,8	26,4	2,5	30
200°C	29,9	28,4	8,3	21,9	27,1	13,6

Standart sapma değerlerinin geniş aralıkta olması, numunelerin toz metal parçalar ve kompozit numuneler olmaları sebebiyle mükemmel yapıda olmamalarıyla açıklanabilir. Numunelerin üretimleri esnasında içyapıda oluşan hatalar ile parçacık ve ana yapı ara yüzelerindeki ayrışmalar ve çentik etkileri gibi nedenlerle dayanım değerleri farklılık göstermektedir.

İçerdikleri takviye türüne göre üç kısma ayrılan numunelerden, alaşım ve SiC takviyeli kompozitlere ait farklı sıcaklıklardaki en yüksek sertlik değerleri Şekil 6.26'da belirtilmiştir.

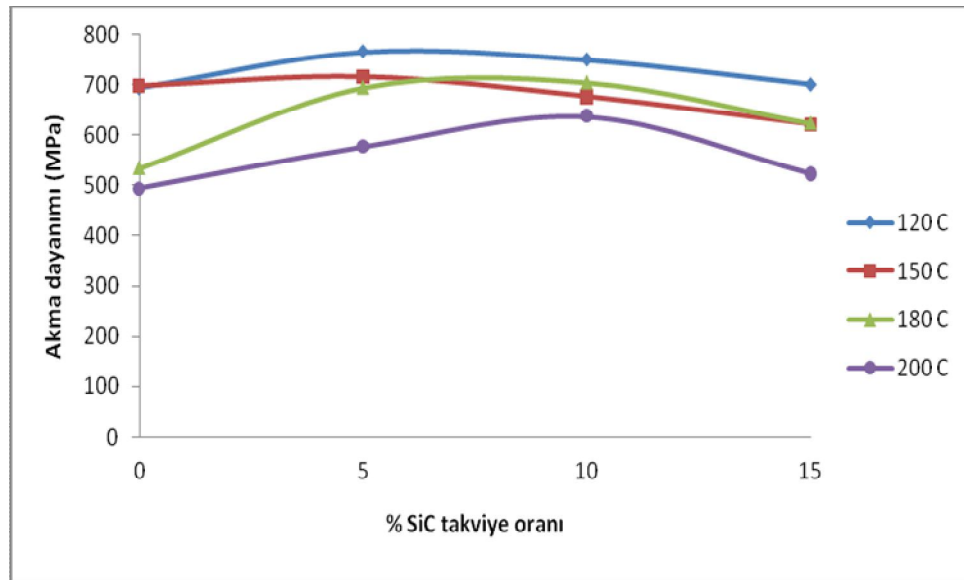


Şekil 6.26 SiC takviyeli kompozitlerin farklı yaşlandırma sıcaklıklarında ulaştıkları en yüksek sertlik değerleri

SiC takviyeli kompozitlere ait en yüksek sertlik değerleri incelendiğinde, artan seramik takviye oranı ile sertlik değerlerinin arttığı fakat alaşım numunenin ulaştığı en yüksek sertlik değerlerinin, %5 SiC takviyeli kompozitlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. SiC takviyeli kompozitler arasında S15A0 numunesi en yüksek sertlik değerine sahiptir. En yüksek sertlik değerlerinin genel olarak, artan

yaşlandırma sıcaklığı ile birlikte azaldığı görülmektedir. 120°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde belirlenen numune için en yüksek sertlik değerleri elde edilirken, 200°C’de yapılan yaşlandırma işleminde ise en düşük değerler elde edilmiştir.

SiC takviyeli kompozitlerin sertlik davranışları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyleri ile belirlenen akma dayanımları Şekil 6.27’de verilmiştir.



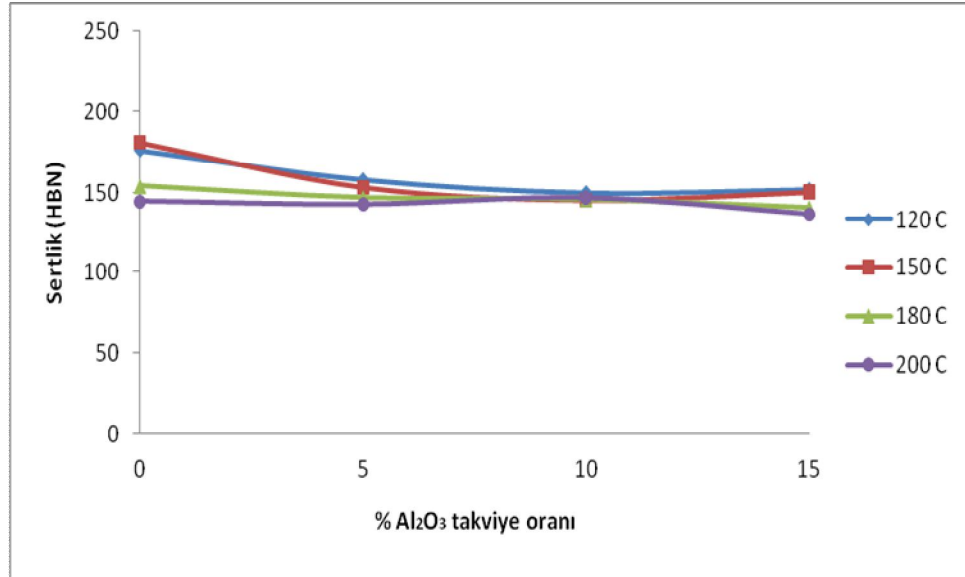
Şekil 6.27 SiC takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerindeki akma dayanımları

Numunelere ait akma dayanımları yaşlandırma koşulları göz önünde bulundurulduğunda incelendiğinde, dayanım değerlerinin en yüksek sertlik değerleri ile paralellik göstermediği görülmüştür. SiC takviyeli kompozitlere ait en yüksek sertlik değerleri ile bu değerlerin elde edildiği koşullardaki akma dayanımları beraber ele alındığında; düşük sertlik değerlerinde daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Bütün yaşlandırma sıcaklıklarında en yüksek dayanım değerlerine genellikle %5 takviye oranına sahip numunelerde ulaşılmıştır. Artan takviye oranları



ile birlikte azalma eğilimi gösteren dayanım değerleri, %15 takviye oranında çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra elde edilen dayanım değerlerine göre daha düşük seviyelere inmiştir.

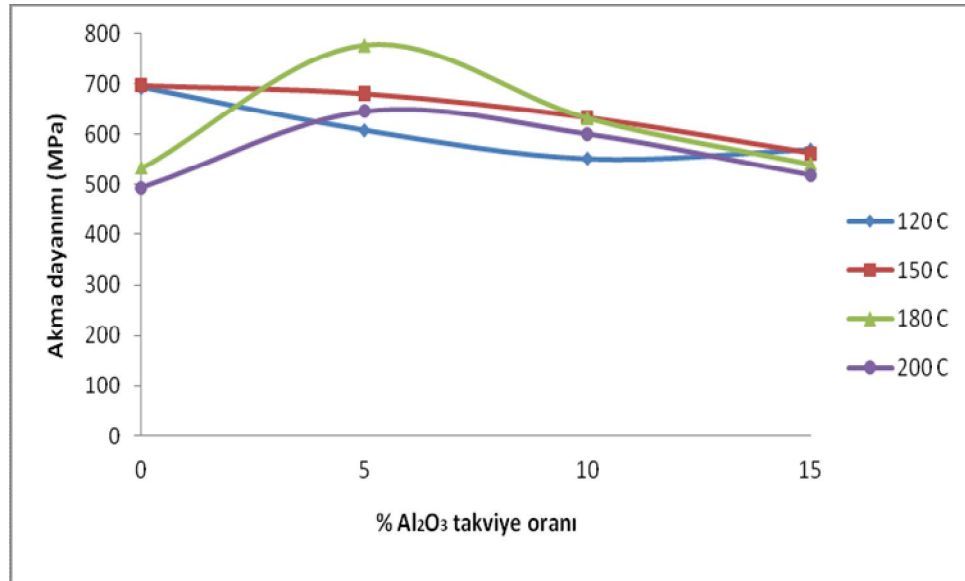
Lee ve Kwon [76], yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı Al alaşımına gevrek yapıda takviye elemanları ilave edilerek oluşturulan kompozitlerde artan takviye oranları ile kompozitlerin akma dayanım değerlerinde azalma gözlemlemiştir. Gevrek yapıdaki takviye elemanlarının ilavesiyle ana yapıda, özellikle takviye parçacıklarına yakın bölgelerde genişlemelere bağlı oluşan gerinim artışı, parçacıklar üzerinde büyük gerilmelerin oluşmasına neden olur. Artan gerilme değerleri takviye parçacıklarında kırılmaların görülmesine, kırılmaların ise kompozit malzemenin toplam yük taşıma kapasitesini düşürmesine neden olduğu düşünülmektedir [76]. Artan takviye oranlarında dayanım değerlerinin azalması, kompozit numunelerde yük taşıma kapasitelerinin azalması ile açıklanmaktadır. Alaşım, %5, 10 ve %15  $Al_2O_3$  takviyeli numunelere ait farklı yaşlandırma koşullarında elde edilen en yüksek sertlik değerlerinin gösterildiği eğriler Şekil 6.28’de verilmiştir.



Şekil 6.28  $Al_2O_3$  takviyeli kompozitlerin farklı yaşlandırma sıcaklıklarında ulaştıkları en yüksek sertlik değerleri

$Al_2O_3$  takviyeli numunelere ait en yüksek sertlik değerleri karşılaştırıldığında; bütün yaşlandırma koşulları için değerlerin, büyük ölçüde birbirine yakın oldukları görülmektedir.  $120^\circ C$  ve  $150^\circ C$ 'de yapılan yaşlandırma koşullarında alaşım numune için yüksek olan en yüksek sertlik değerleri, artan takviye oranı ile azalma gösterirken,  $180^\circ C$  ve  $200^\circ C$ 'de yapılan yaşlandırma işlemlerinde elde edilen en yüksek sertlik değerlerinin bütün numunelerde değişmediği görülmektedir. Özellikle %10 takviye oranına sahip numune için, bütün yaşlandırma koşullarında aynı en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir.

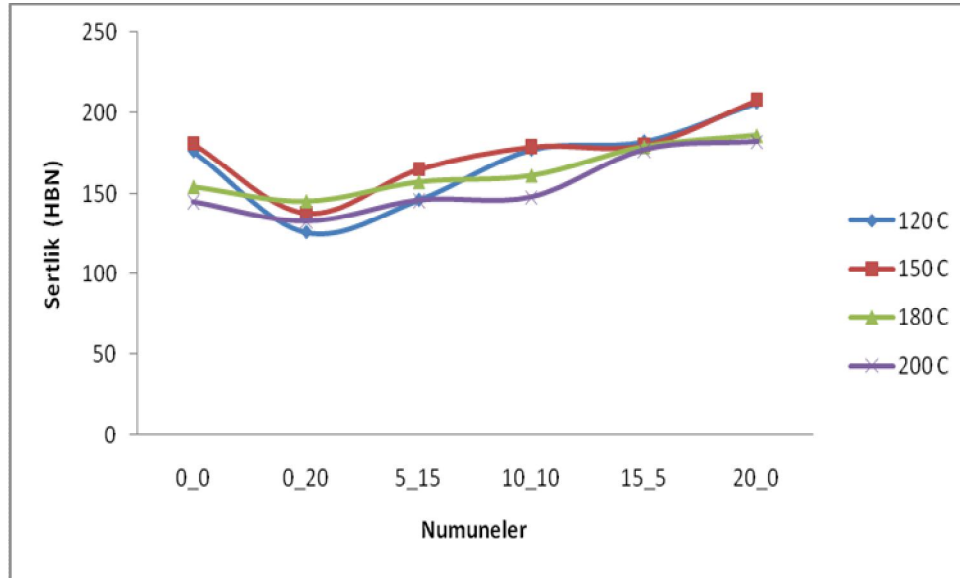
En yüksek sertlik değerlerinin belirlendiği farklı yaşlandırma koşullarında, alümina takviyeli numunelere üç nokta eğme testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.29'da verilmiştir.



Şekil 6.29  $Al_2O_3$  takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerindeki akma dayanımları

$Al_2O_3$  takviyeli kompozit malzemelerin üç nokta eğme deneyleri sonunda belirlenen dayanım değerleri incelendiğinde en yüksek dayanım değerine %5 takviye oranına sahip numunenin  $180^\circ C$ 'de yapılan yaşlandırma işleminde rastlanmıştır. Eğrilere

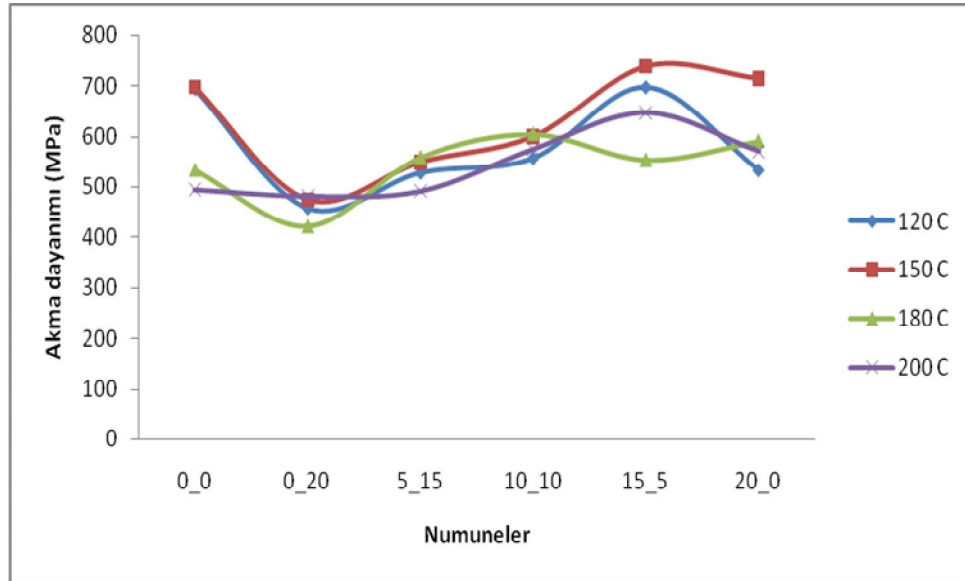
genel olarak bakıldığında düşük sıcaklık olarak adlandırılan 120 ve 150°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde dayanım eğrilerinin kısmen benzerlik gösterdiği, benzer durumun yüksek sıcaklık olarak adlandırılan 180 ve 200°C’deki dayanım eğrilerinin kendi aralarında da bulunduğu görülmektedir. Alaşım numune için 120 ve 150°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde 700 MPa seviyelerinde olan dayanım değerleri artan takviye oranı ile birlikte azalma göstermektedir. 180 ve 200°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde alaşım numunenin dayanım değerleri yaklaşık 500 MPa dolaylarında iken, %5 takviye oranında her iki sıcaklık koşulunda da en yüksek dayanım değerlerine ulaşılmaktadır. Bunun yanında artan takviye oranlarına bağlı olarak dayanım değerlerinde azalma görülürken ve %15 takviye oranına sahip numuneler ile alaşım numunelerin dayanım değerlerinin yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde yaklaşık aynı oldukları görülmüştür. Numunelerin dayanım eğrileri, en yüksek sertlik değerlerinin eğrileri ile beraber incelendiğinde iki eğri arasında tutarlı bir davranış görülmemektedir. Karma kompozitlere ait farklı sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma sıcaklıkları sonunda elde edilen en yüksek sertlik değerleri Şekil 6.30’da verilmiştir.



Şekil 6.30 Karma kompozitlerin farklı yaşlandırma sıcaklıklarında ulaştıkları en yüksek sertlik değerleri

Karma kompozitlerin en yüksek sertlik değerleri incelendiğinde; genel olarak bütün yaşlandırma sıcaklıkları için sertlik eğrileri benzer davranış sergilemektedir. Bütün yaşlandırma sıcaklıkları için en düşük sertlik seviyesine %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numunede rastlanırken, benzer şekilde en yüksek sertlik seviyesine ise %20 SiC takviyeli numunede rastlanmıştır. Diğer taraftan her bir yaşlandırma sıcaklığında SiC takviye oranının artmasıyla ulaşılan en yüksek sertlik değerlerinde artış görülmektedir. Bu durumda en yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesinde SiC seramiğinin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramiğine oranla daha etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca takviye elemanlarının kullanılmadığı alaşım numunenin farklı koşullar için birçok kompozit numuneden daha yüksek sertlik değerlerine sahip olabileceği görülmüştür.

Kompozit numunelerin farklı koşullarda elde edilen en yüksek sertlik değerlerine karşı gelen dayanım değerleri Şekil 6.31’de verilmiştir.



Şekil 6.31 Karma kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerindeki akma dayanımları

Karma kompozit numunelerin dayanım değerlerini gösteren eğriler, en yüksek sertlik değerleri göz önünde bulundurularak incelendiğinde, her iki eğri arasında büyük ölçüde benzerlikler görülmektedir. Yaklaşık bütün yaşlandırma sıcaklıklarında

alaşım numune için yüksek olan dayanım değerleri,  $Al_2O_3$  takviye oranının en yüksek olduğu numune için en düşük seviyelere inerken, artan SiC takviye oranına bağlı olarak belirgin biçimde artış göstermektedir. Dayanım değerlerini gösteren eğriler ile sertlik değerlerini gösteren eğriler arasındaki en önemli fark en yüksek sertlik değerine %20 SiC takviye oranına sahip numunelerde rastlanırken, en yüksek dayanım değerine ise %15 SiC-%5  $Al_2O_3$  takviye oranlarına sahip numunelerde rastlanmaktadır. Takviye elemanlarının kullanılmadığı alaşım numunenin dayanım özellikleri diğer karma kompozit numunelerin birçoğunun dayanım özelliklerinden daha iyi olduğu belirlenmiştir.

En yüksek sertlik değerleri ve bu değerlerde ulaşılan akma dayanım değerleri arasındaki ilişki göz önünde bulundurulduğunda, sertlik değerlerinin artması akma dayanım değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Yüksek değerlerde daha düşük dayanım değerlerinin elde edilmesinin sebebi olarak, parçacık kırılmasına bağlı numunelerde yük taşıma kapasitesinin düşmesi ve deneyler esnasında oluşan çentik etkisinin oluşması gösterilebilir.

Numunelerin dayanım özelliklerine genel olarak bakıldığında, farklı yaşlandırma koşullarında ve takviye oranlarında farklı dayanım değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Yaşlandırma sıcaklığı farklı bileşimlerdeki numunelerde farklı davranışların oluşmasına neden olmuştur. Örneğin, bir numune için en yüksek dayanım değerine  $120^{\circ}C$ 'de yapılan yaşlandırma işleminde ulaşılrken, bir başka numunede  $180^{\circ}C$ 'de yapılan yaşlandırma işleminde ulaşılmıştır. Böylece belirlenen bir yaşlandırma sıcaklığının bütün numuneler için ideal bir sıcaklık değeri olmadığı, takviye elemanının çeşidi ve oranının da en yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesinde etkili oldukları belirlenmiştir. Diğer önemli nokta ise numunelerin sertlikleri ile dayanım değerleri arasında birebir bir ilişkinin bulunmamasıdır. Kısaca, sertlik değerinin yüksek olması dayanım değerinin de yüksek olmasını ya da tam tersine sertlik değerinin düşük olması dayanım değerinin de düşük olmasını gerektirmemektedir.

Sharma ve arkadaşları [40], 7xxx serisi alüminyum alaşımı ve SiC ile takviye edilen kompozit numunelerin farklı yaşlandırma sıcaklıklarında en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği sürede yapılan çekme deneyleri ile numunelerin akma dayanımlarını belirlemişlerdir. 120°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde, 200°C’de yapılanlara göre daha yüksek akma dayanımları elde edilmiştir. Her iki yaşlandırma işleminde de kompozit numunelerin alaşım numunelerden daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ana yapın farklı bileşimde olması nedeniyle takviye oranları arasında karşılaştırma yapmak mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada elde edilen akma dayanım değerleri Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.5 7xxx serisi Al alaşımı ve SiC takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerinde akma dayanım değerleri [40]

	<b>12Zn-1,3Cu-0,3Mn-0,2Cr</b>	<b>12Zn-1,3Cu-0,3Mn-0,2Cr-12,7SiC</b>
120°C	755,6 MPa	758 MPa
150°C	697,6 MPa	699 MPa
	<b>9Zn-1,3Cu-0,3Mn-0,22Cr</b>	<b>9Zn-1,3Cu-0,3Mn-0,22Cr-13,6SiC</b>
120°C	732 MPa	750 MPa
150°C	697,6 MPa	710,6 MPa

Mevcut çalışmada elde edilen akma dayanımları, Sharma ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada elde edilen dayanım değerleri ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Ravi ve arkadaşları [14], 7075 alüminyum alaşımı ve SiC takviyeli kompozitlerin yaşlanma karakterini incelemiş ve buna bağlı olarak numunelerin mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. En yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği yaşlanma koşulunda, çekme deneyi ile numunelerin akma dayanımları belirlenmiştir [14]. Belirlenen akma dayanımları ve elde edildikleri yaşlanma sıcaklığı ve süresi ile birlikte Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6 7075 Al alaşımı ve SiC takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerindeki akma dayanımları [14]

Numune	Yaşlandırma sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma süresi (saat)	Akma dayanımı (Mpa)
Al-6Zn-2,5Mg-1,5Cu (7075)	135	16	533
Alaşım + %9 SiC	135	16	518
Alaşım + %18 SiC	135	16	505

Ravi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada alaşım ve kompozit numunelerin aynı sürede en yüksek sertlik değerine ulaştıklarını belirlemişlerdir. Numunelerin artan takviye oranıyla birlikte akma dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak alaşım numunede en yüksek akma dayanım değeri elde edilmiştir. Mevcut çalışmada 120°C ve 150°C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde en yüksek akma dayanımlarına alaşım numune ve %5 SiC takviyeli numunede rastlanırken, artan takviye oranı ile birlikte değerlerin azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Ravi ve arkadaşlarının 135°C’de yapmış oldukları çalışmada elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar büyük ölçüde benzerlik gösterirken, akma dayanım değerlerinin ulaştığı seviye olarak farklılık göstermektedir. Farklılığın oluşmasında ana yapının bileşim ve takviye oranlarının farklı olması etkili olmuştur.

Seramik parçacıklar, kompozit malzemelerde dayanım artışını doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki yolla gerçekleştirmektedir. Numuneye uygulanan yükün ana yapı içerisinde bulunan seramik parçacıklara transferi ile taşınması, doğrudan dayanım artışı olarak tanımlanmaktadır. Dolaylı olarak ise yapı içerisinde bulunan parçacıkların özellikle kendilerine yakın bölgelerde dislokasyon yoğunluklarını artırmaları beraberinde dayanım artışını getirmektedir. Diğer taraftan, parçacık yüzeylerinde ve ara yüzeylerde oluşan mikro çatlaklar ve kırılmalar yapıda dayanım düşüşüne ve mekanik özelliklerin kötüleşmesine neden olmaktadır [75].

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Doğal yaşlandırma işlemleri sonunda takviye çeşidi ve oranı önemli olmaksızın bütün numunelerde benzer sertlik davranışları elde edilmiştir.
- Farklı takviye oranlarına sahip numuneler için ideal yaşlandırma sıcaklıkları farklılık göstermektedir.
- En yüksek sertlik değerlerine %20 SiC takviyeli kompozit numunelerde rastlanmıştır.
- En düşük sertlik değerlerine %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit numunelerde rastlanmıştır.
- Tek çeşit takviye elemanı ile takviye edilen kompozit numunelerde en yüksek sertlik değerleri 120°C'de yapılan yaşlandırma işlemleri sonunda elde edilmiştir.
- Tek çeşit takviye elemanı ile takviye edilen kompozit numunelerde en düşük sertlik değerleri 200°C'de yapılan yaşlandırma işlemleri sonunda elde edilmiştir.
- Yapay yaşlandırma işlemlerinde artan yaşlandırma sıcaklıklarına bağlı olarak ulaşılan sertlik seviyelerinde azalma görülmektedir.
- SiC takviyeli numunelerde en yüksek sertlik değerleri arttıkça, genel olarak dayanım değerlerinde azalma görülmektedir.
- En yüksek dayanım değerlerine %5 SiC takviyeli kompozit numunelerde rastlanmıştır.
- En düşük dayanım değerlerine %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit numunelerde rastlanmıştır.
- Karma kompozit numunelerde düşük en yüksek sertlik değerlerinde düşük dayanım değerleri elde edilmiştir.
- Karma kompozit numunelerde en yüksek dayanım değerlerine %15 SiC - %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numunelerde rastlanmıştır.



- Karma kompozit numunelerin bütün yaşlandırma koşullarında yakın sertlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir.
- Doğal yaşlandırma işlemleri süresince ulaşılan en yüksek sertlik değerlerinin tek çeşit seramik ile takviye edilen numunelerde ulaşılan en yüksek sertlik değerleri oldukları belirlenmiştir.
- Karma kompozitlerde mevcut doğal yaşlandırma süresi içerisinde, doğal yaşlandırma işlemlerinde yapay yaşlandırma işlemlerine göre daha düşük değerler elde edilmiştir.
- Alınan iç yapı görüntülerinde en yüksek sertlik değerinin daha yüksek olduğu yaşlandırma koşullarında daha fazla çökelti oluştuğu görülmektedir.
- Yaşlandırma işlemlerine bağlı olarak oluşan çökeltilerin tane sınırlarında ve ara yüzeylerde oluştukları belirlenmiştir.
- Çökelti üzerinden alınan analizlerde, oluşan çökeltilerin büyük çoğunluğunun alüminyum ve bakır esaslı oldukları görülmektedir.

Yapılan çalışmanın devamında yapılması önerilen ek çalışmalar ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- En yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği yaşlandırma koşullarında aşınma deneyleri ile numunelerin aşınma dayanımları incelenebilir.
- Üretilen numunelere daha sonra eş kanal açılı presleme (EKAP) deneyleri uygulanarak numunelerde oluşan mukavemet artışları incelenebilir.
- Belirlenen yaşlandırma koşullarında numunelere darbe ve kırılma deneyleri yapılarak, numunelerin tokluk ve kırılma tokluğu değerleri belirlenebilir.
- Yüksek dayanım değerlerine sahip numuneler seçilerek, bu numunelerin balistik dayanımları incelenebilir.
- Aynı bileşimlere sahip numuneler, toz enjeksiyon kalıplama gibi farklı toz metalurjisi yöntemleri ile üretilerek, üretim yöntemleri arasındaki üstün ve zayıf noktalar araştırılabilir.

- Elde edilen sonuçlar ile optimizasyon çalışması yapılarak her numune için ideal yaşlandırma sıcaklığı ve süresi belirlenebilir.
- Yaşlandırma işlemleri ile numunelerde mukavemet artışına sebep olan çökeltilerin ve ikincil fazların yapıları ve oluşumları daha detaylı olarak incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1]. Sanjay K. Mazumdar, Composites Manufacturing; Materials, Product and Process Engineering, CRC Press, Florida, 2001.
- [2]. Imielinska, K. and Le Petitcorps Y., Fabrication and Properties of Hybrid SiC/Al Composite for Tribological Applications, *Advanced Engineering Materials*, 7, No.6, 524-529, 2005.
- [3]. Min, Kyung Ho et al, Mechanical Properties of Sintered 7xxx Series Al/SiCp Composites, *Materials Letters*, 61, 2544–2546, 2007.
- [4]. El-Baradie, Z.M. et al., Accelerated Aging Processes in SiC-7020 Aluminium Composite, *Journal of Materials Processing Technology*, 79, 1–8, 1998.
- [5]. Sheu, Chai-Yuan, Lin, Su-Jien, Ageing Behaviour of SiCp-Reinforced AA 7075 Composites, *Journal of Materials Science*, 32, 1741-1747, 1997.
- [6]. Sha, Gang, Cerezo, Alfred, Early-Stage Precipitation in Al–Zn–Mg–Cu Alloy (7050), *Acta Materialia*, 52, 4503–4516, 2004.
- [7]. Dasgupta, Rupa, Meenai, Humaira, SiC Particulate Dispersed Composites of an Al–Zn–Mg–Cu Alloy: Property Comparison with Parent, Alloy, *Materials Characterization*, 54, 438–445, 2005.
- [8]. Daouda, A., Reif, W., Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulate on the Aging Response of A356 Al-Based Composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 123, 313–318, 2002.
- [9]. Kiourtsidis, Grigoris E. et al, Aging Response of Aluminium Alloy 2024/Silicon Carbide Particles (SiCp) Composites, *Materials Science and Engineering A*, 382, 351–361, 2004.
- [10]. Fan, Xigang et al, Characterization of Precipitation Microstructure and Properties of 7150 Aluminium Alloy, *Materials Science and Engineering A*, 427, 130–135, 2006.
- [11]. Berg, L.K. et al, GP-Zones in Al–Zn–Mg Alloys and Their Role in Artificial Aging, *Acta Materialia*, 49, 3443–3451, 2001.
- [12]. Guo, J., Yuan, X., The Aging Behavior of SiC/Gr/6013Al Composite in T4 and T6 Treatments, *Materials Science and Engineering A*, 499, 212–214, 2009.
- [13]. Shorowordi, K.M. et al, Microstructure and Interface Characteristics of B4C, SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforced Al Matrix Composites: A Comparative Study, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 738–743, 2003.
- [14]. Kumar, N.V. Ravi, Dwarakadasa E.S., Effect of Matrix Strength on the Mechanical Properties of Al–Zn–Mg/SiCp Composites, *Composites: Part A*, 31, 1139–1145, 2000.
- [15]. Hong, S.I., Gray, G.T., Microstructure and Microchemistry of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy Matrix-20 vol. % SiC Composite, *Acta Metallurgy*, 40, 3299-3315, 1992.
- [16]. Thomas, M.P., King, J.E., Comparison of the Ageing Behaviour of PM 2124 Al Alloy and Al-SiC Metal-Matrix Composite, *Journals of Materials Science*, 29, 5272-5278, 1994.

- [17]. Philip O. Ransone, Carbon-Carbon Cylinder Block, United States Patent, Patent Number; 5,769,046, 1998.
- [18]. Matthews, F., Rawlings, R., Composite Materials: Engineering and Science, CRC Press, Florida, 1999.
- [19]. Vukçeviç, Mira and Delijic, Kemal, Some New Directions in Aluminium-Based PM Materials for Automotive Applications, MTAEC9, 36(3-4)101(2002), ISSN 1580-2949.
- [20]. Chawla, K., Composite Materials Science and Engineering, Springer-Verlag, USA, 1998.
- [21]. Mortensen, A., Concise Encyclopedia of Composite Materials, Elsevier, Lausanne, 2007.
- [22]. Soy, Uğur, Kompozit Malzemeler, Ders Notu, Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ekim, 2009.
- [23]. Clyne, T., Comprehensive Composite Materials Vol 3 - Metal Matrix Composites, Elsevier, WW, 2004.
- [24]. İbrahim, İ.A., Mohamed, F.A. and Lavernia, E.J., Particulate Reinforced Metal Matrix Composites - a Review, Journal of Materials Science, 26, 1137-1156, 1991.
- [25]. Tung, Simon C., McMillan, Michael L., Automotive Tribology Overview of Current Advances and Challenges for the Future, Tribology International, 37, 517-536, 2004.
- [26]. Sahin, Y., "The Mechanical and Wear Behavior of (SiC) Fibre-Reinforced Composite Metarials", Ph. D. Thesis, The University of Aston in Birmingham Institute of Science Technology, U.K, 28-31, 1994.
- [27]. Lloyd, D.J., Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites, International Materials Reviews, 39 (1), 1-21, 1994.
- [28]. Srivatsan, T.S. et al, Processing Techniques for Particulate-Reinforced Metal Matrix Composites, Journal of Materials Science, 26, 5965-5978, 1991.
- [29]. Yıldızlı, K., Nair, F., Karamış, M. B., Cerit A. A., Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Metal Matriksli Kompozitlerin Erozyon Davranışının İncelenmesi, & Uluslar arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, Selçuk Üniversitesi, Konya, 517-524, 10-12 Eylül, 2003.
- [30]. Clyne T.W., Withers, P.J., An Introduction to Metal Matrix Composites, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
- [31]. Froyen, L., Verlinden, B., Aluminium Matrix Composites Materials, Talat Lecture 1402, 1994.
- [32]. ASM Handbook, Composites, Volume 21, 2001.
- [33]. Clyne T. W., Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Composites: MMC, CMC, PMC, (3.7), 12-26, Elsevier, 2001.
- [34]. Dwight, J., Aluminum Design and Construction, E & FN Spon Routledge, New York, 1999.
- [35]. ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Volume 02, 1990.

- [36]. Koczak, M.J., Hildeman, G.J., "High-temperature powder metal aluminum alloys to small gas turbines", High-Strength Powder Metallurgy Aluminum Alloys, 225-236, 1982.
- [37]. LaDelpha, A.D. Paul, Metalurgical Characterization of a Commercial Applied 7xxx Series Aluminum P/M Alloy, Master of Applied Science, Dalhousie University, Ottawa, 2008.
- [38]. Wang, Feng et al, Microstructure and Mechanical Properties of Spray-Deposited Al-Zn-Mg-Cu Alloy, Materials and Design, 28, 1154-1158, 2007.
- [39]. Atik, Enver, Yaşlandırılabilir Bir Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kompozitinde Aşınma Dayanımı Açısından Optimum Mekanik Özelliklerin ve Üretim Şartlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1994.
- [40]. Sharma, M.M. ve ark., Aging Response of Al-Zn-Mg-Cu Spray Formed Alloys and Their Metal Matrix Composites, Materials Science and Engineering A, 424, 87-96, 2006.
- [41]. Hadjadj, L., Amira, R., Hamana, D., Mosbah, A., Characterization of Precipitation and Phase Transformations in Al-Zn-Mg Alloy by Differential Dilatometry, Journal of Alloys and Compounds, 2007.
- [42]. Carter, Barry, Norton, Grant, Ceramic Materials Science and Engineering, Springer, 2007.
- [43]. Özdin, Kemal, Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [44]. Shackelford, James F., Doremus, Robert H., Ceramic and Glass Materials Structure, Properties and Processing, Springer, New York, 2008.
- [45]. Oral, S., Kaftanoğlu, B., Bileşik Malzemelerin Endüstriyel Kullanımı, Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, ODTÜ, Ankara, 1: 5, 1987.
- [46]. Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Kitabevi, Ankara, 28, 61-78, 2006.
- [47]. T. Donomoto et al., SAE Paper 830252, Society of Automotive Engineers, 1983.
- [48]. Hieu Nguyen, Manufacturing Processes and Engineering Materials Used in Automotive Engine Blocks, Term Paper, 2005.
- [49]. Wilson Luiz Guesser et al, Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Cylinder Blocks, Ecole centrale Lyon, 2004.
- [50]. Das, S, Development of Aluminium Alloy Composites for Engineering Applications, Trans. Indian Inst. Met., Vol 57, No.4, August 2004, pp. 325-334.
- [51]. Yıldız Teknik Üniversitesi İnternet Erişim Adresi, [http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK\\_son.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son.pdf), Erişim Tarihi: 04.01.2010.
- [52]. Bedir, Fevzi, Alüminyum Kompozitlerin Üretimi, Karakteristik Özellikleri ve Endüstriyel Uygulamaları, Mühendislik ve Makine, Cilt. 47, Sayı: 554, 28-35.
- [53]. EAA (European Aluminium Association) Aluminium in Automobiles İnternet Erişim Adresi, [http://www.eaa.net/upl/4/default/doc/Aluminium\\_in\\_cars\\_Sept2007.pdf](http://www.eaa.net/upl/4/default/doc/Aluminium_in_cars_Sept2007.pdf), Erişim Tarihi: 04.01.2010.

- [54]. Ravi, K. R. et al, Separation of Matrix Alloy and Reinforcement from Aluminum Metal Matrix Composites Scrap by Salt Flux Addition, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 30, No: 4, pp. 393–398, 2007
- [55]. German, R. M., "Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Görüntü İşlemleri", Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., *Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: 05*, Ankara, 15-500, 2007.
- [56]. German, Randall M., *Powder Metallurgy Science*, Princeton, N.J. : Metal Powder Industries Federation, 2005.
- [57]. Akbulut, Hatem, *Otomotiv Fren Diski ve Balataların Metal Matriksli Kompozitlerden Üretimi*, DPT Proje No: 2003K120970.
- [58]. Swift, K.G. and Booker, J.D., *Process Selection: From Design to Manufacture*, BH, Oxford, 2003.
- [59]. Chung, W.S., Lin, S.J., "Ni-Coated SiCp Reinforced Aluminium Composites Processed By Vacuum Infiltration", *Materials Research Bulletin*, 1437-1447, 1996.
- [60]. Ekerer, F. Alparslan, *Alümina-SiC Partikül Destekli Toz Metal Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, S.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
- [61]. Köksal, Funda, *Al-Cu-SiC ve Al-Cu-B4C Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, S.D. Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2004.
- [62]. Kang, S. Joong, *Sintering Densification, Grain Growth, Microstructure*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005
- [63]. ASTM Standarts, Designation E10-84, *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*; 1984.
- [64]. ASTM Standarts, Designation B528-99, *Standard Test Method for Transverse Rupture Strength of Metal Powder Specimens*, 1999.
- [65]. Beffort, Olivier et al, Alloying Effects on Microstructure and Mechanical Properties of High Volume Fraction SiC-Particle Reinforced Al-MMCs Made by Squeeze Casting Infiltration, *Composites Science and Technology*, 67, 737–745, 2007.
- [66]. Yuan, Wuhua et al, Processing of Ultra-High Strength SiCp/Al-Zn-Mg-Cu Composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3251-3255, 2009.
- [67]. Wang, Tao et al, Single-Aging Characteristics of 7055 Aluminum Alloy, *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, 17, 548-552, 2007.
- [68]. Porter, D.A. and Easterling, K.E., *Phase Transformations in Metals and Alloys*, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [69]. Callister, William D., *Materials Science and Engineering an Introduction*, Wiley, Danvers, 2003.
- [70]. Bekheet, N.E. et al, The Effects of Aging on the Hardness and Fatigue Behavior of 2024 Al Alloy-SiC Composites, *Materials and Design* 23, 153-159, 2002.
- [71]. Go´mez de Salazar, J.M., Barrena, M.I., Role Of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulate Reinforcements on Precipitation in 7005 Al-Matrix Composites, *Scripta Mater.*, 44, 2489–2495, 2001.

- [72]. Mazen, Asaad A., Emara M.M., Effect of Particle Cracking on the Strength and Ductility of Al-SiCp Powder Metallurgy Metal Matrix Composites, JMEPEG, 13, 39-46, 2004.
- [73]. Manoharan, M., Lewandowski, J.J., Effect of Reinforcement Size and Matrix Microstructure on the Fracture Properties of an Al-MMC, Material Science Engineering A, 150, p. 179, 1992.
- [74]. Lloyd, D.J. et al, Controlling the Interface Reaction in Alumina Reinforced Al-Composites, Scripta Met.et Mat., 31, 393-396, 1994.
- [75]. Karlsen, D.O., Borradaile, J.B., Gjønnes, J., Taftø, J., in: S.I. Anderson, H. Lilholt, O.B. Pedersen (Eds.), Proceedings of the Ninth Risø International Symposium on Metallurgy and Material Science, Vol. 42, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, p. 421, 1988.
- [76]. Lee, Kon Bae and Kwon, Hoon, Strength of Al-Zn-Mg-Cu Matrix Composite Reinforced with SiC Particles, Metallurgical and Materials Transactions A, 33A, 455-465, 2002.
- [77]. Gnjidic, Z., Bozic, D., and Mitkov, M., The Influence of SiC Particles on the Compressive Properties of Metal Matrix Composites, Mater. Charact., 47 (2), 129 – 138, 2001.

## ÖZGEÇMİŞ

### ***Kişisel Bilgiler***

Soyadı, adı : AYCAN, Mehmet Fatih  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 04.06.1985 Ankara  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (536) 449 27 49  
Faks : -  
e-posta : mfaycan@etu.edu.tr

### **Eğitim**

<b><i>Derece</i></b>	<b><i>Eğitim Birimi</i></b>	<b><i>Mezuniyet tarihi</i></b>
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği	2008

### **İş Deneyimi**

<b><i>Yıl</i></b>	<b><i>Yer</i></b>	<b><i>Görev</i></b>
2008-2009	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2009-halen	T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı	Uzman Yardımcısı

### **Yabancı Dil**

İngilizce

### **Yayınlar**

**Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan (SCI ve/veya SCI-E tarafından Taranan Dergilerde)**

- Übeyli, M., Demir, T., Yıldırım R.O., **Aycan, M.F.**, Effect of Heat Treatment on The Formation of Adiabatic Shear Bands in High Strength Steels Impacted by AP Projectiles. Kovove Materialy, Metallic Materials. 47, 409-413, 2009.

### **Uluslararası konferans bildirileri**

- **Aycan, M.F.**, Übeyli, M., Investigation on the Artificial Aging Behaviour of Ceramic Particle Reinforced Aluminium Matrix Composites, Noval Aspects of Surfaces and Materials (NASM3), Manchester, England, 11-15 April 2010.