



**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KIRMIZI ÇAMUR-EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ  
VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Fatih Yusuf ATEŞ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

MAYIS 2022

**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KIRMIZI ÇAMUR-EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ  
VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih Yusuf ATEŞ**

**İleri Teknolojiler Anabilim Dalı**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayşe KALEMTAŞ**

**MAYIS 2022**



BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19212874013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Fatih Yusuf ATEŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KIRMIZI ÇAMUR-EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Ayşe KALEMTAŞ**      .....

Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Doç. Dr. Ayşe KALEMTAŞ**      .....

Bursa Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Ayşe BEDELOĞLU**      .....

Bursa Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Gülsüm TOPATEŞ**      .....

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

**Teslim Tarihi**      :  
**Savunma Tarihi**    : 26 Mayıs 2022



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



*Benden hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime,*

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca güler yüzünü, ilgisini, yardımlarını, tavsiye ve yönlendirmelerini hiçbir zaman eksik etmeyen, yol gösteren, tecrübe ve bilgileriyle bilimsel gelişimime çok fazla katkısı olan, karakterizasyon çalışmalarında desteklerini benden esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Ayşe KALEMTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Radyasyon kalkanlama deneylerinde imkanlarını seferber eden sayın Süleyman Demirel Üniversitesinden Prof. Dr. İskender Akkurt ve Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesinden Doç. Dr. Kadir GÜNOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım süresince gerekli çalışma ortamını, teknik altyapılarını ve katkılarını sağlayan tüm Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümü ve çalışanlarına, teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, hayatım boyunca benden hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirmemiş, her türlü fedakarlıkta bulunmuş olan, yanımda oldukları için kendimi çok şanslı hissettiğim başta değerli ve çok sevgili babam İbrahim ATEŞ ile annem Ayşe ATEŞ olmak üzere kız kardeşlerim Büşra ATEŞ ve Zeynep Şevval ATEŞ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2022

Fatih Yusuf Ateş  
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	.vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
KISALTMALAR.....	x
SEMBOLLER .....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xviii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Hipotez .....	3
1.3 Boksit .....	3
1.4 Alümina .....	5
1.4.1 Gibsit.....	5
1.4.2 Böhmit.....	5
1.4.3 Diasporit.....	5
1.5 Boksitten Alümina Üretimi .....	5
1.5.1 Asidik yöntemler.....	6
1.5.2 Elektro-termik yöntemler.....	6
1.5.3 Bazik yöntemler .....	6
1.5.4 Kombine prosesi .....	6
1.6 Bayer Prosesi.....	7
1.6.1 Boksit hazırlama .....	8
1.6.2 Otoklav ve kırmızı çamur bölümü .....	8
1.6.3 Dekompozisyon ve hidrat bölümü .....	8
1.6.4 Buharlaştırma bölümü.....	8
1.6.5 Kalsinasyon bölümü.....	8
1.6.6 Kurutma ve öğütme bölümü .....	9
<b>2. KIRMIZI ÇAMUR .....</b>	<b>10</b>
2.1 Kırmızı Çamurun Fiziksel-Kimyasal Özellikleri .....	10
2.1.1 Kimyasal bileşimi .....	11
2.1.2 Mineralojik bileşimi.....	12
2.2 Kırmızı Çamurun Çevreye Etkisi ve Berterafi .....	13
2.3 Kırmızı Çamurun Değerlendirilmesi.....	14
2.4 Kırmızı Çamurun Radyasyon Kalkanlamada Değerlendirilmesi.....	16
2.4.1 Radyasyon kalkanlama .....	16
2.4.2 Kırmızı çamurun radyasyon kalkanlamada kullanımı .....	19
<b>3. EPOKSİ REÇİNE .....</b>	<b>22</b>
<b>4. KOMPOZİT MALZEMELER.....</b>	<b>26</b>
4.1 Kompozit Yapı Elemanları.....	27

4.1.1 Matris malzemeler.....	27
4.1.1.1 Seramik matrisler .....	28
4.1.1.2 Metal matrisler .....	28
4.1.1.3 Polimer matrisler .....	29
4.1.2 Takviye elemanı .....	29
4.1.2.1 Parçacık yapılı takviyeler .....	30
4.1.2.2 Lif yapılı takviyeler.....	31
4.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları .....	31
4.3 Kompozitlerin Kullanım Alanları .....	33
4.3.1 Havacılık sektörü .....	34
4.3.2 Otomotiv sektörü.....	34
4.3.3 Sağlık sektörü.....	34
4.3.4 İnşaat ve yapı sektörü.....	34
4.3.5 Spor ve eğlence sektörü .....	35
4.3.6 Ulaşım sektörü .....	35
4.4 Seramik-Epoksi Kompozitler .....	35
4.4.1 Kullanım alanları.....	38
4.4.2 Üretim yöntemleri .....	39
4.4.2.1 Toz metalurjisi .....	39
4.4.2.2 Sıvı faz üretim yöntemleri.....	40
4.4.2.3 İkili üretim yöntemleri .....	40
<b>5. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI .....</b>	<b>41</b>
<b>6. MALZEMELER ve YÖNTEMLER .....</b>	<b>45</b>
6.1 Malzemeler .....	45
6.1.1 Kırmızı çamur .....	45
6.1.2 Epoksi reçine.....	46
6.1.3 Sertleştirici .....	47
6.1.4 Sodyum aljinat .....	47
6.1.5 Kalsiyum klorür .....	47
6.2 Kullanılan Cihaz ve Aletler.....	47
6.3 Deneysel Yöntem .....	49
6.3.1 Kırmızı çamur kürelerinin oluşturulması .....	49
6.3.2 Sinterleme işlemi.....	53
6.3.3 Kompozit hazırlama .....	54
6.3.4 Zımparalama – parlatma .....	59
6.4 Karakterizasyon Yöntemleri.....	61
6.4.1 SEM analizi.....	61
6.4.2 Radyasyon kalkanlama analizi.....	61
<b>7. BULGULAR ve TARTIŞMA.....</b>	<b>65</b>
7.1 Sinterlenmiş Kırmızı Çamur Kürelerinin SEM Analizi .....	65
7.2 Numunelerin Geometrik Yoğunlukları .....	66
7.3 Radyasyon Kalkanlama Bulguları.....	67
<b>8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>71</b>
8.1 Sonuçlar .....	71
8.2 Öneriler.....	73
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>74</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>81</b>

## KISALTMALAR

<b>Ağ.</b>	: Ağırlıkça
<b>BET</b>	: Yüzey Alanı Ölçüm Analizi
<b>CVD</b>	: Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>ÇKA</b>	: Çok Kanallı Analiz
<b>DGA</b>	: N,N-diglisidil anilin
<b>DGEBA</b>	: Diglisidil eter bisfenol-A
<b>DGEBF</b>	: Diglisidil eter bisfenol-F
<b>EDX</b>	: Enerji Dağılımlı X-Ray Analizi
<b>IR</b>	: Infrared (Kızılötesi)
<b>I/O</b>	: Giriş/Çıkış
<b>k.ç.</b>	: Kırmızı çamur
<b>MMK</b>	: Metal Matrisli Kompozit
<b>NaI(Tl)</b>	: Talyum ihtiva eden Sodyum İyodür
<b>NE</b>	: Novalak Epoksi
<b>PA</b>	: Poliamid
<b>PE</b>	: Polietilen
<b>PEEK</b>	: Polietereterketon
<b>PS</b>	: Polistiren
<b>PSD</b>	: Spektral Güç Yoğunluğu
<b>PVC</b>	: Polivinil Klorür
<b>PVD</b>	: Fiziksel Buhar Biriktirme
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>Sıc.</b>	: Sıcaklık
<b>TGA</b>	: Termogravimetrik Analiz
<b>TG/DTA</b>	: Simultane Termal Analiz
<b>TGMDA</b>	: N,N,N',N-tetraglisidil-4,4'-metilen dianilin
<b>TGPAP</b>	: Triglisidil p-aminofenol
<b>T/M</b>	: Toz Metalurjisi
<b>UV</b>	: Ultraviyole
<b>UV-vis</b>	: Ultraviyole ve görünür ışık

**Yoğ.** : Yoğunluk  
**XRD** : X-ışını Kırınımı  
**XRF** : X-ışını Floresans



## SEMBOLLER

<b>(aq)</b>	: Aqua
<b>Atm</b>	: Atmosfer
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>(ç)</b>	: Çözelti
<b>d</b>	: Yoğunluk
<b>dk</b>	: Dakika
<b>g</b>	: Gram
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	: Yoğunluk
<b>h</b>	: Yükseklik
<b>HV</b>	: Vickers sertlik değeri
<b>(k)</b>	: Katı
<b>keV</b>	: Kiloelektron volt
<b>kg</b>	: Kilogram
<b>kVA</b>	: Kilowatt
<b>kVp</b>	: Kilovoltaj peak
<b>kW</b>	: Kilovolt - amper
<b>kX</b>	: 1000 kat
<b>m</b>	: Kütle
<b>M</b>	: Molar
<b>mg</b>	: Miligram
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>mL</b>	: Mililitre
<b>MPa</b>	: Megapaskal
<b>M<sub>si</sub></b>	: Cevherin Silis Modülü
<b>n</b>	: Yinelenen birim sayısı
<b>N</b>	: Newton
<b>ns</b>	: Nanosaniye
<b>pH</b>	: Asitlik-bazlık derecesi
<b>ppm</b>	: Milyonda Bir Birim
<b>r</b>	: Yarıçap

<b>RH</b>	: Nem ölçü birimi
<b>rpm</b>	: Dakikadaki devir sayısı
<b>Scm<sup>-1</sup></b>	: Santimetre başına siemens
<b>v</b>	: Hacim
<b>w</b>	: Watt
<b>XL</b>	: Endüktif reaktans
<b>μ</b>	: Toplam doğrusal zayıflatma katsayısı
<b>μm</b>	: Mikrometre
<b>μL</b>	: Mikrolitre
<b>α</b>	: alfa ışınması
<b>β</b>	: beta ışınması
<b>γ</b>	: gama ışınması
<b>α - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alümina kristal yapı türü
<b>γ - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alümina kristal yapı türü
<b>Ø</b>	: Çap
<b>π</b>	: Pi sayısı
<b>°C</b>	: Santigrat Derece
<b>%</b>	: Yüzde
<b>~</b>	: Yaklaşık
<b>≅</b>	: Yaklaşık Eşit
<b>±</b>	: Sapma payı

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 1.1 : Boksit'e ait kimyasal bileşim oranları. ....	4
Çizelge 1.2 : Boksit'in silis modülüne ve Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tenörüne göre sınıflandırılması. ....	4
Çizelge 2.1 : Kırmızı çamurda bulunan kimyasal maddeler ve mineraller. ....	11
Çizelge 2.1 (devam) : Kırmızı çamurda bulunan kimyasal maddeler ve mineraller. ....	12
Çizelge 6.1 : Hiçbir ön işleme tabi tutulmamış kırmızı çamurun XRF analiziyle belirlenen elementel bileşimi. ....	45
Çizelge 6.2 : Kompozitlerin farklı formasyonlarda üretimi. ....	56
Çizelge 6.3 : Kullanılan radyoaktif kaynakların bazı özellikleri. ....	64
Çizelge 7.1 : Üretilen numunelerin geometrik yoğunlukları. ....	67

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1</b> : Boksit cevheri.....	<b>3</b>
<b>Şekil 1.2</b> : Bayer prosesine ait akım şeması. ....	<b>9</b>
<b>Şekil 2.1</b> : Kırmızı çamur.....	<b>10</b>
<b>Şekil 3.1</b> : Epoksinin fonksiyonel olarak gösterimi.....	<b>22</b>
<b>Şekil 3.2</b> : DGEBA'nın kimyasal yapısı.....	<b>24</b>
<b>Şekil 3.3</b> : Çapraz bağlı epoksi polimerinin oluşumu.....	<b>24</b>
<b>Şekil 4.1</b> : Kompozit yapıdaki matris malzeme türlerinin sıcaklık-yoğunluk karşılaştırması. ....	<b>28</b>
<b>Şekil 4.2</b> : Takviye malzemelerinin sınıflandırılması.....	<b>30</b>
<b>Şekil 6.1</b> : Hiçbir işleme tabi tutulmamış kırmızı çamurun XRD analizi sonucu. ....	<b>46</b>
<b>Şekil 6.2</b> : Şırınga pompası.....	<b>48</b>
<b>Şekil 6.3</b> : Numuneleri sinterleme amacıyla kullanılan Nevola firmasına ait Thermnevo - Reis Serisi sinter fırını.....	<b>49</b>
<b>Şekil 6.4</b> : 50 mL kırmızı çamur içeren şırınganın şırınga pompasına yerleştirilme düzeni (şekilde gri uçlu iğne).....	<b>50</b>
<b>Şekil 6.5</b> : Kırmızı çamur – aljinat küre üretim deney düzeneği. ....	<b>51</b>
<b>Şekil 6.6</b> : Beş farklı damlatma yüksekliğinde üretilmiş olan kırmızı çamur-aljinat kürelerinin görünüşleri; (a) h = 15 cm, (b) h = 13 cm, (c) h = 12 cm, (d) h = 7 cm ve (e) h = 8,5 cm. ....	<b>52</b>
<b>Şekil 6.7</b> : Beş farklı damlatma yüksekliğinde üretilmiş olan kırmızı çamur seramik kürelerin 1100°C'de 60 dk süreyle sinterlenmesi sonrası görünüşleri; (a) h = 15 cm, (b) h = 13 cm, (c) h = 12 cm, (d) h = 7 cm ve (e) h = 8,5 cm. ....	<b>53</b>
<b>Şekil 6.8</b> : Farklı iğne ucu kullanılarak üretilen ve h = 8,5 cm damlama yüksekliğine sahip kırmızı çamur seramik kürelerinin 1200°C' de 60 dk süreyle sinterlenmesi sonrası görünüşleri; (a) gri uçlu ve (b) yeşil uçlu. ....	<b>54</b>
<b>Şekil 6.9</b> : 1100°C'de sinterlenmiş olan kırmızı çamur kürelerinin 4'er g tartıldıktan sonra 1'den 10'a kadar numarlandırılmış olan kalıplara doldurulmuş hali. ....	<b>55</b>
<b>Şekil 6.10</b> : 1200°C'de sinterlenmiş kürelerin yapılan soğuk döküm işlemleri sonrası görünüşleri; (a) 1, 2 ve 3 nolu kalıplarda sadece epoksi reçine ve sertleştiricinin karıştırılarak katılmasıyla yapılan döküm, (b) 4, 5, 6 ve 7 nolu kalıplarda epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla yapılan döküm ve (c) 8, 9 ve 10 nolu kalıplarda epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla yapılan döküm. ....	<b>56</b>
<b>Şekil 6.11</b> : 1100°C'de sinterlenmiş kürelerin soğuk dökümden sonra, sertleşmeden önceki görünüşleri; (a) 1, 2, 3 ve 4 nolu kalıplarda kürelere sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılarak yapılan döküm, (b) 5, 6 ve 7 nolu kalıplarda kürelere epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak yapılan döküm ve (c) 8, 9 ve 10 nolu kalıplarda epoksi kürelere epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamur tozu katılarak yapılan döküm. ....	<b>57</b>

<b>Şekil 6.12</b> : Kırmızı çamur küreleri katmadan yapılan sade dökümler. (a) Sadece epoksi ve sertleştirici karıştırılarak yapılan döküm, (b) epoksi, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak yapılan döküm ve (c) epoksi, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak yapılan döküm.....	<b>58</b>
<b>Şekil 6.13</b> : 1100°C’de sinterlenmiş olan kürelere sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılarak üretilen kompozitlerin sertleşme sonrası kalıptan çıkarılmaları. ....	<b>59</b>
<b>Şekil 6.14</b> : 1100°C’de sinterlenmiş kürelerin (a) sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılmasıyla, (b) epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla ve (c) epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla üretilen kompozitlerin zımparalama-parlatma sonrası görünümleri.....	<b>59</b>
<b>Şekil 6.15</b> : 1200 °C’de sinterlenmiş kürelerin (a) sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılmasıyla, (b) epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla ve (c) epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla üretilen kompozitlerin zımparalama-parlatma sonrası görünümleri.....	<b>60</b>
<b>Şekil 6.16</b> : Kırmızı çamur küreleri katmadan sadece (a) epoksi ve sertleştirici karıştırılarak (b) epoksi, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak ve (c) epoksi, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak yapılan döküm ile üretilen numunelerin görünümleri. ....	<b>60</b>
<b>Şekil 6.17</b> : Gama spektroskopi sisteminin şematik diyagramı.....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.18</b> : (a) NaI(Tl) detektörünün görünümü ve (b) dedektörün iç yapısı.....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.19</b> : (a) DSPEC LF cihazı ve (b) yüksek gerilim birimi.....	<b>63</b>
<b>Şekil 6.20</b> : Deneyde kullanılan <sup>60</sup> Co (sol) ve <sup>137</sup> Cs (sağ) radyoaktif kaynakları.....	<b>64</b>
<b>Şekil 6.21</b> : <sup>60</sup> Co ve <sup>137</sup> Cs radyoaktif kaynaklarının bozunma şekilleri.....	<b>64</b>
<b>Şekil 7.1</b> : 1100°C’de sinterlenmiş kırmızı çamur küresine ait (a) 200 x, (b) 5k X, (c) 10k X ve (d) 15k X büyütmedeki SEM görüntüleri.....	<b>65</b>
<b>Şekil 7.2</b> : 1200°C’de sinterlenmiş kırmızı çamur küresine ait (a) 250 x, (b) 1k X, (c) 5k X ve (d) 10k X büyütmedeki SEM görüntüleri.....	<b>66</b>
<b>Şekil 7.3</b> : Numunelerin ölçülen $\mu$ katsayısı değerleri.....	<b>69</b>
<b>Şekil 7.4</b> : Numunelerin (A1–A9) $\mu$ katsayısı değerlerinin enerjiyle değişimi. ....	<b>70</b>

## KIRMIZI ÇAMUR EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU

### ÖZET

Günümüzde teknolojinin giderek gelişmesine rağmen üretim tesislerinde, üretimin farklı aşamalarında atık maddeler ortaya çıkmakta ve bu da çevreye zararlı etkiler bırakmaktadır. Bu tarz atıkların değerlendirilmesi hem çevre hem de kısıtlı kaynakların verimli bir şekilde kullanımı adına özellikle ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkeler açısından daha fazla önem arz etmektedir. Kırmızı çamur da bu anlamda çevreye zararlı bir atık olarak gündemde yer almaktadır. Kırmızı çamur Bayer prosesiyle alümina üretim sürecinde ortaya çıkan ve karmaşık yapıya sahip bir endüstriyel katı atıktır. Alümina üretiminde kullanılan boksit mineralinin kostik soda ile liç işlemi sırasında genellikle bir ton alümina üretim sürecinde bir ile bir buçuk ton aralığında kırmızı çamur açığa çıkmaktadır. Kırmızı çamurun alüminyum üretim endüstrisinde önemli bir atık problemi haline gelmesi çamurun değerlendirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmasına neden olmuştur. Kırmızı çamurun farklı alanlarda kullanımı sayesinde çevre kirliliği azalabilir, depolama sorunu ortadan kaldırılabilir, alüminyum üretim maliyeti düşürülebilir ve metalurji sektörüne ekonomik katkı sağlanabilecektir. Bu çalışmada, Konya Eti Alüminyum firmasından temin edilen kırmızı çamur kullanılarak birkaç milimetre boyutlarında seramik küreler üretilmiş, üretilen bu seramik küreler epoksi reçine ile bir araya getirilerek kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Üretilen seramik-polimer kompozitlerin karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, proses koşullarının seramik küre üretiminde meydana getireceği değişimler de incelenmiştir. Seramik küreler üretilirken farklı damlatma yükseklikleri ( $h = 15, 13, 12, 8,5$  ve  $7$  cm) kullanılmış ve sonuçta en uygun damlatma yüksekliği  $8,5$  cm olarak belirlenmiştir. Ayrıca damlatma işlemi iki farklı çapta iğne kullanılarak, kalın olan için  $2,5$  mL/dk ve ince olan için ise  $0,5$  mL/dk besleme hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen seramik küreler  $1100^{\circ}\text{C}$  ve  $1200^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş ve taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde sinterleme sıcaklığının tane boyutu üzerinde çok önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Sinterleme  $1100^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirildiğinde mikroyapının nano,  $1200^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirildiğinde ise mikron metre boyutlarında tanelerden oluştuğu belirlenmiştir. Seramik küreler daha sonra takviye malzemesi olarak epoksi reçineye soğuk döküm şeklinde katılarak farklı formasyonlarda kompozit malzemeler üretilmiştir. Hazırlanan polimer-seramik kompozitlerin gama radyasyonu soğurma performansları incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kırmızı çamur, epoksi, polimer, partikül takviyeli, kompozit, gama radyasyonu.

## PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF RED MUD-EPOXY COMPOSITES

### SUMMARY

Nowadays, despite the gradual development of technology, waste materials are produced at different stages of production in production facilities and this leaves harmful effects on the environment. Evaluation of such wastes is more important especially for developing countries such as our country in terms of both the environment and the efficient use of limited resources. In this sense, red mud is on the agenda as an environmentally harmful waste. Red mud is an industrial solid waste with a complex structure that occurs during the alumina production process by the Bayer process. During the leaching process of bauxite mineral used in alumina production with caustic soda, one ton of alumina production process generally produces between one ton and one and a half ton of red mud. The fact that red mud has become an important waste problem in the aluminum production industry has led to many studies for the evaluation of sludge. With the use of red mud in different areas, environmental pollution can be reduced, the storage problem can be eliminated, the cost of aluminum production can be reduced and an economic contribution to the metallurgy sector will be provided. In this study, ceramic spheres with a size of a few millimeters were produced using red mud, which is a Bayer process waste and supplied from Konya Eti Aluminum company, composite materials were developed by adding epoxy resin to these ceramic spheres and their characterization was investigated. In addition, the effect of process conditions on the formation of ceramic spheres was also investigated. Different drop heights ( $h = 15, 13, 12, 8,5$  and  $7$  cm) were used when producing ceramic spheres, resulting in an optimal drop height of  $8,5$  cm. In addition, the dripping process was carried out using two different syringe tips with gray ( $2,5$  mL/min speed) and green ( $0,5$  mL/min speed) tips. As a result, it was observed that it did not have any effect on the formation of spheres, and production was continued with a gray-tipped needle, as it was possible to produce faster. The produced ceramic spheres were sintered at  $1100^{\circ}\text{C}$  and  $1200^{\circ}\text{C}$ , and microstructural examination with the help of SEM showed that the reinforcement particles were quite homogeneous and contained minimal porosity. Ceramic spheres were then added to the epoxy resin as a reinforcing material in the form of cold casting and composite materials in different formations were produced. Microstructural investigations of the produced samples were carried out with the help of SEM. Gamma radiation absorption performances of the samples were also investigated.

**Keywords:** Red mud, epoxy, polymer, particle reinforced, composite, gamma radiation

## 1. GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyıl dünyasının en önemli sorunlarının başında çevre kirliliği gelmektedir. Giderek artan teknoloji yarışında fabrikaların üretimleri artmakta ve aynı oranda bir çok atık madde meydana gelmektedir. Üretim aşamalarının bazı kısımlarında ortaya çıkan bu atık maddeler doğal olarak çevreye birtakım zararlar vermekte ve üretim yapan fabrikalara da bunların bertarafı konusunda sıkıntı çıkartmaktadır.

Üretilen atıkların değerlendirilmesi bu noktada önem kazanmaktadır. Yeryüzünde sınırsız kaynaklara sahip olmadığımız apaçık ortadadır. Kısıtlı olan bu kaynakların verimli bir şekilde kullanımı hem işgücü, sermaye ve ekonomik olarak Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler açısından hem de çevre sağlığı açısından çok fazla önem arz etmektedir.

Kırmızı çamur ise, çevreye olan zararı ve depolama anlamında sıkıntı yaratan bir madde durumunda olması nedeniyle bu anlamda günümüzde önemli bir atık problemi haline gelmekte, içerdiği bazı bileşikler ve bunların kazanımı noktasında değerlendirilmesi gerekmektedir.

Kırmızı çamur,  $Al_2O_3$  üretimi için kullanılan Bayer prosesi vasıtasıyla meydana gelen katı halde bulunan bir endüstriyel atıktır. Günümüz koşullarında alümina üretimini sağlayabilmek amacıyla boksit, kostik ile liç işlemine tabi tutulmakta ve bunun sonucunda yaklaşık olarak 1 ton alüminadan 1-1,5 ton kırmızı çamur meydana gelmektedir [1]. Günümüz alüminyum endüstrisinde başlangıç malzemesi olması sebebiyle önemli bir yere sahip olan alümina, yine bir çok endüstri alanında kendisine yer bulabilmektedir. Özellikle demir dışı metal üretiminde ön sıralarda yer almakta ve yüksek miktarda üretimi yapılmaktadır. Bu durum aynı zamanda açığa çıkan kırmızı çamur miktarını da etkilemektedir [2]. Yüksek alüminyum üretimi doğal olarak daha fazla kırmızı çamur atığını meydana getirdiğinden atığın bertaraf edilmesini ya da farklı şekillerde değerlendirilmesini zaruri bir hale sokmaktadır. Ancak bakıldığında,

bu yüksek miktardaki atığın farklı alanlarda değerlendirilmesi söz konusu olduğunda oran yalnızca %10 gibi bir değere tekabül etmektedir. [3].

Kırmızı çamur, içerisinde yüksek miktarda fakat bileşimi sabit olmayan %30-60 civarında  $Fe_2O_3$ , %5-20 civarında  $Al_2O_3$ , %1-20 civarında  $SiO_2$ , %1-10 civarında  $Na_2O$  ve en fazla %10 civarında  $TiO_2$  haricinde daha düşük miktarlarda da baryum, vanadyum, sodyum, mangan, potasyum, çinko, krom, ve nikel gibi safsızlıklar barındırmaktadır. Kırmızı çamur bünyesinde yer alan fazla miktardaki alkali içeriği maalesef toprağa ve yeraltı sularına karışarak yaşadığımız çevreye, ekosisteme ciddi zararlar vermektedir [4].

Ortaya çıkan bu atıkların bertaraf edilmesi, buna yönelik gerekli çalışmaların yapılması hem çevreye olan zararın azaltılmasına hem de kısıtlı miktardaki bu kaynakların daha verimli kullanımı adına ülkemiz ekonomisi ve ekolojisi için de önem arz etmektedir.

Kırmızı çamur gibi monolitik halde, başka bir deyişle kompozit yapıda olmayan malzemeler önemli avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Ancak bazı durumlarda bu malzemeler kullanılacak yere göre veya istenilen özelliklerin sağlanması gerektiğinde yeterli karakteristik özellikleri gösteremeyebilirler. Malzemelerin özelliklerini geliştirmek, çeşitli sınırlayıcı özelliklerini ortadan kaldırmak ve malzemelerin avantajlı yanlarını bir araya getirerek yeni malzemelerin üretilmesi yani kompozit bir malzeme haline getirilmesi ise günümüzde sık sık başvurulan bir yöntemdir.

## **1.1 Tezin Amacı**

Bu tezin amacı; Konya Eti Alüminyum firmasından temin edilen kırmızı çamur kullanılarak birkaç milimetre boyutlarında seramik küreler üreterek, bu seramik küreler ile seramik katkılı epoksi polimer matrisli kompozit malzemeler geliştirmek ve bunların karakterizasyon çalışmalarını yapmaktır. Böylece seramik ve polimer malzemelerin önemli avantajlarını bir arada kullanılabilecektir. Bu çerçevede, proses koşullarının seramik küre üretiminde meydana getireceği değişimler, bu seramik kürelere epoksi katılmasıyla ortaya çıkan kompozit yapıların karakterizasyon özellikleri irdelenecektir.

## 1.2 Hipotez

Bu çalışmada, Konya Eti Alüminyum firmasından temin edilen kırmızı çamur atığının seramik küreler haline getirilerek kompozit malzeme üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılabilmesi ve elde edilecek olan ürünlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin gelişeceği, böylece endüstriyel bir katı atığın, yeni bir yaklaşımla kompozit malzeme üretiminde kullanılmasıyla çevreye vereceği zararın azaltılmasının yanı sıra belirli bir katma değere sahip bir ürüne dönüştürülmesi ülkemiz adına da fayda sağlayacağı öngörülmüştür.

## 1.3 Boksit

Daha ekonomik olması sebebiyle günümüzde alüminyum üretimi boksit cevherinden karşılanmaktadır. Yoğunluğu  $2,5 - 3,5 \text{ g/cm}^3$ , mohs sertliği 1 - 3 arasında değişmekte olan boksit, ismini Fransa'nın güneyinde yer alan Arles yakınlarında bulunan Le Baux kasabasındaki maden yataklarından almaktadır. Boksit, sabit olmayan miktarlarda alüminyum hidroksit denilen  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  şeklinde gösterilen gibsit,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  şeklinde gösterilen böhmit,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  şeklinde gösterilen diasporit minerallerinin yanı sıra demir mineralleri olan pirit, siderit, manyetit, hematit, limonit ve çok az oranlarda çinko (Zn), krom (Cr), nikel (Ni), kobalt (Co), bor (B), magnezyum (Mg) gibi element ve organik maddeler içermektedir [5]. Boksit cevherine ait görsel Şekil 1.1'de sunulmaktadır.



Şekil 1.1 : Boksit cevheri.

Genel bir yüzdeyle ifade edildiğinde boksit, en az %40 civarında  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %10–30 demir mineralleri ve en fazla %15 oranında  $\text{SiO}_2$  içermektedir. Demir mineralleri içerisindeki demir oksitten dolayı boksit renkli bir yapıdadır. Minerallerin cinsine ve miktarına

göre farklı renkler alabilir. Hematit kırmızı renk verirken, ilmenit sarı renk vermektedir. Ayrıca kahverengi, gri ve açık beyaz gibi renkler de alabilir. Boksitlerin kimyasal bileşimi sabit olmadığından ana bileşen ağırlıklarının yüzde aralığı şeklinde belirtilir (Çizelge 1.1) [6,7].

**Çizelge 1.1 :** Boksit ait kimyasal bileşim oranları.

İçerik	Miktar (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38 – 65
H <sub>2</sub> O	10 – 34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 – 30
SiO <sub>2</sub>	0,5 – 12
TiO <sub>2</sub>	0,5 – 8

Boksit cevherinin sınıflandırılmasında belli başlı kriterler mevcuttur. Boksitler, mineralojik yapı, oluşum şekli ve endüstriyel olarak üç ana grupta sınıflandırılır. Mineralojik yapısına göre gibsit minerali içerenler gibsitik (trihidratik), böhmitik (monohidratik) ve diyasporitik (monohidratik) boksitler şeklinde sınıflandırılır. Örnek olarak gibsit minerali içeren boksit cevheri gibsitik boksit cevheri olarak adlandırılır. Oluşum şekline göre boksitler lateritik ve karstik boksit olarak şeklinde iki farklı kategoride değerlendirilirler. Alüminyum bakımından zengin silikat kayaçların deforme olması sonucunda lateritik denilen boksitler oluşurken, karstikler dolomit veya kireçtaşının karstik boşluklarında oluşmaktadır [8]. Endüstriyel olarak yapılan sınıflandırmada ise silis modülüne (% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / % SiO<sub>2</sub>) ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörüne göre yapılan sınıflandırma daha çok tercih edilmektedir. Silis modülünün ekonomik açıdan 7'den büyük olması gerekmektedir. Çizelge 1.2'de silis modülüne ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörüne göre yapılan sınıflandırma görülmektedir [9].

**Çizelge 1.2 :** Boksitin silis modülüne ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörüne göre sınıflandırılması.

Silis modülüne göre yapılan sınıflandırma	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub> (% 20)	Yüksek alüminaya sahip cevher
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub> (% 10-20)	Alümina sahip cevher
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub> = (% 4-10)	Endüstriyel cevher (silisli)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub> (% 4)	Yüksek silis içeren cevher
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tenörüne göre sınıflandırma	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% 25)	Çok demirli cevher
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% 10-25)	Demirli cevher
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% 10)	Az demir içeren cevher

## 1.4 Alümina

Genellikle alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) olarak bilinen alüminaya çok farklı kristal şekillerde rastlamak mümkündür. Doğada bulunan hali korendon, sentetik halde olanı ise alüminyum oksit olarak bilinmektedir. İki farklı kristal yapıya sahiptir. Alüminyum hidroksitin ( $Al(OH)_3$ )  $500^\circ C$ 'ye kadar kalsine edilmesi sonucunda  $\gamma-Al_2O_3$  ve  $1000^\circ C$ 'ye kadar kalsine edilmesiyle  $\alpha-Al_2O_3$  oluşur. [10].  $\alpha-Al_2O_3$ , hegzagonal kristal yapıya ve  $4-4,1 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığa sahiptir. Sahip olduğu 9 mohs sertliği elmadan sonraki en sert mineral olmasını sağlamaktadır. Diğer kristal yapı olan  $\gamma-Al_2O_3$  ise ortorombik kristal yapıya sahip, 8 mohs sertlikte ve  $3.6 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlıktadır. Ayrıca daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında  $\alpha-Al_2O_3$ 'e dönüşmektedir [11].

### 1.4.1 Gibsit

Sertlik bakımından 2,5–3,5 mohs aralığında ve özgül ağırlık bakımından 2,3–3,4 aralığında değerlere sahip olan gibsit, bünyesinde bolca alüminyum bulunduran minerallerin (korund, feldispat, nefelin) bozunmaları halinde ortaya çıkan bir boksit cevheridir [12].

### 1.4.2 Böhmit

Böhmit, birçok boksit yatağında değişik miktarlarda bulunan başlıca minerallerinden biridir.  $3,0-3,2 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığa ve 3,5-5,0 mohs sertliğe sahip  $\gamma-Al_2O_3.H_2O$  bileşiminde bir  $\gamma$ -alumina monohidrattır. Böhmit ortorombik kristal bir yapıya sahiptir. Kırmızı kahverengiden grimsi kahverengiye kadar farklı birçok renkte görülmektedir [13].

### 1.4.3 Diasporit

Ortorombik kristallerden meydana gelen ve 6,5-7 mohs aralığında sertliğe sahip bir mineraldir.  $\alpha - Al_2O_3.H_2O$  yapısına sahip diasporit, böhmit ile benzer kimyasal formüle sahip ancak farklı kristal yapıdadır [13].

## 1.5 Boksitten Alümina Üretimi

Alümina üretimine yönelik olarak kullanılan olan yöntemleri dört başlık altında toplamak mümkündür.

### 1.5.1 Asidik yöntemler

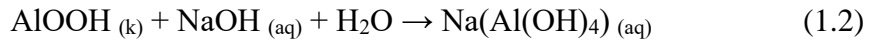
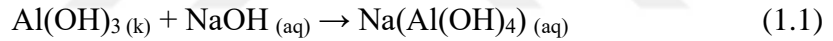
Yöntem sonucunda elde edilen alüminanın saf olmaması, cihazların pahalı olması ve kullanılmış olan asidin geri kazanımındaki zorluklar nedeniyle pek ekonomik bir yöntem değildir [14].

### 1.5.2 Elektro-termik yöntemler

Yapılan üretim sonucunda ortaya çıkan alümina istenilen saflıkta değildir. Bu sebeple kendine çok fazla uygulama alanı bulamamıştır. Ayrıca yöntem çok fazla elektrik tüketimine gereksinim duymaktadır [14].

### 1.5.3 Bazik yöntemler

Alümina üretiminde genellikle tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemde boksitteki mineraller cinsine göre ısı (150-250°C) ve basınç (10-30 atm) altında farklı NaOH derişimlerinde (bu derişimler Na<sub>2</sub>O cinsinden verilmektedir) reaksiyona tabi tutulur. Gibsit kolay çözünürken, böhmit ve disaporit zor çözünür. Cevherdeki alüminyum, aşağıdaki reaksiyonlarına (1.1 ve 1.2) göre sodyum alüminat şeklinde çözeltilmeye alınır [9,14].



Bazik çözeltiliyle reaksiyona vermeyen cevher bünyesindeki demir oksit, titanyum oksit ve kalsiyum oksitler kalıntı oluşumuna sebebiyet verirken, silika kısmi bir reaksiyonla sodyum alüminyum silikat oluşumunu sağlar. Günümüzde düşük miktarda silika içeren cevherler için Bayer prosesi tercih edilirken, yüksek miktarda içerenler için Deville - Pechiney Prosesi tercih edilmektedir. Cevherdeki silikaya göre belli miktarda alümina ve alkali kaybı yaşandığından bazik yöntem kullanıldığı takdirde cevherdeki silis modülü (M<sub>Si</sub>) yani Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün SiO<sub>2</sub>'ye yüzdece oranı ön plana çıkmaktadır [9].

### 1.5.4 Kombine prosesi

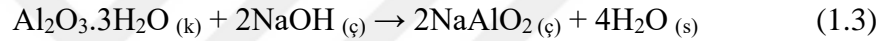
Bu yöntem ise Bayer Prosesi ve Spekani (Sinter) Prosesinin beraber kullanıldığı bir prosestir [14].

Kırmızı çamur, alümina üretimi amacıyla Bayern prosesiyle üretim yapıldığı esnada meydana gelen karmaşık yapılı katı bir atıktır. Bu proses sırasında kullanılan boksitin

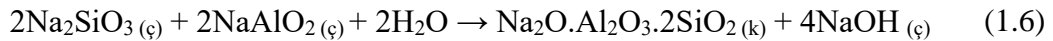
%35-40 civarındaki kısmı kırmızı çamur olarak atığa dönüşmektedir. Daha sonra bu atık, yıkama işlemine tabi tutularak atıkların biriktirildiği alanlara ya da barajlara pompalanmaktadır [9].

## 1.6 Bayer Prosesi

Proses, 1887 yılında ismini aldığı Karl J. Bayer tarafından hayata geçirilmiş bir prosestir. Bayer prosesinde öncelikle yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle boksit ve sodyum hidroksit tepkimeye sokulur. Daha sonra bünyedeki alüminyumun çözeltiye alınması ve sıcakta belli bir süre daha tutulmasıyla çözeltinin desilikasyonu işlemi yapılır. Cevherdeki alüminyum ve silisyum bu şekilde çözeltiye alınmış olur. Bu duruma ait kimyasal tepkimeler (1.3), (1.4), (1.5) ve (1.6)' da sırasıyla verilmektedir [11,15].



Bu çözündürme reaksiyonlarından neticesinde istenmeyen (1.6) reaksiyonu oluşmakta ve nihai durumda sodyum alüminyum silikat ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) denilen silisyum ve az miktarda çözünmüş alüminyumun birlikte çöktüğü durum oluşmaktadır. Böylece cevherdeki alüminyum sodyum alüminyum silikatla beraber atığa gitmektedir [11].



Prosesi neticesinde çözünmeyen ve çözüldüğüden ayrılmış olan sodyum alüminyum silikatlar dışında demir ve titan oksit gibi diğer bileşenler de mevcuttur. Ayrıca besleme yapılan boksit yapısına göre çok daha düşük oranlarda kalsiyum, magnezyum, galyum, zirkonyum v.b. elementleri de içerir. Atık içerisindeki mevcut demir oksit nedeniyle aldığı kırmızı renk sebebiyle kırmızı çamur olarak adlandırılır [15].

1 ton alümina üretmek için cevher kalitesinin de etkisine göre yaklaşık 1,9-3,6 ton boksit kullanılmakta ve üretilen bu 1 ton alümina yahut 0,5 ton alüminyum sonucunda 1 ton civarında kuru halde kırmızı çamur oluşmaktadır [6]. Proses ise olarak altı bölümden oluşmaktadır.

### **1.6.1 Boksit hazırlama**

Boksit hazırlama bölümü, boksitin proseste işlenebilmesi adına silis modülünün 7 veya 8 civarına ayarlandığı kısımdır. Boksit cevheri öncelikle bir elek yardımıyla büyük taş ve safsızlıklardan giderilir. Kırıcılarda 25 mm'den daha ufak hale getirildikten sonra, değirmene beslenerek yaş bir şekilde öğütmeye tabi tutulur ve pulp (boksit özü) meydana getirilir. Boksit, değirmendeki buharlaştırma kısmından gelen kuvvetli çözelti ve dışarıdan ilave NaOH ile birlikte öğütülür [7,16].

### **1.6.2 Otoklav ve kırmızı çamur bölümü**

NaOH çözeltisi ve boksit pulpu, 105°C'de 5-6 saat süreyle silisin yaratmış olduğu zararlı etkileri minimize etmek için desilikasyon işlemi yani silissizleştirme yapılır. Boksit pulpu ön ısıtıcılar ile ısıtıldıktan sonra otoklavda ısı (235°C) ve basınç (36 atm) altında reaksiyona girmesi sağlanarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sıvı fazda elde edilir. Kırmızı çamur gibi çözünmeyen bileşikler çöktürme işlemi yapılarak düzgün bir NaAlO<sub>2</sub> (sodyum alüminat) çözeltisi elde edilir. Ardından kırmızı çamur yıkanarak gerekli baraj v.s. pompalanır [6,16,17,18].

### **1.6.3 Dekompozisyon ve hidrat bölümü**

Bu kısımda, sodyum alüminat çözeltisi [Al(OH)<sub>3</sub>] ile yani aşılama hidratıyla karıştırılır, oradan dekompozörlere geçer ve yapılan hidroliz işlemi sonucunda alüminyum hidroksit kristalleri elde edilir. Yapılan yıkama-filtreleme işlemi sonrası kurutularak kristilizasyon sonrasında meydana gelen çözelti buharlaştırma kısmına gönderilir [16,17].

### **1.6.4 Buharlaştırma bölümü**

Zayıf çözeltinin buharlaştırma işlemine tabi tutulması neticesinde NaOH konsantrasyonunun artmasıyla kuvvetli çözeltinin elde edildiği bölümdür. Proseste mevcut safsızlıkların durumu takip edilerek gerekli durumlarda çözeltideki safsızlıklar çöktürülerek prosesten uzaklaştırılır. Kuvvetli çözelti daha sonra boksitin yaş öğütmesi amacıyla kullanımı için yine boksit hazırlama bölümüne yollanır [5].

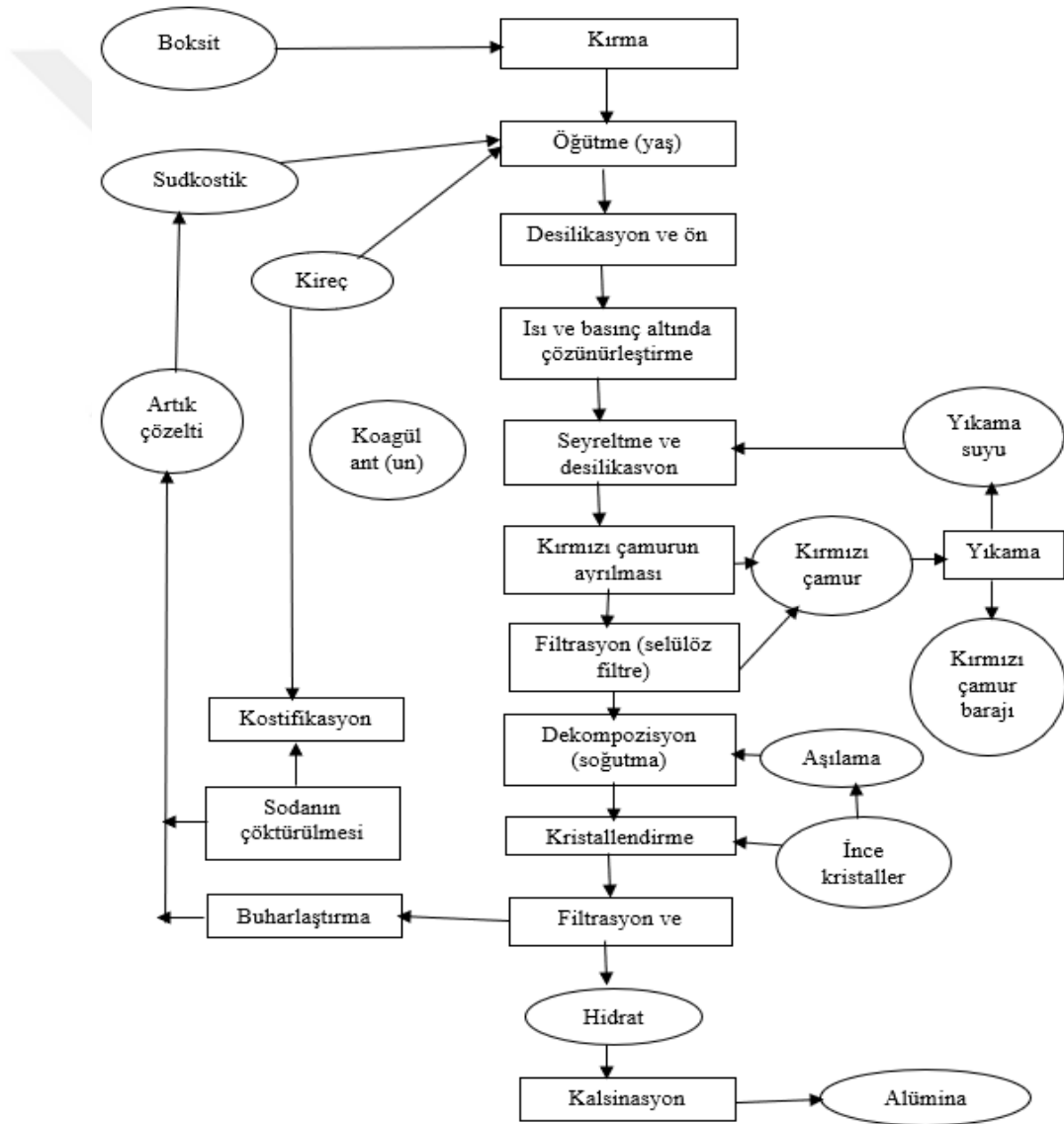
### **1.6.5 Kalsinasyon bölümü**

Burada, dekompozisyon bölümünden gelen hidrat ürünlerinin büyük olan kristalleri yıkanır ve hidrata kalsinasyon işlemi uygulanır. Böylece bünyesindeki fiziksel ve

kimyasal su uçurulmuş olur. Kalsinasyon işlemi neticesinde 1000°C’de fırından ayrılan kalsine alümina, döner soğutucuların yardımıyla sıcaklığı azaltılarak pnömatik pompalar sayesinde alümina depolarına gönderilir [5,17].

### 1.6.6 Kurutma ve öğütme bölümü

Dekompozisyon-hidrat kısmından gelen ıslak haldeki hidrat bu bölümde kurutularak bünyesindeki nemden kurtarılır. Kurutma sonrasında oluşan bu kuru hidrat, tane boyutu küçültülmek isteniyorsa besleme silosuna, satılmak isteniyorsa da torbalama silolarına gönderilir [5]. Bayer prosesinin çalışma prensibi Şekil 1.2 yardımıyla akım şeması şeklinde aşağıda sunulmaktadır [19].



Şekil 1.2 : Bayer prosesine ait akım şeması.

## 2. KIRMIZI ÇAMUR

Kırmızı çamur (Şekil 2.1), koyu kırmızı-kahve bir renge sahip, bünyesinde silisyum, demir, titanyum ve bazı diğer bileşikler barındıran bir bileşimdir. Bayer Prosesi ile boksitten alümina eldesi esnasında ortaya çıkan ve işe yaramayan kısım olarak nitelendirilen bir atıktır. Literatürde ise, yaygın bir şekilde 'red mud' olarak bilinmektedir. Kırmızı çamurun ekonomik bir şekilde işlenmesi konusunda çeşitli metotlar geliştirilmiş olmasına rağmen net bir çözüm bulunamamıştır. Bayer prosesi atığı olan kırmızı çamur hem sebep olduğu çevresel sıkıntılar (mikron boyutlu ve alkali partiküller içermesi) hem de değerlendirilmesi konusunda net bir çözüm bulunamamış olması sebebiyle faydasız bir atık olarak anılmaktadır. Bu nedenle depolanma sıkıntıları yaratmaktadır. Fabrikalar genellikle kırmızı çamurları baraj olarak isimlendirdikleri alanlarda depolamakta, fakat bu konuda belli depolama standartları olmaması nedeniyle çevresel sıkıntılar meydana gelmektedir [18,20,21].



Şekil 2.1 : Kırmızı çamur.

### 2.1 Kırmızı Çamurun Fiziksel-Kimyasal Özellikleri

Sahip olduğu farklı boksit çeşidi ve çözündürmenin farklı şartlar altında gerçekleşmiş olması kırmızı çamurun kimyasal ve mineralojik bileşimini değiştirmektedir [20].

### 2.1.1 Kimyasal bileşimi

Boksit bünyesindeki mevcut alüminanın yaklaşık olarak %75-90'ı çözünürlüştürme işlemi esnasında alüminat çözeltisinde sıvı faz kısmına geçirilir [20]. Bayer prosesi neticesinde çözünmeyen sodyum alüminyum silikatlar (çözeltiden ayrılan) yanında, demir oksit ve titan oksitler de bulunur. Kırmızı çamur içerisinde sabit olmayan yüzdelerde  $Fe_2O_3$  (%30-60),  $Al_2O_3$  (%5-20),  $CaO$  (%2-8),  $SiO_2$  (%1-20),  $Na_2O$  (%1-10) ve  $TiO_2$  (%0,1-10) gib bileşikler barındırırken bunların yanında çok düşük miktarlarda vanadyum, kurşun, magnezyum, çinko, zirkonyum, bakır, mangan, galyum, nikel, uranyum, toryum, krom v.b. nadir toprak elementlerini de muhafaza etmektedir [22]. Boksit artığındaki Na ve Ca'nın ana bileşende bulunuyor olması, artığa çeşitli işlemler sonucu dışarıdan eklenmesiyle meydana gelmektedir [7]. Çizelge 2.1'de kırmızı çamurda bulunan kimyasal maddeler ve mineraller verilmektedir [23].

**Çizelge 2.1 : Kırmızı çamur bünyesindeki mineraller ve gösterilişi.**

Bileşen	Mineralojik İsmi	Gösteriliş
$Al_2O_3$	Gipsit	$(Al_2O_3 \cdot 3H_2O)$
	Böhmit	$AlOOH (\beta-Al_2O_3 \cdot H_2O)$
	Diosporit	$\alpha-Al_2O_3 \cdot H_2O$
	Alumogötit	Fe/AlOOH
	Sodalit	$NAS, 3(Na_2O \cdot Al_2O_5 \cdot 2SiO_2) \cdot Na_2X_n \cdot H_2O$
	Kalsiyum alüminyum silikat	CAS
Tri-kalsiyum alüminyum silikat	$3CaO \cdot Al_2O_5 \cdot 6H_2O$	
$Fe_2O_3$	Hematit	$Fe_2O_3$
	Götit	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$
	Manyetik	$Fe_3O_4$
	Pirit	$FeS_2$
	Markazit	$FeS$
$SiO_2$	Kuartz	$SiO_2$
	Sodalitler	NAS
	Kalsiyum alüminyum silikatlar	CAS

**Çizelge 2.1 (devam) : Kırmızı çamur bünyesindeki mineraller ve gösterilişi.**

Bileşen	Mineralojik İsmi	Gösteriliş
TiO <sub>2</sub>	Sodyum titanat	Na <sub>2</sub> OTiO <sub>2</sub>
	Kalsiyum titanat	CaOTiO <sub>2</sub>
	Sodyum metatitanat	NaHTiO <sub>3</sub>
Na <sub>2</sub> O	Sodalit	NAS
	Sodyum titanat	Na <sub>2</sub> O.TiO <sub>2</sub>
	Diğer sodyum tuzları	
MgO	Magnezyum alüminyum silikat	MAS
	Magnezum hidroksitler	Mg(OH) <sub>2</sub>
	Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
	Manyezit	MgCO <sub>3</sub>
CaO	Tri-kalsiyum alüminat	3CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O
	Kalsiyum titanat	CaOTiO <sub>2</sub>
	Fosforit	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
	Florit	CaF <sub>2</sub>
	Kalsiyum meta vanadat	Ca(VO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
	Kalsiyum alüminyum silikatlar	CAS
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Apatit	Ca <sub>5</sub> [(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F]
	Kalsiyum metavanadat	Ca(VO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>

### 2.1.2 Mineralojik bileşimi

Mineralojik bileşim, kısmi olarak boksitin değişmeyen fazlarından, kısmen de proses teknolojinine bağlı olarak elde edilir. Boksit kaynağından gelen bileşikler (kaolin, gipsit, kalsiyum ferrit, hematit, gipsit gibi) ve proses sırasında oluşan bileşikler çamuru oluştururlar. Boksitte yer almayan tipik kırmızı çamur fazları üç grupta yer almaktadır. Minerallerin reaksiyonları sonucu meydana gelen gazlara en iyi örnek, silisin alüminat çözültisi ile yapmış olduğu reaksiyondur (NAS Fazları). Burada sıcaklık, kostiğin konsantrasyon miktarı, reaksiyon zamanı ve çözültideki mevcut safsızlıklar gibi bir farklı parametrelerin varlığı sodyum alüminyum silikatın değişen bir çok farklı

kompozisyonda meydana gelmesine sebep olur . Boksitte yer almayan bu üç grup ise şöyledir [6,14]:

- A-NAS fazları:  $3(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) \cdot \text{Na}_2\text{X}$  ( $\text{X}=\text{CO}_3^{2-}, 2\text{OH}^-, \text{SO}_4^{2-}, 2\text{Cl}^-$ )
- 2-CAS-CFS fazları:  $3\text{CaO} \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_x \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x} \cdot k\text{SiO}_2 \cdot (6-2k) \text{H}_2\text{O}$
- 3-NT-CT fazları:  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , kassit perovskit, portlandit

Boksitlerde çoğunlukla demir bileşenleri, bayer çözeltisinde katı fazdadır. Götit formuna sahip olan demir bileşeni ise çoğunlukla kırmızı çamurun bazı işlemlerine (filtrasyon ve çökme gibi) olumsuz etki göstermektedir. Her ne kadar yatırım ve işletme maliyetlerine olumsuz etki etse de çöktürücüler, yıkayıcılar, filtreler gibi kırmızı çamur işleme teçhizatları hematit tipi olanlara göre daha büyük olmalıdır. Bu durum çözünürleştirme işleminde CaO, sülfat ve klorür gibi katkı maddelerinin ilavesini gerektirir. Kontrol edilen şartlarda nihayetinde götit hematit haline dönüşerek çökme ve filtrasyondaki bu olumsuz durum giderilir [17,24].

## 2.2 Kırmızı Çamurun Çevreye Etkisi ve Berterafı

Alümina üretimi sonucunda meydana gelen kırmızı çamur, farklı birçok alanda kullanılmasına rağmen sahip olduğu bazı özellikler (kokusu, yüksek toksisite, yüksek pH, ağır metal ve asidik-bazik bileşik içermesi gibi) nedeniyle her yerde ve kolayca depolanamıyor olması depolanma sıkıntılarını ortaya çıkarmakta bu da çeşitli çevresel zararlara ya da felaketlere yol açabilmektedir. Kolloidal bir yapıya sahip olmasından dolayı bol miktarda su içermektedir. Bu durum kırmızı çamuru yer altı sularına karıştırdığında alkali içeriğinden dolayı tehlikeli bir hale getirmektedir. Genellikle gölet benzeri barajlarda depolanan kırmızı çamur, rüzgâr, yağmur veya çeşitli doğa olaylarının nedeniyle, çevreye taşınmaktadır. Çeşitli nedenlerle kurumuş olan tozlar rüzgârda uçarak havayı kirletmekte ve alkali içeriği sorununu büyütmektedir. İçermiş olduğu zararlı kimyasallar nedeniyle soluma yoluyla vücuda alınabilmekte bu da solunum yolunda bir çok hastalığa, daha yoğun miktarlarda maruz kalınması durumunda ise kanser v.b. ciddi hasatalıklara yol açmaktadır. Rüzgarla birlikte oluşan bu durum için yapılması gereken boş alanları yeşillendirmek ya da sulama işlemi yapmaktır [16,19,20]. Ayrıca gölet benzeri depolamanın haricinde kırmızı çamur uygun bir şekilde deniz altında depolanmakta ya da karada geçirgen olmayan bir alanda havuzlamaktadır [20].

Sızıntı, taşkın veya yağışlarla yoluyla kırmızı çamur partikülleri başka yerlere taşınabilmekte, sadece olduğu yere değil farklı bir çok yere zarar verebilmektedir. Toprağa karışması durumunda ise, tarımsal bölgelere zarar vermekte, bu bölgelerin verimini azaltmakta hatta bazı durumlarda üretime engel olmaktadır [16].

Her ne kadar doğal sızdırmaz alanlarda depolanmış olduğu durumlar olsa da, yılın belirli dönemlerinde yeraltı kuyularından numuneler alınarak pH, sodyum, kalsiyum, klorit içerikleri incelenerek sızdırma olup olmadığını kontrol edilmesi gerekmektedir [6].

Tüm bunlar göz önüne alındığında kırmızı çamurun depolanacağı yerde önceden gerekli önlemler alınmalı, ona göre alt yapı çalışmaları yapılmalıdır. Sadece önlem almak ve gerekli alt yapı çalışmalarını yapmak tek başına yetmeyeceği için sonrasında periyodik olarak kontroller yapılmalıdır. Böylece sonradan oluşabilecek afet, kaza ya da çevresel felaketlerin önüne geçmek mümkün olacak ve muhtemel riskler en aza indirilebilecektir. Ayrıca kırmızı çamurun içerdiği değerli bileşik ve metaller sebebiyle, sınırlı olan kaynakların verimli kullanımı açısından geri kazanımı değerlendirilmelidir.

### **2.3 Kırmızı Çamurun Değerlendirilmesi**

Kırmızı çamur, alüminyum üretiminde önemli bir atık sorunu haline gelmesi değerlendirilmesi amacıyla üzerinde birçok araştırma ve çalışma yapılmasına neden olmuştur. Yapılan bu çalışmalar neticesinde çamurun değerlendirilmesi ile çevre kirliliği ve depolama gibi sorunlara çözüm üretilecek, kaynakların daha verimli kullanılması sağlanarak alüminyum üretim maliyetleri düşürülebilir ve metalurji sektörüne de bu sayede ekonomik katkı sağlanabilecektir [13].

Kırmızı çamurun değerlendirilmesi amacıyla yapılan çalışmalar genel olarak;

- Bünyesindeki birden çok bileşenin kullanıldığı,
- Bünyesindeki sadece tek bir bileşenin kullanıldığı,
- Birbirinden farklı bir çok alanda kullanıldığı,
- Susuzlandırılması ve çevreye verdiği zararın azaltılması amacıyla kullanıldığı çalışmalar şeklinde gruplanmaktadır [15].

Kırmızı çamurun değerlendirilmesi amacıyla tuğla, çimento, beton, seramik gibi yapı malzemeleri üretimi ve zemin iyileştirmeleri amacıyla inşaat sektöründe, sıcak gazlar yardımıyla H<sub>2</sub>S absorplamak amacıyla kimya endüstrisinde, dolgu malzemesi kullanımıyla kauçuk-plastik endüstrisinde, renkli cam üretiminde, flokülant şeklinde bazı su uygulamalarında, iyileştirme amacıyla toprak-maden endüstrisinde kullanılmaktadır. Ancak bu uygulamaların birçoğu sudan arındırma ya da kurutma gibi ek masraflar içeriyor olması nedeniyle ekonomik anlamda yeterli değildir [25,26].

Kırmızı çamur, içerdiği değerli metaller sebebiyle: demir ve alkalinin geri kazanımı, TiO<sub>2</sub> ve az miktarlardaki diğer bileşenlerin geri kazanımı gibi uygulama alanlarında da kendine yer bulmaktadır. Günümüzde kırmızı çamurun kullanımıyla ilgili önem kazanan çözümlerden birisi, kırmızı çamurun sinter-izabe işlemleri kullanılarak saf demir haline indirgenmesiyle demirin geri kazanılması, izabe işlemi esnasında uranyum, nadir toprak elementleri, toryum, cürufa geçmiş alümina, sodyum ve titan oksiti farklı bazı yöntemler vasıtasıyla elde edilmesidir. Bunlar alındıktan sonra ise cüruf liç artığı farklı bazı alanlarda (çimento ve gübre gibi) kendine yer bulmaktadır [13].

Kırmızı çamurdan özellikle demir ve alüminyum gibi değerlerin kazanımı amacıyla kullanılmakta olan yöntemler (karbon-kireç-soda sinter işlemi ve kok-kireç taşı elektrik ark izabesi) çok maliyetli olmaları, yüksek enerji tüketimi gibi sebepler nedeniyle ekonomik olmamakta ve dezavantaj yaratmaktadır [13]. Kırmızı çamurun içermekte olduğu demir tenörü, demir yataklarının içerdiği tenörden (%50) daha düşük seviyede olması ve proseslerin sahip oldukları dezavantajlar sebebiyle kırmızı çamur bünyesindeki demir bileşeninin eldesi yönündeki çalışmalar günümüz için pek de ekonomik değildir. Ancak çok ihtiyaç duyulması halinde alternatif olarak düşünülebilir [25,15].

Bunun yanı sıra hem ince bir yapıya sahip olması hem de yıllık birikim miktarının avantajlı olması nedeniyle inşaat sektöründe çimento alanında filler malzemesi olarak, beton üretiminde agrega olarak değerlendirilmesiyle sağlayacağı maliyet avantajı ve hammadde tasarrufu öne sürülmektedir. Kırmızı çamurun birçok farklı sektörde kullanım imkanlarının belirlenmesi amacıyla yapılan araştırma ve çalışmalar ülkemiz bünyesinde daha çok seramik ve tuğla endüstrisi etrafında şekillenmektedir [6,25].

## 2.4 Kırmızı Çamurun Radyasyon Kalkanlamada Değerlendirilmesi

### 2.4.1 Radyasyon kalkanlama

Günümüz koşullarında insanlar artık ömürleri boyunca radyasyonla içli dışlı bir yaşam sürmektedirler. Bu durum radyasyon kaynaklarından kurtulmadıkça devam edecektir. XIX. yüzyılın sonu XX. yüzyılın başlarında keşfedilen X-ışını ve radyoaktivite nedeniyle endüstriyel gelişmeler paralelinde her geçen gün kullanımı artmış ve artık insan hayatının önemli bir parçası haline gelmiştir.

Radyasyon, kısaca doğal ya da yapay haldeki radyoaktif çekirdeklerin kararlı hale gelebilmek amacıyla dışarıya yaydıkları hızlı parçacık ve elektromanyetik dalga şeklindeki fazla enerjiler şeklinde tanımlanmaktadır. Radyasyonu iki kısımda incelemek mümkündür. Bunlar parçacık ve dalga tipi şeklindedir. Çok hızlı, belli bir kütle ve enerjiye sahip olan parçacıklar isminden de anlaşılacağı üzere parçacık tipi radyasyonu temsil ederken, herhangi bir kütle ve enerjiye sahip olmayan, belli bir enerjiye sahip ve titreşim yaparak manyetik dalgalara benzer olanlar ise dalga tipi radyasyonu temsil etmektedir. Dalga ve parçacık radyasyonları da kendi aralarında iyonlaştırıcı olan ve olmayan şeklinde ikiye ayrılırlar. İyonlaştırıcı olanlar, bir maddeye çarptıklarında iyon (yükü) parçacıkları oluştururken, etkileşimde buldukları herhangi bir madde ya da canlı gibi yerlerde meydana gelebilir [27]. İyonlaştırıcı radyasyon yüksek enerjili olması sebebiyle etkileştiği atomdan bir elektron kopararak bu atomu iyonlaştırabilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun enerjisi elektronların bağlanma enerjisinden daha düşük olduğundan atomdan elektron koparamaz, sadece uyarılmaya neden olur. İyonlaştırıcı radyasyon alfa, beta ışınları gibi parçacık veya gama ışınları gibi dalga karakterli olabilmekte iken, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon genellikle elektromanyetik dalga şeklindedir [28].

Alfa ve beta parçacıkları parçacık karakterli iyonlaştırıcı radyasyon türlerinden olduklarından sahip oldukları yük ve kütleleri sayesinde madde ile etkileşime girerek enerjilerini hızla kaybederler. Bu durumda serbest ulaşma uzaklıkları az ve birim mesafede oluşan iyon çifti fazladır. Gama ve X-ışınları ise dalga karakterli iyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyonlardır. Yüksüz ve kütesiz olmaları serbest ulaşma uzaklıklarının fazla olmasını yani madde içinde ilerleme oranının yüksek olmasını sağlarken birim mesafede oluşturulan iyon çifti sayısının ise az olmasına neden olmaktadır.

Kararsız haldeki bir atom çekirdeği kararlı hale gelebilmek amacıyla bozunmaya uğrayarak parçacık ya da dalga salımı yaparak veya parçacıkları birbirine dönüştürerek kararlı hale gelmeye çalışır ve böylece en düşük enerjili hale gelir. Bunun için de bir veya birden çok hatta zincir halinde bozunumlar yaparak kararsız olma nedenine bağlı olarak farklı tip ve enerjiye sahip ışınlar (alfa, beta, gama) yapar [28].

Çekirdek içerisindeki proton sayısının nötron sayısına kıyasla fazla olması, çekirdeği kararsız hale getirmekte ve bu durumda alfa parçacığı yayımlamakta yani alfa ( $\alpha$ ) ışınması yapmaktadır. Böylece çekirdek, iki nötron ve iki proton kaybederken, alfa ışınımı sonrasında atom numarası iki, kütle numarası ise dört azalmaktadır. Beta ( $\beta$ ) ışınması, radyoaktif çekirdek içinde parçacık sayılarının dengede olmaması durumunda, bir proton veya bir nötronun, sırasıyla nötron veya protona dönüşmesi ya da çekirdeğin elektron yakalaması olayı durumunda gerçekleşen ışınmadır [29]. Gama ( $\gamma$ ) ışınları ise, alfa ve beta ışınlarına göre en yüksek frekans ve en düşük dalga boyuna sahiptir. Bu sebeple alfa ve beta parçacıklarına göre maddelere nüfus edebilme yetenekleri daha yüksek fakat iyonlaştırma etkileri ise azdır. Sahip oldukları enerji düzeyi sebebiyle hücrelere önemli derecede zarar vermekte, iyonize etme gücünün düşüklüğü nedeniyle de kalın cisimlerden kolay geçebilmektedir [30]. Çekirdek  $\alpha$ ,  $\beta$  bozunumları veya elektron yakalama olayının hemen ardından bünyesinde var olan fazla enerjiyi elektromanyetik radyasyon halinde yayarak kararlı duruma geçer. Yayılan bu elektromanyetik radyasyona da  $\gamma$  ışını denir.

Radyasyon teknolojisi, kullanıldığı birçok alanda hayatı kolaylaştırmasının yanında sağlık problemlerine de yol açmaktadır. Radyasyondan korunmanın en temel ilkesi, maruz kalınacak olan radyasyon miktarını minimum seviyeye düşürmektir. Mümkün olan en az seviyede radyasyona maruz kalma prensibini göz önüne alarak radyasyonla çalışmak gereklidir. Bu sebeple radyasyonun neden olduğu zararlardan korunmada radyasyonun kaynağına olan mesafe, maruz kalma süresi ve zırlama gibi önemli üç temel faktör vardır.

Korunmada ilk faktör ters kare kanununun temel alındığı uzaklıktır faktörüdür. Bu kanuna göre radyasyonun, uzaklığın karesine ters orantılı bir şekilde bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin; radyasyon kaynağından 100 cm ve 10 cm uzaklıktaki iki radyasyon şiddetleri karşılaştırılırsa 100 cm uzaklıktaki 10 cm olana göre 100 kat daha az olacaktır. Böylece radyasyon kaynağından maksimum seviyede uzakta durmak ve çalışmak alınan zararı en aza indirecektir. Bu durum radyasyondan korunmada en temel

ilkedir. Radyasyon ortamında çalışırken, gereksiz yere radyasyona maruz kalmamak için çalışma süresi çalışmaya başlamadan önce iyi bir şekilde planlanmalı ve mümkün olan en düşük seviyede ayarlanmalıdır [27].

Zararlı etkilerinden korunmak için diğer bir yol da radyasyon kaynağının uygun bir malzeme ile zırhlanmasıdır. Yaygın olarak kullanılan zırh malzemeleri olan kurşun ve beton esaslı malzemelerin yüksek toksisite (kurşun) ve yoğunluk, düşük elastikiyet gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu sebeple kullanım alanları sınırlı kalmakta veya kullanım zorlukları yaşanmaktadır. Ancak, AB'nin zararlı maddelerin kullanımına yönelik bazı kısıtlamaları arasında kurşunun da yer alıyor olması sebebiyle kullanımının giderek azaltılıyor olması önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Kurşunun yanı sıra gerek nötron gerekse gama ışınları zırhlanmasında beton kullanımı da yaygın olup, betonun zırhlama amaçlı olarak (ferrofosfor, ilmenit, barit vb. eklenmesiyle) daha etkin kullanımıyla ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Beton ucuz, kolay şekil verilebilir ve iyi bir zırhlama özelliğine sahip olmasına rağmen ağırlığı ve esnek olmaması nedeniyle kullanım alanı oldukça kısıtlıdır. Ayrıca fazladan zırhlama kalitesi istenildiğinde içerisine katılacak malzemelerle maliyet artmaktadır [28].

Zırhlama malzemesi olarak tungsten, bizmut, çelik, bakır gibi metaller de kullanılmaktadır. Tungsten sahip olduğu yüksek yoğunluğu sayesinde gama ışınlarına karşı etkili olmakta, toksik bir olmaması sebebiyle de yüksek enerjili gama ışınlarının tutulmasında mükemmel bir maddedir. Ancak tungstenin kararsız olması, saf ve katı halde bulunmaz olması ve pahalı teknoloji-malzeme kullanımı gerektirmesi nedeniyle zırhlama malzemesi olarak kullanımını kısıtlamaktadır [28].

Radyasyon kalkanlama uygulamaları için kompozit malzemelerin geliştirilmesi sağladığı ucuzluk, toksik olmama ve kolay şekillendirilebilirlik özellikleri sayesinde son yıllarda oldukça yoğun çalışılan bir konu haline gelmiştir. Malzemelerin genelde tek başına yeterli radyasyon dayanımını gösteremediği, kompozitlerin ise malzemelerin avantajlı yönlerini bir araya getirmelerinden dolayı daha iyi bir kalkanlama performansı göstermektedir. Bu durum polimer kompozitlerin sahip oldukları radyasyon koruyucu malzemesi olarak kullanımına olan ilgi artmaktadır. Ancak, polimerler gama ışınlarını kendi başlarına durdurmak için yetersizdirler. Kırmızı

çamurun polimerler ile kullanılabilirliği ve her iki malzemenin de bazı radyasyon kalkanlama uygulamalarında tercih ediliyor olması sebebiyle üretilecek olan kompozit malzemelerin radyasyon dayanımı konusunda daha dirençli olacağı düşünülmektedir. Kırmızı çamurun radyasyon kalkanlama çalışmalarında kullanımına yönelik ilgi ve bu yönde yapılan çalışmalar artmaktadır.

#### **2.4.2 Kırmızı çamurun radyasyon kalkanlamada kullanımı**

Kırmızı çamurun, yararlı endüstriyel bir ürüne dönüştürülmesi hem ekonomik yarar hem de çevreye verdiği zararın azaltılmasını sağladığından giderek üzerine düşülen bir çalışma konusu haline gelmektedir. Bu çalışma konularından biri de radyasyon kalkanlama çalışmalarında kırmızı çamurun kullanılmasıdır. Yapılan çalışmaların bazıları şöyledir;

Jawad ve arkadaşları [31], çalışmalarında koruyucu malzeme olarak sekiz tip seramik malzeme kullanılmış ve gama ışınlarına karşı test etmişlerdir. Her bir seramik türü sırlı ve sırsız olarak kullanılmıştır. Kullandıkları seramik malzemeler arasında kırmızı çamur da sırlı ve sırsız olarak kullanılmıştır.  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{60}\text{Co}$  radyasyon kaynaklarını, sintilasyon dedektörü NaI(Tl) ile gama ışını spektrometre sistemi ile zayıflama katsayılarını ve yarı değer katmanlarını hesaplamak için kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, sırlı seramiklerin gama radyasyonunun zayıflamasında sırsız seramiklere göre daha iyi olduğunu ve kalkanlamada çalışmalarında kullanımlarının daha iyi olduğunu görmüşlerdir.

Akbulut ve arkadaşları [32], mikronize kil-beyaz çimento, kil silis dumanı, alçıtaşı, alçı-silis dumanı, çimento, beyaz çimento, çimento-silis dumanı, beyaz çimento-alçı, beyaz çimento-silis dumanı, kırmızı çamur silika dumanı, silis dumanı, kırmızı çamur farklı enerji seviyelerinde incelemişlerdir. Kil ve diğer numunelerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak killerin, özellikle kil-beyaz çimento karışımının radyoaktif kalkanlamada diğer numunelere göre daha üstün olduğu tespit etmişlerdir.

Amritphale ve arkadaşları [33], fosfat bağı kullanılarak seramik işleme yoluyla kırmızı çamur ve baryum bileşiği ile radyasyon koruyucu malzemeler yapmak için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Kırmızı çamur bazlı koruyucu malzemeler için X-ışını fotonlarının farklı enerjileri için kalkanlama, yani yarı değer kalınlığı (HVT) hesaplanmış ve geleneksel olarak kullanılan kalkanlama malzemeleri olan beton ve

kurşun ile karşılaştırmışlardır. Sonuçta, kırmızı çamur bazlı koruyucu malzemelerin betona kıyasla daha performanslı olduğunu bulmuşlardır.

Anshul ve arkadaşları [34], elektromanyetik radyasyonlar için yeni kalkanlama malzemelerini, kırmızı çamur ve işlenmiş kırmızı çamur bazlı sistemler kullanılarak iki farklı yaklaşım kullanarak hazırlamışlardır. Hazırladıkları kalkanlama malzemelerinde çok bileşenli ve çoklu kalkanlama fazlarının kristalografik yönü ve kalkanlama verimliliği üzerinde durmuşlardır. Co-60 gama ışını ışınlama kaynağı kullanılarak radyasyon kalkanlama performanslarını değerlendirmişlerdir ve sonuçta kalkanlama kalınlığını yani yarı değer kalınlığını betona oranla %40-60 oranında indirdiğini bulmuşlardır.

Guru ve arkadaşları [35], polyester matrisli borik asit ile işlenmiş kırmızı çamur kullanarak nötron kalkanlama malzemeleri yapmak amacıyla bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen nötron kalkanlama malzemeleri üzerinde, hızlı ve termal nötron kalkanlama amacıyla 12 Ci Am-Be radyasyon kaynağı kullanılarak çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada kırmızı çamur-polyester kompozitlerin toplam makroskopik kesiti hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Geliştirilen kompozitler X-ışını toz kırınımı, SEM, FTIR ve termal analiz vb. ile karakterize edilmişlerdir.

Chauhan ve arkadaşları [36], yenilikçi kırmızı çamur bazlı sentetik koruyucu agregaların kullanıldığı radyasyon koruyucu betonun geliştirilmesi ve tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Geliştirilen kalkanlama agregaları kırmızı çamurdan oluşmakta ve çok fazlı, çok katmanlı kristal yapıda bu nedenle mükemmel koruyucu malzemeler olan baryum silikat (sanbornit), baryum demir titanyum silikat (bafertisite), baryum alüminyum silikat, demir titanyum oksit (psödorutil), baryum titanat, baryum demir gibi malzemelerden oluşmaktadır. Geliştirilmiş sentetik koruyucu agregalar kullanılarak radyasyon koruyucu betonun hem  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV foton enerjisine sahip) ve  $^{241}\text{Am}$  (60 keV foton enerjisine sahip) gama ışınları hem de 300 kVp X-ışınları radyasyon kalkanma performanslarını test etmişler ve son derece etkili kalkanlama özelliklere sahip olduğu bulmuşlardır.

Mudgal ve arkadaşları [37], bu çalışmada iki farklı kaynaktan elde edilen kırmızı çamur kullanmışlardır. Kırmızı çamurun kimyasal formülasyonu ve mineralojik tasarımı, uygun indirgeyici madde ve katkı maddeleri kullanılarak seramik işleme yoluyla yapılmıştır. Geliştirilmiş her iki farklı sentetik radyasyon koruyucu agreganın

da nükleer santrallerin ve diğer radyasyon tesislerinin inşası için gelişmiş radyasyon koruyucu beton yapmak için faydalı mkemmell birer malzeme olduklarını tespit etmişlerdir.

Verma ve arkadaşları [38], kırmızı çamur kullanılarak gelişmiş, X-ışını radyasyon koruma panellerin geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Kırmızı amurun kapasitesini, çok elementli bileşimlere ve çok katmanlı kristal yapılara sahip siyah renkli özel koruyucu nc tozun oluşumunu sağlayan uygun katkı maddesi ve indirgeyici madde ile seramik işleme yaparak araştırmışlardır. Tozu ayrıca kalın ve viskoz radyasyon koruyucu organo-jel bazlı malzeme oluşturmak için polimerik ester ile karıştırmışlardır. Geliştirilen koruyucu jel malzemesini daha sonra, kapalı kalıp imalat sistemi ile cam elyaf takviyesi kullanılarak, elle yatırma tekniği ile gelişmiş radyasyon koruyucu paneller (SPG) yapmak için krlemişlerdir. Geliştirilen panellerdeki cam elyaf içeriği ağırlıkça %10,7 ile %13,5 arasında değişmektedir. Yaptıkları X-ışını fotonlarının farklı enerjileri için zayıflatma hesapları sonucunda çok etkili kalkanlama özellikleri verdiğini tespit etmişlerdir. Geliştirdikleri kalkanlama panellerinin, tanısal X-ray odasından nükleer santral ve diğer stratejik radyasyon koruma tesislerine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Verma ve arkadaşları [39], kırmızı çamurun sitrik asit ile kimyasal olarak işleyerek ve tuzlu su çamuru kullanarak, iki tip toz oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu tozlar özel olarak tasarlanmış radyasyon koruyucu toz ve ileri düzeyde uyarlanmış radyasyon koruyucu tozdur. Sentezlenen tozlar, radyasyon kalkanı özellikleri kazandırmak için gerekli olan yüksek yoğunluklu, çok katmanlı, çok kristalli çok ekranlı fazlara sahiptir. Gelişmiş radyasyon kalkanlama panelleri ve karoları için X ışını fotonlarının farklı enerjilerdeki kalkanlama performanslarını hesaplamışlardır. Geliştirilen gelişmiş kurşunsuz, çok bileşenli bazlı kompozit malzemeler, tanısal X-ray ve CT tarayıcı odasından diğer stratejik radyasyon koruyucu kurulumlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir olduğunu bildirmişlerdir.

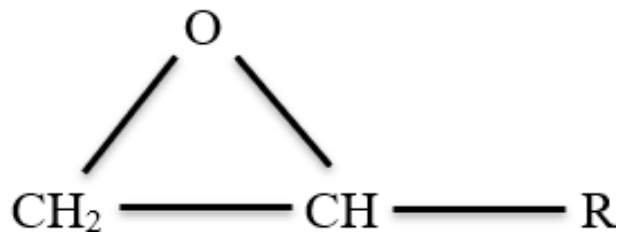
### 3. EPOKSİ REÇİNE

Epoksi uzun yıllardan beri birçok ticari uygulamada yaygın bir şekilde kullanılmakta olan polimer malzemelerden biridir. 1950'li yıllarda ortaya çıkan ticari anlamdaki ilk uygulamalardan bu yana çeşitli yapıştırıcılar, döküm bileşikleri, uzay-havacılık, yapı malzemeleri, endüstriyel döşemeler ve karoser gibi çok farklı mühendislik dallarında kullanılmaktadır Ayrıca sahip olduğu yalıtım anlamında da katkı veriyor olması sebebiyle kendisine transistör üretimi, devre plakası gibi farklı bazı elektronik alanlarda yer bulmasını sağlamaktadır [40-42].

Epoksinin özelliği, sağladığı aromatik gruplar içeren geniş monomer çeşitliliği sayesinde yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip daha sert malzemeler tasarlayabilme imkanı sunması ve alifatik gruplara sahip olan monomerlerin elastomer yapılara şekillenebilmeyi sağlamasıdır [41].

Monomerlerin, molekül ağırlığı ve molekül ağırlık dağılımı sahip oldukları kimyasal fonksiyonelite kadar elde edilen son ürün açısından özelliklerin daha iyi bir biçimde kontrol edilebilmesini sağlar. Bu kimyasal özellikler ve proses edilme esnekliği sayesinde epoksiler; boyalar, koruyucu kaplamalar, yapıştırıcılar, elektronik cihazlar ve bünyesinde kompozit bulunduran birçok uygulamada tercih sebebi olmaktadır. Ancak epoksi reçinelerin çoğu sıkı üç boyutlu moleküler ağ yapıda olması nedeniyle, kırılğan ve çatlak ilerlemesine karşı zayıf direnç göstermektedir [41,43].

Epoksi reçineler, her moleküllerinde epoksi grubu içermesinden dolayı yapısında bulunan epoksi fonksiyonel grupları neticesinde bu ismi almışlardır. Ayrıca bünyesinde eter bulundurmaktadır. Ticari olanları ise; alifatik, sikloalifatik ya da aromatik arka bağlara sahip ürünlerdir [44]. Şekil 3.1'de epoksi fonksiyonel grubu gösterilmektedir [44].



Şekil 3.1 : Epoksinin fonksiyonel olarak gösterimi.

Epoksi reçineler 1930'lu yıllardan itibaren sentezlenmeye başlamış ve sonrasında birbirinden farklı sanayi alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca matris olarak kullanılan diğer polimerlerle kıyaslandığında sahip oldukları fiyat dezantajına rağmen kompozit endüstrisi içerisinde en fazla kullanılan olan polimer matris konumundadır. Bu durumun başlıca nedenleri ise şöyledir [45];

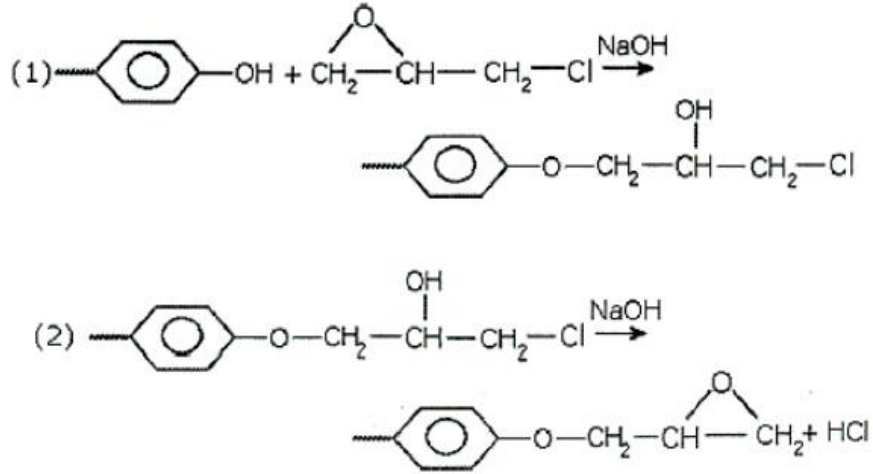
- Çekme ve darbeye olan yüksek dayanımı,
- Yüksek aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık uygulamalarında daha iyi fiziksel ve mekanik bakımdan performans göstermesi,
- Oda sıcaklığı şartlarında sertleşebilme özelliği,
- Viskozitenin düşük olması,
- Düşük ucuculuk
- Yüksek kimyasal ve elektrik direnci .

Farklı yapı ve özelliğe sahip, değişik birçok alanda kullanılan epoksi reçineler;

- Diglisidil eter bisfenol F (DGEBF)
- N,N,N',N'-tetraglisidil-4,4'-metilen dianilin (TGMDA)
- N,N-diglisidil anilin (DGA)
- Diglisidil eter bisfenol A (DGEBA)
- Triglisidil p-aminofenol (TGPAP)
- Novalak epoksi (NE)
- Diglisidil eter tris (hidroksifenil) metan şeklinde sıralanmaktadır.

Çapraz bağlanma sırasında uçucu madde oluşmaması, bağlanma sonrasında ise büzülme oranının % 1-5 oranında daha az olması gibi özelliklere sahiptir. Bunun yanı sıra yüksek fiyat ve uzun pişirme sürelerine sahiptir. Ancak uzun pişirme süresi hızlandırıcılar kullanılarak kısaltılır. 150°C civarına kadar kullanım sıcaklığına çıkabilir [46]. Epoksiler, epoksilerin kendileri arasında homopolimerizasyonu ya da novalak, amin, anhidrid maddelerle girmiş olduğu reaksiyon sonucunda oluşurlar.

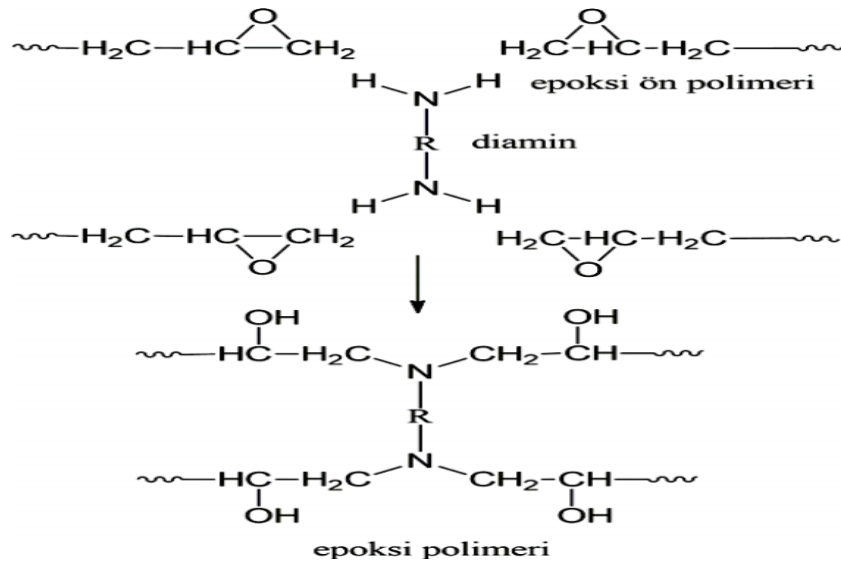
Yaygınlık bakımından en çok kullanılan reçineler epikloroanhidrin ve bisfenol-A'nın alkali katalizörü kullanılarak elde edilenleridir [47]. Şekil 3.2'de DGEBA olarak ifade edilen Diglisidil eter bisfenol-A gösterilmektedir [48].



Şekil 3.2 : DGEBA'nın kimyasal yapısı.

Epoksilerde n değeri özellikler üzerinde etkilidir. n değerinin düşük olması polimerin sıvı halde olmasına sebebiyet verirken, oda sıcaklığı ve n'in 25'e yakın olduğu durumda polimerler katı hale geçmektedir. Mekanik dayanım gerektiren yerlerde n değerinin yüksek olduğu epoksiler, daha basit alanlarda (kaplama gibi) ise düşük n değerine sahip epoksiler tercih edilmektedir [49].

Epoksit ön polimeri çeşitli çapraz bağlayıcılar kullanılarak sertleştirilebilmektedir. Şekil 3.3'de epoksi reçine ve amin grublu sertleştiricinin çapraz bağlanması gösterilmiştir [50,51].



Şekil 3.3 : Çapraz bağlı epoksi polimerinin oluşumu.

Reçinelerin sahip olduğu yüksek dayanıklılık, sertlik, ve ısıl dayanım gibi özellikler bisfenol, yüksek kimyasal dayanım eter bağları ve yapışkanlık gibi özellikler de hidroksil ve epoksi grupları ile devredilirler [42].

Epoksi reçineyi sertleştirmeyi sağlayan yöntemler ısı vererek, oda sıcaklığında ya da elektromanyetik ışımaya şeklindedir. Bunlar arasında ısı vererek sertleştirme en yaygın yöntem olmasına karşın, elektromanyetik yöntemin sağlamış olduğu gerekli ısının frekans ile malzeme bünyesinde oluşturuluyor olması hız ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Böylece verim daha yüksek olmakta ve üretim süresi daha kısa olmaktadır. Ayrıca fiziksel ve kimyasal özellik anlamında daha fazla gelişme sağlanmaktadır [52].



#### 4. KOMPOZİT MALZEMELER

İnsanlık tarihi boyunca çok uzun yıllardır farklı birçok malzemenin (kerpiç ev yapımı gibi) bir araya getirilip kullanılıyor olmasına rağmen, kompozit malzeme tabirinin ortaya çıkışı ancak malzemeleri bir araya getirme kültürünün herkesçe kabul görmesi sonrasında gerçekleşmiş ve bu malzemeler; metal, seramik ve polimerler haricinde yeni bir malzeme grubu olarak sayılmaya başlanmıştır. Öyle ki günümüzde çok bileşenli bir yapıya sahip kompozitler, tek bileşenli (monolitik) yapıya sahip olan metal alaşımı, seramik ve polimerlere kıyasla çok geniş bir malzeme özelliği kombinasyonları sağladığı kabul görmektedir. Malzeme özellik kombinasyonları kompozit malzeme gelişimine bağlı olarak genişlemiş ve genişlemeye de devam etmektedir [53].

Kompozit malzemeler, kısaca iki veya daha fazla malzemeyi sahip olduğu avantajları kullanmak amacıyla bir araya getirmek şeklinde tanımlanabilir . Kompozitleri bir araya getirilirken bazı özelliklerde iyileşme sağlanmakta bazı özelliklerde ise düşme meydana gelebilmektedir. Genel olarak yapay bir şekilde üretilen kompozitler, selüloz elyaf ve ligninden (odun özü) oluşan ağaç veya protein kolojeni ve apatit mineralinden oluşan kemik gibi tabiatta doğal halde de bulunabilmektedir [53].

1930'lardan itibaren plastik malzemelerin sağladığı bazı özellikleri nedeniyle plastikleri diğer malzemeler ile rekabet edecek hale getirmiştir. Şekil verme kolaylığı, yüzey kalitesinin daha iyi olması, metallere kıyasla sahip olduğu düşük yoğunluk ve korozyon dayanımı gibi özellikleri plastiğin ön plana çıkmasına yardımcı olan etkenler olmuştur. Ancak düşük sertlik ve dayanıklılık gibi bazı özelliklere sahip olması tek başına kullanımını sınırlamış ve farklı çözümler aranmasına sebebiyet vermiştir. Bu da kompozit malzeme üretimini tetikleyen olaylardan biri olmuştur. Böylece 1950'lerden itibaren polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmeye başlanmıştır [54].

Kompozit malzeme üretimiyle geliştirilmesi istenen özellikler;

- Aşınma direnci,
- Korozyon direnci,

- Yüksek kırılma tokluğu,
- Yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek sıcaklıklarda çalışabilme,
- Isıl ve elektriksel iletkenlik,
- Hafiflik,
- Rijitlik,
- Uygun maliyet,
- Estetik kaygılar şeklinde sıralanabilir [55].

#### **4.1 Kompozit Yapı Elemanları**

Kompozit malzemeler matris adı verilen birinci faz ve onu çevreleyen saçınmış fazdan (takviye elemanı) meydana gelmektedir. Matris fazı, takviye elemanını sararak sürekliliğini, yükün takviye elemanı arasında dağılmasını, kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını sağlarken takviye elemanı, sertlik ve sağlamlık gibi yapısal özellikleri sağlamaktadır [53,55].

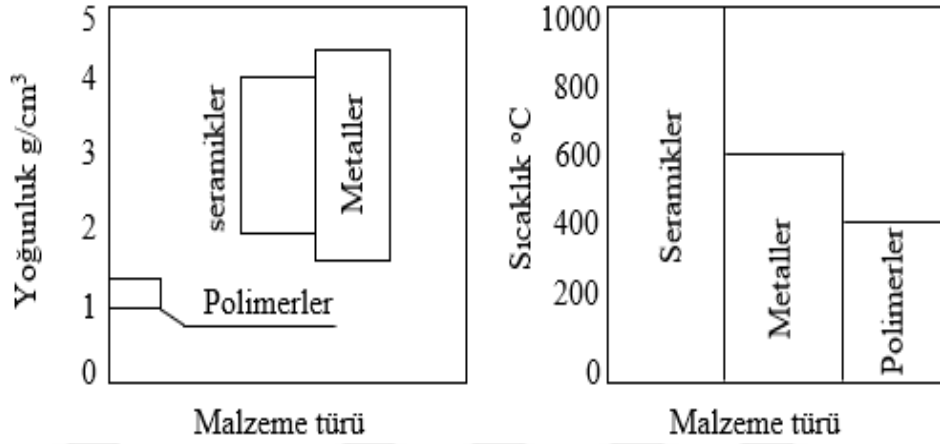
##### **4.1.1 Matris malzemeler**

Matrisin kompozit yapıdaki asıl görevi malzeme üzerine gelen yük ve gerilime karşı koyabilmesi için takviye elemanlarını bir arada tutmaktır. Ancak çoğu takviye elemanı gevrek ve kırılğan olduğundan dolayı matrisin bir diğer görevi de takviye elemanlarına dışarıdan gelebilecek etkilere karşı korumaktır. Dışarıdan gelen etki neticesinde oluşabilecek deformasyona, çatlaklara ve çatlak ilerlemesine karşı koruyucu etki yaparak yayılmasına engel olmaktadır [40].

Kompozit üretiminde matris malzeme seçimi:

- Dışarıdan gelen kuvvet ve etkiyi liflere iletmek,
- Takviye malzemesini darbe ve korozyon gibi etkilerden korumak
- Kullanılacak yere uygunluk,
- Ucuzluk,
- Viskozite,
- Nem ve su alma özelliği,
- Kayma sertliği, darbe özellikleri,
- Erime noktası ve kütleme süresi gibi özellikler göz önüne alınarak yapılır [47].

Kompozitlerde matris malzemesi kullanımı için üç farklı malzeme tipi (seramik, metal, polimer) kullanılmaktadır. Bu malzeme tiplerinin birbirlerine karşı sahip olduğu zayıf ve üstün yanlar Şekil 4.1’de görülmektedir [40].



Şekil 4.1 : Kompozit yapıdaki matris malzeme türlerinin sıcaklık-yoğunluk karşılaştırması.

#### 4.1.1.1 Seramik matrisler

Seramikler oksidasyona, yüksek sıcaklığa, termal ve kimyasal etkilere dayanıklı, düşük yoğunluklu, yalıtkan, çok sert fakat bir o kadar da gevreklerdir. Kırılma tokluğu düşüktür. Sahip olduğu gevreklik nedeniyle gevrek kırılma eğilimindedirler ve işlenmesi zordur.

Seramiklerin kırılma tokluğu, içerisine konulacak olan parçacık, elyaf ya da visker haldeki bir takviye malzemesi sayesinde önemli ölçüde arttırılır. Kırılma tokluğundaki bu iyileşmenin sebebi ilerleyen çatlak ve takviye malzemesi arasında oluşan etkileşimden kaynaklanmaktadır. Normalde matristen başlayan çatlağın ilerlemesi takviye malzemesi sayesinde engellenir veya geciktirilir [53].

Seramik kompozitler için tercih edilen matrisler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Si}_3\text{N}_4$ , olurken, katkı elemanı olarak  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiC}$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kullanılmaktadır [56].

#### 4.1.1.2 Metal matrisler

Metal matrisli kompozitler, tahmin edilebileceği sünek metalin matris olarak kullanıldığı kompozitlerdir. Bu kompozitler, takviye malzemeleri sayesinde takviyesiz metallere nazaran daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmektedir. Takviye elemanının kullanımıyla beraber özgül rijitlik ve dayanımı, aşınma ve sürtünme direnci, boyutsal bir yapının kararlılığı ve ısı iletkenliği gibi özellikler artabilir. Polimer matrisli

kompozitlere oranla daha yüksek kullanım sıcaklığı, alev almama özelliği ve organik akışkanlara karşı daha yüksek bozulma direncine sahiptirler. Ancak polimer matrisli kompozitlere göre daha pahalı olmaları sebebiyle kullanımı daha sınırlıdır [53].

#### **4.1.1.3 Polimer matrisler**

Bu tür kompozitler en çok polimer reçinelerin kullanıldığı ve takviye malzemesi tarafında da elyafın daha çok tercih edildiği kompozitlerdir. Daha ucuza mal edilebilmesi ve üretim kolaylığı gibi en çok talep edilen özellikleri bünyesinde barındırması sayesinde en çok kullanıma sahip kompozitler haline gelmişlerdir. Ayrıca düşük yoğunluklara ve üretim imkanları açısından daha karmaşık şekilli parçaların üretimine imkan tanınması gibi üstün yanları da bulunmaktadır. Ancak bazıları düşük mekanik özellik ve termal dayanım göstermekte ve çevresel anlamda kullanımları sakıncalıdır. Yine de kompozit malzemelerin yaklaşık %90'ı polimer matrisli şekilde üretilmektedir [53,54].

Polimerler genel termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Termoplastikler; sahip oldukları çeşitliğin aksine kullanım alanları daha kısıtlı polimerlerdir. Özellikleri arasında yüksek kırılma tokluğu, uzun kullanım ömrü, sertleşme işlemi için organik çözücü ihtiyacı olmaması, düşük sıcaklıkta sert olması, ısıtıldığında ise yumuşama göstermesi gibi özellikler bulunur. Bu sayede işlem sonrasında ısıtılarak tekrar şekillendirilebilirler. Ayrıca yüksek sertlik ve çarpma dayanımına sahiptirler. Termoplastiklere PEEK (polietereterketon), PE (polietilen), PS (polistiren), PP (polipropilen) ve PA (poliamid) örnek olarak verilebilir. Termosetler ise; polimer kullanımı bakımından en çok tercih edilen sıvı haldeki polimer malzeme türüdür. Isıl işlem uygulanarak veya kimyasal sonucunda sertleşme gösterirler. Termoplastiklerden farkı, termoplastikler gibi tekrar ısıtılarak kullanılamazlar, polimerizasyon işleminin geri dönüşü olmaz. Çoğu termoset yumuşamaması için dondurulmuş halde depolanmak zorundadır. Örnek olarak epoksi reçine, polyester, vinylester, fenolik gösterilebilir [54].

#### **4.1.2 Takviye elemanı**

Kompozit bir yapıda matris haricindeki diğer bileşen ise takviye elemanıdır. Takviye elemanın amacı kendisini saran matris içerisinde homojen bir şekilde dağılarak matrise dışarıdan gelebilecek herhangi bir gerilme ya da etkiye karşı matrisi destekleyerek mukavemetini arttırabilmektir. Matris içerisine katılan takviye malzemeleri ilerleyen

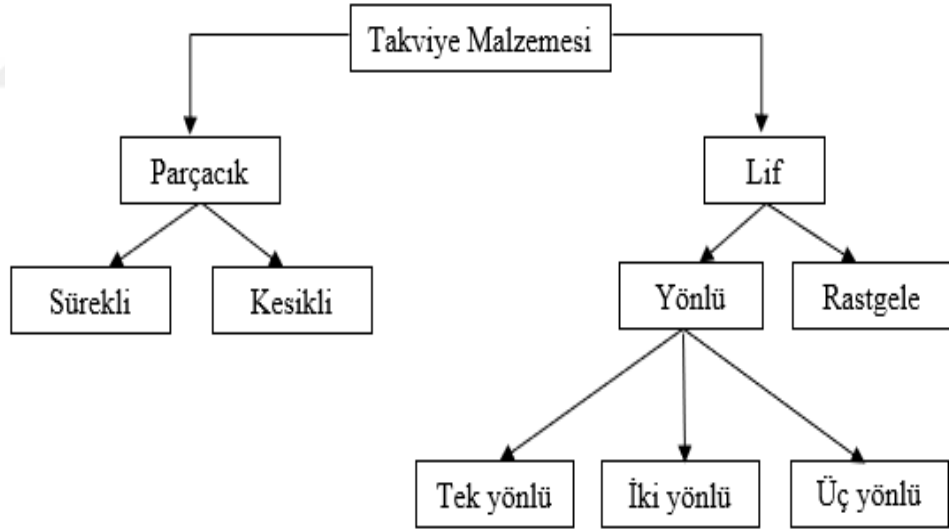
çatlak veya deformasyonla karşılaşması durumunda etkisini azaltmakta hatta engelleyebilmektedir.

Kullanılan takviye malzemesi öncelikle matris ile reaksiyon vermeyecek fakat matrisle iyi bir yapı oluşturacak şekilde seçilmelidir. Matris ve takviyenin farklı termal genişlemelere sahip olmaması ve birbirlerine zarar vermemeleri gerekmektedir [57].

Takviye malzemesi seçiminde dikkat edilmesi gerekenler:

- Hafiflik,
- Çekme-basma dayanımı
- Isı ve elektrik iletkenliği
- Yorulma dayanımı
- Gevreklik-süneklik
- Maliyet şeklinde sıralanabilir [57].

Takviye malzemeleri Şekil 4.2’de gösterildiği gibi iki gruba ayrılmaktadır [58].



Şekil 4.2 : Takviye malzemelerinin sınıflandırılması.

#### 4.1.2.1 Parçacık yapılı takviyeler

Parçacık takviyeli kompozitlerin çoğunda parçacık fazı matristen daha sert ve rijit olmaktadır. Dayanımı arttırmaya yardımcı olan bu parçacıklar, parçacık yakınlarındaki matris hareketlerini engellerler. Aslında elde edilmek ve iyileştirilmek istenen özellikler matris-takviye arasındaki bağın kuvvetli olmasına bağlıdır; çünkü matris dışarıdan gelen yükün bir kısmını parçacıklara aktarmak durumunda kalır [53].

Matris bünyesindeki parçacıklı yapılara düşen yük miktarı, lifli yapılara düşen yük miktarına kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle parçacık yapıya takviye malzemeleri, malzeme sertliğini arttırmanın yanı sıra dayanımını arttırmak için çok etkili değildir [50].

#### **4.1.2.2 Lif yapılı takviyeler**

Teknolojik olarak en önemli kompozitler, takviye malzemesinin lif şeklinde kullanıldığı malzemelerdir. Lif şeklinde adlandırılan malzemeler polimer ya da seramik olan, düşük çap uzunluklarına sahip, düşük ağırlıkta yük dayanımları ve modülü yüksek malzemelerdir. Liflerin takviye olarak kullanımı genelde bu amaca hizmet etmektedir. Bu özellikler çekmeye karşı dayanımın özgül ağırlığa göre oranlanması (özgül dayanım) ve modülün özgül ağırlığa oranlanması (özgül elastiklik modülü) ile ifade edilirler [53].

#### **4.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları**

Kompozit malzemeler, sahip oldukları bazı karakteristik özellikleri ve monolitik malzemelerin istenmeyen veya eksik yönlerini gideren bir yapıda olmaları sebebiyle günümüzde tercih edilme oranı giderek artan bir malzeme çeşidi haline gelmiştir. Monolitik yapıdaki malzemeler kullanıldıkları yere göre bazı avantajlara sahip olsalar da her yerde istenilen özellik ve performansı verememektedir. Bu eksik kalan ya da istenilen özellikleri elde etmek ve malzemeyi geliştirmek amacıyla monolitik haldeki malzemeye başka bir malzeme katılarak her birinin avantajlı yanları kullanılır. Bu durum kompozit malzemelerin temelini oluşturmaktadır.

Kompozit malzemelerin sağlamış olduğu özelliklerin seramik, polimer ve metallere göre farklılık göstermesi, kompozitleri önemli bir malzeme türü haline getirmiştir. Sahip oldukları uzun ömürlü yapıları, hafifliği, düşük özgül ağırlığı, yüksek kimyasal ve mekanik dayanımı gibi özellikler sayesinde bu özelliklerin istendiği alanlarda tercih edilmeleri daha cazip hale gelmiştir. Ayrıca fiber takviyeli kompozitlerin sağladıkları korozyon direnci, elektrik, ses ve ısı yalıtımı tercih edildikleri alana göre avantaj sağlamakta bu da tercih sebebi olmaktadır [59].

Kompozit yapı iç bileşenleri birbirlerine göre genel olarak kovalent bağ ile bağlı olmalarından dolayı çok daha yüksek dayanımlara olanak sağlamaktadırlar. Düşük özgül ağırlıkları sayesinde mukavemet/ağırlık bakımından önemli derecede kazanç

sağlanmaktadır. İyapının sahip olduğu bu özellikler nedeniyle kompozit malzemeyi mukavemet, yorulma, sürünme gibi etkilere karşı daha dirençli hale getirmektedir [60].

Kompozitler sahip oldukları birçok avantajın yanında dezavantajlı olduğu bazı özelliklerde bünyesinde barındırabilmektedir. Bu zellikler kullanıldıkları yere göre avantaj veya dezavantaj yaratabilmektedirler. Ancak kompozit malzemelerin ortaya çıkış amacının daha çok avantaj yaratmak üzerine olmasından dolayı dezavantajlı durumları avantajlarına göre daha az bulunmaktadır.

Genel olarak avantajlı yönleri řu şekilde sıralanabilir [59];

**Yüksek Mukavemet:** Kompozitlerin hem kalıplama özellikleri hem de metallerle kıyasla yapıldığında daha yüksek çekme-eğilme mukavemetinin olması nedeniyle istenen yönde ve bölgede istenilen mukavemet sağlanabilir. Bu da hafiflik, ucuzluk ve tasarruf sağlar.

**Kolay şekillendirebilme:** Büyük ve karmaşık şekilli parçaların üretimine imkan tanır ve üretim kolaylığı sağlar.

**Elektriksel zellik:** Uygulanacakları yere göre malzemelerin üstün elektriksel yada yalıtkan özellikler taşınması istenir. Malzeme seçimi buna göre yapılır. Kompozitler, bazı durumlarda iletken olarak kullanılabilirken bazı durumlarda yalıtkan olarak kullanımı tercih edilir.

**Korozyon ve Kimyasal Direnç:** Sahip oldukları korozyon direnci ve kimyasal direnç sayesinde bu tür etkilerden zarar görmezler. Bu durum kimyevi maddelerin saklandığı tanklar, aspiratörler ve deniz araçları gibi birçok alanda kompozitleri ön plana çıkartır.

**Isıya Dayanıklılık:** Isı iletim katsayısının düşük olduğu malzemelerin tercih edildiği kompozitlerde yüksek ısının bulunduğu durumlarda kullanılmasına olanak sağlar.

**Kalıcı Renklendirme:** Kompozitlere, kalıplama esnasında reçineye eklenen pigmentler neticesinde istenen renk verilebilir. Bu da ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

**Titreşim Sönümlendirme:** Sünek zellik etkisiyle dışarıdan herhangi bir etki edildiğinde oluşan titreşim sönümlleme ile çatlak oluşumu ve ilermesi en aza indirilir.

Kompozit malzemelerin dezavantajları ise şoyledir [59];

- Kompozit malzemelerde bulunan hava boşlukları malzemeyi olumsuz etkileyecek şekilde yorulmaya sebebiyet verebilirler.
- Kompozit malzemeler her yönde aynı etkiyi göstermezler.
- Aynı kompozitin basmaya, çekmeye, eğilmeye ve kesmeye karşı direnci farklılık gösterebilir.
- Kompozit malzemelere uygulanan delme ve kesme gibi etkiler lifleri çok fazla deforme ettiğinden, hassas imalat zordur.
- Kullanılacak hammaddenin pahalı olması gibi durumlar meydana gelebilir, bu da maliyet açısından kullanım tercihini etkiler.
- Lamine kompozitlerin sahip olduğu özellikler her zaman ideal olmayabilir, bazı durumlarda dayanıklılıkta ve özelliklerde düşüklük görülebilir .
- Malzemenin üretim yöntemleri malzemenin kalitesi etkileyebilmektedir, bu da ince el işçiliği gerektiren durumlarda kalite düşüklüğüne sebep olur.
- Gevrek malzemeler olmaları nedeniyle kolayca zarar görebilir, onarılırken farklı sorunlar ortaya çıkabilir.

### **4.3 Kompozitlerin Kullanım Alanları**

Günümüzde kompozit malzemeler sahip oldukları birçok avantajlı özellikleri sayesinde kullanımı gittikçe artan ve farklı uygulama alanlarında kendine yer edinen bir malzeme çeşidi haline gelmiştir. Kullanılacak alana göre farklı malzeme çeşitleri, sahip oldukları avantajlar dikkate alınarak bir araya getirilir ve böylece daha yüksek bir performans elde edilmiş olur.

Kompozit malzemelerin tarihsel anlamda ilk kullanım alanı inşaat sektörü olmuştur. Çamur bünyesine katılan saman ile yapılan kerpiç ev ve duvarlar buna en güzel örnektir. Günümüzde ise evlerin yapımında en basit olarak kireç, çimento ve demirin birlikte kullanımı verilebilir. Yine günümüzden örnek olarak kağıt yapımında selüloz ve reçinenin kullanımı gösterilebilir [54]. Uçak sanayisindeki ihtiyaçlara göre giderek gelişen kompozitler son dönemde daha çok alanda kullanılmaya ve yaygınlaşmaya başlamaktadır. Global anlamda kompozit pazarı her yıl giderek büyümektedir [59].

#### **4.3.1 Havacılık sektörü**

Havacılık sektöründe en önemli konulardan biri hafifliktir. Bunun yanında istenen emniyet, hız ve ekonomi gibi özellikleri harmanlayabilmektir. Hava taşıtlarında dizayn için uzun hizmet ömrü, mesafe, sürat, irtifa gibi kriterleri en uygun ve en hafif şekilde sağlayabilecek olan malzemeler tercih edilmektedirler. Sahip oldukları düşük yoğunluk nedeniyle özgül mukavemet ve özgül rijitlik açısından kompozitler en uygun malzeme çeşidini oluşturmaktadır. Bu da havacılık sektörü açısından kompozit kullanımını giderek arttırmaktadır. Bu sebeple planör gövdesinde, uçak gövdesi ve iç aksamında, helikopter iç mekan ve parçalarında ve uzay araçlarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır [59].

#### **4.3.2 Otomotiv sektörü**

Otomotiv sektöründe amaç, havacılık sektöründeki gibi mümkün olduğu kadar ağırlığı azaltmaktır. Aracı hafifletirken buna bağlı olarak darbe dayanımını da arttırmak ve bu anlamda optimum noktayı bulmak gerekmektedir. Bu sayede aracın yakıt tasarrufu artacak ve aynı yakıtle katettiği mesafe daha fazla olacaktır. Kompozitler otomobil sektöründe; cam silecekleri, filtre kutusu, far gövdesi, otomobil kaportası, yan gövde iskeleti, spoiler, pedallar, dikiz aynası ve gösterge panelleri gibi birçok farklı aksamda kullanılmaktadır [59].

#### **4.3.3 Sağlık sektörü**

İnsan sağlığı her şeyden önde gelmektedir. Sağlık sektörü de günümüzün en önem teşkil eden sektörleri arasındadır. Sağlık sektöründeki her bir gelişme ve ilerleme insalık için önem arz etmektedir. Kompozit malzemeler avantajlı özellikleri sebebiyle sağlık sektörünü de doğal olarak etkilemektedir. Kompozit malzeme teknolojilerindeki gelişmeler sağlık sektörüne uygulanarak, tedavi yöntemi olarak uygulanabilmektedir.

Diş dolgularında kompozit reçineler, tıbbi tetik cihazlarında cam takviyeli plastikler kullanılırken ortopedide kemik onarımında yine kompozit malzemeler tercih edilmektedir [59].

#### **4.3.4 İnşaat ve yapı sektörü**

İnşaat sektörü, çok eski zamanlardan beri kompozitlerin kullanılmaya başlandığı ve halen kullanılmakta olduğu bir sektördür. Çamur bünyesine katılan saman, lif gibi bazı

takviye malzemeleriyle yapılan kerpiç evler buna en güzel örnektir. Bu durum zamanla giderek daha gelişmiş ve yapılarda beton içerisine agrega katılması ve demir ile kullanımı yaygınlaşmıştır.

Boru hatlarında, rögar kapaklarında, mazgallarda, farklı altyapı/üstyapı ürünlerinde cephe korumalarında, evlerde, duraklarda, depo inşaatlarında, kolon güçlendirme çalışmalarında, köprü yapılarında ve farklı birçok inşaat yapılarında kompozitlerden yararlanılmaktadır [59].

#### **4.3.5 Spor ve eğlence sektörü**

Spor araç gereçlerinde de amaç genellikle mümkün olduğunca azaltabilmektir bu sayede hareket kabiliyeti de artacaktır. Bu anlamda cam ve karbon elyafı takviyeli kompozitlerin kullanımı öne çıkmaktadır. Malzeme yoğunluğu ve darbe dayanımının öne çıktığı kano, sörf ve yat gibi alanlarda kompozitler bu isteklere cevap verebilmektedir. Dağ bisikletleri için rijitlik/hafiflik önemli olduğundan karbon elyaf ile üretilmektedir. Ayrıca; golf ve hokey sopası, tenis raketi, oltalar ve bisiklet gövdeleri gibi pek çok spor aletinde hafiflik sağlayan kompozit malzemeler tercih edilmektedir [59].

#### **4.3.6 Ulaşım sektörü**

Ulaşım sektöründe kompozitler genellikle ağırlıktan tasarruf amacıyla kullanılırlar. Kompozitlerin sağladığı hafiflik ile araçlar daha uzun mesafelere gidebilmekte ve hızlara çıkabilmektedirler. Tren, metro, tramvay iç ve dış kısımları, traktör kaportası, kabin, otobüs havalandırma kanalları, gösterge panelleri, toplu taşıma araçlarının oturma kısımları ve teleferiklerin üretimi kompozit malzemedir yapılmaktadır [59].

### **4.4 Seramik-Epoksi Kompozitler**

Bütün kompozitler temelde matris ve onu güçlendiren bir takviye malzemesinden oluşurlar. Genel anlamda kompozit üretimi için kullanılan polimerler termoset esaslı ve termoplastik esaslı olmak üzere iki kategoriye ayrılırlar. Termoset plastikler bir kez kürleştirildikten (katılaştırma) sonra tekrar eritilemez ve eski haline geri döndürülemezler. Termoplastikler ise tekrar eritilerek yeniden şekil verilebilir ve katılaştırılabilirler [61].

Termoplastik malzemeler, termosetlerle bir kıyaslama yapıldığında termosetlere göre daha sert ve genellikle sünek malzemelerdir. Termoplastikler ısı yoluyla eritilip daha sonra tekrar kullanılabilir, şekil verilebilirler ve birçok uygulama alanında dolgu ve takviye eklemesi yapılmadan kullanılırlar. Termosetlere nazaran çapraz bağlanma olmadığından tekrar tekrar kullanılabilirler [62].

Epoksi reçinenin de dahil olduğu termoset matrisler, kimyasal bazı reaksiyonlar sonucunda, genelde katılaştırmayı sağlayan bir malzemeyle kullanımıyla küçük monomer moleküllerinin, polimer molekülleri haline gelmesiyle oluşurlar. Sıvı halde olmaları sebebiyle katılaştırıcı ilavesi sayesinde katılaşmaları sağlanır [63]. Termoplastikler gibi tekrar eritilip, kullanılamazlar. Bunun sebebi termoplastiklerin aksine çapraz bağlı zincirler oluşturmalarıdır. Çapraz bağlanmanın yüksek yoğunlukta gerçekleşmesi durumunda malzeme rijit ve ısıl stabilitesi yüksek bir hal alır [61].

Epoksi reçineler termoset grubuna dahil, matris malzemesi olarak kullanılan, yüksek kimyasal, mekaniksel ve termal özelliklere sahip malzemelerdir. Epoksi reçineler cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın reçinedir.

Epoksi, yapıştırıcı özelliğe sahip bir kimyasal reçinedir. Epoksi reçineleri sertleştirmede kullanılan sertleştiricinin türüne, reçine ve sertleştirici karışım oranlarına göre kompozit malzemelerin özellikleride değişmektedir. Epoksi reçinelerin termik özellikleri, asit ve kimyasallara karşı mukavemeti yüksektir. Epoksi reçinelerin düşük mukavemet özellikleri elyaf malzemelerle iyi bir bağ oluşturabildikleri için lifli olan güçlendiriciler ile birlikte bu özellikleri iyileştirilmektedir. Mekanik dayanımları, aşınma ve sürtünmeye karşı gösterdikleri direnç yüksektir. Ayrıca epoksi reçinelerin hava ve sudaki dayanıklılıklarıda iyidir. Estetik bir görünüm sağlamalarının yanısıra maliyetleri yüksektir. UV ışınlar epoksinin moleküler bağlarını bozarak epoksinin zayıflamasına neden olmaktadır. Ciltle uzun süreli temaslarında ise alerjik etki yapmakta, tozu ve buharı göz ve solunum sistemine olumsuz etki etmektedir [64].

Epoksi malzemeler uygulama alanına bağlı olarak genellikle silika, alümina, mika ve talk gibi çeşitli seramik takviye malzemelerinin ilave edilmesiyle modifiye edilmektedir. Epoksiye eklenen bu takviye edici ilaveler epoksinin kırılma tokluğunu, elektrik ve ısı iletim özelliklerini geliştirmek, reçine sertliğini, aşınma direncini ve alev

geciktirme özelliğini iyileştirmek ve ısı genleşme katsayısını düşürmek gibi farklı amaçlarla kullanılmaktadır.

Epoksi reçine sahip bu olduğu özellikler sayesinde seramik katkıli kompozit üretiminde tercih edilen bir matris malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Seramik katkılar ise kompozit üretiminde tercih edilen takviye çeşitlerinden biridir. Seramik katkılar matrise genellikle parçacık (partikül) halinde katılarak sahip olunan özelliklerin daha da gelişmesini ve iyileşmesini sağlamaktadır. Seramik esaslı takviyeler genellikle kompozitin elastik modülü ve sertliğinin artmasına diğer taraftan ısı genleşme katsayısının düşmesine önemli oranda katkı sağlamaktadır.

Parçacık takviyeli kompozitler, kompozit yapıdaki takviye malzemelerinin daha kısa boyutlu olduğu yapılardır. Takviye malzemesinin sahip olduğu boyutlar, kompozit yapıya sağladığı katkıyı etkiler. Daha uzun boyutlu takviyeler olan lifler, oluşabilecek çatlakların büyüüp ilerlemesini engelleyerek kırılma dayanımına katkı sağlarlar. Daha kısa yani parçacık şeklindeki takviye malzemeleri ise, kırılma dayanımına pek bir etki gösteremezler [62].

Parçacık haldeki takviye malzemeleri matris malzemelerine göre daha sert bir yapıya sahip olmalarından dolayı matrise uygulanan bir plastik deformasyonda yükü paylaşmaktadırlar. Ancak uzun boyutlu takviyeler olan liflerin yük eksenine paralel olarak konulduğu kompozitlerle kıyaslandığında çok düşük kalmaktadır. Parçacık takviyelerin genel kullanım amacı sertliği arttırmak, sürtünme ve aşınma direncini arttırmak, kolay işlenebilirlik sağlamak, yüksek sıcaklık dayanımını arttırmak, ısı ve elektrik iletkenliğini değiştirmek olsa da bazı durumlarda sadece ucuzluk sağlamak için de kullanılırlar [62].

Parçacık takviyelerin kompozit malzeme performansını etkileyen etmenler yüzey enerjisi, sahip olduğu boyutlar, kompozit içerisindeki dağılımları, hacimsel oranlar, eksenlerin hangi yönlerde yönlendiği gibi etmenlerdir. Bu türdeki kompozitlerin roket teknolojilerinden PVC üretimine kadar çok geniş bir uygulama alanı mevcuttur [63].

Seramik veya metal partiküllerden ve camdan yapılan fiber dolgulardan oluşan sert partikül dolgular, aşınma direnci gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmek için bugünlerde kullanılmaktadır. Seramik dolgulu polimer kompozitler, son yirmi yılda kapsamlı araştırmaların konusu olmuştur. Ticari uygulamalar için polimerlere

inorganik dolgu maddelerinin dahil edilmesi, esas olarak maliyeti düşürmeyi ve sertliği iyileştirmeyi amaçlamaktadır [65].

#### 4.4.1 Kullanım alanları

Son yıllarda, seramik/polimer kompozit malzemeler, nispeten düşük maliyetle imal edilebildikleri ve termal ve mekanik özellikleri tasarım aşamasında kolayca optimize edilebildikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Genel olarak, seramik/polimer kompozitler, polimer matrisi güçlendiren dolgu maddeleri olarak seramik partiküller içerir. Polimerlerin genellikle oldukça zayıf termal iletkenliğe sahip oldukları iyi bilinmektedir. Bu nedenle, seramik/polimer kompozitlerdeki güçlendirici seramik partiküllerin diğer ana görevi, kompozitlerin termal iletimini arttırmaktır. Seramik/polimer kompozitleri oluşturmak için polimer matrislere silika, alümina, alüminyum nitrür, bor nitrür gibi birçok türde seramik parçacık uygulanmıştır ve bunların termal iletkenlik polimer matrislere göre daha yüksek bulunmuştur. [66].

Termal olarak iletken ancak elektriksel olarak yalıtkan, aynı zamanda maliyet etkinliği ve tasarım esnekliği için, seramik partikül takviyeli epoksi kompozitler büyük ölçüde elektronik ambalaj veya substrat malzemeleri olarak kullanılır. Bununla birlikte, son birkaç on yılda, mikroelektronik sistemlerde, daha yüksek entegrasyon yoğunluğu, daha hızlı performans, elektronik cihazların minyatürleştirilmesi ve daha düşük maliyetin iyileştirilmesine büyük katkıda bulunmuştur [67].

Son zamanlarda, umut verici elektriksel, mekanik ve termal özelliklere sahip yapışkan malzemelerin kaplanması, havacılıkta uygulanabilir özel güç kaynakları üretme alanında genel ilgiyi ve araştırma ilgisini tetiklemiştir. İnorganik partikül dolgulu polimer esaslı hibrit çömlek yapıştırıcıları, polimer matris, kürlenme ajanı, kürlenme hızlandırma ajanı, plastikleştirici, termal olarak iletken dolgu, reaktif seyreltici ve kalıptan çıkarma ajanından oluşur. Farklı ticari markalarda çok sayıda epoksi reçinesi, yüksek Young modülü, masif alt tabakalara karşı güçlü bağlanma kuvveti, yüksek solvent direnci ve düşük üretim maliyeti sayesinde hibrit saksı yapıştırıcıları matris malzemeleri olarak kullanılmıştır. Farklı epoksi reçinelerinin matrisler olarak karıştırılmasının, aynı zamanda, kompozit çömlek yapıştırıcılarında arzu edilen yüksek akışkanlık ve yüksek mekanik mukavemetin elde edilmesinde oldukça yardımcı olduğu bulunmuştur [68].

#### 4.4.2 Üretim yöntemleri

Partikül takviyeli kompozit malzemelerde tercih edilen takviye malzemelerini genel olarak silisyum karbür (SiC), bor karbür (B<sub>4</sub>C) gibi karbürler, alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) gibi oksitler, silikon nitrit (Si<sub>2</sub>N<sub>4</sub>) ve alüminyum nitrit (AlN) gibi nitritler, C, Si gibi elementler meydana getirmektedir. Bu tür kompozitlerin üretimleri sahip oldukları matris yağısına göre üç farklı şekilde gruplandırılır [69, 70]:

##### A) Katı faz üretim yöntemleri

- Toz metalürjisi
- Difüzyonla bağlanma
- Mekanik alaşımlama

##### B) Sıvı faz üretim yöntemleri

- Karıştırmalı döküm yöntemi
- Sıkıştırma döküm yöntemi
- Kompo döküm yöntemi

##### C) İkili üretim yöntemleri

#### 4.4.2.1 Toz metalürjisi

Toz metalürjisi tekniği katı faz üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde toz bir yapıdaki metalin parçacık haldeki takviye malzemeleri ile karıştırılmasıyla yapılan kompozit üretimi gerçekleştirilir. En çok tercih edilen takviye malzemelerini grafit, silisyum karbür ve titanyum karbür oluştururken, en çok tercih edilen matris malzemelerini bakır, titanyum ve alüminyum oluşturmaktadır. Bu yöntem kullanılarak üretilen kompozitlerin genel olarak üretimi düşük sıcaklıklarda yapıldığından matris-takviye malzemesi arasındaki bağ daha düşük seviyede kalmaktadır. T/M yöntemi sayesinde üretilen kompozitlerde takviye malzemesinin matris malzeme içerisine daha homojen bir şekilde dağılımı sağlanabilmektedir. Yüksek takviye hacim oranının elde edilmesi mümkün olmaktadır. Böylece üretilen kompozitlerin sahip olduğu bazı özelliklerde (yüksek modül, düşük termal genleşme katsayısı gibi) gelişme kaydedilebilmektedir [71].

Difüzyon bağı yönteminde ise, kompozit üretimi matris-takviye malzemesi arasındaki bağı kuvvendirilmesi adına takviye malzemelerinin metal folyolar üzerinde belli bir açıda ve miktarda yerleştirilerek ergime sıcaklığı civarındaki sıcaklıklarda haddeleme ya da baskılama yapmak suretiyle kompozit malzeme üretimine dayanmaktadır [71].

#### **4.4.2.2 Sıvı faz üretim yöntemleri**

Bu yöntemde ilk olarak bir ön şekillendirme yapılmaktadır. Yine bu aşamada hacimsel oran ve fiber yönelendirme gibi parametreler ayarlanmaktadır. Üretilmiş olan ön şekiller daha sonra kalıba bağlayıcı yardımı ile yerleştirildikten sonra kalıba ergimiş metal verilerek, katılaşması beklenir. Yöntem hızlı ve üretim kapasitesi oldukça yüksek olması, nihai ürüne daha yakın bir üretim fırsatı sunması en büyük avantajları arasında yer almaktadır [71].

Sıkıştırılmalı dökümde; ön ısıtmaya tabi tutulmuş, takviye malzemesinin metal bir kalıba yerleştirilmesi ile oluşan ön şekile ergimiş metal verilmesi ve buna da yüksek basınç uygulanması ile katılaşmanın sağlandığı kompozit üretim yöntemidir [71]. Yöntem daha çok düşük ergime sıcaklığına sahip parçacık takviyeli MMK malzemelerde kullanılan bir yöntemdir. Takviye malzemesi üzerine ergiyik haldeki metal parçacıkların plazma püskürtme yöntemiyle püskürtülmesi ile yapılan bir işlemdir. Yapışan parçacıklar hızla katılaşmaktadırlar [71].

#### **4.4.2.3 İkili üretim yöntemleri**

Katı-sıvı üretim tekniği, takviye malzemelerinin faz diyagramında hem sıvı hem katı hale sahip olan matris malzemesinin bünyesine katılmasıyla yapılan kompozit üretim tekniğidir ve birden fazla faza sahip malzemelerin biriktirilmesi, kompo döküm, sprej biriktirme gibi teknikler kullanılır [72]. Kompozit üretimi amacıyla yapılan biriktirme işlemi öncelikle fiberlerin matris malzemesi bünyesine katılması ve daha sonra difüzyon ile bağlanma aşamalarından oluşmaktadır. Böylece üretilen ürünlerde döküm yöntemine göre daha homojen bir yapı elde edilmektedir. Yapılan biriktirme işlemleri sprej biriktirme, daldırma ve elektrokaplama, PVD ve CVD gibi farklı yöntemlerden oluşmaktadır [72].

## 5. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Kırmızı çamur konusunda dünyada ve ülkemizde farklı birçok çalışma yapılmıştır. Kırmızı çamurun değerlendirilmesi; çevre kirliliğinin azaltılması, yarattığı depolama sorunu, maliyeti ve içerdiği bazı değerli metaller açısından büyük önem taşımaktadır. Bu anlamda geliştirilen ya da geliştirilmiş pek çok prosesin ekonomik anlamda yeterli olmaması uygulama alanlarını kısıtlıyor olsa da araştırmalar halen devam etmektedir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Kavas [5]; kırmızı çamur ve bor atıklarını belli oranlarda birbirleri ile karıştırmak suretiyle kaliteli yapı malzemesi üretmeyi amaçlamış ve tuğla üretimi açısından elverişli olup olmadığını denemiştir. Sonuçta, yapı malzemesini kaliteli bir şekilde üretmeyi başarmış ve kırmızı çamur-tuğla toprağına göre üstün özelliklere sahip olduğunu tespit etmiştir.

Oğuz ve arkadaşları [73]; Polialinin/kırmızı çamur katkılı kompozit hazırlamışlar ve sonrasında TGA deneyi sonucunda kırmızı çamur oranı ve zamanda sıcak artmasıyla birlikte kırmızı çamur katkılı polialinin katkısız polialinine göre termal kararlılığının arttığını tespit etmişlerdir.

Singla ve arkadaşları [74]; SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve kırmızı çamur malzemelerini kullanarak bir çalışma yapmışlar ve bu üç farklı malzemeye ağırlıkça %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranlarında alüminyum 6061 ilave etmişlerdir. Daha sonra bunların aşınma ve sertlik değerlerine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışman sonucunda, kırmızı çamura alüminyumun sertlik ve aşınma direnci kazandırdığını gözlemlemişlerdir.

Sivri ve arkadaşları [75]; Konya Eti Alüminyum firmasından temin edilen kırmızı çamuru kullanarak üretilecek kompozit kürelerle tekstil atık sularından reaktif boyar madde (mavi, RB21) giderimi üzerine çalışmışma yapmışlardır. Bu sebeple milimetre boyutlarında kırmızı çamur-aljinat kompozit küreler üretmişlerdir. Reaktif bir tekstil boyası (mavi, RB21) içeren çözeltiler, konsantrasyonu 50 ppm olacak şekilde hazırlanmış ve çözeltilerin pH değerleri, NaOH ve HCl çözeltileri kullanılarak pH  $\cong$  3,2-4,4-6,1-8,4-10,1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Boya giderim çalışmaları 100 mL 50 ppm boya çözeltileri ve 0,3 g kurutulmuş ve 1,5 M HCl ile işleme tabi tutulmuş

kompozit kürelerle, iki saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda en yüksek boya gideriminin (% 98)  $pH \cong 6,1$ 'de ve en düşük boya gideriminin ise (%82)  $pH \cong 3,2$ 'de elde edildiği belirlenmiştir.

Apak ve arkadaşları [76]; kırmızı çamur ve kömür uçucu külünü kullanarak sudan Pb (II), Cu (II), Cd(II) gibi toksik özelliğe sahip metallerin arındırmak üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda sudaki toksik metal ve ucuz atıklardan adsorpsiyon ile kurtulmayı başarmışlardır.

Ashok ve arkadaşları [77]; çimentonun %15 kadarını kırmızı çamur kullanarak değiştirmişler ve sonuç olarak kırmızı çamurun optimum kullanım oranını göstermişlerdir. Metallerin çözelti ve absorban arasındaki dağılımlarının sıcaklık, sulu ortamdaki metallerin denge konsantrasyonu ve absorban tipine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptıkları gözlemler neticesinde farklı birçok metal oksit partiküllerden oluşan atıkların absorban olarak kullanılabilceğini tespit etmişlerdir.

Satapathy ve Patnaik [78]; yapmış oldukları çalışmada izotaktik polyester malzemesine %10, %20 ve %30 oranlarında kırmızı çamur ekleyerek bir kompozit yapı elde etmişlerdir. Kırmızı çamurun eklenmesinin, kompozitin yoğunluğunu arttırdığı tespit edilmiş ve bu üç farklı kırmızı çamur yüzdesine sahip numunelerin sahip olan numunelerin yoğunluklarını da sırasıyla 1,67, 1.81 ve 1.93 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçmüşlerdir. Kırmızı çamur ilavesi arttıkça sertlik değerinin arttığı ölçülen vickers mikro sertlik değerlerini % 10 için 54 HV , %20 için 59 HV ve %30 için 62 HV bulmuşlardır. Ayrıca, çekme gerilimleri 174 Mpa'dan, %10 kırmızı çamur ilavesi sonucunda 162,3 MPa'ya, %20 için 156,7 MPa'ya, %30 için ise 151,3 MPa değerine kadar düşmüştür. Tüm numunelerde, kompozitlerin çekme mukavemeti, kırmızı çamur ilavesi ile azalma göstermiştir.

Rana ve Sathe [79]; yaptıkları çalışmada betona %20 oranında silis dumanı ve %10 oranında kırmızı çamur ilave ederek beton bünyesindeki çimento maliyetini %6,43 oranında azaltarak daha ekonomik bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır.

Metilda ve arkadaşları [80]; çalışmalarında beton içerisine %15 kadar kırmızı çamur eklemişlerdir. Bu durumun betonun basınç dayanımında herhangi bir düşüşe sebep olmadığını gözlemlemişlerdir.

Arhin ve arkadaşları [81]; kırmızı çamur kullanarak çimento bünyesine %5, %10, %15, %20 ve %25 gibi birçok farklı ekleme yaparak kırmızı çamur-çimento

kompozitleri üretmişler ve bunların eğme mukavemeni incelemişlerdir. Saf çimento ile bir karşılaştırma yaptıklarında sadece %5 kırmızı çamur ilavesi olan üründe eğme mukavemetinde artma gözlemlerken, diğer oranlarda eğme mukavemetinde giderek azalma tespit etmişlerdir. Bu duruma sebep olarak kırmızı çamur ilavesinin gözenekliliği artırmasını göstermişlerdir.

Banjare ve arkadaşları [82]; çalışmalarında kırmızı çamuru %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında epoksi reçine bünyesine katmayı denemişler ve bunun sonucunda ürettikleri kompozit yapılarda termal iletkenlik ve yoğunluk değerlerini incelemişlerdir. Saf epoksiyle karşılaştırıldığında bir artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Çengelöglü ve arkadaşları [83]; sudaki florun giderilmesi amacıyla kırmızı çamuru kullanmışlar ve bu amaçla kırmızı çamuru asitle muamele ederek aktifleştirmişlerdir. Sonuç olarak florun uzaklaştırma verimini artırdığını tespit etmişlerdir.

Gök ve arkadaşları [84]; yaptıkları çalışmada, polianilin ve kırmızı çamur kullanarak yeni tip iletken kompozitler üretmişlerdir. Burada polianilin iletken faz, kırmızı çamur ise inorganik destek olarak kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin sahip oldukları polianilin miktarına göre 0,42-5,2 Scm<sup>-1</sup> aralığında iletkenliğe sahip olduğunu belirlemişlerdir. Karakterizasyon yöntemleri arasında SEM, IR, XRD, UV-vis, gibi karakterizasyon yöntemleri bulunmaktayken IR, XRD sonuçlarına göre kırmızı çamur yüzeyine polianilinin varlığı tespit edilmiştir. Üretilen kompozitlerin küresel bir formda olduğunu ve yüzeysiz olanlara kıyasla kırmızı çamur üzerinde sentezlenenlerin daha küçük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Atasoy [85]; Seydişehir kırmızı çamuru üzerinde karakterizasyon araştırması yapmış, bu anlamda Türk kırmızı çamuruyla İrlanda kırmızı çamurlarını karşılaştırma yoluyla mineralojik, termal ve kimyasal bakımdan incelemiştir. Sonuç olarak her iki çamurun morfolojileri haricindeki diğer özelliklerinin çok farklılık gösterdiğini belirlemişlerdir. Alümina içerikleri benzemesine rağmen, İrlanda çamurunun daha yüksek seviyede kalsiyum ve titanyum ancak daha düşük seviyede silisyum, demir ve sodyum oksitleri barındırdığını tespit etmiştir.

Arslan ve arkadaşları [86]; Seydişehir kırmızı çamurunun bünyesindeki suyu uçurmak yoluyla, barajın ömrünü arttırmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Karakterizasyon çalışmaları için IR, XRD, XRF, TG/DTA, BET, SEM/EDX, PSD ve BET gibi analizler yaparak hem fiziksel hem de kimyasal bakımdan özelliklerinin tespitine

alışmışlardır. Çalışmada belli miktarda demir, alüminyum, titanyum ve skandiyum içeriği saptanmıştır. Nihai olarak yapılan filtreleme yöntemi işe yararış ve kırmızı çamurun bünyesindeki su %70 oranından %30 oranına kadar düşürölmüştür.



## 6. MALZEMELER ve YÖNTEMLER

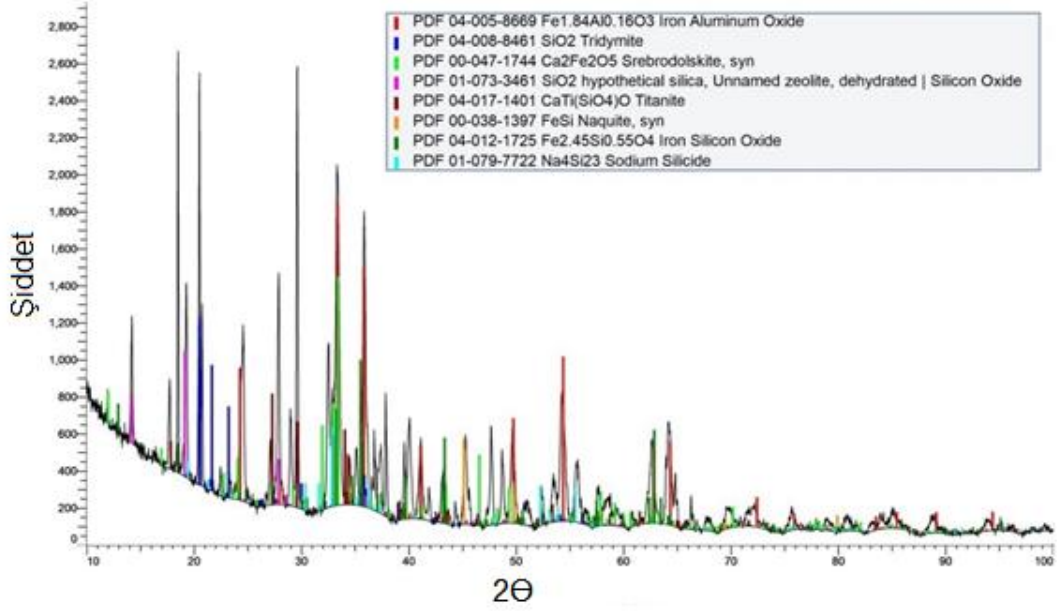
### 6.1 Malzemeler

#### 6.1.1 Kırmızı çamur

Çalışmada Konya Eti Alüminyum firmasından temin edilen atık kırmızı çamur kullanılmıştır. Sert, katı ve kısmen topaklı haldeki kırmızı çamur porselen havanda ince toz haline gelene kadar öğütülerek proseste kullanılabilir hale getirilmiştir. Kırmızı çamur hiçbir ön işleme tutulmadan XRF elementel kimyasal analizi (Çizelge 6.1) ve XRD (Şekil 6.1) ile faz analizi gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 6.1 :** Hiçbir ön işleme tabi tutulmamış kırmızı çamurun XRF analiziyle belirlenen elementel bileşimi.

Element	% Ağ.
Fe	37,80
Ca	21,50
Al	16,70
Si	9,28
Na	9,07
Ti	4,13
Mg	0,32
S	0,31
K	0,29
Zr	0,20
Cr	0,11
Ni	0,10
Zn	0,08
As	0,04
P	0,04
Co	0,04
Sr	0,03
Y	0,03
Cl	0,02
Nb	0,01



**Şekil 6.1 :** Hiçbir işleme tabi tutulmamış kırmızı çamurun XRD analizi sonucu.

Kırmızı çamurun oldukça yüksek oranda demir, kalsiyum ve alüminyum içerdiği belirlenmiştir. Bu elementlerin yanı sıra azımsanmayacak oranlarda silisyum, sodyum ve titanyum içerdiği saptanmıştır. Ayrıca her biri %0,5'in altında olmak kaydıyla diğer pek çok elementin (S, K, Zr, Cr, Ni, Zn, As, P, Co, Sr, Y, Cl, Nb) de kırmızı çamurda bulunduğu saptanmıştır. Kırmızı çamurun XRD analizi sonucunda yapıda çok sayıda farklı kristalin yapıya sahip fazın bulunduğu belirlenmiştir. Bu fazların demir, silisyum ve alüminyum gibi kırmızı çamurun yapısında bolca bulunan elementleri içerdiği belirlenmiştir (Şekil 6.1).

### 6.1.2 Epoksi reçine

Tez çalışması kapsamında matris malzemesi olarak solventsiz döküm tipi ultra şeffaf epoksi reçine (Master Boya) kullanılmıştır. Epoksi reçineler genel olarak kompozit üretmek amacıyla bünyesine takviye katılarak, koruyucu kaplama ve yapıştırıcı üretiminde kullanılabilirler. Çalışmada tercih edilen epoksi reçine ise 2/1 oranında kullanılabilen kolay bir karışıma sahiptir. Yavaş kuruyan yapısı ile hava kabarcığı bırakmadan, harika yüzey düzgünlüğü, tek seferde daha kalın döküm imkanı, her türlü ahşap kaplama, dekoratif eşya, biblo dökümü, takı tasarım, mobilya kaplama ve etiket kaplama gibi işlemler için de son derece uygun bir üründür. Kristal parlaklığında kesinlikle sararma yapmayan, ekstra UV katkısı sayesinde mükemmel dayanım ve cam görünümünde kusursuz parlak yüzey sağlamaktadır.

### **6.1.3 Sertleştirici**

Sertleştirici olarak ise yine aynı firmaya ait (Master Boya) döküm tipi epoksi reçine sertleştirici kullanılmıştır. Sertleştirici 1/2 (7:14) oranında epoksi reçineye katılarak kolayca kullanılabilir. Epoksi kaplamaların sertleştirici yardımıyla sertleştirilmesi sonucunda mekanik ve kimyasal değerlerde artış, bazı özelliklerinde (UV ve su gibi) direncinin arttığı bilinmektedir.

### **6.1.4 Sodyum aljinat**

Çalışmada E401 (Gemici Gıda Tic. Ltd. Şti.) sodyum aljinat kullanılmıştır. Sodyum aljinat bir asit sodyum tuzudur ve genellikle gıda sektöründe katkı maddesi olarak kıvam artırma amacıyla kullanılır. Suda çözünme, yüksek su tutma, yüksek oranda aljinasyon sayesinde çözünme ve kalınlaşma sonucunda bağlanabilme özelliklerine sahiptir. Ayrıca sodyum ile kalsiyum iyonlarının yer değiştirmesi durumunda ısı olmasa dahi bir jel oluşturabilir. XIX. yüzyılın sonlarında ilk olarak Edward CC Stanford tarafından patenti alınmıştır. Edward CC Stanford deniz yosunlarını kullanarak sodyum aljinat eldesini gerçekleştirmiştir.

### **6.1.5 Kalsiyum klorür**

Çalışmada E509 (Gemici Gıda Tic. Ltd. Şti.) kalsiyum klorür (gıda) kullanılmıştır. Kalsiyum klorür ( $\text{CaCl}_2$ ), herhangi bir kokuya sahip olmayan, nem tutma özelliğine sahip, beyaz renkte bir tuzdur. Bunun haricinde su ya da alkole katıldığında çözünür. Gıda maddesi olarak kullanılan E kodu E509'dur. Kimya endüstrisinde kullanımının yanı sıra, içme suları, peynir ve konserve üretimi gibi gıda sektörü alanlarında ve kışın buz tutmuş yollarda buz kırma amacıyla kullanılır. Nem ve suya karşı yüksek emici özelliğe sahip olmasından dolayı ambalajları kapalı şekilde saklanması gerekmektedir.

## **6.2 Kullanılan Cihaz ve Aletler**

Çalışmada Fritsch Pulverisette marka bilyalı değirmen kullanılmıştır. Kullanılan bilyalar ise zirkonya bilyalardır. Değirmen, yapılan çalışma esnasında 300 rpm'de 45 dk'lık süreyle kırmızı çamur tozu-aljinat karışımını öğütmek amacıyla kullanılmıştır. Bilyalı değirmende uygulanan öğütme işlemiyle tane boyut dağılımını ayarlamak mümkündür. Bu süreçte önemli olan süreç değişkenleri başlangıç başlangıç tane boyutu, değirmen iç haznesinin malzeme türü, kullanılan bilyanın malzemesi, bilya

boyutu ve bilya miktarı, katı oranı, değirmen devir hızı ve öğütme süresidir. Öğütme hem bilya değirmen haznesi, hem de bilya – bilya arayüzeyinde yüksek hızlı çarpmaların bir sonucu olarak meydana gelmektedir.

Çalışmada %2'lik sodyum aljinat ve  $\text{CaCl}_2$  çözeltilerini hazırlamak amacıyla ısıtıcı özelliğine de sahip olan Istotex firmasına ait manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Sodyum aljinat çözeltisi orta devirde (500-700 rpm),  $50^\circ\text{C}$ 'de karıştırma yapılarak yaklaşık 4 saatte gerçekleştirilmiştir.

Kırmızı çamur tozu-sodyum aljinat karışımı bilyalı değirmende öğütüldükten sonra elde edilen çözelti New Era Pump Systems Inc. firmasına ait NE-1000 Programmable şırınga pompası yardımıyla manyetik karıştırıcıda karıştırılmakta olan beher içerisindeki  $\text{CaCl}_2$  çözeltisine belirli bir hızla damlatılmıştır. Kullanılan cihaz Şekil 6.2'de gösterilmektedir.



**Şekil 6.2 :** Şırınga pompası.

Çalışmada gerekli tartım işlemlerini yapmak amacıyla OHAUS PA214C marka, 0,0001 g hassasiyete sahip terazi kullanılmıştır.

Üretilen numuneleri sinterlemek amacıyla Nevola firmasına ait Thermnevo-Reis Serisi  $1300^\circ\text{C}$ 'lik kutu tipi fırını kullanılmıştır (Şekil 6.3).



**Şekil 6.3 :** Numuneleri sinterlemek için kullanılan Nevola firmasına ait Thermnevo - Reis Serisi sinter fırını.

Cihaz, üretilen numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra bünyesindeki çapakları gidermek ve yüzey düzgünlüğü sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Parlatma işleminde kullanılan zımpara kağıtları 600 mesh'dir. Parlatma işlemi amacıyla ATM firmasına ait Saphir 520 model bir cihaz kullanılmıştır. Cihazda numuneleri otomatik bir şekilde parlatma uygulaması yapılabilmesine rağmen numune boyutlarının uygun olmaması sebebiyle cihazda elle parlatma işlemi uygulanmıştır.

## 6.3 Deneysel Yöntem

### 6.3.1 Kırmızı çamur kürelerinin oluşturulması

Çalışmada ilk olarak kırmızı çamurun porselen havanda elle öğütülmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Topaklaşmış haldeki kırmızı çamur havanda ince toz haline gelene kadar öğütülerek proseste kullanılabilir hale getirilmiştir. Ardından 150 ml %2'lik aljinat çözeltisine, 30 g kırmızı çamur ve 200 g  $ZrO_2$  bilya eksenel değirmen haznesine konularak 300 rpm' de 45 dk süreyle öğütme işlemi yapılmıştır.

Öğütme sonrası çamur süzgeç yardımıyla bir behere süzölmüştür. Bu çamurdan sonra şırınga yardımıyla 50 mL kadar çekilerek ucuna gri veya yeşil uçlu iğneler takılmıştır. Bu şırınga bir şırınga pompasına yerleştirilmiştir. Şırınganın pompaya yerleştirilme düzeni Şekil 6.4’de gösterilmektedir.



**Şekil 6.4 :** 50 mL kırmızı çamur içeren şırınganın şırınga pompasına yerleştirilme düzeni (şekilde gri uçlu iğne).

Çalışmada farklı iki iğne kullanılmasının sebebi, kullanılan gri ve yeşil iğnelerin farklı çaplara sahip olmasıdır. Kullanılan iğnenin çapına bağlı olarak elde edilecek olan kırmızı çamur içerikli kürelerin çaplarında bir fark olup olmayacağını incelemek için bu denemeler yapılmıştır.

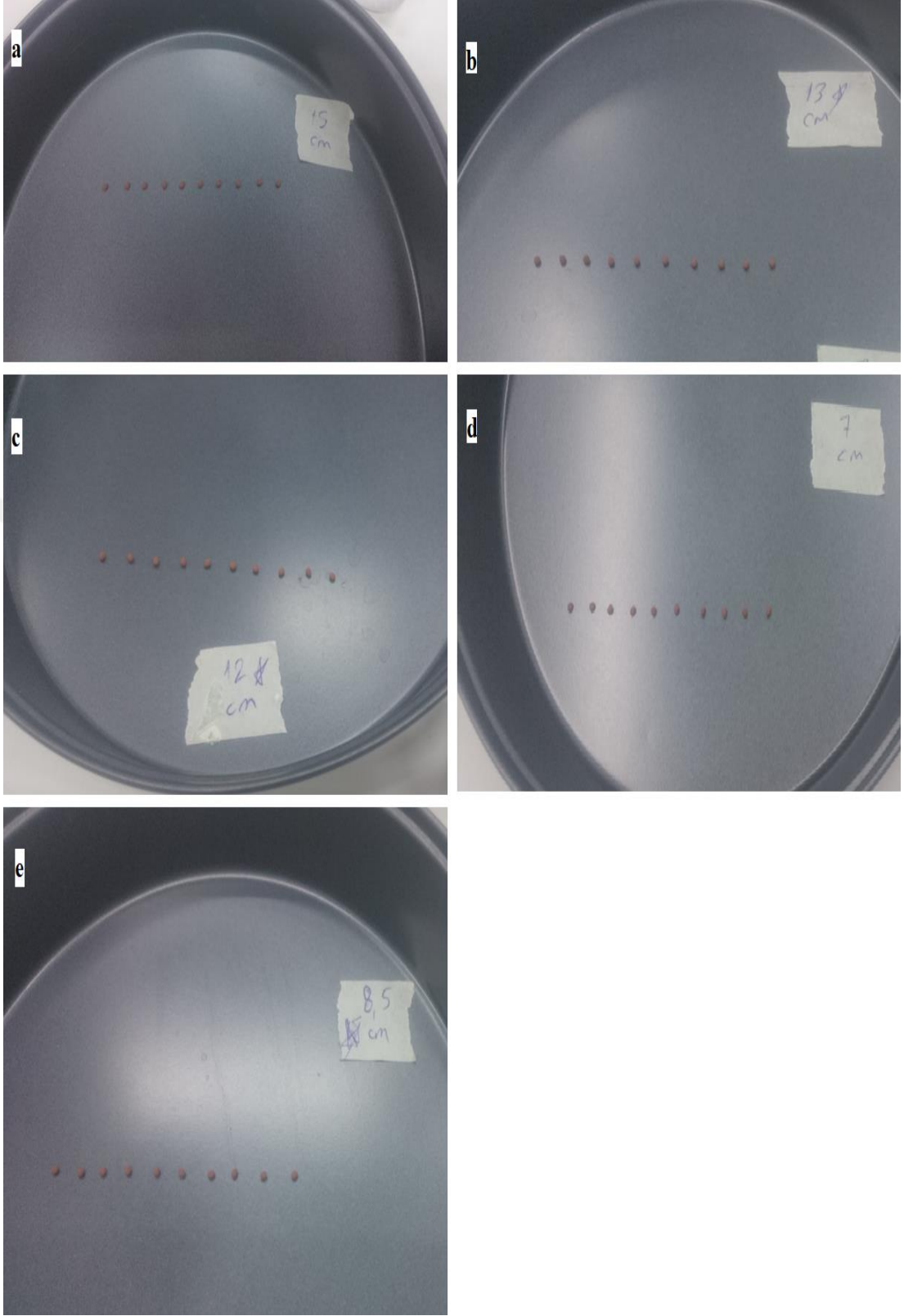
İyon değişiminin sağlanması için 1800 mL saf suya 20 g  $\text{CaCl}_2$  ilave edilerek manyetik karıştırıcıda  $\text{CaCl}_2$  çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan kırmızı çamur şırınga pompası yardımıyla 400 mL’lik  $\text{CaCl}_2$  içerisine damlatılarak kırmızı çamur-aljinat küreler elde edilmiştir. Çalışma deney düzeneği Şekil 6.5’de gösterilmektedir.



**Şekil 6.5 :** Kırmızı çamur – aljinat küre üretim deney düzeneği.

Ayrıca kırmızı çamur seramik kürelerin oluşumuna yapacağı etkinin incelenmesi amacıyla şırınganın damlatma yaptığı noktadan, beherdeki sıvı seviyesine kadar olan yüksekliğin prosese etkisini ölçmek amacıyla sadece yükseklik değiştirilerek beş farklı yükseklik değerlerinde ( $h = 15, 13, 12, 7$  ve  $8,5$  cm) sabit bir şekilde 600 mL beher ve 400 mL çözelti de yeşil uçlu şırınga ile denemeler yapılmıştır (pompa hızı 0,5 mL/dk). Bu denemeler sonucunda elde edilen numunelerin fotoğrafları çekilerek her bir yükseklikte yapılan denemeler sonucunda elde edilen kırmızı çamur seramik kürelerin morfoloji ve boyutları incelenmiştir (Şekil 6.6).

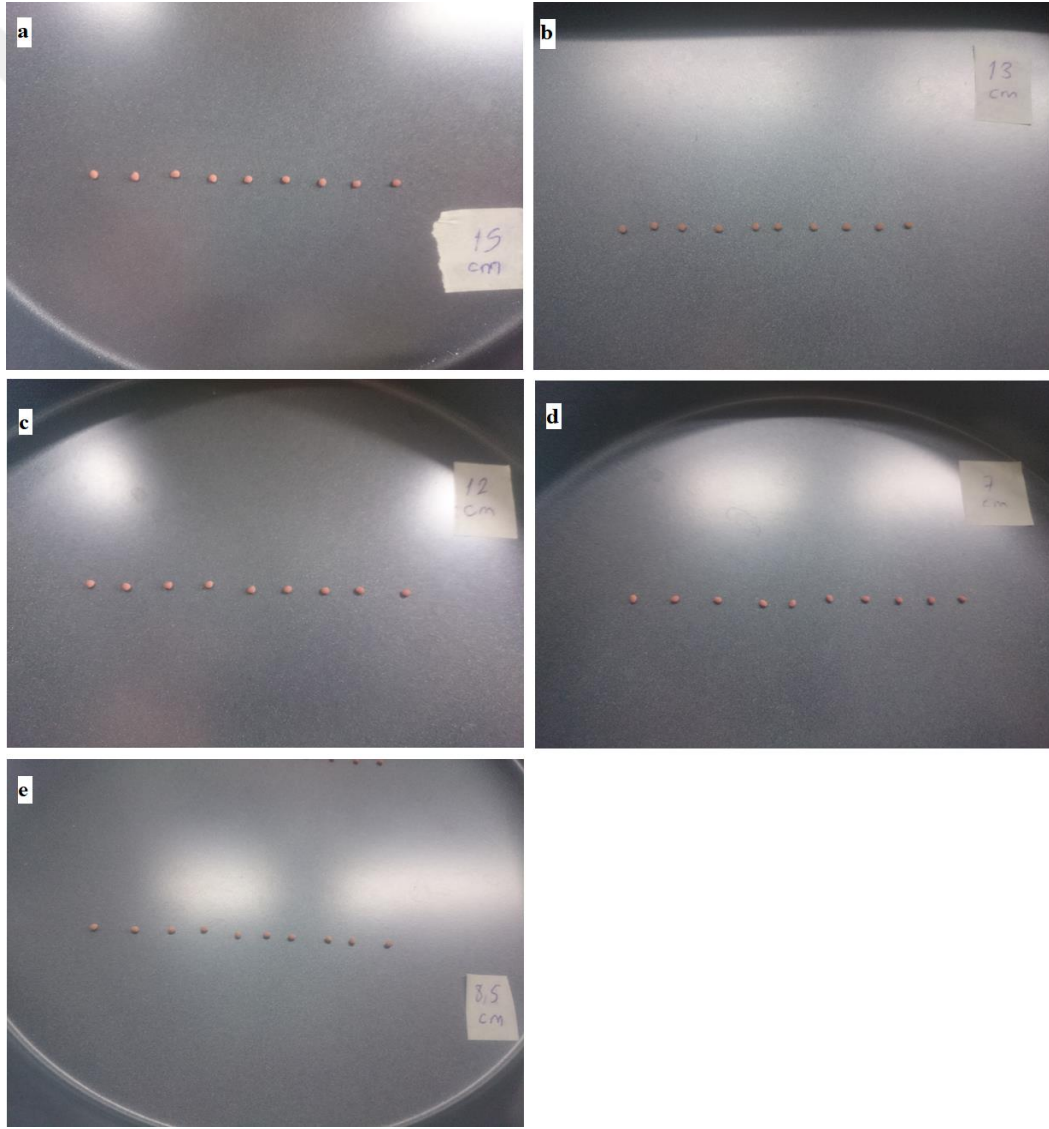
Yapılan denemeler sonucunda en iyi küresel şekle sahip olan numunelerin  $h = 8,5$  cm'de elde edildiği belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmada  $h = 8,5$  mesafede üretilen kürelerle çalışmanın devamına karar verilmiştir. Yeşil şırınga ucu (pompa hızı 0,5 mL/dk) ile seri üretimi yapılmış olan numuneden bir de gri şırınga ucu (pompa hızı 2,5 mL/dk) ile üretim yapılması kararlaştırılmıştır. Böylece kırmızı çamur, şırıngada gri uç takılı ve  $h = 8,5$  cm iken de bir miktar üretilerek sinterleme sonrası yeşil ve gri uçlu üretimin arasında fark olup olmadığı incelenmiştir.



**Şekil 6.6 :** Beş farklı damlatma yüksekliğinde üretilmiş olan kırmızı çamur-aljinat kürelerinin görünümleri; (a)  $h = 15$  cm, (b)  $h = 13$  cm, (c)  $h = 12$  cm, (d)  $h = 7$  cm ve (e)  $h = 8,5$  cm.

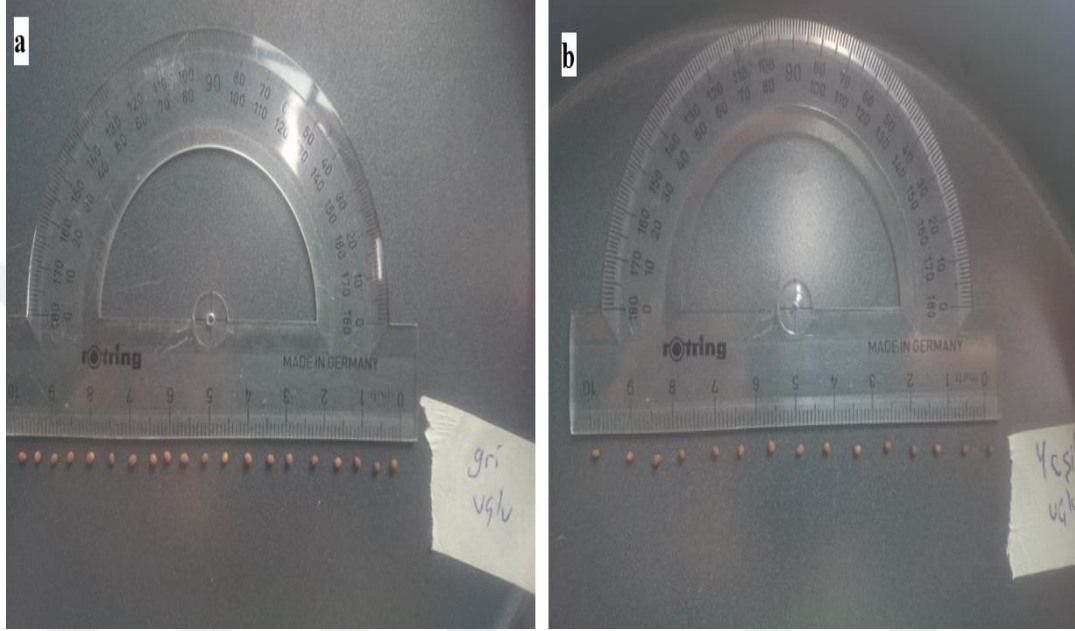
### 6.3.2 Sinterleme işlemi

Beş farklı yükseklikte üretilmiş kırmızı çamur-aljinat küre örnekleri ilk olarak 1000°C’de atmosfer koşullarında, 60 dk süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası yapılan incelemede numunelerin 1000°C’de çok gözenekli oldukları ve elle dahi kolayca kırıldıkları gözlenmiştir. Bunun üzerine sinterleme süresi sabit tutularak sinterleme sıcaklığı 1100°C’ye çıkarılmıştır. Fırından çıkartılarak inceleme yapılan numuneler kontrol edildiklerinde 1100°C’de kolayca kırılmadıkları ve 1000°C’ye göre daha dayanıklı oldukları tespit edilmiştir. Her bir yükseklikte üretilen kırmızı çamur seramik kürelerin 1100°C’de 60 dk süreyle yapılan sinterleme sonrası görüntüleri Şekil 6.7’de gösterilmektedir.



**Şekil 6.7 :** Beş farklı damlatma yüksekliğinde üretilmiş olan kırmızı çamur seramik kürelerin 1100°C’de 60 dk süreyle sinterlenmesi sonrası görünüşleri; (a)  $h = 15$  cm, (b)  $h = 13$  cm, (c)  $h = 12$  cm, (d)  $h = 7$  cm ve (e)  $h = 8,5$  cm.

Şekil 6.7 incelendiğinde, en uygun yükseklik olarak kararlaştırılan  $h = 8,5$  cm'de hem gri uçlu iğne hem de yeşil uçlu iğne kullanılarak üretilen kırmızı çamur küreleri için  $1200^{\circ}\text{C}$ 'de 60 dk süreyle yeni bir sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sonrasında yapılan incelemede kürelerin  $1200^{\circ}\text{C}$ 'de,  $1100^{\circ}\text{C}$ 'ye göre daha dayanıklı oldukları görülmüştür. Gerçekleştirilen sinterleme sonrasında elde edilen küreler Şekil 6.8'de sunulmaktadır.



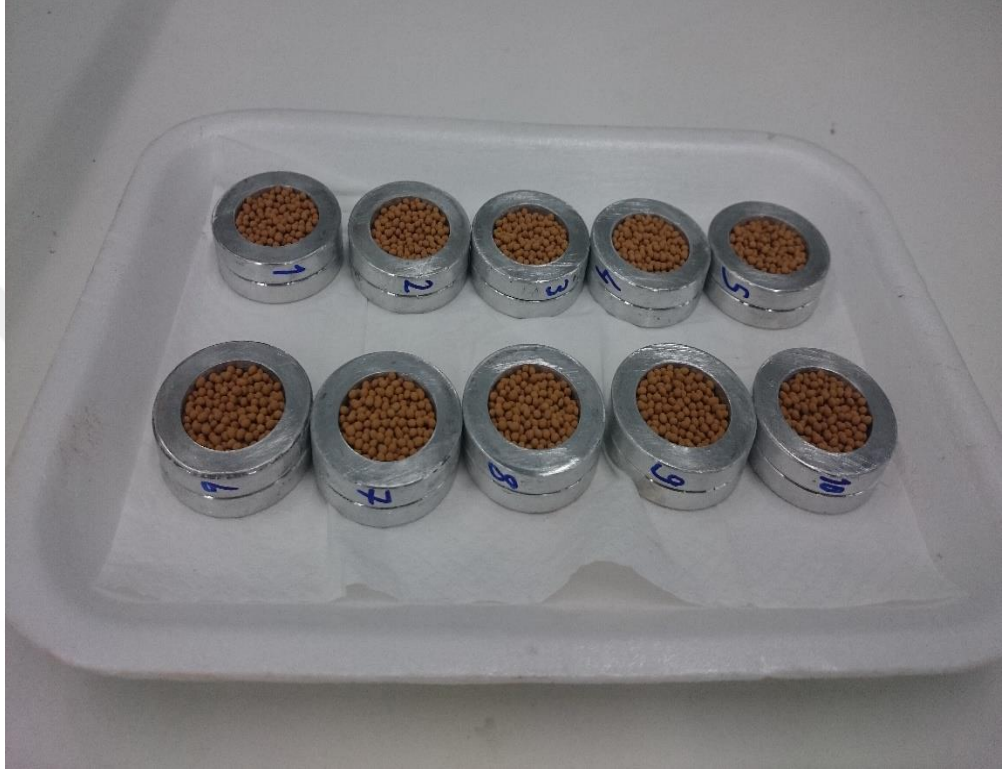
**Şekil 6.8 :** Farklı iğne ucu kullanılarak üretilen ve  $h = 8,5$  cm damlama yüksekliğine sahip kırmızı çamur seramik kürelerinin  $1200^{\circ}\text{C}$ ' de 60 dk süreyle sinterlenmesi sonrası görünüşleri; (a) gri uçlu ve (b) yeşil uçlu.

Sinterleme sonrası morfolojiler incelendiğinde gri veya yeşil uçlu iğne kullanımının önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Sinterleme sonucunda elde edilen morfoloji ve boyutlar oldukça benzerdir. Bu sebeple yeşil uçla üretim yerine gri uçla üretim yapılarak kompozit hazırlanmasına karar verilmiştir. Böylece gri uçla (pompa hızı 2,5 mL/dk) yapılacak olan üretim yeşil uçlu (pompa hızı 0,5 mL/dk) iğne ile yapılacak olan üretime göre daha hızlı olacaktır.

### 6.3.3 Kompozit hazırlama

Kompozit hazırlama aşamasında öncelikle  $1100^{\circ}\text{C}$  ve  $1200^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş olan kırmızı çamur küreleri ayrı birer kaptan toplanmıştır. Bu kırmızı çamur küreleri daha sonra 1'den 10'a kadar numaralandırılmış olan kalıplarda epoksi ve sertleştirici katılarak yapılacak olan döküm işlemine hazırlanmaları amacıyla hassas terazide tartım işlemine geçilmiştir.

Kırmızı çamur küreleri kalıbı yeterince doldurabilecek şekilde 1100°C’de sinterlenmiş olanlardan her biri 4 g, 1200°C’de sinterlenmiş olanlardan ise her biri 7,5 g olacak şekilde tartım işlemi yapılmıştır. Gramaj farklılığının sebebi 1100°C’ de sinterlenmiş kürelerin daha gözenekli ve büyük çaplı olmalarından dolayı kalıbı daha az gramaj ile doldurabilmesidir. Kürelerin 10 adet kalıba doldurulduktan sonraki durumu Şekil 6.9’da gösterilmektedir.



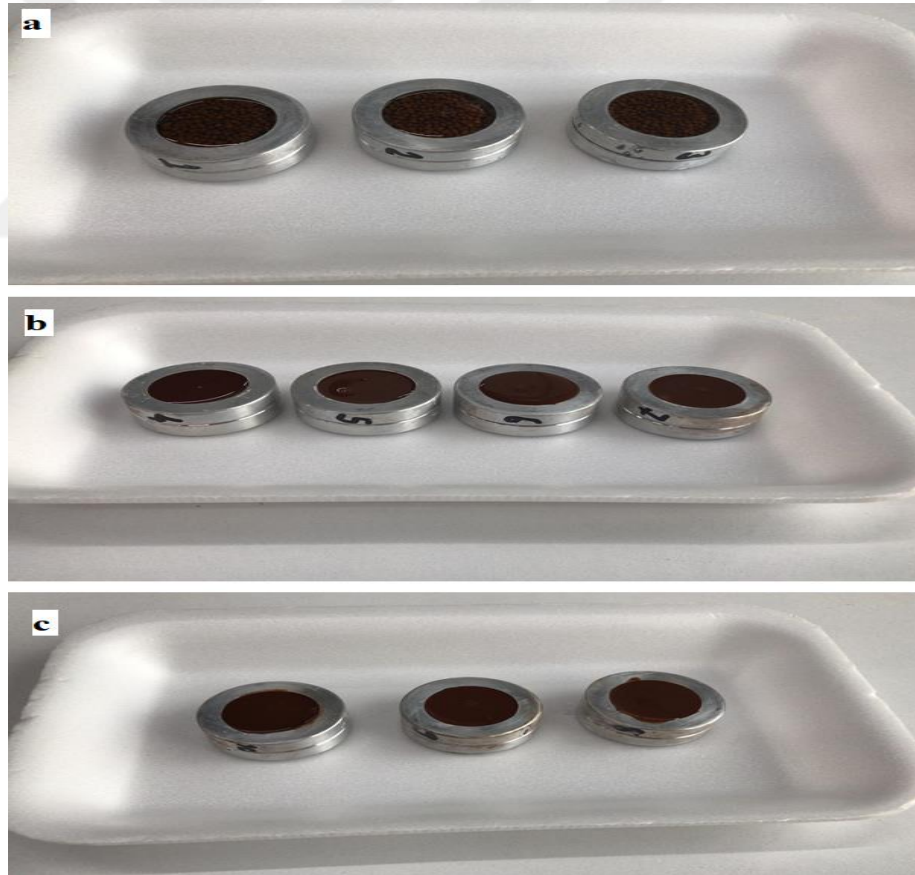
**Şekil 6.9 :** 1100°C’de sinterlenmiş olan kırmızı çamur kürelerinin 4’er g tartıldıktan sonra 1’den 10’a kadar numarlandırılmış olan kalıplara doldurulmuş hali.

Tartım işlemi tamamlanan ve kalıplara doldurulan 1100°C ve 1200°C’de sinterlenmiş kürelere üç farklı formasyonda soğuk döküm işlemi yapılmıştır. Bunun haricinde üretilen numunelerle kıyaslama yapılabilmesi amacıyla kırmızı çamur küreleri katılmadan yine üç farklı formasyonda soğuk döküm işlemi yapılmıştır. Numune hazırlama süreçlerinde dışarıdan katılan kırmızı çamur tozları öncelikle epoksi ile homojen bir şekilde mekanik olarak karıştırılmıştır. Tüm döküm işlemleri her bir formasyon için 5’er adet olacak şekilde yapılmıştır. Epoksi reçineye sertleştirici 2’ye 1 oranında (14:7) katılarak döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Döküm işlemleri Çizelge 6.2’de sunulduğu gibi yapılmıştır.

**Çizelge 6.2 :** Numunelerin farklı formasyonlarda üretimi.

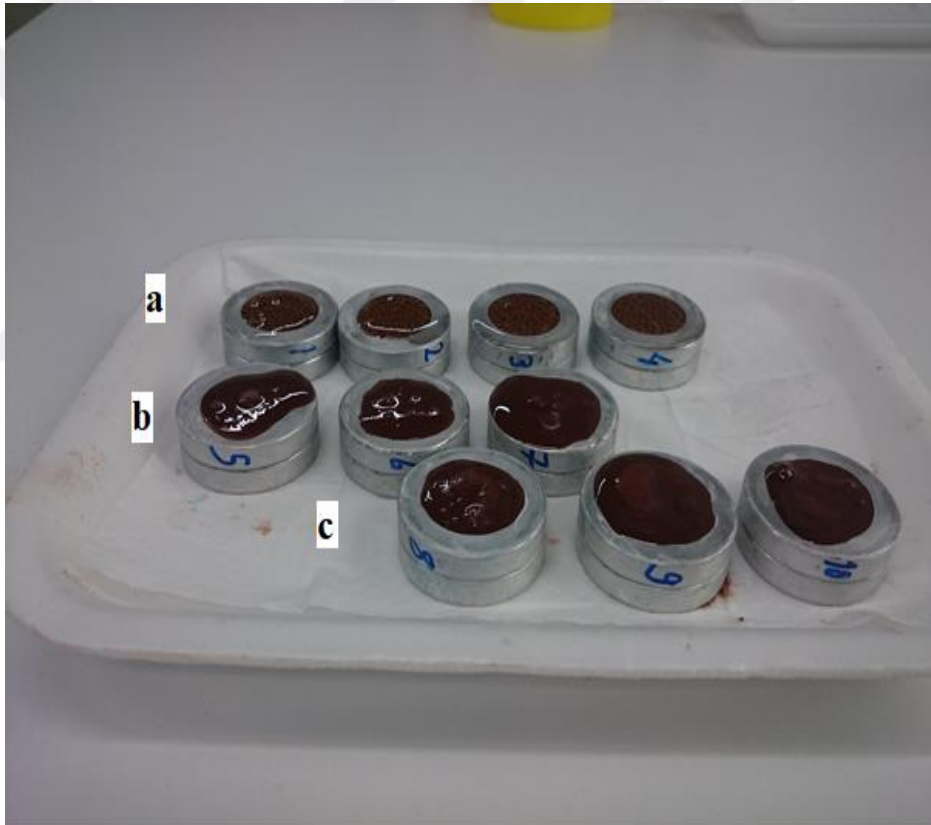
Numune	Sinter Sıc.(°C)	Bileşim
A1	1100	4 g küre + epoksi
A2	1100	4 g küre + epoksi + 2 g k.ç. tozu
A3	1100	4 g küre + epoksi + 4 g k.ç. tozu
A4	1200	7,5 g küre + epoksi
A5	1200	7,5 g küre + epoksi + 2 g k.ç. tozu
A6	1200	7,5 g küre + epoksi + 4 g k.ç. tozu
A7	-	epoksi
A8	-	epoksi + 2 g k.ç. tozu
A9	-	epoksi + 4 g k.ç. tozu

Çizelgedeki formasyonlar dikkate alınarak bütün soğuk döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. 1200°C’de sinterlenmiş kırmızı çamur kürelerinin döküm sonrasına ait görseller Şekil 6.10’da gösterilmektedir.



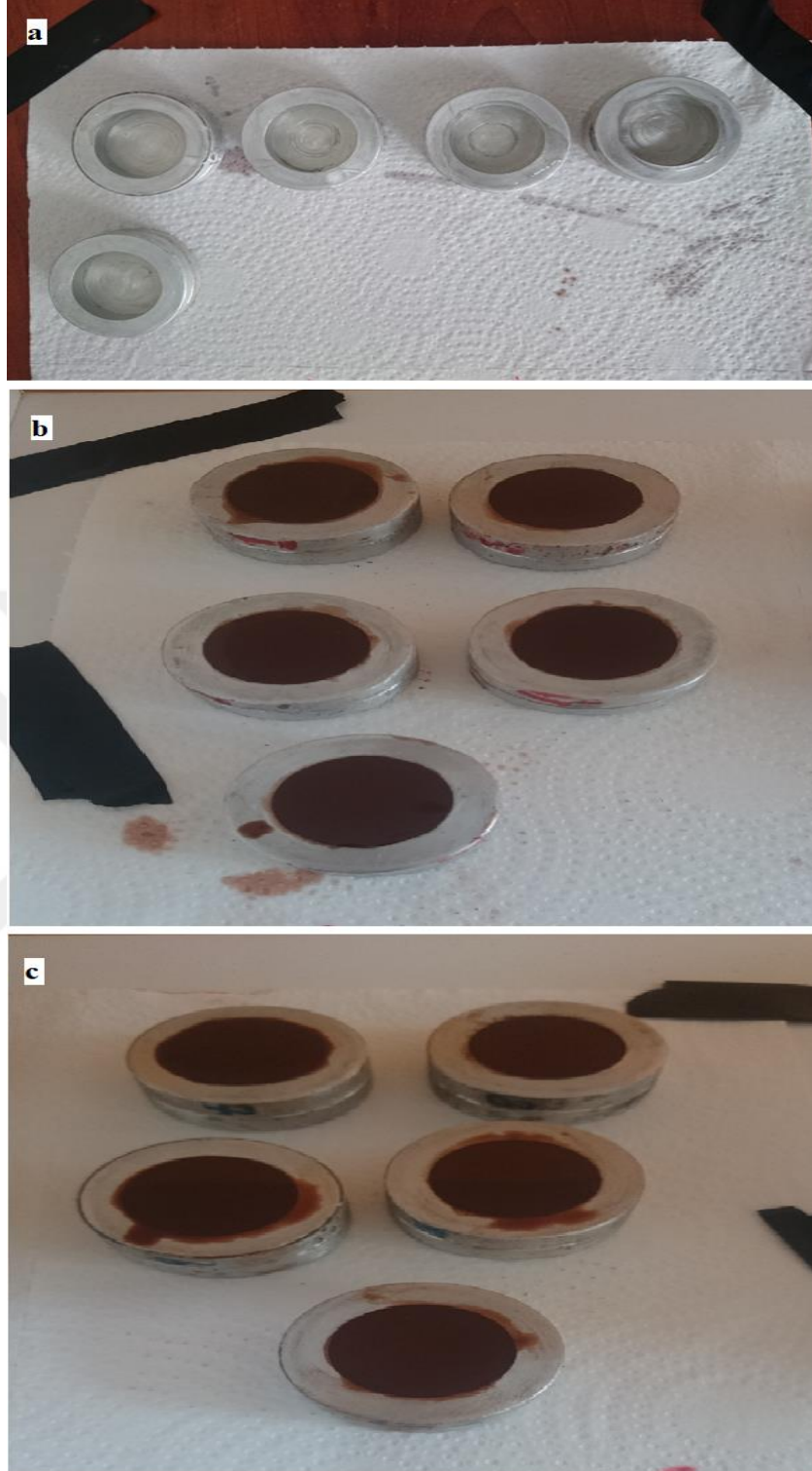
**Şekil 6.10 :** 1200°C’de sinterlenmiş kürelerin yapılan soğuk döküm işlemleri sonrası görüntüleri; (a) 1, 2 ve 3 nolu kalıplarda sadece epoksi reçine ve sertleştiricinin karıştırılarak katılmasıyla yapılan döküm, (b) 4, 5, 6 ve 7 nolu kalıplarda epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla yapılan döküm ve (c) 8, 9 ve 10 nolu kalıplarda epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla yapılan döküm.

Her bir formasyondan 5'er adet üretilecektir, Şekil 6.10'da sırasıyla 3, 4 ve 3 adet döküm yapıldığı görülmektedir. Bunun nedeni kalıp yetersizliğinden dolayı aynı anda sadece 10 adet kalıba döküm yapılabilmesidir. Yapılan ikinci döküm işlemiyle 5'er adete tamamlanmışlardır. Şekil 6.11, 1100°C'de sinterlenmiş kırmızı çamur kürelerinin döküm sonrası halini göstermektedir. Şekil 6.11'den de anlaşılacağı üzere 1100°C'de sinterlenmiş kürelere 1, 2, 3 ve 4 nolu kalıplarda sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılarak döküm yapılmıştır. 5, 6 ve 7 nolu kalıplara epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılması sonucu döküm yapılırken; 8, 9 ve 10 numaralı kalıplara ise epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılması sonucu döküm yapılmıştır. Yine burada da yapılan ikinci döküm işlemiyle her bir formasyon 5'er adede tamamlanmıştır.



**Şekil 6.11** : 1100°C'de sinterlenmiş kürelerin soğuk dökümden sonra, sertleşmeden önceki görüntüleri; (a) 1, 2, 3 ve 4 nolu kalıplarda kürelere sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılarak yapılan döküm, (b) 5, 6 ve 7 nolu kalıplarda kürelere epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak yapılan döküm ve (c) 8, 9 ve 10 nolu kalıplarda epoksi kürelere epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamur tozu katılarak yapılan döküm.

Kırmızı çamur küreleri katılmadan yapılan dökümlere ait numune görselleri Şekil 6.12'de verilmektedir.



**Şekil 6.12 :** Kırmızı çamur küreleri katmadan yapılan sade dökümler. (a) Sadece epoksi ve sertleştirici karıştırılarak yapılan döküm, (b) epoksi, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak yapılan döküm ve (c) epoksi, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak yapılan döküm.

Yapılan tüm döküm işlemleri 48 saat boyunca sertleşmeye bırakılmış, 48 saat sonra ise kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılmış numunelere ait görsel Şekil 6.13'de sunulmaktadır.



**Şekil 6.13 :** 1100°C’de sinterlenmiş olan kürelere sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılarak üretilen kompozitlerin sertleşme sonrası kalıptan çıkarılmaları.

#### 6.3.4 Zımparalama – parlatma

Şekil 6.13’de görüldüğü gibi kalıptan çıkarılan kompozit numunelerde çapak sorunu bulunmaktadır. Hem çapak gidermek, hem de testler için yüzey düzgünlüğü sağlayabilmek amacıyla numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra zımparalama-parlatma makinesinde elle parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. İşlem sonrası numunelerin görünümleri Şekil 6.14, 6.15 ve 6.16’da sunulmaktadır.



**Şekil 6.14 :** 1100°C’de sinterlenmiş kürelerin (a) sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılmasıyla, (b) epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla ve (c) epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla üretilen kompozitlerin zımparalama-parlatma sonrası görünümleri.



**Şekil 6.15 :** 1200°C’de sinterlenmiş kürelerin (a) sadece epoksi reçine ve sertleştirici katılmasıyla, (b) epoksi reçine, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla ve (c) epoksi reçine, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamurun karıştırılarak katılmasıyla üretilen kompozitlerin zımparalama-parlatma sonrası görünümleri.



**Şekil 6.16 :** Kırmızı çamur küreleri katmadan (a) epoksi ve sertleştirici karıştırılarak (b) epoksi, sertleştirici ve 2 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak ve (c) epoksi, sertleştirici ve 4 g kırmızı çamur tozu karıştırılarak yapılan döküm ile üretilen numunelerin görünümleri.

## 6.4 Karakterizasyon Yöntemleri

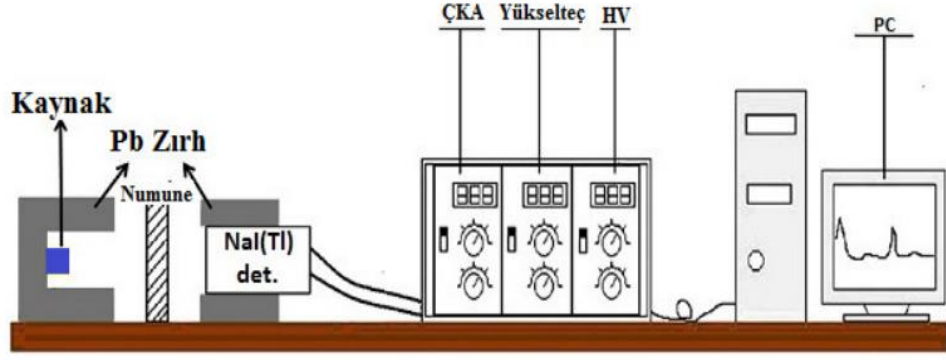
### 6.4.1 SEM analizi

Üretilen numunelerin SEM analizleri Selçuk Üniversitesi Taramalı Elektron Mikroskobu Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Öncelikle 1100°C ve 1200°C'de 1 saat boyunca sinterlenmiş kırmızı çamur kürelerinin taramalı elektron mikroskopuyla iç yapısı incelenmiştir.

### 6.4.2 Radyasyon kalkanlama analizi

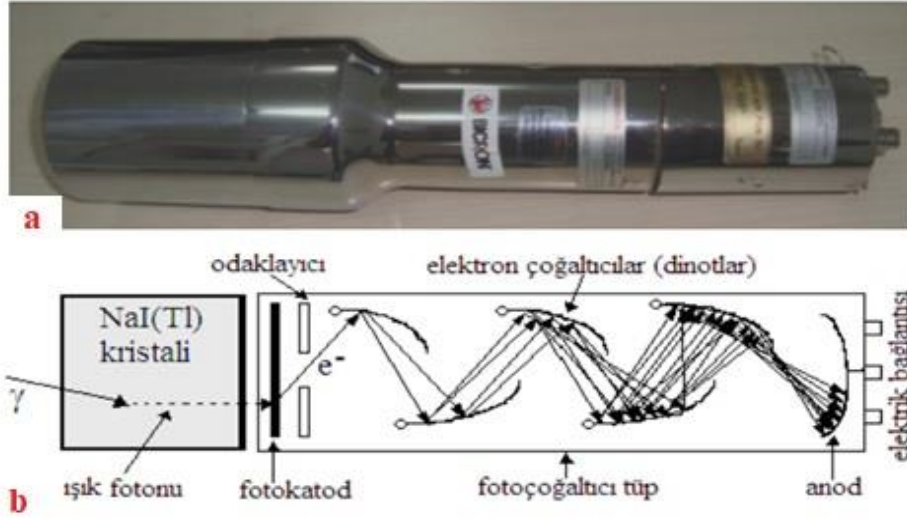
Üretilen numunelerin (A1–A9) gama radyasyonu soğurma özellikleri Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Nükleer Fizik A.B.D.'na ait Gamma Spektroskopi Laboratuvarı'nda ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan gama spektroskopi sistemi, NaI(Tl) detektörü, NIM modülü ve spektrum analiz yazılımı MAESTRO-32'yi içeren bilgisayardan oluşmaktadır. Numunelere ait soğurma performanslarının belirlenmesi amacıyla  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  radyoaktif kaynaklarının kullanımıyla toplamda üç farklı gama enerjisi sisteme sağlanmıştır.

Gama spektrometresi, bir malzemenin veya materyalin radyoaktifliğini belirlemek amacıyla kullanılan bir sistemdir. Eğer materyal radyoaktif ise bunun hangi radyoizotoptan kaynaklandığının tespit edilmesine yarayan ve bu radyoaktif elementlerin yaymış olduğu gama ışınlarını sahip olduğu enerjilere göre birbirinden ayıran sistemdir. Radyasyon kaynağından yayılan radyasyon, sistemdeki dedektör tarafından tespit edilerek, absorbe enerjisine orantılı bir akım darbesi meydana getirir. Meydana gelen bu darbe amplifikatör adı verilen çeviriciler ile voltaj darbesine çevirilerek oradan çok kanallı analizöre (ÇKA) gönderilir ve burada bilgisayarın okuyabileceği sayısal bir hale çevrilir. Bu sayısal veriler de ekranda spektrum şeklinde gösterilir. Gerekli bilgiler değerlendirme yapılabilmesi amacıyla giriş/çıkış (I/O) cihazı yardımıyla dışarıya aktarılır. Şekil 6.17'de bu sisteme ait düzenek verilmektedir [87].



Şekil 6.17 : Gama spektroskopi sisteminin şematik diyagramı.

Radyasyon dedektörleri kullanılan malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Dedektörler yarı iletken, gazlı ve sintilasyon (parıldayıcı) şeklinde üç farklı gruba ayrılmaktadır. Bu çalışmada 3"x3" boyutlara sahip bir NaI(Tl) sintilasyon dedektörü (ORTEC) yardımıyla gama radyasyonu spektrumlarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kullanılan dedektör Şekil 6.18'de gösterilmektedir [87].



Şekil 6.18 : (a) NaI(Tl) dedektörünün görünümü ve (b) dedektörün iç yapısı.

Sintilasyon dedektörü, foto çoğaltıcı tüp (içerisinde anot, foto katot odaklıyıcı elektrot, dinot adı verilen elektron çoğaltıcılar bulunduran) ve sintilatör bölümlerinden meydana gelmektedir. Gelen gama ışınlarını sintilasyon dedektörünün kaydedebilmesi için bazı olayların gerçekleşmesi gerekmektedir. Öncelikle gama ışınının sintilatör içerisine girmesiyle beraber malzemeyi uyarır ve enerjisinin tamamını ya da bir kısmını elektron-pozitron çiftlerine aktarır. Uyarılmış olan elektronlar bu aşamada temel seviyelerine geri dönüş yolunda görünür bölgede veya görünür bölgeye yakın yerlerde flüoresan radyasyonu denilen ışık yayımlarlar. Dedektörün foto çoğaltıcı kısmına gelen bu ışınlar, ışığa duyarlı foto katotla etkileşerek bir elektrot yardımıyla

foto elektron oluşturarak, dinot adı verilen elektron çoğaltıcı tabakalara yönlendirilirler. Bu elektronların dinot ile etkileşimi neticesinde çoğaltıcı kısımdan birden fazla ikincil elektronlar kopar. Ortaya çıkan ikincil elektronlar odaklayıcılar vasıtasıyla anota kadar devam edecek şekilde bir sonraki elektron çoğaltıcıya yönlendirilir. En nihayetinde anot kısmında bir akım sinyali oluşur bu da spektrum haline çevrilerek okunabilir hale getirilir [87].

Gama radyasyonunun meydana getirdiği okunabilir sinyallere dönüştürülebilmesi ancak sistem içerisindeki bazı elektronik cihazlar ve yazılım sayesinde gerçekleşir. Radyasyonun dedektör tarafından tespit edilmesi ve sonrasında amplifikatör yardımıyla yükseltip, çok kanallı analizöre (DSPEC LF) gönderilir. Burada sayısal hale çevrilir, bu sayısal veriler ise sistem içerisindeki MAESTRO-32 yazılımı sayesinde ekranda spektrum şekline okunur. Bu spektrum pikleri Gauss eğrisi şeklindedir. Ayrıca detektörün çalışması için gerekli gerilim olan 800 V'ın sağlanması için sistem yüksek bir gerilim birimi ile beslenmektedir. Şekil 6.19'da bu yüksek gerilim birimi ve DSPEC LF cihazını göstermektedir [87].



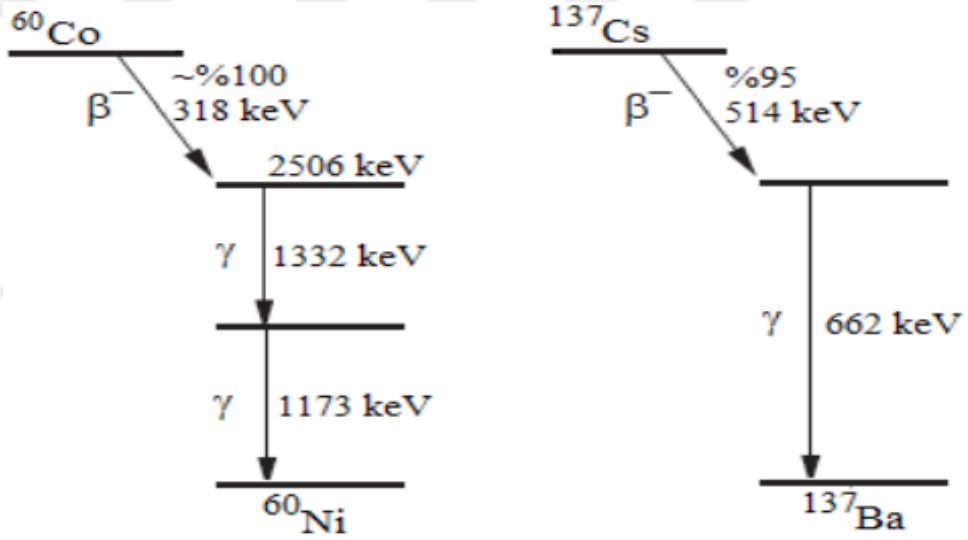
Şekil 6.19 : (a) DSPEC LF cihazı ve (b) yüksek gerilim birimi

Çalışmada Spectrum Techniques firmasından temin edilmiş her biri 1  $\mu$ Ci aktiviteye sahip  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  radyoaktif izotop kaynaklar kullanılmıştır (Şekil 6.20).  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  izotopları her biri birer  $\beta^-$  ışıması yapmalarına rağmen ürün çekirdekleri kararsız halde olduklarından sahip oldukları fazla enerjiyi atmak amacıyla  $\gamma$  ışıması yayarlar. Burada  $^{60}\text{Co}$  iki farklı enerjili (1173 keV ve 1332 keV) ve  $^{137}\text{Cs}$  ise tek enerjili (662 keV) fotonu 0,1 ns aralıklarla yaymaktadır. Bu durum çalışmada kullanılan gama

enerjisinin üç farklı enerjide olduğu göstermektedir.  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  izotoplarına ait bazı özellikler Çizelge 6.3'te, bozunma hali Şekil 6.21'de sunulmuştur [87].



Şekil 6.20 : Denede kullanılan  $^{60}\text{Co}$  (sol) ve  $^{137}\text{Cs}$  (sağ) radyoaktif kaynakları.



Şekil 6.21 :  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  radyoaktif kaynaklarının bozunma şekilleri.

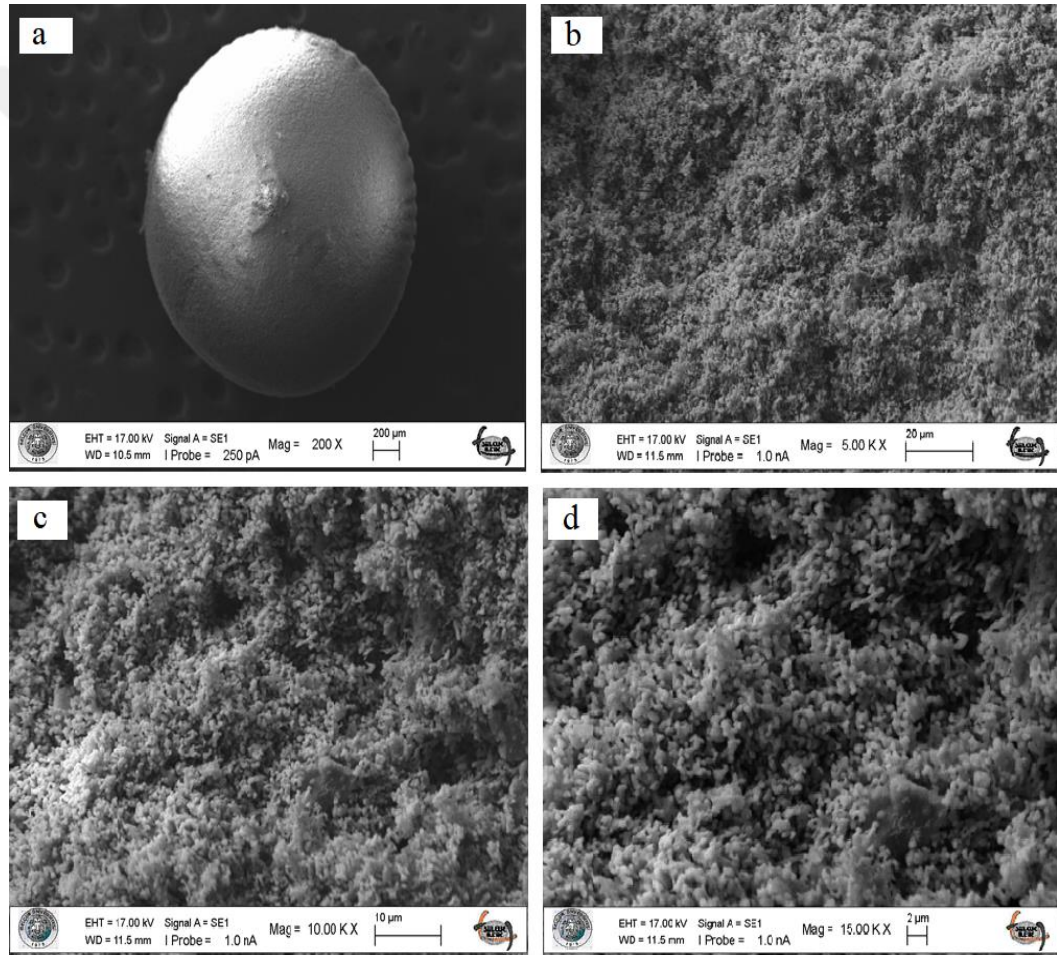
Çizelge 6.3 : Çalışmadaki  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  radyoaktif kaynaklarına ait özellikler.

	Yarı ömür	Bozunma modu	$\gamma$ enerjisi	Aktivite	Ürün çekirdek
$^{60}\text{Co}$	5,27 yıl	$\beta^-$	1173 keV 1332 keV	1 $\mu\text{Ci}$	$^{60}\text{Ni}$
$^{137}\text{Cs}$	30,1 yıl	$\beta^-$	662 keV	1 $\mu\text{Ci}$	$^{137}\text{Ba}$

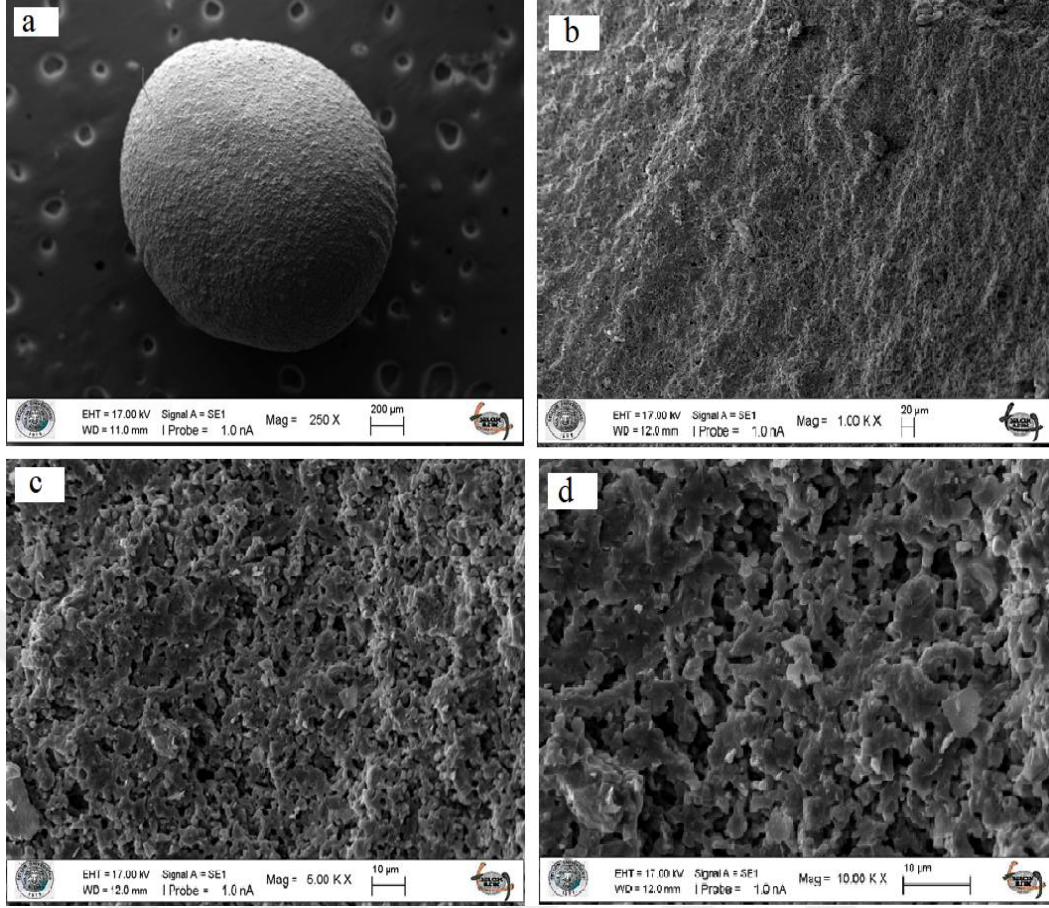
## 7. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 7.1 Sinterlenmiş Kırmızı Çamur Kürelerinin SEM Analizi

Farklı iki sıcaklıkta ve 1 saat süreyle sinterlenmiş olan kırmızı çamur kürelerine ait SEM analizinin sonuçları aşağıda sunulmuştur. Şekil 7.1’de 1100°C’de ve Şekil 7.2’de 1200°C’de sinterlenmiş olan numunelerin iç yapı görüntüleri sunulmaktadır.



**Şekil 7.1 :** 1100°C’de sinterlenmiş kırmızı çamur küresine ait (a) 200 x, (b) 5k X, (c) 10k X ve (d) 15k X büyütmedeki SEM görüntüleri.



**Şekil 7.2 :** 1200°C’de sinterlenmiş kırmızı çamur küresine ait (a) 250 x, (b) 1k X, (c) 5k X ve (d) 10k X büyütmedeki SEM görüntüleri.

Üretilen seramik kürelerin farklı sıcaklıklarda (1100°C ve 1200°C) sinterlenmesi ile mikroyapıda iki farklı tane boyut ve dağılımı oluşmuştur. Her iki sıcaklıkta üretilen kürelerin sinterleme sonrası yuvarlak bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının mikroyapı gelişimi üzerinde çok etkili olduğu, düşük sıcaklıkta daha çok gözenekli ve nano metre boyutunda bir iç yapı elde edildiği belirlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığıyla tane boyutunda önemli bir artış meydana gelmiş ve mikron metre boyutunda tanelerden oluşan bir iç yapı elde edilmiştir.

## 7.2 Numunelerin Geometrik Yoğunlukları

Farklı iki sıcaklıkta sinterlenen kırmızı çamur kürelerinin epoksi reçine matrisine takviye malzemesi olarak katılmasıyla üretilen kompozitler, kırmızı çamur küreleri kullanılmadan üretilen kompozitler ve sadece epoksi ile üretilen numune arasında karşılaştırma yapılabilmesi açısından üretilen farklı formasyonlardaki referans numyelerinin geometrik yoğunlukları denklem 7.1 ve 7.2’deki bağıntılar dikkate alınarak hesaplanmıştır ( $\pi = 3,14$ ). Numunelerin geometrik yoğunlukları Çizelge

7.1’de verilmektedir. Burada  $v$  silindir hacmini,  $\pi$  pi sayısını,  $r$  yarıçapı,  $h$  yüksekliği ve  $m$  kütleyi temsil etmektedir.

$$\text{silindir hacmi} = v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (7.1)$$

$$d = \frac{m}{v} \quad (7.2)$$

Üretilen seramik–epoksi kompozitlerin ve takviyesiz epoksi numunenin yoğunluğu geometrik olarak belirlenmiştir. Takviye içermeyen epoksinin yoğunluğu  $1,14 \pm 0,02$  g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmişken üretilen kompozitlerin yoğunluğunun ise bileşime bağlı olarak  $1,20 \pm 0,04$  ile  $2,29 \pm 0,04$  g/cm<sup>3</sup> aralığında değiştiği belirlenmiştir. Kürelerin sinterleme sıcaklığı 1100°C iken yoğunluk değerleri  $1,50 \pm 0,06$  ile  $1,59 \pm 0,01$  g/cm<sup>3</sup> aralığında değişirken sinterleme sıcaklığı 1200°C’ye çıkarıldığında yoğunluğun  $2,22 \pm 0,06$  ile  $2,29 \pm 0,04$  g/cm<sup>3</sup> aralığında değiştiği belirlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ile kompozitlerin yoğunluğunda belirgin bir artış meydana geldiği saptanmıştır.

**Çizelge 7.1 : Üretilen numunelerin geometrik yoğunlukları.**

Numune	Küre Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Bileşim	Geometrik Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )
A1	1100	küre + epoksi	1,50 (± 0,06)
A2	1100	küre + epoksi + 2 g k.ç. tozu	1,53 (± 0,04)
A3	1100	küre + epoksi + 4 g k.ç. tozu	1,59 (± 0,01)
A4	1200	küre + epoksi	2,26 (± 0,09)
A5	1200	küre + epoksi + 2 g k.ç. tozu	2,29 (± 0,04)
A6	1200	küre + epoksi + 4 g k.ç. tozu	2,22 (± 0,06)
A7	-	epoksi	1,14 (± 0,02)
A8	-	epoksi + 2 g k.ç. tozu	1,20 (± 0,04)
A9	-	epoksi + 4 g k.ç. tozu	1,28 (± 0,03)

\* Her ölçüm 5 numunenin ortalamasıdır.

### 7.3 Radyasyon Kalkanlama Bulguları

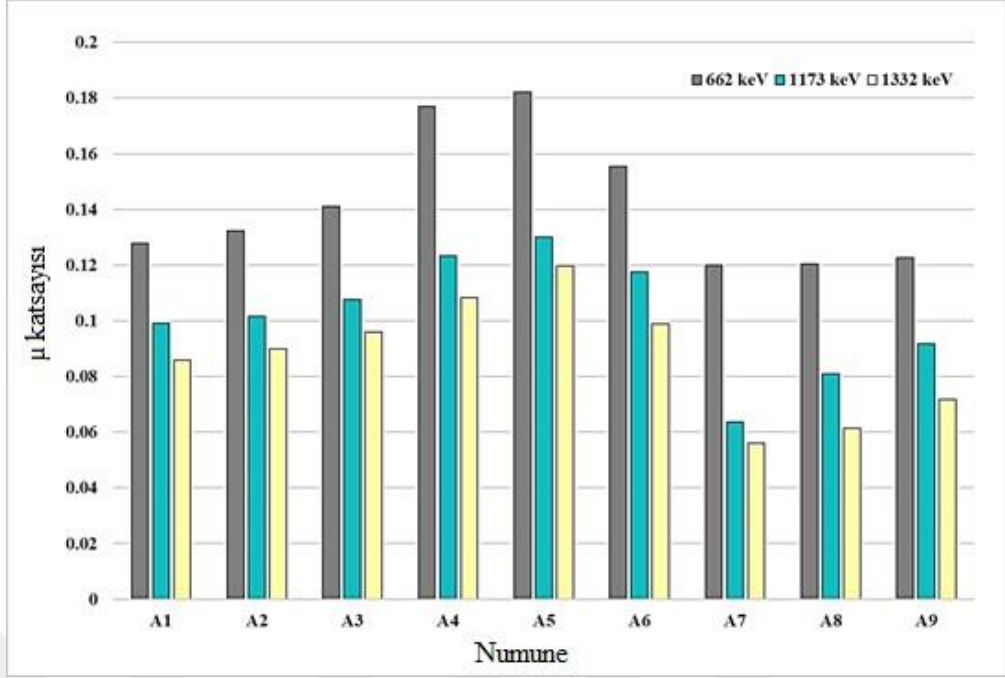
Tezin bu kısmında, üretilen numunelerin (A1-A9) gama radyasyonuna karşı doğrusal zayıflatma katsayıları ( $\mu$ , cm<sup>-1</sup>) incelenmiştir. Numunelerin gama radyasyonuna karşı ortaya koydukları performanslar Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Nükleer Fizik A.B.D.’na ait Gama Spektroskopi Laboratuvarı’nda

ölçülmüştür. Ölçüm sırasında NaI(Tl) detektörü kullanılmıştır. Ölçümlerde  $^{60}\text{Co}$  radyoaktif kaynağı ile 1173 keV ve 1332 keV enerjili,  $^{137}\text{Cs}$  radyoaktif kaynağı ile 662 keV enerjili gama ışınları yayan radyoaktif kaynaklar kullanılmıştır. Deneyde soğurma performansları ele alınan numunelerin gama radyasyonuna karşı ortaya koydukları soğurma özellikleri  $\mu$  toplam doğrusal zayıflatma katsayıları vasıtasıyla incelenmiştir. Denklem 7.3'deki Beer-Lambert Yasası ile radyasyon demetinin herhangi bir engelle etkileşime girmesi sonucu zayıflatılmış olan demetin şiddeti değişmektedir. Böylece Denklem 7.3'den yararlanarak toplam zayıflatma katsayısı hesaplanır. Zayıflatılmamış ve zayıflatılmış radyasyon demeti şiddetlerini sırasıyla  $I_0$  ve  $I$ , soğurucu maddenin cm cinsinden kalınlığını ise  $x$  temsil etmektedir [87].

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I} \quad (7.3)$$

Deney aşamasında ilk olarak herhangi bir numune kullanılmadan dedektör ve kaynak arası radyoaktif kaynak ile detektör arası boş bir şekilde belli bir süre ölçüm yapılarak referans ölçüm denilen  $I_0$  ölçülmüştür. Bu  $I_0$  ölçüsü Çizelge 7.1'de gösterilen tüm numuneler (A1-A9) için referans alınmıştır. Bir sonraki aşamada bu numuneler tek tek dedektör ve radyoaktif kaynak arasına konularak zayıflatılmış radyasyon şiddeti olan  $I$  şiddetleri her biri için ölçülmüştür. Deneylerin eşit şartlar altında, kaynağın dedektöre ve kaynağın numunelere olan mesafesinin her bir numune için eşit ve ölçüm sürelerinin eşit olması sağlanmıştır. Numune kalınlıkları 1/100 cm hassasiyete sahip kumpas kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda numunelerin toplam zayıflatma katsayılarını hesaplamak amacıyla grafik yöntemi kullanılmıştır. Buna göre elde edilen verilere ( $\ln(I_0/I)$  ve kalınlık) ışığında bir grafik çizilirse veri noktalarından uydurulan doğrunun eğimi hesaplanarak sahip olunan toplam doğrusal zayıflatma katsayısı ( $\mu$ ) elde edilir [87,88].

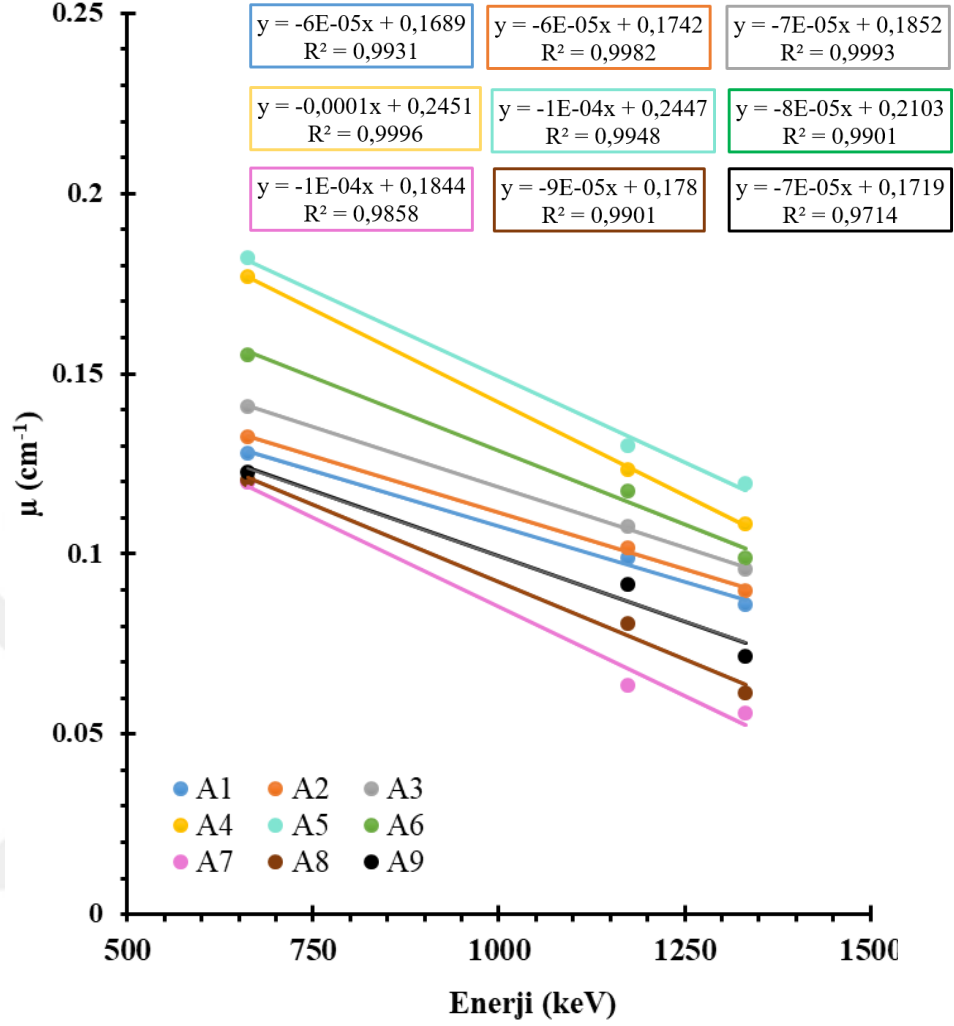
Çalışmada iki farklı sıcaklıkta sinterlenmiş kürelerin kullanıldığı kompozit numunelerin (A1-A6) radyasyon soğurma performanslarını, sinterlenmiş kürelerin radyasyon kalkanlamaya katkısını daha iyi anlayabilmek amacıyla sinterlenmiş kürelerin kullanılmadığı numunelerin de (A7-A9) radyasyon soğurma performansları incelenmiştir. Kullanılan numunelere (A1-A9) ait doğrusal zayıflatma katsayılarınının 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV gama enerjilerindeki performansları Şekil 7.3'te gösterilmektedir.



**Şekil 7.3 :** Numunelerin ölçülen  $\mu$  katsayısı değerleri.

Şekil 7.3'ten de anlaşılacağı üzere A5 numunesi 662, 1173 ve 1332 keV enerjileri için en yüksek zayıflatma katsayılarına sahiptir. A5 numunesi Çizelge 7.1'de gösterildiği gibi 1200°C'de sinterlenmiş kırmızı çamur küreleri, epoksi reçine ve 2 g kırmızı çamur tozu kullanılarak üretilmiştir. A5 numunesine en yakın zayıflatma sonucunu 662, 1173 ve 1332 keV enerjilerinde veren A4 numunesi de yine 1200°C'de sinterlenmiş k.ç. küreleri, epoksi reçine içerirken, 4 g k.ç. tozu içermektedir. En düşük zayıflatma katsayısı ise sinterlenmiş küre ve k.ç. tozu içermeyen, sadece epoksi ile üretilmiş A7 numunesinde ölçülmüştür. Sinterlenmiş küre içermeyen A7, A8 ve A9 numuneleri, sinterlenmiş küreler içeren kompozit numunelere göre 662, 1173 ve 1332 keV enerjilerinde daha düşük zayıflatma performansı göstermişlerdir. Sinterlenmiş küre içeren numuneler arasında (A1-A6) en yüksek zayıflatma performansını 662, 1173 ve 1332 keV enerjilerinde A5 numunesi göstermiştir. Sinterlenmiş küreler içermeyen A7, A8 ve A9 numuneleri arasında ise 662, 1173 ve 1332 keV enerjilerinde en yüksek zayıflatma katsayısı A9 numunesinde, en düşük zayıflatma katsayısı A7 numunesinde ölçülmüştür. 662 keV enerjisinde A7, A8 ve A9 numunelerinin zayıflatma performansları birbirine yakın iken 1173 ve 1332 keV enerjilerinde A9 numunesi A7 ve A8 numunesi göre daha yüksek performans göstermiştir.

Şekil 7.4'te tüm numunelere ait doğrusal zayıflatma katsayılarının enerjeye göre değişimi sahip oldukları hata oranlarıyla beraber verilmektedir.



Şekil 7.4 : Numunelerin (A1–A9)  $\mu$  katsayısı değerlerinin enerjiyle değişimi.

Şekil 7.4 enerji değişimiyle beraber doğrusal zayıflatma katsayısının doğrusal bir şekilde değiştiği görülmektedir. Tüm numuneler için bu bağıllık değerini veren  $R^2$  değeri 0,97 değerinin üzerindedir. Elde edilen doğrusal zayıflatma katsayısı sonuçlarına göre artan enerji ile zayıflatma katsayısının düştüğü görülmektedir.

## 8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 8.1 Sonuçlar

- Kırmızı çamur, alümina üretimi amacıyla kullanılan Bayer prosesi esnasında meydana gelen katı bir hale sahip endüstriyel atıktır. Günümüz koşullarında alümina üretimini sağlayabilmek amacıyla boksit, kostik ile liç işlemine tabi tutulmakta ve bunun sonucunda yaklaşık olarak 1 ton alüminadan 1-1,5 ton kırmızı çamur açığa çıkmaktadır. Bu atığın tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de değerlendirilmesi ve katma değeri yüksek bir ürüne dönüştürülebilmesi amacıyla kırmızı çamur karakterizasyonu, adsorpsiyon çalışmaları ve tuğla üretimine yönelik bilimsel çalışmalar yapılmaktadır.
- Gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada kırmızı çamurun seramik-polimer kompozit üretiminde kullanılması üzerine araştırmalar yapılmıştır. Kırmızı çamurun kendisine farklı uygulama alanları bulabilmesi hem kaynakların daha verimli bir şekilde kullanımını açısından, hem de kırmızı çamur kaynaklı çevresel zararların minimize edilebilmesi açısından önem arz etmektedir.
- Bu tez çalışmasında Konya Eti Alüminyum firmasından temin edilen kırmızı çamur kullanılmış olup, kullanılan bu atığın karakterizasyonu SEM, XRD ve XRF kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kırmızı çamur bünyesinde sabit olmayan oranlarda yüksek oranda demir, kalsiyum, sodyum, oksijen, alüminyum, silisyum ve titanyum gibi farklı elementlerin yer aldığı belirlenmiştir.
- Kırmızı çamura herhangi bir saflaştırma işlem uygulanmaksızın, epoksi matrisli kompozit üretiminde kullanmak üzere sol-jel yöntemiyle kırmızı çamur ve aljinat kullanılarak küre formunda takviye yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir.
- Şekillendirme sonrası 1100°C ve 1200°C'de 1 saat süreyle sinterleme sonucunda elde edilen seramik kürelerin içyapılarının oldukça farklı olduğu belirlenmiştir. Düşük sıcaklıkta nano metre ve yüksek sıcaklıkta ise mikron

metre mertebesinde büyüklüğe sahip tanelerin olduğu SEM analizleriyle belirlenmiştir. Yapının her iki sıcaklıkta da gözenek içerdiği ancak nispeten yüksek bir yoğunlaşma oranının elde edildiği belirlenmiştir.

- Kırmızı çamur küreler epoksi matrise ilave edilerek seramik–epoksi bulk kompozitleri üretilmiştir. Üretilen seramik–epoksi kompozitlerin radyasyon kalkanlama amacıyla kullanım potansiyeli olduğu düşünüldüğünden epoksi içerisine farklı oranlarda kırmızı çamur tozu katılarak da kompozitler hazırlanmıştır.
- Üretilen seramik–epoksi kompozitlerin ve takviyesiz epoksi numunenin yoğunluğu geometrik olarak belirlenmiştir. Takviye içermeyen epoksinin yoğunluğu  $1,14 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmişken üretilen kompozitlerin yoğunluğunun ise bileşime bağlı olarak  $1,20 \pm 0,02$  ile  $2,29 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$  aralığında değiştiği belirlenmiştir. Kürelerin sinterleme sıcaklığı  $1100^\circ\text{C}$  iken yoğunluk değerleri  $1,50 \pm 0,06$  ile  $1,59 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  aralığında değişirken sinterleme sıcaklığı  $1200^\circ\text{C}$ 'ye çıkarıldığında yoğunluğun  $2,22 \pm 0,06$  ile  $2,29 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$  aralığında değiştiği belirlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ile kompozitlerin yoğunluğunda belirgin bir artış meydana geldiği saptanmıştır.
- Tez çalışması kapsamında üretilen 9 farklı bileşime sahip numunenin gama radyasyonu soğurma performansları,  $\mu$  toplam doğrusal zayıflatma katsayıları ölçülerek incelenmiştir. Ölçümlerde 1173 keV ve 1332 keV enerjilerde gama ışıması yapan  $^{60}\text{Co}$  ve 662 keV enerjide ışıma yapan  $^{137}\text{Cs}$  radyoaktif kaynakları kullanılmıştır. En iyi sonuçlar A5 numunesiyle elde edilmiş olup, sadece epoksi içeren numuneye kıyasla  $\mu$  toplam doğrusal zayıflatma katsayısı değerinde 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerji seviyeleri için sırasıyla %51,9-%104,4-%113,6 oranında oldukça belirgin artışlar elde edilmiştir.
- Epoksiye sadece kırmızı çamur tozu ilave edilerek hazırlanan numunelerden A8 için  $\mu$  toplam doğrusal zayıflatma katsayısı değerinde 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerji seviyesi için sırasıyla %0,4-%26,9-%9,5 oranında bir artış sağlandığı görülmüştür. A9 için  $\mu$  toplam doğrusal zayıflatma katsayısı değerinde 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerji seviyesi için sırasıyla %2,3-%44,0-%27,9 oranında bir artış sağlandığı görülmüştür. Artan kırmızı çamur toz miktarına bağlı olarak önemli oranda bir artışın sağlandığı belirlenmiştir.

## 8.2 Öneriler

- Kırmızı çamur Bayer prosesiyle esnasında alümina üretim sürecinde ortaya çıkan karmaşık yapılı ve katı halde bulunan bir atıktır. Alümina üretim sürecinde genellikle bir ton alümina üretimi sonucunda bir ile bir buçuk ton aralığında kırmızı çamur açığa çıkmaktadır. Bu atığın depolanması bile önemli bir çevre sorununa ve ekonomik sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle bu atığın katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi için farklı uygulama alanlarında da çalışmalar yapılması gerekmektedir.
- Bu tez çalışması sonucunda üretilecek olan ürünler pek çok farklı araştırma konusuna da ilham kaynağı olabilecektir. Radyasyon kalkanlama dışında özellikle tribolojik uygulamalarda kullanım potansiyelini belirlemek amacıyla yeni çalışmalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.
- Kırmızı çamur ile hazırlanan kürelerin farklı sıcaklık ve sürelerde sinterleme çalışması yapılarak %100 yoğun küreler üretilebilir. Bu kürelerle hazırlanacak seramik-polimer kompozitlerin radyasyon kalkanlama özellikleri incelenebilir.
- Ayrıca, küre üretim sürecinde düşük sıcaklıkta tam yoğunlaşma sağlamak amacıyla diğer sanayi atıkları veya doğal atıklar sisteme katılarak yeni çalışmalar yapılabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **C. Brunori, C. Cremisini, P. Massanisso, V. Pinto, L. Torricelli**, (2005). Early-age characteristics of red mud–coal gangue cementitious material, *Journal of Hazardous Materials*, 117 (1), 55-63.
- [2] **S. Kumar, R. Kumar, A. Bandopadhyay**, (2006). Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries, *Resources, Conservation and Recycling*, 48 (4), 301-314.
- [3] **T. Liu, X. Li, L. Guan, P. Liu, T. Wu, Z. Li, A. Lu**, (2016). Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead–zinc mine tailings and red mud: Foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties, *Ceramics International*, 42 (1, Part B), 1733-1739.
- [4] **N. Zhang, H. Sun, X. Liu, J. Zhang**, (2009). Early-age characteristics of red mud–coal gangue cementitious material, *Journal of Hazardous Materials*, 167 (1), 927-932.
- [5] **Kavas, T.** (1997). *Seydişehir kırmızı çamuru ve kırka bor atıkları kullanılarak kaliteli yapı malzemesi üretim imkanlarının araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [6] **Kılıç, Y.** (2013). *Kalsine kırmızı çamurun puzolanik aktivite ve betonun renklendirme, mineraloji ve fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi* (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Özgün, M. A.** (2012). *Kırmızı çamur üretimi ve değerlendirme olanakları* (Doktora tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [8] **Devlet Planlama Teşkilatı.** (2001). *Sekizinci beş yıllık kalkınma planı madencilik özel ihtisas komisyon raporu metal madenler alt komisyonu boksit çalışma grubu raporu* (Rapor No: DPT: 2625). Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı.
- [9] **Göral, M. S.** (1999). *Kırmızı çamurdan alüminanın geri kazanımında verimlilik koşullarının araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [10] **Boztepe, A, Gülen, J.** (t.y.) *Aktif Alümina* Erişim tarihi Mart 4, 2021, Erişim adresi <https://inovatifkimyadergisi.com/aktif-alumina>
- [11] **Gülfe, G.** (1998). *Hidroklorik asit çözeltilisinde milas boksit cevherlerinin çözünürlüğü* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- [12] **Alp, A.** (1990). *Zonguldak Boksitlerinin Alümina Üretiminde Değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [13] **Uzun, D.** (2006). *Kırmızı çamurdan demir ve alüminyumun sülfürik asit çözeltilisindeki çözünme kinetiği* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [14] **Altıntığ, E.** (2007). *Kırmızı çamurdan yapay zeolit sentezi* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [15] **Aksu, S.** (2001). *Kırmızı çamur bileşenlerinin hidroklorik asit çözeltilisindeki çözünürlükleri* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [16] **Akbıyık, H.** (2018). *Bayer prosesinde ortaya çıkan kırmızı çamurun renk gideriminde kullanılması için yenilikçi yöntemlerin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bolu.
- [17] **Sidrak, L. Y.** (2001). Dynamic simulation and control of the bayer process, A Review, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, 1146-1156.
- [18] **Arslan, S.** (2016). *Eti alüminyum a.ş. kırmızı çamurun susuzlandırma performansının artırılması* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [19] **Yalçın, N.** (1996). *Kırmızı çamurun seramik endüstrisinde değerlendirilmesi* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [20] **Akıncı, A.** (2004). *Polimer matriksli kompozitlerde katkı malzemelerinin yapı ve özelliklere etkisi* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [21] **Varol, M.** (2019). *Kırmızı çamurdan pirometalürjik yöntemle demirin geri kazanımı* (Yüksek lisans tezi). Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı.
- [22] **Agatzini-Leonardou, S., Oustadakis, P., Tsakiridis, P. ve Markopoulos, C.,** (2008). Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure, *Journal of Hazardous Materials*, 157 (2), 579-586.
- [23] **Acar, M.** (1997). *Kırmızı çamurun değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [24] **Sigmond, G., Solymar, K., Toth, P., Çev.Gencer, E., Nemli, H. F.,** (1979). Boksitten alumina üretiminin kimyasal temeli ve teknolojisi, alumina üretiminde grup eğitimi, *United Nations Industrial Development Organization*, Aluterv-FKI.
- [25] **Levent, M.** (2012). *Kırmızı çamur katkılı tuğla üretiminin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [26] **Wang, S. Ang, H. ve Tade, M.,** (2008). Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes, *Chemosphere*, 72, 1621-1635.

- [27] **Turhan, A.** (2008). *Borlamanun Paslanmaz Çeliğın Radyasyon Zırhlama Özelliğine Etkisinin Araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [28] **Belgin, E.** (2017). *Elektromanyetik Radyasyon Zırhlama Uygulamaları İçin Farklı Metal Tuz Takviyeli Polimer Esaslı Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi* (Doktora Tezi). Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [29] **Akkaş, A.** (2015). *Alüminyum-Bor-Karbür Kompozit Malzemelerin Radyasyon Karşısındaki Davranışının Belirlenmesi, Xcom Bilgisayar Programı İle İncelenmesi Ve Yeni Bir Hibrit Kompozit Radyasyon Zırh Malzemesi Önerisi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] **İrim, Ş.** (2018). *Nano-Bor Katkılı Kompozitlerin Nötron ve Gama Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Belirlenmesi* (Doktora Tezi). Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- [31] **A. A. Jawad, N. Demirkol, K. Gunoğlu, I. Akkurt,** (2019). Radiation shielding properties of some ceramic wasted samples, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 5039–5042.
- [32] **Akbulut, S., Sehhatigdiri, A., Eroglu, H., Çelik, S.,** (2015). A research on the radiation shielding effects of clay, silica fume and cement samples, *Radiation Physics and Chemistry*, 117, 88-92.
- [33] **Amritphale, S. S., Anshul, A., Chandra, N., Ramakrishnan, N.,** (2007) A novel process for making radiopaque materials using bauxite-Red mud, *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 1945–1951.
- [34] **Anshul, A., Amritphale, S. S., Chandra, N., Ramakrishnan, N., Shrivastava, A., Verma, U.S.P.,** (2009) Chemically formulated ceramic gamma ray irradiation shielding materials utilising red mud, *Advances in Applied Ceramics*, 108 (7), 429-437.
- [35] **Guru, S., Amritphale, S. S., Mishra, J., Joshi, S.,** (2019) Multicomponent red mud-polyester composites for neutron shielding application, *Materials Chemistry and Physics*, 224, 369-375.
- [36] **Chauhan, R. K., Mugdal, M., Verma, S., Amritphale, S.S., Das, S., Shrivastva, A.,** (2017) Development and design mix of radiation shielding concrete for gamma-ray shielding, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 27, 871-882.
- [37] **Mugdal, M., Chauhan, R. K., Verma, S., Amritphale, S. S., Das, S., Shrivastva, A.,** (2017) Development of advanced, non-toxic, synthetic radiation shielding aggregate, *Radiochimica Acta*, 106 (1), 59-68.
- [38] **Verma, S., Amritphale, S. S., Das, S.,** (2017) Development of advanced, X-ray radiation shielding panels by utilizing red mud-based polymeric organo-shielding gel-type material, *Waste and Biomass Valorization*, 8, 2165–2175.

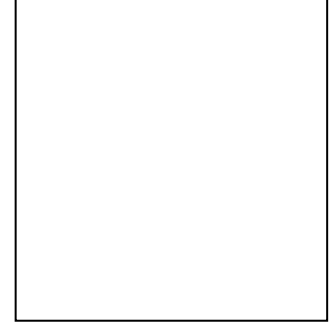
- [39] **Verma, S., Mili, M., Bajpai, H., Hashmi, S., Shrivastva, A.,** (2020) Advanced lead free, multi-constituent-based composite materials for shielding against diagnostic X-rays, *Plastics, Rubber and Composites*, 50 (2), 48-60.
- [40] **Şahin, Y.,** (2000). *Kompozit malzemelere giriş*. Gazi Kitabevi, Ankara, 32-40.
- [41] **L.M. McGrath, R.S. Parnas, S.H. King, J.L. Schroeder, D.A. Fischer, J.L.** (2008). Investigation of the thermal, mechanical, and fracture properties of alumina–epoxy composites, *Polymer*, 49 (4), 999-1014.
- [42] **H. Lee, K. Neville** (1967). *Handbook of Epoxy Resins*. McGraw-Hill, New York.
- [43] **L.-C. Tang, H. Zhang, S. Sprenger, L. Ye, Z. Zhang,** (2012). Fracture mechanisms of epoxy-based ternary composites filled with rigid-soft particles, *Composites Science and Technology*, 72(5), 558-565.
- [44] **Durmuş, A.,** (2006). *Poliolefin nanokompozitlerin hazırlanması* (Doktora tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [45] **Kaw, A. K. ve Willenbring, G.,** (1997). A software tool for mechanics of composite materials, *International Journal of Engineering Education*, 13(6), 433-441.
- [46] **Velde B.,** (1992). *Introduction to Clay Minerals, Chemistry, Origins, Uses and Environmental Significance*. 1 th Edition, Chapman & Hall Inc., London, Great Britain, 10-15.
- [47] **Bağcı, İ.** (2006). *Epoksi reçinesi ile nanokompozit sentezi* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [48] **Zhou, Y., Feng, J., Peng, H., Qu, H. ve Hao, J.,** (2014). Catalytic pyrolysis and flame retardancy of epoxy resins with solid acid boron phosphate, *Polymer Degradation and Stability*, 110, 395-404.
- [49] **Mc Aninch, I. M., Palmese, G. R., Lenhart, J. L. ve La Scala, J. J.,** (2015). Epoxy-amine networks with varying epoxy polydispersity, *Journal of Applied Polymer Science*, 132 (8), 41503.
- [50] **Kuşaklı, S.** (2018). *Bor ve alüminyum hidroksit katkılı yanmaya dayanıklı yeni epoksi reçine kompozitlerin geliştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [51] **Erkan, İ.** (2008). *Reşadiye bentonitinin amin ile modifikasyonu ve epoksi bazlı nanokompozit malzeme üretimi*, (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- [52] **Ting, T. H., Wang, T. M., Yang, S. F., Sun, K. S. ve Lee, W. C.,** (2011). Effect of the water quenched slag-epoxy resin composite on microwave absorbing properties, *Journal of the Chinese Chemical Society*, 58 (1), 83-89.
- [53] **Callister, William D. Jr., Rethwisch, David G.** (2013). *Malzeme bilimi ve mühendisliği* (K. Genel, Çev.). 8. Basımdan çeviri.
- [54] **Bozkurt, P.** (2014). *Epoksi reçine/çar kompozitlerinin hazırlanması ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

- [55] **Ulcay Y. Akyol M, Gemci R.,** (2002). Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukvemeti üzerine farklı kür metodlarının etkisinin incelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, Bursa, 7 (1), 4-13.
- [56] **Kalemtaş, A.,** (2015). Seramik matrisli kompozit malzemeler, *Putech & Composites*, Nisan–Mayıs–Haziran sayısı, 20-26.
- [57] **Haris, B.,** (1986). Engineering composite materials, *The Institute of Metals*, London, 1-15: 84-91.
- [58] **Saiyad, M., Devashrayee, N. M. ve Mevada, R. K.,** (2014). Study the effect of dispersion of filler in polymer composite for radiation shielding, *Polymer Composites*, 35 (7), 1263-1266.
- [59] **Arıcasoy, O.,** (2006). Kompozit sektör raporu. İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 4-22.
- [60] **Tekin, F.** (2015). *Nano-karbon ile güçlendirilmiş cam elyaf takviyeli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti* (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [61] **Mazumdar, S. K.** (2002). *Composites Manufacturing: Material, Product and Process Engineering*. CRC Pres, Boca Raton London New York Washington, D.C.
- [62] **Ersoy, M. S.** (2005). *Lif takviyeli polimerik kompozit malzeme tasarımı* (Yüksek lisans tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [63] **Gemci, R.** (1996). *Lif takviyeli polimer kompozit malzemelerde aşınma ve ısı iletimlerinin iyileştirilmesi* (Doktora tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [64] **Asi, D.** (2018). *Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması* (Doktora tezi). Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak.
- [65] **Nayak, R., Pallicity, T. D. ve Satapathy, A.,** (2010). A computational and experimental investigation on thermal conductivity of particle reinforced epoxy composites, *Computational Materials Science*, 48, 576-581.
- [66] **Hu, Y., Du, G. ve Chen, N.,** (2016). A novel approach for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/epoxy composites with high strength and thermal conductivity, *Composites Science and Technology*, 124, 36-43.
- [67] **He, H., Fu, R., Han, Y., Shen Y. ve Song, X.,** (2007). Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions, *Journal of Materials Science*, 42, 6749–6754.
- [68] **Hu, J. B.,** (2020). High-performance ceramic/epoxy composite adhesives enabled by rational ceramic bandgaps, *Scientific Reports*. Retrieved June 21, 2021, from <https://www.nature.com/articles/s41598-019-57074-7>.

- [69] **Ekici, R.**, (2004). *Alüminyum esaslı SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [70] **Kösedâğ, E.**, (2017). *Pomza Takviyeli Magnezyum matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*, (Yüksek lisans tezi), Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- [71] **Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği.** (2020). *Mukavemet artırıcı sistemler ve mikroyapı tasarımı* [PowerPoint slides]. Retrieved from <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/mgurbuz/126407/HAFTA%204.pdf>
- [72] **Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.** Retrieved Ağustos 10, 2021, from <https://uslularhadde.com/metal-matrisli-kompozit-malzemeler>.
- [73] **Oguz, I., Gök, A.**, (2006). Structural and thermal characterization of poly (2-chloroaniline)/redmud nanocomposite materials, *Applied Polymer*, 99 (5), 2101–2108.
- [74] **Singla, Y. K., Chhinner, R., Hitesh, B., Anil, K.**, (2015). Wear behavior of aluminum alloy 6061-based composites reinforced with SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and red mud: A comparative study, *The Minerals, Metals & Materials Society*, DOI: 10.1007/s11837-015-1365-0, 67 (9), 2160-2169.
- [75] **Sivri, S., Koç, E., Beyaz, Ö., İşleyen, M. ve Kalemtaş, A.**, (2019). Kırmızı çamur–aljinat kompozit kürelerle tekstil boyar madde giderimi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, 48-53.
- [76] **Apak, R., Tütem, E., Hügül, M., Hızal, J.**, (1998). Heavy metal cation retention by unconventional sorbents (red muds and fly ashes), *Water Research*, 32, 430-440.
- [77] **Ashok P., Sureshkumar, M. P.**, (2014). Experimental studies on concrete utilising red mud as a partial replacement of cement with hydrated lime. *IOSR-JMCE*, 2278-1684.
- [78] **Satapathy, A., Patnaik, A.**, (2008) Analysis of dry sliding wear behavior of red mud filled polyester composites using the taguchi method, *Journal of Reinforced Plastics and Composites Online First*, Page No. 16, DOI:10.1177/0731684408092453.
- [79] **Rana, A.Y. Sathe, N. A.**, (2015). Analysing the potential substitute of red mud in concrete adding lime and silica, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2250-2459.
- [80] **Metilda, D. L., Selvamony C., Anandakumar R., Seenii A.**, (2015). Investigations on optimum possibility of replacing cement partially by redmud in concrete, *Scientific Research and Essays*, 1992-2248.
- [81] **Arhin, D. D., Nuamah, R. A., Agyei-Tuffour, B., Obada, D., Yaya, A.**, (2017). Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications, *Case Studies in Construction Materials*, 7, 45–55.

- [82] **Banjare, J., Sahu, Y. K., Agrawal, A., Satapathy, A.,** (2014). Physical and thermal characterization of red mud reinforced epoxy composites: An experimental investigation, *Procedia Materials Science*, 5, 755–763.
- [83] **Çengeloğlu, Y., Kır, E., Ersöz, M.,** (2002). Removal of fluoride from aqueous solution by using red mud, *Separation and Purification Technology*, 28(1), 81-86.
- [84] **Gök, A., Omastová, M., Prokes, J.,** (2007). Synthesis and characterization of red mud/polyaniline composites: Electrical properties and thermal stability, *European Polymer Journal*, 43, 2471-2480.
- [85] **Atasoy, A.** (2007). The comparison of the bayer process wastes on the base of chemical physical properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 90 (1), 153-158.
- [86] **Arslan, S., Uçbeyiay, H., Çelikel, B., Baygül, M., Avcu, S., Demir, G. K.** (2015). ETI Aluminium red mud characteristics and evaluation of dewatering performance, *Bauxite Residue Valorisation and best Practices Conference*, Leuven.
- [87] **Günoğlu, K.,** (2012). *Türkiye'deki bazı doğal taşların radyoaktivite tayini ve radyasyon soğurma özelliklerinin araştırılması* (Doktora tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [88] **Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kiliçarslan, S., Basyigit, C.,** (2010). Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate, *Annals of Nuclear Energy*, 37, 910-914.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : **Fatih Yusuf ATEŞ**

**Doğum Tarihi ve Yeri** :

**E-posta** :

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Lisans** : 2021, Anadolu Üniversitesi, Açıköğretim Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü
- **Y.Lisans** : 2022, Bursa Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- P.M.S Alüminyum – Üretim Vardiya Mühendisliği.
- Pilotcar Otomotiv – Üretim Mühendisliği.