

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ATIK ALÜMİNYUM KULLANARAK GRAFEN VE SİLİSYUM NİTRÜR TAKVİYELİ  
KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

BURAK ÖZTOP

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ATIK ALÜMİNYUM KULLANARAK GRAFEN VE SİLİSYUM NİTRÜR  
TAKVİYELİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**BURAK ÖZTOP**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SAMSUN  
2017**

**Her hakkı saklıdır.**

## TEZ ONAYI

Burak ÖZTOP tarafından hazırlanan “ATIK ALÜMİNYUM KULLANARAK GRAFEN VE SİLİSYUM NİTRÜR TAKVİYELİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması 10/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** Yrd. Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

### Jüri Üyeleri

**Başkan** Yrd. Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** Prof. Dr. Erdem KOÇ  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** Yrd. Doç. Dr. Pınar UYAN  
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi  
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü

Yukarıdaki sonucu onaylarım .../.../20..

**Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK**

**Enstitü Müdürü**

## ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

10.07.2017



Burak ÖZTOP

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ATIK ALÜMİNYUM KULLANARAK GRAFEN VE SİLİSYUM NİTRÜR TAKVİYELİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Burak Öztop

Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mevlüt Gürbüz

Bu çalışma; hem ekonomik hem de kolay bir yöntem olan karıştırma döküm yöntemi kullanılarak, silisyum nitrür ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ve grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozit (AMK) malzeme üretmek, bu malzemelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Üretimi yapılan kompozit malzemelerin matrisi için saf alüminyum veya ticari alüminyum alaşımları yerine atık alüminyum içecek kutuları kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ise grafen ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tozları kullanılmıştır.

Çalışmanın birinci aşamasında; atık içecek kutularının üzerindeki boyaların giderilmesi için ön ergitme işlemi uygulanmış, elde edilen sıvı ergiyik kalıplara dökülerek külçeler halinde matris malzemesi elde edilmiştir. İkinci aşamada, külçe alüminyumlar ergitme fırını potasında ergitilerek, ağırlıkça % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranında grafen ve % 0.5, 0.75 ve 1 oranında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tozları ile takviye edilerek iki farklı türde kompozit malzeme üretilmiştir. Üçüncü aşamada ise, elde edilen kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

$\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozitlerde, artan takviye oranına bağlı olarak, çekme mukavemeti 54,5 MPa'dan 105,17 MPa'ya, darbe mukavemeti 4,94 J'den 13,18 J'ye ve sertlik 70 HV'den 87,9 HV'ye yükselmiştir. Yapılan yoğunluk ölçümlerinde takviye oranının artmasıyla yoğunluğun ve gözenek oranının arttığı görülmüştür. Üretilen kompozitlerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülerinden, takviye malzemesinin homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Grafen takviyeli kompozitlerde ise çekme mukavemeti 54,5 Mpa'dan 158,96 Mpa'ya kadar artmış ve en yüksek çekme mukavemeti % 0.3 takviye oranında elde edilmiştir. Sertlik değeri 70 HV'den 80,05 HV'ye yükselmiş, en yüksek sertlik % 0.1 takviye oranında elde edilmiştir. Darbe dayanımı 4,94 J'den 30,04 J'ye yükselmiş, en yüksek darbe dayanım değerinin yine % 0.1 takviye oranında elde edildiği görülmüştür. Grafen takviyeli kompozitlerin yoğunluğunun, artan takviye oranıyla birlikte düştüğü, gözenek oranının ise artış gösterdiği belirlenmiştir. SEM görüntülerinden grafen plakaların, alüminyum tane sınırlarına yerleştiği görülmüştür.

Temmuz 2017, 113 sayfa

Anahtar Kelimeler: Atık alüminyum içecek kutusu; Alüminyum matrisli kompozit;  
Grafen;  $\text{Si}_3\text{N}_4$

## ABSTRACT

Master Thesis

CHARACTERISATION AND PRODUCTION OF GRAPHENE AND SILICON  
NITRIDE REINFORCED COMPOSITES WITH USING WASTE ALUMINIUM

Burak Öztop

Ondokuz Mayıs University  
Institute of Science  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mevlüt Gürbüz

The aim of this study is to produce silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) and graphene reinforced aluminum matrix composite (AMC) material with using Stir Casting Method which is an economic and easy method and investigate mechanical and microstructure specifications of this material. Instead of pure aluminum or commercial aluminum alloy, waste aluminum was used for the matrix of produced composite material. As for reinforcing material silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) and graphene powder is used. Silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) and graphene powders were used as reinforcing the material.

In the first phase of the study; the pre-melting process was applied to remove the paints on waste beverage cans, and poured to liquid melt molds to obtain the bullion matrix material. In the second phase, two different types of composite materials were produced by melting bullion aluminum in the melting furnace by reinforcing with 0.1%, 0.3% and 0.5% graphene and 0.5%, 0.75% and 1%  $\text{Si}_3\text{N}_4$  powders. In the third phase, the mechanical and microstructure specifications of the obtained composites were investigated.

In  $\text{Si}_3\text{N}_4$  reinforced composites, tensile strength increased from 54,5 MPa to 105,17 MPa, impact strength increased from 4,94 J to 13,18 J, and hardness values increased from 70 HV to 87,9 HV depending on the increased reinforcement ratio. Also, in the density measurements, density and porosity ratio increased with the increase of the reinforcement ratio. The produced composites were examined with scanning electron microscope (SEM) and it was seen that the reinforcement material was homogeneously dispersed. In graphene reinforced composites, tensile strength increased from 54,5 MPa to 158,96 MPa and the highest tensile strength was obtained at 0.3% reinforcement ratio. The hardness value increased from 70 HV to 80,05 HV and the highest hardness reinforcement ratio was obtained at 0.1%. It was seen that the impact resistance increased from 4,94 J to 30,04 J and the highest impact resistance value was obtained again at the reinforcement rate of 0.1%. It was determined that the density of graphene-reinforced composites decreased but the porosity ratio increased with increasing reinforcement ratio. It was seen from the SEM images that, graphene platelets were settled on aluminum grain boundary.

July 2017, 113 pages

Keywords: Waste Aluminium beverage can, Aluminum matrix composite, Graphene,  $\text{Si}_3\text{N}_4$

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmamın her aşamasında, güven ve desteğini esirgemeyen, deneyimleri ve değerli önerileriyle beni yönlendiren sayın danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalıőmamın her aşamasında önemli derecede faydalandığım, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü altyapısı için sayın Prof. Dr. Erdem KOÇ'a, kompozit üretiminde kullandığım silisyum nitrür tozunun teminini sağlayan sayın Yrd. Doç. Dr. Pınar UYAN'a ve çalıőmalarım sırasında laboratuvar imkanlarını kullanmamı sağladığı için Malzeme Mühendisliği Bölüm Baőkanlıęı'na teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tüm hayatım boyunca beni sürekli destekleyen babam Salim ÖZTOP'a, annem Fatma ÖZTOP'a, çalıőmalarım süresince beni daima motive eden, manevi destekleriyle bana g veren, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eőim Habibe ÖZTOP'a, ve kızlarım Zeynep ile Elif'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Kompozit malzeme üretim fırını, karıştırma ve kontrol ünitesinin imalinde her türlü desteği sunan Zen-Tek Makine Kalıp ve Plastik San. iőletme sahibi Veysel ZENGİN ve teknik personeline teşekkür ederim.

Temmuz 2017, Samsun

Burak ÖZTOP

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM VE ÖZELLİKLERİ.....	4
2.1. Alüminyum Üretimi.....	7
2.2. Alüminyumun Kullanım Alanları.....	9
2.2.1. Alüminyumun inşaat sektöründe kullanımı.....	9
2.2.2. Alüminyumun ulaştırma sektöründe kullanımı.....	10
2.2.3. Alüminyumun ambalaj malzemesi olarak kullanımı.....	11
2.2.4. Alüminyumun elektrik sektöründe kullanımı.....	11
2.2.5. Alüminyumun içecek kutularında kullanımı.....	12
2.3. Alüminyumun Geri Dönüşümü.....	13
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	18
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	21
3.2. İslatılabilirlik.....	24
3.3. Matris Malzemeleri.....	25
3.4. Takviye Malzemeleri.....	26
3.5. Alüminyum Matrisli Kompozitler.....	28
3.6. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	29
3.6.1. Toz metalurjisi yöntemi.....	31
3.6.2. Difüzyon bağı oluşturma yöntemi.....	32
3.6.3. Sıvı metal emdirme ( İnfiltrasyon) yöntemi.....	33
3.6.4. Sıkıştırma döküm yöntemi.....	34
3.6.5. Sıvı metal karıştırma (vorteks döküm) yöntemi.....	35
3.6.6. Rheocasting ve Compocasting döküm yöntemi.....	37
3.6.7. Plazma püskürtme yöntemi.....	37
3.6.8. In-Situ yöntemi.....	38
3.6.9. XD yöntemi.....	38
4. KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILAN TOZLAR.....	39
4.1. Silisyum Nitrür ve Özellikleri.....	39
4.2. Grafen ve Özellikleri.....	44
5. KAYNAK ÖZETLERİ.....	49
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	58
6.1. Materyal.....	58
6.2. Deneysel Akış Diyagramı.....	59
6.3. Ergitme Fırını Tasarımı ve İmalatı.....	60
6.4. Deneysel Yöntem.....	68
6.4.1. Matris malzemesinin hazırlanması.....	68
6.4.2. İşlem parametrelerinin belirlenmesi.....	71
6.4.3. Takviye oranlarının belirlenmesi.....	73



6.4.4. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> takviyeli kompozit üretimi.....	75
6.4.5. Grafen takviyeli kompozit üretimi.....	78
6.5. Sertlik Ölçümleri.....	80
6.6. Çekme Deneyi.....	81
6.7. Çentik Darbe Deneyi.....	82
6.8. Yoğunluk Ölçümleri.....	83
6.9. Mikroyapı İncelemeleri.....	84
7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	85
7.1. Sertlik Testi Sonuçları.....	85
7.2. Çekme Deneyi Sonuçları.....	87
7.3. Çentik Darbe Deneyi Sonuçları.....	92
7.4. Yoğunluk Ölçümleri ve Gözenek Oranlarının Belirlenmesi.....	94
7.5. Mikroyapı İnceleme Sonuçları.....	98
8. SONUÇLAR.....	106
9. ÖNERİLER.....	108
KAYNAKLAR.....	109

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

Al	: Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum oksit
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	: Alüminyum karbür
AlN	: Alüminyum nitrür
B	: Bor
BN	: Bor nitrür
B <sub>4</sub> C	: Bor karbür
BeO	: Berilyum oksit
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
CdS	: Kadmiyum sülfür
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
Cu	: Bakır
Gr	: Grafen
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum oksit
Mn	: Mangan
MoS <sub>2</sub>	: Molibden disülfid
Nb	: Niobyum
Pb	: Kurşun
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum karbür
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	: Silisyum nitrür
SO <sub>2</sub>	: Kükürt dioksit
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum dioksit
ThO <sub>2</sub>	: Toryum oksit
Ti	: Titanyum
TiC	: Titanyum karbür
TiN	: Titanyum nitrür
Zn	: Çinko
ZnS	: Çinko sülfat
ZrC	: Zirkonyum karbür
ZrO <sub>2</sub>	: Zirkonyum oksit
ZrN	: Zirkonyum nitrür
MPa	: Megapaskal
GPa	: Gigapaskal
nm	: Nanometre
µm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
m	: Metre
cm <sup>3</sup>	: Santimetreküp

s	: Saniye
dak	: Dakika
g	: Gram
kg	: Kilogram
N	: Newton
W	: Watt
kW	: Kilowatt
J	: Joule
°C	: Santigrat
K	: Kelvin
HV	: Vickers sertliği
HB	: Brinell sertliği
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
θ	: Temas açısı

### **KISALTMALAR**

AMK	: Alüminyum matrisli kompozit
CVD	: Kimyasal buhar yoğuşturma
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
KMK	: Kullanılmış meşrubat kutusu
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
PVD	: Fiziksel buhar yoğuşturma
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X ışını difraktometresi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Alüminyum içecek kutularının ülkelere göre toplanma oranları.....	3
Şekil 2.1.	Alüminyum akış diyagramı.....	8
Şekil 2.2.	Kullanım yerlerine göre alüminyum dağılım yüzdeleri .....	9
Şekil 2.3.	İnşaat sektöründe alüminyum uygulamaları .....	9
Şekil 2.4.	Ulaştırma sektöründe alüminyum uygulamaları .....	10
Şekil 2.5.	Ambalaj sektöründe alüminyum uygulamaları .....	11
Şekil 2.6.	Alüminyum iletkenler .....	12
Şekil 2.7.	Alüminyum içecek kutuları.....	12
Şekil 2.8.	Kapalı döngü geri dönüşüm .....	15
Şekil 2.9.	Açık döngü geri dönüşüm .....	16
Şekil 3.1.	Kompozit malzemelerin malzeme sınıfları .....	19
Şekil 3.2.	Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar a) Doğrudan (arafazsız) birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı c) Karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu.....	20
Şekil 3.3.	Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler, a) Parçacık takviyeli b) Süreksiz elyaf veya whisker takviyeli c) Sürekli elyaf takviyeli .....	23
Şekil 3.4.	Islatılabilirlik, a) Bir sıvı damlasının katı altık üzerinde yayılmasını gösteren temsili bir resim, b) Metal matris üzerindeki seramik damlacığının yayılımını gösteren bir resim.....	24
Şekil 3.5.	Islatma açısı.....	24
Şekil 3.6.	AMK (a) piston kolu prototipi, (b) fren parçaları, (c) kardan mili.....	29
Şekil 3.7.	Uygulama alanlarına göre MMK üretim yöntemlerinin oranları....	31
Şekil 3.8.	Toz metalurjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretim şeması.....	32
Şekil 3.9.	Difüzyon bağlama yöntemi ile kompozit malzeme üretim şeması.	33

Şekil 3.10.	İnfiltrasyon deney düzeneğinin şematik gösterilişi.....	34
Şekil 3.11.	Sıkıştırma döküm yöntemi .....	34
Şekil 3.12.	Vorteks metodu ile kompozit üretim ünitesinin şematik resmi.....	35
Şekil 3.13.	Osprey yönteminin şematik gösterimi.....	38
Şekil 4.1.	a) Silikatlarda ve nitrür seramiklerdeki dörtlü birim yapı, b) $\beta$ - $Si_3N_4$ ' ün kristal yapısı .....	43
Şekil 4.2.	$Si_3N_4$ ' ün tipik uygulama alanları; (a) türbin kanatları, (b) motor subapları (c) otomobil motor parçaları, (d) yatak bilyeleri .....	44
Şekil 4.3.	Karbon esaslı malzemeler .....	45
Şekil 4.4.	Karbon atomunun $sp^2$ hibrit orbitalleri .....	46
Şekil 4.5.	Grafenin çeşitli özelliklerinin, bilinen diğer malzemelerle karşılaştırılması.....	47
Şekil 6.1.	Kompozit üretimi akış şeması.....	59
Şekil 6.2.	Kompozit malzeme hazırlama fırını.....	60
Şekil 6.3.	Elektrikli ergitme fırını şematik resmi.....	61
Şekil 6.4.	Kompozit malzeme üretiminde kullanılan ergitme fırını.....	62
Şekil 6.5.	Dış pota.....	62
Şekil 6.6.	Ergitme potası.....	63
Şekil 6.7.	Kapak.....	63
Şekil 6.8.	Flanş.....	64
Şekil 6.9.	Sehpa.....	64
Şekil 6.10.	Karıştırma mili.....	65
Şekil 6.11.	Kontrol ünitesi.....	65
Şekil 6.12.	Mekanik karıştırıcı.....	66
Şekil 6.13.	Ön ergitme düzeneği şematik resmi.....	66
Şekil 6.14.	Döküm işlemlerinde kullanılan metal kalıbın boyutları.....	67
Şekil 6.15.	Döküm işlemlerinde kullanılan metal kalıp.....	67

Şekil 6.16.	Isıl işlem fırınında bekletilen içecek kutuları a) 350 °C de bekletilen b) 450 °C de bekletilen c) 500 °C de bekletilen d) 550 °C de bekletilen.....	69
Şekil 6.17.	İçecek kutularının boya tabakasının yanması.....	69
Şekil 6.18.	Alüminyum içecek kutularının ergitilmesi.....	70
Şekil 6.19.	Matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum külçeler.....	71
Şekil 6.20.	Sertlik değerlerinin takviye oranlarına bağlı olarak değişimi.....	74
Şekil 6.21.	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> takviyeli kompozit üretimi akış şeması.....	75
Şekil 6.22.	Metalografik numune kesme cihazı.....	76
Şekil 6.23.	Hassas terazi.....	76
Şekil 6.24.	Grafen takviyeli kompozit üretimi akış şeması.....	78
Şekil 6.25.	Grafen etil alkol karışımı.....	79
Şekil 6.26.	Zımparalama – parlatma cihazı.....	80
Şekil 6.27.	Vickers sertlik ölçüm cihazı.....	81
Şekil 6.28.	Çekme deney cihazı.....	81
Şekil 6.29.	Charpy darbe deney cihazı.....	82
Şekil 6.30.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	84
Şekil 6.31.	X ışını kırınım cihazı.....	84
Şekil 7.1.	Malzemelerin sertliğinin Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> yüzde ağırlık oranı ile değişimi...	86
Şekil 7.2.	Malzemelerin sertliğinin grafen yüzde ağırlık oranı ile değişimi...	86
Şekil 7.3.	Takviyesiz Al matrisin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi.....	88
Şekil 7.4.	Al - % 0.5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> malzemenin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi..	88
Şekil 7.5.	Al - % 0.75 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> malzemenin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi	89
Şekil 7.6.	Al - % 1 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> malzemenin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi....	89
Şekil 7.7.	Al - % 0.1 Grafen malzemenin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi	90
Şekil 7.8.	Al - % 0.3 Grafen malzemenin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi	90
Şekil 7.9.	Al - % 0.5 Grafen malzemenin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi	91

Şekil 7.10.	Çekme mukavemetinin ( $\sigma_c$ ), $\text{Si}_3\text{N}_4$ yüzde ağırlık oranı ile değişimi.....	91
Şekil 7.11.	Çekme mukavemetinin ( $\sigma_c$ ), grafen yüzde ağırlık oranı ile değişimi.....	92
Şekil 7.12.	Darbe mukavemetinin $\text{Si}_3\text{N}_4$ yüzde ağırlık oranı ile değişimi.....	93
Şekil 7.13.	Darbe mukavemetinin grafen yüzde ağırlık oranı ile değişimi.....	94
Şekil 7.14.	$\text{Si}_3\text{N}_4$ takviye oranlarının artışıyla yoğunluk değişimi.....	95
Şekil 7.15.	$\text{Si}_3\text{N}_4$ takviye oranlarının artışıyla yoğunluk oranı değişimi.....	96
Şekil 7.16.	$\text{Si}_3\text{N}_4$ takviye oranlarının artışıyla gözenek değişimi.....	96
Şekil 7.17.	Grafen takviye oranlarının artışıyla yoğunluk değişimi.....	97
Şekil 7.18.	Grafen takviye oranlarının artışıyla yoğunluk oranı değişimi.....	97
Şekil 7.19.	Grafen takviye oranlarının artışıyla gözenek değişimi.....	98
Şekil 7.20.	Kullanılan $\text{Si}_3\text{N}_4$ ve grafen tozlarının XRD örgü deseni (a-b) ve SEM analizleri (c-d).....	99
Şekil 7.21.	Takviyesiz ve $\text{Si}_3\text{N}_4$ takviyeli Al kompozitlerin XRD örgü deseni.....	100
Şekil 7.22.	Takviyesiz ve $\text{Si}_3\text{N}_4$ takviyeli Al kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri: (a-b) AL, (c-d) ALSN05, (e-f) ALSN075, (g-h) ALSN1.....	101
Şekil 7.23.	Takviyesiz Al için elementel haritalama sonuçları.....	102
Şekil 7.24.	ALSN1 için elementel haritalama sonuçları.....	102
Şekil 7.25.	Takviyesiz ve grafen takviyeli Al kompozitlerin XRD örgü deseni.....	103
Şekil 7.26.	Takviyesiz ve grafen takviyeli Al kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri: (a-b) AL, (c-d) ALGR01, (e-f) ALGR03, (g-h) ALGR05.....	104
Şekil 7.27.	ALGR01 için elementel haritalama sonuçları.....	105

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Saf alüminyum metalinin özellikleri (*safılık derecesine bağlı) ....	6
Çizelge 3.1	MMK malzemelerde matris metali olarak en çok kullanılan bazı metal ve alaşımların mekanik özellikleri.....	26
Çizelge 3.2.	Çeşitli takviye malzemeleri ve özellikleri.....	28
Çizelge 4.1.	Teknolojik seramiklerin uygulama alanları.....	40
Çizelge 4.2.	Teknolojik seramiklerin sınıflandırılması.....	40
Çizelge 4.3.	Bazı teknolojik seramiklerin özellikleri.....	41
Çizelge 4.4.	Silisyum nitrürün temel özellikleri.....	42
Çizelge 4.5.	$\alpha$ ve $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ birim hücrenin parametrelerinin karşılaştırılması...	42
Çizelge 4.6.	Karbon allotroplarının fiziksel özellikleri.....	46
Çizelge 6.1.	$\text{Si}_3\text{N}_4$ takviyeli kompozit üretimi denemeleri.....	71
Çizelge 6.2.	Islatılabilirlik için denemeler.....	72
Çizelge 6.3.	Grafen takviyeli kompozit üretimi denemeleri.....	73
Çizelge 6.4.	Sertlik testi sonuçları.....	73
Çizelge 6.5.	$\text{Si}_3\text{N}_4$ takviyeli kompozit malzemelerin kodları.....	77
Çizelge 6.6.	Grafen takviyeli kompozit malzemelerin kodları.....	80
Çizelge 7.1.	Sertlik testi sonuçları.....	85
Çizelge 7.2.	Çekme deneyi sonuçları.....	87
Çizelge 7.3.	Çentik darbe deneyi sonuçları.....	93
Çizelge 7.4.	Numunelerin teorik ve deney yoğunlukları ile gözenek oranları...	95



## 1. GİRİŞ

Geleneksel metaller ve alaşımları ile seramik malzemeler, gelişmiş sistemlerin gereksinimlerini karşılayamamaktadır. Enerji, iletişim, ulaşım, havacılık ve uzay sektörlerindeki teknolojik faaliyetlerin sürekli gelişmesi ile yeni malzemelere olan gereksinim artmıştır. Bu nedenle; günümüz teknolojisinin gereksinimlerini karşılayacak ve geleneksel malzemelere göre daha iyi özellikler gösteren “kompozit malzemeler” adı altında yeni malzemeler üretilmiştir ve kullanımları hızla artmaktadır (Özkök, 2004; Kılıç, 2008).

Kompozit malzeme çeşitlerinden birisi olan metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, mühendislik malzemelerinin bir sınıfını oluşturmaktadırlar. Bu malzemeler, mukavemet/ağırlık oranı, çekme ve basma dayanımı, korozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi özelliklerinin yüksek olması ile metal ve seramiklerin iyi özelliklerini birleştirmeleri sebebiyle önemli mühendislik malzemeleri haline gelmişlerdir (Kılıç, 2008).

Önceleri, yüksek takviye elemanı maliyetleri ve üretim güçlüğü nedeniyle MMK malzemeler otomotiv, uzay ve havacılık endüstrileri gibi alanlarda kullanılmışlardır. Fakat son zamanlarda üretim yöntemlerindeki gelişmeler ve geliştirilen kaliteli ve ucuz takviye elemanları sayesinde MMK malzemelerin ticari kullanımı yaygınlaşmıştır (Özkök, 2004; Toprak, 2010).

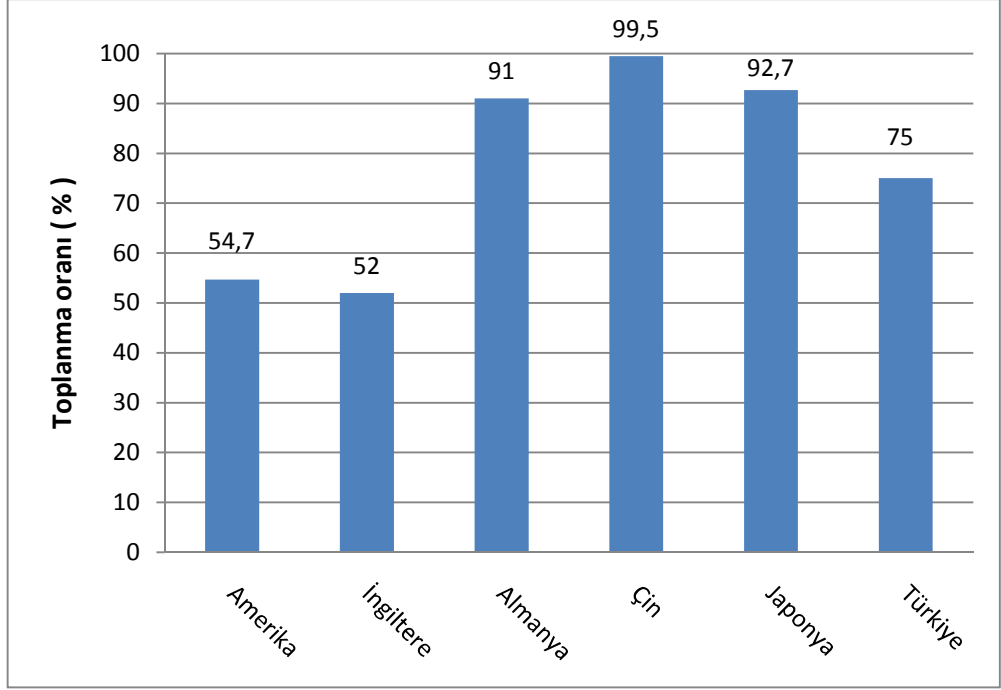
MMK’larda matris malzemesi olarak her çeşit metal ve alaşım kullanılmasına rağmen, en yaygın olarak kullanılanı alüminyum (Al) ve Al alaşımlarıdır. Al ve alaşımları, takviye malzemeleri ile fiziksel ve kimyasal uyumluluk, hafiflik, düşük yoğunluk, yüksek elektrik, yüksek ısı iletkenliğine sahip olmaları ve geniş uygulama alanları nedeniyle tercih edilmektedirler. Takviye malzemesi olarak ise genellikle elyaf veya parçacık şeklinde silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ), alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), silisyum karbür (SiC), bor karbür ( $B_4C$ ), titanyum karbür (TiC) malzemeler kullanılmaktadır. Günümüzde yapılan araştırmalar, ağırlıklı olarak alüminyum matrisli kompozitler üzerinde yoğunlaşmakta olup hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, yüksek elastik modülleri ve yüksek aşınma dirençleriyle savunma ve havacılık dışında otomotiv endüstrisinde özellikle motor pistonu, silindir gömleği,

fren disk ve kampanaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Özkök, 2004; Kılıç, 2008).

Teknoloji alanında hızlı gelişmelerin yaşandığı son yıllarda, yaşanabilir bir dünya için çevre-teknoloji uyumunun sağlanması büyük önem kazanmıştır. Bu sebeple, yeniden değerlendirilebilecek olan atıkların, çeşitli kimyasal ve fiziksel işlemlerden geçirilerek hammadde haline dönüştürülmesi ve bu ikincil hammaddelerin üretimde kullanılması gerekmektedir. Bu faaliyetlerin hepsi geri dönüşüm olarak ifade edilmektedir (Pulat vd, 2014).

Geri dönüşüm uygulamalarında metalik malzemeler önemli yer tutmaktadır. Çünkü metalik malzemeler ve bunların içerisinde özellikle alüminyum, günümüzde her alanda kullanılmakla beraber geri dönüşüm oranları yüksektir. Alüminyumun geri dönüşümüyle, özellikle enerji tüketimi ve hava kirliliğinde önemli oranda azalma sağlanmaktadır. Aynı zamanda atık alüminyumun içerisine kaliteli ve ucuz takviye elemanları ilave edilmesiyle, mevcut özelliklerinin iyileştirilmesi ve üstün özelliklere sahip alüminyum matrisli kompozit (AMK) malzeme üretilebileceği öngörülmektedir. Matris için saf alüminyum veya ticari alüminyum alaşımları yerine atık alüminyum kullanılması ile hem üretim maliyetleri düşürülerek AMK malzemelerin ticari kullanımı yaygınlaştırılacak olup hem de bu sayede bir anlamda geri dönüşüm uygulaması yapılmış olunacaktır.

En yaygın kullanılmakta olan ve geri dönüşümü yapılan atıklardan biri de alüminyum içecek kutularıdır. Günümüzde dünyada alüminyum içecek kutularının toplanma oranı %69.1, Avrupa'da ise %70'tir. Bu oranlar Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, Amerika'da %54.7, İngiltere'de %52, Almanya'da %91, Çin'de %99.5, Japonya'da %92.7 ve Türkiye'de %75 seviyesindedir. Bu veriler doğrultusunda alüminyum içecek kutularının endüstriyel olarak tekrar değerlendirilmesi büyük öneme sahiptir (Anonymous, 2013).



Şekil 1.1. Alüminyum içecek kutularının ülkelere göre toplanma oranları (Anonymous, 2013)

Bu çalışmada öncelikle, atık alüminyum içecek kutuları ergitilip boya giderimi yapıldıktan sonra kalıplara dökülerek matris malzemesi elde edilmiştir. Karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak, matris malzemesine grafen ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyesi ile farklı iki türde kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça farklı takviye oranlarında üretilen kompozit malzemelerin mikroyapısı, yoğunluk, sertlik, çekme ve darbe dayanımları incelenmiş olup, katkı oranlarının sonuçlara etkisi detaylı olarak verilmiştir.

## 2. ALÜMİNYUM VE ÖZELLİKLERİ

Alüminyum, yerkabuğunda oksijen ve silisyumun ardından en fazla olan (%7,5-8,1) ve doğada boksit cevheri halinde bulunan bir elementtir. Bu derece fazla olan alüminyum metalinin varlığı ancak 1808 yılında tespit edilmiştir. Fransa'da Paul Louis Toussaint Héroult ve ABD'de Charles Martin Hall isminde birbirinden habersiz iki bilim insanı, ticari olarak ilk üretim teknolojisinin keşfini 1886 yılında gerçekleştirmişlerdir. Hall-Héroult yöntemi olarak adlandırılan bu yöntemde, alüminyum oksit ergimiş kriyolit içinde çözündürülerek üzerinden güçlü bir elektrik akım geçirilmekte ve bunun sonucunda alüminyum elektrolitin altında sıvı halde birikmektedir. Bu yöntemin keşfedilmesinin ardından bu alanda yaşanan ekonomik ve teknik gelişmelere bağlı olarak yaklaşık dört yıl içerisinde İsviçre, Amerika, Fransa, İngiltere, Almanya ve Avusturya'da elektrolizhaneler kurularak alüminyum üretimine başlanmıştır (Anonim, 2004).

Alüminyumun 1900 yılında dünyada toplam yıllık üretimi 8.000 ton, 1913'de 65.000 ton, 1920'de 128.000 ton, 1938'de 537.000 ton, 1946'da 681.000 ton, 2003'de 25-27 milyon ton ve 2010'da 39 milyon ton seviyelerinde gerçekleşmiştir. Türkiye'de ise birincil alüminyum üretimi 2010 yılında yaklaşık 60.000 ton iken, ikincil alüminyum üretimi 150.000 tonu bulmuştur. Son yıllarda geriye kazanılmış alüminyumla birlikte dünyada toplam yıllık üretim miktarı neredeyse 50 milyon tona ulaşmıştır. Günümüzde 858 milyon ton seviyelerinde olan çelik üretiminin yanında bu miktarların çok düşük olmasına karşılık, ürettikleri katma değerlere bakıldığında tam tersi bir durum söz konusudur. Yıllık 22 milyon ton alüminyumun katma değer karşılığı 150 milyon ton çeliğe eşdeğerdir (Anonim, 2004).

Alüminyumun diğer metallere göre çoğu alanda daha avantajlı olmasını ve dünyada kullanılan en yaygın ikinci metal olmasını sağlayan en önemli özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Hafif olması
2. Alaşımlandırıldığında, yüksek mukavemet/ağırlık oranı
3. Tekrar tekrar kullanılabilir olması
4. Korozyon direncinin yüksek olması

5. Çekilebilirliğinin iyi olması
6. Şekillendirilebilirliğinin iyi olması
7. Dövülebilirliğinin iyi olması
8. İşlenebilir olması
9. Isı ve elektriksel iletkenliğinin yüksek olması
10. Işık ve ısı yansıtıcılığının iyi olması

Diğer metallere göre yaklaşık %100 geri dönüşümü olan alüminyumun, geleceğin metali olmasını sağlayacak özelliklerinden en önemlisi ekolojik özelliğidir. Dünyada, özellikle gelişmiş ülkelerde, kamuoylarının 1980'lerde zirveye ulaşan çevre korumacılığı baskıları ve 1970'li yıllarda petrol krizleri sonucu hızlanan sınırlı kaynakların en ekonomik, çevreyi en az kirletecek ve daha az enerji tüketecek şekilde kullanımı gibi kriterler, alüminyumun alternatif malzemelere göre avantajlı hale gelmesine neden olmuştur (Anonim, 2004).

Saf alüminyum, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, düşük özgül ağırlık, ayrıca korozyona karşı dayanıklılık özellikleri nedeniyle daha çok elektrik iletiminin istenildiği yerlerde, ambalaj sanayinde ve dekoratif amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır. En saf alüminyum (%99,99 saf), izabe alüminyumun özel rafinasyonu ya da hurda alüminyumlardan elde edilir (Özkök, 2004; Ediz, 2011). Saf alüminyuma ait özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, kristal yapısı yüzey merkezli kübik, yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , ısı iletkenliği  $237 \text{ W/m.K}$ , ergime sıcaklığı  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ , çekme dayanımı  $39\text{-}85 \text{ MPa}$ , sertliği  $12\text{-}20 \text{ HB}$  ve elastik modülü  $70 \text{ MPa}$ 'dır.

Çizelge 2.1. Saf alüminyum metalinin özellikleri (\*saflık derecesine bağlı)  
(Ediz, 2011)

Özellikler	Fiziksel sabitler
Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik
Yoğunluk	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150-300 °C *
Isı iletkenliği	237 W/m.K
Isıl genleşme	23,1 µm/m·K (25°C'de)
Ergime sıcaklığı	660 °C
Kaynama sıcaklığı	2519 °C
Çekme dayanımı	39-85 Mpa *
Akma dayanımı	10-30 Mpa *
Sertlik (BHN 2.5)	12-20 HB *
Elastik modül	70.000 Mpa *
Kayma modülü	25.000 Mpa *
Kopma uzaması	% 30-40

Saf alüminyumun mekanik özelliklerini ve dökülebilirliğini geliştirmek için silisyum (Si), demir (Fe), bakır (Cu), çinko (Zn), magnezyum (Mg), mangan (Mn) gibi çeşitli elementlerle alaşımlandırılır. Katkı elemanları miktarının artmasına bağlı olarak mukavemet ve yüzde uzama oranı artarken, elektrik iletkenliği ise büyük oranda azalmaktadır. Yüzeyinde kolaylıkla oluşabilen çok ince fakat yoğun bir oksit tabakasının bulunması, saf alüminyum kimyasal etkenlerden özellikle korozyona karşı çok iyi korumakta ve yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Bu geçirimsiz, sert ve koruyucu oksit tabakası, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ten oluşmakta ve alüminyumun korozyon direncini büyük ölçüde arttırmaktadır. Saf alüminyumun bu özelliğinden dolayı korozyona karşı hassas olan alüminyum alaşımları, saf alüminyum giydirilmesi yoluyla korozyondan korunmaktadır (Kılıç, 2008; Anonim, 2004; Ediz, 2011).

Saf alüminyumun sertlik ve dayanımı oldukça düşüktür. Mekanik özelliklerini ve dökülebilirliğini geliştirmek için, alüminyum matris içerisine ilave edilen alaşım elementlerinin çoğu alüminyumu alaşımlandırarak genelde yaşlanma sertleşmesi mekanizması ile dayanım değerlerini önemli oranda artırır. Bu mukavemetleşme mekanizması ile matris yapı içerisinde ısıtım işlem yoluyla,  $Al_2Cu$ ,  $Al_3Mg$  ve  $Mg_2Si$  gibi sert kimyasal bileşikler oluşması ve bu bileşiklerin dislokasyon hareketlerini engellemesi sonucu dayanım değerleri artmaktadır. Al-%4Cu alaşımı, mühendislik malzemesi olarak en çok kullanılan alaşımdır (Özkök, 2004)

Alüminyum alaşımlarının sahip oldukları başlıca özellikler şunlardır (Ediz, 2011) :

- Mukavemet/ağırlık oranı yüksektir.
- Çok geniş periyotta mukavemet değerleri gösterirler.
- Isıtım işlemle sertleştirilebilirler.
- Ergime sıcaklıkları düşüktür ve dökümü kolaydır.
- Elektrik ve ısı iletkenliği iyidir.
- Atmosferik korozyona karşı direnci yüksektir.
- Dekoratif görüntüsü vardır.
- Zehirleyici özelliği yoktur.
- Şekillendirebilme kabiliyeti iyidir.
- Hacme bağımlı olarak fiyatı diğer metallere oranla daha ekonomiktir.
- Alüminyum, elektrolitik olarak oksitlendirilerek değişik renklerde üretilebilir.

## 2.1. Alüminyum Üretimi

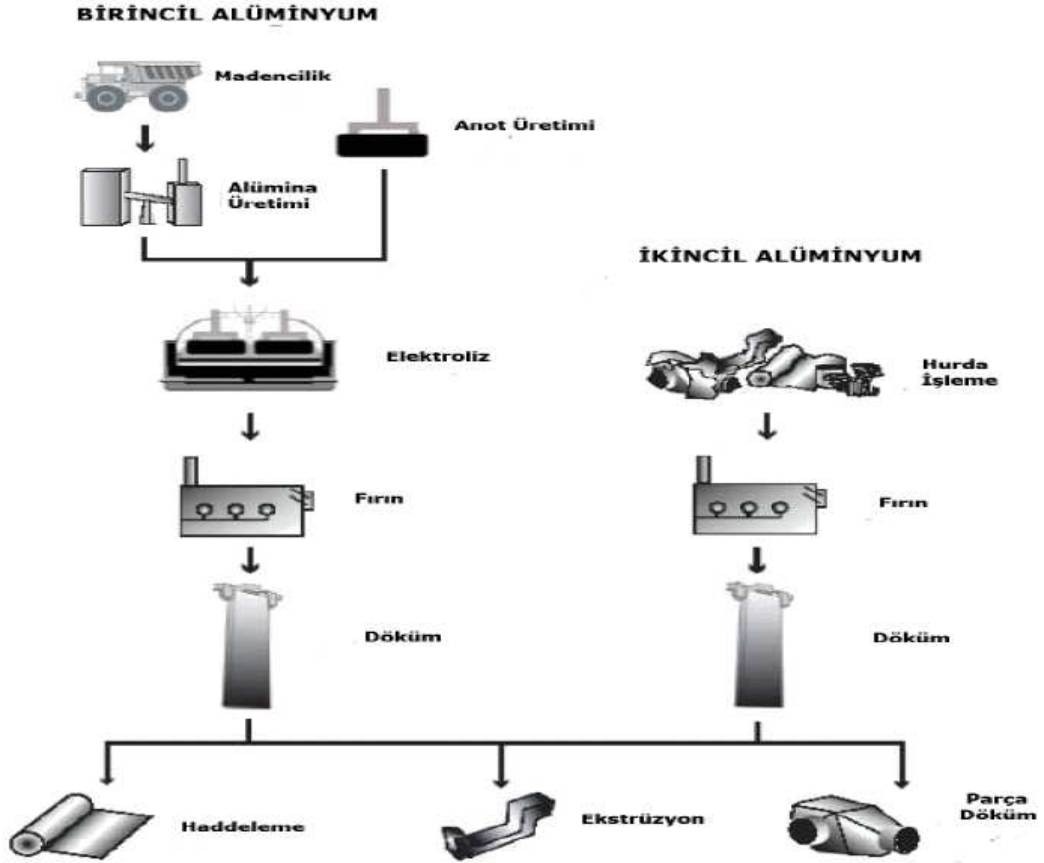
Günümüzde alüminyum üretiminde iki kaynak söz konusudur :

1. Birincil alüminyum (Cevherden üretilen alüminyum)
2. İkincil Alüminyum (Hurdadan üretilen alüminyum)

Birincil alüminyum üretim süreci beş aşamalı bir prosestir (Şekil 2.1):

1. Boksit madeni işletmeciliği
2. Sırasıyla kırma, öğütme, çözümlendirme, çöktürme ve kalsinasyon işlemlerinin uygulanması ile boksit cevherinden alüminyum oksit (alümina) üretimi
3. Ergimiş tuz elektrolizi ile alüminadan sıvı alüminyum üretimi

4. Sıvı alüminyumun alaşımlandırılması ve dökümü
5. Döküm işleminin ardından ekstrüzyon ve haddeleme işlemleriyle çeşitli alüminyum mamüllerin üretimi (Anonim, 2004).



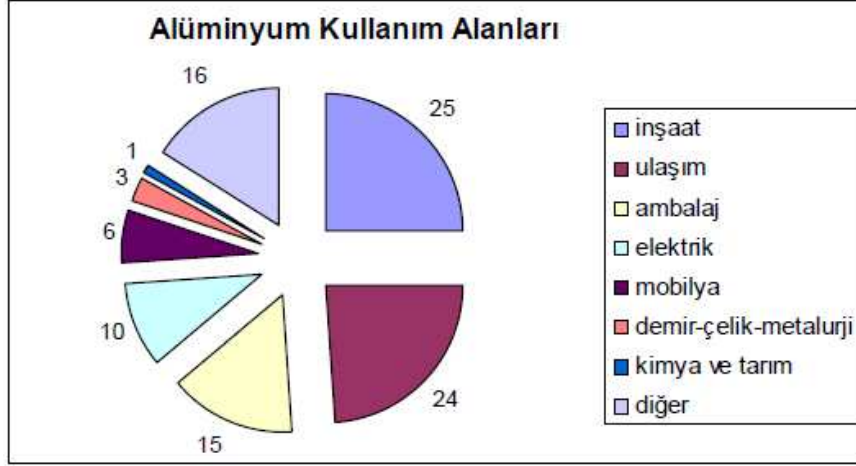
Şekil 2.1. Alüminyum akış diyagramı (Anonim, 2004)

Eski veya yeni hurdalardan elde edilen alüminyuma ikincil alüminyum denilmektedir. Birincil alüminyum üretimi sırasında oluşan hurdalar yeni kategorisine girer. Örneğin, alüminyum içecek kutularının üretimi sırasında üstünden ve altından kesilen dairesel fazlalıklar yeni atık olarak düşünülür. Geri dönüşüm ile oluşan hurdalar örneğin, bitmiş haldeki içecek kutuları eski hurda kategorisindedir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi çeşitli alanlarda kullanılıp geri dönüşümü sağlanan hurda veya elektroliz yöntemiyle elde edilen erimiş alüminyum, alaşımlandırma elementleri ile birlikte alaşımlandırma fırınına girmekte ve döküm işlemi ile haddeleme veya ekstrüzyon gibi işlemlerden sonra çeşitli alüminyum mamulleri şeklinde ortaya çıkmaktadır (Ediz, 2011).



## 2.2. Alüminyumun Kullanım Alanları

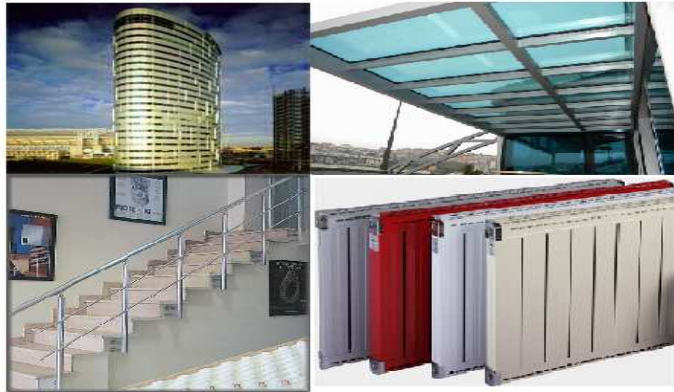
Şekil 2.2’de görüldüğü gibi kullanım alanına göre özelliklerinden kaynaklı avantajları ve yeni alaşımların getirdiği bazı alanlarda artan oranda çeliğin yerine kullanılma olanakları nedeniyle, alüminyum inşaattan tarıma kadar pek çok alanda kullanılmaktadır.



Şekil 2.2. Kullanım yerlerine göre alüminyum dağılım yüzdeleri (Ediz, 2011)

### 2.2.1. Alüminyumun inşaat sektöründe kullanımı

Konut ve diğer yapılar, karayolları, radyatör, bina çatı iskeleti, seralar, kapı/pencere doğramaları, merdivenler, cephe/çatı kaplamaları ve aksesuarlar gibi pek çok alanda kullanılır (Şekil 2.3). Alüminyum sağlamlığı yanında gerek natürel veya renkli eloksal kaplama, gerekse lake boyama ile dekoratif görünümü sayesinde inşaat sektörüne de birçok seçenekler sunmaktadır (Anonim, 2004; Ediz, 2011).



Şekil 2.3. İnşaat sektöründe alüminyum uygulamaları (Ulucak, 2003)

### 2.2.2. Alüminyumun ulaştırma sektöründe kullanımı

Avrupa ülkelerinde tüketilen alüminyumun neredeyse üçte biri ulaşım sektörü tarafından kullanılmaktadır. Otomobillerde, uçaklarda, gemi sanayisinde, trenlerin yük taşıma ve yolcu kompartımanlarının imalinde gün geçtikçe daha fazla alüminyum kullanılmaktadır (Şekil 2.4). Alüminyum, otomotiv endüstrisinde güvenlikten ve mukavemetten herhangi bir taviz verilmeden ağırlığın azaltılabildiği önemli bir malzemedir. Bunun neticesinde aynı hacimdeki bir motorla daha kısa sürelerde istenen hıza ulaşılabilir ve araçta yakıt tasarrufu sağlanabilir. Böylece, alüminyum alaşımlarının ilk alış fiyatı çeliğe göre daha pahalı olmasına rağmen hem araç performansı artırılmış, hem de uzun vadede tasarruf sağlanmış olur. Yakıtın daha az harcanması sonucunda çevreye yayılan emisyon miktarı da düşürülmüş olur. Binek otomobillerde alüminyum kullanma potansiyeli toplam ağırlığın %25'i kadarı olmakla birlikte, günümüzde sadece toplam ağırlığın %6'sı kadarı alüminyum parçalardan oluşmakta ve bu oran geçmişe göre çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bir uçağın ağırlığının yaklaşık %70'i alüminyumdan oluşmaktadır. Alüminyum alaşımları, hafifliklerinin yanı sıra sağlamlıkları ile de havacılık sektörünün gelişmesine büyük katkı sağlamışlardır. Deniz araçlarında ise alüminyum, kamaralarda, kompartımanlarda, tüm üst bina inşasında ve pervanelerin üretiminde kullanılmaktadır (Anonim, 2004; Ediz, 2011).



Şekil 2.4. Ulaştırma sektöründe alüminyum uygulamaları (Ulucak, 2003)

### 2.2.3. Alüminyumun ambalaj malzemesi olarak kullanımı

Son dönemde alüminyumun en hızlı gelişen kullanım alanlarından birisi de ambalaj sektörüdür. Daha fazla miktardaki diğer ambalaj malzemelerinin sağladığı koruma, birkaç mikron kalınlıktaki alüminyum ile çok daha etkin bir şekilde sağlanabilmektedir. Alüminyumun özellikle homojen yapısı, ince folyo şeklinde üretilmesi, hava geçirmez olması ve kolay şekillenebilirliği, ideal bir ambalaj malzemesi olarak kullanılmasını sağlar. %98 saflıkta üretilen alüminyum folyolar gıdaların hijyen şartlarında taze kullanılabilmesi için kullanılmaktadır. Alüminyum ambalaj malzemesi su, gaz, buhar, ışık ve mikroorganizma geçirmezliği, sıcak ve soğuğa karşı dayanıklılığı, hava değişimlerinden ve çevreden kolay etkilenmemesi gibi özelliklerinden dolayı ilaç ve gıda sektöründe yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca mor ötesi ve kızılötesi ışınlarla karşı koruyucu özelliğinin olması yeni geliştirilen ürünlere de hitap edebilmesine imkan sağlamaktadır (Anonim, 2004; Ediz, 2011).



Şekil 2.5. Ambalaj sektöründe alüminyum uygulamaları (Ulucak, 2003)

### 2.2.4. Alüminyumun elektrik sektöründe kullanımı

Alüminyum son derece iletken bir metal olması nedeni ile iletişim sektöründe kullanılmaktadır. Avrupa'da, ABD'de ve Japonya'da elektrik ve elektronik sektöründe alüminyum kullanım oranı sırasıyla %10, %9 ve %7 şeklindedir. Yüksek

voltajlı elektrik nakil hatlarında elik zli alüminyum iletkenler, tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra alüminyum, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve motor bobin sarımında da çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Anonim, 2004; Ediz, 2011).



Şekil 2.6. Alüminyum iletkenler (Ulucak, 2003)

#### **2.2.5. Alüminyumun içecek kutularında kullanımı**

içecek kutuları, alüminyumun en yaygın kullanıldığı alanlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde dünyada kullanılan metal kutuların %80'i alüminyumdan üretilmektedir. Hafif, açılması kolay, darbeye dayanıklı, sağlam, geri kazanılabilir oluşu ve çabuk soğutma özellikleri nedeniyle bu sektörde kullanımı oldukça fazladır. Kullanılmış alüminyum içecek kutuları %70'e yaklaşan bir geri kazanım hızına sahiptir. Toplumun evre bilincinin artması, doğal kaynakların gün geçtikçe azalması, toplumda doğru enerji kullanımı ve evre bilincinin artması ve alüminyum üreticilerinin desteğiyle alüminyum içecek kutularını toplama ve geri kazanım programları hızla gelişmiştir (Anonim, 2004; Ediz, 2011).



Şekil 2.7. Alüminyum içecek kutuları (Ulucak, 2003)

Alüminyum, bu alanların dışında düşük oranlarda da olsa, buzdolabı, dondurucu, havalandırma, spor ekipmanları ve mutfak aletleri yapımında da kullanılmaktadır.

### **2.3. Alüminyumun Geri Dönüşümü**

Teknoloji alanında hızlı gelişmelerin yaşandığı son yıllarda, yaşanabilir bir dünya için çevre-teknoloji uyumunun sağlanması büyük önem kazanmıştır. Bu sebeple, yeniden değerlendirilebilecek olan atıkların, çeşitli kimyasal ve fiziksel işlemlerden geçirilerek hammadde haline dönüştürülmesi ve bu ikincil hammaddelerin üretimde kullanılması gerekmektedir. Bu faaliyetlerin hepsi geri dönüşüm olarak ifade edilmektedir (Pulat vd, 2014).

Geri dönüşümde amaç; doğal kaynakların gereksiz kullanılmasını önlemek ve atıkların kaynağında ayrıştırılması ile birlikte atık çöp miktarını azaltmaktır. Demir, çelik, bakır, kurşun, kağıt, plastik, kauçuk, cam ve elektronik atıklar gibi birçok maddenin geri dönüşüm sonucu hammadde haline dönüştürülmesiyle doğal kaynakların tükenmesi önlenecektir. Geri dönüşüm ile malzeme üretiminde endüstriyel işlem sayısı azaldığı için enerji tasarrufu sağlanır. Örneğin metal içecek kutularının geri dönüşümünde metal direkt eritilerek yeni ürün haline dönüştürülür. Bu sayede hem üretim için kullanılan maden cevherine dolayısıyla da madenin çıkarılması için uygulanacak işlemlere hem de madenin saflaştırması için uygulanacak işlemlere gerek duyulmaz. Böylelikle bir alüminyum kutunun geri dönüşümünden yaklaşık %96 oranında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Benzer şekilde katı atıklardan ayrılan kâğıt ile tekrar kağıt imal edilmesi için gerekli olan enerji, normal işlemler için gerekli olanın %50'si kadardır. Aynı şekilde cam ve plastik atıkların geri dönüşümünden de ciddi oranlarda enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Anonim, 2015).

Hammaddenin azalması ve doğal kaynakların gün geçtikçe tükenmesi sonucunda ekonomik problemlerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Tam da bu noktada geri dönüşüm, ekonomi üzerinde olumlu etki yapacak, yeni istihdam alanları sağlayacak ve gelecek kuşaklara doğal kaynaklardan faydalanma olanağı sağlayacaktır. Diğer yandan, geri dönüşümün amaçlarından biri de bertaraf edilecek katı atık miktarlarının azaltılması sonucu çevre kirliliğinin önemli ölçüde önlenmesinin sağlanacak olmasıdır. Örneğin, kullanılmış kağıdın geri dönüşümü

sonucunda hava kirliliği %74-94, su kirliliği %35, su kullanımı %45 azalmakta ve bir ton atık kağıdın geri kazanımı ile 8 ağacın kesilmesi önlenebilmektedir. Özellikle katı atıkları bertaraf etmek için yeterli alanı bulunmayan ülkeler için katı atık miktarının ve hacminin azalmasını sağlayan geri dönüşüm faaliyetleri büyük bir avantajdır. Alüminyum, demir, çelik, bakır, kurşun, piller, kağıt, plastik, kauçuk, cam, motor yağları, atık yağlar, akümülatörler, araç lastikleri, beton, röntgen filmleri, elektronik ve organik atıklar başlıca geri dönüşebilen maddelerdir (Anonim, 2015).

Alüminyum üretimi; boksitten başlanarak, kullanım ömrü dolmuş alüminyum hurdaların ergitilmesi ve işlenmesi olmak üzere iki yolla yapılır. Fakat boksit cevherinin topraktan çıkarılıp işlenmesi ve hayatımızda kullandığımız şekilde üretimine kadar geçen proseslerde harcanan enerji çok fazla olduğundan, günümüzde daha çok ikincil üretim kullanılmaktadır. İkincil üretimde harcanan enerji, birincil üretimde harcanan enerjinin yaklaşık %5'i kadar olduğu için eski hurdaların yeniden dönüşümü büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden sonsuz geri dönüşüm avantajı olan alüminyum ikincil üretim ile üretmek hem ekonomik hem de çevre sağlığı açısından çok önemlidir (Pulat vd, 2014).

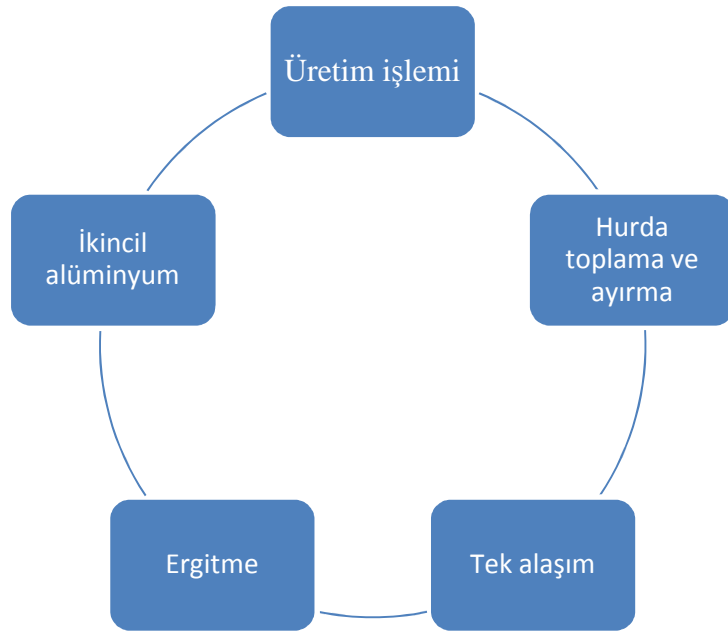
İkincil alüminyum endüstrisi, geri dönüşüm işleminin uygulandığı alüminyum üretim endüstrisi olarak tanımlanır. Yenilenebilir özellikte olan alüminyum ürünler, kullanım ömürleri boyunca gerekli işlevlerini yerine getirirler ve kullanım ömürleri dolduğunda, ikincil alüminyum endüstrisinin hammaddesi olarak yeniden sisteme dahil olurlar. Hurda alüminyum malzeme, yeniden uygun şartlarda işlenip, tüm kaybettiği özelliklerini yeniden kazanarak ikincil alüminyum olarak sisteme tekrar girer. 1 ton alüminyum hurdanın yeniden üretim sürecine alınmasıyla, yaklaşık olarak ( hurda hazırlama ve ergitme kayıpları nedeniyle ) 0,9 ton yeni alüminyum malzeme üretilir. Bir ton kullanılmış alüminyumdan alüminyum üretimi sonucu; 1300 kg boksit bakiyesi, 15.000 lt soğutma suyu, 860 lt proses suyu, 2000 kg CO<sub>2</sub> ve 11 kg SO<sub>2</sub> emisyonu daha az oluşur (Alan, 2008; Car, 2011).

Geri dönüşümde kullanılan alüminyumlar ( ikincil alüminyum hammaddeler) üç sınıfta incelenir (Anonim, 2004; Car, 2011):

1. İşlem ve döküm ürünlerinin imali sırasında oluşan geri kazanım oranı %100 olan ıskarta (yeni) hurda.

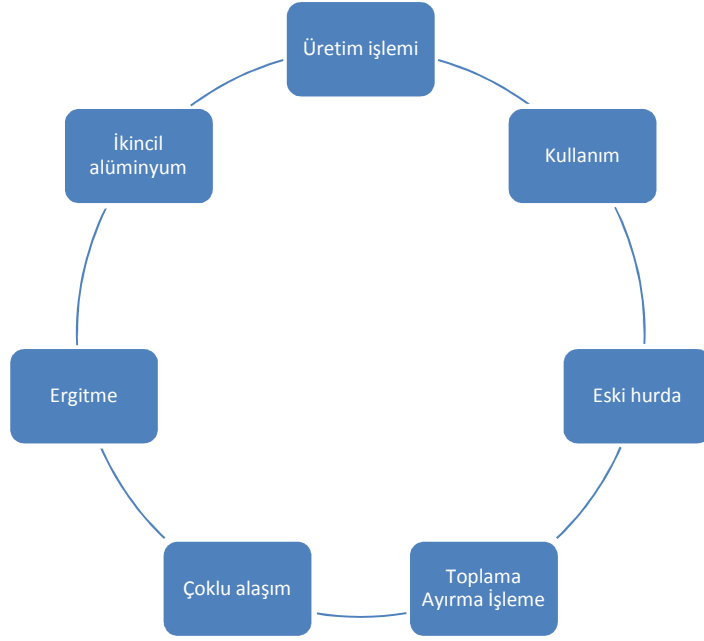
2. Kullanım ömrünü doldurmuş, yapısı, şekli ve et kalınlığına bağlı olarak geri kazanma oranı % 30-95 arasında değişen atık hurda.
3. Cüruf, alüminyum ergitme, rafinasyon ve aktarma süreçlerinde meydana gelen metalik alüminyum ve oksit karışımlarıdır.

Geri dönüşüm kavramı kapalı ve açık döngü olarak iki grupta incelenebilir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, kapalı döngü geri dönüşüm ile kullanım ömrünü tamamlamış olan alüminyum malzeme yeniden ergitilerek, asıl amacına uygun hale getirilip, yeniden kullanılır. Örnek olarak alüminyum içecek kutularının yeniden ergitilerek tekrar içecek kutularına çevrilmesi verilebilir (Car, 2011).



Şekil 2.8. Kapalı döngü geri dönüşüm (Car, 2011)

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi, açık döngü geri dönüşüm sürecinde ise, kullanım ömrünü dolduran farklı alaşımlardaki alüminyum malzemeler ergitilir ve sonrasında alaşımlandırılarak kullanım amacına uygun alüminyum malzemeler üretilir. Örnek olarak jant talaşlarından piston kapağı üretimi verilebilir (Car, 2011).



Şekil 2.9. Açık döngü geri dönüşüm (Car, 2011)

Atık geri dönüşüm piyasasının temel taşı kullanılmış alüminyum kutularıdır. Alüminyum kutuların ilk kullanımı 1970’lerin başlarına tekabül eder. İlk zamanlarda bu kutular “atılabilir” olarak nitelendirilmiştir. Fakat 70’li yılların sonlarına doğru alüminyum kutuların geri dönüşümü endüstrisi başlamıştır ve bunun ekonomik ve çevresel yararları görülmüştür. Bugün hurda alüminyumun %40’ ı eski hurda ve %50’si de kullanılmış içecek kutularından (KİK) elde edilmektedir (İzgi, 2011).

Alüminyumun geri dönüşümünün ekonomi ve çevre açısından sağladığı başlıca faydalar şunlardır (Car, 2011) :

- Alüminyum metali enerji bankası olarak tanımlanır. Örneğin, cevherden üretilen birincil alüminyum ürünü 1 adet içecek kutusunun üretimi için harcanan enerji ile hurda alüminyumdan 20 adet içecek kutusu üretilebilir. 1 adet alüminyum içecek kutusunun, birincil hammadde yerine hurdadan üretilmesi sonucu tasarruf edilen enerji miktarı ise, televizyonun üç saat içinde tükettiği enerji miktarına eşittir.
- Geri dönüşüm ile rasyonel hammadde kullanımı ve buna bağlı olarak doğal kaynakların korunması söz konusudur.
- 1 kg birincil alüminyum üretiminde, elektrik üretimi için 5,4 kg, boksit madenciliği ve alümina üretimi için ise 4,3 kg olmak üzere toplam olarak 9,7 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri sera gazı atmosfere salınır. Günümüzde eski alüminyum hurdaların, geri dönüşüm sonucu yeniden üretime katılmasıyla yıllık yaklaşık olarak 80



milyon ton daha az sera gazı salınımı yapılmaktadır. Bu değer, 15 milyon adet otomobilin ürettiği sera gazı miktarına eşdeğerdir.

- Doğada atık malzeme depolama için yapılan tahribat ve bunun neticesinde ortaya çıkan çevresel sorunlar azalır. Örneğin alüminyum meşrubat ya da spreycutularının doğada yok olması için 500 yıl gerekir.
- Geri dönüşüm ile hem doğal kaynaklar hem de enerji kaynaklarının kullanımı azalacak ve gelecek kuşaklara daha temiz ve varlıklı bir dünya bırakılabilecektir.
- İkincil alüminyum üretimi başlı başına bir endüstridir ve hurda toplayıcılara, ergiticilere ve bunları destekleyen diğer yan endüstrilerle beraber çok ciddi iş alanı ve istihdam yaratır.
- Atık depolama ve atık bertaraf etme maliyetlerini azaltır,
- Atıkların depolanması sırasında ortaya çıkan yer altı sularının kirlenme riskini ortadan kaldırır.

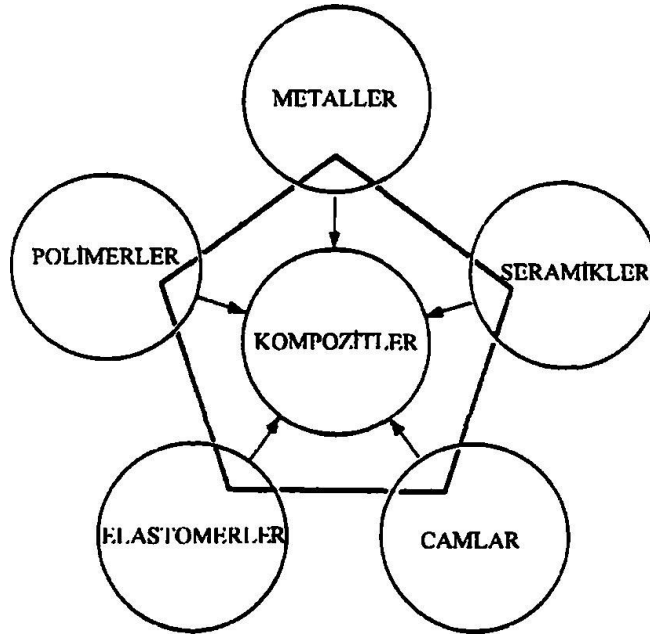
### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

Belirli bir amaç için tek başlarına yeterli olmayan, biçim ve kimyasal bileşimleri farklı olan, iki veya daha fazla sayıda aynı veya farklı gruptaki malzemelerin, birbiri içerisinde çözünmeden makro düzeyde birleştirilmesi sonucu en iyi özelliklerinin yeni bir malzemede toplanmasıyla oluşturulan malzemeler, kompozit malzeme olarak adlandırılırlar (Özkök, 2004; Kılıç, 2008)

Malzeme bilimindeki ilerlemeler ve yeni buluşlar, teknolojik gelişmelerin esasını oluşturmaktadır. Günümüzde malzeme bilimi tek ve genel bir mühendislik dalı olmaktan çıkarak, metallere, ametaller, kimyasallar, organikler, inorganikler, polimerler gibi alt branşlara ayrılmıştır. Mühendislikte uygulama alanlarına bağlı olarak çok farklı malzemeler kullanılmakta olup bunlar genelde, metallere, plastikler, seramikler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bu malzemelerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bir malzemede aranılan en önemli özelliklerden bazıları; akma mukavemeti, elastik modülü, kırılma tokluğu, aşınma direnci, yoğunluk ve malzemenin ergime noktası ile bağlantılı olan yüksek sıcaklıklara dayanma direncidir (Özkök, 2004; Nazik, 2013).

Bugün istenilen bu özellikleri sağlamada ileri teknoloji malzemelerine duyulan ihtiyaç giderek artmakta ve tek bileşenli malzemeler, ileri mühendislik uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılamamaktadır. Bu nedenle üstün özelliklere sahip kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Savunma, havacılık, uzay, otomotiv, denizcilik ve tekstil gibi önemli endüstri kolları kompozit malzemelerin önemini benimsemiş ve sürekli gelişmelerden kendilerine düşen payı almışlardır (Özkök, 2004; Nazik, 2013).

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan malzeme sınıfları Şekil 3.1’de verilmiştir.



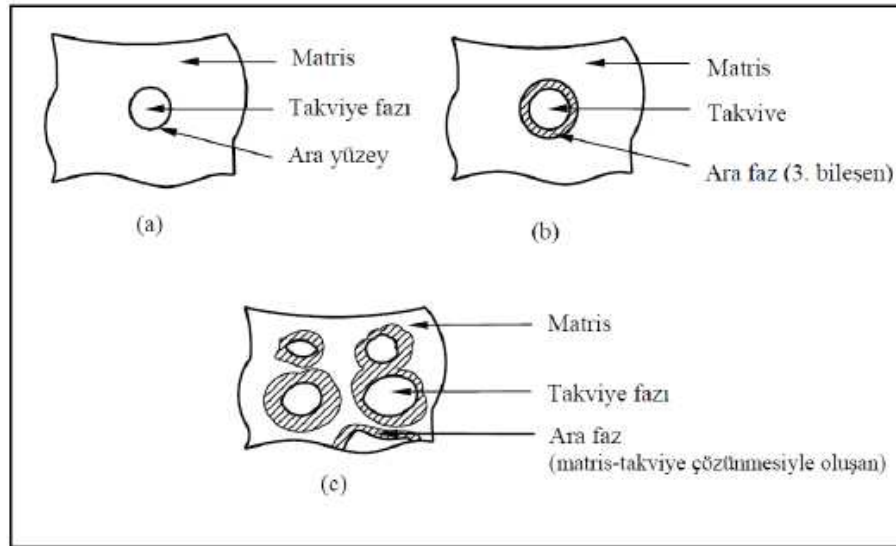
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin malzeme sınıfları (Kılıç, 2008).

Bir kompozit malzeme genelde, düşük elastik modül ve mukavemete sahip reçine veya metalik matris ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan daha sert ve daha yüksek dayanıma sahip tali faz olan takviye elemanından oluşmaktadır. Takviye malzemesinin görevi, gelen yükü taşımak ve matris malzemesinin iyileştirilmesi istenilen özelliklerini geliştirmektir. Matris malzemesinin ise, kompozit malzemeye gelen yükleri takviye malzemelerine iletmek, kompozit malzemenin tokluğunu artırmak, kompozit malzemenin mukavemetine katkıda bulunmak, takviye elemanlarını bir arada tutmak (bağlayıcı faz görevi yapmak), takviye malzemelerini ortamın etkilerinden ve darbelerden korumak ve malzemenin şekilsel bütünlüğünü korumak gibi görevleri vardır (Özkök, 2004; Kalemtaş, 2014).

Kompozit malzemeler yüksek mukavemet, daha iyi rijitlik, hafiflik, yüksek elastik modülü ve kırılma tokluğu, iyi korozyon, aşınma ve yorulma mukavemeti gibi üstün mekanik özellikleri, yüksek mukavemet-ağırlık ve elastik modülü-ağırlık oranları, iyi derecede ısı iletim/yalıtım özellikleri ve tasarıma yatkınlıkları gibi önemli özelliklere sahip olması dolayısıyla endüstriyel kullanım alanları giderek artmaktadır. Gerçekte kompozit malzemelerin tüm bu özelliklere sahip olması

sağlanamaz. Sadece kullanım alanlarına göre gerekli olan özellik artırılır. Böylece; uygun kompozit malzemeler kullanılan matris ve takviyenin özelliklerini taşıyacak şekilde elde edilebilir (Özkök, 2004; Kalemtaş, 2014).

Kompozit malzemenin mekanik özelliklerini, kompozit yapıyı oluşturan matris ve takviye elemanlarının özellikleri, hacimsel oranları, matris ve takviye bileşenleri arasında bulunan bağın özellikleri, takviye elemanının şekli, yapısı ve kompozit yapı içerisindeki yönlenmesi önemli bir ölçüde etkilemektedir. Şekil 3.2’de kompozit malzemelerde matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar verilmiştir. Matris üzerine etki eden gerilmelerin takviye malzemesine aktarılması ara yüzey vasıtası ile olduğundan dolayı matris-takviye ara yüzeyinin yapısı ve özellikleri kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Kompozit tanımına uygun olarak matris ve takviye fazı birbiri içinde çözünmemelidir. Ancak çok düşük miktarda çözünürlük, matris ile takviye fazı arasında güçlü bir bağın oluşumunu sağlayabilmektedir. Matrisle takviye fazı arasında bağ oluşmaması halinde ise bağlanmayı sağlamak amacıyla takviye malzemesi üzerine matris ile bağ oluşturacak bir malzeme kaplanabilmektedir (Nazik, 2013; Kalemtaş, 2014).



Şekil 3.2. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar a) Doğrudan (arafazsız) birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı c) Karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu (Nazik, 2013)

### 3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemenin ana yapısını oluşturan matris türüne bağlı olarak kompozitler üç ana sınıfa ayrılmaktadır.

- Polimer matrisli kompozitler,
- Seramik matrisli kompozitler,
- Metal matrisli kompozitler.

Polimer matrisli kompozitlerde matris olarak sürekli fiberlerle takviye edilen polyester, polyamid ve epoksi reçineler kullanılırken, takviye malzemesi olarak ise genellikle cam, karbon ve organik fiberler tercih edilmektedir. Polimer matrisli kompozitler, özellikle havacılık endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Şahin, 2011).

Seramik malzemeler gevrek yapıda olup sertlik değerleri yüksek iken termal şok direnci ve tokluğu ise düşüktür. Dolayısıyla kullanımları esnasında ani hasarlar meydana geldiğinden dolayı çeşitli tehlikelere yol açabilirler. Seramik fiberler ile takviye edilen seramik matris malzemelerin, ani kırılmalara karşı dayanımları, termal şok dayanımları ve toklukları artmaktadır. Öyle ki geleneksel seramiklere oranla toklukları 20 kata kadar artırılabilir. Seramik matrisli kompozitlerin üretimleri iki aşamalı bir süreçtir. Birinci aşama takviye malzemesinin matris içine ilavesi, ikinci aşama ise matrisin kurutulmasıdır. Üretim metodları; soğuk presleme ve sinterleme, sıcak presleme, kimyasal reaksiyon, sıvı infiltrasyon, sol-jel ve polimer proliz olarak sayılabilir (Şahin, 2011).

Mevcut malzemelerin kullanım sıcaklığının üzerinde sıcaklıklarda kullanılacak ve daha yüksek mekanik özelliklere sahip malzemelere olan gereksinim 1960'lı yılların başında metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin geliştirilmesi için çalışmaların başlamasına sebep olmuştur. Metal matrisli kompozitlerin üretimi ve kullanımları son yıllarda teknolojik gelişmeler doğrultusunda, yüksek dayanım ve hafifliğin öne çıktığı, fiyatın ise ikincil önemde kaldığı otomotiv endüstrisi ile uzay ve havacılık sektöründe artış göstermiş olup, bu malzemeler günümüzde ticari olarak kullanılabilir hale gelmiştir. MMK'ların kullanımıyla, malzemenin mevcut özellikleri korunarak %50'ye varan ağırlık tasarrufları sağlanabilmektedir (Toprak, 2010; Kalemtaş, 2014).

Tek bileşenli malzemelerle elde edilemeyen yüksek elastik modülü, yüksek mukavemet ve yüksek aşınma direnci gibi mekanik özellikleri sağlamak üzere genellikle MMK üretiminde matris olarak sünek metaller olan Al, Mg, Zn, Cu, Ti ve Ni veya bunların alaşımları kullanılmaktayken; takviye malzemesi olarak ise silisyum karbür (SiC), bor (B), grafit, alümina ( $Al_2O_3$ ), tungsten ve molibden gibi bir çok takviye türleri kullanılmaktadır (Toprak, 2010; Şahin, 2011).

MMK'ların, metallere göre avantajları şunlardır (Şahin, 2011);

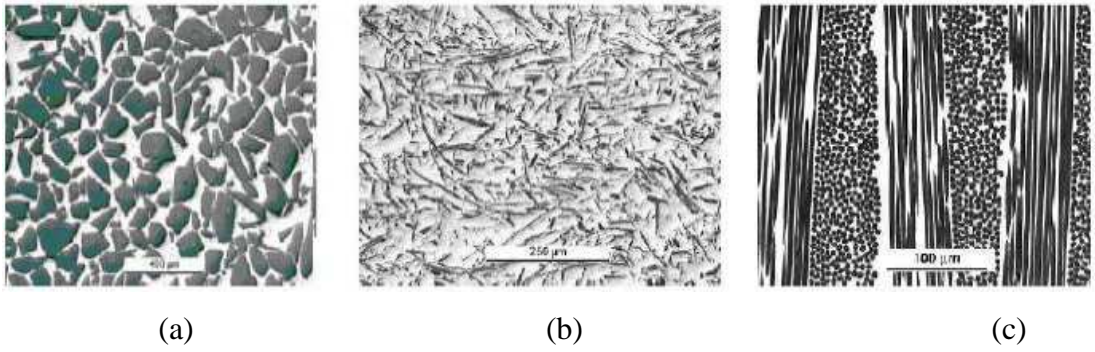
- Geleneksel üretim yöntemlerinin basit modifiyelerle kullanılabilmesi
- İstenen özelliklerin önceden belirlenebilmesi
- Yüksek özgül modül
- Yüksek özgül mukavemet
- Daha yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek sıcaklıklarda yeterli mukavemet gösterebilme
- Sürünme oranının düşük olması
- Termal genleşme katsayısının düşük olması
- Daha yüksek aşınma direnci
- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı
- Yüksek esneklik modülü/yoğunluk oranı
- Yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik
- Yüzey sertliğinin yüksek ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet
- Tekrar üretilebilir içyapı ve özellikler

MMK'ların dezavantajları için ise şu maddeler sayılabilir (Şahin, 2011);

- Sürekli fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda zor ve kompleks üretim prosesleri
- Bu kompozit malzemelere şekil vermek için geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan kesici takımların kullanılamaması sebebi ile takım maliyetinin artması
- Değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler göstermeleri
- Metallere göre daha az sünek olmaları
- Üretim için kullanılan sistem ve teçhizatın yüksek maliyetli olması
- Nem ve hava zerreciklerinin, kompozitlerin mekanik ve yorulma özelliklerini negatif yönde etkilemesi

- Yeni ve hızlı gelişen bir teknoloji olması nedeniyle üreticilerin deneyim eksikliğinin olması

MMK'lar, takviye elemanlarına göre sürekli ve süreksiz takviyeli olarak iki ana gruba ayrılırken, bunlar da kendi içinde uzun elyaf (uzun fiber) , kısa elyaf (kısa fiber)/whisker ve parçacık takviyeli olacak şekilde üç gruba ayrılabilirler (Şekil 3.3). Takviye boy/çap oranı esas alınarak bu sınıflandırma yapılmaktadır. Büyük boy/çap oranına sahip olanlar sürekli takviyeli (uzun elyaflar, filamentler, vb.), küçük boy/çap oranına sahip olanlar ise süreksiz takviyeli (kırpılmış elyaflar, parçacıklar, whiskerlar, vb.) olarak adlandırılmaktadırlar (Nazik, 2013; Şahin 2014).



Şekil 3.3. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler, a) Parçacık takviyeli b) Süreksiz elyaf veya whisker takviyeli c) Sürekli elyaf takviyeli (Nazik, 2013)

Süreksiz (parçacık, kısa fiber, whisker) parçacık takviyeli MMK'nın, havacılık ve otomotiv uygulamalarındaki kullanım alanları giderek artmakta ve son yıllarda yapılan araştırmaların çoğunluğu alüminyum esaslı süreksiz parçacık takviyeli MMK'ların üretim işlemi ve özelliklerinin tahmini üzerine olmaktadır (Nazik, 2013).

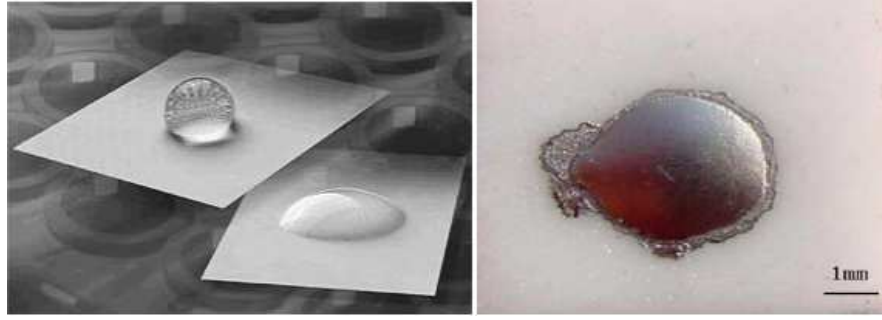
“Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin diğer takviye şekillerine göre önemli avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Üretimin hacmi büyüdükçe maliyet önemli olduğundan, sürekli veya kırpılmış elyafa göre daha ucuz maliyetlerle elde edilebilirler
- Döküm ve toz metalurjisi gibi üretim teknikleri ve bunu takiben haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi ikincil işlemler uygulanabilir
- Takviye edilmemiş metalden daha yüksek kullanım sıcaklığına sahiptirler
- Daha yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahiptirler
- Artan ısıl kararlılık gösterirler

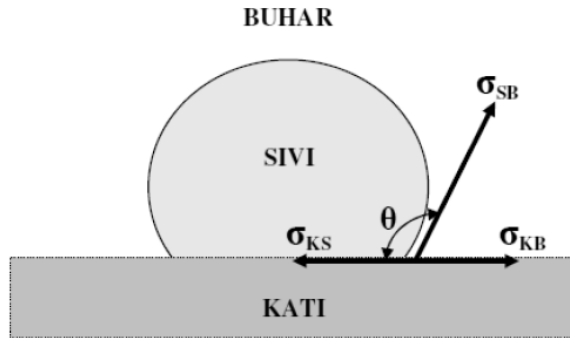
- Elyaf takviyeli kompozitlere göre daha izotropik özellikleri vardır.” (Ürkmez, 2004).

### 3.2. Islatılabilirlik

Sıvı faz üretim yöntemlerinde, sıvı metalin takviye malzemesini yeterli düzeyde ıslatması gerekmektedir. Islatılabilirlik genel anlamda, bir sıvının katı bir yüzey üzerinde yayılabilme yeteneği olarak ifade edilir. Şekil 3.4’de bir sıvı damlasının katı altlık üzerinde ve bir seramik damlacığının metal matris üzerinde yayılmasını gösteren resimler bulunmaktadır. Şekil 3.5’de gösterildiği gibi sıvı damlanın katı yüzey ile yaptığı ( $\theta$ ) temas açısı ıslanabilirliğin fiziksel bir ölçüsüdür (Ürkmez, 2004).



Şekil 3.4 Islatılabilirlik, a) Bir sıvı damlasının katı altlık üzerinde yayılmasını gösteren temsili bir resim, b) Metal matris üzerindeki seramik damlacığının yayılımını gösteren bir resim.



Şekil 3.5. Islatma açısı (Nazik, 2013)

Denge durumunda temas açısı Young-Dupre denklemi olarak bilinen  $\sigma_{KB} = \sigma_{KS} + \sigma_{SB} \cdot \cos\theta$  ifadesi ile belirlenir.  $\theta$  : temas açısını,  $\sigma_{KB}$ : katı-buhar arayüzey enerjisini,  $\sigma_{KS}$ : katı-sıvı arayüzey enerjisini ve  $\sigma_{SB}$ : sıvı-buhar arayüzey enerjisini



göstermektedir. Bu durumda ıslatılabilirlik,  $\Theta$  temas açısına göre değişkenlik gösterir. Şöyle ki;

- $\Theta = 0^\circ$  ise mükemmel ıslatılabilirlik,
- $\Theta = 0^\circ < \Theta < 180^\circ$  ise kısmen ıslatılabilirlik,
- $\Theta = 180^\circ$  ise ıslatılabilirliğin olmadığı anlamına gelmektedir (Ürkmez, 2004; Nazik, 2013).

Sıvı metalin takviye malzemesini ıslatma yeteneğini arttırmak amacıyla, matris alaşımına değişik alaşım elementlerinin ( magnezyum, titanyum, zirkonyum gibi) ilavesi, seramik takviye malzemesinin CVD ( kimyasal buhar yoğunlaştırma), PVD ( fiziksel buhar yoğunlaştırma), sol-jel gibi teknikler kullanılarak bir metalle kaplanması, takviye malzemesine ısıl işlem uygulanması en çok kullanılan yöntemlerdir (Ürkmez, 2004).

### 3.3. Matris Malzemeleri

Kompozit malzemelerde yükü takviye malzemesine iletmek ve dağıtmak, matrisin temel görevi olmakla birlikte, takviye malzemesini ortamın etkilerinden ve darbelerden korumak, tokluğu arttırmak, mukavemete katkıda bulunmak ve takviye elemanlarını bir arada tutmak gibi farklı görevleri de bulunmaktadır (Aran, 1997).

Düşük yoğunluk, yüksek tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımları, matris malzemesi olarak MMK yapılarda çok yaygın olarak kullanılmakla birlikte özellikle dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapı konstrüksiyonlarda tercih edilirler. Bu tür malzemelerin diğer bir önemli özelliği ise atmosfere karşı yüksek korozyon dayanımının olmasıdır (Şahin, 2011; Kalemtaş, 2014).

Çizelge 3.1'de MMK malzemelerde matris malzemesi olarak en fazla kullanılan metal ve alaşımlarından bazılarının mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. MMK malzemelerde matris metali olarak en çok kullanılan bazı metal ve alaşımların mekanik özellikleri (Kılıç, 2008)

<b>Matris</b>	<b><math>\sigma_{ym}</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_m</math> (MPa)</b>	<b>E (%)</b>	<b><math>E_m</math> (GPa)</b>
Saf Al (ticari)	30	80	40.0	12
Al-6 Fe	280	350	12.5	82
Al-4,5 Cu-T6	107	182	17.0	71
Al-Cu-Mg-T6	319	345	1.2	72
AM100-T6	63	99	4.1	-
2014 Al-T6	414	409	10.0	72
2014 Al-T4	268	388	8.2	-
Al 2124-T4	350	479	12.0	-
A 356 Al-T6	200	275	6.0	69
6061 Al-T6	276	326	15.0	68
7010Al-T6	490	550	10.5	70
Mg-2 Ag-T6	200	240	-	48
Mg-Al-Zn	168	311	21.0	49

$\sigma_{ym}$  : Matrisin akma mukavemeti  
 $\sigma_m$  : Matrisin maksimum mukavemeti  
**E** : Matrisin kopmadaki % uzama miktarı  
 $E_m$  : Matrisin elastik modülü

MMK'ların üretiminde kullanılan en yaygın matris malzemesi Al ve Al alaşımlarıdır. Al ve alaşımları döküm ve deformasyon işlemlerine uygunluk, işleme kolaylığı, hafif, yüksek korozyon direnci, birçok üretim yöntemi ile ekonomik olarak üretilebilirlik ve takviye edilebilirlik gibi önemli özelliklere sahip malzemelerdir. Alüminyumun diğer matris malzemelerine göre ergime sıcaklığının nispeten daha düşük olması, toz metalurjisi ve döküm yöntemleri ile MMK üretiminde kolaylıkla kullanılmasını sağlamaktadır. Al ve alaşımlarının sahip olduğu özellikleri, takviye malzemesi kullanarak geliştirmek ve ayrıca çekme mukavemeti, ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık ve üretilebilirlik gibi özellikleri iyileştirmek mümkündür (Ürkmez, 2004; Kalemtaş, 2014).

### 3.4. Takviye Malzemeleri

Takviye elemanı, kompoziti oluşturan ana elemanlardan biri olup, kompozit üzerine gelen yükün önemli bir bölümünü taşımaktadır. MMK'ların yüksek elastik modülü

ve dayanıma sahip olması ancak, uygulanan dış kuvvetlerin matris tarafından takviye elemanına iletimi ve dağılımı ile mümkün olacağından takviye elemanı ile matris arasındaki ara yüzey bağının güçlü olması gerekmektedir. Sıvı haldeki matris malzemesinin takviye elemanını ıslatamaması, ara yüzey bağlarının oluşumunun engellenmesine ve hava boşluklarının oluşmasına neden olur. Bu sebeple takviye elemanı seçimi, matris içerisinde yönlendirilme şekilleri ve hacim oranları, kompozitin fiziksel ve mekaniksel karakteristiklerini belirleyen önemli etkenlerdir (Kılıç, 2008).

“Takviye malzemesi olarak, değişik kimyasal kompozisyonlarda ve yapıda, seramikten grafitte veya karbondan metale, pek çok malzeme çeşidi kullanılmaktadır. Takviye malzemeleri, L/D (çap/boy) oranı yaklaşık 1 olan parçacıklar, yaklaşık 50 olan kırılmış elyaf veya whiskerlar ve 100 den büyük olan sürekli elyaflar olarak başlıca üç gruba ayrılmaktadır” (Ürkmez, 2004).

Kompozit üretiminde uygun takviye elemanlarının seçimi çok önemli olduğundan dolayı, takviye elemanlarının özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. MMK malzemelerin üretiminde kullanılan takviye malzemeleri, temin edilebilmelerindeki kolaylık, matris malzemesi ile uyumluluk, elastiklik modülü, çekme dayanımı, yoğunluk, ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık, ısıl genleşme katsayısı, boyut ve şekil, kimyasal bileşim, partikül yapı gibi özellikler göz önünde tutularak, kimyasal yapılarına göre;

a) Oksitler (  $\text{SiO}_2$  ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  )

b) Karbürler (  $\text{SiC}$  ,  $\text{B}_4\text{C}$  )

c) Nitrürler (  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$  )

d) Elementler (paslanmaz çelik, Si, C, vs) gibi dört ana gruba ayrılır (Şahin, 2011; Nazik, 2013).

Çizelge 3.2’de çeşitli takviye malzemelerinin yoğunluk, dayanım ve elastik modülleri verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere  $\text{SiC}$ ’nin yoğunluğu  $3,22 \text{ g/cm}^3$ , mukavemet değeri 3100 MPa, elastik modülü 324 GPa,  $\text{B}_4\text{C}$ ’nin yoğunluğu  $2,52 \text{ g/cm}^3$ , mukavemeti 2579 MPa, elastik modülü 448 GPa,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ’ün yoğunluğu  $3,98 \text{ g/cm}^3$ , mukavemeti 221 MPa, elastik modülü 379 GPa ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ’ün yoğunluğu  $3,18 \text{ g/cm}^3$ , mukavemet değeri 4100 MPa, elastik modülü 250 GPa’dır.

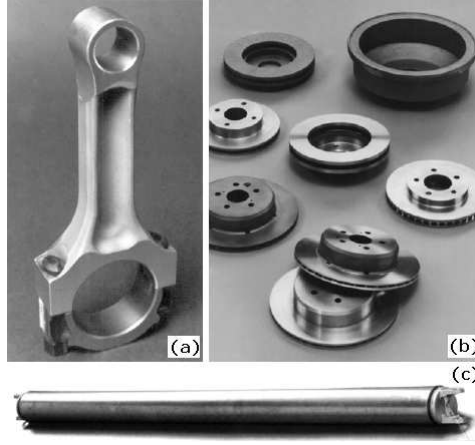
Çizelge 3.2. Çeşitli takviye malzemeleri ve özellikleri

<b>Partikül Takviye Malzemeleri</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Mukavemet (Mpa)</b>	<b>Elastik Modül (Gpa)</b>
SiC	3,22	3100	324
B <sub>4</sub> C	2,52	2579	448
TiC	4,93	55	269
ZrC	6,73	90	359
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,98	221	379
MgO	3,58	4100	417
ZrO <sub>2</sub>	5,89	83	132
CeO <sub>2</sub>	6,9	600	200
ThO <sub>2</sub>	9,86	193	200
AlN	3,26	2069	310
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,18	4100	250

### 3.5. Alüminyum Matrisli Kompozitler

Son yıllarda kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, hafif ve üstün özelliklere sahip malzemeler elde etmek amacıyla matris malzemesi olarak hafif bir metal olduğundan dolayı alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Alüminyum içerisine katılan SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vb. seramik parçacıklar, kompozit malzemenin özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. AMK'lar ihtiva ettiği takviye malzemesine bağlı olarak karakteristik özellikleri değişmektedir. Genelde AMK'lar toz metalurjisi ya da sıvı faz yöntemleriyle üretilirler. Parçacık takviyeli AMK'lar sıvı faz yoluyla daha kolay üretilmektedirler. AMK'ların, yüksek elastiklik modülü, yüksek mukavemet, yüksek yorulma direnci, yüksek aşınma dayanımı, yüksek rijitlik, yüksek sıcaklıkta kararlılık, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, düşük ısıl genleşme katsayısı ve düşük yoğunluk gibi birçok üstün özellikleri bulunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle AMK'lar özellikle havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadırlar (Özkök, 2004; Toptan vd, 2006; Kılıç,2008).

AMK'ların otomobillerde kullanımı, motor pistonu, silindir gömleği, fren diski/kampanası gibi uygulamalarla her geçen gün artmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. AMK (a) piston kolu prototipi, (b) fren parçaları, (c) kardan mili (Toptan vd, 2006)

Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik şaftların yerine %20  $Al_2O_3$  elyaf takviyeli AMK kullanımıyla, ağırlık tasarrufunun yanı sıra, vibrasyonun azalması ve kritik şaft dönme hızının artması sağlanmıştır. Otomobillerde kullanılan dökme demir fren disklerinin yerine %20-30 SiC takviyeli AMK kullanımı ile fren sisteminde %60'a varan ağırlık tasarrufu sağlanmıştır. Otomobillerde kullanılan pistonların Al-SiC(p), Al-TiC(p) kompozit malzemeden üretilmeleri ile ağırlık kazancı ve aşınma dayanımı elde edilmiştir. Biyel kolunun Al- $Al_2O_3$ , Al-TiC(p) kompozit malzemeden üretilmesi de yine hafiflik ve yüksek mukavemet sağlamıştır. Havacılık ve uçak sanayinde grafit elyaf takviyeli Al metal matrisli kompozit malzemeler roket ve helikopter parçalarında, B-SiC karışımı elyaflarla takviye edilen AMK malzemeler ise jet motoru kanatçıklarının yapımında kullanılmaktadır (Kılıç, 2008).

### 3.6. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

MMK üretiminde farklı yöntemler kullanılmakta olup, her bir yöntemin diğerlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, her bir yöntem farklı açılardan değerlendirilerek ve üretilecek kompozit malzemeden istenen özellikler dikkate alınarak, MMK üretimi için en uygun yöntem belirlenir (Kalemtaş, 2014).

“MMK üretiminde dikkate alınan en önemli özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

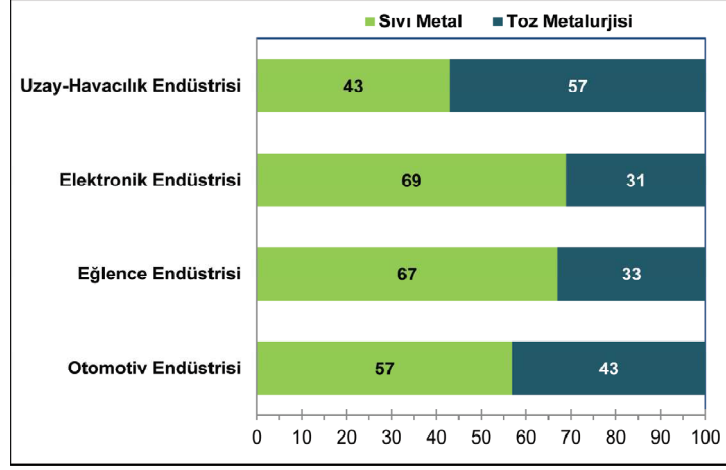
- Elde edilecek üründen istenen boyutsal özellikler
- Kullanım sıcaklık aralığı
- Takviye malzemesinin şekli

- Matris malzemesi ile takviye malzemesinin uyumu
- Matris ve takviye malzemelerinin ek işlem gereksinimi
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında olası olan tepkimeler
- Takviyenin matris malzemesi içerisinde eş dağılımlı olması
- Matris-takviye arayüzey bağlanmasının tam olarak sağlanabilmesi.” (Kalemtaş, 2014).

Değişik matris ve takviye malzemelerinin kullanımı dolayısıyla MMK’lerin üretiminde farklı teknikler geliştirilmiştir. Üretim sırasında matrisin sıvı veya katı fazda bulunmasına göre MMK üretim yöntemlerini aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür (Nazik, 2013).

- Katı faz üretim yöntemleri
  - Toz metalurjisi yöntemi
  - Difüzyon bağı oluşturma yöntemi
- Sıvı faz üretim yöntemleri
  - Sıvı metal emdirme yöntemi
  - Sıkıştırma döküm yöntemi
  - Sıvı metal karıştırma (Vorteks döküm) yöntemi
- Diğer üretim yöntemleri
  - Rheocasting ve Compocasting döküm yöntemi
  - Plazma püskürtme yöntemi
  - In-Situ yöntemi
  - XD yöntemi

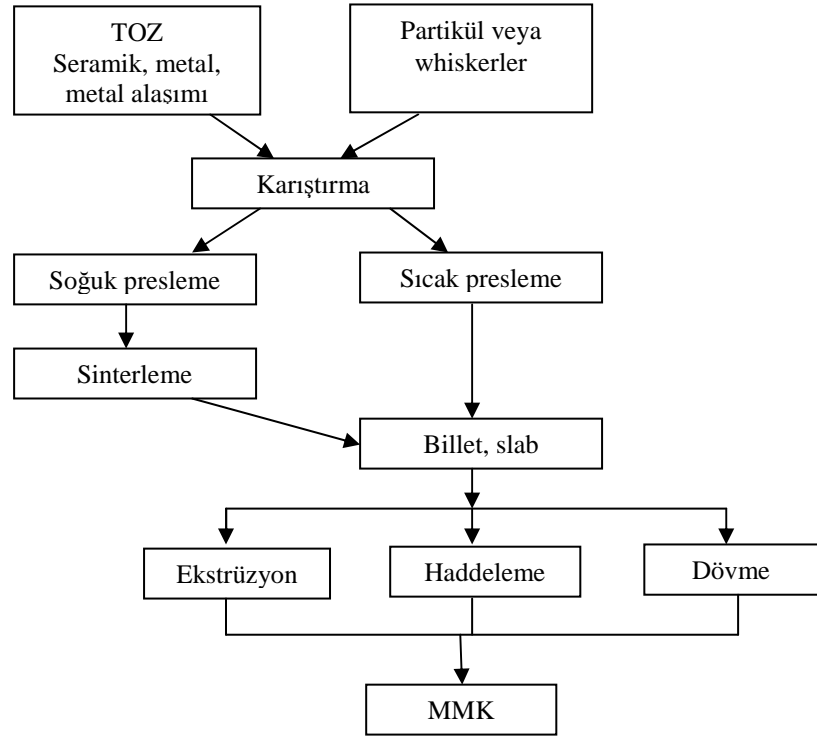
Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanlarına göre “sıvı metal” ve “toz metalurjisi” yöntemleri ile üretimlerine ait oranlar Şekil 3.7’de verilmektedir. Toz metalurjisi yöntemi, yüksek miktarlarda ve küçük tane boyutunda takviyeler içeren kompozitlerin üretiminde kullanılırken, döküm yöntemi ise düşük miktarlarda ve büyük tane boyutunda takviyeler içeren kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır (Kalemtaş, 2014).



Şekil 3.7. Uygulama alanlarına göre metal matrisli kompozit üretim yöntemlerinin oranları (Kalemtaş, 2014)

### 3.6.1. Toz metalurjisi yöntemi

Bu yöntem genellikle süreksiz takviye malzemeleri ile üretilen seramik ya da metal matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılır. Şekil 3.8’de üretim şeması verilen bu yöntemde, takviye malzemesi (parçacık veya whisker) ile matris malzemesi toz halinde istenilen oranda homojen bir şekilde karıştırılmaktadır. Karışım istenen şekildeki bir kalıp içerisine konularak preslenir. Presleme işlemi soğuk veya sıcak presleme olarak yapılabilmektedir. Fakat iyi bir ara yüzey oluşturmak ve partikül kırılmasını azaltmak için sıcak presleme tercih edilir. Daha sonra takviye ile matris tozlarının daha iyi birleşmesini sağlamak ve preslemeden sonra daha dayanıklı hale getirmek için sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Birleştirilmiş ürün, ekstrüzyon, haddeleme, dövme gibi ikinci bir işleme operasyonundan sonra MMK malzeme olarak kullanılır (Ürkmez, 2004).

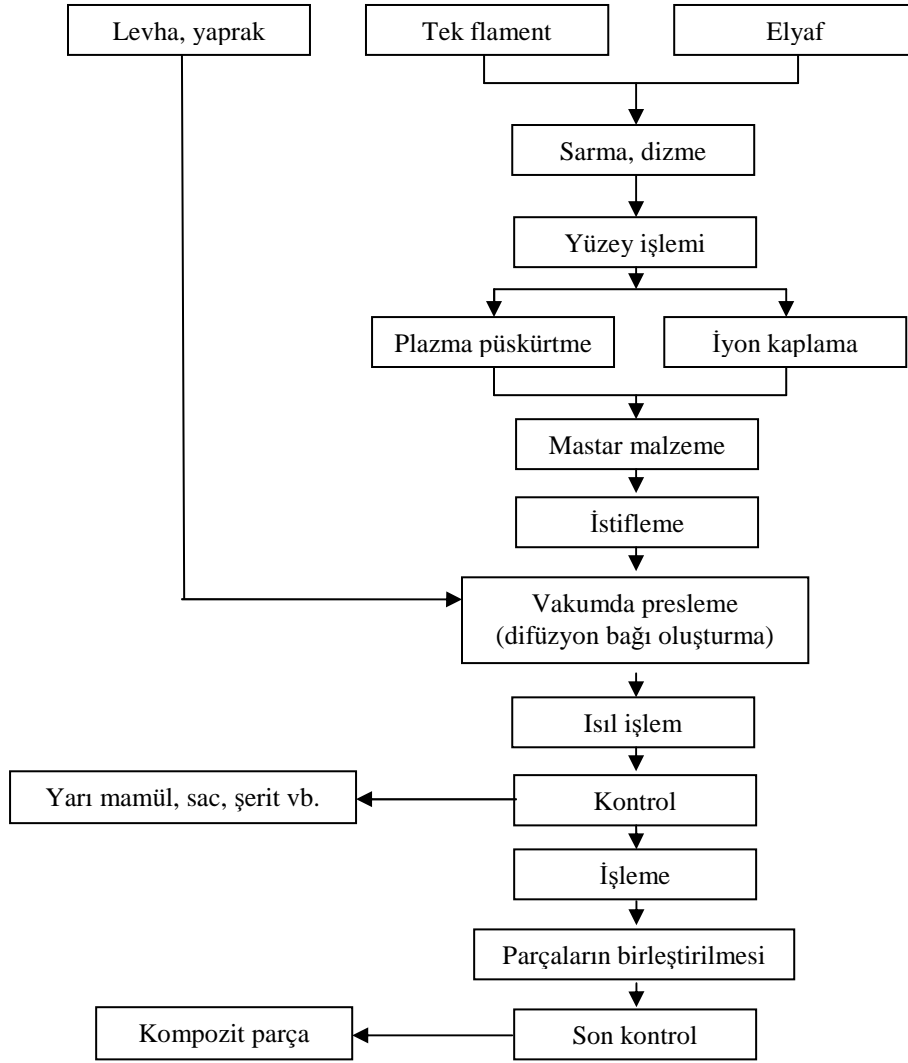


Şekil 3.8. Toz metalurjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretim şeması (Ürkmez, 2004)

### 3.6.2. Difüzyon bağı oluşturma yöntemi

Şekil 3.9’da akış şeması verilen bu yöntemde, elyaflar metal folyo veya levhasal yapıdaki matris malzemesi üzerine, belirlenen yönlerde, açılarda, istenilen aralıklarla ve miktarda yerleştirilir ve ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta preslenmesi sonucu matris ile elyaflar arasında difüzyon bağı oluşturularak kompozit malzeme üretilmektedir. Difüzyon bağı oluşturabilmek için, takviye ile matris malzemesi yüzeylerine kimyasal temizleme işlemi uygulanmakta olup bunun dışında yine aynı amaç doğrultusunda elyafların yüzeyinde plazma püskürtme yöntemi ve iyon kaplama ile koruyucu bir tabaka da oluşturulabilmektedir (Ürkmez, 2004; Yılmaz, 2007).



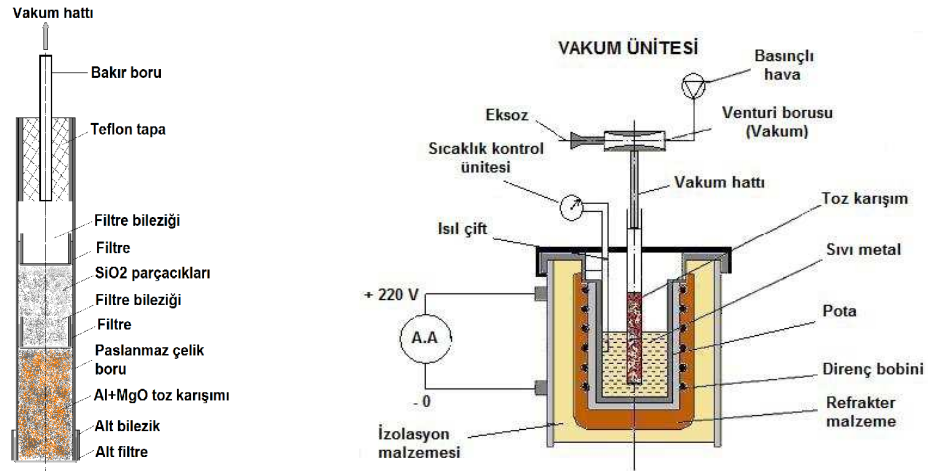


Şekil 3.9. Difüzyon bağlama yöntemi ile kompozit malzeme üretim şeması (Ürkmez,2004)

### 3.6.3. Sıvı metal emdirme ( İnfiltrasyon) yöntemi

Bu yöntemde, kalıba yerleştirilen elyaflar arasına, sıvı halde metal matrisin emdirilmesi ile kompozit malzeme üretilmektedir. İlk önce istenilen profilde ön şekillendirme yapılmakta, elyafların doğrultuları ve hacimsel oranları bu aşamada ayarlanmaktadır. İnfiltrasyon sırasında, tatbik edilen basınç etkisi ile kompaktın dağılmasını ve sıvı metalin kompaktı geçerek dışarıya taşmasını önlemek için partiküllerin üzerine bir filtre yerleştirilir ve çelik borunun kalan boşluğuna da  $\text{SiO}_2$  kumu doldurulur. Hazırlanan ön şekil, kalıba bir bağlayıcı ile tutturulduktan sonra kalıp içerisine sıvı metal emdirilir veya sıvı metal, basınç ya da vakum altında ön şekle emdirilir. Emdirme işlemi basınç altında yapıldığında, matrisin elyafların arasına girmesi sonucu açığa çıkacak atıl gazlar yapı içerisinde dışarı atılacaktır.

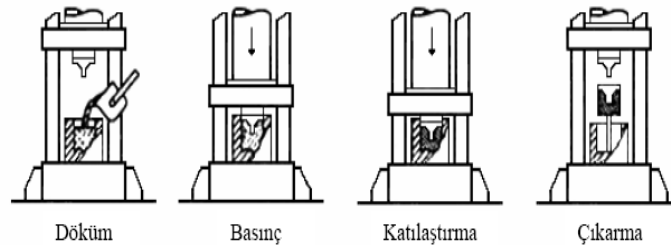
Emdirme işlemi vakum altında yapıldığında ise elyaf yüzeyi aktivitesi yüksek olacağı için daha iyi ıslanabilirlik elde edilecektir (Ürkmez, 2004; Yılmaz, 2007).



Şekil 3.10. İnfiltasyon deney düzeneğinin şematik gösterilişi (Pul vd, 2009)

### 3.6.4. Sıkıştırma döküm yöntemi

Grafit, silisyum karbür, alümina, bor karbür ve paslanmaz çelik elyaf gibi takviye malzemeleri, sıvı metal içerisinde yeteri kadar ıslatılmamaktadır. Bu sebeple, bu tür takviyelerle yapılacak üretimlerde sıvı metal emdirme yerine sıkıştırma döküm yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, ön ısıtılmış takviye malzemesi bir kalıp içerisine yerleştirildikten sonra üzerine sıvı metal dökülür. Daha sonra katılaşma tamamlanincaya kadar sıvı metal, takviye ile birlikte yüksek basınca maruz bırakılır (Şekil 3.11). Basınç altında katılaştırma ile takviye malzemesi ile matris arasındaki ara yüzey bağ mukavemeti önemli oranda artmaktadır (Ürkmez, 2004; Yılmaz, 2007; Kılıç, 2008).



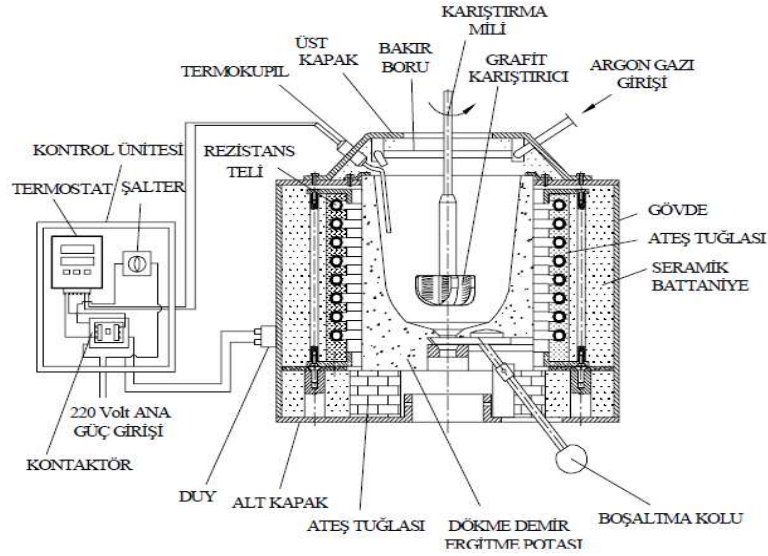
Şekil 3.11. Sıkıştırma döküm yöntemi (Yılmaz, 2007)

### 3.6.5. Sıvı metal karıştırma (vorteks döküm) yöntemi

“Partikül takviyeli MMK üretimi için çok değişik metotlar olmasına rağmen, bu metotlardan en kolay ve en ucuz olanı seramik partiküllerin ergimiş sıvı metal içerisinde karıştırılması şeklinde olan Vorteks (sıvı metalürji) metodudur” (Kök, 2001).

Bu yöntemde, ergitilen metal matrisin içine daldırılan bir karıştırıcı yardımıyla oluşturulan vorteks (girdap) içine genellikle parçacık, kırılmış elyaf veya kılcak kristal şeklinde olan seramik takviye malzemeler ilave edilerek metal matrisli kompozit malzemeler elde edilir . Genel olarak 5 ile 100 µm büyüklüğünde seramik parçacıkların sıvı metal içerisine katılımı %30'a kadar olmaktadır. Bu yöntem mikron altı çok küçük seramik parçacıkların üretiminde uygun değildir (Bedir, 2006).

Vorteks metodu ile kompozit üretim ünitesinin şematik resmi Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12. Vorteks metodu ile kompozit üretim ünitesinin şematik resmi (Sur vd, 2005)

Son ürünün başarılı bir şekilde üretilmesi ve iyi nitelikli MMK malzeme elde edebilmek için birçok parametre mevcuttur ve bunların iyi kontrol edilmesi gerekir. Bu parametreler şu şekilde sıralanabilir (Yılmaz, 2007) :

- Sıvı metalin bileşimi, sıcaklığı ve soğutma hızı
- Sıvı metalin viskozitesi

- Karıştırıcı boyutu
- Karıştırıcı kabiliyeti
- Karıştırma işlemi süresi ve sıcaklığı
- Karıştırma hızı
- Takviye partiküllerinin ve eriyiğin yoğunluğu
- Takviye elemanlarının boyutu ve miktarı
- Takviye ilave hızı
- Katılma süresince herhangi bir dış kuvvetin varlığı
- Karıştırma sonrası döküm işlemine kadar geçen süre
- Döküm kalıbı malzemesi ve kalıp sıcaklığı

Vortex metodunda, işlem parametreleri içinde özellikle karıştırma hızı, karıştırıcı kabiliyeti, karıştırma sıcaklığı ve takviye hızı gibi parametrelerin kontrolünün sağlanması gerekir. Kontrolün sağlanmadığı sistemlerde, özellikle düşük partikül boyutu ve yüksek hacim oranlarında porozite oluşmakta ve oluşan porozite oranı %25-30'a kadar çıkabilmektedir (Kök, 2001).

Vorteks yönteminde oluşan poroziteler, karıştırma işlemi sırasında oluşan hava kabarcıklarının sıvı metal içersinde çözünmesiyle meydana gelir. Yapılan çalışmalar neticesinde takviye edilen partiküllerin oranının artması ile porozitenin arttığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra porozite, karıştırma parametrelerine de bağlıdır. Kompozitlerin üretilmesi esnasında sıvıda çözünen gazları minimuma indirmek için yapılan çalışmalardan birisi, vorteks metodunun vakum veya inert bir gaz atmosferinde gerçekleştirilmesi, bir diğeri ise klor veya azot gazları gibi maddelerle sıvıda çözünen gazın giderilmesi veya partiküllerin sıvıya ilave edilmeden önce ısıl işleme tabi tutularak gazların giderilmesi şeklinde olmuştur (Yılmaz, 2007).

Bu metotta görülen bir diğeri problem ise seramik partiküllerin sıvı metal tarafından ıslatılmamasıdır. Islatma kabiliyetinin artırılması için:

- 1) Katı yüzey enerjisinin artırılması
- 2) Sıvı metal yüzey geriliminin azaltılması
- 3) Katı-sıvı arayüzey enerjisinin azaltılması

şeklinde tedbirler alınmaktadır. Bu tedbirlere örnek olarak; sıvı metalin sıcaklığının artırılması, seramik takviye malzemesinin partikül yüzeyinin bir metalle kaplanması, partiküllere ısıl işlem uygulanarak oksitlendirilmesi ya da matris sıvı yüzey

geriliminin azaltılması için matris alaşımına değişik alaşım elementlerinin (Mg, Ti gibi) ilavesi ile bileşim ayarlaması gibi yöntemler uygulanmaktadır (Kök, 2001).

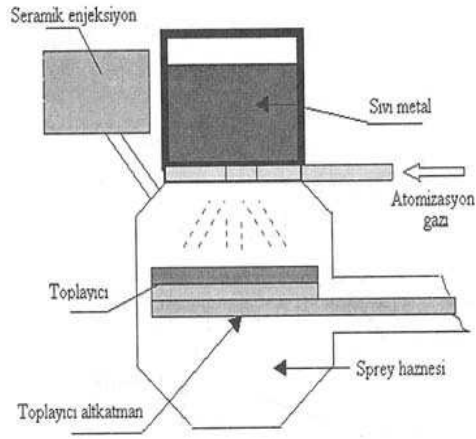
### **3.6.6. Rheocasting ve Compocasting döküm yöntemi**

Rheocasting ve Compocasting döküm olarak bilinen yarı katı karıştırmalı bu yöntemlerde, matris malzemesi karıştırma ünitesi bir ergitme fırınının içinde ergime sıcaklığının 40-50 °C üzerinde ısıtılıp karıştırma işlemi uygulanmakta ve sıvı metal sıcaklığı kontrollü olarak düşürülmektedir. Matris yarı katı hale geldiğinde içine süresiz takviye malzemesi eklenir ve bu sırada takviyenin tamamı ıslatılınca kadar sıcaklık artırılarak karıştırılmaya devam edilir. Nispeten düşük viskoziteye sahip karışımın doğrudan basit kütük şeklinde dökülmesi durumunda yöntem "Rheocasting" adını almakta, eğer karışım ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta iken karıştırılarak döküm gerçekleştirilirse "Compocasting" adı verilmektedir (Ürkmez, 2004; Yılmaz, 2007).

### **3.6.7. Plazma püskürtme yöntemi**

Bu yöntemde, atomize edilmiş sıvı metal parçacıkları takviye elemanları üzerine püskürtülmekte, püskürtülen sıvı metal parçacıkları takviye elemanlarına yapışarak hızla katılaşmaktadır. "Koruyucu gaz jeti ile birlikte ergimiş veya toz halindeki matris malzemesine yine toz haldeki takviye malzemesinin katılıp beraberce bir katman üzerine püskürtülmesi yöntemi "Osprey yöntemi" olarak adlandırılmıştır" (Ürkmez, 2004).

Toplayıcı alt katman hareketli olduğundan hıza göre katman kalınlığı belirlenmektedir. Çok kısa reaksiyon sürelerinden dolayı birbirleri içinde çözünme hızları düşük olan oksit ve metallerin ara yüzey bağ mukavemeti düşük olmaktadır. Bu yöntem Şekil 3.13'de şematik olarak gösterilmektedir (Yılmaz, 2007).



Şekil 3.13. Osprey yönteminin şematik gösterimi (Yılmaz, 2007)

### 3.6.8. In-Situ yöntemi

In-Situ yönteminde, bir ötektiğin yönlendirilmiş olarak katılaştırılması ile biri matris diğeri ise matris içine dağıtılmış lamel, plaka veya fiber şeklinde iki fazlı bir yapı ortaya çıkmaktadır. Uygulamaların çoğu alüminyum, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar kullanılarak tek seferde elde edilir ve iç yapıları oldukça kararlıdır (Ürkmez, 2004)

### 3.6.9. XD yöntemi

Martin Marietta şirketi tarafından geliştirilen bu yöntemde, matris alaşımı ve reaktif bileşenler katı halde karıştırılır ve karışımın her yerinde kendi kendine yayılabilen bir ekzotermik reaksiyon başlatılır. Reaksiyonda meydana gelen eriyik haldeki bir matris alaşımı içerisine takviye elemanlarının kararlı ve homojen bir şekilde dağılması sonucu proses sona erer (Yılmaz, 2007).

## 4. KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILAN TOZLAR

### 4.1. Silisyum Nitrür Ve Özellikleri

Birbirleri ile iyonik, kovalent veya iyonik/kovalent karışımı bağlarla bağlı olan seramikler, metalik ve metal olmayan elementlerin oluşturduğu inorganik malzemelerdir. Seramik malzemelerin özelliklerini, içerdiği farklı bileşimlerdeki kristal veya camsı fazlar, bu yapı bileşenlerinin dağılımı ve porozite miktarı etkilemektedir. Seramik malzemeler, metalurji endüstrisinde refrakter, makine-takım endüstrisinde aşındırıcı, inşaat ve otomobil endüstrilerinde cam, nükleer güç santrallerinde ise uranyum oksit yalıtkanlar olmak üzere birçok endüstrinin temel taşlarındandır (Bağcı, 2007; Akbulut vd, 2009)

Seramikler, yüksek basma mukavemeti ve sertlik, düşük sürtünme ve ısıl genişleme katsayısı, aşınmaya, oksidasyona ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık gibi üstün özellikleri nedeniyle özellikle uçak ve uzay endüstrisinde son yıllarda büyük ölçüde kullanılmaktadırlar. Bu üstün özelliklerine karşılık seramik malzemelerin diğer mühendislik malzemelerine kıyasla en önemli dezavantajı, gevrek ve kırılğan bir yapıya sahip olmasıdır (Bağcı, 2007; Genç, 2007).

Seramikler, geleneksel ve teknolojik seramikler olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Geleneksel seramikler, bileşimlerinde değişik türde silikatlar, alüminatlar ve bir miktar metal oksitleri bulunan seramiklerdir. Örneğin; cam, tuğla, kiremit ve porselen refrakterler gibi. Teknolojik seramiklerin hammaddesi, sentezleme yoluyla üretilen yüksek saflıktaki, çok ince tane boyutuna sahip tozlar olup, üretim yöntemi ise malzeme tozlarının bağlayıcılarla karıştırılıp, preslenip, sinterlenmesini içeren toz metalurjisi yöntemidir. Teknolojik seramikleri, geleneksel seramiklerden ayıran en önemli özellik, teknolojik malzemelerin çok ince tozlardan üretilmeleridir ki bu sayede çok yüksek yoğunluklarda parça üretilebilmektedir. Sonuç olarak parça yoğunluğunun artması ile seramik malzemenin mekanik özellikleri daha iyi duruma gelmektedir (Arık, 1996; Bağcı,2007).

Teknolojik seramiklerin, üstün özellikleri sayesinde birçok uygulama alanı bulunmakla beraber, her geçen gün artış göstermektedir. Bu uygulama alanları Çizelge 4.1’de sınıflandırılmıştır.

Çizelge 4.1. Teknolojik seramiklerin uygulama alanları (Akbulut, 2009)

Fonksiyonları	Özellikleri	Uygulama Alanları
Biyolojik / Kimyasal	Biyolojik uygunluk Adsorpsiyon Katalizör Korozyona karşı dirençli	Kemik Diş Katalizör taşıyıcı Kimyasal ekipmanlar
Mekanik	Yüksek mukavemet Aşınma direnci Düşük ısı genleşme Yağlayıcılık	Kesici uçlar Aşındırıcılar Türbin pervaneleri Katı yağlayıcı
Isıl	Refrakterlik Yalıtım Isı toplama Isıl iletkenlik	Yüksek sıcaklık endüstri fırınlarında tuğla Elektrot malzemesi Elektronik parçalar için ısı kalkanı
Nükleer	Radyasyon direnci Refrakterlik Yüksek sıcaklık mukavemeti	Nükleer yakıt Kontrol malzemesi Reaktör tuğlaları
Optik	Optik odaklama Floresans özellik Geçirgenlik Optik iletkenlik	Lazer diodları Isıya dayanıklı geçirgen porselenler Optik fiber
Elektrik ve manyetik	Elektriksel yalıtıcılık Elektriksel iletkenlik Piezoelektrik Dielektrik	Rezistans ısıtıcı elemanı Varistör Sensör Hafıza elemanı

Teknolojik seramikler, oksit ve oksit olmayan seramikler olarak gruplandırılmaktadır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Teknolojik seramiklerin sınıflandırılması (Bağcı, 2007)

Oksit seramikler	Oksit olmayan seramikler				
SiO <sub>2</sub>	Nitrürler	Karbürler	Sülfürler	Silisitler	Borürler
MgO					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiC	MoS <sub>2</sub>	MO <sub>2</sub> Si	TiB <sub>2</sub>
BeO	AlN	TiC	CdS	TaSi <sub>2</sub>	LaB <sub>6</sub>
ZrO <sub>2</sub>	TiN	ZrC	ZnS	WSi <sub>2</sub>	ZrB <sub>2</sub>
ThO <sub>2</sub>	ZrN	HfC	v.b.	v.b.	v.b.
	BN	B <sub>4</sub> C			



Silisyum nitrür, alüminyum nitrür, silisyum karbür ve bor karbür gibi oksit olmayan seramikler, endüstriyel uygulamalar bakımından önemli bir yere sahiptir ve bunlar özellikle sertlikleri ve refrakterlikleri ile tanınırlar. Çizelge 4.3’de bazı teknolojik seramiklerin atomsal bağ yapıları ile bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.3. Bazı teknolojik seramiklerin özellikleri (Genç, 2007)

Tipi	Atomsal bağ	Örnekler	Özellikler
Oksitler	İyonik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MgO ZrO <sub>2</sub> (PSZ) LiAl <sub>2</sub> SiO <sub>6</sub>	Sert aşındırıcı Sürtünme özellikleri iyi Çok sert
Karbürler	Az iyonik Yeralan bileşikler	ZrC TiC VC NbC	Elastiklik modül yüksek
	Kovalent	B <sub>4</sub> C SiC WC	Yüksek sıcaklıkta kararlı Sürtünme kötü Kesici takımlarda, aşındırıcılarda ve kalıplarda kullanılır.
Nitrürler	Kovalent	BN Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> AlN SiAlON TiN	Düşük yoğunluk Yüksek sıcaklıkta kararlı Çok sert Sürtünme direnci iyi Kesici takımlarda, gaz türbinlerinde, nozul ve potalarda kullanılır.
Borürler	Kovalent	LaB <sub>6</sub> ZrB <sub>2</sub>	Çok iyi iletken Sürtünme özellikleri iyi Elektron mikroskopunda filamen olarak kullanılır.

Silisyum nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), adından ilk defa 1857 yılında bahsedilmiş olmasına rağmen, seramik malzeme olarak geliştirilmesi ve kullanılması ancak 1954 yılından sonra olmuştur. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, oksit dışı nitrür seramikler içerisinde yer alan, yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik ve termomekanik özellikleri olan, bu özelliklerinden dolayı nitrür seramikler içerisinde en fazla öneme sahip ve kullanım alanı her geçen gün artmakta olan teknolojik seramik malzemedir (Kurt, 2002; Akbulut vd, 2009).

Çizelge 4.4’de görüldüğü üzere Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>’ün sertliği 1400-1700 HV, yoğunluğu 3,22-3,25 g/cm<sup>3</sup>, elastik modülü 310-320 GPa, çalışma sıcaklığı 1000 °C ve kırılma tokluğu 6-8 Mpa.m<sup>1/2</sup>, dır.

Çizelge 4.4. Silisyum nitrürün temel özellikleri (Şahin, 2009)

Özellikler	Silisyum Nitrür
Sertlik (HV10)	1400-1700
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	3,22-3,25
Elastiklik Modülü (GPa)	310-320
Çalışma Sıcaklığı	1000 °C
Kırılma Tokluğu (Mpa.m <sup>1/2</sup> )	6-8

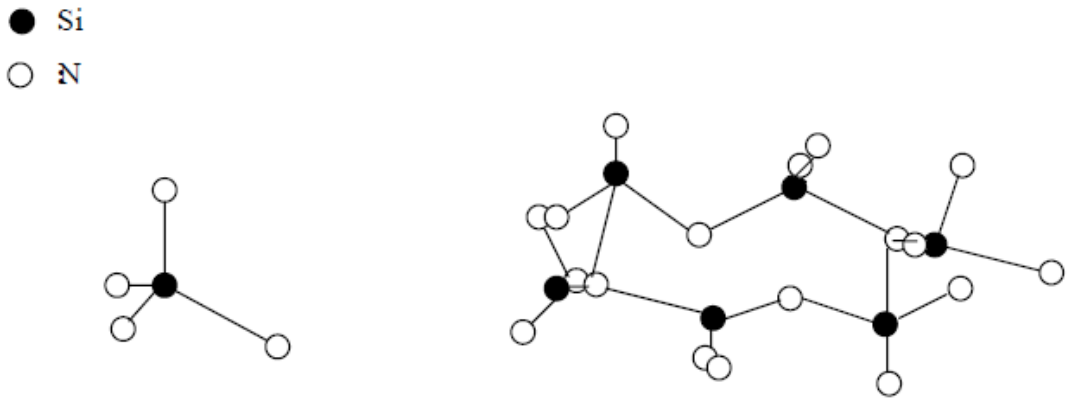
Silisyum nitrür, yüksek sertlik, mukavemet, yorulma ömrü, aşınma direnci, oksidasyon direnci ve korozyon direnci, düşük ısıl genleşme katsayısından dolayı mükemmel ısıl şok direnci gibi üstün özelliklere sahip ideal mühendislik malzemelerindendir. Bütün bu üstün özellikleri nedeniyle silisyum nitrürler üzerinde son 30 yıl içerisinde pek çok çalışma yapılmıştır. Silisyum nitrürlerin sahip oldukları üstün özelliklere ulaşabilmenin yolu ancak silisyum nitrürlerin teorik yoğunluğuna yakın bir yoğunlukta parça üretimi ile mümkündür (Kurt, 2002).

Toz halinde üretilen Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> malzemeler  $\alpha$  ve  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> şeklinde iki farklı allotropik yapıda kristalleşmektedir ve her ikisi de hegzagonal kristal kafes yapısına sahiptir. Önceleri  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün bir silisyum oksinitrürü olarak kabul edilmekte iken, artık günümüzde  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'ün gerçek bir polimorf olduğu ve  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ile arasında 30 kJ/mol kadar bir entalpi farkı bulunduğu bilinmektedir.  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yapıda,  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yapıya göre her 30 azot atomundan birinin yerini bir oksijen atomu almaktadır. Çizelge 4.5'de görüldüğü gibi, fazların ( $\alpha$  ve  $\beta$ ) ikisi de hegzagonal kristal yapıda olmasına rağmen bu durum, kafes yapının bazı parametrelerinde küçük değişimlere neden olmaktadır (Kurt, 2002; Erden, 2005; Genç, 2007; Şahin, 2009).

Çizelge 4.5.  $\alpha$  ve  $\beta$  - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> birim hücrenin parametrelerinin karşılaştırılması (Kurt, 2002)

Silisyum nitrür	Birim hücre	a (Å°)	c (Å°)	c/a	V (Å° <sup>3</sup> )	Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>
$\alpha$	Si <sub>12</sub> N <sub>16</sub>	7.748	5.617	0.7250	292.0	3.184
$\beta$	Si <sub>6</sub> N <sub>8</sub>	7.608	2.9107	0.3826	145.9	3.187

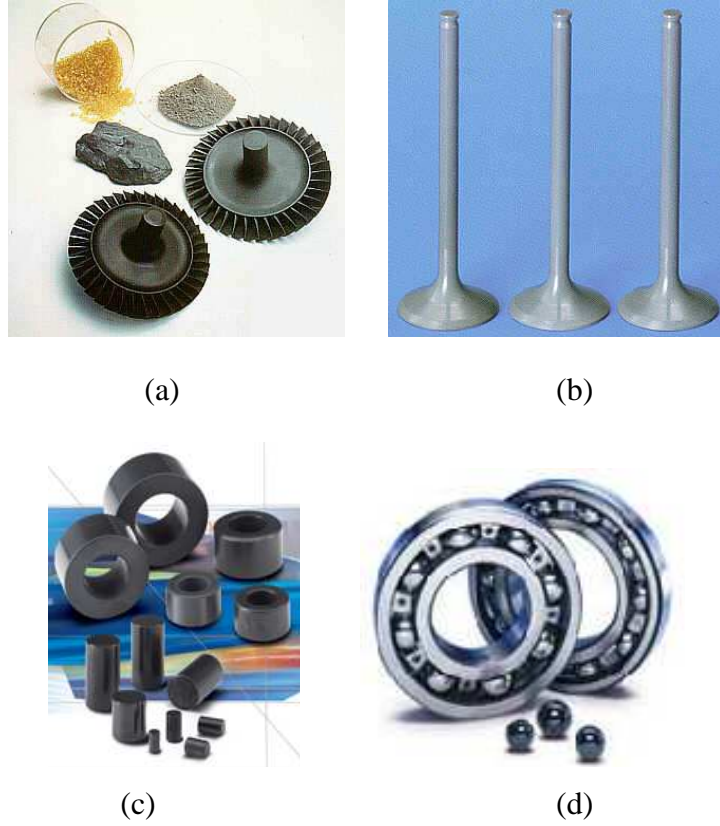
$\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'e göre daha kararlı yapıda olduğundan 1300-1450 °C aralığında sürekli olarak  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'den  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'e dönüşüm vardır ve tersi bir dönüşüm söz konusu değildir.  $\beta$  yapısı,  $\alpha$ 'nın eriyik veya buharlaşmasıyla meydana gelir.  $\alpha$  yapısı,  $\beta$  yapısına göre daha fazla sertliğe sahiptir. Ancak  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  formunun çubuksu mikro yapısı nedeniyle kendinden takviyeli olması, yapıya daha iyi tokluk ve mukavemet değerleri kazandırmaktadır. Bunun için  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ , mühendislik uygulamalarında daha fazla tercih edilmektedir.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  birim yapısı,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  dörtlüsünden oluşmakta ve yapı içerisinde her azot atomu üç ayrı silisyum atomu ile bağlanmaktadır (Kurt, 2002; Erden, 2005; Genç, 2007; Şahin, 2009).



Şekil 4.1. a) Silikatlarda ve nitrür seramiklerdeki dörtlü birim yapı, b)  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ün kristal yapısı (Kurt, 2002)

$\text{Si}_3\text{N}_4$  seramikler, yüksek sıcaklıklarda iyi mukavemet özelliklerine sahip olmaları nedeniyle yüksek derecede gerilmelerin meydana geldiği türbin kanatları ve diğer hareketli parçaların imalinde kullanılan en önemli malzeme haline gelmişlerdir.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  esaslı seramikler, demir dışı metaller tarafından kolayca ısıtılmaz olmaları ve yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımı özellikleri sebebiyle çok faydalı bir refrakter olarak alüminyum endüstrisinde çeşitli tüplerin ve termokupl kılıflarının imalatında kullanılmaktadır. Sertlik, aşınma direnci ve tokluk özellikleri sebebiyle metal işleme bileşenlerinde takım uçları ve tel çekme hadde makaraları olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sanayinde geniş uygulama alanı bulunan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  esaslı seramikler, motor bloklarında, piston ve valflerde aşınmaya maruz kalan klasik çelik parçaların yerine kullanılmak üzere geliştirilmektedirler. Yüksek performans gerektiren türbin kanatlarında kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramikleri, büyük güçlerin harcandığı sistemlerde düşük sürtünme katsayısından dolayı bilyeli rulmanlarda kullanılmaktadırlar. Şekil

4.2'de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ün tipik uygulama alanları gösterilmektedir (Kurt, 2002; Bağcı, 2007; Genç, 2007; Şahin, 2009).



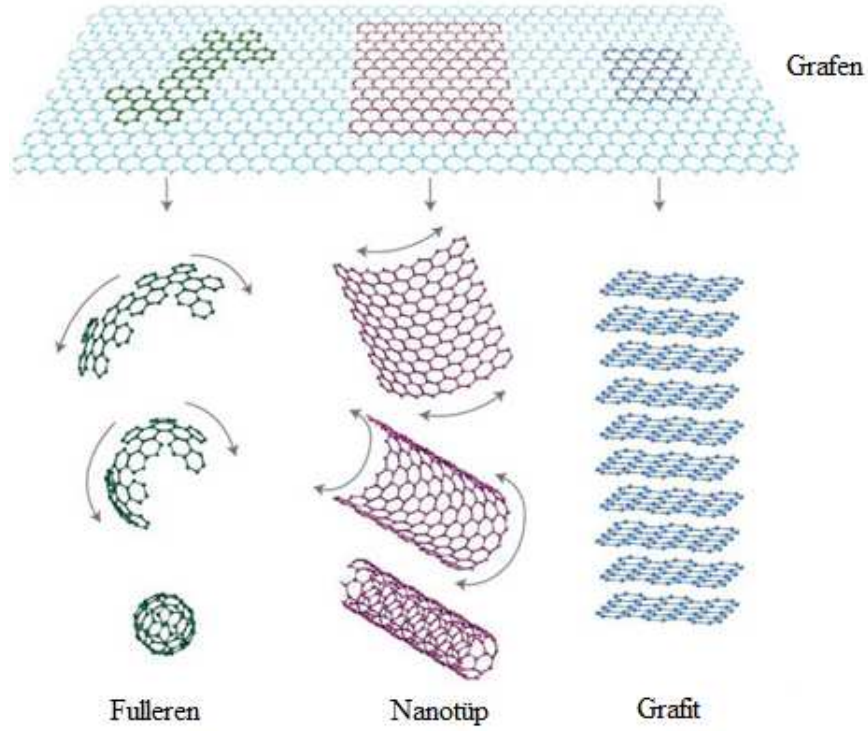
Şekil 4.2.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ün tipik uygulama alanları; (a) türbin kanatları, (b) motor subapları (c) otomobil motor parçaları, (d) yatak bilyeleri (Bağcı, 2007)

#### 4.2. Grafen ve Özellikleri

Önceleri sadece grafit ve elmas, karbonun doğada bulunan allotropları olarak biliniyordu. Ancak 2004 yılında Manchester Üniversitesi'nden Andre Geim ve Konstantin Sergeevich Novoselov isimli iki bilim insanı tarafından yapılan çalışma ile tek tabakalı, iki tabakalı ve bir kaç tabakalı olarak sentezlenen iki boyutlu malzeme, grafen olarak adlandırılmıştır (Çiftçi, 2015).

İki boyutlu malzeme olan grafen temel yapısı kullanılarak, Şekil 4.3'de gösterildiği gibi fulleren, karbon nanotüp ve grafit adı verilen farklı malzemeler geliştirilebilmektedir. Fulleren küresel halde yuvarlanıp top haline getirilmiş grafen tabakası olup, karbon nanotüp ise boru haline yuvarlatılmış grafen tabakasıdır. Son olarak grafit ise, üst üste yığılı birçok grafen tabakasının aralarında zayıf Van der Waals etkileşimi ile bağlanması sonucu meydana gelen karbonun üç boyutlu allotropu

olarak karşımıza çıkmaktadır. Katı halde olan grafit, sertliği çok düşük ve yağlı bir maddedir. Yağ haline getirilen grafit makinelerde, birbirine temas eden ve izafi harekette bulunan parçaların sürtünmesi neticesinde oluşacak güç kaybı ve aşınmanın azaltılması için yağlayıcı olarak kullanılır.



Şekil 4.3. Karbon esaslı malzemeler (Şenel vd, 2015)

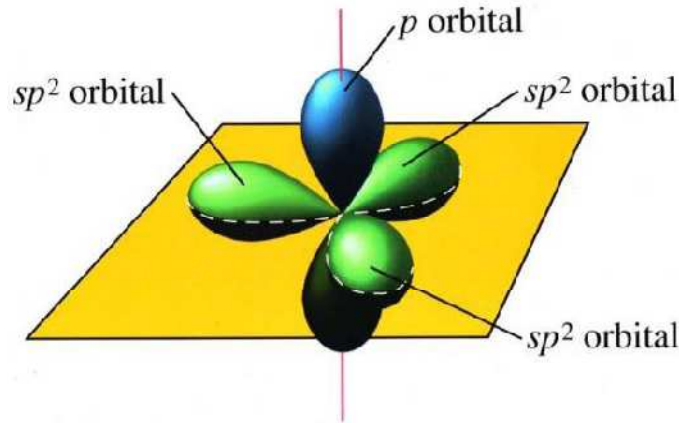
Grafen, diğer karbon allotroplarından oldukça farklı olup, sıradışı özelliklere sahiptir. İdeal grafen yapısı tek tabakalı olan ise de tabaka sayısı kontrol edilerek, özellikler kontrol edilebilmektedir. Karbon allotroplarının bazı fiziksel özelliklerinin karşılaştırmaları Çizelge 4.6'da verilmiştir (Kozal, 2012; Doğan, 2014; Şenel vd, 2015).

Bu özellikler incelendiğinde grafenin yüzey alanının çok yüksek olduğu ( $\sim 1500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ),  $4840\text{-}5300 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ile en yüksek termal iletkenliğe sahip olduğu ve yine diğer karbon allotroplarına göre en yüksek sertliğin grafene ait olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. Karbon allotroplarının fiziksel özellikleri (Doğan, 2014)

Karbon Allotropları	Boyut	Yüzey alanı (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	Yoğunluk (gcm <sup>-3</sup> )	Termal iletkenlik (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Sertlik	Elektriksel iletkenlik (Scm <sup>-1</sup> )	Esneklik
Grafit	Üç	~10-20	2,09-2,23	1500-2000, 5-10	Yüksek	Anisotropik 2,3.10 <sup>4</sup>	Elastik olmayan esnek
Elmas	Üç	20-60	3,5-3,53	900-2320	Ultra yüksek	-	-
Fulleren (C <sub>60</sub> )	Sıfır	80-90	1,72	0,4	Yüksek	10 <sup>-10</sup>	Elastik
Karbon nanotüp	Bir	~1300	>1	3500	Yüksek	Yapıya bağlı	Elastik esnek
Grafen	İki	~1500	>1	4840-5300	En yüksek	2000	Elastik esnek

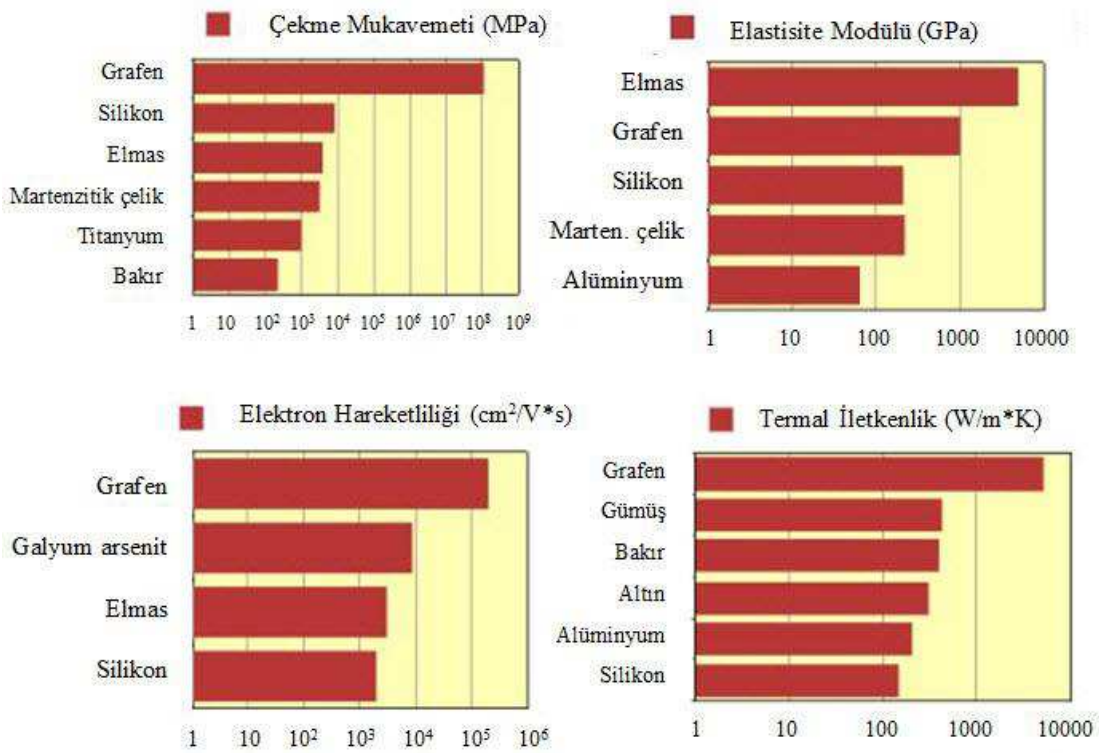
Karbon elementinin bal peteği örgülü yapıları olan grafen, sp<sup>2</sup> bağlı karbon tomularının tek atom kalınlığındaki düzlemsel yapısına sahiptir. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi bu iki boyutlu malzemede, karbon atomları bir tane s ve iki tane p orbitallerinin birleşimi ile 120 derece açılı üç adet sp<sup>2</sup> melezleşmesi yapmaktadır. Boşta kalan pz orbitalleri ise grafene olağanüstü özellikler kazandırmaktadır (Doğan, 2014).



Şekil 4.4. Karbon atomunun sp<sup>2</sup> hibrit orbitalleri (Doğan, 2014).

Karbon atomlarının tek düzlemde altıgen yapıda dizilmesi sonucu oluşan iki boyutlu, bir atom kalınlığında karbon allotropu bir yapı olan grafen, bu yapısı sayesinde olağanüstü özelliklere sahiptir. Şekil 4.5'de grafenin çeşitli özelliklerinin bilinen diğer malzemelerle karşılaştırmaları bulunmaktadır. Dijital teknolojisinin en önemli malzemesi silisyum, grafen ile karşılaştırıldığında, elektronların silisyum içindeki hızlarının grafen içindeki hızlarına göre 100 kez daha yavaş olduğu tespit

edilmiştir. Bilinen en ince malzeme olan grafendeki güçlü karbon bağları, onu yeryüzünde bilinen en güçlü malzeme yapmaktadır. Öyle ki, grafenin elastisite modülü, çelikten yaklaşık 100 kat daha fazladır. Grafen, elmastan sert olmasına rağmen kolayca esneyebilerek değişik formlardaki birçok malzemenin yüzeyine kolaylıkla kaplanabilmektedir. Saydam olan grafen tabakasının iyi bir elektrik iletkeni olmasının yanında iyi bir ısı iletkeni olduğu da bilinmektedir. Ayrıca grafen, sahip olduğu doğal yağlayıcılık özelliğinden dolayı aşınma katsayısını düşürerek aşınma dayanımını artırmaktadır. Tüm bu özelliklerinden dolayı grafen, dünyada birçok önemli değişikliklere neden olabilecek bir malzemedir (Şenel vd, 2015).



Şekil 4.5. Grafenin çeşitli özelliklerinin bilinen diğer malzemelerle karşılaştırılması (Şenel vd, 2015)

Yakın bir gelecekte hayatımızın ayrılmaz bir parçası olarak pek çok bilimsel ve teknolojik gelişmenin öncüsü olacak olan grafenin, otomotiv ve havacılık endüstrisi, elektrik-elektronik sektörü, robot imalatı, enerji depolama, fotovoltaiik hücreler, telekomünikasyon, biyokimya ve tıp gibi alanlarda kullanılması beklenmektedir. Yeniden şarj edilebilir pillere benzer şekilde enerji depolayan ve neredeyse sınırsız bir ömre sahip olan süper kapasitörler, grafenin gelecekteki en önemli uygulama alanlarından birisi konumundadır. Çok küçük ölçeklerde boyutlandırma problemi

nedeniyle gün geçtikçe sınırlarına yaklaşan silisyum tabanlı elektronik teknolojisi, alt sınıra ulaştığında sorunun çözümü için alternatif olarak bir atom kalınlığındaki grafenin kullanılması öngörülmektedir. Karbon kaynaklarından meydana gelmiş iki ürün olan grafen ve insan vücudunun birbiriyle uyumlu olması ve grafenin vücut içerisinde bulunan iyonik sıvılarda yapısı bozulmadan kalabilmesinden dolayı biyonomik kulak, biyonomik göz vb. organ teknolojilerinin geliştirilmesi grafenle mümkün olabilecek gibi görünmektedir. Grafenin bir diğere önemli kullanım alanı da kompozit malzeme üretimidir. 2004 yılında sentezlenmeye başlanan grafen, 2008 yılından itibaren MMK'ların üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Üretilen sonuçlardan, Al, Ti, Mg, gibi matris malzemelerine grafen takviyesinin mekanik özellikleri büyük oranda artırdığı tespit edilmiş olup, yakın gelecekte otomotiv, havacılık ve uzay sektörlerinde kullanılacak yeni nesil kompozitler üretilebilecektir (Başçı, 2015; Şenel vd, 2015).

Grafen, hafifliği, yüksek mukavemet ve aşınma direnci gibi özellikleri nedeniyle kompozit üretiminde önemli bir takviye elemanı haline gelmiştir. Ayrıca grafen takviyesinin bilinen diğere takviyelere göre oldukça az miktarda olması yine en önemli tercih nedenlerindedir. Ancak grafen katkısının artırılması sonucunda grafenin topaklanma eğilimine girdiği ve  $Al_4C_3$  gibi istenmeyen ikincil fazların oluşarak mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bu sebeple, grafenin sahip olduğu üstün özelliklerin kompozite olan etkisi, grafenin matris içerisinde homojen dağılması ve  $Al_4C_3$  gibi istenmeyen ikincil fazların oluşumunun önlenmesine bağlıdır (Şenel vd, 2015).



## 5. KAYNAK ÖZETLERİ

**Pai vd (1993)**, sıvı metal karıştırma yönteminin diğer yöntemlere göre nispeten basit, ucuz ve hemen hemen tüm döküm yöntemine adapte edilebilir olduğunu ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada üç farklı takviye malzemesi (kırpılmış karbon elyaf, grafit parçacıklar, SiC parçacıkları) ve beş farklı Al alaşımı matris malzemesi kullanarak (LM6, LM25, 6061, HMS2112 ve 7075), farklı döküm yöntemleriyle deneme yapmışlardır. Döküm yönteminin seçiminde takviye boyutunun ve tipinin belirleyici olduğu, kritik parçacık çapının 20 µm ve daha küçük çaplar olduğu, takviye malzemesinin sıvı alüminyum üzerinde oluşan geçirimsiz alümina tabakasını ve yüzey gerilimini aşarak ergimiş metal içine topaklanmadan karışmasını sağlamak için yeteri kadar güçte ve iyi tasarlanmış karıştırıcılar gerektiğini belirlemişlerdir. Vorteks oluşumunun karışımı sağladığı fakat ortamdan oldukça fazla gaz emilmesine neden olduğu için bu tür karıştırma yöntemlerinde azot ve argon gazı koruması altında yapılması gerektiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca yüzey gerilimini azaltmak ve takviyenin daha iyi karışımını sağlamak için Mg, Ca, Nb, Ti, Pb gibi elementlerin alaşıma katılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

**Samuel & Samuel (1995)**, matris olarak Al-Si-Mg alaşımı, takviye olarak da SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanmışlar ve ergimiş metal sıcaklığının, ortamdaki hidrojen seviyesinin ve karıştırma prosedürünün dengeli seçimi ile sırası ile istenmeyen kimyasal reaksiyonların, gaz porozitesinin ve inklüzyon ve oksit kirliliklerinin önlenmesinde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir.

**Seo & Kang (1995)**, sıvı metal karıştırma ve ardından presleme yöntemi ile MMK malzemelerin üretiminde en iyi mekanik özellikleri veren en uygun presleme basıncını bulmak amacıyla yaptıkları çalışmalarında matris malzemesi olarak Al-Si alaşımı ve takviye malzemesi olarak da SiC partikülleri kullanmışlardır. Seo ve Kang sıvı metal karıştırma metoduyla elde ettikleri eriyiği kalıba boşaltıp katılaşmadan 70, 100 ve 130 MPa basınç altında presleyerek MMK malzeme üretmişlerdir. Mikroyapı incelemeleri ve çekme deneyleri sonuçlarına göre uygulanan basıncın artmasıyla matris ile takviye malzemesi arasındaki ıslanabilirliğin ve MMK malzemelerin çekme mukavemetinin iyileştiğini tespit etmişlerdir.

**Gui vd (2000)**, SiC takviyeli Al-Si matrisli kompozit malzemeleri döküm yoluyla üretmeyi kapsayan çalışmalarında, sıvı karıştırma prosesini takiben yarı-katı karıştırma prosesi uygulamışlardır. Nispeten düşük devirli karıştırma sonucu SiC parçacıklarının matris tarafından tam olarak ıslatılabildiği, karıştırma işleminin düşük sıcaklıklarda yapılması ile Al-SiC ara yüzeyinde istenmeyen Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> oluşumunun minimize edildiğini belirlemişlerdir. %15, %20 hacimsel takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının takviye edilmemiş matris malzemesine göre sırası ile %15 ile %26, akma dayanımının %40 ile %54, elastikiyet modülünün %30 ile %40 oranında arttığını belirtmişlerdir.

**Kök (2001)**, vorteks metodu ve basınç ile üç farklı boyut (66 µm, 32 µm ve 16 µm ) ve hacim oranlarında ( %7, %15 ve %23 ) α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri ile takviye edilmiş 2024 alüminyum esaslı metal matrisli kompozitleri başarılı bir şekilde üretmiştir. Kompozit üretimi için farklı denemeler yapılmış ve en iyi sonuçlar; sıvı metal sıcaklığının 700 °C, karıştırma hızının 900 dev/dak, kalıp sıcaklığının 550 °C, takviye elemanı ilâve hızının 5 g/dak, porozitenin azaltılması amacıyla uygulanan basıncın 6 MPa ve takviyenin bitmesinin ardından karıştırma süresinin 5 dakika olduğu şartlarda elde edilmiştir. Yoğunluk ölçümleri sonucunda, üretilen kompozit malzemelerdeki porozitenin çok düşük olduğu; takviye elemanı oranının artması ve boyutunun düşmesi ile porozitenin arttığı görülmüştür. SEM ile yapılan mikroyapı incelemelerinde elde edilen görüntülerde, partikül boyutu arttıkça, takviye elemanlarının matris içerisinde dağılımının homojen olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra düşük boyutlu partikül kullanımının, partikül topaklanması ve porozite oluşumuna neden olduğu tespit edilmiştir.

**Sur vd (2005)**, MMK malzemelerin, ergimiş metal karıştırma yöntemi ile üretimlerinde karşılaşılan problemlerin azaltılmasını amaçlamışlardır. Bu doğrultuda kompozit üretimi için argon gazı koruyucu atmosferli ergitme fırını ve karıştırma ünitesi tasarlayarak imalatı gerçekleştirmişlerdir. Üretimi yapılan MMK'larda, matris malzemesi olarak 2014 alüminyum alaşımı, takviye malzemesi olarak da üç farklı boyutta (29 µm, 45 µm ve 110 µm) SiC partikülleri kullanılmıştır. Üretilen MMK malzemenin içerisinde oluşabilecek porozitenin en düşük seviyede tutulabilmesi için kalıba döküm işleminin ardından, elle basmalı hidrolik preste 3 ton'luk yük 5 dakika süre ile uygulanmıştır. MMK malzemelerin üretimleri esnasında artan partikül boyutu ve azalan takviye oranı ile üretimlerin kolaylaştığını gözlemlemişlerdir.

Bununla birlikte azalan partikül boyutu ve artan takviye oranı ile kompozitlerin sertliklerinin arttığı, yine aynı şartlarda porozite miktarının ve partiküllerin topaklanmasının da arttığı bununla birlikte homojen dağılımın sağlanamadığı görülmüştür.

**Kok (2005)**, farklı boyutlarda ( 16, 32, 66  $\mu\text{m}$ ) ve farklı yüzde ağırlık oranlarında (%10, 20, 30)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  parçacıkları, 2024 alüminyum alaşımına takviye ederek vorteks yöntemi ve sonrasında basınç altında presleme işlemi uygulayarak kompozit malzeme üretmiştir. Kompozitlerin sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerine,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  parçacık miktarı ve boyutunun etkilerini araştırmıştır. Yoğunluk ölçümleri, örneklerin çok az gözeneklilik içerdiğini göstermiştir ve porozite miktarının, ağırlıkça yüzde takviye oranının artması ve parçacık boyutunun küçülmesiyle arttığı tespit edilmiştir. Kompozitlerin sertlik ve çekme dayanımı, parçacıkların yüzde ağırlık oranının artışıyla ve parçacık boyutunun azalmasıyla artış göstermiştir.

**Özdin vd (2006)**, vorteks metodu ile iki farklı boyut (63 ve 128  $\mu\text{m}$ ) ve üç farklı hacim (%4, %8 ve %12) oranlarında SiC partikülleri ile takviye edilmiş 2011 alüminyum esaslı metal matrisli kompozitlerin üretimini başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, karıştırıcı kabiliyeti, karıştırma hızı, kalıp sıcaklığı, partikül ilave hızı ve döküm hızı gibi işlem parametrelerinin başarılı bir kompozit üretimi için ne derece önemli olduklarını ve hatta parametrelerin herhangi birinin uyumsuz olmasının üretim hatalarına yol açtığını belirlemişlerdir. Karıştırma hızı 900 dev/dak ve takviyenin bitmesinin ardından gerçekleştirilen karıştırma süresi 8 dakika ve kalıba döküm sıcaklığı 660  $^{\circ}\text{C}$  olarak uygulandığında partikül topaklanmasında önemli bir azalma gözlenmiştir. Kompozit üretimleri dışında, vorteks metodu kullanılarak gerçekleştirilen partikül takviyeli MMK üretiminde, partikül boyutunun ve miktarının porozite oluşumuna olan etkisi araştırılmıştır. Döküm işleminden hemen ardından kompozit malzeme, jel kıvamından biraz daha katı halde iken hidrolik preste 5 MPa basınçta preslenmiştir. Bu sayede porozitenin daha düşük olduğu ve matris ile takviye elemanı arasında daha iyi bağ kuvveti elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde, kompozitlerdeki partikül oranının artması ve partikül boyutunun azalması ile porozitenin arttığını tespit etmişlerdir.

**Atik vd (2006)**, matris malzemesi olarak kullanılan AlSi12CuNiMg alüminyum alaşımına %4 SiC, %4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %2-4-6-8 TiO<sub>2</sub> olmak üzere ağırlıkça çeşitli yüzdelerde partikül takviyesi yaparak, döküm yöntemiyle üretilen partikül takviyeli kompozit numuneler üzerinde sertlik, çekme ve basma dayanımı ile aşınma direncini araştırmışlardır. AlSi12CuNiMg alüminyum alaşımına ilave edilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC ve TiO<sub>2</sub> partikül takviyesinin çekme dayanımını azalttığı, sertliği ve basma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Çekme dayanımında meydana gelen bu azalmanın, partiküllerin çekme anında matrisle iyi bağlanamamasından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Bunun yanı sıra SEM fotoğraflarından da matris ile partikül takviye elemanları arasında iyi bir bağlantı sağlanmadığını gözlemlemişlerdir. %4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %4 SiC ve %2 TiO<sub>2</sub> partikül takviyelerinin aşınma direncinde sırasıyla %6, %4 ve %2 oranında iyileştirici etkiye sahip oldukları belirlenmiştir. TiO<sub>2</sub> ile matris malzemesi olarak kullanılan Al alaşımı arasında iyi bir bağlantının sağlanmadığını, bu nedenle TiO<sub>2</sub> oranının artmasıyla aşınma dayanımında düşüş olduğunu belirlemişlerdir.

**Buytoz & Eren (2007)**, Al-Si-Mg alaşımına ağırlıkça %5,10 ve15 oranlarında SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve FeCrC parçacıkları ilave ederek üretilen alüminyum metal matrisli kompozit malzemelerin abrasiv aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Kompozit malzemeler vorteks metodu ile üretilmiştir. Abrasiv aşınma deneyleri, bir pin on disk test cihazında kayma hızı 1.89 m/s ve uygulanan yük 10, 20 ve 30 N değerlerinde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bunların dışında, matris alaşımı ve üretilen kompozit malzemelerin optik mikroskop, SEM ve (enerji saçınım spektrometresi) EDS incelemeleri yapılmıştır. Test sonuçlarını incelediklerinde, kompozit malzemelerin aşınma değerlerinin matris alaşımının aşınma değerlerine göre oldukça düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte üretilen kompozit malzemelerde, artan yükte birlikte aşınma miktarının da arttığını, ancak maksimum yükte FeCrC parçacıklarının matrisi plastik olarak deforme ettiğini belirlemişlerdir.

**Mindivan & Kayalı (2007)**, sıkıştırma döküm yöntemini kullanarak ürettikleri hacimsel %50 oranında SiC parçacık takviyeli 2618 alüminyum matrisli kompozitin döküm halindeki ve yaşlandırılmış durumdaki kuru kayma aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca sertlik ve darbe deneyleri ile kompozitlerin sertlik ve darbe dayanım değerlerini belirlemişlerdir. Yapılan testler sonucunda kompozitin sertliğinin yaşlandırma işlemi ile %5 oranında artarken darbe direncinin ise yaklaşık

olarak %12 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi için kullanılan ileri-geri aşınma deneyleri 1.5 - 6 N yük aralığında, 0.02 m/s ve 0.09 m/s olmak üzere iki farklı kayma hızında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> topun sürtünmesi ile yapılmıştır. Aşınma deneyleri sonunda kompozit malzemenin yaşlandırma işlemi ile elde edilen aşınma direncinin, döküm haline göre düşük test yüklerinde ve yüksek kayma hızlarında değişmediği, ancak yüksek test yüklerinde ve düşük kayma hızlarında ise arttığı tespit edilmiştir.

**Kılıç (2008)**, sıkıştırma döküm yöntemiyle farklı hacim oranlarında (%5, %10, %15 ve %20) SiC parçacık takviyeli Al-Mg esaslı (AA5754) MMK malzemenin aşınma davranışı ve sürtünme katsayısı değişimini, farklı yüklerde ileri-geri aşınma testi yapan reciprocating aşınma cihazı ile incelemiştir. 1 N ve 6 N yük altında yapılan deneylerde, malzemenin yüksek oranda yük uygulandığında takviye oranı düştükçe plastik deformasyona uğradığı ve deformasyon sertleşmesinin etkisiyle sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür. Artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının büyük oranda arttığını tespit etmiş olup takviyesiz ve düşük oranlı takviyeli kompozitlerde 6 N yükde aşınmadan çok deformasyon meydana geldiği SEM analizinde görülmüştür.

**Singla vd (2009)**, alüminyum esaslı SiC parçacıklı MMK geliştirmek ve üretim sırasında seramik malzemenin matris içinde homojen dağılımını sağlamak için düşük maliyetli bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu hedeflere ulaşmak için iki aşamalı karıştırmanın uygulandığı bir karıştırma döküm tekniği kullanmışlardır. Alaşım yarı katı halde iken elle karıştırma yapılmıştır ve sonra tamamen sıvı hale gelene kadar ısıtılarak bir mekanik karıştırıcı ile karıştırma işlemi uygulanmıştır. Deneyler, SiC ağırlıkça takviye oranı %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 şeklinde değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar uygulanan yöntemin, takviye malzemesinin matris içinde üniform dağılımını elde etmek için çok başarılı olduğunu göstermiştir. SiC ağırlık yüzdesi arttıkça sertlik ve darbe dayanımının arttığı gözlenmiştir. En iyi sonuçlar ağırlıkça %25 takviye oranında elde edilmiştir. Bu takviye oranının artırılmasıyla, SiC parçacıklarının kümelenmesi sebebiyle sertlik ve darbe dayanım değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

**Toprak (2010)**, koruyucu argon gazı atmosferi altında yarı katı karıştırma tekniği ve sıkıştırma döküm yöntemi ile üretilmiş kompozit malzemeler kullanmıştır. Soğuk biçimlendirme uygulanmış ve uygulanmamış olarak iki grup halinde incelenen farklı hacimsel takviye oranlarına sahip AlMg3/SiCp kompozitlerinin basma yükleri karşısındaki davranışları araştırılmıştır. Basma deneylerinde, malzemelerin basma dayanımlarının matris içerisindeki takviye hacimsel oranları ile doğrusal olarak arttığı, kompozit malzemelere uygulanan soğuk biçimlendirme işlemleri (haddeleme gibi) sonucunda da takviye ilavesi ile kazanılan dayanım artışına ek artışlar meydana geldiği gözlenmiştir.

**Bajaj (2011)**, karıştırma döküm yöntemini kullanarak, ağırlıkça %2.5, 5, 7.5, 10 oranlarında SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ve SiC+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli, alüminyum döküm alaşımı (LM6) matrisli kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmiştir. Elde edilen numunelerin sertlik, çekme ve darbe deneyleri ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Takviye oranının artışı ile sertliğin, çekme dayanımı ve darbe dayanımının artış gösterdiği belirlenmiştir. Mekanik özelliklerde en fazla artış, SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye elemanlarının birlikte ilave edilmesiyle elde edilen kompozitlerde tespit edilmiştir.

**Mutlu (2012)**, çalışmasında matris metali olarak ticari saf alüminyum ve takviye malzemesi olarak ortalama çapları 5-100 µm boyutlarındaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülü %5 hacim oranında kullanmıştır. Kompozit malzeme üretimi için, öncelikle özgün bir yaklaşımla üretim sistemi tasarlamıştır. Bu tasarımda elektrik motorundan alınan mekanik enerji ile elde edilen dönme hareketi, ucunda dökme demir karıştırıcı pervanenin bulunduğu mile aktarılmakta ve bu sayede ergitme potasında ergimiş olan matris metali karıştırılmaktadır. Karıştırma sonucunda girdap (vorteks) oluştuğu sırada takviye malzemesi olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküller ilave edilmiştir. Bu işlemin ardından meydana gelen kompozit malzeme, potanın alt boşaltma deliğinden kalıplara alınarak hazırlanmaktadır. Ergitme ve karıştırma işlemleri sırasında, inert koruyucu atmosfer oluşturulması için argon gazı kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemenin mikro yapı incelemesi optik metalografi ile yapılarak takviye malzemesi olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıklarının homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, vorteks metodu ile metal matrisli kompozit üretimi için tasarlanıp imal edilen düzeneğin başarılı şekilde çalıştığı görülmüştür.

**Sujan vd (2012)**, SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacık takviyeli AMK'ların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Al356 alaşımına, ağırlıkça %5, 10, 15 oranlarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve yine aynı oranlarda SiC ilave edilerek karıştırma döküm yöntemi ile kompozit malzemeler üretilmiştir. Sonuçlar, kompozit malzemelerin yüksek çekme dayanımı, yüksek darbe dayanımı, yüksek sertlik ve düşük termal genleşme katsayısı gibi gelişmiş fiziksel ve mekanik özellikler sergilediğini göstermiştir. Ayrıca kompozit malzemelerde takviye oranının artması ile aşınma oranının önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir.

**Singh vd (2013)**, karıştırma döküm yöntemi kullanarak AMK üretimi yaptıkları çalışmada, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacık boyutu (75, 105, 150 µm), ağırlıkça yüzde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı (%3, 6, 9) ve karıştırma zamanı (15, 20, 25 dak) gibi giriş proses parametrelerinin, sertlik, darbe dayanımı ve çekme dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Karıştırma zamanı ve takviye elemanının ağırlık yüzdesinin artması, takviye parçacık boyutunun ise azalması ile birlikte tüm bu mekanik özellikler artış eğilimi göstermiştir.

**Alaneme & Bodunrin (2013)**, AA6063 alaşımına hacimsel olarak %6, 9, 15, 18 oranlarında 28 µm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıkları ilave ederek iki aşamalı karıştırma döküm yöntemi kullanarak ürettikleri alüminyum metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Üretilen kompozitlerin, düşük gözenek seviyelerine (≤ %3,51) sahip olduğu ve artan takviye oranıyla gözenek oranının arttığı görülmüştür. Matris malzemesi içerisinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıklarının homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hacim oranının artışı ile kopma uzaması ve kırılma tokluğu azalırken, çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik artmıştır.

**Sharma vd (2015)**, AA6082-T6 alaşımına ağırlıkça çeşitli yüzdelerde (%3, 6, 9, 12) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıkları ilave ederek konvansiyonel karıştırma döküm yoluyla ürettikleri alüminyum matrisli kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Alüminyum matris içinde Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıklarının varlığı, taramalı elektron mikroskopu görüntüleri ile belirlenirken, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıklarının dağılımı da X-ışını kırınım yöntemi ile tespit edilmiştir. Alüminyum matris içinde Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıklarının ağırlık yüzdesi arttıkça çekme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özellikler iyileşmiştir ve yoğunluk ile porozite de artan bir eğilim göstermiştir.

**Hindi vd (2015)**, karıştırma döküm yöntemi kullanarak, ağırlıkça %2, 4 ve 6 oranlarında SiC parçacıkları, Al 6063 alüminyum alaşımına takviye ederek kompozit malzeme üretmişlerdir. SiC takviyesinin artışı ile sünekliğin azaldığı, sertlik ve çekme dayanımının ise arttığı tespit edilmiştir. Darbe dayanımının başlangıçta arttığı ve daha sonra SiC takviyesinin artırılması ile azaldığı gözlenmiştir.

**de Araujo vd (2012)**, AA6061 alüminyum alaşımına ağırlıkça %5, 10, 15 oranlarında Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve AlN takviye edilerek toz metalurjisi yöntemiyle iki farklı kompozit malzeme üretmişlerdir. Takviye fazının mikroyapı ve sertliğe etkisini araştırmışlardır. Tozlar ve sinterlenmiş malzemelerin mikroyapısı SEM vasıtasıyla, sertlikleri ise Vickers sertlik testi ile değerlendirilmiştir. Yüksek enerjili öğütme işleminin parçacık çapını azaltmada oldukça etkili olduğu ve buna bağlı olarak her iki kompozitin SEM görüntülerinde takviye fazının homojen dağıldığı görülmüştür. Takviye oranlarının artmasıyla, her iki kompozit türünün de sertlik değerlerinin arttığı ve en yüksek sertlik değerine %15 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyesiyle ulaşıldığı tespit edilmiştir.

**Wang vd (2012)**, toz metalurjisi yöntemi ile ağırlıkça %0,3 oranında grafen nanotabaka takviyeli alüminyum kompozit üretmişler ve takviyesiz Al matrise göre kompozitin çekme dayanımının %62 arttığını belirlemişlerdir.

**Rashad vd (2014)**, bu çalışma ile toz metalurjisi ve ardından sıcak ekstrüzyon yöntemi kullanılarak grafen nano tabakalı alüminyum kompozit eldesi ve grafen nano parçacık ilavesinin çekme dayanımı, basma dayanımı ve sertlik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,3 oranında grafen takviyesi sonucu saf alüminyumun çekme dayanımı ile sertliğinin arttığı, basma dayanımının ise düştüğü gözlemlenmiştir.

**Yan vd (2014)**, grafen nano tabaka takviyeli alüminyum alaşımları, toz metalurjisi yöntemi ile başarılı bir şekilde hazırlamışlardır. Ağırlıkça %0,15 ve %0,5 oranlarında takviyelerle kompozit numuneler elde edilmiştir. Çekme dayanımı ve akma dayanımı, takviye oranının artmasıyla artmıştır. En önemlisi, diğer MMK'lerin çoğunda olduğu gibi takviye ilavesiyle süneklik azalmamıştır.

**Jagadish (2015)**, bu çalışma ile metallerin ve takviye malzemelerinin istenen özelliklerini birleştirerek MMK malzemelerin geliştirilmesini içeren bir çalışma yapmışlardır. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen kompozitlerde, matris olarak Al



2024 alaşımı ve takviye olarak da ağırlıkça %0.25, 0.5, 0.75 ve 1 gibi farklı oranlarda grafen kullanılmıştır. Sertlik değerlerinin takviye ile dūřmesiyle birlikte en dūřük sertlik %0.5 takviye oranında gürülmüştür. Grafenin yüzde ağırlık oranının artışıyla darbe dayanımının azaldığı, eğilme dayanımının ise artış gsterdiği belirlenmiştir.

**Gao vd (2016)**, toz metalurjisi yöntemi ile ağırlıkça %0.1, 0.3 ve 0.5 oranında grafen takviyeli alüminyum kompozit üretmişlerdir. Grafen takviyeli alüminyum kompozitlerin çekme dayanımı başlangıçta artmakla birlikte grafen takviyesinin artmasıyla azalmış ve kompozitin grafen içeriği %0.3 olduğunda çekme dayanımı maksimuma ulaşmıştır. Bununla birlikte, kompozitin kopma uzamasının giderek azaldığı ve grafen içeriğinin artması ile birlikte kompozitin kırılma şeklinin sünekten gevrek kırılmaya doğru değiştiği gözlenmiştir.

Yapılan literatür taramasında, matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum için daha çok alaşımlar, yöntem olarak da karıştırma döküm ve toz metalurjisi tercih edilmiştir. Fakat literatürde atık içecek kutularının geri dönüşümü ile bunun  $Si_3N_4$  ve grafen takviyeli kompozitlerde kullanımı ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, matris olarak atık alüminyum içecek kutularının kullanıldığı, grafen ve  $Si_3N_4$  takviyeli kompozit malzemeleri karıştırma döküm yöntemi ile üretmek bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır.

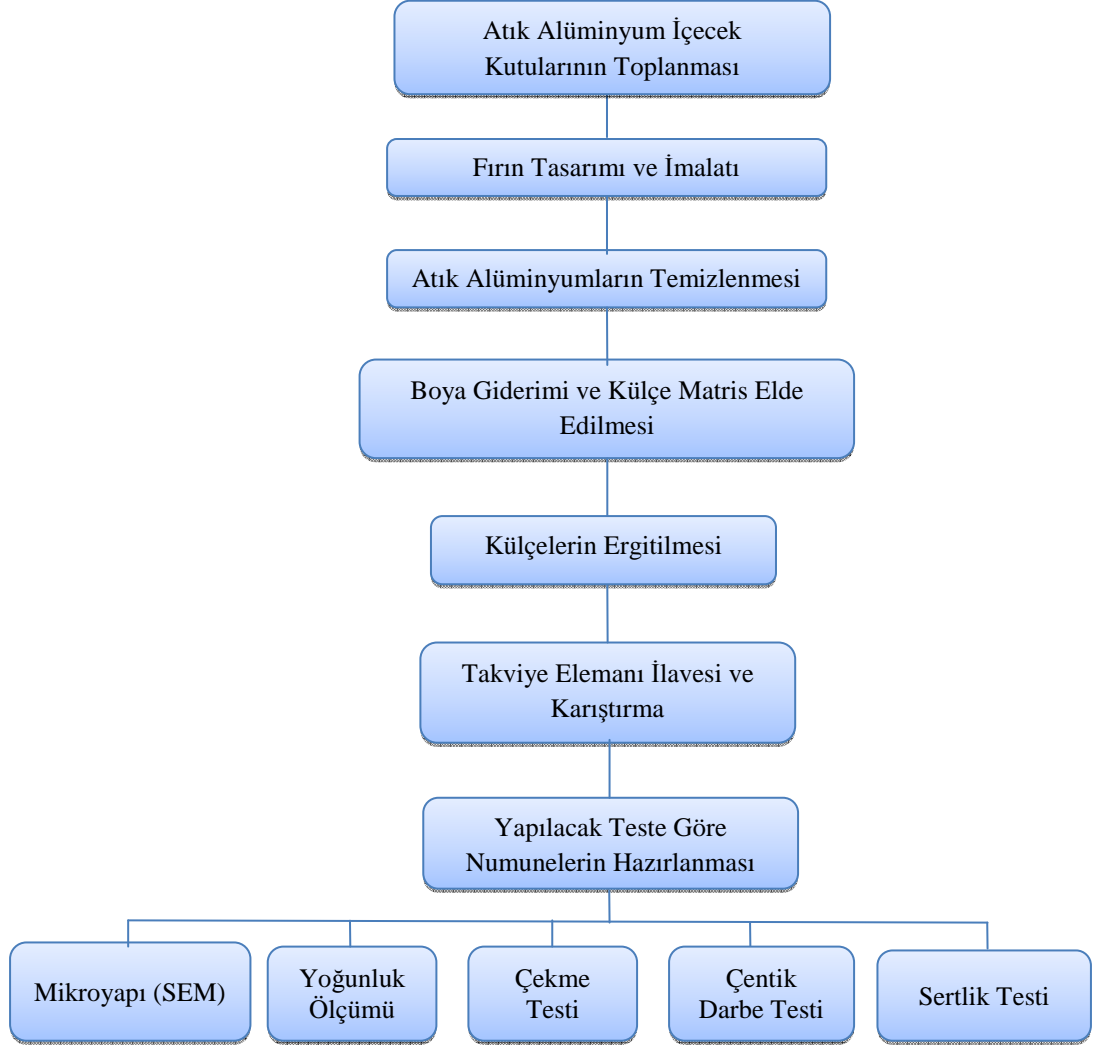
## 6. MATERYAL VE YÖNTEM

### 6.1. Materyal

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak daha önce yapılmış çalışmalarda kullanılan saf alüminyum veya ticari alüminyum alaşımları yerine atık alüminyum kullanılmıştır. Bu ihtiyaç ise atık alüminyum içecek kutuları ile sağlanarak aynı zamanda geri dönüşüm uygulaması yapılmıştır.

Takviye elemanı olarak ise grafen ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tozları seçilmiştir. Takviye elemanı olarak kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  toz tane boyutu ortalama 0.5-0.8  $\mu\text{m}$  (500-800 nm)'dir.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  özellikle yüksek dayanım, sertlik, aşınma direnci ve kırılma tokluğu gibi üstün mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan grafen takviyesinin bilinen diğer takviyelere göre oldukça az miktarda olması ve hafifliği yanında yüksek mukavemet ve aşınma direnci gibi özelliklerinin bulunması grafenin tercih edilmesinin en önemli nedenlerindedir. Kullanılan grafen kalınlığı ortalama 5-8 nm olup, çap yaklaşık 10  $\mu\text{m}$ 'dir.

## 6.2. Deneysel Akış Diyagramı



Şekil 6.1. Kompozit üretimi akış şeması

Şekil 6.1’de verilen akış şemasına göre öncelikle deneyde kullanılmak üzere her biri aynı marka ve ölçüde olacak şekilde yaklaşık 1000 adet atık içecek kutusu, restoran ve kafelerden toplanmıştır. Kompozit malzemelerin üretimi için düşük maliyet ve uygulama kolaylığı gibi avantajları nedeniyle karıştırma döküm yöntemi tercih edilmiştir. Karıştırma döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretebilmek için ergitme fırını tasarlanarak imal edilmiştir. Toplanan içecek kutuları suyla yıkanarak kurutulmuşlardır. Yüzeylerindeki boyanın giderilmesi ve külçe halinde matris malzemesi elde edilmesi için ön ergitme düzeneği kurulmuştur. Düzeneğin metal haznesinde kömür yakılarak içerisine yerleştirilen potada içecek kutuları ergitilmiştir. Ergitme işlemi sonrası potadaki sıvı alüminyum, metal kalıba dökülerek alüminyum

külçeler elde edilmiştir. Külçe matris malzemesi hassas terazide tartılarak ağırlığı belirlenmiştir. Kompozit üretiminde ağırlıkça yüzde takviye oranı kullanılmıştır. Örnek olarak, 100 g matris malzemesine ağırlıkça %1 takviye malzemesi ilave edilmesi, matrise 1 g takviye malzemesinin ilave edileceği anlamına gelmektedir. Buna göre takviye malzemelerinin miktarları hesaplanmış olup, hassas terazi kullanılarak tartımları gerçekleştirilmiştir. Ergitme fırınında ergitilmesinin ardından külçe matris içerisine ağırlıkça yüzde takviye oranına göre belirlenen miktarda takviye elemanı ilave edilerek karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen sıvı haldeki karışım, ön ısıtma yapılan metal kalıba dökülerek kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin takviye oranına göre değişimini ve mikroyapılarını incelemek için test numuneleri hazırlanmıştır. Test numunelerinin hazırlanması, uygulanacak teste göre belirlenen ölçülerde, metalografik numune hazırlama cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir kompozit malzeme için hazırlanan numunelere sertlik, çekme, çentik darbe testi uygulanmış ve yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda üretilen kompozitlerin SEM ve EDS incelemeleri yapılmıştır.

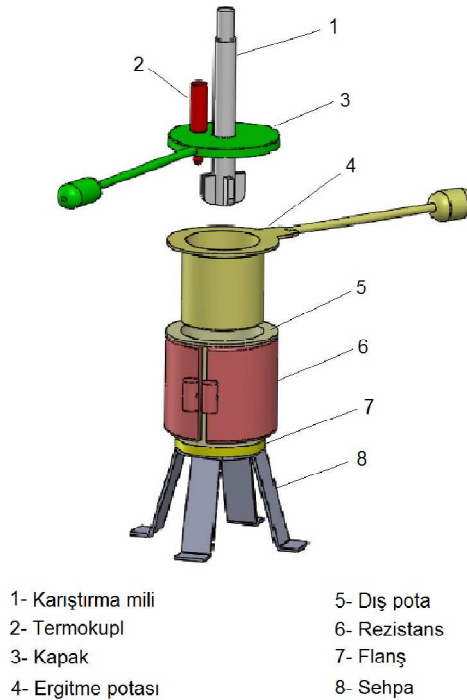
### 6.3. Ergitme Fırını Tasarımı ve İmalatı

Karıştırma döküm yöntemiyle, parçacık takviyeli AMK malzeme üretimini gerçekleştirmek amacıyla, bir kompozit malzeme hazırlama fırını tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Kompozit malzeme hazırlama fırını

Paslanmaz çelik malzemeden imal edilen dış pota üzerine 1,5 kW gücünde tek panjurlu seramik plakalı rezistans bağlanarak, sıcaklığı 900 °C'ye kadar çıkabilen bir elektrikli fırın elde edilmiştir. Bu rezistanslar, ısı kaybının olmasının istenmediği durumlarda, ısı izolasyonu sağlanarak seramik yalıtımlı enerji tasarruflu çerçeve rezistansların üzerine paslanmaz sacın panjurlu olarak kaplanmasıyla elde edilmektedir. Fırının içerisine yine paslanmaz çelikten yapılan bir başka pota yerleştirilmiş olup bu pota hem ergitme hem de döküm potası olarak tasarlanmıştır. Döküm işleminin rahat yapılabilmesi için bu potaya uç kısmı plastikle kaplı olan metal bir sap eklenmiştir. Fırın yüksek sıcaklıklarda çalıştırılacağından dolayı yerleştirildiği masa veya tezgaha zarar vermemesi için bir sehpa üzerine monte edilmiştir. Bu sehpa, karıştırma işlemi sırasında fırının devrilmeden durabilmesi için dört ayaklı yapılmıştır. Ergitme ve karıştırma işlemleri sırasında fırının üst kısmını kapatmak için yine uç kısmı plastik olan metal saplı bir kapak bulunmaktadır. Karıştırma işlemini gerçekleştirmek için kullanılan karıştırma mili paslanmaz çelik malzemeden ve bir ucu 40 mm çapında dört kanatlı olarak imal edilmiştir. Fırın içerisindeki ergitme işlemi için sıcaklığın kontrolü, standart 8 mm rakorlu M12 K-tip termokupl yardımıyla sağlanmıştır (Şekil 6.3).

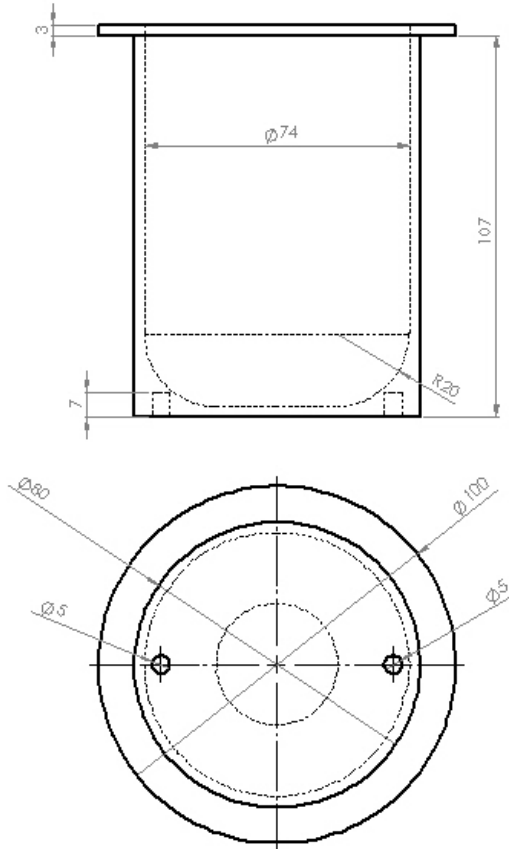


Şekil 6.3. Elektrikli ergitme fırını şematik resmi

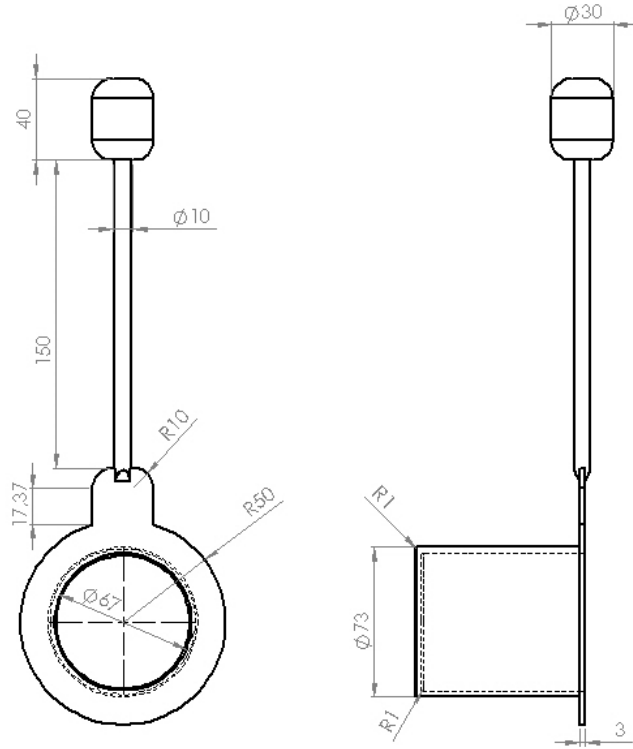


Şekil 6.4. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan ergitme fırını

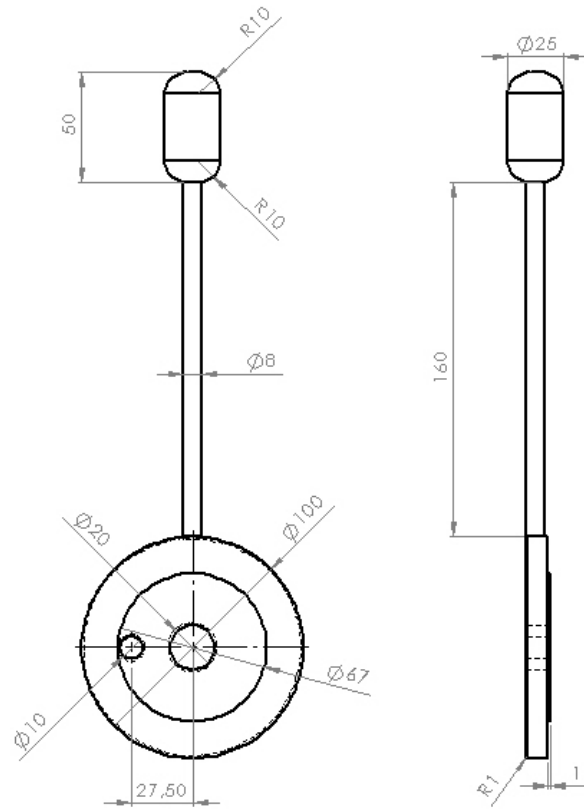
Ergitme fırınının parçalarının imalatı Şekil 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 ve 6.10'da verilen boyutlarda gerçekleştirilmiştir.



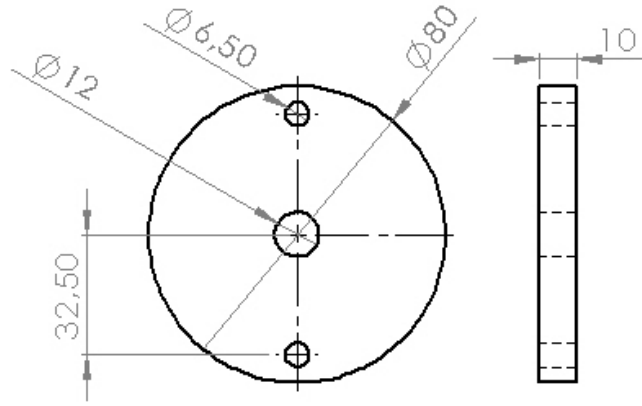
Şekil 6.5. Dış pota



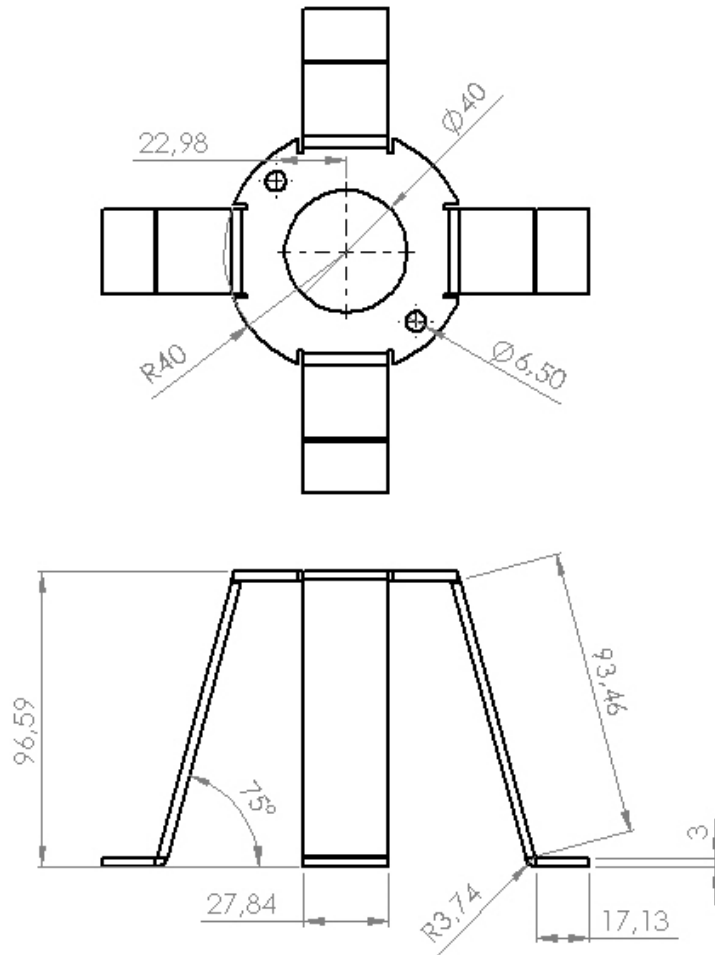
Şekil 6.6. Ergitme potası



Şekil 6.7. Kapak

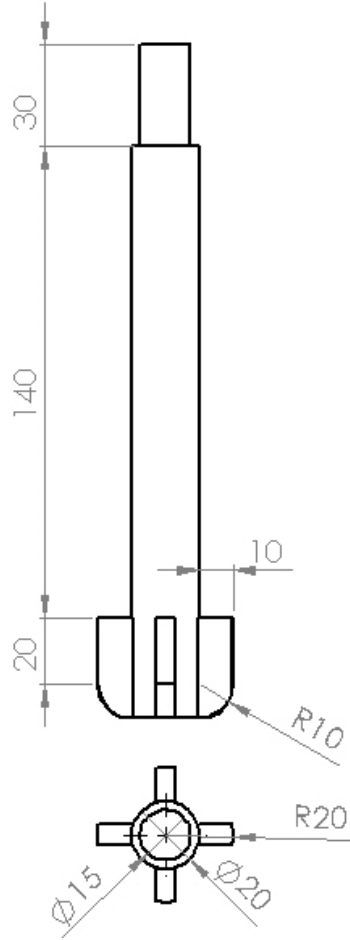


Şekil 6.8. Flanş



Şekil 6.9. Sehpa





Şekil 6.10. Karıştırma mili

Fırın kontrol ünitesi olarak Isıtek marka tek modüllü kontrol cihazı kullanılmıştır. Termokupl ve rezistans bu kontrol cihazına bağlı çalışmaktadırlar. Bu sayede 900 °C'ye kadar istenilen sıcaklıklarda ayar imkanı mevcuttur (Şekil 6.11).



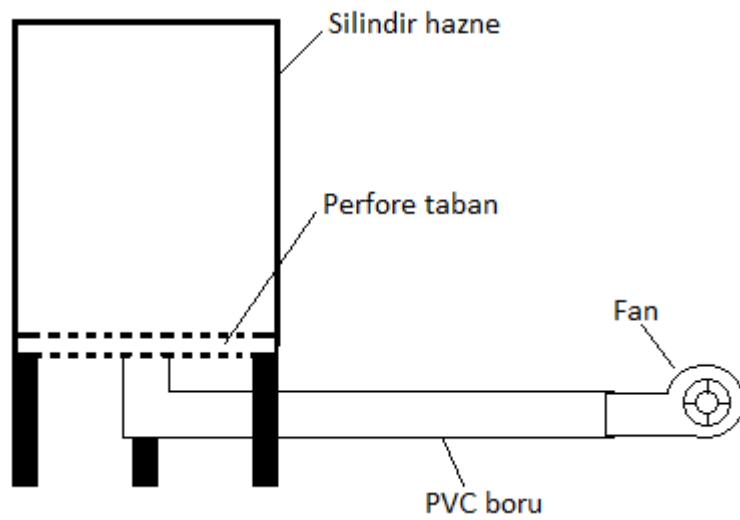
Şekil 6.11. Kontrol ünitesi

Kompozit malzemelerin üretiminde, ilave edilen takviye malzemelerinin matris malzemesi içine karıştırılabilmesi için devir sayısı ayarlanabilen (200-3000 rpm) masa üstü mekanik karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 6.12).



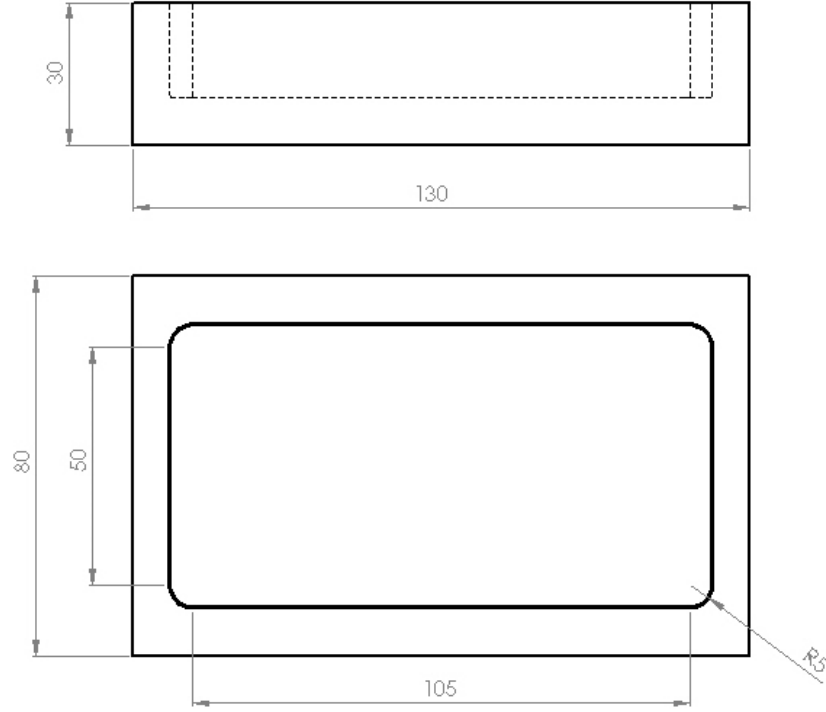
Şekil 6.12. Mekanik karıştırıcı

Atık alüminyum içecek kutularının ergitilip kalıplara dökülmesiyle, matris malzemesi olarak kullanılacak alüminyum külçelerin elde edilmesi için de bir ön ergitme düzeneği kurulmuştur. Bu düzenekte tabanına belli aralıklarda delik açılmış olan üst kısmı açık silindirik metal hazne, bir ucu 90° dirsekli pvc boru, fan ve ince cidarlı çelik ergitme potası kullanılmıştır (Şekil 6.13).



Şekil 6.13. Ön ergitme düzeneği şematik resmi

Hem ön ergitme işlemi hem de kompozit üretiminin ardından yapılan döküm işlemlerinde kullanılan metal kalıbı Şekil 6.14’de verilen boyutlarda, talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 6.14. Döküm işlemlerinde kullanılan metal kalıbın boyutları



Şekil 6.15. Döküm işlemlerinde kullanılan metal kalıp

## **6.4. Deneysel Yöntem**

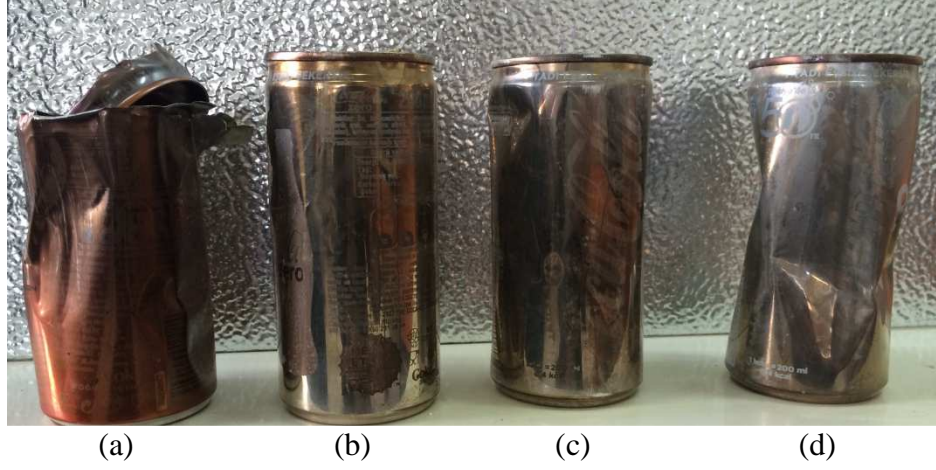
Kompozit üretimi için öncelikle matris malzemesi hazırlanmıştır. Daha sonra kompozit malzemelerde istenilen iç yapı ve dayanım özelliklerinin elde edilebilmesi amacıyla en uygun işlem parametreleri ve takviye oranlarının belirlenmesi için denemeler yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda elde edilen tüm bilgiler doğrultusunda deney prosesinin sistematik ve standart olması sağlanarak kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu kompozitlerin yoğunluk değerleri, sertlik değerleri, çekme mukavemetleri, darbe enerjileri ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

### **6.4.1. Matris malzemesinin hazırlanması**

Kompozit üretiminde matris malzemesi olarak kullanılacak olan atık alüminyum içecek kutuları, içlerinde veya üstlerinde herhangi bir yabancı madde kalmaması için su ile yıkanarak kurutulmuştur.

Daha sonra üzerilerindeki boyanın giderilmesi için farklı yöntemler denenerek en uygun işlem seçilmiştir. İlk olarak eloksal kaplama işlemi öncesi alüminyum malzemelerin yüzeylerinin dağlanması için de kullanılan kostik (sodyum hidroksit) suda eritilmiş ve alüminyum içecek kutuları bu çözelti içerisinde bekletilmiş ancak sonuç alınamamıştır.

Bunun ardından yapılan araştırmalar neticesinde alüminyum içecek kutularının geri dönüşümü sırasında bir döner fırın içerisinde ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda fırının hareket ettirilmesiyle yüzeydeki boyaların giderildiği belirlenmiştir. Bunun üzerine bahsedilen tarzda fırınımızın olmaması nedeniyle içecek kutularının ısı işlem fırınında ısıtılarak boyanın yüzeyden uzaklaştırılması denenmiştir. İçecek kutuları sırasıyla 350, 450, 500 ve 550 °C'de 10 dakika bekletilmiş ancak boya tamamen giderilememiştir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16. Isıl işlem fırınında bekletilen içecek kutuları a) 350 °C de bekletilen b) 450 °C de bekletilen c) 500 °C de bekletilen d) 550 °C de bekletilen

Alüminyum içecek kutularının ergitilip kalıplara dökülmesiyle, matris malzemesi olarak kullanılacak alüminyum külçelerin elde edilmesi için bir ön ergitme düzeneği kurulmuştur. Bu düzende yanma odası içinde yaklaşık 1000 °C'ye kadar sıcaklık sağlandığı tespit edilmiştir. Bu denli yüksek bir sıcaklıktaki ergitme potasına içecek kutularının konulması sonucunda, kutular ergimeden önce yüzeylerindeki boyanın yanarak dumanla atmosfere atılacağı düşünülmüştür. Yapılan denemede 10 adet kutu ergitme potasının içine sırayla konulmuş ve ergimeden hemen önce boya tabakasının yandığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.17).



Şekil 6.17. İçecek kutularının boya tabakasının yanması

Alüminyum içecek kutularının ergitilmesi için tabanında delikli ızgara bulunan üst kısmı açık silindirik metal hazne yerden yaklaşık 20 cm yüksekte olacak şekilde üç ayaklı şase üzerine yerleştirilmiştir. Yaklaşık 1 m uzunluğunda bir ucunda 90°

dirsek bulunan 70 mm çapındaki pvc borunun dirsekli ucu haznenin altına gelecek şekilde yerleştirilmiş ve diğer ucuna ise fan bağlanmıştır. Dirsekli kısmın haznenin altında kalan yerleri, yüksek sıcaklık nedeniyle erimemesi için alüminyum folyo ile sarılmıştır. Hazne içerisine yüksek kalorili kömürler küçük parçalara bölünerek yerleştirilmiştir ve kömürlerin üzerine tutuşturucu jel dökülerek yakılmıştır. Fan çalıştırılarak delikli haznenin altından hava verilerek hem yanmanın hızlanması hem de ısı artışı sağlanmıştır. Kömürlerin yanıp köz oluşmasının ardından ince cidarlı metal ergitme potası kömürlerin üzerine konulmuştur. Ergitme potasının içerisine içecek kutuları birer birer atılarak ergitilmiştir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Alüminyum içecek kutularının ergitilmesi

Her bir matris numunesi için 16 adet içecek kutusu ergitilerek kalıba dökülmüş ve oda sıcaklığında soğutulmak suretiyle her biri ortalama 170 g ağırlığında 50 adet alüminyum külçe elde edilmiştir (Şekil 6.19).





Şekil 6.19. Matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum külçeler

#### 6.4.2. İşlem parametrelerinin belirlenmesi

Karıştırma döküm yöntemiyle kompozit malzeme üretiminde, karışımın iyi bir şekilde sağlanabilmesi ve en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, öncelikle  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozit üretimi için takviye ilave şekli, karıştırma hızı, karıştırma süresi, takviye ilave ve karıştırma sıcaklığı, karıştırma sonrası bekleme süresi gibi parametreler değiştirilerek Çizelge 6.1’de gösterilen denemeler yapılmıştır. En uygun parametrelerin seçimi, takviyesiz numunenin sertliği ile denemeler sırasında üretilen kompozit numunelerin sertlik değerleri kıyaslanarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozit üretimi denemeleri

Takviye % ağırlık oranı	Takviye ilave şekli	Karıştırma hızı dev/dak.	Karıştırma süresi (dak)	Takviye ilavesi sırasında karıştırma sıcaklığı (°C)	Karıştırma sonrası bekleme süresi (dak)	Bekletme sıcaklığı (°C)	Döküm öncesi yüzeydeki oksit filminin alınması	Makro boyutta Gözenek	Ort. Sertlik (HV)
% 0	-	-	-	-	-	-	-	-	70
% 0.5	Üstten ilave	800	2	700 ±10	-	-	-	Çok fazla	Sertlik ölçülemedi
% 0.5	Üstten ilave	200	2	700 ±10	-	-	-	Az	70
% 0.5	Üstten ilave	200	7	700 ±10	10	700 ±10	+	Az	73
% 0.5	Üstten ilave	400	7	630-650	10	700 ±10	+	Yok	75

Yapılan bu deneme üretimlerinin neticesinde, sertlik değeri ortalama 75 HV olarak elde edilen numunenin üretim parametreleri, kompozit üretiminde kullanılacak en uygun parametreler olarak belirlenmiştir.

Ancak en iyi sonucun elde edildiği deneme üretiminde bile döküm sonrası pota içerisinde az da olsa takviye malzemesinin kaldığı görülmüştür. Bunun sonucunda sıvı haldeki matrisin takviye malzemesini yeterli düzeyde ıslatmadağı sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda ıslatma kabiliyetini artırmak için matrise değişik alaşım elementlerinin ilavesi ve takviye malzemesine ısıl işlem uygulayarak oksitlendirilmesi gibi denemeler yapılmıştır. Bu sonuçlara göre ıslatma kabiliyetinin artırılması için en uygun yöntemin takviye malzemesine ısıl işlem uygulanarak oksitlendirilmesi olarak belirlenmiştir (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.2. Islatılabilirlik için denemeler

Takviye malzemesi	Takviye ilave şekli	Takviyeye uygulanan ön işlem	Ort. Sertlik (HV)
% 0.1 Mg + % 0.5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Üstten ilave	-	57
% 0,1 Ti + % 0.5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Üstten ilave	-	75
% 0.1 Al + % 0.5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Üstten ilave	-	71
% 0.5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Üstten ilave	Isıl işlem ( 1100 °C - 5 saat)	80

Yine bu çalışmada üretimi yapılacak olan grafen takviyeli kompozitler için de en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla benzer denemeler yapılmış ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'den farklı olarak takviye ilave şeklinin matris yüzeyine biriktirilerek yapılmasına karar verilmiştir. Çünkü Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>'e göre tane boyutu çok küçük olan grafen elle üstten ilave edildiğinde matris yüzeyinde toplanmış ve topak oluşumu meydana gelmiştir. Bundan dolayı grafenin matris içinde homojen dağılımı sağlanamamıştır (Çizelge 6.3).



Çizelge 6.3. Grafen takviyeli kompozit üretimi denemeleri

Takviye % ağırlık oranı	Takviye ilave şekli	Karıştırma hızı dev/dak.	Karıştırma süresi (dak)	Takviye ilavesi sırasında karıştırma sıcaklığı (°C)	Karıştırma sonrası bekleme süresi (dak)	Bekletme sıcaklığı (°C)	Döküm öncesi yüzeydeki oksit filminin alınması	Makro boyutta Gözenek	Ortalama Sertlik (HV)
% 0	-	-	-	-	-	-	-	-	70
% 0.1	Üstten ilave	400	6	630-650	10	700 ±10	+	Çok fazla	70
% 0.1	Yüzeyde biriktirme	400	6	630-650	10	700 ±10	+	Yok	79

### 6.4.3. Takviye oranlarının belirlenmesi

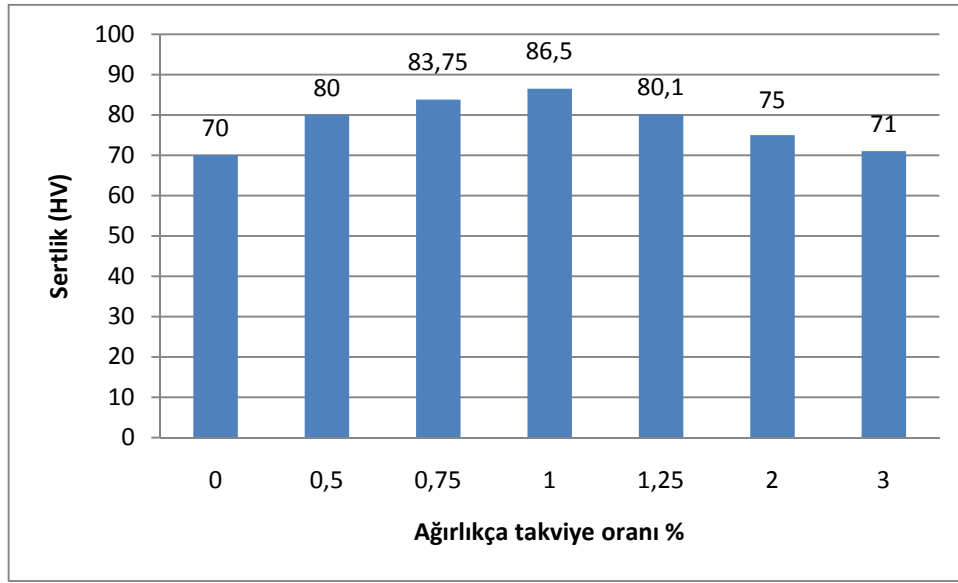
Grafen takviyeli alüminyum kompozitler üzerine daha önce yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, alüminyum matris içerisine ağırlıkça %0.5'e kadar yapılan grafen ilavesinin, kompozitin mekanik özelliklerini arttığı tespit edilmiştir. %0.5'in üstünde yapılan ilavelerde ise grafenin topaklanma eğilimine girdiği ve  $Al_4C_3$  fazı oluşarak kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu sebeple yapılan araştırmalar doğrultusunda en çok çalışılan kompozisyon değerleri belirlenmiş ve grafen takviye oranları ağırlıkça %0.1, %0.3 ve % 0.5 olarak belirlenmiştir.

Kullanılan  $Si_3N_4$  toz tane boyutunun ortalama 0,5-0,8  $\mu m$  olması nedeniyle, yüksek oranlarda yapılacak takviyelerde tozun topaklanması ve karışımın homojenliğinin sağlanamaması gibi problemler göz önüne alınarak düşük takviye oranları kullanılmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda ağırlıkça %0.5, %0.75, %1, %1.25, %2 ve %3 oranlarında  $Si_3N_4$  takviye malzemesi katılarak her bir oran için kompozit malzemeler üretilmiş ve sertlik ölçümleri yapılmıştır (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.4. Sertlik testi sonuçları

Malzeme	Sertlik (HV)
Al	70
Al - % 0.5 $Si_3N_4$	80
Al - % 0.75 $Si_3N_4$	83,75
Al - % 1 $Si_3N_4$	86,5
Al - % 1.25 $Si_3N_4$	80,1
Al - % 2 $Si_3N_4$	75
Al - % 3 $Si_3N_4$	71

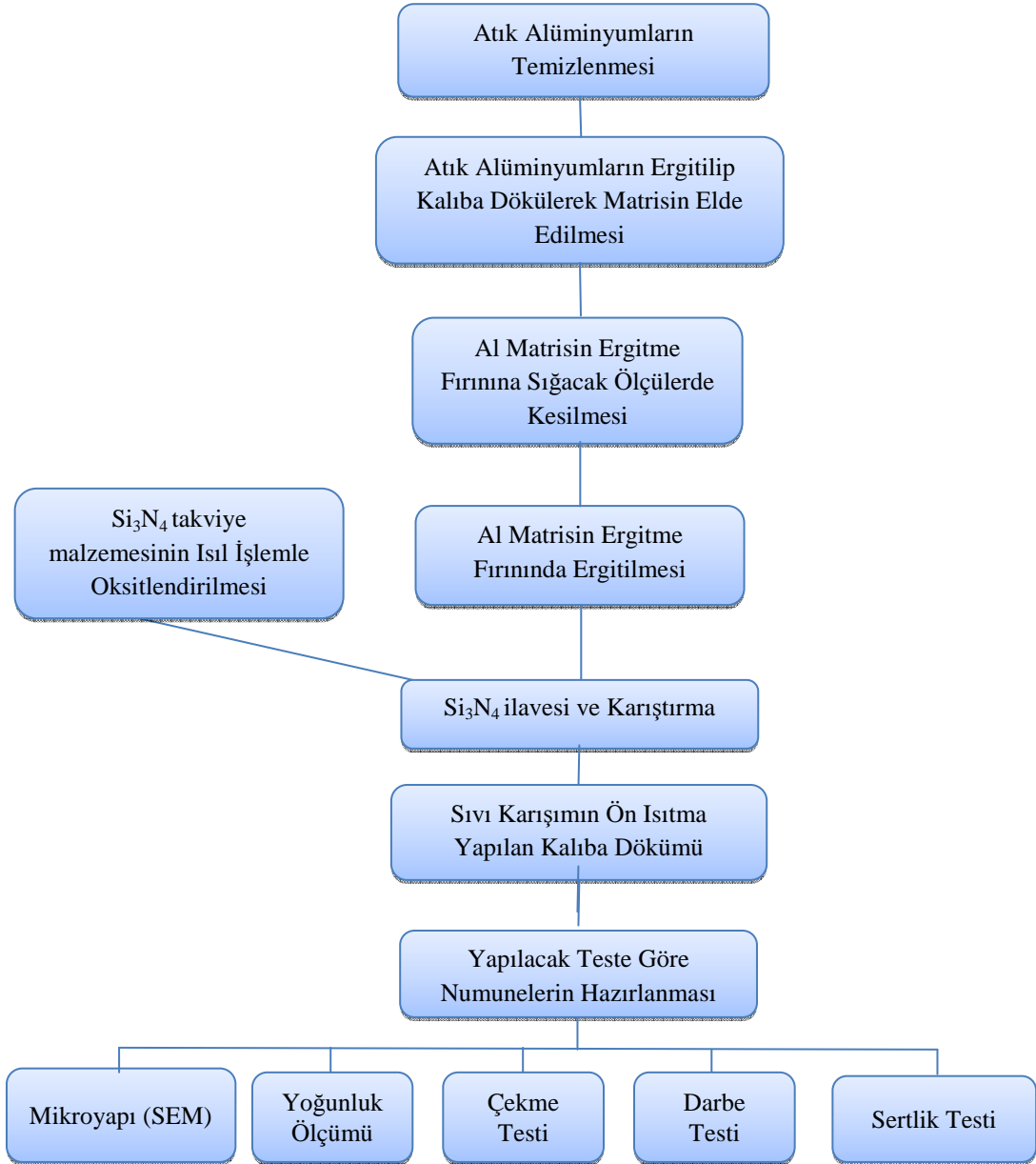
Bu sonuçlara göre takviye oranının artması ile sertlik değerinin arttığı ancak en yüksek sertliğin (86,5 HV) ağırlıkça %1'lik takviye oranı ile elde edildiği ve takviye tane boyutunun mikronaltı seviyede olmasından dolayı takviye oranı ağırlıkça %1'in üzerine çıktığında takviye malzemesinin topaklanması ve karışımın üzerinde toplanması nedeniyle sertlik değerinin gittikçe düştüğü görülmüştür. Bu sebeple  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozit üretimi için takviye oranlarının ağırlıkça %0.5, %0.75 ve %1 olmasına karar verilmiştir (Şekil 6.20).



Şekil 6.20. Sertlik değerlerinin takviye oranlarına bağlı olarak değişimi

#### 6.4.4. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozit üretimi

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitlerin üretimi için uygulanan iş akış şeması Şekil 6.21’de verilmiştir.



Şekil 6.21. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozit üretimi akış şeması

Bu akış şemasına göre kompozit üretimine başlanmıştır. Atık alüminyum içecek kutuların ergitilmesiyle elde edilen alüminyum matris bloklardan 15 adet ( her bir takviye oranı için 5 adet) alınarak her biri ergitme fırınının potasına sığacak ölçüde

üç parçaya kesilmiştir. Kesim işlemi METKON METACUT-M 250 metalografik numune kesme cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.22).



Şekil 6.22. Metalografik numune kesme cihazı

Kesim işleminin ardından alüminyum matris malzemeleri Şekil 6.23'deki hassas terazide tartılarak ağırlıkları tespit edilmiştir. Bu ağırlıklara göre de önceden ısıl işlem fırınında 1100 °C'de 5 saat oksitlendirilen Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> parçacıkları, belirlenmiş olan ağırlıkça yüzde takviye oranlarına göre tartılarak hazırlanmıştır.



Şekil 6.23. Hassas terazi

Ergitme fırınının sıcaklığı 700 °C'ye çıkarılarak, matris malzemesi ergitme potasının içine konulmuştur. Potadaki matris malzemesi ergidikten sonra takviye ilavesi ve karıştırma işlemi sırasında tozun ıslanabilirliğini kolaylaştırmak ve matris-takviye ara yüzeyi oluşturmak için sıcaklık 630-650 °C arasına indirilmiştir. Ergiyik

matrisin içerisine bir miktar takviye malzemesi ilave edilerek 30 saniye kadar 400 rpm hızla mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Sonra bir miktar daha takviye malzemesi ilave edilerek yine 400 rpm hızla 30 saniye karıştırıldıktan sonra üçüncü seferde kalan takviye malzemesi ilave edilerek 400 rpm hızla 5 dakika karıştırma işlemi uygulanmıştır. Sıcaklık  $700 \pm 10$  °C' ye çıkarılarak karışım aynı hızla 1 dakika süreyle karıştırılarak homojenleştirme yapılmıştır. Karışım bu sıcaklıkta 10 dakika bekletilmiş ve metal bir kaşık yardımıyla döküm öncesi yüzeydeki oksit filmi alınmıştır. Hemen ardından karışım, önceden ısıtılmış (450-500 °C) metal kalıba dökülmüş ve kompozit malzeme kalıp içinde bir süre bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak oda sıcaklığında soğuması sağlanmıştır.

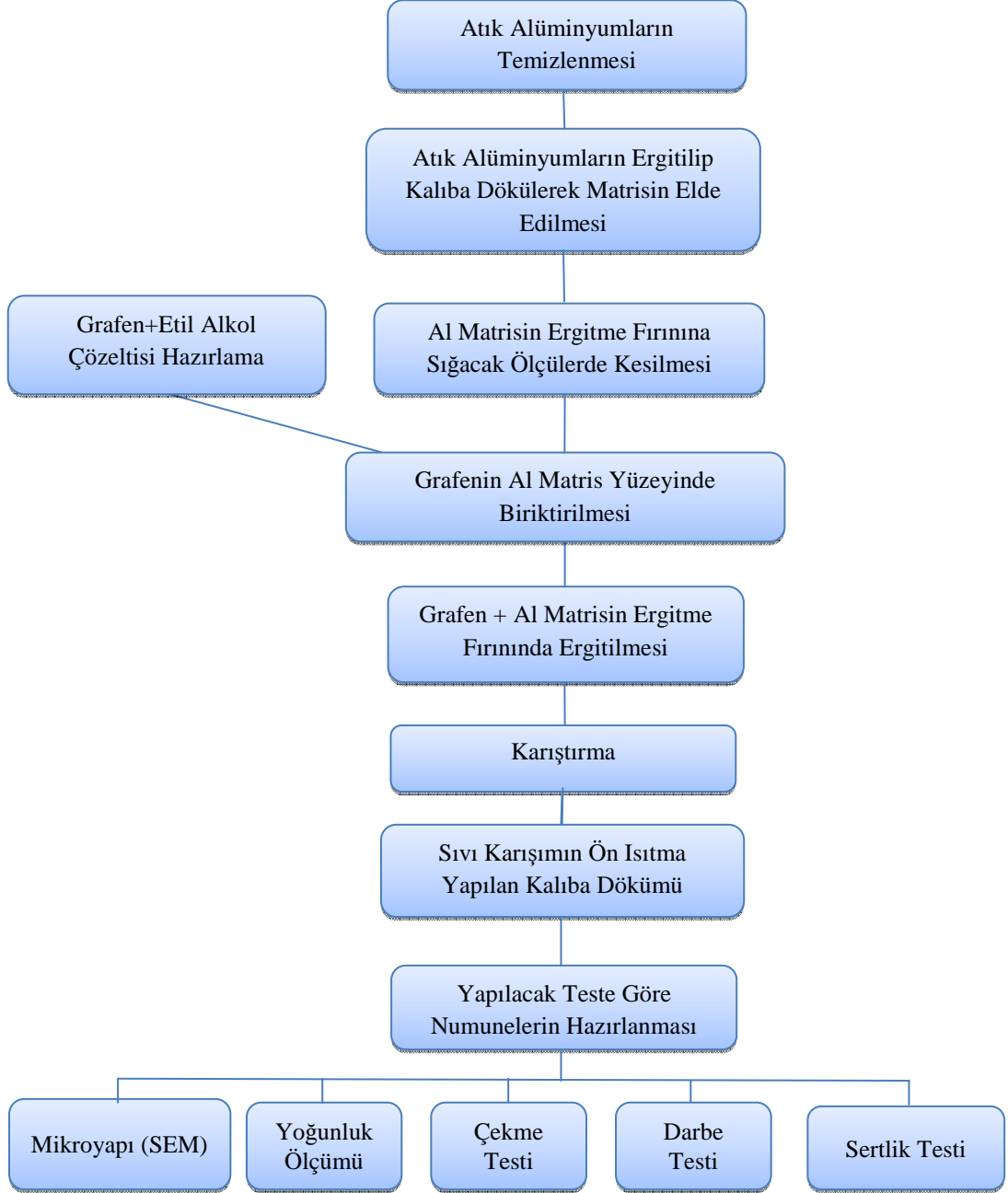
Bu yöntem uygulanarak alüminyum matris içine ağırlıkça %0.5, %0.75 ve %1 oranlarında  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviye malzemesi ilave edilerek her bir oran için beşer adet kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Testlerin uygulanması sırasında numunelerin karıştırılmaması ve test sonuçlarının doğru kayıt edilebilmesi için üretilen kompozit malzemeler ve takviyesiz matris numuneleri Çizelge 6.5'de gösterildiği şekilde kodlanmıştır.

Çizelge 6.5.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozit malzemelerin kodları

<b>Malzeme</b>	<b>Kod</b>
Al	AL
Al - % 0.5 $\text{Si}_3\text{N}_4$	ALSN05
Al - % 0.75 $\text{Si}_3\text{N}_4$	ALSN075
Al - % 1 $\text{Si}_3\text{N}_4$	ALSN1

#### 6.4.5. Grafen takviyeli kompozit üretimi

Grafen takviyeli kompozitlerin üretimi için uygulanan iş akış şeması Şekil 6.24'de verilmiştir.



Şekil 6.24. Grafen takviyeli kompozit üretimi akış şeması

Atık alüminyum içecek kutuların ergitilmesiyle elde edilen alüminyum matris bloklardan her bir takviye oranı için 5 adet yani toplamda 15 adet alınarak her biri

ergitme fırınının potasına sığacak ölçüde yine metalografik numune kesme cihazında kesilmişlerdir. Kesim işleminin ardından alüminyum matris malzemeleri hassas terazide tartılarak ağırlıkları tespit edilmiştir. Bu ağırlıklara göre de grafen parçacıkları, belirlenmiş olan ağırlıkça yüzde takviye oranlarına göre tartılarak hazırlanmıştır.

Tartımları yapılan grafen parçacıkları içerisinde etil alkol olan beherlere boşaltılarak, oluşturulan çözelti ultrasonik karıştırıcı (homojenizatör) ile karıştırılmıştır. Bu sayede grafenin alkol içerisinde topaklaşmadan homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır (Şekil 6.25).



Şekil 6.25. Grafen etil alkol karışımı

Hazırlanan grafen-alkol çözeltisinin, ince uçlu pnömatik püskürtme tabancası kullanılarak çeker ocak içerisinde yaklaşık 15-20 cm mesafeden püskürtülmesi ile grafen, matris malzemesinin yüzeyinde biriktirilmiştir. Grafenli matris malzemeleri bir süre ortam sıcaklığında bekletilerek kuruması sağlanmıştır.

Ergitme fırınının sıcaklığı 700-750 °C'ye çıkarılarak, grafenli matris malzemesi ergitme potasının içine konulmuştur. Potadaki matris malzemesi ergidikten sonra karıştırma işlemi sırasında tozun ıslanabilirliğini kolaylaştırmak ve matris-takviye ara yüzeyi oluşturmak için sıcaklık 630-650 °C arasına indirilmiştir. Ergiyik karışıma 400 rpm hızla 5 dakika karıştırma işlemi uygulanmıştır. Sıcaklık 700 ±10 °C'ye çıkarılarak karışım aynı hızla 1 dakika süreyle karıştırılarak homojenleştirme yapılmıştır. Karışım bu sıcaklıkta 10 dakika bekletilmiş ve metal bir kaşık yardımıyla döküm öncesi yüzeydeki oksit filmi alınmıştır. Hemen ardından karışım, önceden ısıtılmış (450-500 °C) çelik kalıba dökülmüş ve kompozit malzeme kalıp içinde bir süre bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak oda sıcaklığında soğuması sağlanmıştır.

Bu yöntem uygulanarak alüminyum matris ağırlıkça %0.1, %0.3 ve %0.5 oranlarında grafen takviye malzemesi ile kaplanarak her bir oran için beşer adet kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Testlerin uygulanması sırasında numunelerin karıştırılmaması ve test sonuçlarının doğru kayıt edilebilmesi için üretilen kompozit malzemeler Çizelge 6.6’da gösterildiği şekilde kodlanmıştır.

Çizelge 6.6. Grafen takviyeli kompozit malzemelerin kodları

Malzeme	Kod
Al - % 0.1 Grafen	ALGR01
Al - % 0.3 Grafen	ALGR03
Al - % 0.5 Grafen	ALGR05

### 6.5. Sertlik Ölçümleri

Takviyesiz matris malzemesinin ve üretimi yapılan kompozit malzemelerinin sertlik değerlerini tespit etmek ve takviye oranlarının arttırılmasıyla meydana gelen sertlik değişimlerini belirlemek için sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bunun için malzemelerden 10x10x50 mm boyutunda parçalar kesilerek numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin yüzeyleri, METKON FORCIPOL 2V zımparalama – parlatma cihazında önce P1200 zımpara ile zımparalanarak, ardından 1µm elmas süspansiyon kullanılarak parlatma çuhasında parlatılmış ve sertlik ölçümüne hazır hale getirilmişlerdir (Şekil 6.26).



Şekil 6.26. Zımparalama – parlatma cihazı

Sertlik ölçümleri, Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak TMTECK marka HV-1000B tipi sertlik ölçüm cihazında 20 saniye süre ile 1.96 N (200 g) yük altında



gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.27). Her numune için 5'er ölçüm yapılmış ve ölçülen değerlerin ortalamaları alınarak sertlik değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 6.27. Vickers sertlik ölçüm cihazı

## 6.6. Çekme Deneyi

Kompozit malzemelerin ve takviyesiz matris malzemesinin mekanik davranışını değerlendirmek ve takviye oranlarının artırılmasıyla çekme mukavemetlerinde meydana gelen değişimleri tespit etmek için çekme deneyi uygulanmıştır. Hem takviyesiz matrisden hem de kompozit malzemelerden 10x10x100 mm ebatında 5'er adet olmak üzere toplam 35 adet çekme deney numunesi hazırlanmıştır. Çekme deneyleri, 10 ton kapasiteli Mares marka çekme deney cihazında yapılmıştır (Şekil 6.28).



Şekil 6.28. Çekme deney cihazı

Çekme deneyi tüm numuneler için sabit 5 mm/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında çekme cihazına bağlı olan bilgisayardaki yazılım ile çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Her bir malzeme türü için ölçülen değerlerin ortalamaları alınarak hem takviyesiz matrisin hem de kompozit malzemelerin çekme dayanım değerleri tespit edilmiştir.

### 6.7. Çentik Darbe Deneyi

Kompozit malzemelerin ve takviyesiz matris malzemesinin dinamik zorlama altında kırılmaları için gerekli enerji miktarının tespit edilmesi ve takviye oranlarının artırılmasıyla darbe mukavemetinde meydana gelen değişimleri tespit etmek için çentik darbe deneyi uygulanmıştır. Hem takviyesiz matristen hem de kompozit malzemelerden 10x10x70 mm ebatında 5'er adet olmak üzere toplam 35 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Darbe deneyleri, ALŞA marka charpy darbe deney cihazında yapılmıştır (Şekil 6.29). Her bir malzeme için yapılan beş deney sonucunun ortalaması alınarak ortalama darbe enerjisi hesaplanmıştır.



Şekil 6.29. Charpy darbe deney cihazı

## 6.8. Yoğunluk Ölçümleri

Takviyesiz matris malzemesinin ve üretimi yapılan kompozit malzemelerinin deneysel olarak yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre tespit edilmiştir. Her bir malzeme türünden 8x8x10 mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır. Numuneler ağırlığı sabit kalıncaya kadar etüvde kurutulduktan sonra hassas terazide tartılmışlardır. 300°C sıcaklığa kadar ısıtılan numuneler kaynayan su içerisine atılıp, 3 saat süresince kaynatma işlemi devam ettirilmiştir. Daha sonra suyun sıcaklığı oda sıcaklığına inene kadar numuneler suda bekletilmiştir. Numunelerin, deney için özel hazırlanmış düzende su içerisinde asılı ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra sudan çıkarılan numuneler, yüzeylerindeki su kağıt havlu yardımıyla silinerek hızlı bir şekilde hassas terazide tartılmıştır. Elde edilen bu veriler (6.1) nolu denklemde kullanılarak numunelerin deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$\rho_d = [ M_a / ( M_c - M_b ) ] \times \rho_{su} \quad (6.1)$$

$\rho_d$  : Numunenin deneysel yoğunluğu

$\rho_{su}$  : Suyun yoğunluğu

$M_a$  : Kuru numunenin havadaki ağırlığı

$M_b$  : Su emdirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı

$M_c$  : Su emdirilmiş numunenin havadaki ağırlığı

Daha sonra karışımlar kuralına göre de (6.2) nolu denklem kullanılarak tüm malzemelerin teorik yoğunlukları belirlenmiştir.

$$\rho_t = [(matris \text{ yoğunluğu} \times \text{yüzde matris ağırlık oranı}) + (\text{takviye malzemesi} \text{ yoğunluğu} \times \text{yüzde takviye ağırlık oranı})] \quad (6.2)$$

$\rho_t$  : Numunenin teorik yoğunluğu

Teorik yoğunluk ile ölçülen gerçek yoğunluk değerleri (6.3) nolu denklemde kullanılarak numunelerin içerisindeki gözenek oranları tespit edilmiştir.

$$\% \text{ gözenek} = ( \rho_t - \rho_d / \rho_t ) \cdot 100 \quad (6.3)$$

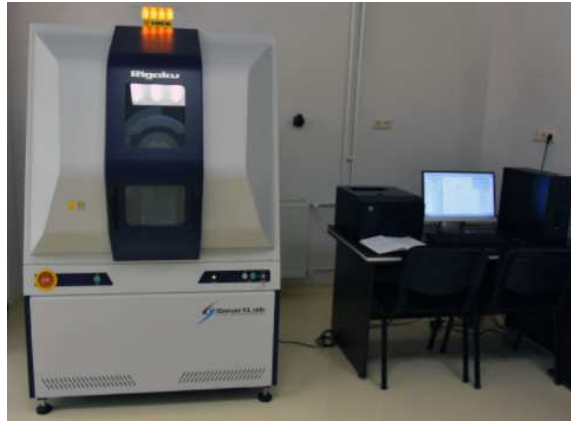
## 6.9. Mikroyapı İncelemeleri

Sistematik bir şekilde üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerde matris içerisinde takviye malzemelerinin dağılımının homojen olup olmadığını tespit etmek amacıyla mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Darbe deneyi sonrası kırılan numunelerden 10x10x10 mm ölçüsünde numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin kırık yüzeylerinden gerçekleştirilen mikroyapı incelemeleri için EDS donanımlı Jeol JSM 7001F tipi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 6.30). Ayrıca kompozit üretiminde kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve grafenin de SEM analizleri yapılmıştır.



Şekil 6.30. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Üretimi gerçekleştirilen kompozitlerin ve kompozit üretiminde kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve grafenin X-ışınları kırınım (XRD) analizleri, Rigaku Smartlab marka X ışını kırınım cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.31).



Şekil 6.31. X ışını kırınım cihazı

## 7. BULGULAR VE TARTIŞMA

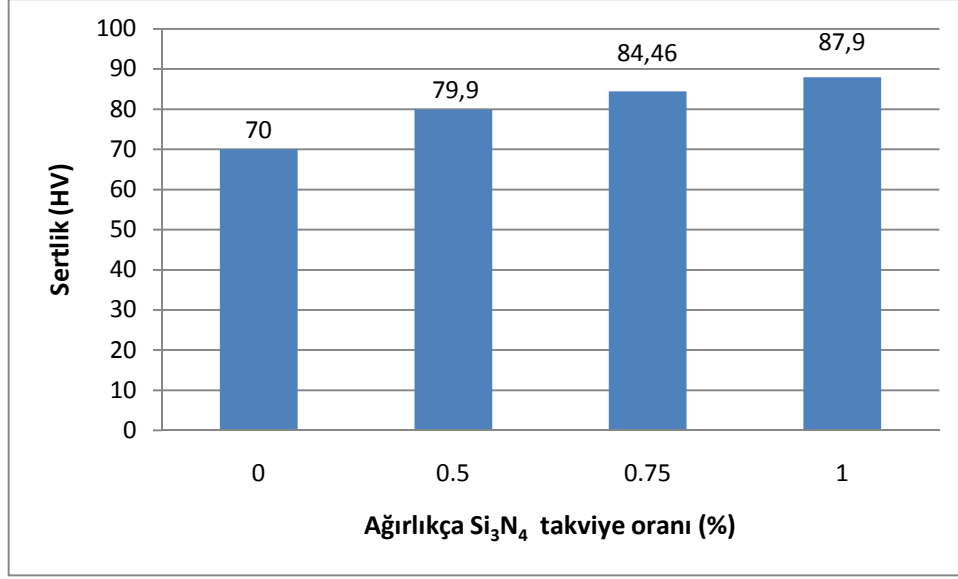
Yapılan bu çalışmada, üretimi gerçekleştirilmiş olan kompozit malzemelerin özelliklerinin, atık alüminyum içecek kutularından elde edilen matris malzemesinin özellikleri ile kıyaslanabilmesi ve test sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek için kompozit malzemelere uygulanan işlemler ve testler aynı şekilde matris malzemesine de uygulanmıştır. Bu doğrultuda hazırlanan numunelere sertlik, çekme, çentik darbe testi uygulanmış ve yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda takviyesiz matris malzemesi ile üretilen kompozitlerin SEM ve EDS incelemeleri yapılmıştır.

### 7.1. Sertlik Testi Sonuçları

Takviyesiz matris malzemesinin,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli ve grafen takviyeli kompozit malzemelerin sertliklerinin tespiti için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.1). Ayrıca malzemelerin sertlik değerlerinin takviye oranına göre değişimleri grafik olarak Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de verilmiştir.

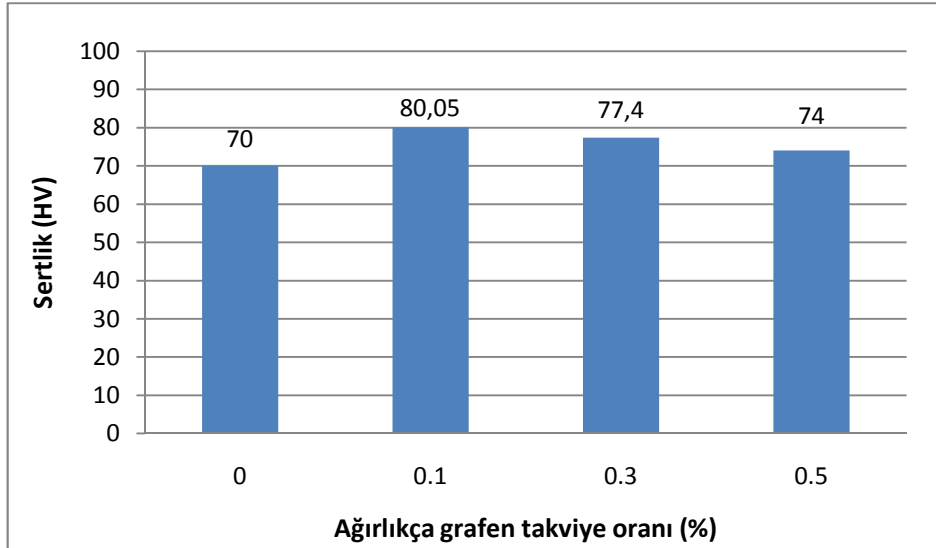
Çizelge 7.1. Sertlik testi sonuçları

Malzeme	Sertlik (HV) 1. Ölçüm	Sertlik (HV) 2. Ölçüm	Sertlik (HV) 3. Ölçüm	Sertlik (HV) 4. Ölçüm	Sertlik (HV) 5. Ölçüm	Ort. Sertlik (HV)
AL	70,15	68,5	71,16	69,72	70,47	70
ALSN05	81,48	77,61	78,58	80,53	81,3	79,9
ALSN075	84,37	83,61	85,4	83,85	85,07	84,46
ALSN1	88,78	87,18	86,27	89,58	87,69	87,9
ALGR01	81,6	78,35	80,21	79,56	80,54	80,05
ALGR03	78,58	79,27	74,4	75,41	79,35	77,4
ALGR05	73,53	75,69	71,74	76,38	72,7	74



Şekil 7.1. Malzemelerin sertliğinin Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yüzde ağırlık oranı ile değişimi

Yapılan literatür taramasında takviye oranının artmasıyla kompozit malzemelerin sertliğinin arttığı tespit edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin sertlikleri ile ilgili elde edilen veriler doğrultusunda Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yüzde ağırlık oranının artmasıyla kompozit malzemelerin sertliği 70 HV'den 87,9 HV'ye yükselmiştir. Elde edilen bu sonucun literatürdeki bilgilerle tutarlı olduğu görülmüştür.



Şekil 7.2. Malzemelerin sertliğinin grafen yüzde ağırlık oranı ile değişimi

Grafen yüzde ağırlık oranının artmasıyla kompozit malzemelerin sertliği 70 HV'den 80,05 HV'ye kadar artmış ve en yüksek sertlik ağırlıkça % 0.1 takviye oranında elde edilmiştir. Bu oranın üzerindeki ilavelerde ise matrisse göre sertlik

değerleri daha fazla olmasına rağmen takviye oranının artmasıyla sertliğin düştüğü belirlenmiştir. Grafen takviyesi, matris yüzeyine kaplama yöntemiyle yapılmasına rağmen takviye oranı arttıkça grafenin topaklanma eğiliminin arttığı ve bunun sonucunda düzgün olmayan takviye dağılımından dolayı da sertliğin azaldığı düşünülmektedir.

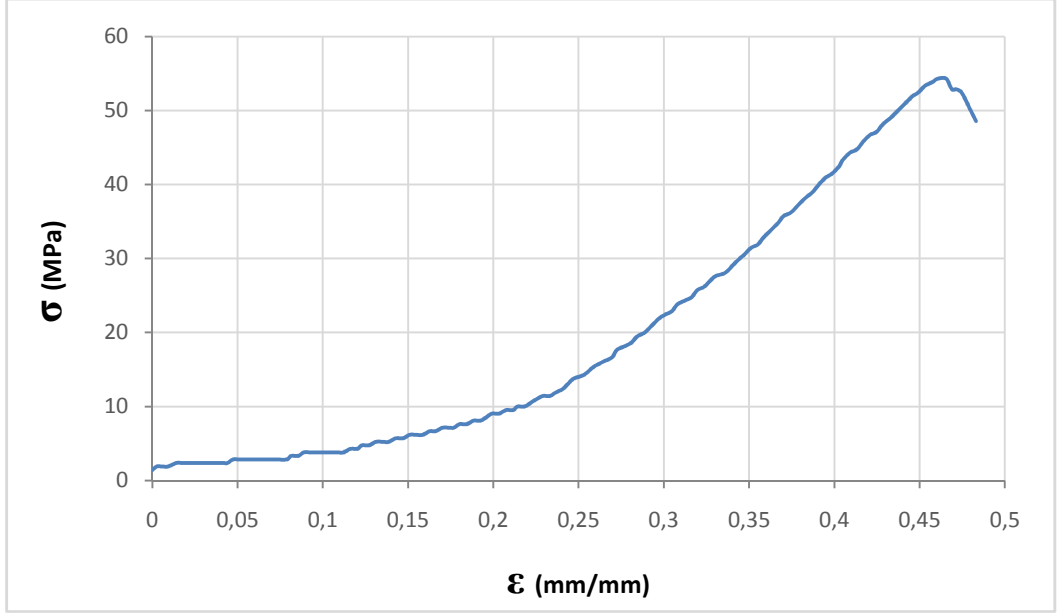
## 7.2. Çekme Deneyi Sonuçları

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli ve grafen takviyeli kompozit malzemeler ile takviyesiz matris malzemesinin çekme mukavemeti değerlerinin tespiti için çekme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak ortalama çekme mukavemeti değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.2).

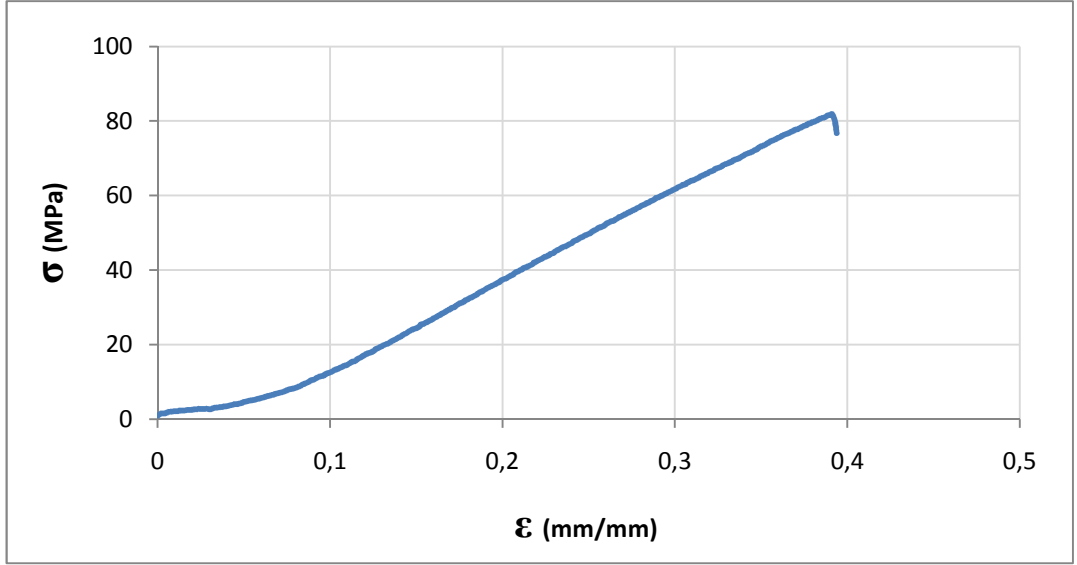
Çizelge 7.2. Çekme deneyi sonuçları

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Ortalama Çekme Mukavemeti (MPa)
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	
AL	54,29	55,11	54,1	54,5
ALSN05	81,85	80,14	80,56	80,85
ALSN075	92,49	93,53	93,28	93,1
ALSN1	105,1	104,89	105,52	105,17
ALGR01	139,17	140,58	138,15	139,3
ALGR03	159,7	158,2	158,98	158,96
ALGR05	152,21	154,71	153,34	153,42

Her malzemenin birinci numunesine ait gerilme - birim uzama eğrileri Şekil 7.3 ile Şekil 7.9 arasında verilmiştir. Bu eğimlerden görüldüğü üzere ağırlıkça takviye oranının artmasıyla kompozit malzemelerin çekme mukavemeti takviyesiz matris malzemesine göre artmış ve yüzde kopma uzaması nispeten düşmüştür.

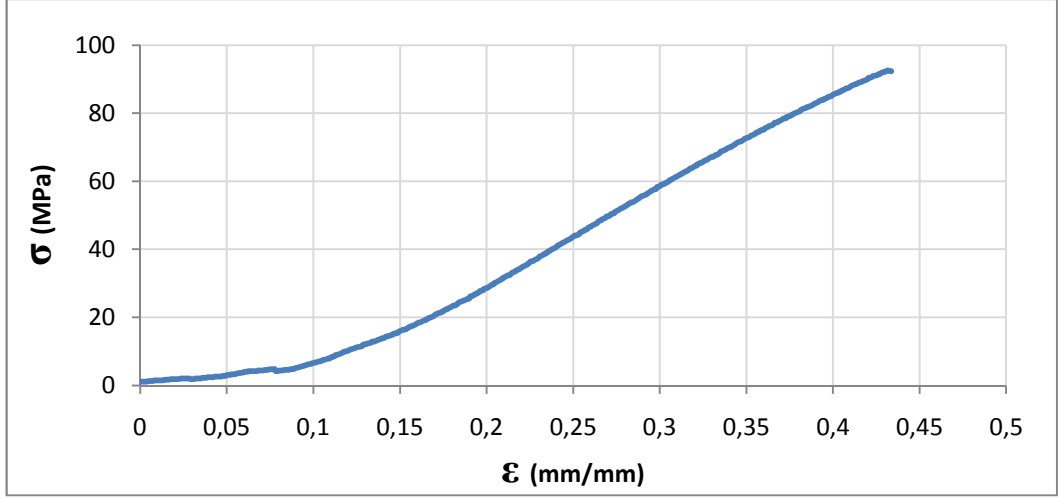


Şekil 7.3. Takviyesiz Al matrisin gerilme ( $\sigma$ )-birim uzama ( $\epsilon$ ) eğrisi

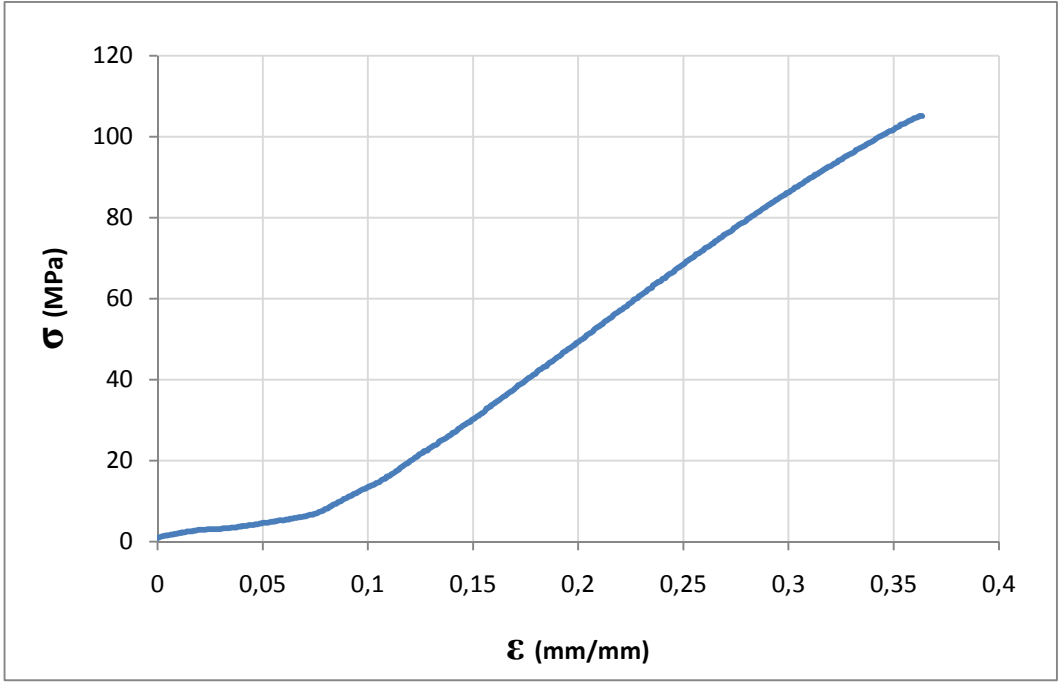


Şekil 7.4. Al - % 0.5  $\text{Si}_3\text{N}_4$  malzemenin gerilme ( $\sigma$ )-birim uzama ( $\epsilon$ ) eğrisi

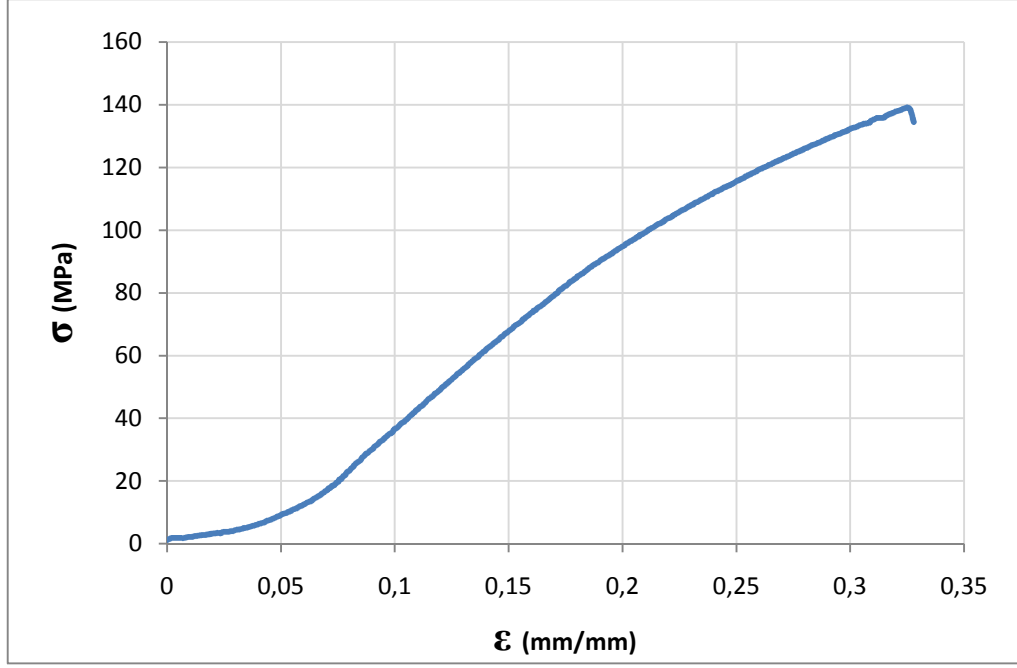




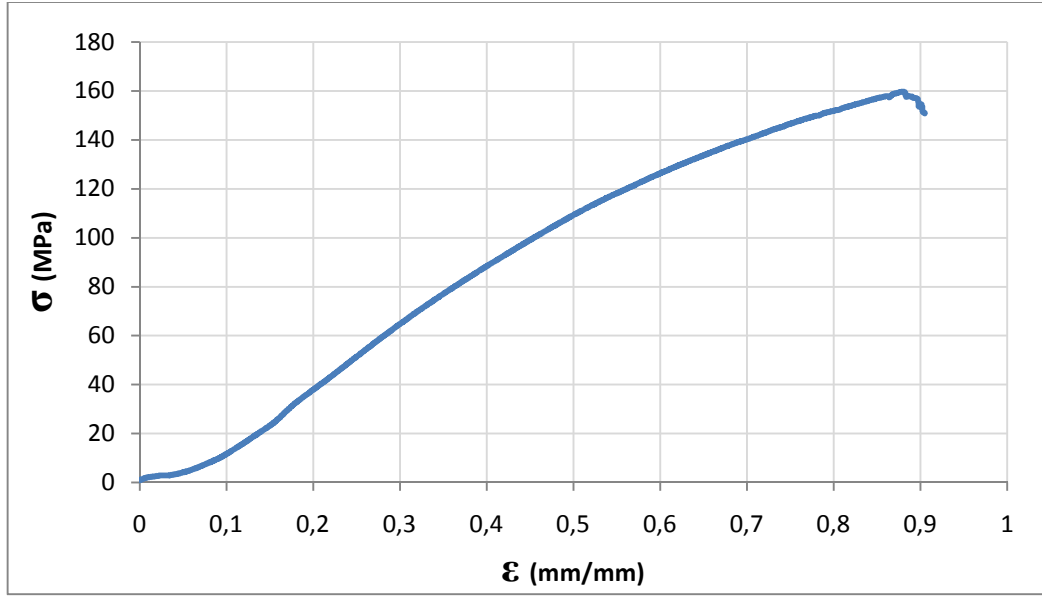
Şekil 7.5. Al - % 0.75 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> malzemenin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi



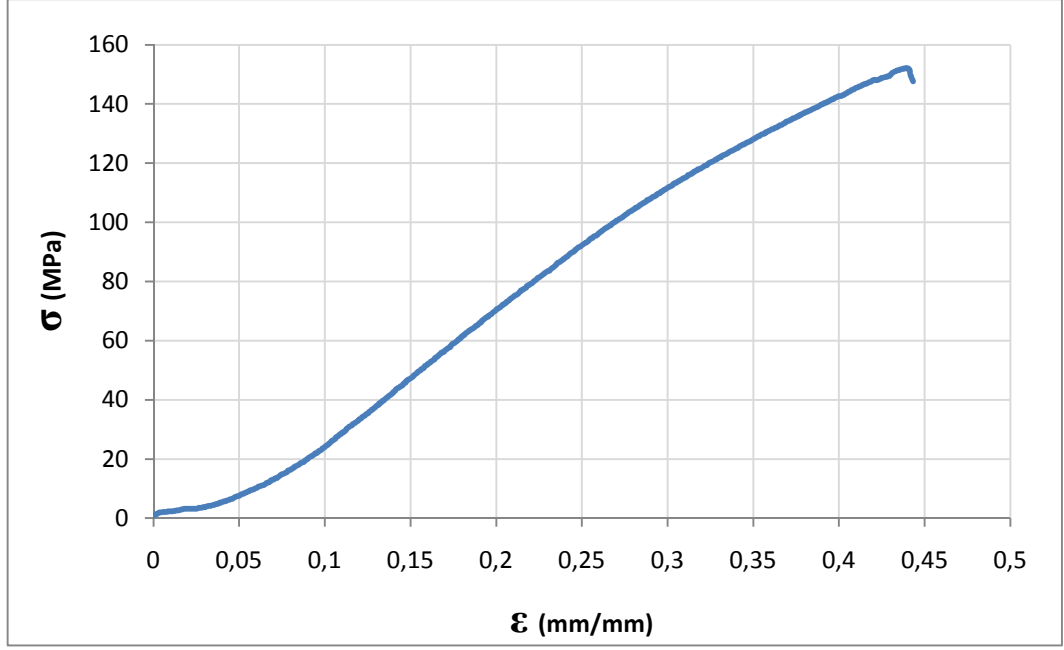
Şekil 7.6. Al - % 1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> malzemenin gerilme (σ)-birim uzama (ε) eğrisi



Şekil 7.7. Al - % 0.1 Grafen malzemenin gerilme ( $\sigma$ )-birim uzama ( $\epsilon$ ) eğrisi

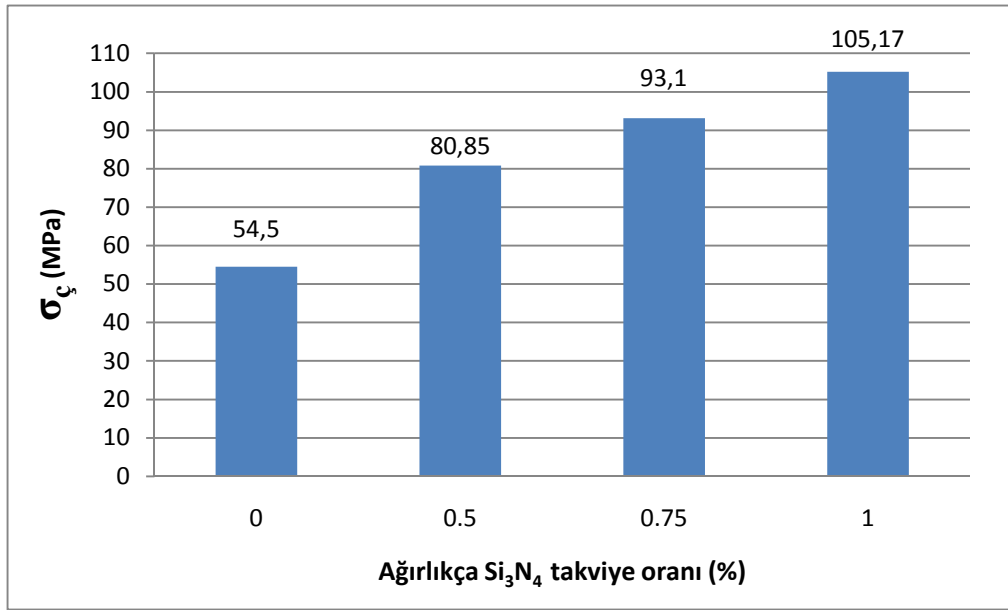


Şekil 7.8. Al - % 0.3 Grafen malzemenin gerilme ( $\sigma$ )-birim uzama ( $\epsilon$ ) eğrisi



Şekil 7.9. Al - % 0.5 Grafen malzemenin gerilme ( $\sigma$ )-birim uzama ( $\epsilon$ ) eğrisi

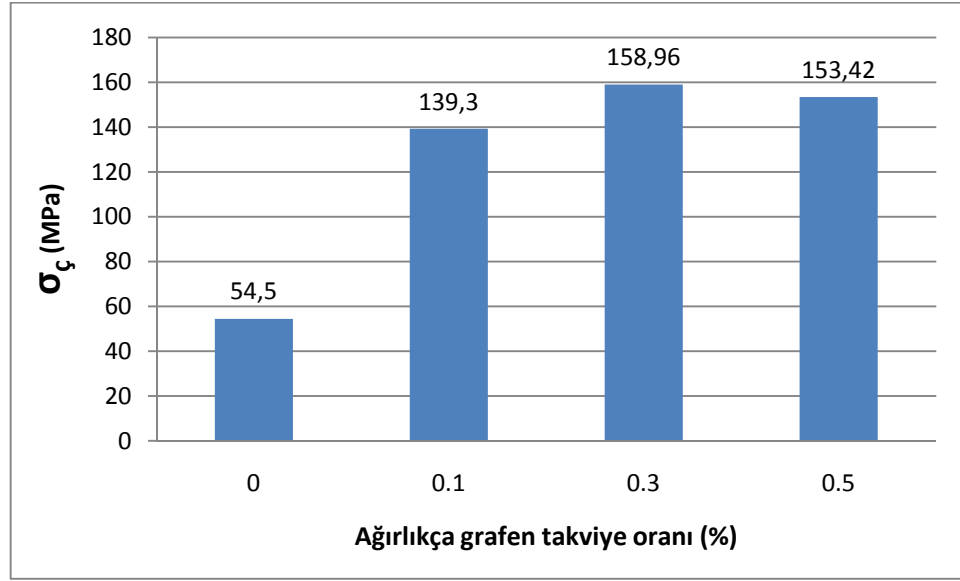
Malzemelerin çekme mukavemeti değerlerinin takviye oranına göre değişimini gösteren grafikler Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de verilmiştir.



Şekil 7.10. Çekme mukavemetinin ( $\sigma_c$ ), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yüzde ağırlık oranı ile değişimi

Yapılan literatür taramasında artan takviye oranının kompozit malzemelerin çekme mukavemetini arttırdığı tespit edilmiştir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yüzde ağırlık oranının artmasıyla kompozit malzemelerin çekme mukavemeti 54,5 Mpa’dan 105,17 Mpa’ya

yükselmiştir. Elde edilen bu sonucun literatürdeki bilgilerle tutarlı olduğu görülmüştür.



Şekil 7.11. Çekme mukavemetinin ( $\sigma_c$ ), grafen yüzde ağırlık oranı ile değişimi

Ağırlıkça grafen takviye oranının artmasıyla kompozit malzemelerin çekme mukavemeti 54,5 Mpa'dan 158,96 Mpa'ya kadar artmış ve en yüksek çekme mukavemetinin %0.3 takviye oranında elde edildiği görülmüştür. %0.5 takviye oranında ise matrise göre çekme mukavemeti değeri daha fazla olmasına rağmen bir önceki takviye oranına göre bir miktar düşmüştür. Grafen takviye oranı arttıkça grafenin topaklanma eğiliminin arttığı ve bunun sonucunda düzgün olmayan takviye dağılımından dolayı da çekme mukavemetinin azaldığı düşünülmektedir.

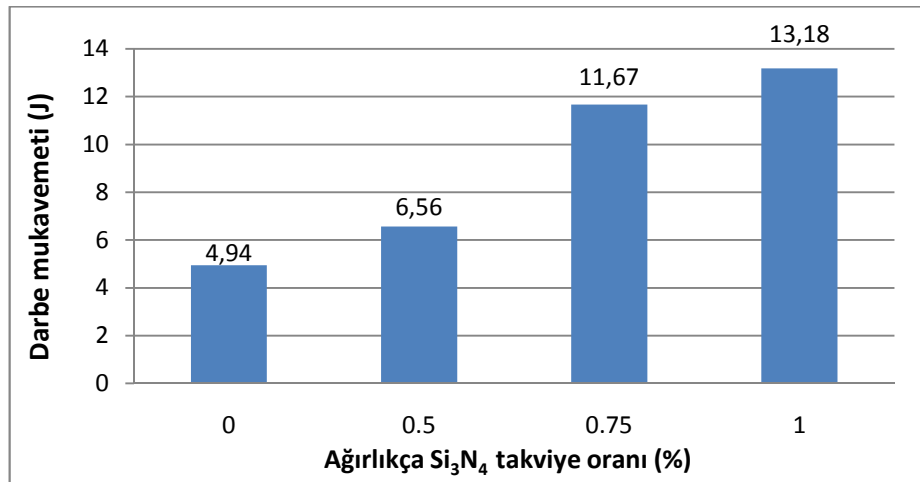
### 7.3. Çentik Darbe Deneyi Sonuçları

$Si_3N_4$  takviyeli ve grafen takviyeli kompozit malzemeler ile takviyesiz matris malzemesinin dinamik zorlama altında kırılmaları için gerekli enerji miktarının tespit edilmesi ve takviye oranlarının artırılmasıyla darbe mukavemetinde meydana gelen değişimleri tespit etmek için darbe deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak ortalama darbe enerjisi değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.3).

Çizelge 7.3. Çentik darbe deneyi sonuçları

Malzeme	Darbe Enerjisi (J)	Darbe Enerjisi (J)	Darbe Enerjisi (J)	Ortalama Darbe Enerjisi (J)
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	
AL	4,62	5,22	4,98	4,94
ALSN05	6,81	6,21	6,66	6,56
ALSN075	11,58	10,98	12,45	11,67
ALSN1	12,65	13,85	13,04	13,18
ALGR01	29,43	31,23	29,46	30,04
ALGR03	22,15	24,09	23,66	23,3
ALGR05	18,21	17,08	16,07	17,12

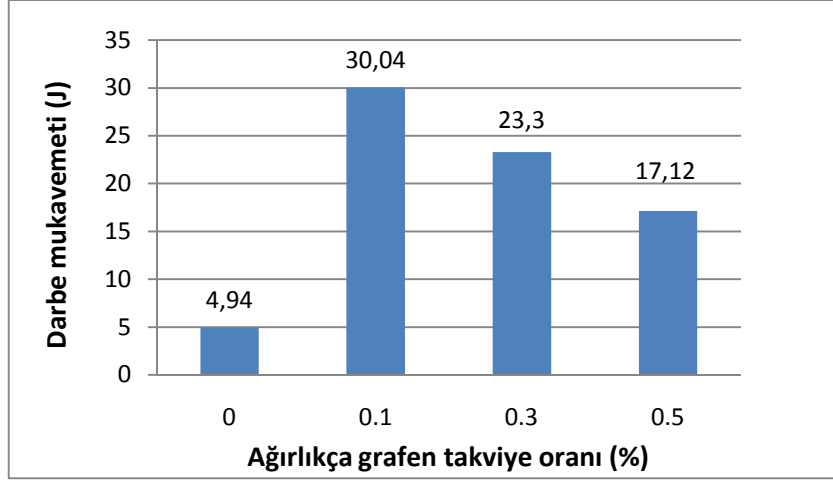
Malzemelerin darbe mukavemeti değerlerinin takviye oranına göre değişimini gösteren grafikler ise Şekil 7.12 ve Şekil 7.13’de verilmiştir.



Şekil 7.12. Darbe mukavemetinin Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> yüzde ağırlık oranı ile değişimi

Kompozit malzemelerin artan takviye oranına bağlı olarak darbe mukavemetlerindeki değişimlerle ilgili literatürde farklı sonuçlar bulunmakla birlikte ağırlıklı olarak darbe mukavemetinin artan takviye oranıyla arttığı görülmüştür. Takviye malzemesinin matris malzemesi tarafından iyi ıslatıldığı ve ara yüzde istenmeyen ikincil fazların oluşmadığı ya da oluşumunun azaltıldığı üretim yöntemlerinde darbe dayanım değerleri yükselmektedir (Singla vd, 2009; Bajaj, 2011; Sujana vd, 2012; Singh vd, 2013).

Yapılan bu çalışmada  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviye oranının artmasıyla darbe mukavemetinin 4,94 J'den 13,18 J'ye yükseldiği görülmüştür. Bu durumun,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  parçacıklarının matris içerisinde düzgün dağılması ve alüminyum matrisle  $\text{Si}_3\text{N}_4$  arasında güçlü arayüzey bağlanması neticesinde gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 7.13. Darbe mukavemetinin grafen yüzde ağırlık oranı ile değişimi

Grafen yüzde ağırlık oranının artmasıyla kompozit malzemelerin darbe mukavemetinin 4,94 J'den 30,04 J'ye yükseldiği ve en yüksek değer %0.1 takviye oranında elde edildiği görülmüştür. Bu oranın üzerindeki ilavelerde ise darbe mukavemeti değerlerinin, matrisinkine oranla çok daha fazla olmasına rağmen takviye oranının artmasıyla düştüğü belirlenmiştir. %0.1'in üzerindeki takviye oranlarında gerçekleşen darbe mukavemetindeki azalmanın, takviye oranının artmasıyla grafenin topaklanma eğiliminin arttığı ve meydana gelen topaklanmanın da matris takviye arasındaki yük transferini olumsuz etkilemesi sonucunda gerçekleştiği şeklinde yorumlanmıştır.

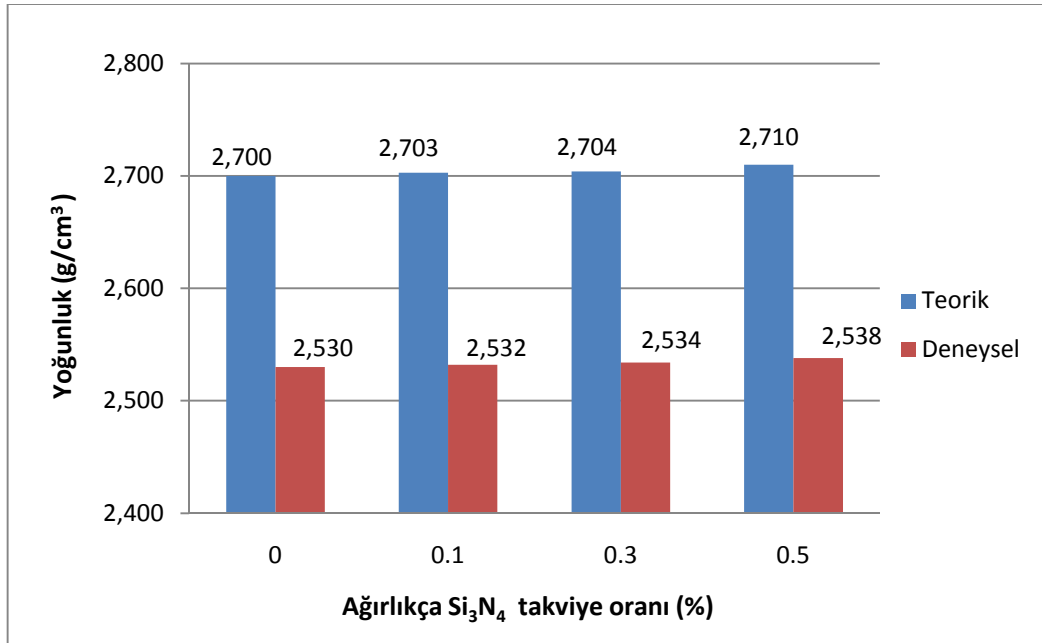
#### 7.4. Yoğunluk Ölçümleri ve Gözenek Oranlarının Belirlenmesi

Takviyesiz ve takviyeli malzemelerin her biri için karışımlar kuralına göre belirlenen teorik yoğunluklar, Arşimet prensibine göre elde edilen deneysel yoğunluklar ve bu yoğunluklar kullanılarak hesaplanan gözenek oranları Çizelge 7.4'de verilmiştir.

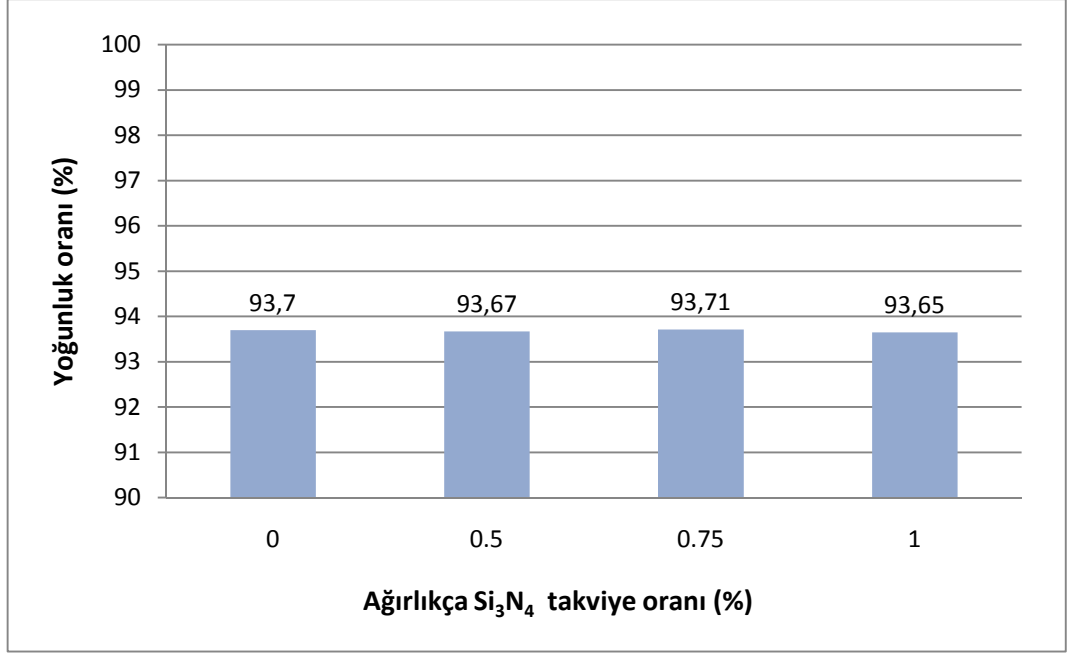
Çizelge 7.4. Numunelerin teorik ve deneysel yoğunlukları ile gözenek oranları

Malzeme	Teorik Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )	Deneysel Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )	Gözenek (%)
AL	2,700	2,53	6,29
ALSN05	2,703	2,532	6,32
ALSN075	2,704	2,534	6,28
ALSN1	2,710	2,538	6,35
ALGR01	2,699	2,517	6,74
ALGR03	2,699	2,510	7
ALGR05	2,698	2,503	7,2

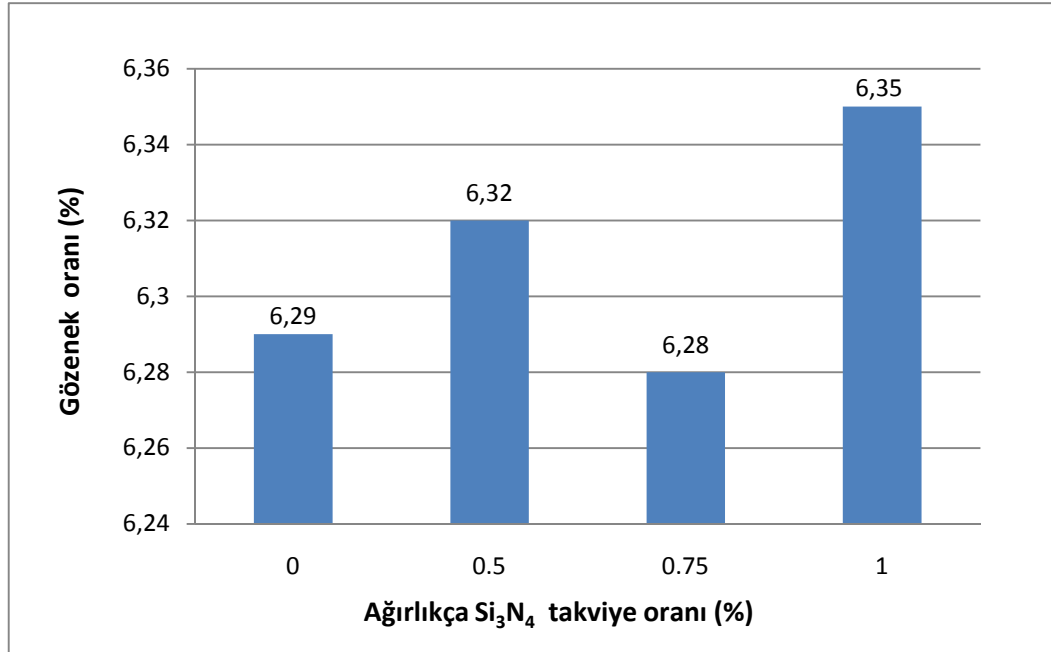
Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozitlerin teorik ve deneysel yoğunluklarının takviye oranına göre değişimi Şekil 7.14’de, deneysel yoğunluğun teorik yoğunluğa oranı Şekil 7.15’de verilmiştir. Ayrıca takviye oranıyla gözenek oranlarının değişimi de Şekil 7.16’da verilmiştir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>’ün yoğunluğunun, matrisin yoğunluğundan fazla olması nedeniyle ağırlıkça takviye oranlarının artmasıyla, kompozit malzemelerin yoğunluklarının doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Kompozitler içindeki Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye oranının artmasıyla gözenek de arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.14. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye oranlarının artışıyla yoğunluk değişimi



Şekil 7.15. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye oranlarının artışıyla yoğunluk oranı değişimi

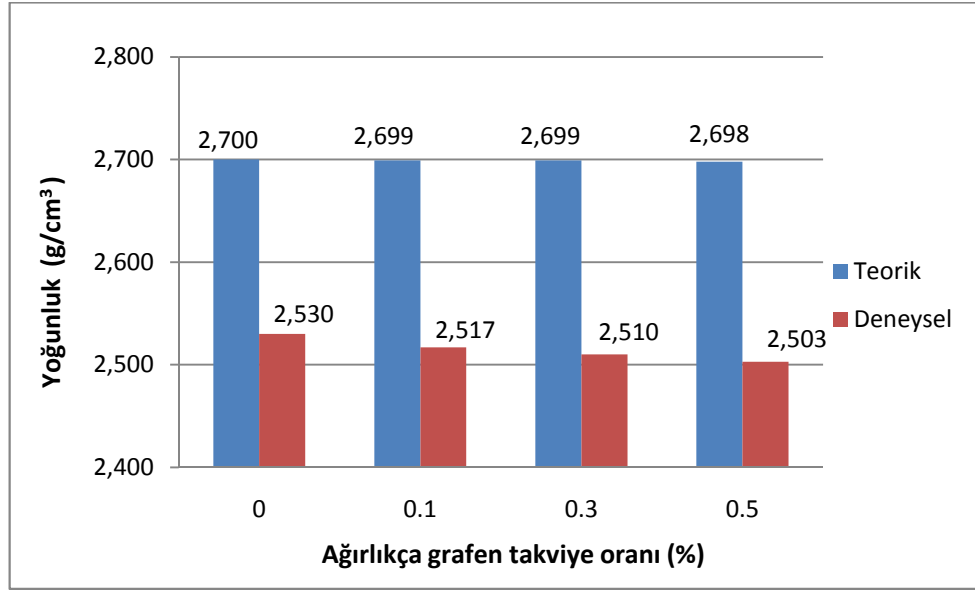


Şekil 7.16. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye oranlarının artışıyla gözenek değişimi

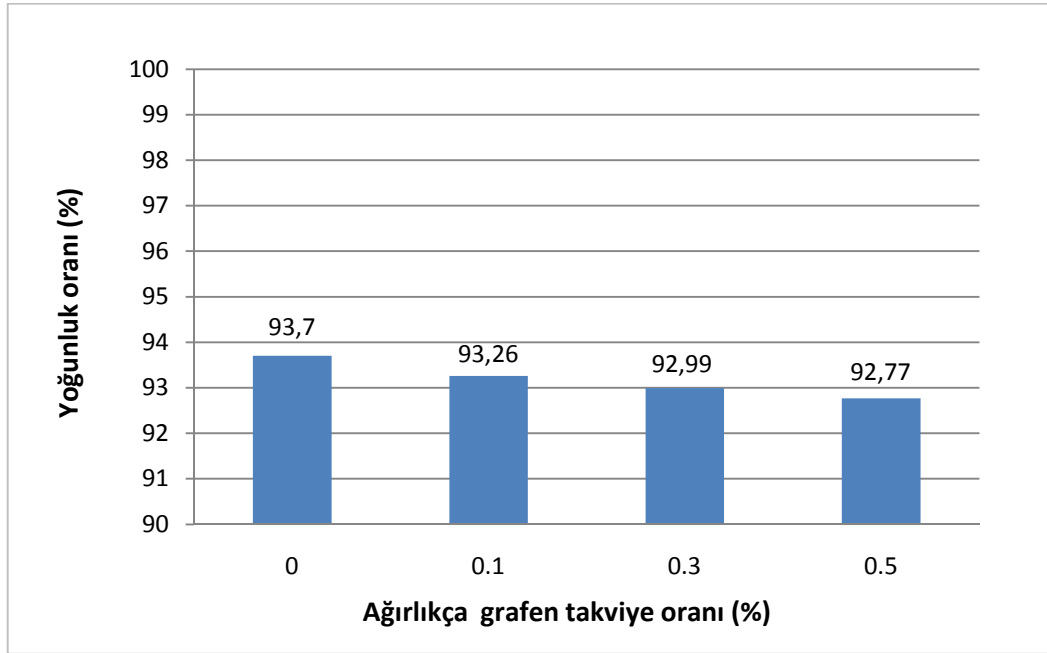
Grafen takviyeli kompozitlerin teorik ve deneysel yoğunluklarının takviye oranına göre değişimi Şekil 7.17’de, deneysel yoğunluğun teorik yoğunluğa oranı Şekil 7.18’de verilmiştir. Takviye oranıyla gözenek oranlarının değişimi de Şekil 7.19’da verilmiştir. Grafenin yoğunluğunun, matrisin yoğunluğundan düşük olması nedeniyle ağırlıkça takviye oranlarının artmasıyla, kompozit malzemelerin



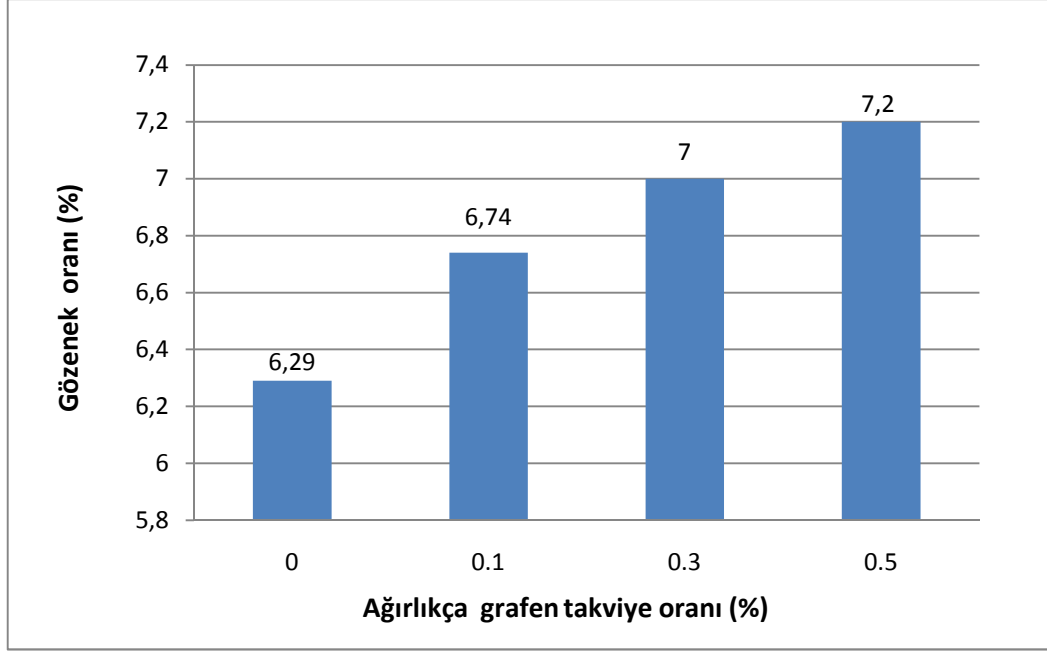
yoğunluklarının da azaldığı görülmüştür. Gözenek ise kompozitler içindeki grafen takviye oranının artmasıyla artmıştır.



Şekil 7.17. Grafen takviye oranlarının artışıyla yoğunluk değişimi



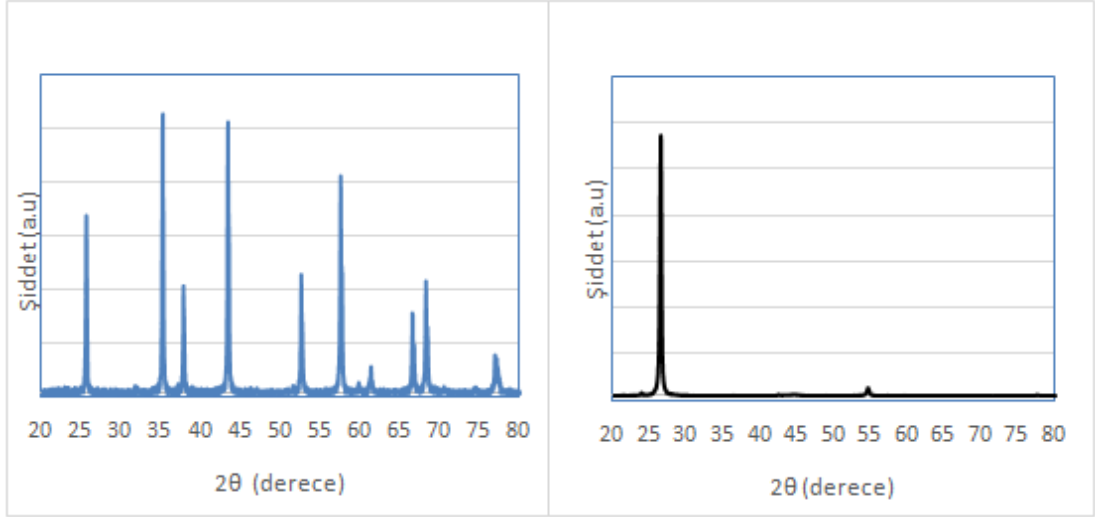
Şekil 7.18. Grafen takviye oranlarının artışıyla yoğunluk oranı değişimi



Şekil 7.19. Grafen takviye oranlarının artışıyla gözenek değişimi

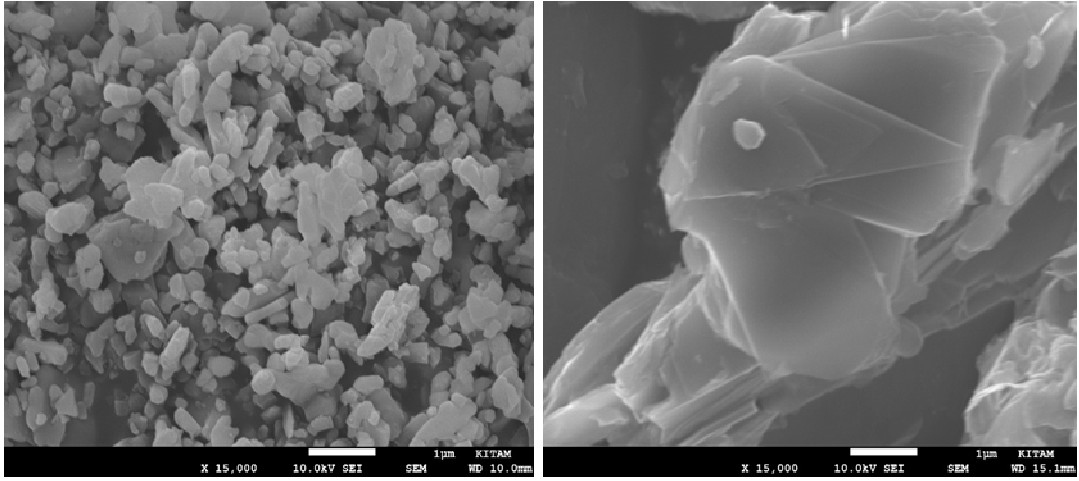
### 7.5. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Şekil 7.20’de alüminyum kompozit üretiminde kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve grafenin XRD ve SEM analizleri verilmiştir. XRD analizinden kullanılan tozların tamamen  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve grafen olduğu görülmektedir. SEM analizinden,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tozunun ortalama tane boyutunun yaklaşık 500-800 nm civarında olduğu ve kullanılan grafenin ise üst üste paketlenmiş ve tabakalı bir yapıda olduğu görülmektedir.



(a)

(b)

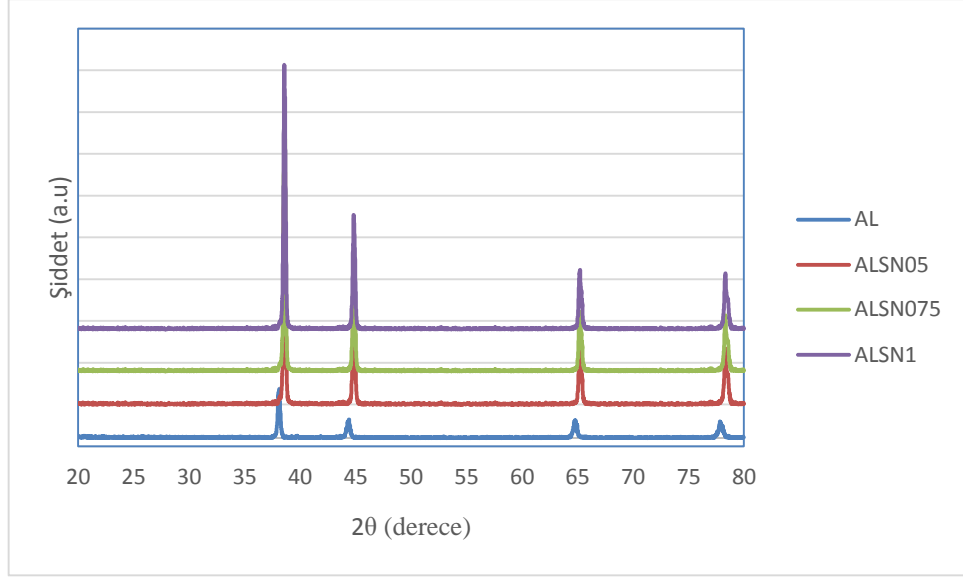


(c)

(d)

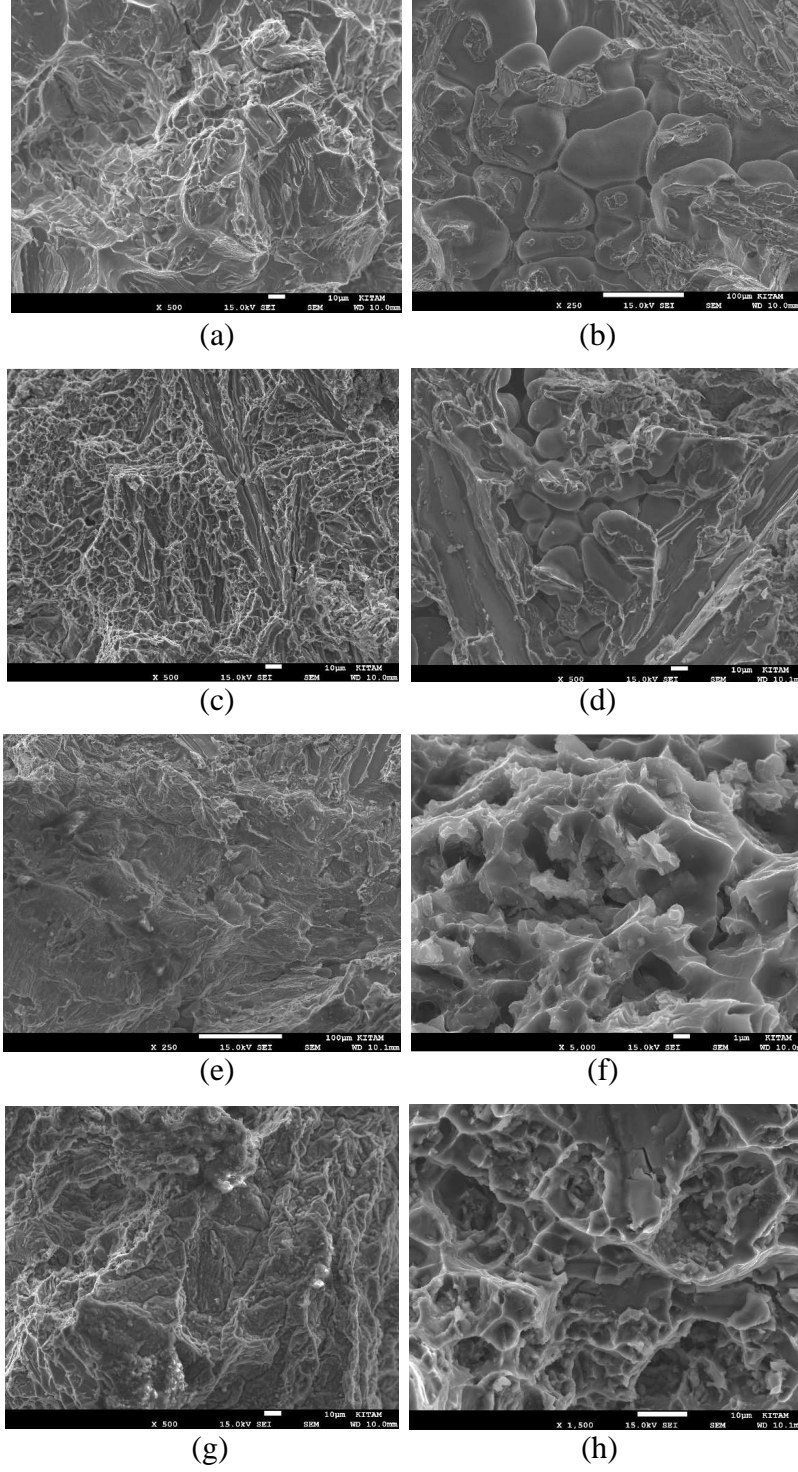
Şekil 7.20. Kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ve grafen tozlarının XRD örgü deseni (a-b) ve SEM analizleri (c-d)

Şekil 7.21’de ise  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ilaveli alüminyum kompozitlerin XRD örgü deseni verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere bütün yapı tamamen alüminyuma ait pikler vermiştir. Yapıda  $\text{Si}_3\text{N}_4$  pikinin olmamasının sebebi kullanılan miktarın ağırlıkça %5’ten az olması ve cihazın deteksiyon limitinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.21. Takviyesiz ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli Al kompozitlerin XRD örgü deseni

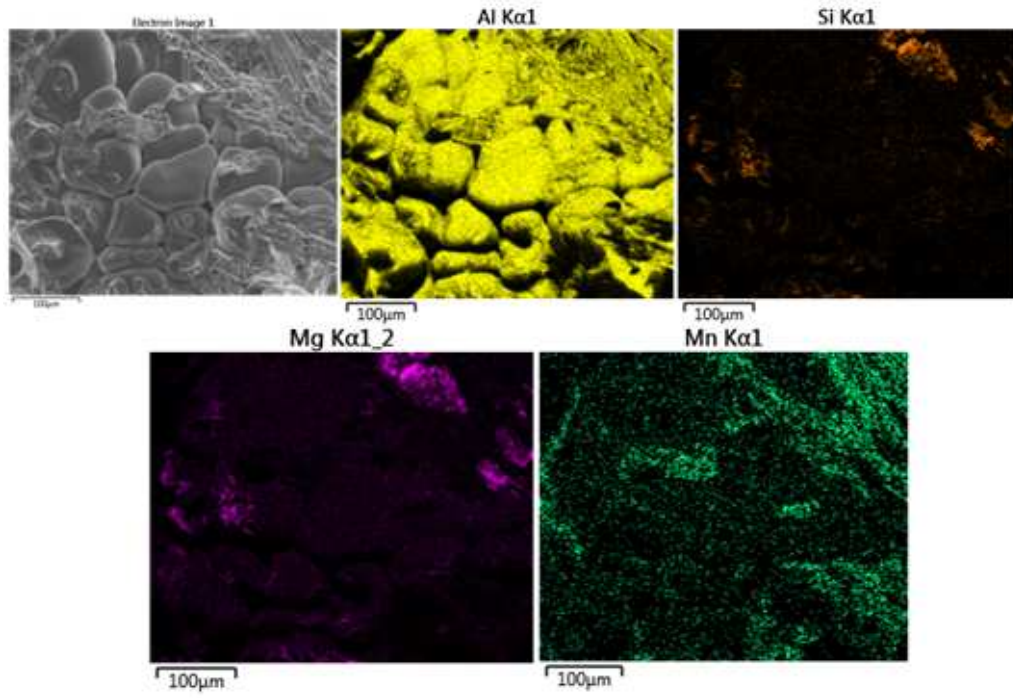
Şekil 7.22’de, üretilen kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Kırık yüzey görüntülerinden, tanelerin boyun oluşturduğu ve oldukça az gözenekli yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere artan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  miktarına bağlı olarak partikül dağılımı artmaktadır. Mekanik özelliklerin artan toz miktarıyla artmasının nedeni, takviye malzemesinin homojen olarak dağılması gösterilebilir. Daha fazla  $\text{Si}_3\text{N}_4$  kullanımı homojen olmayan topakların oluşmasına, bu da bölgesel olarak farklılık yaratacağından özellikle sertlik değerinde düşüşe neden olmaktadır.



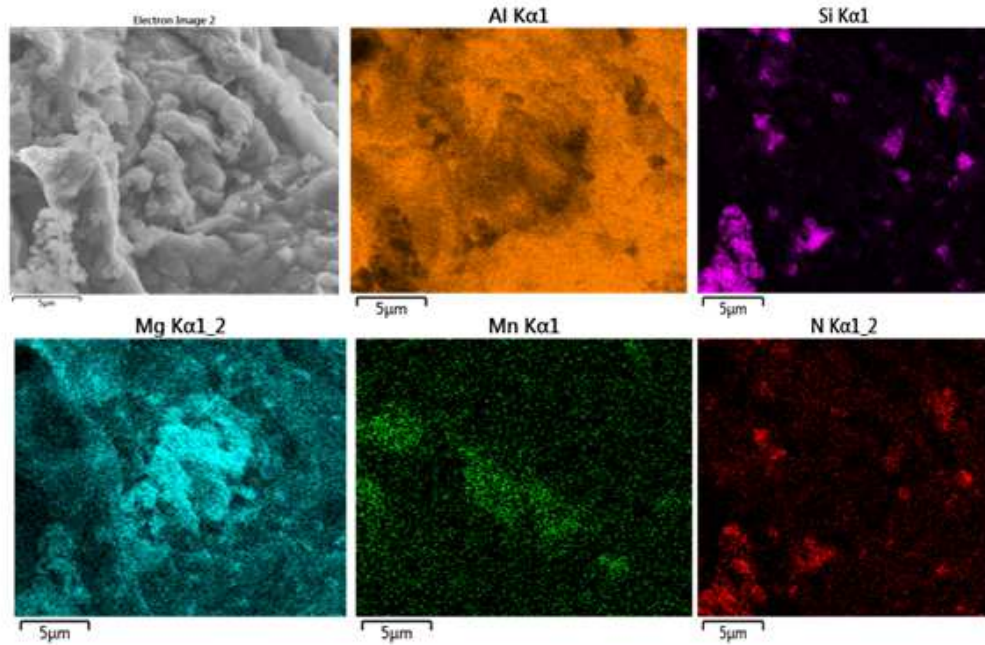
Şekil 7.22. Takviyesiz ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli Al kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri: (a-b) AL, (c-d) ALSN05, (e-f) ALSN075, (g-h) ALSN1

Şekil 7.23’de takviyesiz Al ve Şekil 7.24’de ise en iyi mekanik özellik gösteren ALSN1 için elementel haritalama sonuçları verilmiştir. Takviyesiz Al içeren malzemede görüldüğü üzere yapıda Al, Si, Mg ve Mn elementleri bulunmaktadır. Diğer taraftan en iyi mekanik özellik gösteren ALSN1 için yapılan haritalamada ise

bunlara ilave olarak azot da gelmektedir. Ayrıca Si ve N'nin bulunduğu yerlerdeki dağılım birbirine benzer olup tozun homojen olarak dağıldığını göstermektedir.

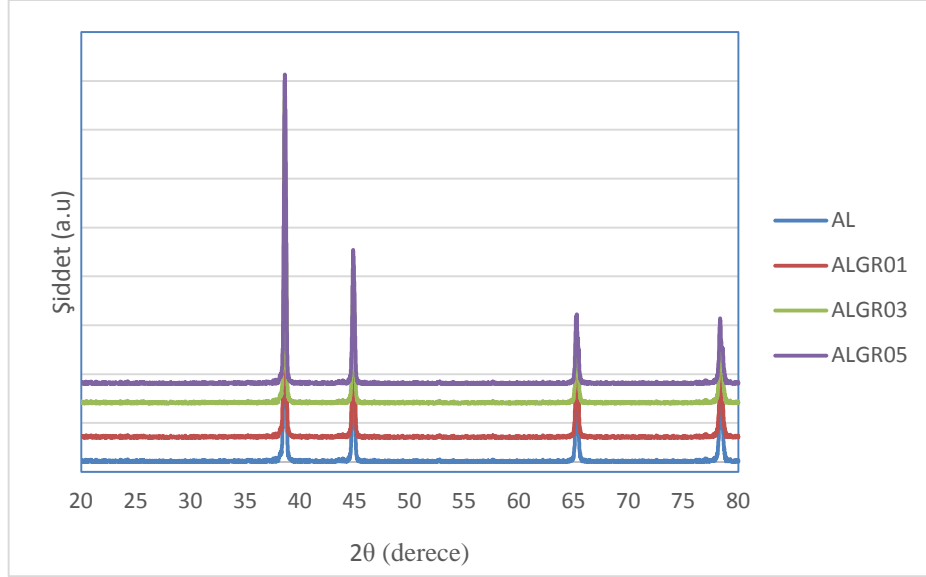


Şekil 7.23. Takviyesiz Al için elementel haritalama sonuçları



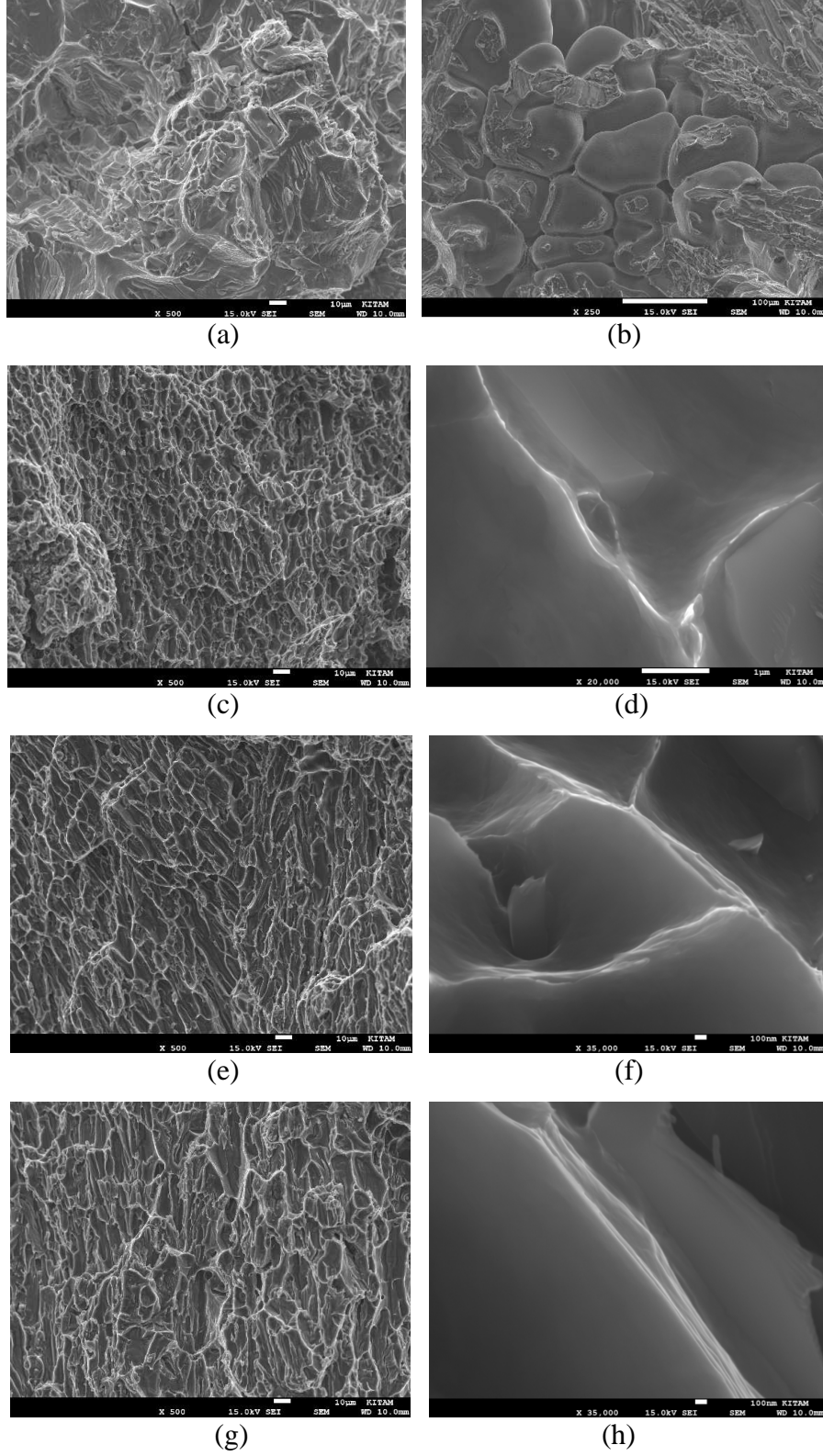
Şekil 7.24. ALSN1 için elementel haritalama sonuçları

Şekil 7.25’de ise grafen takviyeli alüminyum kompozitlerin XRD örgü deseni verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere yapıda grafene ait pikin bulunmaması; kullanılan grafen miktarının eser miktarda olması ve cihazın deteksiyon limitinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.25. Takviyesiz ve grafen takviyeli Al kompozitlerin XRD örgü deseni

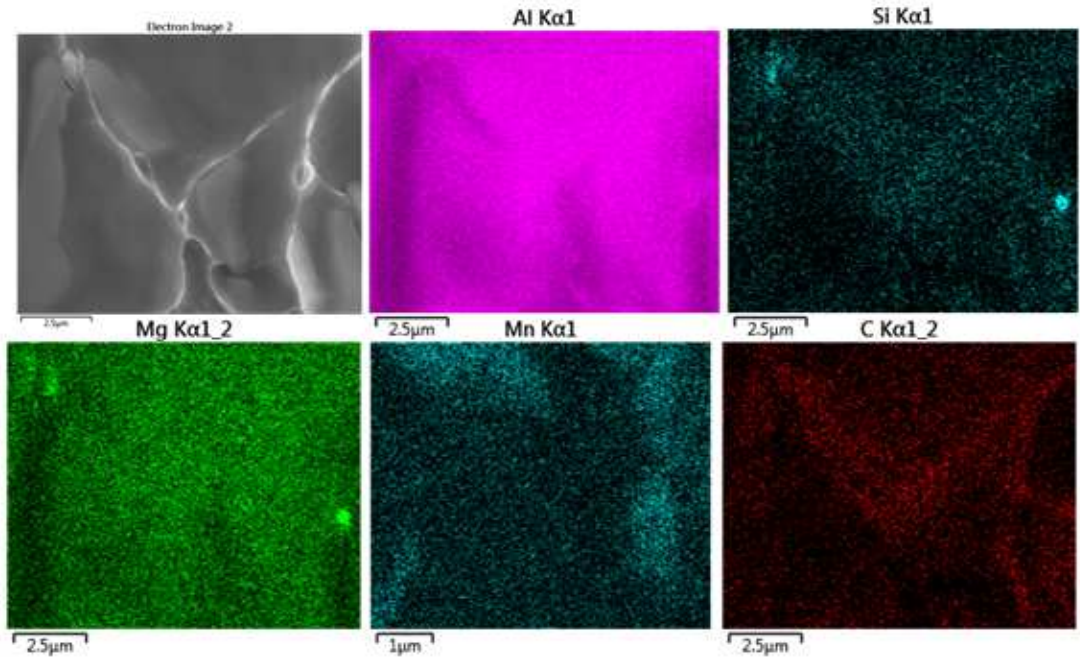
Şekil 7.26’da, üretilen grafen takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Kırık yüzey SEM görüntülerinden  $Si_3N_4$ ’tekine benzer şekilde taneler arasında boyun oluşumu gerçekleşmiş yoğun yapılar görülmektedir. Düşük ve yüksek büyütme SEM görüntülerinden görüldüğü üzere grafen plakalar Al tane sınırlarına yerleşmiştir. Daha önce verildiği üzere en yüksek sertlik değeri ALGR01 için elde edilmiştir. Bunun nedeni artan grafen miktarıyla topaklanma eğiliminin artmasıdır. Mukavemet değerlerinin yüksek olması ise grafenin tane sınırlarında bariyer olarak davranması ve dislokasyon yoğunluğunu artırmasıdır.



Şekil 7.26. Takviyesiz ve grafen takviyeli Al kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri: (a-b) AL, (c-d) ALGR01, (e-f) ALGR03, (g-h) ALGR05



Şekil 7.27’de ise en iyi mekanik özellik gösteren ALGR01 için elementel haritalama sonuçları verilmiştir. Takviyesiz Al içeren malzemenin elementel haritalama sonuçları daha önce Şekil 7.23’de verilmiş olup, yapıda Al, Si, Mg ve Mn elementlerini içerdiği belirlenmiştir. Diğer taraftan en iyi sertlik değeri veren ALGR01 için yapılan analizde ise bunlara ilave olarak grafenden gelen karbon da gelmektedir. Ek olarak karbonca zengin olan (daha kırmızı bölgeler) yerler tane sınırındaki grafenin bulunduğu yerler olup yapıda grafenin tane sınırlarında olduğunu ve homojen dağıldığını doğrulamaktadır.



Şekil 7.27. ALGR01 için elementel haritalama sonuçları

## 8. SONUÇLAR

Bu çalışmada, karıştırma döküm yöntemi ile biri grafen takviyeli diğeri ise  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli olmak üzere iki tür alüminyum kompozit malzeme üretilmiştir. Üretimi yapılan kompozit malzemelerin matrisi için pahalı saf alüminyum veya ticari alüminyum alaşımları yerine atık alüminyum içecek kutuları kullanılmıştır. Elde edilen grafen takviyeli kompozitler ile  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozitlerde takviye oranı değişiminin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular değerlendirilerek çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

### **$\text{Si}_3\text{N}_4$ takviyeli kompozitlerde;**

- 1) Artan takviye yüzde ağırlık oranı ile sertliğin 70 HV'den 87,9 HV'ye arttığı tespit edilmiştir.
- 2) Takviye yüzde ağırlık oranının artmasıyla çekme mukavemetinin 54,5 Mpa'dan 105,17 Mpa'ya arttığı görülmüştür.
- 3) Takviye yüzde ağırlık oranının artmasıyla darbe mukavemetinin 4,94 J'den 13,18 J'ye arttığı görülmüştür.
- 4) Takviye yüzde ağırlık oranının artmasıyla, kompozit malzemelerin yoğunluklarının ve gözeneğin arttığı tespit edilmiştir.
- 5)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  takviyeli kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntülerinden, tanelerin boyun oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca artan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  miktarına bağlı olarak partikül dağılımının arttığı ve takviye malzemesinin homojen olarak dağıldığı belirlenmiştir.

### **Grafen takviyeli kompozitlerde;**

- 1) Takviye yüzde ağırlık oranının artmasıyla sertlik, 70 HV'den 80,05 HV'ye yükselmiş ve en yüksek sertlik %0.1 takviye oranında elde edilmiştir. Bu oranın üzerindeki ilavelerde ise matrise göre sertlik değerleri daha fazla olmasına rağmen, artan grafen miktarıyla topaklanma eğiliminin artması sonucu sertliğin düştüğü belirlenmiştir.
- 2) Takviye yüzde ağırlık oranının artmasıyla çekme mukavemeti, 54,5 Mpa'dan 158,96 Mpa'ya yükselmiş ve en yüksek çekme mukavemetinin %0.3 takviye oranında elde edildiği görülmüştür. %0.5 takviye oranında ise matrise göre çekme mukavemeti değeri daha fazla olmasına rağmen, artan grafen miktarıyla topaklanma eğiliminin artması sonucu çekme mukavemetinin bir miktar düştüğü tespit edilmiştir.
- 3) Takviye yüzde ağırlık oranının artmasıyla darbe mukavemeti, 4,94 J'den 30,04 J'ye yükselmiş ve en yüksek değer %0.1 takviye oranında elde edildiği görülmüştür. Bu oranın üzerindeki ilavelerde ise matrisinkine oranla darbe mukavemeti değerlerinin çok daha fazla olmasına rağmen artan grafen miktarıyla topaklanma eğiliminin artması sonucu darbe mukavemetinin düştüğü belirlenmiştir.
- 4) Takviye yüzde ağırlık oranının artmasıyla, kompozit malzemelerin yoğunluklarının azaldığı, gözeneğin ise arttığı tespit edilmiştir.
- 5) Grafen takviyeli kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntülerinden, taneler arasında boyun oluşumu gerçekleşmiş yoğun yapılar ve grafen plakaların Al tane sınırlarına yerleştiği görülmüştür.

## 9. ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulguların değerlendirilmesinden sonra ileride yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir.

- 1) Üretilen kompozit malzemelerin artan takviye oranına göre termal iletkenliğinde meydana gelen değişimler incelenebilir.
- 2) Üretilen kompozit malzemelerin korozyona karşı dirençleri araştırılabilir.
- 3) Üretimi yapılan kompozitlerin aşınma davranışları incelenebilir.
- 4) Üretimi yapılan kompozit malzemelere plastik şekil verme yöntemleri (haddelme, ekstrüzyon gibi) uygulanarak, mekanik özelliklerindeki değişimler incelenebilir.
- 5) Atık içecek kutularından elde edilen matrise daha büyük tane boyutunda (30-50 µm gibi)  $Si_3N_4$  tozu, ağırlıkça %10 ile %30 arasında oranlarda takviye edilerek üretilecek kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenebilir.
- 6) Atık içecek kutularından elde edilen matris malzemesine  $Si_3N_4$  ve grafen tozları birlikte takviye edilerek hibrit alüminyum matrisli kompozit üretimi yapılabilir.
- 7) Mevcut çalışmada kullanılan ergitme fırınına vakum pompası bağlanarak, karıştırma işlemleri sırasında hava ile temasın engellenmesiyle yüzeyde oksit tabakası oluşumu minimum seviyeye indirilebilir.
- 8) Daha büyük kapasitede bir ergitme fırın imalatı yapılabilir. Bu sayede, büyük ebatlarda kompozit malzeme üretilebilir ve takviye oranının talaşlı işlenebilirliğe etkisi incelenebilir.
- 9) Ergitme fırın kapasitesinin artırılmasıyla elde edilecek sıvı ergiyiğin, tekniğine uygun tasarlanıp imal edilecek döküm kalıplarına dökülmesiyle, kompozit makine parçası imali gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Akbulut, A. (2009a). Silisyum nitrür tozunun  $Al_2O_3$ , MgO,  $MgF_2$  sinterleme ilaveleri kullanılarak sinterlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 69, Sakarya.
- Akbulut, A., Tatlı, Z. ve Çalışkan, F. (2009b).  $Si_3N_4$  Seramiklerinin  $Al_2O_3$ , MgO Katkıları Kullanılarak Basıncısız Sinterlenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs, Bildiri Kitabı, 949-952, Karabük, Türkiye.
- Alan S (2008). Alüminyum Raporu. <http://www.demirbirlik.org/TR,46/aluminyum-sektor-raporu.html> (Erişim tarihi: 11.09.2015).
- Alaneme, K. K. and Bodunrin, M. O. 2013. Mechanical Behaviour of Alumina Reinforced AA 6063 Metal Matrix Composites Developed by Two Step-Stir Casting Process, *Acta Technica Corviniensis-bulletin of engineering*, 6(3): 105-110
- Anonim (2004). TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Alüminyum Raporu. [http://www.metalurji.org.tr/arsiv/05\\_sektorel\\_rapor/aluminyum\\_raporu.pdf](http://www.metalurji.org.tr/arsiv/05_sektorel_rapor/aluminyum_raporu.pdf) (Erişim tarihi: 10.09.2015).
- Anonim (2015). Geri Dönüşüm. <http://www.obi.bilkent.edu.tr/ekookul/pdf/geridonusum.pdf> (Erişim tarihi: 10.09.2015).
- Anonymous (2013). Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, Aluminium Recycling in Europe. <http://recycling.worldaluminium.org/uploads/media/f10000217.pdf> (Erişim tarihi: 20.10.2016)
- Aran, A. (1997). Metal Matrisli Kompozit Malzemeler Alanında Yeni Gelişmeler. 1. Makine Mühendisliği Kongresi (MAMKON'97), 4-6 Haziran, Bildiri Kitabı, 368-372, İstanbul.
- Arık, H. (1996). Sepiyolitten karbo-termal indirgeme ve nitrüleme yoluyla silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ) seramik tozu üretimi parametrelerinin araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı, 143, Ankara.
- Atik, E., Ünlü, S. B., Şen, O. ve Çavdar, U. (2006). Partikül Takviyeli  $AlSi12CuNiMg$  Kompozitinin Aşınma Dayanımı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2): 75-87.
- Bağcı, C. (2007). Sepiyolitten silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ) tipi teknolojik seramik malzeme üretimi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 129, Ankara.

- Bajaj, P. (2011). Mechanical behaviour of aluminium based metal matrix composites reinforced with SiC and alumina. Master's Thesis, Thapar University Master of Engineering in Production & Industrial Engineering, 70 , Patiala, India.
- Başçı, M. (2015). Geleceğin Malzemesi Grafen. *Bilişim Dergisi*, 177: 156-165.
- Bedir, F. (2006). Alüminyum Kompozitlerin Üretimi, Karakteristik Özellikleri Ve Endüstriyel Uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 47(554): 28-35.
- Buytoz, S. ve Eren, H. (2007). Al Metal Matris Kompozitlerin Abrasiv Aşınma Performansına Takviye Elemanlarının Etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2): 209-216.
- Car, E. (2011). İkincil Alüminyum Üretimine Genel Bir Bakış. [http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi160/d160\\_4250.pdf](http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi160/d160_4250.pdf) (Erişim tarihi: 11.09.2015).
- Çiftçi, S. N. (2015). İndirgenmiş grafen okside desteklenmiş nikel- paladyum alaşım nanopartikülleri: sentezi, yapısal tanımlanmaları ve amonyak boran'dan hidrojen üretiminde katalitik etkinlikleri. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı, 72, Erzurum.
- de Araujo, E. R., de Souza, M. M. S., Gonzalez, C. H. and de Araujo Filho, O. O. (2012). Preparation of Metal Matrix Aluminum Alloys Composites Reinforced by Silicon Nitride and Aluminum Nitride Through Powder Metallurgy Techniques, *In Materials Science Forum*, 727: 259-262.
- Doğan, Ö. H. (2014). Grafit oksitin elektrokimyasal indirgenmesi ile grafen ve metal-grafen kompozit sentezi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, 211, Erzurum.
- Ediz, Ç. (2011). Alüminyumun geri dönüşüm süreci ve süreçte kullanılan malzemelerin alüminyum bileşenlerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 68, Bilecik.
- Erden, O. İ. (2005). Alüminyum – silisyumnitrür kompozit malzemenin difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 99, Ankara.
- Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., Yao, L. and Wang, B. (2016). Preparation and Tensile Properties of Homogeneously Dispersed Graphene Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Materials & Design*, 94: 54-60.
- Genç, G. (2007). Kuartz mineralinden karbotermal indirgeme ve nitrüleme yöntemi ile Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> üretimi ve sinterlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 92, Sakarya.

- Gui, M. C., Wang, D. B., Wu, J., Yuan, G. and Li, C. G. (2000). Microstructure and Mechanical Properties of Cast (Al-Si)/SiCp Composites Produced by Liquid and Semisolid Double Stirring Process. *Material Science and Technology*, 16(5): 556-563.
- Hindi, J., Kini, A. U., Sharma, S. S., Gurumurthy, B. M. and Shankar, G. (2015). Mechanical Characterization of Stir Cast Al 6063 Matrix SiC Reinforced Metal Matrix Composites. 5th International Conference on Automotive, Mechanical and Materials Engineering (ICAMME'2015), 16-17 August, Book of Abstracts, 69-73, Bali, Indonesia.
- İzgi, N. (2011). Alüminyumun geri dönüştürülmesi ve özelliklerinin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 135, İstanbul.
- Jagadish, B. S. (2015). Synthesis and Characterisation of Aluminium 2024 and Graphene Metal Matrix Composites by Powder Metallurgy Means. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 2(7): 14-18.
- Kalemtaş, A. (2014). Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. <http://www.researchgate.net/publication/269624843> (Erişim tarihi: 15.09.2015)
- Kılıç, C. (2008). Sıkıştırma döküm yöntemi ile üretilmiş ve soğuk haddelenmiş AlMg<sub>3</sub>/SiCp kompozitinin aşınma özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 103, Edirne.
- Kok, M. (2005). Production and Mechanical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particle Reinforced 2024 Aluminium Alloy Composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 161(3): 381-387.
- Kozal, B. (2012). Karbon tabanlı petek örgülerin elektronik özellikleri. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, 119, Ankara.
- Kök, M. (2001). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Partikül Takviyeli 2024 Alüminyum Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2): 131-142.
- Kurt, T. (2002). Diyatomit'ten karbo-termal indirgeme ve nitrürleme yoluyla silisyum nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) seramik toz üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 91, Ankara.
- Mindivan, H. ve Kayalı, S. E. (2007). SiC Takviyeli 2618 Al Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışı. *İtü Dergisi/d Mühendislik*, 6(2): 63-70.
- Mutlu, İ. (2012). Alüminyum Matrisli Metal Kompozit Malzemelerin Üretilmesi. *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(1): 31-36.
- Nazik, C. (2013). Alüminyum matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 108, Ankara.

- Özdin, K., Mutlu, İ. ve Öner, C. (2006). Vorteks Metoduyla Metal Matrisli Kompozitlerde Partikül Boyutu Ve Partikül Hacim Oranının Poroziteye Etkisinin İncelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 29-34.
- Özkök, Ö. (2004).  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> içeren alüminyum matrisle kompozit malzeme üretimi ve özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 104, Ankara.
- Pai, B. C., Pillai, R. M. and Satyanarayana, K. G. (1993). Stir Cast Aluminium Alloy Matrix Composites. *Key Engineering Material*, 79-80: 117-128.
- Pul, M., Çalın, R., Çıtak, R. ve Şeker, U. (2009). Düşük Takviyeli MgO-Al Kompozitlerin Vakumlu İnfilyasyonunda Takviye Oranının İnfilyasyon Davranışına Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 12(3): 173-177.
- Pulat, D., Altubay, M., Erzi, E., Yüksel, Ç. ve Dışpınar, D. (2014). Alüminyum Geri Dönüşümünde Verimlilik ve Akışkanlığın İncelenmesi. 15<sup>th</sup> International Materials Symposium (IMSP'2014), 15-17 Ekim, Bildiri Kitabı, 905-909, Denizli, Türkiye.
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A. and Asif, M. (2014). Effect of Graphene Nanoplatelets Addition on Mechanical Properties of Pure Aluminum Using a Semi-Powder Method. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(2): 101-108.
- Samuel, A. M. and Samuel, F. H. (1995). Foundary Aspects of Particulate Reinforced Aluminium Mmcs: Factors Controlling Composite Quality. *Key Engineering Material*, 104-107: 65-98.
- Seo, Y. H. and Kang, C. G. (1995) The Effect of Applied Pressure on Particle-Dispersion Characteristics and Mechanical Properties in Melt-Stirring Squeeze-Cast SiCp/Al Composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 55(3): 370-379.
- Sharma, P., Sharma, S. and Khanduja, D. (2015). Production and Some Properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Reinforced Aluminium Alloy Composites, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3(3): 352-359.
- Singh, L., Ram, B. and Singh, A. (2013). Optimization of Process Parameter for Stir Casted Aluminium Metal Matrix Composite Using Taguchi Method. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(8): 375-383.
- Singla, M., Dwivedi, D. D., Singh, L. and Chawla, V. (2009). Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 8(6): 455-467.
- Sujan, D., Oo, Z., Rahman, M., Maleque, M. and Tan, C. K. (2012). Physio-Mechanical Properties of Aluminium Metal Matrix Composites Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 68, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 6(8): 678 - 681.



- Sur, G., Şahin, Y. ve Gökkaya, H. (2005). Ergimiş Metal Karıştırma Ve Basınçlı Döküm Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Tanecik Takviyeli Kompozitlerin Üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2): 233-238.
- Şahin, C. (2009). Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> matrisli SiC kompozitlerinin sinterlenmesinde C veya SiC ilavesinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı, 83, İstanbul.
- Şahin, E. (2011). AlMg<sub>3</sub>/SiCp kompozit malzemelerinin darbe davranışının takviye oranı ile değişiminin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 58, Edirne.
- Şenel, C. M., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669): 36-47.
- Toprak, O. (2010). AlMg<sub>3</sub>/SiCp kompozitlerinin basma dayanımı özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 67, Edirne.
- Toptan, F., Kumdalı, F. ve Kerti, I. (2006). Al-B<sub>4</sub>C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış. *Metalurji*, 145: 11-18.
- Ulucak, T. (2003). Alüminyum - En Genç Metal. <http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfam1.html> (Erişim tarihi: 15.09.2015)
- Ürkmez, N. (2004). AlMg<sub>3</sub>/SiCp kompozitlerinin üretimi ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 106, İstanbul.
- Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z. and Zhang, D. (2012). Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix Composites. *Scripta Materialia*, 66(8): 594–597.
- Yan, S. J., Dai, S. L., Zhang, X. Y., Yang, C., Hong, Q. H., Chen, J. Z. and Lin, Z. M. (2014). Investigating Aluminum Alloy Reinforced by Graphene Nanoflakes. *Materials Science and Engineering A*, 612: 440-444.
- Yılmaz, H. (2007). Alüminyum esaslı SiCp partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler. Bitirme Ödevi, Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Gövde-Motor Bölümü, 115, Kayseri.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Burak ÖZTOP  
Doğum Yeri : Tokat / Zile  
Doğum Tarihi : 15/06/1982  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Amasya Anadolu Öğretmen Lisesi (1999)  
Lisans : Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine  
Mühendisliği Bölümü (2004)

### Çalıştığı Kurumlar ve Yıl

TMMOB Makine Mühendisleri Odası Amasya İl Temsilciliği, Teknik Görevli,  
(2005-2007)  
Yiğit Doğalgaz Sistemleri A.Ş, Proje Mühendisi, (2007 – 2008)  
Plasform Plastik ve Metal Endüstri A.Ş, Üretim Mühendisi, (2008 – 2014)  
Amasya Üniversitesi Merzifon MYO, Öğretim Görevlisi, (2014 – devam ediyor)