



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**RADYASYON KORUMA ÖZELLİKLERİ GELİŞTİRİLMİŞ POLİMER KOMPOZİT
MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

DERYA MUTLU

DANIŞMAN: Doç. Dr. İdris KARAGÖZ

**YALOVA
MAYIS 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

RADYASYON KORUMA ÖZELLİKLERİ GELİŞTİRİLMİŞ POLİMER KOMPOZİT
MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

DOKTORA TEZİ

DERYA MUTLU

205301001

DANIŞMAN: Doç. Dr. İdris KARAGÖZ

YALOVA
MAYIS 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Radyasyon Koruma Özellikleri Geliştirilmiş Polimer Kompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Derya MUTLU

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. İdris Karagöz'e, tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen tez izleme jüri üyelerim Doç. Dr. Ürkiye Akar Tarım ve Doç. Dr. Mithat Çelebi'ye ve yine desteklerinden dolayı Doç. Dr. Harun Sepetçioğlu'na, Prof. Dr. Mehmet Büyükyıldız'a ve Prof. Dr. Orhan Gürler'e teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında beni destekleyen Aysu Çavuşoğlu'na da teşekkür ederim. Malzeme temininde bana yardımcı olan Kale Naturel Firması'na ve Faruk Durukan Bey'e ayrıca teşekkür ederim. Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için aileme ve canım anneme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması boyunca 100/2000 YÖK Doktora Bursu kapsamında destek veren, Yüksek Öğretim Kurumu'na (YÖK) teşekkür ederim.

Mayıs – 2025

Derya MUTLU

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Literatür Araştırması	2
1.2.1. Radyasyondan korunmada geleneksel zırhlama malzemelerinin kullanımı	3
1.2.2. Radyasyondan korunmada polimer ve polimer kompozitlerin kullanımı	5
1.3. Hipotez	8
2. RADYASYON VE RADYASYONDAN KORUNMA	9
2.1. Radyasyon	9
2.2. Radyasyon Çeşitleri	9
2.2.1. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon	11
2.2.2. İyonlaştırıcı radyasyon.....	11
2.2.2.1. Parçacık tipi iyonlaştırıcı radyasyon	12
2.2.2.2 Dalga tipi iyonlaştırıcı radyasyon	13
2.3. Radyasyonun Kullanıldığı Alanlar	15
2.3.1. Tüketici ürünleri ve faaliyetleri	15
2.3.2. Tıbbi teşhis ve tedavide	15
2.3.3. Bilimsel çalışmalarda.....	16
2.3.4. Suçları çözmek için adli vakalarda	16
2.3.5. Çeşitli sanayi dallarında.....	17
2.4. Radyasyonun Çevre ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri	17
2.5. Radyasyondan Korunma ve Radyasyonun Madde ile Etkileşimi	19
2.5.1. Radyasyondan korunma.....	19
2.5.1.1. Zaman kuralı	20
2.5.1.2. Mesafe kuralı	20
2.5.1.3. Zırhlama kuralı	21
2.5.2. Radyasyonun madde ile etkileşimi	22
2.5.2.1. Fotoelektrik olay	23

2.5.2.2. Compton saçılımı	24
2.5.2.3. Çift oluşumu	26
2.6. Elektromanyetik Radyasyonun Absorpsiyonu	27
2.6.1. Lineer (μ) azaltma katsayısı	28
2.6.2. Kütle (μ_m) azaltma katsayısı	30
2.6.3. Yarı kalınlık (HVL) ve onda bir kalınlık (TVL).....	31
2.6.4. Ortalama serbest yol (MFP).....	31
2.7. Radyasyon Ölçüm Birimleri.....	32
2.7.1. Radyasyon doz birimi	32
2.7.2. Radyasyon enerji birimi.....	33
2.7.3. Radyasyon şiddet birimi	33
2.7.4. Radyasyon ışınlama birimi	33
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
3.1. Çalışmada Kullanılan Polimerler.....	35
3.1.1. Epoksi reçine.....	35
3.1.2. Akrilonitril bütadien stiren (ABS)	37
3.2. Çalışmada Kullanılan Dolgular	38
3.2.1. Bakır.....	38
3.2.2. Sodyum pentaborat	39
3.3.3. Barit	41
3.4. Çalışmada Kullanılan Üretim ve Şekillendirme Yöntemleri.....	42
3.4.1. Polimer döküm yöntemi.....	42
3.4.2. Ekstrüzyon yöntemi	43
3.4.3. Enjeksiyon kalıplama yöntemi.....	44
3.5. Çalışmada Kullanılan Karakterizasyon Yöntemleri	45
3.5.1. Çekme testi	45
3.5.2. Eğme testi	46
3.5.3. Darbe testi	47
3.5.4. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi.....	47
3.5.5. Termogravimetrik (TGA) analizi.....	48
3.5.6. Fourier transform infrared spektrofotometresi (FTIR) analizi	48
3.5.7. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi	49
3.5.8. Elektriksel iletkenlik testi	49
3.5.9. Su absorpsiyon testi	50
3.5.10. Piknometre ile yoğunluk ölçümü	51

3.5.11. Sertlik (Shore D) testi	52
3.5.12. Parlaklık (Gloss) testi.....	52
3.5.13. Radyasyon zırlama testi	52
4. CU/EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU.....	55
4.1. Malzemeler ve Yöntemler	55
4.2. Testler ve Analizler	57
4.2.1. Mekanik inceleme.....	57
4.2.2. FTIR, DSC ve TGA analizleri	57
4.2.3. Mikro yapı karakterizasyonu	58
4.2.4. Elektriksel iletkenlik testi	58
4.2.5. Yoğunluk ve sertlik ölçümleri	58
4.2.6. Radyasyon zırlama testleri.....	58
5. NAB508 / BASO4 / ABS KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU 61	
5.1. Malzemeler ve Yöntemler	61
5.1.2. Karışım hazırlama ve ön şekillendirme	62
5.1.3. Polimer kompozitin şekillendirilmesi	64
5.2. Testler ve Analizler	65
5.2.1. Mekanik inceleme.....	65
5.2.2. FTIR, DSC ve TGA analizleri	65
5.2.3. Mikro yapı karakterizasyonu	66
5.2.4. Parlaklık (gloss) testi	66
5.2.5. Su absorpsiyon testi	66
5.2.6. Yoğunluk ve sertlik (Shore D) ölçümleri	66
5.2.7. Radyasyon zırlama testleri.....	67
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	69
6.1. Cu/Epoksi Kompozitler Deneysel Sonuçlar ve Tartışma	69
6.1.1. Çekme test sonuçları.....	69
6.1.2. Üç nokta eğme test sonuçları	70
6.1.3. Darbe test sonuçları	73
6.1.4. FTIR analiz sonuçları.....	73
6.1.5. DSC analiz sonuçları	75
6.1.6. TGA analiz sonuçları	76
6.1.7. Mikro yapı inceleme sonuçları	77
6.1.8. Elektriksel iletkenlik sonuçları	78
6.1.9. Yoğunluk ve sertlik ölçüm sonuçları	79

6.1.10. Radyasyon zırhlama test sonuçları	80
6.2. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS Kompozitler Deneysel Sonuçlar ve Tartışma	83
6.2.1. Çekme test sonuçları	83
6.2.2. Üç nokta eğme test sonuçları	84
6.2.3. Darbe test sonuçları	85
6.2.4. FTIR analiz sonuçları	87
6.2.5. DSC analiz sonuçları	90
6.2.6. TGA (DTG) analiz sonuçları	91
6.2.7. Mikroyapı inceleme sonuçları	93
6.2.8. Parlaklık (Gloss) ve su absorpsiyon ölçüm sonuçları	94
6.2.9. Yoğunluk ve sertlik ölçüm sonuçları	96
6.2.10. ABS Kompozitler için Radyasyon Zırhlama test sonuçları	98
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
7.1. Sonuçlar	107
7.2. Öneriler	108
KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	129

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

α	: Alfa
β^+	: Pozitron
β^-	: Negatron
c	: Işık hızı
e^-	: Elektron
E_e	: Elastisite modülü
I	: Radyasyon kaynağının doz hızı
Θ	: Teta
Φ	: Fi
$h\nu$	: Foton enerjisi
μ	: Lineer zayıflatma katsayısı
t	: Fotoelektrik katsayısı
σ	: Compton katsayısı
κ	: Çift oluşum katsayısı
λ	: Radyoaktif bozunma sabiti
R	: Radyasyon kaynağından uzaklık
ρ	: Yoğunluk
λ	: Ortalama serbest yol
σ_t	: Toplam atom kesiti
ϵ	: Molar sönüm katsayısı
σ_e	: Elektronik kesit
σ_e	: Eğilme gerilmesi
Ω	: Ohm
ρ	: Özdirenç
σ	: Öziletkenlik
γ	: Gama ışınları
Z_{eef}	: Etkili atom numarası

KISALTMALAR

A	: Yüzey alanı
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
AC	: Alternatif akım
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Am	: Amerikyum
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
b	: Barn
Ba	: Baryum
BaO	: Baryum oksit
BaSO ₄	: Baryum sülfat
Be	: Berilyum
Bi ₂ O ₃	: Bizmit oksit
BNCT	: Bor nötron yakalama tedavisi
Bq	: Becquerel

C	: Coulomb
Ca	: Kalsiyum
Ce	: Seryum
Cf	: Kaliforniyum
Ci	: Curie
cm	: Santimetre
Co	: Kobalt
CO ₃	: Karbonat
Cs	: Sezyum
Cu	: Bakır
D	: Çap
DGEBA	: Bisfenol A'nın diglisidil eteri
DNA	: Deoksiribo nükleik asit
dpm	: Radyoaktif maddede dakikada parçalana ve radyasyon yayan atom sayısı
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
DTG	: Kütle kayıp hızı
E	: Enerji
EDX	: Enerji dağılım X-ışını spektrometresi
eV	: Elektronvolt
Ftir	: Fourier transform infrared spektrofotometresi
g	: Gram
GeV	: Giga-elektronvolt
GPa	: Gigapaskal
Gy	: Gray
H	: Hidrojen
HCl	: Hidrojen klorür
Hg	: Cıva
HPGE	: Yüksek saflıkta germanyum dedektörü
HVL	: Yarı kalınlık
Hz	: Hertz
IACS	: Uluslararası Tavlanmış Bakır Standardı
J	: Joule
KeV	: Kilo-elektronvolt
Kg	: Kilogram
L	: Uzunluk
LAC	: Lineer azaltma katsayısı
m	: Kütle
m	: Metre
Me	: Eğme momenti
MeV	: Mega elektronvolt
MFP	: Ortalama serbest yol
ml	: Mili litre
Mn	: Mangan
MÖ	: Milat öncesi
MPa	: Megapaskal
MS	: Megasimens
mSv	: Mili Sievert
N	: Newton
n	: Nötron
Na	: Sodyum

NaB ₅ O ₈	: Sodyum pentaborat
NaI(Tl)	: Sodyum iyodür sintilasyon dedektörü
Ni	: Nikel
PB	: Polibütadien
Pb	: Kurşun
PbO	: Kurşun monoksit
prn	: Bir dakikadaki devir sayısı
P.S.D	: Darbe şekli ayırma tekniği
PVC	: Polivinil klorür
R	: Direnç
R	: Roentgen
Ra	: Radyum
Rad	: Radyasyon emilen doz
rem	: Röntgen eşdeğeri adam
S	: Stiren
s	: Saniye
SAN	: Stiren akrilonitril
Sb	: Antimon
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
SO ₃	: Kükürt trioksit
SO ₄	: Sülfat
Sv	: Sievert
Tc	: Teknesyum
Tc	: Kristalleşme sıcaklığı
TG	: Kütle kaybı
Tg	: Camsı geçiş sıcaklığı
TGA	: Termogravimetrik analiz
Tm	: Kristal erime sıcaklığı
TS EN ISO	: Türk Standardı-Avrupa Normu-Uluslararası Standardizasyon Örgütü
TVL	: Onda bir kalınlık
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyon Etkileri Bilimsel Komitesi
yy	: Yüzyıl
Zn	: Çinko

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 4.1. Cu/epoksi kompozitlerin formülasyonu.....	55
Tablo 5.1. Sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerin formülasyonu	61
Tablo 6.1. Cu/epoksi kompozitleri üzerinde yapılan çekme testlerinin deneysel sonuçları.	70
Tablo 6.2. Cu/epoksi kompozitleri üzerinde yapılan eğilme testlerinin deneysel sonuçları.	72
Tablo 6.3. Kompozitlerin çekme testinden elde edilen sayısal veriler.....	84
Tablo 6.4. Kompozitlerin eğme testinden elde edilen sayısal veriler	85
Tablo 6.5. Kompozitlerin Charpy Darbe testinden elde edilen sayısal veriler	87
Tablo 6.6. Kompozitlerin TGA testinden elde edilen sayısal veriler.....	93
Tablo 6.7. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerinin yüzey parlaklığı	95
Tablo 6.8. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerin yoğunluğu	97
Tablo 6.9. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerin sertlik değerleri	97
Tablo 6.10. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için yarı kalınlık değerleri	101
Tablo 6.11. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için onda bir kalınlık değerleri	102
Tablo 6.12. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için ortalama serbest yol değerleri.....	104
Tablo 6.13. NaB ₅ O ₈ ve BaSO ₄ dolgulu ABS kompozitlerin zırhlama özelliklerinin literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırılması.	104

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Radyasyon çeşitleri	10
Şekil 2.2. İyonlaştırıcı radyasyon türlerinin çeşitli maddelerden geçişleri	11
Şekil 2.3. İyonlaştırıcı radyasyonun günlük yaşamdaki maruziyetleri	19
Şekil 2.4. Fotoelektrik olayın şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.5. Compton saçılımı olayının şematik gösterimi	25
Şekil 2.6. Çift oluşumunun şematik gösterimi	26
Şekil 2.7. Işın demetlerinin zırh tarafından soğurulması	28
Şekil 2.8. Yarı değer katmanı.....	30
Şekil 3.1. Epoksi önpolimer reaksiyonu.....	35
Şekil 3.2. Epoksi çapraz bağlanma reaksiyonu	36
Şekil 3.3. Akrilonitril bütadien stiren polimeri	37
Şekil 3.4. Akrilonitril bütadien stiren polimeri	37
Şekil 3.11. Bor elementinin ekonomik olarak yeterince zenginleştiği oluşumlar.....	40
Şekil 3.12. Polimer döküm yöntemi.....	42
Şekil 3.13. Plastik ve elastomerler için tek vidalı bir ekstrüzyon makinasının elemanları	43
Şekil 3.14. Plastik ve elastomerler için tek vidalı bir ekstrüzyon makinasının elemanları	44
Şekil 3.15. Kaynak-dedektör sistemi, deneysel kurulumu	53
Şekil 4.1. Epoksi/bakır kompozit üretim aşamaları	56
Şekil 4.2. Epoksi/bakır kompozitlerin kalıplanma aşamaları.....	57
Şekil 5.1. Dolguların elekten geçirilmesi	62
Şekil 5.2. Malzemelerin katı karıştırma işlemi	63
Şekil 5.3. Ekstrüder ile ön şekillendirme işlemi.....	63
Şekil 5.4. Liflerin kırma makinası ile granül hale getirilmesi.....	64
Şekil 5.6. Enjeksiyonla kalıplama işlemi	65
Şekil 6.1. Epoksi-Cu kompozitlerin Çekme gerilim/gerinim grafiği	70
Şekil 6.2. Epoksi-Cu kompozitlerin Eğilme gerilim/gerinim grafiği.....	72
Şekil 6.3. Epoksi-Cu kompozitlerin Darbe dayanımı.	73
Şekil 6.4. Epoksi ve epoksi-Cu kompozitlerin 650-4000 cm^{-1} aralığındaki FTIR spektrumlarındaki önemli pikler.	74
Şekil 6.5. DSC Eğrileri, i) ECU0 kodlu saf epoksi, ii) ECU1 kodlu %1Cu dolgulu epoksi kompozit ve iii) ECU6 kodlu %6 Cu dolgulu epoksi kompozit.	76
Şekil 6.6. Sıcaklıkla birlikte ağırlık kaybını gösteren termogravimetrik analiz eğrileri.	77
Şekil 6.7. SEM mikrografı (a)ECU0, (b) ECU1, (c) ECU6'yı göstermektedir.	78

Şekil 6.8. Epoksi ve epoksi-Cu kompozitlerin Cu konsantrasyonlarına bağlı elektriksel iletkenliği.....	79
Şekil 6.9. Epoksi ve epoksi-Cu kompozitlerin yoğunluk ve sertliği.....	80
Şekil 6.10. (a) 59,5 keV, (b) 616,6 keV (c) 1332,5 keV enerjili gama ışınları için incelenen kompozitlerin lineer azaltma katsayıları.	81
Şekil 6.11. Epoksi ve epoksi kompozitlerde 59,5, 661,6 ve 1332,5 keV gama enerjileri için teorik ve deneysel lineer azaltma katsayılarının karşılaştırılması.	82
Şekil 6.12. Epoksi ve epoksi kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için lineer azaltma katsayısının değişimi	82
Şekil 6.13. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerin gerilim/gerinim grafiği.....	83
Şekil 6.14. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerin eğilme gerilimi/uzama grafiği.....	85
Şekil 6.15. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerin dolgu yüklemesine karşı darbe dayanımı grafiği	86
Şekil 6.16. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerin dolgu yüklemesine karşı darbe dayanımı grafiği	87
Şekil 6.17. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerin FTIR analizi	90
Şekil 6.18. DSC Eğrileri; (i) Saf ABS, (ii) 20NaABS, (iii) 20BaABS, (iv) 10Na10BaABS	91
Şekil 6.19. NaB ₅ O ₈ /BaSO ₄ /ABS kompozitlerin DTG Eğrileri	92
Şekil 6.20. NaB ₅ O ₈ /BaSO ₄ /ABS kompozitlerin TGA Eğrileri	92
Şekil 6.21. SEM mikrografı (a) Saf ABS (b) 20BaABS, (c) 20NaABS, (d) 15Na5BaABS, S, (e) 10Na10BaABS, (f) 5Na15BaAB 'yı gösterir.	94
Şekil 6.22. NaB ₅ O ₈ / BaSO ₄ /ABS kompozitlerin su absorpsiyon grafiği.....	96
Şekil 6.23. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için ABS kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının değişimi.....	98
Şekil 6.24. ABS kompozitlerde 59,5 keV enerjili gama ışınları için ABS kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının değişimi	99
Şekil 6.25. ABS kompozitlerde 661.6 keV enerjili gama ışınları için ABS kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının değişimi	99
Şekil 6.26. ABS kompozitlerde 1332,5 keV enerjili gama ışınları için ABS kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının değişimi	100
Şekil 6.27. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için yarı kalınlık değerlerinin değişimi.	101
Şekil 6.28. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için onda bir kalınlık değerlerinin değişimi	102
Şekil 6.29. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için ortalama serbest yol değerlerinin değişimi.....	103

RADYASYON KORUMA ÖZELLİKLERİ GELİŞTİRİLMİŞ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, radyasyondan korunmak için bazı polimer kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu hedeflenmektedir. Numuneler radyasyon çeşidi olarak gama radyasyonuna maruz bırakıldı ve gama ışınlarına karşı zırhlama özellikleri değerlendirildi.

Bu amaçla polimer kompozit eldesinde matris malzeme olarak epoksi reçine ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimer kullanıldı, dolgu maddesi olarak ise bakır (Cu), sodyum pentaborat (NaB_5O_8) ve barit (BaSO_4) kullanıldı. Dolgu maddeleri farklı oranlarda polimer matrise eklendi ve kompozit malzemeler elde edildi. İlk çalışmada; epoksi reçineye farklı oranlarda bakır tozu eklendi ve polimer döküm yöntemi ile kompozit elde edildi. Sonraki çalışmada; ABS polimere farklı oranlarda NaB_5O_8 ve BaSO_4 eklendi, ekstrüder ve enjeksiyon makinası kullanılarak kompozit elde edildi. Her iki çalışmada elde edilen polimer kompozit malzemelerin radyasyon koruma özellikleri, mekanik özellikleri, mikroyapı görüntülemeleri ısıl-mekanik özellikleri incelendi ve karakterize edildi. Kompozitlerin, yoğunluk, sertlik (Shore D), parlaklık, su absorpsiyon ve elektriksel iletkenlik özellikleri incelendi, SEM, DSC, TGA, FTIR analizleri gerçekleştirildi.

Sonuçlar, %1 ila %4 oranında bakır parçacıkları eklenen Cu/Epoksi kompozitlerde, saf epoksiye kıyasla eğilme mukavemeti ve eğilme elastik modülünün arttığını göstermiştir. Cu/Epoksi kompozitlerin radyasyon zırhlama özellikleri 59,5, 661,6 ve 1332,5 keV enerjili gama ışınları için incelenmiş 59,5 keV enerjili gama ışınları için en iyi sonuçları vermiştir. Çalışmada, NaB_5O_8 / BaSO_4 /ABS kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş en iyi darbe dayanımı, çekme mukavemeti ve uzama değerini %20 barit içeren kompozit sergilemiştir. Mekanik testlerden elde edilen sonuçlar, SEM görüntülerinden elde edilen gözlemlerle desteklenmiştir. NaB_5O_8 / BaSO_4 /ABS kompozitlerin 59,5-1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık, onda bir kalınlık ve ortalama serbest yol değerleri incelenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, 59,5 keV ve 661,6 keV'de 20BaABS numunesi en yüksek lineer azaltma katsayısı değerini sergilerken, 1332,5 keV'de en yüksek değeri 5Na15BaABS numunesi göstermiştir. 59,5 keV enerjide, tüm kompozit örneklerinde yarı kalınlık değerlerinin saf polimerden daha iyi gama zırhlama yeteneğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmada geliştirilen sistemler literatürde bulunan geleneksel radyasyon tutucu sistemlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gama radyasyonu, Radyasyon zırhlama, Polimer kompozit

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS WITH ENHANCED RADIATION SHIELDING PROPERTIES

ABSTRACT

In this study, the aim was to produce some polymer composites with improved radiation shielding properties and to investigate their radiation shielding properties. Samples were exposed to gamma radiation as a type of radiation and their shielding properties against gamma rays were evaluated. For this purpose, epoxy resin and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) polymer were used as matrix materials in obtaining polymer composites, and copper (Cu), sodium pentaborate (NaB_5O_8) and barite (BaSO_4) were used as fillers. Fillers were added to the polymer matrix at different rates and composite materials were obtained. In the first study, copper powder was added to the epoxy resin at different rates, and the composite was obtained by polymer casting method. In the next study, NaB_5O_8 and BaSO_4 were added to the ABS polymer at different rates, and the composite was obtained using an extruder and injection machine. The radiation shielding properties, mechanical properties, microstructure imaging and thermal-mechanical properties of the polymer composite materials obtained in both studies were examined and characterized. The composites were examined for density, hardness (Shore D), gloss, water absorption and electrical conductivity, and SEM, DSC, TGA and FTIR analyses were performed. In the last study, natural polymers such as chitin, chitosan, hemp seed and hemp fiber were used to shape the composites using the press method and the radiation shielding properties of these natural polymers were examined.

The results showed that in Cu/Epoxy composites with 1% to 4% copper particles added, the flexural strength and flexural elastic modulus increased compared to pure epoxy. The radiation shielding properties of Cu/Epoxy composites were examined for gamma rays with energies of 59.5, 661.6 and 1332.5 keV, and the best results were obtained for gamma rays with energies of 59.5 keV. In the study, the mechanical properties of $\text{NaB}_5\text{O}_8/\text{BaSO}_4/\text{ABS}$ composites were examined and the composite containing 20% barite exhibited the best impact strength, tensile strength and elongation values. The results obtained from mechanical tests are supported by the observations obtained from SEM images. The linear attenuation coefficient, half-value layer, tenth-value layer and mean free path values of $\text{NaB}_5\text{O}_8/\text{BaSO}_4/\text{ABS}$ composites for gamma rays in the energy range of 59.5-1332.5 keV were examined. According to the measurement results, while the 20BaABS sample exhibited the highest linear attenuation coefficient value at 59.5 keV and 661.6 keV, the 5Na15BaABS sample showed the highest value at 1332.5 keV. At 59.5 keV energy, it was determined that the half-value thickness values in all composite samples had better gamma shielding ability than the pure polymer.

The systems developed in the study were compared with the traditional radiation shielding systems in the literature and the results were evaluated.

Keywords: Gamma radiation, Radiation shielding, Polymer composite

1. GİRİŞ

Günümüz modern teknolojisinde radyasyon ışınları nükleer tesislerde, tıp merkezlerinde, tarımda, enerjide ve bilimsel araştırmalarda sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Radyasyonun artan kullanımı bu potansiyel yararlarının yanında insan ve çevre üzerinde büyük bir tehlikeyi de beraberinde getirmektedir. Olumsuz etkileri ortaya konan radyasyondan korunmak için radyasyon zırhlama analizi ve dizaynı geliştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle kurşun kullanılmış ancak toksik etkileri ve çevreyi kirletmesi nedeniyle kayalar ve beton gibi diğer geleneksel malzeme kullanımına gidilmiştir [2-4]. Yıllar içinde alternatif zırhlama malzemeleri olarak hizmet edecek daha iyi yeni malzeme geliştirme yolunda ilerleme kaydedilmiştir. Bu bağlamda radyasyon zırhlama malzemesi olarak polimer ve polimer kompozit malzemelerin verimliliği ve performansı üzerine çalışılmaktadır [5, 6]. Bir iyonlaştırıcı radyasyon türü olan gama ışınları madde içerisine nüfuz edebilme kabiliyeti nedeniyle tehlikelidir. Gama ışınlarının etkileşimi bir madde içinde olabileceği gibi insan vücudunda da olabilir. Bu nedenle gama radyasyonuna karşı zırhlama teknikleri temel alınarak zırh malzemesi geliştirilmeye çalışılmıştır [7, 8]. Polimerler hafif olmaları, kolay işlenebilmeleri, mekanik dayanımları ve çok işlevli özellikleri nedeniyle radyasyon zırhlama için umut vericidir [5, 6]. Çalışmada, metal ve mineral dolguların (bakır, sodyum pentaborat, barit) polimer matrise (epoksi, ABS) eklenmesiyle elde edilen polimer kompozitler gama radyasyonuna karşı zırhlama malzemesi olarak araştırılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Radyoaktif elementlerin artan kullanımı, radyoaktif kirliliği arttırmakta ve bireyleri korumak için gelişmiş materyallere ihtiyaç duyulmaktadır. Polimerler mekanik, elektriksel, termal ve çok işlevli özelliklerinden dolayı bu ihtiyacı karşılamak için alternatif bir malzeme grubudur. Polimer malzemeler, geleneksel radyasyon koruyucu malzemelere kıyasla oda sıcaklığında katı halde bulunmaları, kolayca şekillendirilebilmeleri ve düşük yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle radyasyon koruma malzemesi olarak araştırılmaktadır. Özellikle perdeleme karakterizasyonu için gama radyasyonlarının bazı polimer malzemelerle etkileşimleri incelenmiştir [9]. Polimer malzemelerin kurşun (Pb) içermeyen sodyum pentaborat ve barit gibi ağır mineraller veya bakır gibi metaller ve bunların oksitleri ve tuzları [10-13] ile katkılı kompozitleri, düşük ağırlıkları, yüksek korozyon dirençleri, esneklikleri, basit ve düşük maliyetli işleme yöntemleri, yüksek nötron emme yetenekleri nedeniyle radyasyon zırhı olarak potansiyel kullanıma sahiptirler [14-16]. Özellikle, polimerlerin ve yüksek atom numaralı dolgu maddelerinin kullanımıyla elde edilen polimer kompozitler, düşük ağırlıklı, iyi esnekliğe ve iyi işlenebilirliğe sahip

malzemelerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum radyasyondan korunma için polimer malzemelerin kullanımına olan ilgiyi arttırmaktadır [17]. Bu çalışmada, polimer matrise (epoksi ve ABS) yüksek atom numaralı dolgu maddeleri (bakır, sodyum pentaborat ve barit) eklenerek zırh malzemelerinin hazırlanması ve dolgu maddelerinin rolüne odaklanarak radyasyondan korunma için kullanılabilirliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.2.Literatür Araştırması

Bazı atomlar, çekirdeğindeki nötron ve proton sayılarının dengesiz olması sonucu kararsızdır, bu tür atomlara radyoaktif atom denir. Bu kararsızlık atom çekirdeğinde enerji fazlalığına neden olmakta ve ışıma şeklinde salınmaktadır. Salınım olayı atom çekirdeğinde proton sayısı nötron sayısı ile dengeleninceye yani kararlı hale gelinceye kadar devam etmektedir. Radyasyon, atomun kararlı yapıya geçme sürecinde doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmek için dışarı saldıkları fazla enerjidir. Salınan bu enerji, hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalga şeklinde taşınmaktadır [18, 19].

Radyasyon iyonizasyon oluşturan (iyonize radyasyon) ve iyonizasyon oluşturmeyen (noniyonize radyasyon) radyasyon şeklinde sınıflandırılmaktadır. İyonizasyon oluşturan radyasyon, karşılaştığı atomun yörüngelerinden elektron kopararak iyon çiftleri oluşturan radyasyondur [18]. İyonlaşma, radyasyonla etkileşime giren herhangi bir maddede meydana gelebileceği gibi insan vücudunda da meydana gelebilir [19]. İyonlaştırıcı radyasyonlar yüksek enerjili oldukları için madde içerisine girerek, atomların elektronlarını koparabilmekte ve bu nedenle insan sağlığını etkileyebilmektedirler [18]. İnsanlar için bu durum organ hasarına, hücre mutasyonuna, kansere, bileşen yetmezliğine ve diğer zararlı etkilere neden olabilir [1]. İyonize radyasyon, parçacık ve dalga tipi olmak üzere iki ana başlıkta incelenir. Parçacık tipi radyasyon, belirli bir enerji ve kütleye sahip çok hızlı hareket eden parçacıkları ifade etmektedir. Parçacık tipi radyasyona, alfa (α) ve beta (β^+ , β^-) radyasyonları örnek verilebilir. Dalga tipi radyasyon ise kütlesiz olup belirli bir enerjiye sahip olan radyasyon çeşididir. Atomu çevreleyen elektron bulutunda meydana gelen X ışını ve atomun çekirdeğinde meydana gama (γ) ışını dalga tipi radyasyona birer örnektir. İyonize olmayan radyasyon, etkileşime girdiği maddede iyonlar oluşturmeyen radyasyon çeşididir. İyonize olmayan radyasyona, kızıl ve mor ötesi ışık, radyo dalgaları, mikro dalgalar ve görünür ışık örnek verilebilir [20]. Bu tür radyasyonlar düşük enerjili oldukları için madde içerisine (örneğin insan vücuduna) giremeyip sadece maddenin atomlarını titreştirmekte ve etkileştikleri ortamın sıcaklığını çok az bir miktar arttırmaktadırlar [18].

Günümüz modern teknolojisinde radyasyon farklı amaçlarla farklı sektörlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin; tarımda, enerjide, nükleer tesislerde, tıp merkezlerinde ve bilimsel araştırmalarda radyasyon kullanılmaktadır. Radyasyonun potansiyel yararlarının yanında çeşitli zararlarının de var olduğu yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur [1]. Bu nedenle radyasyondan korunmak için zırhlama araştırmaları yapılmaktadır. Radyasyondan korunma parametreleri maruz kalma süresi, mesafe ve zırhlama şeklinde sıralanmaktadır. Zırhlama radyasyon dozunu kabul edilebilir seviyelere indirmek amacı ile radyasyon kaynağı ile kişi arasına koruyucu engel konulmasıdır. Zırhlama amacıyla genellikle ağır beton, tuğla, duvar, metal bloklar zırhlama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Zırhlama malzemelerinin yoğunluğu ne kadar fazla ise gama veya X-ışınlarını zırhlama özelliği o kadar artar. Zırhlama, radyasyon yayan cihazın zırhlanması ve cihazın bulunduğu odanın zırhlanması olarak iki farklı şekilde yapılır [19]. Zırhlama için radyasyon çeşidine (nötron, X ve gama ışınları, proton vb.) göre en uygun zırhlama malzemesi seçilmelidir.

Radyasyondan korunmak amacıyla metal bloklar [2], beton bloklar [3, 21], kurşun ve cıva içeren yapılar [4, 17, 22], kullanılmaktadır. Geleneksel radyasyon koruyucu malzemeler yüksek maliyetli olmaları, ağır olmaları ve doğaları gereği bazılarının toksik (kurşun, cıva gibi) olmalarından dolayı kullanımları sakıncalıdır. Bu olumsuzluklar nedeniyle toksik olmayan, daha hafif ve düşük maliyetli radyasyon koruyucu malzeme ihtiyacı doğmuştur.

1.2.1. Radyasyondan korunmada geleneksel zırhlama malzemelerinin kullanımı

Radyasyondan korunmanın en önemli yöntemi zırhlamadır. Zırhlamada temel amaç radyasyon kaynağından yayınlanan zararlı ışınların kişilere ulaşmasını engellemek veya kabul edilebilir düzeye indirmektir. Zırhlama kullanım alanına ve radyasyon türüne bağlı olarak farklı malzemeler kullanılarak birçok şekilde yapılabilir. Madde içerisine nüfuz edebilme kabiliyeti nedeniyle gama ışınları oldukça tehlikelidir. Gama ışınlarına karşı geleneksel olarak kullanılan zırhlama malzemelerinin başında kurşun, demir, çelik, beton, cıva, nikel vb. içeren yapılar yer almıştır. Bu malzemelerin gama radyasyonuna karşı zırhlamada kullanımına dair literatürde çalışmalar mevcuttur.

Masoud ve diğ. [23] beton agregalara hematit ve barit ekleyerek serpantin-barit (AB25, 50) ve serpantin-hematit (AH25, 50) betonlarını elde etmiş ve zırhlama özelliklerini kontrol serpantin betonunun (A) özellikleriyle karşılaştırmıştır. Bu betonların hızlı nötron ve gama ışınlarını zırhlama özellikleri, lineer zayıflatma katsayıları, farklı enerjilerdeki gevşeme uzunluğu (λ) ve yarı değer uzunluğu (HVL) parametrelerinin ölçülmesiyle belirlenmiştir. B ve H'nin dahil

edilmesinin, serpantin esaslı betonların zayıflama özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Bu iyileştirmenin, eşdeğer oranlarda H yerine B kullanılması durumunda daha etkili olduğu ve %50 B, hızlı nötronların ve gama ışınlarının zırlamasını daha iyi artırdığı saptanmıştır.

Başıyigit ve diğ. [24] cam, normal beton, baritli beton, düşük karbon çeliği ve ahşap gibi yapı malzemelerini kullanmış ve bu malzemelerin 10keV ile 100 GeV geniş enerji aralığındaki radyasyon zırlama özelliklerini incelemiştir. Hesaplanan radyasyon tutuculuk katsayısı (μ) değerinin yüksek ve düşük enerji bölgelerinde önemli değişimler gösterdiği, orta enerji bölgelerinde ise aynı değişimi sergilediği saptanmıştır.

Hussein ve diğ. [25] farklı oranlarda sırasıyla %50, %35 ve %15 mol konsantrasyonlarında kurşun monoksit (PbO) içeren seryum (Ce), antimon (Sb) ve mangan (Mn) borat cam sistemlerini eritme-tavlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Monte Carlo kodu (MCNP5) ve Phy-X/PSD yazılımı ile zırlama parametreleri incelenmiş ve kütle ve doğrusal zayıflama katsayıları, etkili atom numarası (Z_{eff}), radyasyon koruma verimliliği, yarım ve onda bir değer katmanları verileri elde edilmiştir. Üç camın zırlama davranışının karşılaştırılması, Ce-kurşun borat camının en yüksek kütle ve doğrusal zayıflama katsayıları, etkili atom numarası, radyasyon koruma verimliliği değerlerine ve en iyi zırlama verimliliğine atıfta bulunan en düşük yarım ve onda bir değer katmanları ve ortalama serbest yol değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Sharkawy ve diğ. [22] arka plan radyasyonunu daha da azaltmak için düşük arka planlı bir kurşun (Pb) kalkanının içine civa (Hg) pasif kalkanı eklemenin avantajlarını araştırmıştır. 25 ila 2700 keV enerji aralığında tek başına Pb kalkanı tarafından elde edilen arka plan sayım oranı, normal arka planın %15'i olan $8.4 \cdot 10^{-4}$ sayım/s.keV'ye ulaşmıştır. Hg kalkanının eklenmesinin %15'lik bir azalma daha sağlayarak X ve gama ışınlarının net tepe alanlarını daha düşük bir seviyeye bastırdığı görülmüştür.

Akkurt ve diğ. [26] çeliğin radyasyon kalkanı özelliklerini ve borlama işlemiyle bu özelliklerin değişimini araştırmıştır. Bu amaçla çelik 662 keV ve 1250 keV foton enerjisinde borlanmış ve çeliğin borlanmadan önce ve sonraki doğrusal zayıflama katsayıları ölçülmüştür. Borlamadan önce ölçülen sonuçlar teorik hesaplamayla karşılaştırılmıştır. Borlamanın çeliğin radyasyon kalkanı özelliklerini iyileştirdiği açıkça görülmüştür.

Akkurt ve diğ. [27] foton zayıflatma katsayısının kimyasal ortamdaki değişimini araştırmışlardır. Bu amaçla barit betonunun doğrusal zayıflatma katsayıları kimyasal ortamdan ayrılmadan önce ve 6 aylık bir sürenin ardından 662, 1773 ve 1332 keV'de bir NaI (Tl)

dedektörü ve 16 k kanallı MCA içeren gama spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümden, kimyasal ortamın barit betonunun doğrusal zayıflama katsayılarını azalttığı ve baritin beton üretimi için önemli olduğu bulunmuştur.

Tasnim ve diğ. [28] yüksek oranda (>%80) BaSO₄ içeren yüksek yoğunluklu zırhlama malzemeleri geliştirmiş ve gama ışını zayıflama parametrelerini araştırmıştır. Bu bağlamda üç numune hazırlanmış [Numune-1 (%83,75), Numune-2 (%84,75) ve Numune-3 (%82,75)], element bileşimleri EDX yöntemi ile belirlenmiş ve Numune-1 (3,362 g/cm³), Numune-2 (3,365 g/cm³) ve Numune-3 (3,358 g/cm³) için yoğunluk deneysel olarak ölçülmüştür. 1 keV ila 100 MeV arasındaki foton enerji aralığı için doğrusal zayıflama katsayısı, toplam atom kesiti (toplam elektronik kesit (σ_e), etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) ve gevşeme uzunluğu hesaplanmıştır. Tüm parametreler barit, serpantin, ilmenit-manyetit, sıradan beton ve bazalt-manyetit olmak üzere beş farklı betonun değerleriyle karşılaştırılmıştır. En yüksek yoğunluğa (3,365 g/cm³) sahip olan ve nispeten daha yüksek atom numaralı elementlerden oluşan Numune-2'nin gama ışını zayıflatması için en etkili zırh olduğu bulunmuştur.

1.2.2. Radyasyondan korunmada polimer ve polimer kompozitlerin kullanımı

Günümüz koşullarında, tüm zararlı etkilerine rağmen iyonlaştırıcı radyasyon tıbbi görüntüleme cihazlarında, nükleer santrallerde, arkeolojik çalışmalarda, akıllı tarım uygulamalarında vb. alanlarda önemli bir rol oynar. Bu nedenle kişileri bu zararlı radyasyona karşı korumak için güçlü bir koruma gereklidir. Bu sorunu ele almak için ilk girişim kurşun kullanımı olmuştur ancak toksik etkileri ve çevreyi kirletmesi nedeniyle kayalar ve beton gibi diğer kurşunsuz geleneksel malzemeler bir alternatif olarak düşünülmüştür. Araştırmacılar bunu daha da ileri götürerek alternatif zırhlama malzemeleri olarak hizmet edecek daha iyi yeni malzeme geliştirme yolunda ilerlemektedir. Bu bağlamda radyasyon zırhlama malzemesi olarak polimer ve polimer kompozit malzemelerin verimliliği ve performansı üzerine çalışılmaktadır [5, 6, 15]. Polimerler mekanik, elektriksel, termal ve çok işlevli özellikleri nedeniyle radyasyon zırhlama için umut vad ediyor. Polimerlerden ve yüksek atom numaralı dolgulardan yapılan kompozitler düşük ağırlık, iyi esneklik ve iyi işlenebilirliğe sahip malzeme elde etmeye olanak sağlamaktadır [29].

More ve diğ. [30] dar ışın geometri kurulumu kullanarak, naylon 6, naylon 1,1, naylon 6,6, naylon 6,9, naylon 6,10 ve naylon 6,12 için kütle azaltma katsayıları, toplam atom kesitleri (σ_t), molar sönüm katsayıları (ϵ), elektronik kesitler (σ_e), etkin atom numaraları ve elektron yoğunlukları hesaplamıştır. Mevcut araştırmada, 122, 356, 511, 662, 840, 1170, 1275 ve 1330

keV enerji yayan radyonüklidler ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , Co^{57} , Ba^{133} , Cs^{137} , Na^{22} , Mn^{54} ve Co^{60} çok kanallı analizörle birleştirilmiş bir NaI (TI) dedektörü tarafından sayılmıştır. Kütle azaltma katsayıları, toplam atomik kesir kesitleri ve elektronik kesiti değerlerinin seçilen enerji aralığında compton saçılmasının baskınlığı nedeniyle gama fotonlarının artan enerjisiyle azaldığı saptanmıştır. Hesaplanan sonuçlardan, seçilen numuneler arasında naylon 1,1'in düşük enerji bölgesinde gama fotonlarını iyi emme yeteneğine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu çalışma ile büyük ölçekte kullanılabilecek ve düşük maliyetle temin edilebilecek yeni gama ışıını engelleyici malzemelerin araştırılması için bir girişimde bulunulmuştur.

Plionis ve diğ. [31] kurşunun sağlık açısından tehlikeli olması, bertaraf ve endüstriyel hijyen açısından sorun oluşturmaları nedeniyle kurşuna benzer zırhlama özelliklerine sahip tehlikesiz bir malzeme olarak bizmutu araştırmışlardır. Her iki malzemenin zırhlama etkinliğini karşılaştırmak için kurşun ve polietilen bazlı bizmattan oluşan dedektör zırhlaması kullanılarak bir germanyum (HPGe) dedektörü karakterize edilmiştir. Sonuç olarak polimer bizmut tuğlaları, hassas düşük enerjili ölçümler için gama spektrometre zırhlaması olarak önerilmiştir.

Sharma ve diğ. [32] makul esnekliği ve güvenilirliği nedeniyle FLUKA Monte Carlo kodu kullanarak politetrafloroetilen, bakalit, polietilen tereftalat, polipropilen, polisülfon, polistiren, polietilen, doğal kauçuk, polimetil metakrilat ve polivinilklorür gibi bazı polimerik malzemeler için kütle azaltma katsayısı, gevşeme uzunluğu, onda bir kalınlık, yarı kalınlık, elektronik tesir kesiti, atomik tesir kesiti, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu gibi radyasyon etkileşimiyle ilgili parametreler bildirilmiştir. FLUKA simülasyon programı kullanılarak 59,5 (^{241}Am), 80,9 (^{133}Ba), 140,5 ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), 356,5 (^{133}Ba), 661,6 (^{137}Cs), 834,8 (^{54}Mn), 1173,2 (^{60}Co) ve 1332,5 (^{60}Co) keV enerjili yaygın olarak kullanılan gama kaynakları için araştırmalar rapor edilmiştir. FLUKA Monte Carlo koduyla elde edilen sonuçlar, XCOM standart referans veri tabanı ile %1'den daha az bir bağıl sapmaya sahip olarak iyi bir şekilde uyumuştur. Seçilen polimerler arasında polivinilklorür ve politetrafloroetilen sırasıyla 59,5 keV- 1332,5 keV aralığında düşük ve yüksek enerji uçlarında en iyi zırhlama özelliği göstermiştir.

Kılınçarslan ve diğ. [33] pamuk polyester karışımı kumaş kullanarak kaplama yöntemi ile kumaşlara barit nüfuz ettirmiş ve radyasyon zırhlama özelliğine sahip barit kaplı kumaşlar elde etmiştir. Barit, yüksek atom numaralı bir element olan baryum nedeniyle zırhlama amacıyla kullanılabilen bir mineral olduğu için tercih edilmiştir. Kaplama yöntemi ile kumaşa barit minerali uygulamak için çeneli kırıcılar kullanılarak barit 2-10 mikron boyutuna öğütülmüştür. Yapıştırıcı olarak FK 800/N tipi şeffaf bileşik kullanılmıştır. Barit oranının %0, %40, %50 ve %60 olduğu dört farklı kumaş türü üretilmiştir. Kaplamalı barit kumaşların lineer azaltma

katsayıları sırasıyla ^{137}Cs ve ^{60}Co -ışın kaynakları kullanılarak 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjilerinde ölçülmüştür. Ölçüm 16k kanallı analizöre bağlı NaI(Tl) içeren gama spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları barit kaplamalı kumaşların radyasyonu engellediğini göstermiştir. Barit oranı arttıkça emilen radyasyon miktarının da arttığı tespit edilmiştir.

Sarraf ve diğ. [34] radyasyon azaltma ve koruma yeteneklerine sahip yalıtkan epoksi/barit ve çapraz bağlı doymamış polyester/barit kompozitleri oluşturmak için bir deneme yapmıştır. Kompozitlerin pratik uygulamalar için bütünlüğünü incelemek amacıyla mekanik ve fiziksel özelliklerle incelenmiştir. Radyasyon zayıflatma özellikleri, fisyon ^{252}Cf (100 μg) nötron kaynağından yayılan kolime edilmiş ışın ve stilben sintilatörlü nötron-gama spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nötron ve gama ışını darbeleri arasında ayırım yapmak için sıfır geçiş yöntemine dayalı darbe şekli ayırma (P.S.D) tekniği kullanılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Chang ve diğ. [35] farklı ağırlık yüzdelerinde tungsten tozu kullanarak tungsten/epoksi kompozitler hazırlamıştır. Dolgu yüklemesinin kompozitlerin zırhlama ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, Co-60 kaynağının iki farklı aktivitesi kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar, tungsten yüklemesinin artmasıyla kompozitlerin zırhlama özelliğinin arttığını göstermektedir. Ancak, ışınlama dozunun artmasıyla, kompozitlerin termal kararlılığı ve mekanik özelliklerinin önce azaldığı, sonra hafifçe arttığı ve gama radyasyonundan kaynaklanan zincir kopması nedeniyle sonunda keskin bir şekilde düştüğü görülmüştür.

Ambika ve diğ. [36] doymamış polyester reçineye ağırlıkça %60 bizmut oksit (Bi_2O_3) takviye etmiştir. Bizmut oksidin kompozitlerin gama koruma yeteneği üzerindeki etkisi, Ba-133, Cs-137 ve Co-60 gama ışını kaynakları kullanılarak azaltma parametreleri açısından incelenmiştir. Sonuçlar, kompozit malzemenin koruma özelliğinin dolgu konsantrasyonundaki artışla arttığını ve enerjiyle azaldığını ortaya koymuştur. Kompozitlerin HVL, TVL ve gevşeme uzunluğunun dolgu konsantrasyonundaki artışla azaldığı saptanmıştır. %60 dolgulu polimer kompozitin koruma yeteneğinin düşük enerjide baritinkine benzer olduğu bulunmuştur. Polimer kompozitin tüm enerjilerde iyi performans gösterdiği ve düşük enerjiler için mükemmel bir gama radyasyon zırh görevi görebileceği kanıtlanmış ve geleneksel koruma malzemeleriyle karşılaştırıldığında iyi bir alternatif malzeme olabileceği bildirilmiştir.

1.3.Hipotez

Polimer kompozitlerin radyasyon koruma özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan çalışmaların sayısının fazlaştığı ve radyasyondan korunma amacıyla polimer malzemelerin ve organik ve inorganik dolgulu polimer kompozitlere olan ilginin arttığı görülmektedir. Gama radyasyonu tutucu özelliğine odaklanarak bakır/epoksi kompozit kullanımına dair literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Sodyum pentaborat ve barit'in tek tek dolgu olarak kullanıldığı çalışmalar olmasına rağmen, sodyum pentaborat ve baritin birlikte kullanımıyla oluşacak sinerjik etkinin polimer kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgili literatürde veriye rastlanmamaktadır.

Bu çalışmada polimer kompozit eldesinde matris malzeme olarak epoksi reçine ve akrilonitril bütadien stiren polimer kullanılacak, dolgu maddesi olarak ise bakır, sodyum pentaborat ve barit kullanılacaktır. Dolgu maddeleri farklı oranlarda polimer matrise eklenecek ve kompozit malzemeler elde edilecektir. İlk çalışmada; epoksi reçineye farklı oranlarda bakır tozu eklenecek ve polimer döküm yöntemi ile kompozitler hazırlanacaktır. Sonraki çalışmada; ABS polimere farklı oranlarda NaB_5O_8 ve BaSO_4 eklenecek, ekstrüder ve enjeksiyon makinası kullanılarak kompozit numuneleri üretilecektir. Elde edilen polimer kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama özellikleri, mekanik özellikleri, mikroyapı görüntülemeleri ısıl-mekanik özellikleri incelenecek ve karakterize edilecektir.

Bu tez çalışmasında farklı radyasyon dalga boylarında düşük oranlarda bile bakır gibi dolguların radyasyondan korumada etkili olabileceği, sodyum pentaborat ve barit gibi radyasyon zırhlama özellikleri yüksek malzemelerin birlikte kullanılmasıyla sinerjik etkilerinin hem ürün özelliklerini geliştireceği hem de daha yüksek radyasyon zırhlama özelliği sunacağı düşünülmektedir.

2. RADYASYON VE RADYASYONDAN KORUNMA

2.1.Radyasyon

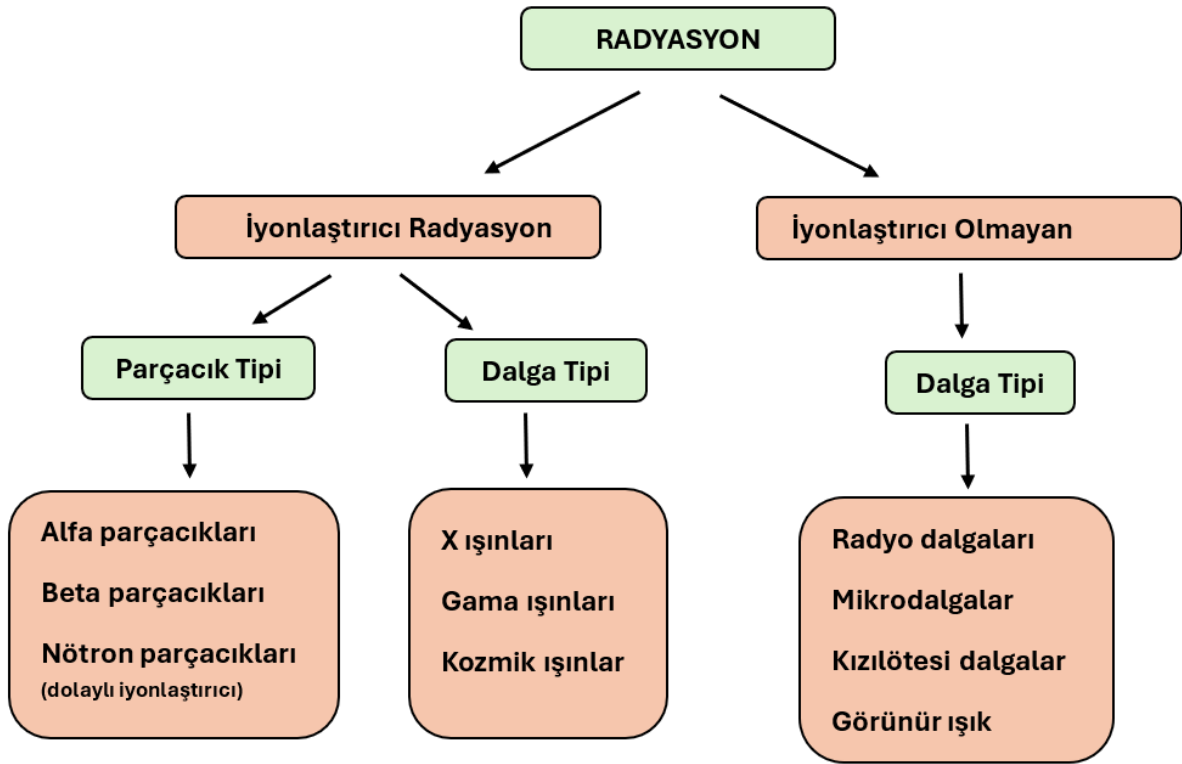
Atom bir kimyasal elementin bütün özelliklerini taşıyan en küçük yapısıdır. Atom proton, nötron ve elektrondan oluşur. Atom çekirdeğinde pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlar yer alırken, çekirdeğin etrafında negatif yüklü elektron bulutu yer almaktadır. Atomdaki proton sayısı kimyasal elementi tanımlarken, nötron sayısı elementin izotopunu tanımlar. Bu iki parçacık birlikte nükleon olarak adlandırılır [37]. Atomda bulunan elektronlar belirli enerji seviyelerinde bulunmakta ve bu seviyeler arasında foton salınımı veya Emilimi yaparak geçişler yapabilmektedir. Atomdaki proton sayısı elektron sayısına eşit olduğunda atom elektriksel olarak yüksüzdür. Elektron ve proton sayıları eşit değilse bu parçacık iyon olarak adlandırılır [38]. Bazı atomların ise çekirdeğindeki nötron ve proton sayıları eşit değildir. Bu tür atomlar, çekirdeğindeki nötron ve proton sayılarının dengesiz olması sonucu kararsızdır. Bu tür kararsız atomlara radyoaktif atom denir [39]. Bu kararsızlık atom çekirdeğinde enerji fazlalığına neden olmakta ve ışıma şeklinde salınmaktadır. Salınım olayı atom çekirdeğinde proton sayısı nötron sayısı ile dengeleninceye yani kararlı hale gelinceye kadar devam etmektedir. Radyasyon, atomun kararlı yapıya geçme sürecinde doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmek için dışarı saldıkları fazla enerjidir. Salınan bu enerji, hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalga şeklinde taşınmaktadır [18, 19].

Atomların fazla enerjilerini çevreye radyasyon yayarak gidermelerine radyoaktivite adı verilir. Radyoaktivite ilk olarak 1896 yılında Becquerel' in X-ışınları ve uranyum tuzlarının fosfor esanslığı üzerine yaptığı çalışmalarda uranyum tuzlarının gözle görülemeyen fakat fotoğraf filmine etki edebilen görünmez ışınlar yaydığını keşfetmesiyle ortaya çıkmıştır [37]. İlerleyen yıllarda 1899'da Ernest Rutherford alfa radyasyonu ve beta radyasyonu olmak üzere en az iki farklı radyasyon türü olduğunu göstermiştir [38]. 1902'de Marie Curie ve eşi Pierre Curie uranyum ile deney yaparken benzer ışınlarla rastlamış polonyum ve radyumun oluştuğunu görmüşlerdir [26, 39].

2.2. Radyasyon Çeşitleri

Radyasyon sözcüğü madde içine nüfuz edebilen ışınlar, yani girici ışınlar anlamında kullanılmıştır. Belirli bir radyasyon türü için giricilik enerji ile ilgili bir özelliktir ve radyasyon çeşidine göre değişmektedir. Düşük enerjili ışınlar (görünür ışık vb.) girici değildir. Enerjileri yüksek dalga boyları kısa olan x-ışını ve gama ışını ise madde içine nüfuz edebilen yapıdadırlar. Radyasyon bir ortamda yayılırken ortamdaki atom veya moleküllerle çarpışır. Bu çarpışma

sonucunda madde içine nüfuz edip cismi oluşturan atomları iyonlaştırması veya iyonlaştırmaması itibariyle iki sınıfta incelenir [40]. Atom ile etkileşip atomdan elektron kopararak, pozitif ve negatif elektrik yüklü bir iyon çifti oluşturuyorsa bu tip radyasyona iyonlaştırıcı radyasyon denir. İyonlaştırıcı radyasyon, parçacık ve dalga özelliğinde olabilmektedir. Atom ile etkileştiğinde iyonlaşma meydana getirmeyen radyasyonlara ise iyonlaştırıcı olmayan radyasyon denir [41]. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon dalga tipi radyasyon özelliği sergiler. Şekil 2.1’de İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon çeşitleri görülmektedir.



Şekil 2.1. Radyasyon çeşitleri

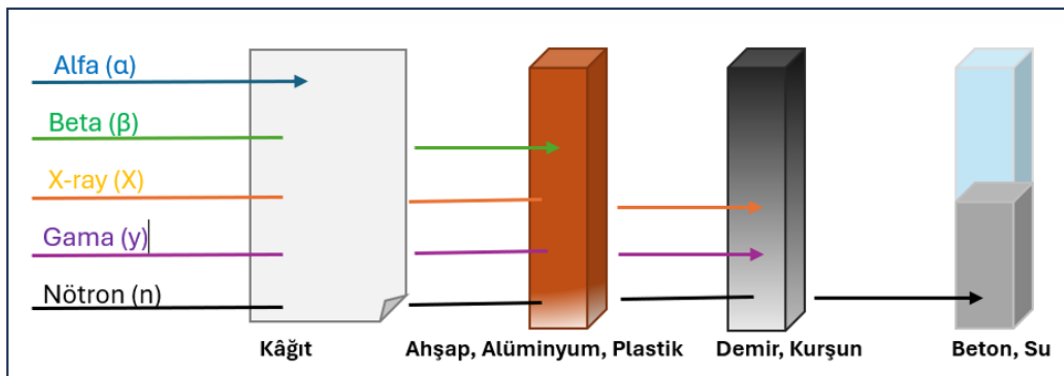
İyonlaştırıcı olmayan radyasyon düşük enerjili olduğu için etkileştiği madde içindeki atomları iyonize edemez ve sadece uyarmakla yetinir. Dolayısıyla insan ve çevre için zararlı bir radyasyon riski oluşturmaz. İyonlaştırıcı radyasyon ise yüksek enerjili olduğu için etkileştiği madde içindeki atomları iyonlaştırır [42]. İyonlaşma, radyasyonla etkileşime giren herhangi bir maddede meydana gelebileceği gibi insan vücudunda da meydana gelebilir [19, 43]. Bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyon insan ve çevre için radyasyon tehdidi oluşturmaktadır [18, 42].

2.2.1. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon enerji kuantaları (enerji paketleri) yaklaşık 10 eV'den küçük olan ve etkileştiği atomda elektron koparıp iyonlaştırma yapacak enerjiye sahip olmayan radyasyon çeşididir [44]. Düşük enerjili ve kütesiz elektromanyetik dalgalar olup herhangi bir cisme çarpıp enerji transferi gerçekleştirmedikleri müddetçe ortamda yayılırlar. Radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi dalgalar ve görünür ışık bu tür radyasyona örneklerdir. Bu dalgaların insan dokuları üzerindeki etkisi çok azdır, ancak uzun süre ve yüksek seviyelerde maruz kalındığında kişilerde baş ağrısı, uykusuzluk ve yorgunluk görülebilir [43, 44].

2.2.2. İyonlaştırıcı radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon etkileştiği ortamda iyon oluşmasına sebep olan radyasyonlara denir. İyonlaştırıcı radyasyonlar parçacık tipi ve dalga tipi olmak üzere ikiye ayrılır. Parçacık tipi radyasyonlara beta parçacıkları, alfa parçacıkları ve nötron parçacıkları (dolaylı iyonlaştırıcı) örnek verilebilir [40]. Dalga tipi radyasyonlar ise X-ışınları, gama ışınları (γ) ve kozmik ışınlardır. İyonlaştırıcı radyasyon, içine girdiği atomlarda yüklü parçacıklar (iyonlar) oluşturabilmektedir. Bu iyon oluşumları yani iyonizasyon olayı herhangi bir maddede meydana gelebileceği gibi insan dahil tüm canlı hücrelerinde de meydana gelebilmektedir [43]. Bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyon, tüm canlılar için zararlı olabilecek bir radyasyon çeşididir. Radyasyonun herhangi bir ortamda durana kadar aldığı yola radyasyonun o madde ya da ortamdaki giriciliği denir [42]. İyonlaştırıcı radyasyon türlerinin giricilik özelliklerinin bazı maddelere göre değişimi Şekil 2.2' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. İyonlaştırıcı radyasyon türlerinin çeşitli maddelerden geçişleri

2.2.2.1. Parçacık tipi iyonlaştırıcı radyasyon

Alfa (α) parçacıkları 1903 yılında Rutherford tarafından bulunmuştur. Alfa ışıması, atomun çekirdeğinde hem nötron hem de proton fazlalığından dolayı meydana gelmektedir. Atom iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığını yayımlayarak daha küçük ve kararlı hale gelmektedir. Alfa parçacıkları; iki elektronunu kaybetmiş pozitif yüklü bir helyum atomu çekirdeğidir. Alfa parçacığının pozitif yükü elektronun yükünün iki katı ($\alpha^+ = 2 \times 1,6 \times 10^{-19}$ C) kütlesi ise bir helyum çekirdeğinin kütlesi ($m_\alpha = 6,69 \times 10^{-27}$ kg) kadardır. Alfa parçacıkları bozunum sırasında enerjinin büyük bir kısmını, momentumun korunumu kanununca atoma göre daha küçük kütleye sahip oldukları için, bünyelerine alırlar. Alfa parçacıklarının enerjileri 4-10 MeV arasında değişmektedir. Alfa parçacığı yüksek enerjiye sahip olsa da ağır kütlesi nedeniyle menzili fazla olmaz, bir kâğıt parçası veya 8-10 cm'lik bir hava tabakası tarafından tamamen durdurulabilir. İçerisinden geçtiği maddenin elektronları ile yoğun bir şekilde iyonlaşır. Alfa radyasyonu cildimizin dış tabakası (epidermis) tarafından tamamen durdurulabilir. Ancak alfa yayan maddeler solunum ve ağız yoluyla vücuda alınırsa, iç dokuları doğrudan etki edebilir ve bu nedenle biyolojik hasara neden olabilir [37, 39, 45].

Beta parçacıkları (β) atom çekirdeği tarafından salınan yüksek hızlı parçacıklardır. Elektronla eşdeğer özellik ve kütleye sahip olup kütlesi $m_e = 9.10^{-31}$ kg'dır. Beta parçacığının elektrondan temel farkı elektronların atomik orbitallerden yayınlanması, beta parçacıklarının ise atom çekirdeğinden salınmasıdır [39]. Beta ışınları pozitif veya negatif yüklü olarak ya da elektron yakalaması şeklinde üç türlü gerçekleşebilmektedir. Pozitif yüklü elektronlar pozitron (β^+), negatif yüklü elektronlar ise negatron (β^-) olarak adlandırılır. Çekirdekte bulunan enerji fazlalığı, çekirdek civarında bir kütle oluşturur. Bu kütle çekirdekteki fazla yükü alarak, dışarıya bir beta (β) parçacığı olarak çıkar. Çekirdekteki enerji fazlalığı protonların çok olmasından kaynaklanıyorsa bir proton bir nötron ile bir pozitif yüklü elektrona dönüşür ve çekirdekten elektron yerine bir pozitron ayrılır. Bu bozunma β^+ bozunumudur. Çekirdekteki enerji fazlalığı nötronların çok olmasından kaynaklanıyorsa bir nötron bir proton ile bir elektrona dönüşür ve çekirdekten elektron ayrılır. Bu bozunma β^- bozunumudur [41, 46]. Elektron yakalama olayında, çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsızdır ve atomun çekirdeğe yakın (K, L, M) yörüngelerindeki elektronlardan biri çekirdek tarafından yakalanır. Elektron ile bir proton reaksiyona girerek nötron ve nötrino (yüksüz ve kütesiz parçacık) haline dönüşür. Bu olay, farklı karakterlerde gerçekleşebilmekle beraber genel olarak pozitron dönüşümüne benzer şekilde değerlendirilir. Pozitrondan farklı olarak bütün bozunum enerjisi nötrino tarafından alındığı için β^+ oluşmaz. Dolayısıyla bu bozunumda çekirdekten parçacık

salınmaz lakin boşalan elektron yörüngesine üst yörüngelerdeki başka bir elektron geçer ve bremmstrahlung (frenleme) radyasyonu adı verilen x ışınları yayınlanır. Beta parçacıkları belli bir kütleye sahiptir ve alfa parçacıklarının yaptığı gibi madde içerisinden geçerken madde içerisinde iyonlaşmaya sebep olur. Bu iyonlaşma, alfa parçacıklarının oluşturduğu iyonlaşmadan çok daha azdır fakat daha giricidirler. Çünkü beta parçacıkları alfa parçacıklarına göre çok daha küçük ve hafiftir. Beta ışını yeterli enerjiye sahip olduğundan dolayı tehlikelidir. Beta parçacıkları havada 3–5 m yol alabilmektedir. Yaklaşık 3 cm’lik bir tahta parçası veya ince alüminyum bir levha kullanarak beta ışınlarını tamamen soğurulabilmek mümkündür [42, 45, 46].

Nötron (n) parçacıkları (dolaylı iyonlaştırıcı), 1932 yılında James Chadwick tarafından bulunmuş, elektriksel olarak yüksüz bir nükleon üyesidir. Hidrojen atomu hariç bütün atomların çekirdeklerinde bulunur. Nötronlar yüksüz olduklarından dolayı bir çekirdeğe yaklaştıklarında elektron veya Coulomb alanından etkilenmeden her maddeye kolayca nüfuz edebilirler. Nötronlar, içine nüfuz ettikleri maddede doğrudan iyonizasyon gerçekleştirmeyip dolaylı olarak etkileşimde bulunur ve bunun sonucunda alfa, beta parçacıkları, gama ve X-ışınları gibi ikincil radyasyon oluştururlar. Meydana gelen bu radyasyonlar etkileşme sonucu içine nüfuz ettikleri maddenin atomundan elektron kopararak iyonlaşmaya sebep olurlar [37, 46]. Nötronlar, güneşte oluşan nükleer patlamalar sırasında kararsız atom çekirdeğinden yayınlanan kozmik ışınların bir bileşenidir. Ayrıca yapay olarak nükleer reaktörlerde meydana gelen reaksiyonlarda kararsız atom çekirdeğinden saçılabilir. Nötronlar sahip oldukları enerji değerlerine göre gruplandırılırlar. Enerjileri 0,003 eV ‘den daha düşük olanlar soğuk nötronlar, 0,003 - 0,5 eV arası olanlar termal (ısı) nötronlar, enerjileri 0,5 eV - 10 keV arası olanlar epitermal (orta enerjili) nötronlar, enerjileri 10 keV - 10 MeV arası olanlar hızlı nötronlar ve enerjileri 10 MeV den büyük olanlar ise relativistik nötronlar olarak ifade edilir. Nötronların giricilikleri çok yüksektir. Bu nedenle madde veya doku ile kolayca etkileşebilir ve diğer radyasyon türleri oluşturup maddenin atomundan elektron kopararak maddeye zarar verebilir. Nötron radyasyonundan korunmak için beton bloklar ve su bloklar kullanılabilir [39, 45, 47].

2.2.2.2 Dalga tipi iyonlaştırıcı radyasyon

X ışınlarını 1895 yılında Alman fizikçi W. Conrad Roentgen bulmuştur. Işınların ne olduğunu anlayamayan Roentgen bulduğu bu ışınları bilinmeyen manasında “X” olarak adlandırmıştır. X ışınları son derece yüksek frekanslı çok kısa dalga boyuna sahip (10^{-5} -100 Å (1 Å = 10^{-10} m)) elektromanyetik dalgalarıdır. Bu ışınlar, elektronların frenlenmesi sonucu (Bremsstrahlung

(Frenleme) ışınları) ya da yüksek atom numarasına sahip atomların iç katmanlarından elektronların ayrılması sonucu (X-ışınları) oluşabilmektedir [45]. X ışınları yüksek enerjili girici fotonlardır. Bu yönüyle gama ışınmasına benzemekte gamalardan farklı olarak atom çekirdeğinden değil de atomların iç elektron kılıfından salınmaktadır. X ışınlarının dalga boyu ayarlanarak kemikleri geçememesi (film üzerinde beyaz bölgeler), bazı dokulardan geçebilmesi (film üzerinde siyah bölgeler) sağlanabilir. Bu yöntem ile tıbbi uygulamalarda teşhis ve tedavi yapılabilir. X ışınları yüksek doz maruziyetinde canlı dokulara ve organizmalara ciddi zararlar vererek öldürücü olabilirler. X ışınlarını durdurmak için demir, kurşun bloklar kullanılabilir [43, 45].

Gama (γ) bozunması α ve β bozunmasını takiben meydana gelmektedir. Radyoaktif bir çekirdek α veya β parçacıkları yayınladıktan sonra çekirdek yüksek enerjili (uyarılmış) halde kalır. Çekirdek normal hale geçerken parçacık fırlatmadan izomerik geçişle enerjisini kaybederse bu arada bir gama ışını yayınlanır. İzomerik geçiş, çekirdeğin fazla enerjisini sadece foton olarak saldığı, α veya β gibi bir parçacığın fırlatılmasının eşlik etmediği durumdur. Gama fotonunun çekirdekten fırlatılması yaklaşık olarak 10^{-12} s gerektirmekle beraber saat ya da gün mertebesinde yayınlanan gama ışınları da mevcuttur [46]. Gama ışınları 1900 yılında Fransız fizikçi Paul Villard tarafından keşfedilmiştir. Manyetik alandan etkilenmeyen, belirli bir elektrik yüküne sahip olmayan ve kararsız atom çekirdeğinden yayılan bir çeşit elektromanyetik ışıdır. Gamalar, x ışınlarına benzer ancak x ışınlarından farklı olarak çekirdekten yayılır ve genellikle çok daha kısa dalga boylarına (10^{-10} m ve 10^{-14} m) sahiptir. Gama ışınlarının enerjisi çok yüksek olup genellikle 10 keV'in üzerindedir ve 3 MeV'e kadar ulaşabilmektedir [16, 39]. Gama ışınları meydana getirdikleri elektronlarla maddede iyonizasyona neden olur. Bu iyonizasyon insan vücudunda da meydana gelebilir. Gama ışını çok girici özeliğe sahip olduğundan dolayı, gama radyasyonunu durdurmak için oldukça kalın beton veya kurşun bloklar kullanmak gerekir [45].

Kozmik ışınlar, uzaydan dünyamıza gelen çok yüksek enerjili ışınlardır. Kozmik ışınların keşfi, elektroskopların doğal radyoaktivite kaynaklarından oldukça uzakta karanlıkta tutulsalar bile deşarj olduklarının keşfedildiği 1900'lü yıllarda başlamıştır. Fizikçi Eister ve Geitel elektroskopa havanın iletkenliğini incelemiş ve havadaki iyonize partiküllerin devamlı olarak yenilendiğini bulmuşlardır. 1912 yılında Avusturyalı fizikçi Victor Hess, bir balon ile uçuş yapmış ve elektroskopa denemeler yaparak havadaki iletkenliğin yükseklerle çıkıldıkça arttığını görmüştür. Bu durum 1914 yılında D. Kolhörstev tarafından da teyit edilmiştir [48]. Sonuç olarak havayı iyonize eden radyasyonun atmosferin yüksek tabakalarından ya da dünya

dışından gelebileceği düşünülmüştür. 20.yy'da atmosferdeki iyonizasyonun uzaydan dünyaya gelen yüklü partiküllerden kaynaklandığı keşfedilmiştir. Düşük enerjilerde kozmik ışınların ölçümü, 1950'lerin sonlarında ilk uyduların uzaya fırlatılmasından bu yana mümkün olmuştur. Kozmik ışınlar, uzayda ışık hızına yakın bir hızda hareket eden çok yüksek enerjili yüklü proton kaynaklı parçacık ışımasıdır [48, 49]. Güneşten ya da güneş sistemi dışındaki diğer sistem ve galaksilerden kaynaklanabilir. Dünya atmosferine sürekli olarak çarpan bu parçacıkların enerjileri 10^9 eV'nin altından 10^{20} eV'nin ötesine kadar ulaşabilir [50]. Kozmik ışıma, dünyamızı koruyan atmosferin üst katmanlarında oldukça yoğundur. Kozmik ışınların büyük bir kısmı dünya atmosferinden geçmeye çalışırken tutulur ancak çok az bir miktarı yeryüzüne ulaşır [49].

2.3. Radyasyonun Kullanıldığı Alanlar

Radyasyon günümüzde çeşitli alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Nükleer santrallerde enerji üretimi, tıpta tanı ve tedavi, savunma ve askeri sistemler, uçak ve uzay sanayi vb. alanlarda fayda sağlamakla beraber radyasyon maruziyetinin insan ve çevre açısından zararlı etkileri de mevcuttur. Fayda ve zarar kıyaslaması yapıldığında ağır basan faydalardan dolayı radyasyon günümüzde artan bir kullanıma sahiptir [51-53].

2.3.1. Tüketici ürünleri ve faaliyetleri

Bazı tüketici ürünleri radyasyon kaynağıdır. Duman dedektörleri ve saatler gibi bazı tüketici ürünlerinde radyasyon, cihazın performansı için olmazsa olmazdır. Tütün ürünleri veya yapı malzemeleri gibi diğer ürünlerde radyasyon, ürünün işlevinde tesadüfen meydana gelir. Hava yolculuğu, kozmik radyasyona maruz kalmaya neden olan başka bir tüketici faaliyetidir [44, 54].

2.3.2. Tıbbi teşhis ve tedavide

Radyasyon, teşhis tıbbi ve tedavisinin önemli bir aracıdır ve bu kullanımda, insan yapımı radyasyona maruz kalmanın ana kaynağıdır. Genellikle, tıbbi maruziyetler vücudun belirli bölgelerine yönlendirilmiş ışınlardan kaynaklanır [54]. Modern tıpta doktorlar ve dişçiler vücudumuzdaki yapıları görmek için x-ışınlarını kullanırlar. Bu, kırık kemikleri ve diş sorunlarını tespit etmelerini sağlar. X-ışınları cildimizden geçebilen bir radyasyon türüdür ve kırık kemiklerin ve diş sorunlarının tespit edilmesini sağlar. Kemiklerimiz cildimizden daha yoğundur, bu nedenle röntgen çekildiğinde kemikler ve diğer yoğun maddeler fotoğrafik filmde tespit edilebilen gölgeler oluşturur. Tanısal x-ışınları veya radyasyon tedavisi hipertiroidizmden

kemik kanserine kadar uzanan durumların tespiti ve tedavisi yoluyla binlerce hayat kurtarmıştır. Radyoaktif iyot (özellikle iyot-131) tiroid kanserini tedavi etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bazı radyasyon türlerine (örneğin, X-ışınları) maruz kalmak, dezenfekte edilen eşyalara zarar vermeden veya onları radyoaktif hale getirmeden mikropları öldürebilir. Radyasyona maruz kaldıklarında, bandajlar, hipodermik şırıngalar ve cerrahi aletler gibi tıbbi ekipmanların sterilize edilmeleri için toksik kimyasallara veya aşırı ısıya maruz kalmaları gerekmez [52]. Radyasyon ve radyoaktif maddeler ayrıca çok çeşitli ilaçlarda ve plastik kalp kapakçıkları gibi ısıya duyarlı ürünlerin sterilizasyonu dahil olmak üzere tıbbi aletlerin hazırlanmasında kullanılır. Nükleer tıp muayeneleri ve tedavisi, radyoaktif bileşiklerin veya radyofarmasötiklerin enjeksiyon, inhalasyon, tüketim veya yerleştirme yoluyla dahili olarak uygulanmasını içerir [54]. X-ışını tomografisi ve Proton Emisyon Tomografisi tıpta görüntüleme ve teşhiste çok sık kullanılan yöntemlerin başında yer almaktadır. Beyin tümörlerinin yok edilmesinde bor nötron yakalama tedavisi (BNCT) başarıyla kullanılmaktadır [44, 53].

2.3.3. Bilimsel çalışmalarda

Birçok bilimsel çalışmada radyasyondan yararlanılmaktadır. Radyasyon bir madde içindeki elementleri belirlemede, tarihi eser ya da fosillerin yaş tayininde, uzayda su araştırmalarında, hava ve su kirliliği türlerinin incelemesi ve ölçülmesinde, alan ve mesafe hesaplarında, petrol arama ve kalite kontrollerinde sıklıkla kullanılır [44]. Deney laboratuvarlarında, radyasyon üretim tesislerinde, hızlandırıcı tesislerinde radyasyon kullanılmaktadır. Karbon tüm canlılarda bulunur ve bu karbonun küçük bir yüzdesi karbon-14'tür. Bir bitki veya hayvan öldüğünde, artık yeni karbon almaz ve içerdiği karbon-14 radyoaktif bozunma sürecini başlatır. Ancak, atmosferimizde karbon-14'ün yeni izotopları oluşmaya devam ediyor ve birkaç yıl sonra eski bir nesnedeki radyoaktivite yüzdesi, yeni bir nesnedekinden daha az oluyor. Bilim insanları bu farkı ölçerek belirli nesnelerin ne kadar eski olduğunu belirleyebiliyorlar. Ölçüm sürecine karbon tarihlemesi adı veriliyor [44, 52].

2.3.4. Suçları çözmek için adli vakalarda

Radyasyon suçları çözmek için kullanılmaktadır. Dedektifler genellikle suç mahallinden boya, cam, saç veya kan izlerini ararlar. Bu tür kanıtlar toplandıktan sonra genellikle radyasyona maruz bırakılıp daha sonra tam yapısını bulmak için analiz edilir. Malzeme nötron akımlarına maruz kalır, nötronların bir kısmı maruz kalan malzemenin çekirdeğine emilebilir. Bu durum, malzemeleri biraz radyoaktif hale getirir çünkü kararsızdırlar ve zamanla bozulurlar. Bilim

insanları daha sonra bu maddelerin tam kimyasal imzalarını okuyabilmektedir. Aktivasyon analizi adı verilen bu laboratuvar süreci, bir suç mahallinde bulunan tek bir saç telinin belirli bir kişiye ait olup olmadığını söyleyecek kadar hassastır [52].

2.3.5. Çeşitli sanayi dallarında

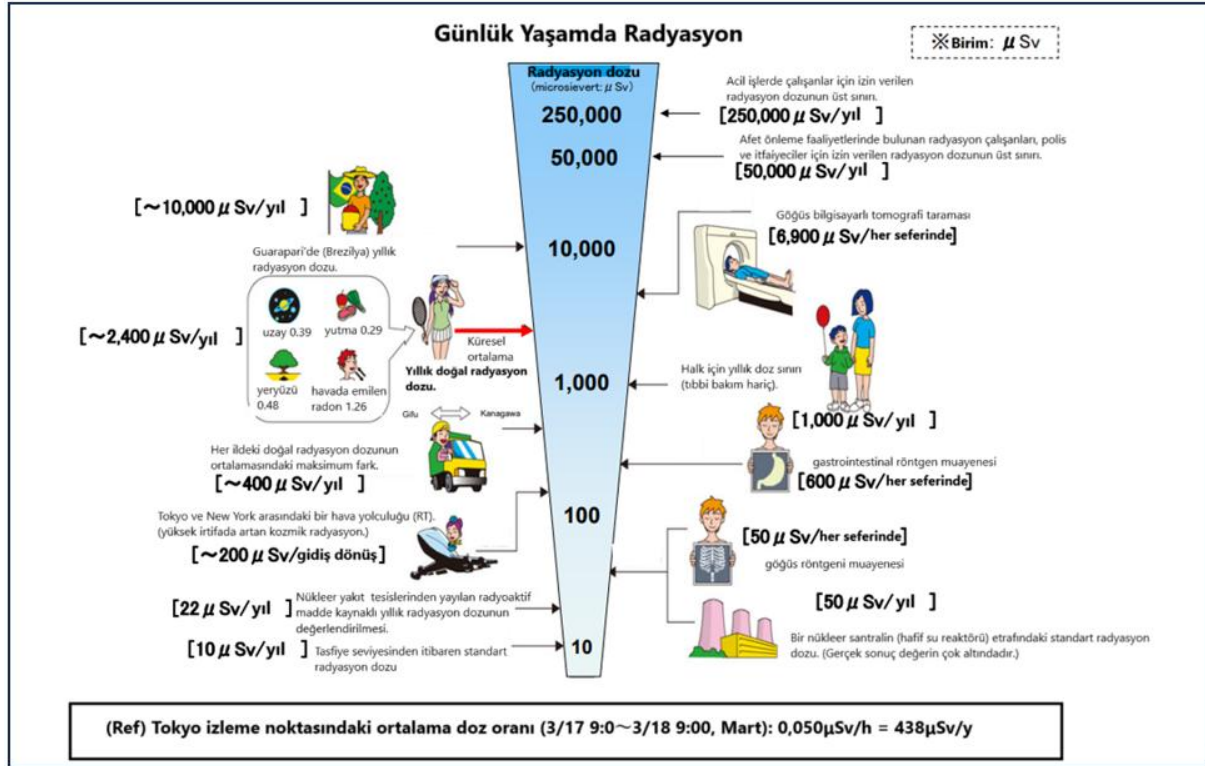
Sanayide radyasyonun çok sayıda ve çeşitli kullanımları bulunmaktadır. Sanayideki radyasyon kaynakları arasında uranyum madenleri, yakıt işleme tesisleri ve nükleer santraller gibi nükleer tesislerden çıkan radyoaktif madde emisyonları; mineral çıkarma tesislerinden çıkan emisyonlar; ve radyoaktif maddelerin taşınması yer almaktadır [54]. Savunma sanayide patlayıcı ve mayın aramalarında, yön bulma ve hedef belirlemede, yer tayininde, çeşitli radar sistemlerinde, özel teçhizatlı silah yapımında radyasyon kullanılmaktadır [44]. Mühendisler, malzemelerin kalınlığını ölçmek için radyoaktif maddeler ve radyografi adı verilen bir x-ışını işlemi kullanarak birçok metal ve makinede tespit edilmesi zor kusurları bulurlar. Radyografi ayrıca, kapalı motorlardaki yağ akışı ve çeşitli malzemelerin aşınma hızı ve şekli gibi şeyleri kontrol etmek için de kullanılır [52]. Radyasyon tarımda toprak kalitesini belirlemede, gübre geliştirme ve bitkinin ne kadar gübreye ihtiyaç duyduğunun tespitinde, böcek popülasyonlarını kontrol altına almada, tohum ıslahında, çimlenme ve çimlenme süreçlerinin takibinde, meyve ve sebzelerin taze saklanması kullanılmaktadır [44]. Günlük yaşamda ya da sanayide elektrik üretmek amacıyla yakıt olarak radyoaktif bir element olan uranyum kullanılmaktadır. Radyoaktif maddeler uzay araçlarına güç sağlamak için de kullanılır. Bu tür maddeler ayrıca güneş sistemimizin en dış bölgelerine göreve gönderilen uydulara elektrik sağlamak için de kullanılmıştır [52]. Bazı mesleklerdeki çalışanlar da işleri nedeniyle radyasyona maruz kalabilirler. Bu meslekler arasında tıp, havacılık, araştırma, eğitim pozisyonları yer alır [54].

2.4. Radyasyonun Çevre ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Yeryüzündeki tüm canlılarda, su, hava ve toprakta belli bir miktar radyasyon mevcuttur. Bu radyasyonlar çok küçük dozlarda olduğu için göz ardı edilebilir seviyededir ve normal kabul edilir. Canlılara ve çevreye nüfuz eden radyasyon kaynakları, uzaydan gelen kozmik ışınlar ya da toprakta bulunan radyum bozunmaları gibi doğal kaynaklı olabilmekle beraber insanlar tarafından yapay üretilen radyasyon da olabilmektedir. Kozmik ışınların büyük bir kısmı dünya atmosferinden geçmeye çalışırken tutulur ancak çok az bir miktarı yeryüzüne ulaşır [49]. Yer kabuğunda bulunan radyoaktif radyum elementinin (Ra^{226}) bozunması sırasında oluşan radyoaktif maddelerin bir kısmı toprak içerisinde kalırken radon gazı toprak yüzeyine doğru yükselir. Toprakta diğer canlılara ve insanlara ulaşabilir. Doğal kaynaklı radyasyonların insan

ve çevre üzerindeki maruziyeti düşüktür ve daha az zarar verir. İnsanlar tarafından üretilen yapay radyasyon kaynakları ise çeşitli alanlarda (nükleer santrallerde enerji üretimi, tıbbi görüntüleme cihazları vb.) faydalı olmakla beraber insan ve çevre üzerindeki etkileri oldukça büyük bir tehlike arz etmektedir. 1986'da Çernobil nükleer santralindeki kaza ve 2011'de meydana gelen büyük doğu Japonya depremi ve tsunamisi sonrasındaki planlanmamış olaylar; yapay veya doğal radyasyon kaynaklarına maruz kalmanın arttığı tehlikeli durumlara birer örnektir [55-57]. Alfa radyasyonu, uranyum ve radyum gibi elementlerin atomları tarafından yayılan ağır, pozitif yüklü parçacıklardan oluşur. Alfa radyasyonu bir kağıt parçası veya cildimizin dış tabakası (epidermis) tarafından tamamen durdurulabilir [37, 45]. Beta radyasyonu elektronlardan oluşur. Alfa parçacıklarından daha nüfuz edicidirler, birkaç milimetre kalınlığında bir alüminyum levha ya da bir tahta parçası beta radyasyonunu durduracaktır [41, 46]. Gama ışınları, X ışınlarına benzer elektromanyetik radyasyondur. Gama ışınları, enerjilerine bağlı olarak (yüksek enerjili) insan vücudundan geçebilirler ancak kalın beton veya kurşun duvarlar tarafından durdurulabilirler [39, 46]. Nötronlar yüksüz parçacıklardır ve doğrudan iyonlaşma üretmezler. Ancak, maddenin atomlarıyla etkileşimleri alfa, beta, gama veya X ışınlarına yol açabilir ve bunlar da iyonlaşma üretir. Nötronlar nüfuz edicidir ve yalnızca kalın beton, su veya parafin kütleleri tarafından durdurulabilir [45, 46]. İyonlaştırıcı radyasyon insan vücudunda fiziksel, fizikokimyasal, kimyasal ve biyolojik olmak üzere 4 evrede etki gösterir. Fiziksel evre; radyasyonun hücrenin bir atomu veya molekülü ile etkileşmesi sonucunda, biyomoleküllerde iyonlaşma veya uyarılma olaylarının meydana getirmesidir. Etki süresi 10^{-18} - 10^{-13} s aralığındadır. Fizikokimyasal evre; iyonlaşma sonucu reaktif serbest atom ve serbest radikallerin oluşmasıdır. Böylece kararlı moleküller oluşturmak için ikincil reaksiyonlar başlar. Etki süresi 10^{-10} s civarındır. Bu evrede radyasyon enerjisini direkt olarak biyolojik moleküllere vererek biyo-radikaller oluşturabilir ya da indirekt olarak enerjisinin çoğunu hücredeki su moleküllerine vererek önce su moleküllerinde iyonlaşma daha sonra serbest radikaller meydana getirme eğiliminde olabilir. Kimyasal evre; suyun radyolizi ile oluşan serbest radikaller, DNA ve diğer doku ve organ molekülleri ile reaksiyona girerek bunları biyo-radikallere dönüştürebilir. Etki süresi 10^{-6} s civarındır. Biyolojik evre; organizmanın radyasyona maruziyet sonucu meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimlere vermiş olduğu biyolojik cevaptır. Etki süresi 10^{-6} s - 40 yıl aralığındadır lakin bazen çok daha uzun süre etkisini sürdürebilmektedir. Radyasyon kromozomların kırılmasına, kıvrılmasına, birbirlerine yapışmasına ve kenetlenmesine yol açabilir. DNA hasarına, doku ve organ hasarına ve kanserojen etkiye neden olabilir [58-60]. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalınan durumlar

ve maruziyet oranları ile ilgili Tokyo'da yapılan bir çalışmanın şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. İyonlaştırıcı radyasyonun günlük yaşamdaki maruziyetleri [61]

Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR)'ın 2000 raporuna göre, radon dahil olmak üzere doğal olarak oluşan radyasyon kaynaklarına maruziyetten kaynaklanan dünya çapındaki ortalama yıllık radyasyon dozu 2,4 mSv'dir. Herhangi büyük bir popülasyonda, nüfusun yaklaşık %65'inin yıllık 1 ila 3 mSv arasında dozlara maruz kalması beklenir. Nüfusun yaklaşık %25'inin yıllık 1 mSv'den az dozlara maruz kalması beklenir ve yaklaşık %10'unun ise yıllık 3 mSv'den fazla dozlara maruz kalması beklenir [57].

2.5. Radyasyondan Korunma ve Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

2.5.1. Radyasyondan korunma

Radyoaktif ışınlar ve parçacıklar insan doku ve organlarına zarar vermekte ve kanserojen etki gösterebilmektedir. Bilindiği gibi nötron parçacığı, X ve gama ışınları madde içerisinde ilerleyebilme ve madde yapısını etkileyebilme kabiliyetine sahiptir. Bu sebeple bu radyoaktif parçacık ve ışınların bir şekilde madde içerisine girmesinin durdurulması gerekir. Radyoaktif maddelerin yaydığı gama ışınlarına karşı korunmak için gerçekleştirilen yapılarda demir,

kurşun ve ağır betonlarla zırlama yapılmaktadır [57, 62]. Radyasyon koruma sorununu ele almak için kullanılan yaklaşım, radyasyon tehlikelerinin tanınması, değerlendirilmesi ve kontrol edilmesini içerir. Tanınma, tüm radyasyon kaynaklarının ve özelliklerinin ve kaynakların kullanımında çalışanların ve halkın maruziyetine giden yolların bilinmesini içerir. Değerlendirme, kapsamlı hesaplamalar, radyasyon araştırmaları ve bir radyasyon sorununun tam bir maruziyet değerlendirmesini gerçekleştirmek için standartlara başvurmayı içerir. Kontrol etme, radyasyon ölçümleri ve araştırmalarını kapsar. Dış maruziyete karşı koruyucu önlemler; maruziyet süresini sınırlamak, kaynaktan uzaklığı kontrol etmek ve zırlama yapmak şeklinde ifade edilebilir [44, 62]. Radyasyona maruz kalınacak dozun müsaade edilen seviyelerin altında kalması (halkın bir üyesi için tahmini yıllık toplam etkili doz eşdeğeri 1 mSv'den az olmalıdır), olabildiği kadar düşük tutulması ve bunun için gerekli her türlü tedbirin alınması gerekir. Radyasyonun vereceği zarar taşıdığı enerji ve radyasyon türü ile yakından ilgilidir. Dış radyasyon kaynaklarından korunmanın zaman, mesafe ve zırlama gibi üç temel kuralı vardır [44, 63].

2.5.1.1. Zaman kuralı

Zaman kuralı; radyasyona maruz kalan kişinin kaynakla etkileşimde olduğu süredir. Radyasyonla yapılan işlemlerde alınan doz; doz hızı ile zamanın çarpımıdır. Zaman ne kadar çok artarsa alınan dozda o kadar artar.

$$Doz = Doz \text{ hızı} \times Zaman \quad (2.1)$$

Bu bağıntıdan radyasyon alanında ne kadar az süre kalınırsa o kadar az doz alınacağı, ne kadar uzun süre kalınırsa o kadar çok doz alınacağı açıktır. Bir örnek ile açıklayacak olursak; bir ölçüm cihazının bir bölgenin radyasyon doz hızını 60 mSv/saat olarak gösterdiğini kabul edelim. Bu durumda maruz kalınacak dozlar 1 saatte 60 mSv, 2 saatte 120 mSv olacaktır. Doz hızının bilinmesi ne kadar zaman sonra kabul edilen dozun aşılabacağını saptanması açısından önemlidir ve buna göre önlem almayı gerektirir [53, 57].

2.5.1.2. Mesafe kuralı

Radyasyon şiddeti radyasyon kaynağından uzaklaştıkça orantılı olarak azalmaktadır. Radyasyon kaynağına yakın olan uzak olana göre daha çok etkilenmektedir. Bu nedenle uzaklık iyi bir korunma aracı olmaktadır. Bir noktasal radyasyon kaynağı için radyasyon şiddeti mesafenin karesiyle ters orantılı olarak azalmaktadır. Bir örnek ile açıklayacak olursak;

radyasyon kaynağından 4 m uzakta olan bir kişi, 2 m uzakta olanın uğradığı şiddetin ¼'ü kadar şiddette radyasyona maruz kalacaktır. Mesafeye bağlı radyasyon doz hızı (şiddeti) aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanabilmektedir;

$$I_1 \cdot R_1^2 = I_2 \cdot R_2^2 \quad (2.2)$$

Bağıntıya dayanarak 2.kaynağın radyasyon şiddeti;

$$I_2 = I_1 \times R_1^2 / R_2^2 \quad (2.3)$$

Şeklinde bulunabilir. Noktasal 1. radyasyon kaynağının doz hızı I_1 , kaynaktan uzaklık R_1 , noktasal 2. radyasyon kaynağının doz hızı I_2 , kaynaktan uzaklık R_2 ile ifade edilmiştir.

Bu kanun ters kare kanunu olarak bilinir. Ters kare kanunu, kaynağın boyutlarının kaynak ve etkilenen madde arasındaki uzaklıkla karşılaştırıldığında ihmal edilecek kadar küçük olması yani kaynağın nokta kaynak olması halinde geçerlidir. Belirli bir uzaklıktaki doz hızı değeri biliniyorsa başka bir uzaklık için doz hızı değeri uzaklıkların kareleriyle ters orantılı olarak hesaplanır. Nokta kaynak olarak kabul edilemeyecek boyutlardaki radyasyon kaynaklarından (duvar, tavan vb.) meydana gelen saçılmalarındaki radyasyon şiddeti mesafenin karesiyle değil mesafeyle azalır [44, 62].

2.5.1.3. Zırhlama kuralı

Radyasyon kaynağı ile kişiler arasına radyasyon tutucu malzeme konulmasına zırhlama denilmektedir. Zırhlama, dış radyasyon tehlikelerinden korunmanın en etkin yöntemi olup radyasyonun şiddetini azaltmak için radyasyon kaynağı ile kişi arasına uygun özelliklerde koruyucu engelin konulması ya da radyasyon kaynağının zırhlanması şeklinde yapılabilmektedir. Zırhlama, radyasyon kaynağı ile nüfuz edeceği alan arasına radyasyonu tamamen soğuracak ya da şiddetini izin verilen seviyelere sınırlayacak bir bariyer yerleştirilmesine dayanır [63]. Genel olarak, zırhlama radyasyon risklerinden kaçınmanın en etkili yöntemidir. Zırhlama, radyasyon türüne göre koruyuculuğu yüksek uygun zırhlayıcı malzeme (beton, çelik, kurşun vb.) kullanılarak yapılabilir. Zırhlama hesaplamaları malzemelerin belirli radyasyonlara karşı gösterdikleri yarı tabaka kalınlığının ölçülen değerleri

kullanılarak yapılır. Farklı radyasyonlar için kullanılan zırhlama maddeleri ve zırhlama işlemleri birbirinden farklıdır [46, 62]. Radyasyon koruyucu zırh tasarımı, radyasyon kaynağının türü ve zırhlama malzemesinin özelliklerine göre şekillenmelidir. Zırh malzemesinin radyasyon türüne göre koruyucu özelliği, radyasyon hasarına karşı direnci, radyasyona karşı koruma kapasitesi, uygun ağırlık ve kalınlıkta olması ve bu özelliklerini uzun süre sürdürebilmesi malzeme seçiminde dikkate alınmalıdır. Gama radyasyonuna karşı zırhlama malzemesi olarak demir, kurşun ve beton bloklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Gamma ışınlarının zayıflatılması zırh malzemesinin yoğunluğuna bağlıdır. Yüksek atom numaralı yoğun bir zırh malzemesi daha iyi bir zayıflatıcı özellik sergiler [7, 39].

2.5.2. Radyasyonun madde ile etkileşimi

Gama ışınlarına karşı zırhlama yapabilmek için öncelikle maddeyi nasıl etkilediklerini incelemek ve anlamak gerekir. Gama ve X-ışınları, kütsüz, elektriksel olarak yüksüz, dalga boyu (10^{-14} - 10^{-10} m) çok kısa ve girciliği çok yüksek olan elektromanyetik dalgalar [59]. Madde içinde hareket ederken iyonlaşmalara neden olabilirler. Bir gama ışınının etkileşim olasılığı, hedefin görünen kesit alanı olarak ifade edilir. Kesit alanı 10^{-24} cm² kadardır ve birimi barn (b)'dir [45]. Elektromanyetik radyasyon birçok olayda parçacıklara benzer davranış sergilediği için radyasyon birim elemanına foton adı verilmiştir. Fotonlar madde ile etkileşime girince enerjisini kaybedip madde tarafından soğurulabilir veya saçılma uğrayabilir. Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşiminde rol oynayan en önemli üç olay; a) fotoelektrik olay, b) compton saçılımı ve c) çift oluşumu olaylarıdır [51, 58, 59]. Bunlar elastik olmayan saçılma olarak kabul edilir ancak bunların dışında x ve gama ışınları madde ile elastik saçılma şeklinde de etkileşebilir [44]. Gama ışınlarının dağılmasına veya emilmesine neden olabilecek bir dizi süreç vardır. Bu süreçlerin çoğu oldukça seyrek ve bazıları henüz gözlemlenmemiştir. Gama ışınının maddeyle etkileşime girebileceği olası süreçler birincil etkileşimler (fotoelektrik olay, compton saçılımı ve çift oluşumu) olabileceği gibi ikincil etkileşimler şeklinde minör olarak da gerçekleşebilmektedir. Nükleer geçişlerde en sık karşılaşılan enerji alanında (0,01 MeV ila 10 MeV) çok küçük etkilerin birkaçı hariç hepsi birincil etkileşimler ile açıklanabilir. Gerçekleşme ihtimalleri (veya tesir kesitleri) diğer etkileşimlere göre nispeten düşük olan etkileşimler şöyle özetlenebilir:

Rayleigh saçılması: Rayleigh saçılması fotonların hedef atomu uyarmadan atomik elektronlar tarafından saçılmasıdır. Küçük momentum transferlerinde, atom içindeki tüm elektronlardan saçılan ışınların genlikleri koherent olarak toplanır. Bu şekildeki saçılmaya Rayleigh saçılması

denir. Rayleigh saçılma açıları her zaman küçüktür çünkü atomlar ne uyarılır ne de iyonize olur, sadece gelen foton aynı enerjidedir lakin yönü değişir [41, 45].

Çekirdek tarafından Thomson saçılması: Thomson saçılması, Rayleigh saçılmasıyla tutarlı bir şekilde birleşebilir. Çekirdeğin büyük kütlesi nedeniyle, etkiler küçüktür ancak tespit edilmiş gibi görünmektedir. Relativistik enerjilerde Thomson ve Rayleigh saçılmaları çok küçüktür.

Delbruck Saçılması: Delbruck saçılması veya elastik "nükleer potansiyel saçılması", çekirdek alanında sanal (sezilgen) elektron çifti oluşumundan kaynaklanır. Etki, mevcutsa, son derece küçüktür deneylerde açıkça görülmez [41, 64].

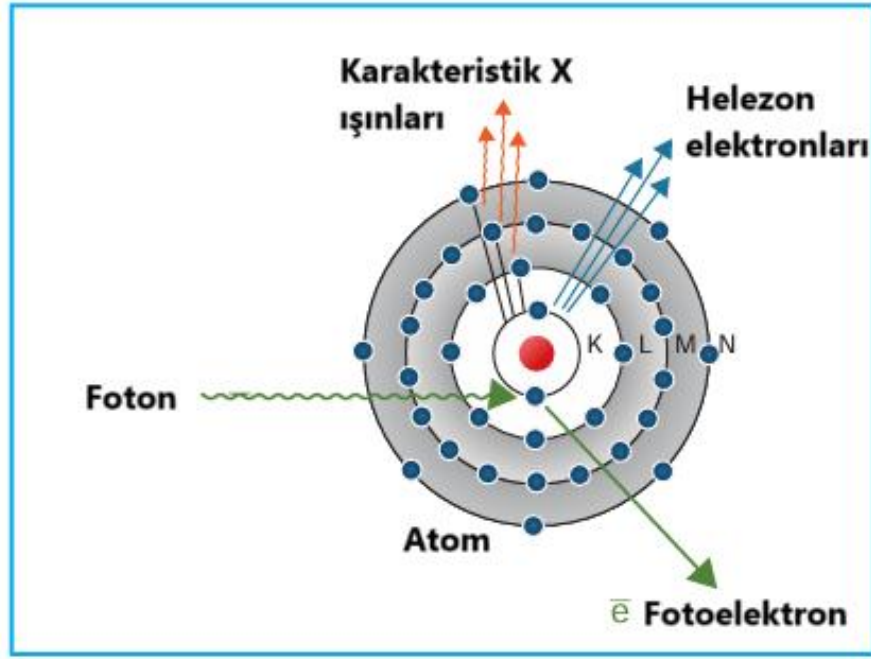
Nükleer Rezonans Saçılması: Bu tür saçılma, bir nükleer seviyenin bir olay fotonu tarafından uyarılmasını ve ardından uyarma enerjisinin yeniden yayılmasını içerir. Saçılma rezonansı ile örtüşecek kadar geniş bir Doppler genişlemeli emisyon çizgisi üretilerek nükleer rezonans saçılmasını tespit etmeye izin veren uygun koşullar bulunmuş gibi görünmektedir [64].

Çekirdeklerin Foto-parçalanması: Foto parçalanma ya da "nükleer fotoetki", foton enerjisinin nötron ya da protonun koparılma enerjisini aştığında enerjik olarak mümkündür. Bu etkiler, (eşiğin 2 MeV mertebesinde olduğu Be^9 (γ, n) ve H^2 (γ, n) hariç) genellikle yaklaşık 10 MeV'in üzerindeki yüksek enerji bölgesiyle sınırlıdır. Foto parçalanma enerji bakımından mümkün olsa bile, tesir kesitleri Compton saçılması ve nükleer çift oluşumu tesir kesitleriyle kıyaslandığında ihmal edilebilir düzeydedir [41, 65].

Mezon Üretimi: Mezon üretimi yaklaşık 150 MeV'in üzerindeki foton enerjilerinde mümkündür. Diğer zayıflatma işlemleriyle karşılaştırıldığında kesitler ihmal edilebilir düzeydedir ($\sim 10^{-3}$ barn/atom) [41].

2.5.2.1. Fotoelektrik olay

Fotoelektrik etki, bir fotonun bir atom elektronu tarafından emilmesini ve ardından atomdan fotoelektron adı verilen elektronun atılmasını içerir. Fotoelektrik olay düşük enerjilerde atomun dış yörüngelerinde, yüksek enerjilerde atomun iç yörüngelerde görülür. Bu olayda foton içinden geçtiği ortamdaki atomun K, L, M yörüngesindeki bir elektrona enerjisini vererek onu çekirdeğin bağlayıcı kuvvetinden kurtarır. Elektron fotoelektron olarak dışarı atılır ve oluşan elektron boşluğu dış yörüngedeki başka bir elektron tarafından doldurulur ve bu sırada x ışını yayımlanır [46, 60]. Fotoelektrik etki Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Fotoelektrik olayın şematik gösterimi [60]

Teknik olarak serbest bir elektron bir fotonu ememeyeceği ve aynı zamanda momentumu koruyamayacağı için, fotoelektrik etki her zaman çekirdeğin geri tepme momentumunu absorpladığı bağlı elektronlarda meydana gelir. Bu olayda gelen fotonun enerjisinin bir kısmı emildiği atomdan elektron koparmak için harcanır, geri kalan kısmı ise fotoelektronun kinetik enerjisi olarak aktarılır [7, 39, 44]. Foton enerjisi ve fotoelektronun kinetik enerjisi arasındaki bağıntı Denklem 2.4 ve 2.5'te verilmiştir.

$$E_{\text{foton}} = E_{\text{bağlanma}} + E_{\text{fotoelektron}} \quad (2.4)$$

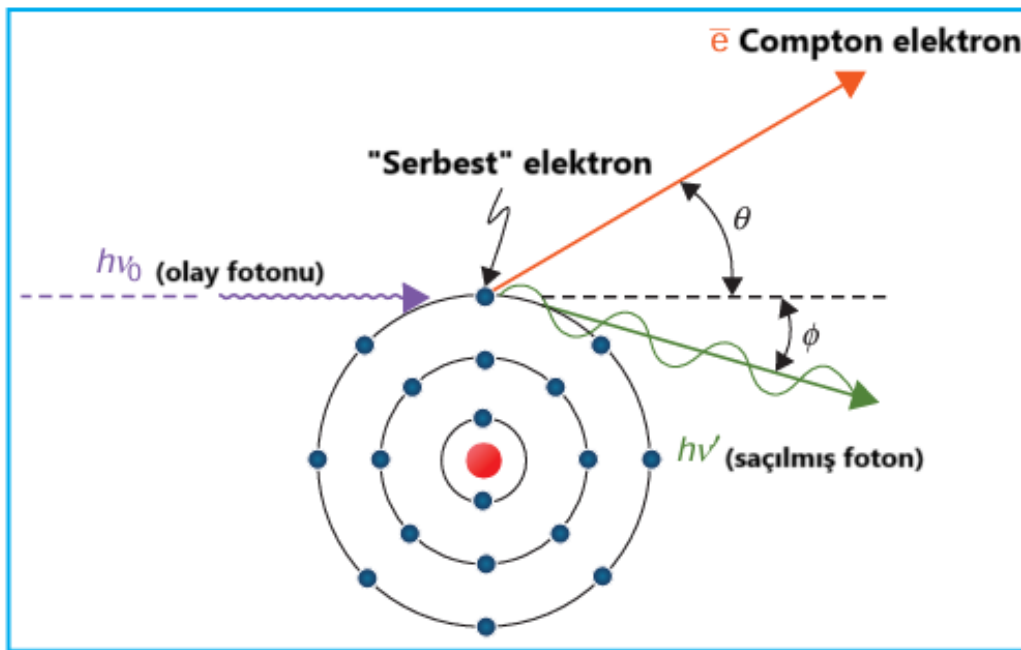
$$E_{\text{fotoelektron}} = E_{\text{foton}} - E_{\text{bağlanma}} \quad (2.5)$$

Foton enerjisi E_{foton} , elektron bağlanma enerjisi $E_{\text{bağlanma}}$ ve fotoelektronun kinetik enerjisi $E_{\text{fotoelektron}}$ (nispeten küçük elektron kütlesi enerjisinin neredeyse tamamını alır) ile ifade edilecek olursa yukarıdaki denklemler elde edilir [63].

2.5.2.2. Compton saçılımı

Compton saçılımı olayında, foton bir atomik elektronla sanki "serbest" bir elektronmuş gibi etkileşime girer. Elektronun bağlanma enerjisi bombardıman eden fotonun enerjisinden çok

daha küçüktür. Gelen fotonun enerjisi 0.5 MeV'den büyük ise etkileştiği atomun elektronlarına çarparak elektronu bir doğrultuda fırlatır kendisi de başka bir doğrultuda saçılır. Spesifik olarak bu etkileşimde, elektron fotondan bir miktar enerji alır ve teta (θ) açısıyla yayılır (Şekil 1.5). Azaltılmış enerjiye sahip foton fi (ϕ) açısıyla saçılır. Foton, elektronla elastik çarpışma yapar. Enerjisinin ve momentumunun bir kısmını "serbest" elektrona aktarır ve onu atomdan dışarı atar, kendisi ise daha düşük enerjili yeni bir foton olarak yol alır (Şekil 2.5). Foton, fotondan elektrona aktarılan enerji miktarına bağlı bir açıyla saçılır. Saçılma açısı yaklaşık 0° ile 180° arasında değişebilir. Bu olaya Compton saçılımı, olay sonucunda meydana gelen elektrona Compton elektronu adı verilir [7, 60, 63].



Şekil 2.5. Compton saçılımı olayının şematik gösterimi [60]

Compton süreci, bir foton ve bir elektron olmak üzere iki parçacık arasındaki çarpışma açısından analiz edilebilir. Enerji ve momentumun korunumu yasaları uygulanarak, aşağıdaki ilişkiler türetilir:

$$\alpha = h\nu_0 / m_0c^2 \quad (2.6)$$

$$E = h\nu_0 \frac{\alpha (1-\cos\phi)}{1+\alpha (1-\cos\phi)} \quad (2.7)$$

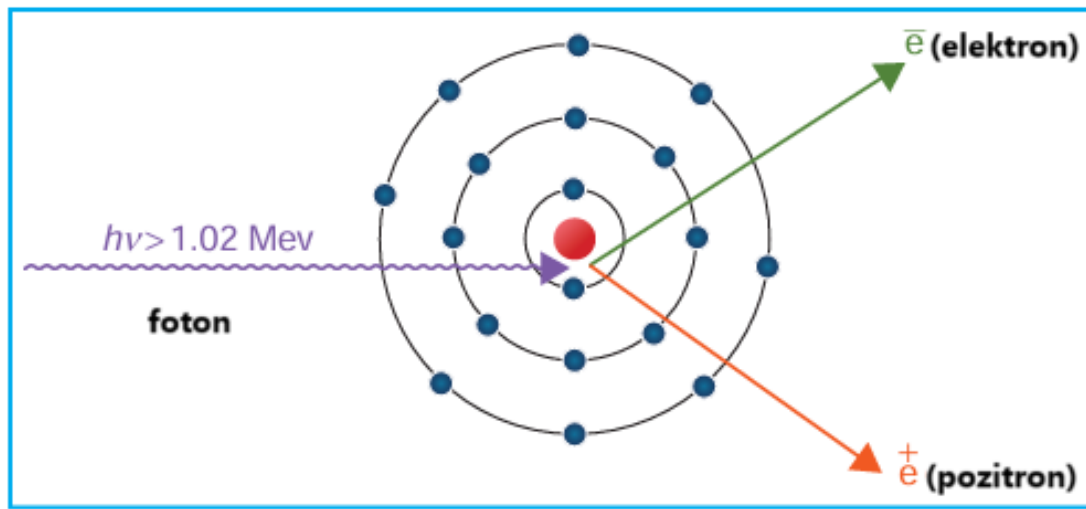
$$h\nu' = h\nu_0 = \frac{1}{1+\alpha (1-\cos\phi)} \quad (2.8)$$

Burada $\alpha = hv_0 / m_0 c^2$ dir, eşitlikteki m_0 elektronun durgun kütlesi, c ışık hızı (saniyede yaklaşık olarak 300.000 km), $m_0 c^2$ elektronun durağan enerjisidir (0,511 MeV). E elektron enerjisi, $h\nu_0$ olay foton (gelen foton) enerjisi, $h\nu'$ saçılan foton enerjisidir. Φ foton saçılma açısıdır [60].

Elektron kütleli bir parçacık olduğu için momentumun korunumu gereği fotonun bütün enerjisini absorplayamaz. Dolayısıyla foton, enerjisinin sadece bir kısmını elektrona aktararak saçılma uğrar ve yoluna devam eder. Yüksek enerjili fotonlar sadece compton saçılımı ile tamamen soğurulamaz. Enerjileri belirli bir seviyeye düşene kadar compton saçılımına uğrar daha sonra fotoelektrik olayla absorplanır [7, 39, 60].

2.5.2.3. Çift oluşumu

Enerjileri 1,02 MeV'den büyük olan gama fotonları, bir atom çekirdeğinin yakınından geçince atom çekirdeğinin elektromanyetik alanıyla güçlü bir şekilde etkileşime girer. Foton enerjisinden çekirdek yakınında aynı anda zıt yüklü iki elektron oluşur ve kalan enerji iki parçacık arasında kinetik enerji olarak bölünür. Çift oluşumu olarak ifade edilen bu süreçte foton tüm enerjisini kaybeder ve negatif yüklü elektron(e^-) ve pozitif yüklü pozitron (β^+) olmak üzere iki parçacık oluşur [60, 62]. Çift oluşumu Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Çift oluşumunun şematik gösterimi [60]

Oluşan elektron, atomla serbest elektronlar gibi etkileşirken, pozitron ise bir yörünge elektronu ile birleşir ve zıt yönlü iki gama fotonu yayarak yok olur. Fotonlar ise fotoelektrik yolla soğurulur. Elektronun durağan kütle enerjisi 0,51 MeV'dir, dolayısıyla elektron çiftini oluşturmak için minimum 1,02 MeV enerji gereklidir. Bu nedenle, çift üretim süreci için eşik

enerjisi 1,02 MeV'dir ve bu enerjiden daha yüksek enerjilerde çift oluşumu gerçekleştiğinde eşik değerini aşan foton enerjisi parçacıklar arasında kinetik enerji olarak paylaşılır. Elektron-pozitron çifti için mevcut toplam kinetik enerji:

$$E_{\text{kinetik enerji}} = (h\nu - 1.02) \text{ MeV} \quad (2.9)$$

Bağıntısı ile verilir, burada elektron-pozitron çifti için toplam kinetik enerji $E_{\text{kinetik enerji}}$, foton enerjisi $h\nu$ 'dir.

Çift oluşumunda elektromanyetik bir fotondan madde oluşur. Bu süreç, Einstein'ın $E = mc^2$ denkleminde öngörüldüğü gibi, enerjinin kütleyle dönüştürüldüğü bir olay örneğidir. Ters süreç, yani kütlenin enerjiye dönüştürülmesi, bir pozitronun bir elektronla birleşerek iki foton üretmesiyle gerçekleşir, buna yok olma radyasyonu denir [60]. Yok olma radyasyonunda, pozitron (β^+) elektronun yaptığı gibi aynı tür etkileşimlerle, yani iyonizasyon, uyarılma ve bremsstrahlung ile maddeyi geçerken enerjisini kaybeder. Menzilin sonuna yaklaşıldığında neredeyse sıfır kinetik enerjiye yavaşladıktan sonra çevresindeki serbest elektronlardan biriyle birleşerek her biri 0,51 MeV enerjiye sahip iki yok olma fotonu oluşturur. Momentum bu süreçte korunduğu için iki foton zıt yönlerde doğru atılır [7, 60, 63]. Çift üretiminden kaynaklanan ikincil yok etme radyasyonu, kalkanlama analizlerinde genellikle ihmal edilebilir, çünkü çok daha yüksek enerjili birincil fotonlar dozun çoğundan sorumludur. Pozitronlar, madde içinde yaklaşık 10^{-10} s içinde yavaşlar ve daha sonra elektronlarla yok edilir. Pozitronun yoğun madde içinde yavaşlarken göç mesafesi genellikle en fazla birkaç milimetredir. Bu nedenle zırlama yalnızca yüksek foton enerjilerinde ve yüksek atom numaralı malzemeler için önemlidir. Gama ışınlarını zırlama bakımından en etkili malzemeler yüksek atom numaralı ve özgül ağırlığı büyük olan elemanlardan yapılmış malzemelerdir [7, 62].

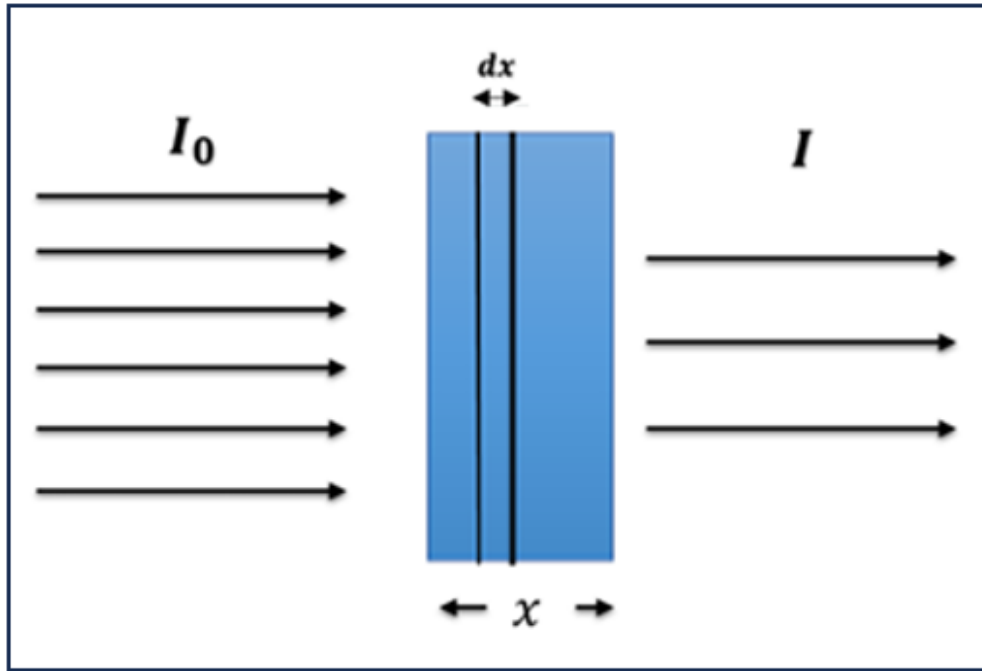
2.6. Elektromanyetik Radyasyonun Absorpsiyonu

Belirli bir radyasyon türünün maddeyle etkileşimi, etkileşim türüne ve etkileşimin gerçekleştiği maddeye göre sınıflandırılabilir. Etkileşim bir elektronla gerçekleşebilir ve birçok durumda elektron serbestmiş gibi davranır [46]. Radyasyon yayıldığı ortama enerji aktararak çeşitli etkileşimlere neden olur. Etkileşme ihtimalleri yüksek olan fotoelektrik olay, compton saçılması ve çift oluşumunda foton madde içinden geçerken enerji kaybeder. Fotonlar madde ile etkileştiğinde bazıları madde tarafından soğurulur, bazıları taşınır ve bazıları çeşitli yönlerde

saçılır. Bu süreçlerin gerçekleşme olasılığı, gelen fotonunun enerjisine ve etkileştiği madde özelliklerine bağlıdır [46, 66].

2.6.1. Lineer (μ) azaltma katsayısı

Fotonlar madde ile etkileştiğinde foton yoğunluğu (foton akışı) maddeden geçerken azalır. Bu foton kaybına azaltma denir; ışının içinden geçtiği maddeye soğurucu veya zırhlayıcı denir. Lineer azaltma katsayısı birim yüzeyde birim kalınlık başına düşen enerji soğurma kesrine denir. Yani birim yüzeye gelen enerjinin birim kalınlıkta azaltılma kesridir. Bu adlandırma, foton etkileşimlerini tanımlamak için yaygın olarak kullanılsa da, μ genellikle makroskobik kesit olarak adlandırılır [7]. Azaltma, fotoelektrik etkiyle zırh içindeki gama ışınlarının emilmesi ve compton etkisiyle zırh içindeki gama ışınlarının sapıtılmasının sonucudur. Ve zırh ne kadar kalınsa, azaltma derecesi de o kadar büyük olur (Şekil 2.7) [45].



Şekil 2.7. Işın demetlerinin zırh tarafından soğurulması

Kolime edilmiş (dar) x veya gama ışın demetleri için, iletilen foton yoğunluğu, zırh kalınlığının (x cm cinsinden) doğrusal artışlarıyla üssel olarak azalır [45]. Fonksiyonun üssel olması, gelen fotonun yarısının malzemenin ilk santimetresini geçerken yok olacağı, kalan fotonların yarısının bir sonraki santimetreyi geçerken kaybolacağı ve bu durumun böyle devam edeceği şeklinde düşünülebilir [7]. Dar ışın geometrisinde aynı fotonların frekanslarındaki veya yoğunluğundaki değişim, malzeme kalınlığının azalan fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemle verilir;

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = - \int_0^x \mu dx \quad (2.10)$$

$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x \quad (2.11)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.12)$$

Foton absorpsiyonu ile fotonun geçtiği ortamın kalınlığı arasındaki ilişki temel alınarak elde edilen 2.12 denklemi “Lambert kanunu”, “Beer kanunu” veya Lambert-Beer kanunu olarak bilinir ve bu kanun kullanılarak numunenin lineer azaltma katsayısı μ elde edilir (Denklem 2.13) [67].

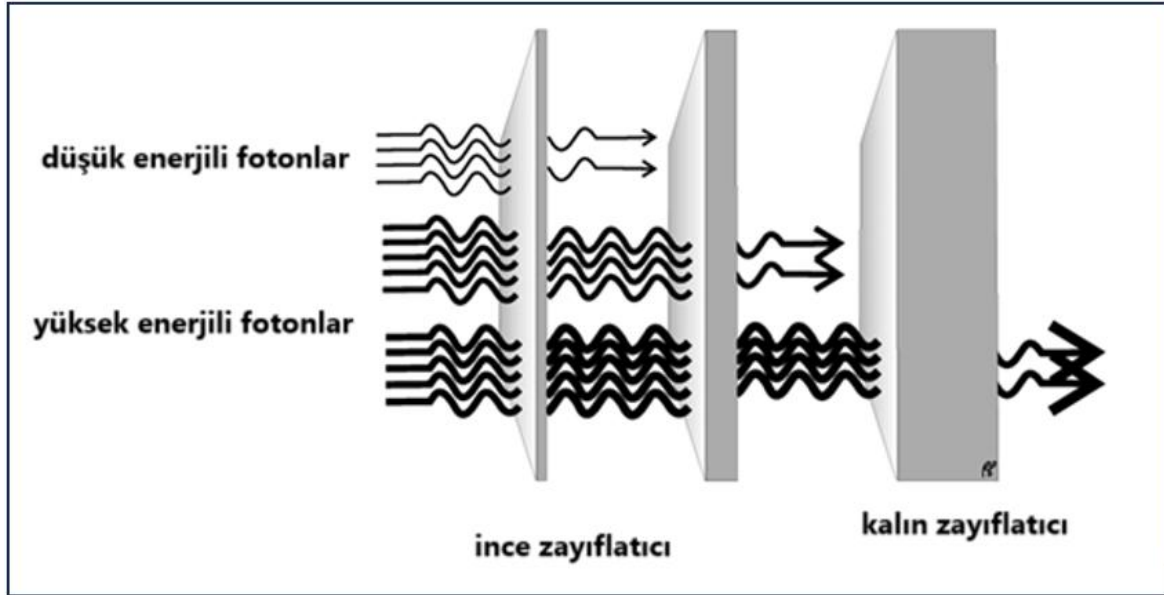
$$\mu = x^{-1} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.13)$$

Denklemlerde I numuneden etkileşmeden geçen fotonların sayısı, I_0 numuneyi geçemeyen (veya numune tarafından tutulan veya azaltılan) fotonların sayısıdır; τ fotoelektrik katsayısı, σ compton katsayısı, κ çift oluşum katsayısı, μ (LAC), bir zırh malzemesinde birim kalınlık başına toplam etkileşim olasılığıdır ve birim zaman başına radyoaktif atomların dönüşüm olasılığı olarak tanımlanan radyoaktif bozunma sabiti (λ) ile eş anlamlıdır [66].

Bu üstel ilişkiye göre, bir foton demeti tamamen soğurulamaz ancak demetin şiddeti üstel zayıflama veya soğurma yasasına göre tespit edilemeyecek seviyelere düşebilir. Lineer azaltma katsayısı μ , kalınlık santimetre cinsinden verildiğinde, santimetre başına lineer azaltma katsayısı olarak ifade edilir. Birimi cm^{-1} 'dir. Toplam lineer azaltma katsayısı (μ), fotoelektrik etkileşme (τ), compton saçılması (σ) ve çift oluşumu (κ) katsayılarının toplamıyla denklem (2.14) ile verilir.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.14)$$

Genel olarak, lineer azaltma katsayısı hem fotonların enerjisine hem de zayıflatıcının ortalama atom numarasına (Z) ve kalınlığına bağlıdır. Fotonların enerjisi ne kadar düşükse veya zayıflatıcının ortalama atom numarası veya kalınlığı ne kadar büyükse, azaltma o kadar büyüktür (Şekil 2.8) [43, 63].



Şekil 2.8. Yarı değer katmanı [63].

2.6.2. Kütle (μ_m) azaltma katsayısı

Beer-Lambert denklemi kullanılarak lineer azaltma katsayısı μ 'nün bağlı olduğu değişkenler tanımlanmaktadır. Lineer azaltma katsayısı çizgisel bir değeri ifade eder bunu tüm malzemeye uyarlamak için kütle azaltma katsayısı kavramı kullanılır. Kütle azaltma katsayısı (μ_m), lineer azaltma katsayısının maddenin yoğunluğuna (ρ) bölünmesidir (denklem 2.15). Bir malzemenin yoğunluğu g/cm^3 olarak verildiğinde kütle azaltma katsayısının birimleri cm^2/g 'dır ve μ_m ile gösterilir [7, 63].

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (2.15)$$

Zırh malzeme kalınlığı x , yoğunluk ve kalınlık birimleriyle (g/cm^2) ifade edildiğinde, kütle azaltma katsayısı μ_p olur ve yoğunluk kalınlığı birimi başına kesirli azaltma olarak da ifade edilir [45]. İki veya daha fazla maddenin bir araya gelerek oluşturduğu kompozit malzemeler için kütle azaltma katsayısı Denklem 2.16'daki gibi verilebilir [68].

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (2.16)$$

Burada w_i ve $(\mu/\rho)_i$ numune içindeki i. elementinin ağırlık kesri ve kütle azaltma katsayısıdır.

2.6.3. Yarı kalınlık (HVL) ve onda bir kalınlık (TVL)

Bir malzemenin foton zayıflatıcı olarak etkinliği lineer azaltma katsayısı ile tanımlanır. HVL, yarı kalınlık gelen ışın şiddetini (I_0) yarıya düşürmek için gerekli numune kalınlığı olarak ifade edilir. Fotonların başlangıç şiddeti I_0 ise bu şiddetin yarıya ($I = I_0/2$) düşmesi için gereken numune kalınlığı yarı kalınlık değeridir. Aynı kalınlıktaki ikinci katman, kalanın yarısını kaldırarak orijinal ışının dörtte birini bırakacaktır [43, 62, 63]. Herhangi bir malzeme için gelen fotonun yarı kalınlığının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılır;

$$HVL = X_{1/2} = \ln 2 / \mu = \frac{0,692}{\mu} \quad (2.17)$$

Burada zayıflatıcının yarı kalınlığı $X_{1/2}$, toplam lineer azaltma katsayısı μ 'dır [46, 66].

Foton şiddetini onda bire düşürebilmek için gereken malzeme kalınlığı onda bir kalınlık (TVL) olarak ifade edilir. Onda bir kalınlık, radyasyonun başlangıç şiddetinin %10'una düşmesi için gerekli soğurucu madde kalınlığıdır ve herhangi bir malzeme için onda bir kalınlık Eşitlik (2.18) kullanılarak belirlenir;

$$TVL = X_{1/10} = \ln 10 / \mu = \frac{2,303}{\mu} \quad (2.18)$$

Burada zayıflatıcının Onda bir kalınlığı $X_{1/10}$, toplam lineer azaltma katsayısı μ 'dir [43, 46, 66].

2.6.4. Ortalama serbest yol (MFP)

Fotonlar madde içerisinde belli bir mesafe alana kadar madde ile etkileşimde bulunmadan ilerleyebilir. Bir fotonun iki etkileşim arası gidebildiği ortalama uzaklığa “ortalama serbest yol (MFP)” denir. Fotonun serbest yolu, toplam enerjisine bağlıdır. Rahatlama uzunluğu olarak da bilinen ortalama serbest yol Denklem 2.19' taki gibi ifade edilir ve birimi cm' dir [59, 66, 69].

$$\text{MFP} = \lambda = 1/\mu \quad (2.19)$$

Burada ortalama serbest yol λ , lineer azaltma katsayısı μ ile ifade edilmiştir.

Gama fotonlarının bir etkileşim gerçekleşmeden önce soğurucuda kat ettikleri ortalama penetrasyon mesafesi de ortalama serbest yol ifadesi altında değerlendirilir [59].

2.7. Radyasyon Ölçüm Birimleri

2.7.1. Radyasyon doz birimi

Radyasyon dozu, iyonize radyasyon tarafından ortama bırakılan enerjinin, birim kütle başına değerini ifade eden bir büyüklüktür. Radyasyon dozunun ölçümleri: Radyoaktif izotoptan yayılan radyasyon dozu (bozunma oranı), havadaki radyasyon dozu (maruz kalma dozu), vücuda giren radyasyon dozu (emilen doz) ve hasara neden olan radyasyon dozu (eşdeğer doz) şeklinde yapılmaktadır.

Bozunma oranının ölçümü

Bozunma oranı, radyoaktif maddede dakikada parçalanana (dpm) ve radyasyon yayan kararsız atomların sayısıdır. Bozunma oranı iki birimle ölçülür:

a) *Curie (Ci)*: 1 gram radyum ile dengede bulunan radonun aktivite miktarı olarak belirlenmiştir. Kısaca 1 curie saniyede $3,7 \times 10^{10}$ parçalanma yapan radyoaktif maddenin aktivitesi olarak tanımlanabilir. Büyük bir birimdir (Bir curie = $2,2 \times 10^{12}$ dpm)

b) *Becquerel (Bq)*: Saniyede bir bozunma gösteren radyoaktif maddenin aktivitesi olarak bilinir. Küçük bir birimdir (bir Becquerel = 60 dpm)

Maruz kalma dozunun ölçümü

Maruz kalma dozu, belirli bir hacimdeki havanın radyasyona (sadece gama ve x-ışınlarına) maruz kaldığında oluşan iyon çiftlerinin sayısıdır. Bu doz, Röntgen (R) birimi ile ölçülür.

Emilen doz ölçümü

Emilen doz, organizmanın herhangi bir radyasyon türünden emdiği enerji miktarıdır, ancak farklı radyasyonların biyolojik etkilerini tanımlamaz. Bu doz iki birimle ölçülür:

a) *Rad* (Radyasyon emilen doz) küçük bir ABD birimidir

b) *Gray (Gy)* standart bir uluslararası (SI) ve büyük bir birimdir, 1 Gray = 100 rad.

Eşdeğer doz ölçümü

Eşdeğer doz, herhangi bir radyasyon türüyle karşılaştırıldığında belirli bir radyasyon dozunun neden olduğu zarar veya riske göre radyasyon dozu miktarıdır. Bu doz iki birimle ölçülür:

a) *Röntgen eşdeğeri adam (rem)*: Küçük ABD birimidir

b) *Sievert (Sv)* standart uluslararası (SI) büyük birimdir (1 Sievert = 100 rem) [70, 71].

2.7.2. Radyasyon enerji birimi

Radyasyon enerji birimi, bir elektronun vakum içerisinde ve 1 voltluk potansiyel farkına sahip bir elektriksel alanın etkisi ile hızlandırıldığında kazandığı kinetik enerjiyi ifade eder. Birimi elektron voltur (eV, 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ joule) [70].

2.7.3. Radyasyon şiddet birimi

Elektromanyetik radyasyon çeşidi olan X veya gama ışını kaynağının 1 m uzağında oluşturdukları radyasyon şiddetine denir. Birimi Röntgen/h veya Gray/saniye'dir (1 R/h = 2,425 Gy/s) [70].

2.7.4. Radyasyon ışınlama birimi

İşnlama birimi, radyasyonun belirli bir ortamda (hava) atomları iyonlaştırma (iyonizasyon meydana getirme) özelliğine dayanan bir ölçüdür ve elektromanyetik radyasyon için tanımlanmıştır. 1 Röntgen normal şartlar altında 1 cm³ havada 1 elektrostatik birim iyonizasyon değişikliği yapan X veya gama ışınlama miktarıdır. Röntgen birimi 3 MeV enerji altındaki X veya gama ışını için tanımlanmıştır. Sadece havadaki iyonizasyonu gösterir. 1 Coulomb 1m³ havada 1 elektrostatik birim iyonizasyon değişikliği yapan X veya gama ışınlama miktarıdır (1 R = $0,58 \times 10^{-4}$ C/kg) [70, 71].

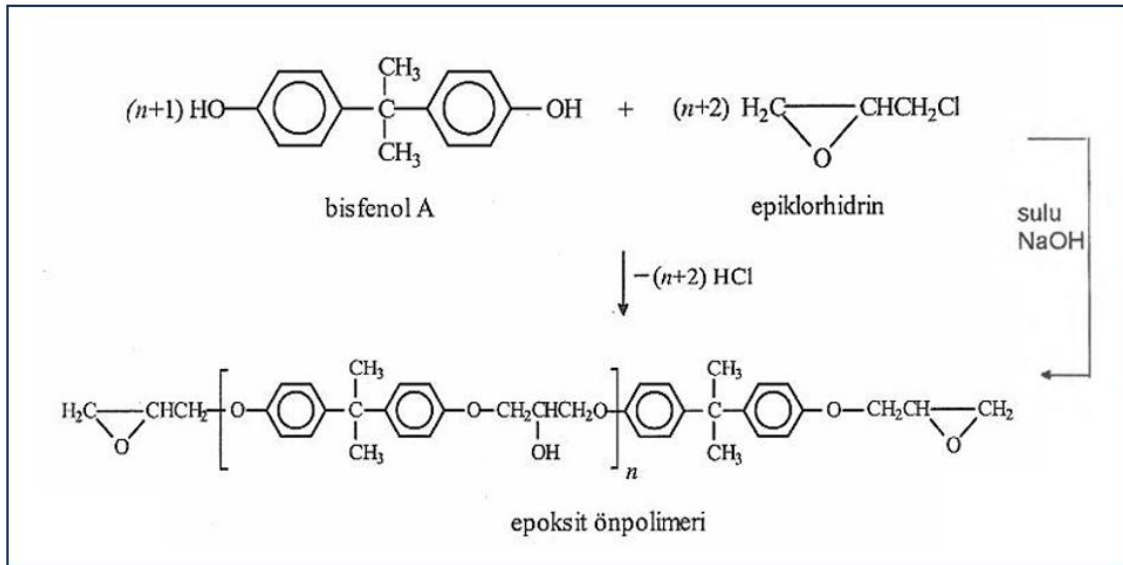


3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Çalışmada Kullanılan Polimerler

3.1.1. Epoksi reçine

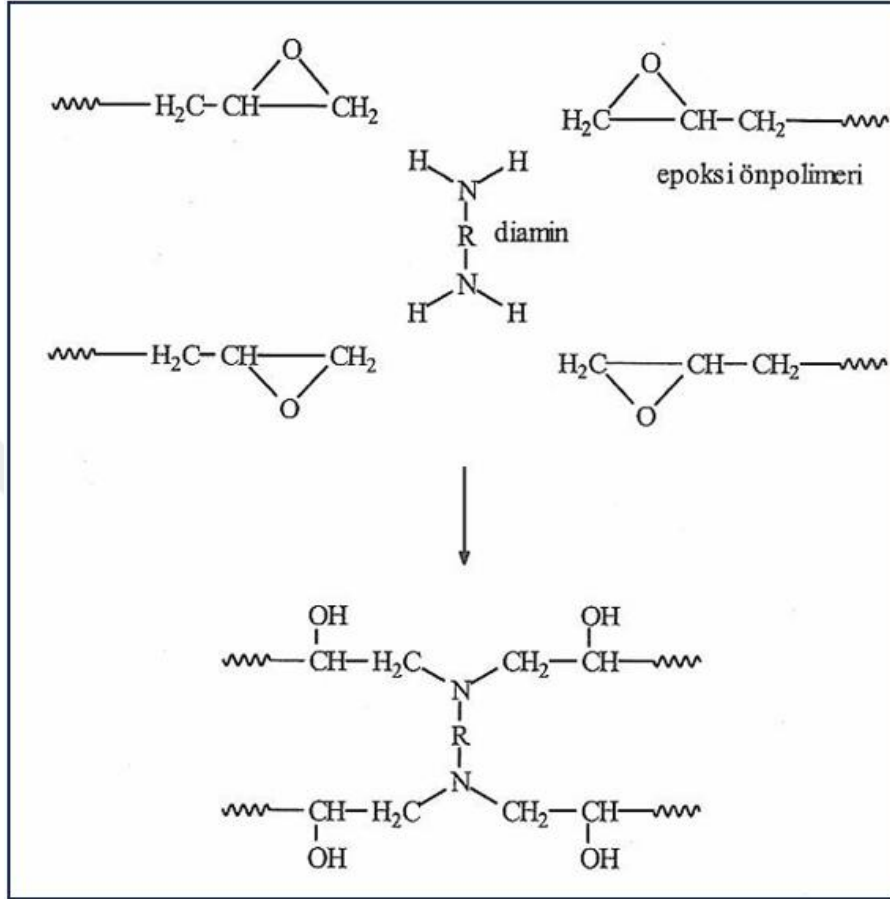
1936'da Pierre Castan, epiklorohidrin ile bisfenol-A kullanarak bazik ortamda epoksi reçine üretmiş daha sonra reçinenin ftalik anhidrit ile reaksiyonundan bir termoset bileşimi hazırlamıştır. Epoksi reçinenin ilk ticarileştirme çalışmaları İsviçre'de Pierre Castan ve Amerika Birleşik Devletleri'nde Sylvan Greenlee tarafından gerçekleştirilmiş ancak başarılı olamamıştır. 1939'da Sylvan Greenlee, bisfenol-A ve epiklorohidrininden yüksek moleküler ağırlıklı bir reçine üretmiş ve bu reçine daha sonra doymamış yağ asitleriyle esterleştirilmiştir. İlk patenti 1948 yılında verilmiştir [72]. Epoksi reçine 1940 yılında bazik ortamda epiklorohidrin ve bisfenol A arasındaki tepkimeyle araldit ve epon ticari adlarıyla üretilmiştir. Termoset polimer yapısına iki aşamada geçilir. İlk aşamada fazla oranda epiklorohidrin kullanılarak zincir sonlarının epoksit gruplarıyla kapanması sağlanır ve düşük molekül ağırlıklı önpolimer elde edilir. Önpolimer, viskoz sıvı ya da düşük erime noktasına sahip polimer özellikleri taşıyabilir. Bu durum tamamen polimerizasyon derecesine bağlı olarak değişir. Önpolimer daha sonra diamin veya polianhidritlerle çapraz bağlı polimere dönüştürülür [73, 74]. Bisfenol A ve epiklorohidrin kullanılarak epoksi elde edilme reaksiyonu Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Epoksi önpolimer reaksiyonu [73]

İkinci aşamada, termoset epoksi eldesi için ön polimer uygun bir çapraz bağlayıcı ile sertleştirilir. Çapraz bağlayıcı ajan olarak dietilen triamin, trietilen tetraamin, heksametilen

tetraamin, m-fenilen diamin vb. aminler kullanılabilir. Epoksi polimerlerde ticari olarak önpolimer ve çapraz bağlayıcı ajan ayrı kaplarda bulunur. Karıştırma işlemi yapıldığında çapraz bağlanma gerçekleşir ve polimer termoset yapıya geçer (Şekil 3.2) [73, 75].



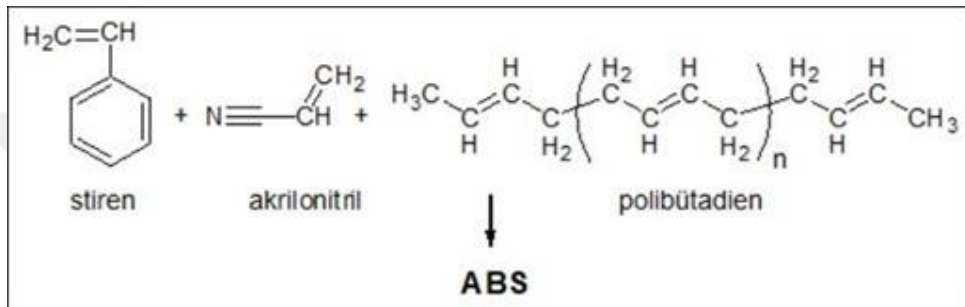
Şekil 3.2. Epoksi çapraz bağlanma reaksiyonu [73]

Çapraz bağlı epoksiler, yapıştırıcılarda, kimyasal korozyona ve aşınmaya karşı yüzeylerin kaplamasında, zemin kaplamalarında, tüp, boru ve endüstriyel tankların astarlanmasında, elektronik uygulamalarda (baskılı devre kartları vb.), havacılık sektöründe, spor malzemelerinde (raketler, kayaklar, bisiklet çerçeveleri, golf malzemeleri, beyzbol sopaları vb.) ve çeşitli kompozitlerde matris malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Epoksi reçinenin başlıca tercih sebepleri; polimerizasyon reaksiyonunda uçucu ürün emisyonu olmaması, kimyasallara karşı iyi direnç göstermesi, dayanıklılığı, kompozit matrisi olarak kullanılarak çeşitli özelliklerde malzeme eldesine imkân tanınması (sıvı kristal damlacıkları ile optik özellikte epoksi eldesi, kauçuk veya termoplastik modifiye epoksiler ile tokluğu artırmak vb.), yapıda bulunan polar gruplar nedeniyle çeşitli yüzeylere çok yüksek yapışma özelliği, polimerizasyon sırasında çok düşük çekme özelliği vb. şeklinde sıralanabilir [73, 76]. Epoksilerin %80'ni kaplama, laminat hazırlama ve kompozit yapımında kullanılmaktadır [73]. Epoksi reçine

yukarıda ifade edilen üstün özelliklerinden dolayı geleneksel radyasyon tutucu malzemelere muadil olarak tercih edilmiştir.

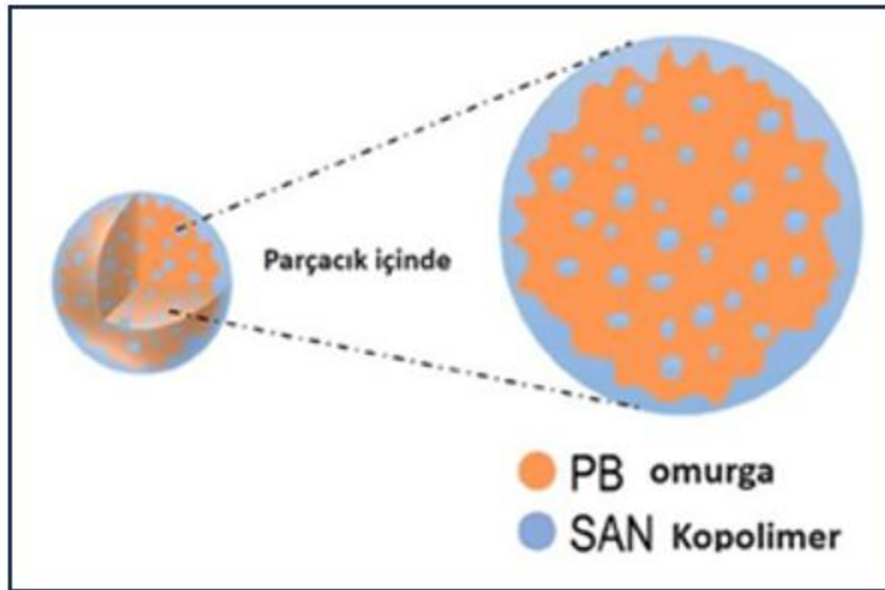
3.1.2. Akrilonitril bütadien stiren (ABS)

ABS kopolimerleri, stiren(S) ve akrilonitril kopolimerden (SAN) oluşan bir matris içinde aşılannmış faz olarak polibütadien(PB) elastomer parçacıklarının dağılmasıyla elde edilmektedir [77]. Polibütadien parçacıklarının stiren akrilonitril kopolimerine dahil edilmesi, ABS kopolimerlerine, öncelikle yüksek darbe dayanımı kazandırır [78]. ABS polimerin kimyasal yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Akrilonitril bütadien stiren polimeri

ABS ticari olarak emülsiyon polimerizasyon prosesi ile elde edilmektedir. Emülsiyon polimerizasyonu daha yüksek kauçuk içerikli ABS üretmeye olanak sağlamaktadır [77]. ABS polimerin morfolojik yapısı Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Akrilonitril bütadien stiren polimeri [14]

Son çalışmalarda radyasyon perdeleme karakterizasyonu için gama radyasyonlarının bazı polimer malzemelerle etkileşimleri mercek altına alınmıştır [79, 80]. Polimer malzemeler (epoksi, polipropilen (PP), akrilonitril bütadien stiren, polivinil klorür (PVC) vb.) geleneksel radyasyon koruyucu malzemelere kıyasla düşük yoğunluğa sahip olmaları, kolayca şekillendirilebilmeleri, kimyasal dirençleri, boyutsal kararlılıkları vb. avantajları nedeniyle radyasyon koruma malzemesi olarak araştırılmaktadır. ABS, iyi mekanik özellikleri, kimyasal direnci ve kolay işleme özellikleri, mükemmel dayanıklılık, iyi boyutsal stabilite, iyi işlenebilirlik ve kimyasal direnç nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir mühendislik termoplastiğidir [77, 81]. Geleneksel radyasyon koruyucu malzemelere kıyasla sağladığı avantajlar nedeniyle polimer matris olarak tercih edilmiştir [82].

3.2. Çalışmada Kullanılan Dolgular

3.2.1. Bakır

MÖ 8000 yılından beri bilindiği düşünülen bakır, kırmızımsıtrak renktedir ve kolayca dövülüp işlenebilen bir madendir. Bakır periyodik tabloda 1B geçiş grubunda bulunup “Cu” simgesi ile ifade edilir. Atom numarası 29, atom ağırlığı 63.54, yoğunluğu 8.93 g/cm^3 , spesifik direnci (20°C 'da) 0.0178 Ohm/mm^2 , m'dir. Bakır, bütün metaller içerisinde, gümüşten sonra elektriği en iyi ileten metaldir (Uluslararası tavllanmış bakır standardı (IACS)'na göre bakır iletkenliği 20°C 'de metre başına 58.108 megasiemens'lik (MS/m) bir iletkenliğe, kesiti bir milimetrekare olan bir tel için metre başına $1/58.108 \text{ ohm'luk}$ bir özdirence eşdeğerdir [83]). Dünyada bakır üretiminde başlıca Şili, ABD, Zambia, Kanada, Kongo, Güney Afrika Cumhuriyeti, Avusturalya, Peru, Avusturalya ve Japonya gibi ülkeler yer almaktadır [84-86]. Memleketimiz, bakır madenleri bakımından zengindir, bakır damarları bilhassa güneydoğu Toroslarda, Erganide, Anadolunun kuzeydoğu köşesinde Kuvarshan ve Murgulda, İnebolu ile Kastamanu arasında Kürede, yer yer Ege bölgesinde görülmektedir [87]. Doğada farklı bileşim ve miktarda bakır içeren birçok mineral bulunur. Bunlar arasında madencilik açısından en önemlileri sülfürlü bakır bileşikler (kalkopirit, kalkosit, bornit, enarjit, tetrahedrit vb.) olup en önemli cevher minerali de kalkopirittir. Sülfürlü minerallerin yanı sıra karbonatlı bakır mineralleri (azurit ve malahit) ile oksitli bakır mineralleri (kuprit ve tenorit) de madenciliği yapılan diğer bakır cevheri mineralleridir [86, 88]. Nadir de olsa nabit (saf) hâlde bulunabilen bakır ve bakır alaşımları kolay işlenebilen, nispeten korozyona dirençli ve dayanıklı olması dolayısıyla sayısız alet ve eşya yapımında kullanılan en eski metallere aittir [85]. Bakır metalinin aynı zamanda antibakteriyel özelliği bulunmaktadır [89]. Günümüzde demir ve alüminyumdan sonra en fazla

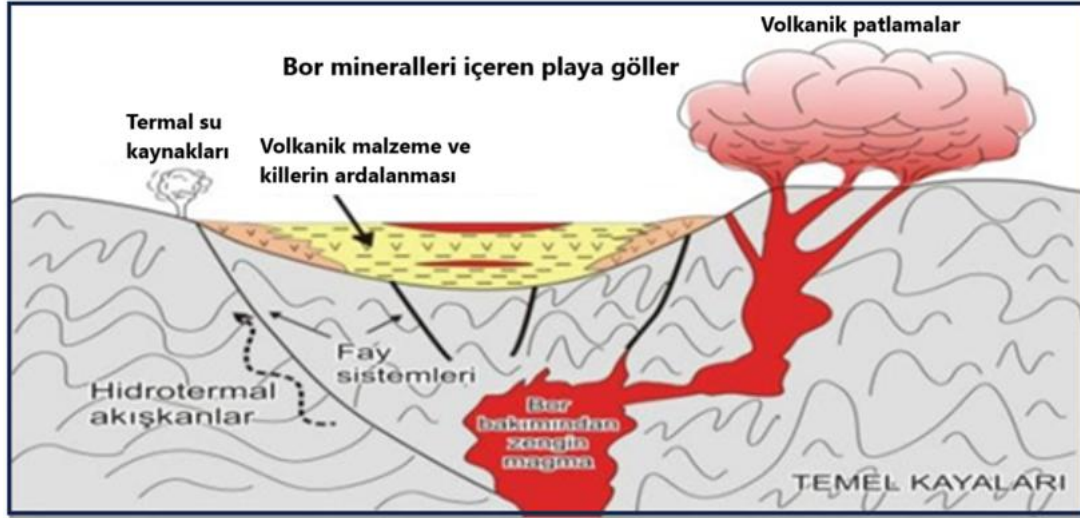
tüketilen üçüncü metal bakırdır. Bakırın başlıca bileşen olduğu önemli alaşımlar arasında pirinç (Cu ve Zn), bronz (Cu ve Sn) ve nikel gümüşü (Ag içermeyen Cu, Zn ve Ni), Monel (Cu ve Ni) ve alüminyum bronz (Cu ve Al) bulunur. Bakır neredeyse tüm madeni para metallerinin bir parçasıdır [86]. Bakır esas olarak elektrik endüstrisinde (elektrik dağıtımı ve kablolamada), sıhhi tesisat uygulamalarında, otomobil parçalarında, makina-teçhizat imalat sanayinde, denizcilik ekipmanlarında, havacılık ve uzay sanayinde, savunma sanayinde, ev aletlerinde, mücevherlerde ve tarımda özellikle mantar öldürücü (bakır asetat), böcek öldürücü (bakır sülfat) ve ahşap koruyucu (bakır arsenat) olarak kullanılmaktadır [85, 86]. Bakır yüksek atom ağırlığı nedeniyle radyasyondan korunma amacıyla alternatif malzeme olarak araştırılmaktadır [90-92]. Polimer kompozitin gama radyasyonuna karşı zırhlama etkinliğini geliştirmek amacıyla polimere eklenebilir.

3.2.2. Sodyum pentaborat

Bor mineralleri, medeniyetlerin ortaya çıkışından bu yana kullanıldığı bilinen ve günümüzde pek çok endüstri alanında kullanılan cevherlerdir. Bor ürünleri kimya sanayi, tekstil elyafları, nükleer uygulamalar, tarımda gübre sanayi, cam sanayi, seramik sanayi, enerji depolama, özel yakıtlar, sağlık ve medikal uygulamalar, ileri mıknatıs sistemleri vb. geniş bir alanda kullanılmaktadır [12, 26]. Dünyada birkaç bölgede yoğunlaşan bor yataklarının en önemlisi Türkiye’de bulunmaktadır. Türkiye bor kaynaklarında dünyada birinci sırada yer almaktadır. Dünya toplam bor rezervinin %75-80 kadarı Türkiye’de bulunmaktadır [93]. Türkiye’den sonra %13’ü civarında bir pay ile ikinci kaynak ülke ABD olup, bor rezervlerinin kalan kısmı Rusya, Arjantin, Çin, Bolivya, Şili, Peru, Kazakistan ve Sırbistan’da bulunmaktadır. Dünyada az sayıda üreticisi bulunan bor mineralinin Türkiye’deki üretimi Eti Bor A.Ş. tarafından yapılmaktadır. Türkiye’deki bor madenciliği dört bölge ile sınırlıdır. Bunlar: Emet (Kütahya), Kırka (Eskişehir), Bigadiç (Balıkesir) ve Kestelek (Bursa)’tir [12, 33].

Periyodik tablonun üçüncü grubunun başında yer alan bor elementinin atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81’tir. Bor, element olarak doğada ^{10}B ve ^{11}B olarak adlandırılan iki ayrı kararlı izotoptan oluşmaktadır. Bu izotoplar, fiziksel ve kimyasal değişimler sırasındaki farklı reaktivitelerinden dolayı birçok jeolojik olayın tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bor doğada serbest halde bulunmaz. Genel olarak diğer elementler ve oksijenle birlikte bor tuzlarını oluşturmakta ve toprak, su, bitki ve canlılarda belli oranlarda bulunmaktadır. Bor elementinin toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan miktarı ortalama 10 ppm civarındadır [26, 33]. Ekonomik değere sahip olan borun kaynağı denizel olmayan borat yataklarıdır. Denizel

olmayan borat kaynaklarının oluşumu için bor bakımından zengin kaynağın olması ve bu kaynağın belli bir yerde birikmesi gerekmektedir. Kurak ve yarı-kurak iklim koşulları da borun depolanması ve saklanması için gereklidir. Bor elementinin, ekonomik olarak yeterince zenginleştiği birkaç oluşum vardır. Bu oluşumlar; bor kaynağı olarak lokal bir volkanik aktivite, bor bileşiklerini çözmek için göl vb. su kütlesi, çözeltiyi çökelme noktasında zenginleştirmek için evaporitik koşullar ve bor minerallerinin korunması için koruyucu sediman tabakasının çökmesidir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Bor elementinin ekonomik olarak yeterince zenginleştiği oluşumlar [93]

Dünya sanayiinde kullanılan boratların %95'ini tinkal ve kernit(Sodyum boraks), kolemanit(kalsiyum borat) ve olak üleksit(sodyum-kalsiyum borat) oluşturmaktadır [93]. Dünya bor rezervlerinin yaklaşık %75-80'i Türkiye'de bulunmaktadır [94]. Türkiye'nin başlıca borat üretilen bölgeleri Bigadiç (kolemanit ve üleksit), Emet (kolemanit), Kestelek (kolemanit, probertit ve tinkal) ve Kırka (boraks ve tinkal) olup ve Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından işletilmektedir [93]. En yaygın olarak üretilen özel bor ürünleri; çinko borat, ferrobora, özel sodyum boratlar, bor karbür, bor nitrür, bor hidrürler, bor halojenürler, organobor bileşikleri, bor-azot bileşikleri, borik asit esterleri vb. olarak sıralanabilir. Sodyum pentaborat(NaB_5O_8), tinkal türünün bir altçeşididir [95]. Sodyum pentaborat tarımda ürün veriminin artması amacıyla gübre olarak kullanılmaktadır. Polimerizasyon reaksiyonları için katalist ve stabilizatör görevi görmektedir. Polimer kompozitlerde ise sodyum pentaboratın alev geciktirici özelliğinden yararlanılmaktadır[12, 96]. Sodyum pentaboratın radyasyon tutucu özelliği üzerine çalışmalar mevcuttur [12].

3.3.3. Barit

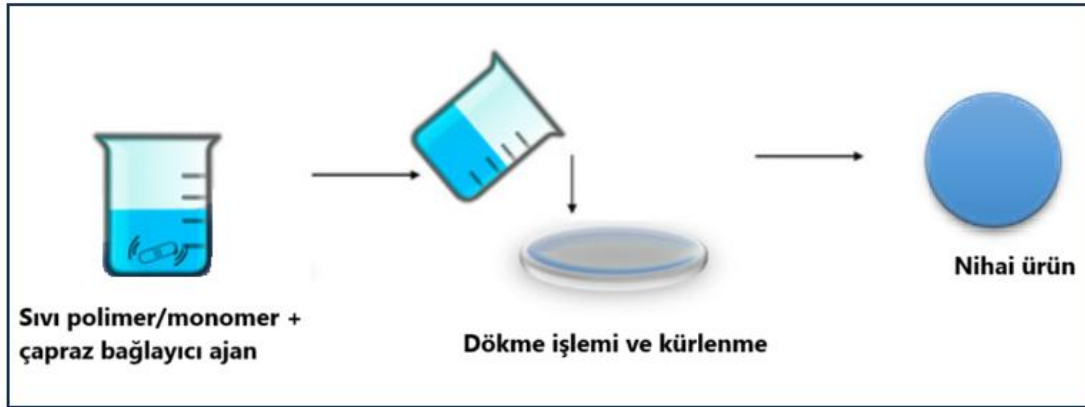
Barit (BaSO_4); baryum elementinin bir mineralidir. Baryumun sembolü “Ba”dır, periyodik tablonun 2. grubunda yer alır ve alkali toprak metallerindendir. Atom numarası 56, yoğunluğu $3,78 \text{ g/cm}^3$, atom ağırlığı 137,36’dır [97]. Baryum elementi doğada kalsiyum (Ca), sülfat (SO_4), silisyum (Si), karbonat (CO_3), alüminyum (Al), gibi anyon ve katyonlarla bileşik yapmış halde bulunur. Barit (BaSO_4), baryumun sülfatla yaptığı bir bileşik olup doğada en çok bulunan baryum mineralidir. Barit, yoğunluğunun fazla olması nedeniyle "ağır spat" adıyla anılmış, kelime anlamı olarak Yunanca'da ağır anlamına gelen "barys" kelimesinden türetilmiştir. Teorik olarak ise barit, %65,7 baryum oksit (BaO) veya %58,8 baryum (Ba) ve %34,3 kükürt trioksit (SO_3) içerir [98, 99]. Barit, bünyesinde yabancı maddelerin bulunması durumunda değişik renkler alabilmektedir. Genel olarak beyazımsı opak ve yarı şeffaf görünüşte olmasına rağmen, demir içermesi durumunda kahverengi-kırmızı, karbonlu maddeler içermesi durumunda ise sarı, siyah ve mavi renklerde görülebilir. Barit cevheri bileşiminde safsızlık olarak kuvars, karbonat mineralleri, sülfat mineralleri ve kil içermektedir [100]. Baritin özgül ağırlığı, $4.3-4.5 \text{ g/cm}^3$ arasındadır. Kendisine benzeyen silikatlardan sertliğinin az olması ile bilinir. Mohs sertlik cetveline göre sertliği 3-3.5 civarındadır (en düşük sertlikteki talk minerali; 1, en yüksek sertlikteki elmas minerali; 10 olarak ifade edilir) [98, 100, 101].

Barit, dünyanın her yerinde hidrotermal damar ve tortul yataklarda bulunmaktadır [102]. Barit yatakları dünyanın her bölgesinde bulunmaktadır. Barit üretiminin yapıldığı başlıca ülkeler; Almanya, Fransa, İtalya, İngiltere, Belçika, İspanya, Kazakistan, Bulgaristan, Romanya, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Meksika, Brezilya, Arjantin, Fas, Cezayir, Tunus’tur. En büyük barit üreticisi Çin’dir (yaklaşık $3,8 \cdot 10^6$ ton/yıl). Diğer büyük barit üreticileri Hindistan, İran, Türkiye, Endonezya, Kuzey Kore, Tayland, Pakistan, Malezya, Japonya ve Avustralya’dır [98, 101, 102]. Türkiye’de Adana, Konya, Antalya, Giresun, Muş, Çanakkale, Kocaeli, Karaman, Gümüşhane, Bayburt, Isparta, Sivas illerinde barit yatakları bulunmaktadır [99]. Barit, yüksek yoğunluğu, rengi, x ve y ışınlarını soğurması, kimyasal reaksiyonlara dayanıklılığı vb. özelliklerinden dolayı birçok uygulamada geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Barit boya ve plastiklere dolgu maddesi olarak eklenmekte, cam sanayinde, kauçuk sanayinde, kimya ve ilaç endüstrilerinde kullanılmaktadır. Radyasyon tutucu özelliğinden dolayı x-ışını ve gama ışını uygulamalarında koruyucu katkı maddesi olarak yer almaktadır [93, 94].

3.4. Çalışmada Kullanılan Üretim ve Şekillendirme Yöntemleri

3.4.1. Polimer döküm yöntemi

Polimerik malzemeler kullanılacağı uygulama alanına göre farklı işlemlere tabi tutularak gerekli şekil ve boyuta dönüştürülür. Bu tür ürünler çeşitli şekillerde (enjeksiyon, ekstrüzyon, vakumla kalıplama, şişirerek kalıplama vb.) kalıplanabilir. Bazıları ise sıvı ön polimerler kullanılarak kalıp boşluğuna dökülür ve nihai şekillendirme yapılır. Sıvı ön polimerin boyutları önceden belirlenmiş bir kalıba dökülmesi ve kurlenmesiyle yapılan şekillendirme işlemi polimer döküm yöntemi olarak adlandırılır. Polimer döküm yönteminde, sıvı termoset polimer veya monomer karışımı çapraz bağlayıcı ajan ile belirli oranlarda karıştırılır ve ön karıştırma işlemi yapılır. Daha sonra sıvı ön polimerik malzeme kalıba dökülür. Kalıp, istenen şekil ve boyutta içi boş bir boşluk içerir. Kalıplanan malzemenin katılaşması için kurlenmesine izin verilir. Çapraz bağlama/polimerizasyon reaksiyonlarından sonra ürün kalıbın şeklini alır. Katılaşmış parça daha sonra kalıptan çıkarılır ve işlem tamamlanır [103, 105]. Şekil 3.12’de polimer döküm yöntemi şema olarak verilmiştir.

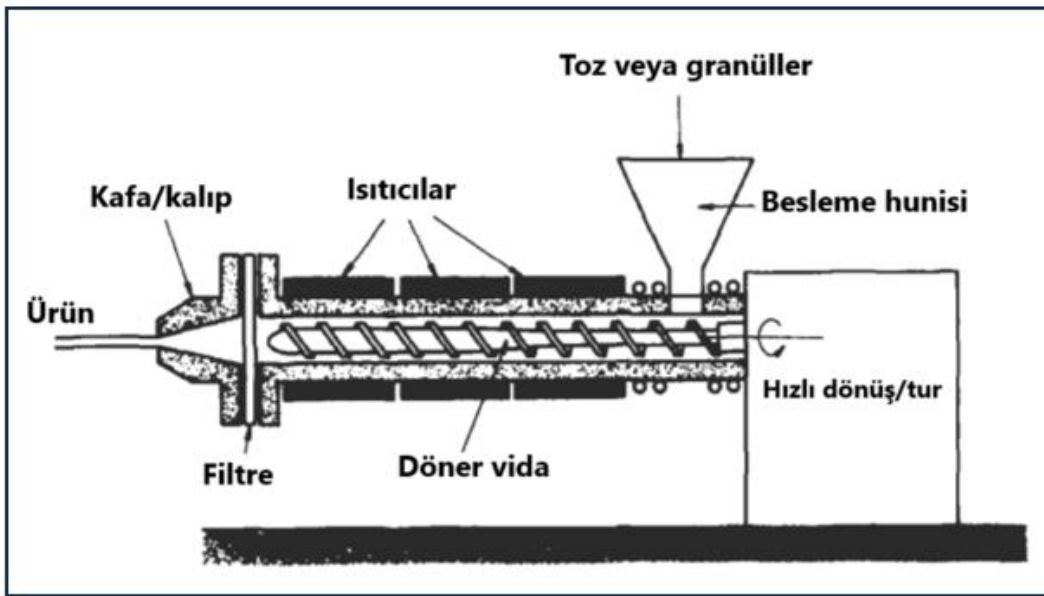


Şekil 3.12. Polimer döküm yöntemi

Polimerik ürünlerin şekillendirilmesi için kullanılan en basit yöntemlerdendir. Genellikle termoset reçinelerin şekillendirilmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemle epoksi reçineler, doymamış polyesterler, akrilikler, poliüretanlar ve silikon reçineleri kalıplanabilir. Bu işlem, mücevher, oyuncak, protez ve endüstriyel parçalar dahil olmak üzere çeşitli ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır [105].

3.4.2. Ekstrüzyon yöntemi

Ürünlerin istenilen kesit, ölçü ve uzunlukta, devamlı (kesiksiz) olarak elde edilmesini sağlayan makinelere ekstrüzyon makineleri (ekstrüder) denir [106]. Ekstrüderle şekillendirme yöntemi termoplastik polimer ve polimer kompozitlerin üretiminde kullanılan, homojen karışımın istendiği durumlarda tercih edilen bir yöntemdir [107]. Bu yöntemde, katı granül halindeki polimer ekstrüdere beslenir ve ekstrüderden geçirilerek vida hareketi, sıcaklık ve basınç altında eritilip ekstrüder çıkışına bağlanmış bir kalıba basılır. Kalıp/kafa şekline göre boru, levha, profil, çubuk, film vb. şeklinde ürünler elde edilir [106, 107]. Tek vidalı ekstrüder makinası şekil 3.13'te şematize edilmiştir.



Şekil 3.13. Plastik ve elastomerler için tek vidalı bir ekstrüzyon makinasının elemanları [107]

Temel olarak bir ekstrüder vidasının **besleme, sıkıştırma ve ölçüm** bölgesi olmak üzere üç farklı bölgesi vardır.

Besleme bölgesi: Bu bölgenin işlevi plastiği önceden ısıtmak ve sonraki bölgelere iletmektir. Bu bölümün tasarımı önemlidir çünkü sabit vida derinliği optimum düzeyde tutulmalıdır. Çünkü bu bölge ölçüm bölgesini besleyecek kadar yeterli malzeme sağlamalı ancak taşmamalıdır. Optimum tasarım, hammadde özellikleri, vida geometrisi, vida ve kovanın plastiğe göre sürtünme özellikleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

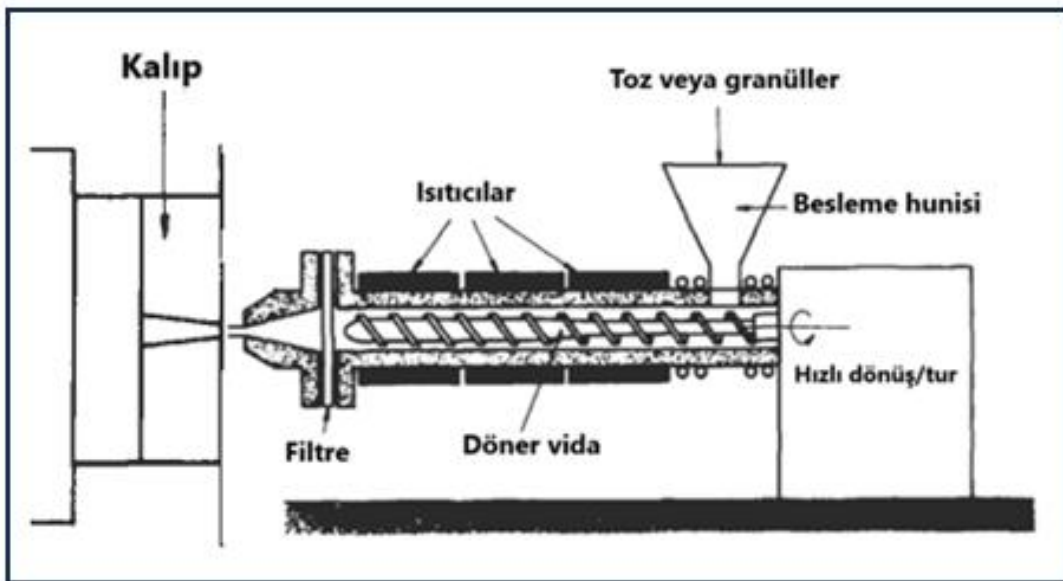
Sıkıştırma bölgesi: Bu bölgede vida derinliği, plastiği sıkıştırmak için kademeli olarak azalır. Bu sıkıştırma, sıkışmış hava ceplerini besleme bölgesine geri sıkıştırma ve malzemenin azaltılmış kalınlığı boyunca ısı transferini iyileştirme gibi ikili bir role sahiptir.

Ölçüm bölgesi: Ölçüm Bölgesinde vida derinliği sabittir ancak besleme bölgesinden çok daha azdır. Ölçüm bölgesinde eriyik homojenleştirilir, böylece kalıba sabit bir oranda, tekdüze sıcaklık ve basınçta malzeme beslenir. Bu bölge, tekdüze bir kanal boyunca akan viskoz bir eriyiği içerdiğinden analiz edilmesi en kolay bölgedir [107].

Ekstrüder ile şekillendirme yöntemi, basit plastiklerin (plastikleştiriciler, nötr dolgu maddeleri ve polimerler) üretiminden, özel kompozitlerin (aktif dolgu maddeleri ve fonksiyonel katkı maddeleri içeren polimer bileşikleri) kadar birçok farklı uygulamaya sahiptir. Çeşitli uygulamalar (ileri kompozit malzemeler, polimer blend ve fonksiyonel polimerler vb.) için tek vidalı, çift vidalı, reaktif ekstrüder vb. ekstrüder çeşitleri mevcuttur [106]. Ekstrüder ile şekillendirme granül ya da toz halindeki katı partiküllerin homojen ve dağıtıcı bir şekilde karışmasına olanak sağlar [108]. Verimli, sorunsuz ve rahat bir eritme mekanizmasıyla polimer kompozit eldesine imkân sunar.

3.4.3. Enjeksiyon kalıplama yöntemi

Enjeksiyon yöntemi termoplastik polimerin şekillendirmesinde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde; sisteme toz veya granül halinde beslenen polimer, sıcaklık, basınç ve vidanın eksenel dönüş hareketiyle eritilip kovan çıkışına (kalıba) doğru iletilir. Vidanın ileri doğru hareketiyle kalıp boşluğuna enjekte edilen eriyik polimer basınç altında kalıpta tutulur ve soğutularak şekillendirilir. Daha sonra açılan kalıptan şekillendirilen polimer çıkarılır ve proses aynı şekilde tekrarlanır [107, 108]. Klasik bir enjeksiyon makinası Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Plastik ve elastomerler için tek vidalı bir ekstrüzyon makinasının elemanları [107]

İşlemin başlıca avantajları arasında, çok çeşitli ürünleri kalıplamadaki çok yönlülüğü, otomasyonun kolayca getirilebilmesi, yüksek üretim imkanı ve dar toleranslı ürünlerin imalatı yer alır [107]. Enjeksiyon ünitesinin ürünü, vidanın önünde biriken polimer eriyiğidir. Eriyik homojenliği, doldurma işlemini ve nihai ürün kalitesini etkiler. Enjeksiyon ünitesi tarafından her döngüde ve bir döngüden diğerine aynı kalitede iyi karıştırılmış ve düzgün sıcaklıkta eriyik üretildiği varsayılır. Polimer eriyiğini kalıba enjekte etmek için eriyiğe basınç uygulanır. Bu görev vidanın veya pistonun eriyiği ileri itmesiyle gerçekleştirilir [108].

3.5. Çalışmada Kullanılan Karakterizasyon Yöntemleri

3.5.1. Çekme testi

Çekme testi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ve mekanik davranışlarının değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan deney metotlarından biridir. Çekme deneyi boyutları standartlara göre hazırlanmış bir numunenin, tek eksen doğrultusunda statik bir yük uygulanarak, belirli bir çekme hızında, belirli sabit bir sıcaklıkta numunenin koparılincaya kadar çekilmesi işlemidir. Çekme deneyinin bir amacı da malzemelerin statik yük altında elastik ve plastik davranışlarının belirlenmesidir. Malzemenin mukavemeti ve deformasyonu ile ilgili belirli özellikleri hakkında bilgi verir. Bu özelliklerin bilinmesi, malzeme bilimcilerine, teknoloji uzmanlarına ve tasarımcılara bir malzemenin potansiyel performansı hakkında fikir verebilir. [109, 110].

Çekme gerilimi-gerinim özellikleri, hem bir malzemeyi ayırmak için gereken kuvvetin hem de sabit bir deformasyon oranında uygulanan kuvvetin bir sonucu olarak malzemenin maruz kaldığı yer değiştirmenin izlenmesiyle elde edilir.

Kuvveti ve yer değiştirmeyi gerilim-gerinim özelliklerine dönüştürmek için bir dizi tanımın tanıtılması gerekir:

$$\text{Gerilim (MPa)} = \text{Kuvvet (N)} / \text{Alan (mm}^2\text{)} \quad (3.1)$$

Kesit alanı (mm²) olan numune üzerine uygulanan bir kuvvet 'F' (N) ise, çubuktaki çekme gerilimi (MPa) basitçe F / mm^2 olarak ifade edilmiştir.

$$\text{Gerinim} = [\text{Uzama } l_1(\text{mm}) - \text{Orijinal uzunluk } l_0(\text{mm})] / l_0 \quad (3.2)$$

Numunenin yük uygulanmadan önceki uzunluğu l_0 (orijinal uzunluk), kuvvet uygulandıktan sonraki numunenin uzunluğu l_1 'i olarak ifade edilmiştir [109].

Gerinimi yüzde olarak ifade etmek yaygın bir uygulamadır ve bu basitçe 100 ile çarpılarak gerçekleştirilir:

$$\text{Gerinim (\%)} = [\text{Uzama } l_1 \text{ (mm)} - \text{Orijinal uzunluk } l_0 \text{ (mm)}] / l_0 \times 100 \quad (3.3)$$

Elastik bir katının gevrek kırılmaya kadar olan gerilim-gerinim karakteristiğini göz önünde bulundurarak, gerilim ve gerinim arasındaki ilişkinin kırılma noktasına kadar doğrusal olduğu ve sonuç olarak gerilim / gerinim = sabit ilişkisinin olduğu görülebilir. Bu sabit, malzemenin elastik modülü olarak bilinir ve genellikle GPa olarak ölçülür [110].

$$\text{Modül (GPa)} = \text{Gerilim (MPa)} / \text{Gerinim} \quad (3.4)$$

3.5.2. Eğme testi

Eğme deneyi malzemenin mukavemetini ve eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Eğme testinin verileri, malzemenin yük altında deformasyona karşı gösterdiği direncin derecesine yönelik bilgiler verir. Enine yük uygulanan numune eğilmeye maruz bırakılır. Numunenin her bir bölgesinde eğilme momentleri meydana gelir. Bu durum eğilme gerilmesi ile alakalıdır. Eğme deneyi, iki desteğe serbest olarak oturtulan, dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının yön değiştirmeksizin ortasına bir kuvvet uygulandığında oluşan biçim değiştirmesi olarak tanımlanır. Eğme deneyi sonucunda eğme momenti (M_e), eğilme gerilmesi (σ_e), elastisite modülü (E_e) gibi değerler hesaplanır. Bu deney genellikle kırılğan ve gevrek malzemeler için daha uygundur çünkü yük altında kopmak yerine uzayan malzemelerin akma gerilmesinin hesaplanmasında zorluklar meydana gelir. Bu sorun %5 esneme kaydedildiğinde ölçülen kuvveti alarak ortadan kaldırılır. %5 esneme, numunenin dış yüzeyindeki gerilme değeri %5 arttığındaki değer olarak tanımlanır. Test örneğine %5 deformasyon gözlenene kadar arttırılarak kuvvet uygulanır ve bu andaki gerilim değeri ölçülerek eğme gerilimi elde edilir. Eğilme testi, çekme testine göre numune hazırlama ve test düzeneği açısından daha basit ve kolaydır [109, 111, 112].

3.5.3. Darbe testi

Darbe deneyi, malzemelerin dinamik zorlamalar altında kırılması için gerekli enerji miktarının tespiti amacıyla yapılır. Bulunan değer malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır. Bir malzemeyi kırmak için yapılan iş "tokluk" kavramı, ile açıklanır. Darbe testi, test parçasını kırmak için gereken gerçek enerjinin hazır bir ölçüsünü sunmaktadır. Darbe testi ile ayrıca numunenin darbe oranı, akma noktasındaki kuvvet ve yer değiştirmesi, kırılma, akma ve deformasyon enerjileri ile modül değerleri hesaplanmaktadır [109, 110].

Polimerik bir malzemenin darbe yüklerine dayanma yeteneğini değerlendirmek için çeşitli test yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlere, önceden belirlenmiş bir yükseklikten bırakılan belirli ağırlıktaki bir sarkaç ile bir numunenin kırılması için gereken enerjinin ölçülmesi için kullanılan Izod ve Charpy darbe dayanımı testleri örnek verilebilir. Izod testi, bir ucundan sıkıca kelepçelenmiş ve ardından diğer ucundan bir sarkaç ağırlığı ile vurulmuş çentikli bir konsol numunenin kırılması için gereken enerjinin ölçülmesini içerir. Charpy testinde, çekiç benzeri bir ağırlık, her iki ucundan sıkıca tutulan çentikli bir numuneye çarpar. Numuneyi kırmak için gereken enerji, çekicinin kinetik enerjisindeki kayıptan elde edilir [110].

3.5.4. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi

DSC analizinde, numunenin koruyucu bir atmosferik ortamda (N_2 gibi) belirli bir hızda ısıtılması, soğutulması ve belirli sıcaklıklarda bekletilmesi sonucu oluşan enerji farklılıklarındaki değişimler analiz edilir. Referans numune ile test edilen numune arasındaki ısı akış farkı ölçülür. Test esnasında, numune ve referansın sıcaklıkları düzenli bir hızla artırılırken her ikisinin sıcaklığının aynı olması için numune veya referansa dışardan gereken miktarlarda ısı ilavesi yapılır. Test edilen numuneye referans malzemesine göre daha fazla ısı verilirse sıcaklık değişimine bağlı olarak endotermik bir değişim meydana gelir ve test numunesi ile referans arasında pozitif bir ısı akışı farkı görülür. Eğer egzotermik bir değişim meydana geliyorsa, test edilen numuneye referans malzemesine göre daha az ısı verilir ve test numunesi ile referans malzemesi arasında negatif bir ısı akışı farkı meydana gelir [111, 113]. Bir polimer amorf ise, katıdan eriyik hale geçiş çok yavaş bir şekilde gerçekleşir ve faz dönüşümü olmadan ara bir "lastik" durumdan geçer. Sert ve kırılğan durumdan kauçuğumsu bir duruma geçiş, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olarak adlandırılan dar bir sıcaklık aralığında gerçekleşir. Kısmen kristalin bir polimer durumunda, yukarıdaki dönüşüm yalnızca amorf bölgelerde gerçekleşir. Kristalin bölgeler değişmeden kalır ve takviye edici elemanlar olarak hareket ederek numuneyi sert ve dayanıklı halde tutar. Isıtma devam ederse, kristalin bölgelerin

erimeye başladığı bir sıcaklığa ulaşılır. Polimerler için denge kristal erime noktası (T_m) son kristalitin erimeye başladığı sıcaklığa karşılık gelir. Basit malzemelerin aksine, T_m değeri kristalinlik derecesine ve kristalitlerin boyut dağılımına bağlıdır [111]. Genel olarak ısı (entalpi) değişiminin ölçülmesi, camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı, kristalleşme zamanı ve sıcaklığı (T_c), reaksiyonların ve füzyonun ısısı, özgül ısı kapasitesi, oksidatif ve termal kararlılık, saflık vb. özelliklerin saptanması amacıyla tercih edilir [114].

3.5.5. Termogravimetrik (TGA) analizi

Termogravimetrik analiz, artan sıcaklığa bağlı olarak numunenin kütesinde meydana gelen ağırlık değişimlerinin kantitatif olarak değerlendirildiği bir termal analiz yöntemidir. Numunenin bozunması sırasındaki ağırlık değişimleri sıcaklık veya zamana bağlı olarak incelenmektedir. Numunedeki ağırlık değişimi yüksek sıcaklıklarda fiziksel veya kimyasal bağların kopması sonucu meydana gelen; dehidrasyon, uçucu bileşenlerin buharlaşması, piroliz, kimyasal reaksiyonlar ve termal bozunma vb. nedenlerden dolayı gerçekleşmektedir. Numunede sıcaklıkla birlikte kütle kaybı görülebileceği gibi oksidasyon ile uçucu olmayan oksitlerin oluşması sonucunda kütle artışı da gözlemlenebilir. Test sonucunda termogram olarak ifade edilen kütlenin veya kütle yüzdesinin sıcaklığa karşı grafiğini veren termal bozunma eğrisi elde edilir [113, 114].

3.5.6. Fourier transform infrared spektrofotometresi (FTIR) analizi

FTIR klasik yapısal analiz yöntemi olarak en çok başvurulanan tekniklerden biridir. Bu teknikte temel olarak ışın ile maddenin etkileşiminden yararlanılmaktadır. Elektromanyetik ışımanın infrared bölgesine ait belirli bir dalga boyundaki ısıma, analizi yapılan moleküller üzerine düşürülmekte ve molekülde bazı (titreşim, elektronik ve dönme düzeyinde geçişler) yapısal değişimler meydana gelmektedir. Molekülün titreşim ve dönme düzeyinde meydana gelen geçişler infrared spektroskopisi tekniği ile incelenmektedir. Dalga sayısına karşı geçirgenlik veya absorpsiyon durumu kaydedilerek bir spektrum alınmaktadır [115, 116]. FTIR analizi, maddenin yapısını moleküler ölçekte açıklamak için kullanılan temel ve kritik bir karakterizasyon tekniğidir. Bu teknik kullanılarak homopolimer, kopolimer, polimer kompozit ve genel olarak polimerik malzemelerdeki bileşenlerin kimyasal bileşimi ve bağlanma düzeni elde edilebilir [115]. FTIR tekniği, gazları, sıvıları ve katıları minimum hazırlıkla analiz etmek için kullanılabilir [116].

3.5.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

SEM, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu tipidir. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek değişik sinyaller üretirler. Bu sinyaller dedektörler tarafından algılanarak numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgi verir [117]. Elektron demeti raster tarama ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görüntü oluşturulur. SEM'de görüntü oluşturmak için elektron demeti tarafından uyarılan numune atomlarının yaydığı ikincil elektronlardan faydalanılır. İkincil elektronlar, düşük enerjili elektronlar olup, demet elektronlarının atom dış yörüngelerindeki elektronlara çarpması ile atomlarından ayrılan dış yörünge elektronlarıdır [118]. Odaklanmış ışın demetindeki elektronlar örnek numune yüzeyi ile elastik olmayan çarpışma yaparak enerjilerini elektronlara aktarırlar ve ikincil elektronları oluştururlar. Bu elektronlar numune yüzeyinin hemen altında ortaya çıkar. Numune yüzeyinde bulunan ikincil elektronlar, dedektör yardımı ile toplanır ve yüksek çözünürlükte topografik görüntü elde edilir [117].

Dolgu parçacıklarının polimer matrisi içindeki dağılımını ve kırılma yüzeyinin morfolojisini araştırmak amacıyla mikro yapı karakterizasyonu bir taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI 450) kullanılarak yapılmıştır. İncelemeden önce numuneler, elektron iletimini kolaylaştırmak ve şarj etkilerini azaltmak için püskürtmeli kaplayıcı (Cressington 108 Auto) kullanılarak ince bir altın tabakasıyla kaplanmıştır. Daha sonra, optimum görüntü kalitesini sağlamak için numuneler yüksek vakum koşulları altında gözlemlenmiştir. Bu mikroyapısal analizi yürüterek, dolgu parçacıklarının polimer matris içindeki dağılımı ve bunların kompozitlerin kırılma davranışı üzerindeki etkisi hakkında daha derin bir anlayış kazanılmıştır.

3.5.8. Elektriksel iletkenlik testi

Bir malzemenin elektrik direnci, o malzemenin elektrik akışına ne kadar direndiğini açıklayan bir değerdir. Direnç, ohm·metre ($\Omega \cdot m$) birimiyle ölçülür. Elektrik bir malzemedan kolayca akabiliyorsa, o malzemenin özdirenci düşüktür. Elektriğin bir malzemedan akması çok zorsa, o malzemenin özdirenci yüksektir. Bir malzemenin özdirenci iletkenliği ile ters orantılıdır. Bu nedenle, bakır ve alüminyum gibi düşük özdirençlere (yaklaşık $20 \text{ n}\Omega\text{m}$) sahip malzemelerin iletkenliği yüksektir ve elektrik gücünün çok kolay akmasına izin verirler [119]. Elektriksel direnç, bir iletkenin uzunluğu ile doğru, kesit alanı ile ters orantılıdır. Elektriksel direnç, özdirenç ve öz iletkenlik bağıntıları aşağıda verilmiştir [120].

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.5)$$

$$\rho = \frac{RxA}{l} \quad (3.6)$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (3.7)$$

$$\sigma = \frac{l}{RxA} \quad (3.8)$$

Verilen bağıntılarda l; numunenin iletkenliğinin ölçüldüğü doğrultudaki boyu, R; direnci, A probun temas ettiği yüzeyin alanı, ρ; öz direnç, σ ise iletkenliği temsil etmektedir.

Elektriksel iletkenlik testi yapılarak kompozitlerin direnç değerleri elde edilmiştir. Direnç değerleri ve numune boyutları yukarıdaki formüllerde kullanılarak, numunelerin iletkenlik değeri hesaplanmıştır.

3.5.9. Su absorpsiyon testi

Su absorpsiyonu, polimerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyebilen önemli bir faktördür. Polimerin değişen çevre koşulları altında boyutunu koruyabilme yeteneğini ifade eden boyutsal kararlılık, nem emiliminden etkilenebilmektedir. Emilen nem bazen bir plastikleştirici görevi görerek camsı geçiş sıcaklığını ve malzemenin mukavemetini azaltabilir. Emilen nem miktarı, plastiğin türüne, ortam koşullarına (sıcaklık, nem oranı ve temas süresi) ve kullanılan katkı maddelerine bağlı olarak değişmekte ve plastiğin dış görünüşü, çekme mukavemeti, darbe mukavemeti, elastikiyet ve elektriksel performans gibi özelliklerinde değişiklikler meydana getirmektedir [121]. Türüne göre bazı polimerlerin su absorplama özelliği yüksek iken (naylon normal koşullarda ağırlığının %4 veya %8'ine kadar) bazı polimerlerde bu oran az (polipropilen %0,01 civarı) bazılarında ise neredeyse hiç yoktur (Politetrafloroetilen %0). Polimer malzemenin işleme, nakliye, depolama ve kullanım sırasında su emilimini ve malzemenin buna nasıl tepki vereceğini anlamak kritik öneme sahiptir [122-124].

Plastiklerin su absorpsiyonu için standart test olarak ASTM D570 yöntemi kullanılmaktadır. Su emilimi, belirtilen koşullar altında emilen su miktarını belirlemek için kullanılır. Veriler, malzemelerin su veya nemli ortamlardaki performansına ışık tutar. Su absorpsiyon testinde öncelikle numunelerin kuru tartımının alınması gerekir. Nemin uzaklaştırılması amacıyla numuneler belirtilen bir süre ve sıcaklıkta fırında kurutulur ve ardından soğuması için bir kurutucuya yerleştirilir. Numuneler soğutulduktan hemen sonra kuru tartım alınır. Malzeme daha sonra kararlaştırılan koşullarda, genellikle 25°C'de 24 saat veya dengeye gelene kadar suda bekletilir [122]. Daha sonra numuneler sudan çıkarılır, tiftiksiz bir bezle kurulanır ve tartılır. Su absorpsiyonu, ağırlık yüzdesindeki artış olarak ifade edilir [123-125]. Aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$\text{Su absorpsiyon yüzdesi} = \left[\frac{\text{Islak ağırlık} - \text{Kuru ağırlık}}{\text{Kuru ağırlık}} \right] \times 100 \quad (3.9)$$

3.5.10. Piknometre ile yoğunluk ölçümü

Birim hacimdeki madde miktarına yoğunluk denir. Yoğunluk “p” ile ifade edilir, birimi g/cm³’tür. Hassas çalışmalarda katı cisimlerin yoğunluğu piknometre kullanılarak belirlenebilmektedir. Piknometre, çalışma sıvısında (su, alkol vb.) çözünmeyen katı nesnenin yoğunluğunu belirlemekte kullanılan bir yoğunluk ölçüm yöntemidir. Piknometre, hacmi belli (50 ml’lik piknometre vb.) küçük bir balon joje şeklinde olup, ağzına oluklu bir cam tapa yerleştirilmiştir. Yoğunluğu tayin edilecek olan malzeme piknometre içine yerleştirildikten sonra üzerine malzemeye uygun sıvı konulmaktadır. Kompozitlerin yoğunluğu, piknometre kullanılarak aşağıdaki şekilde belirlenmektedir; öncelikle, 25°C’de kuru halde bulunan piknometrenin kendi ağırlığı tartılır (a). Yoğunluğuna bakılacak olan cisim piknometreye konur ve tekrar tartım alınır (b). Daha sonra, piknometre su ile yavaşça doldurulur, aralıklı olarak çalkalanarak piknometrede hava kabarcıklarının kalmaması sağlanır ve ağırlığı saptanır (c). Piknometre boşaltılıp içindeki nemi kurutulur ve sonra su ile doldurulup tartılarak ağırlığı saptanır (d). Her işlem aşamasında piknometrenin etrafı kurutularak ölçüm hassasiyeti sağlanır [126]. Yoğunluk hesaplamaları aşağıdaki formüle göre yapılmaktadır;

$$Yoğunluk = \frac{b-a}{((d-a)-(c-b))} x \rho \quad (3.10)$$

(a; şişe + kapak, b; şişe + kapak+ numune, c; şişe + kapak + numune + saf su, d; şişe + kapak + saf su, ρ ; kullanılan sıvının özgül ağırlığı (saf su için 1))

3.5.11. Sertlik (Shore D) testi

Sertlik testi, plastiklerin sertliğini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Sertlik testinde, metalden yapılmış belirli bir şekle sahip bir pim, bir yay tarafından tutulur ve ardından test nesnesine itilir. Penetrasyon derinliğine bağlı olarak, test edilen malzeme sert ya da yumuşak olarak ifade edilir. Plastik malzemelerin sertlik değerinin ölçümü durometre ile yapılmaktadır. Sertlik ölçü birimi Shore olarak ifade edilmektedir. Sertlik ölçümü, yumuşak elastomer malzemeler için Shore A ve daha sert polimerik malzemeler için Shore D olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır [127].

3.5.12. Parlaklık (Gloss) testi

Parlaklık; polimer yüzeyinin ışığı belirli bir yönde yansıtma kapasitesi olarak tanımlanır. Parlaklık, bir plastik malzemenin ne kadar yansıtıcı veya "parlak" olduğunu yani malzemeye belirli bir geliş açısıyla dokunan ışık ışınının ne kadarının standart bir malzemeye göre yansıtıldığını karakterize eder. Bu özellik büyük ölçüde test edilen numunenin yüzey görünümüne bağlıdır [128]. Parlaklık, özellikle otomotiv, ambalaj filmleri vb. endüstrilerde plastik yüzeyle ilişkilendirilen önemli optik özelliklerden biridir. Işığın değişik açılarda gelme ve yansımadaki durum fotoelektrik cihazlarla ölçülür [129]. Yüzey parlaklığı, polimer kompozitlerin görünümünü, kalitesini ve kullanılabilirliğini etkileyen önemli bir faktördür. Pürüzsüz ve parlak bir yüzey, kompozitin estetik değerini ve profesyonel görünümünü artırır. Otomotiv ve havacılık gibi alanlarda yüksek yüzey parlaklığı aerodinamik performansı artırır ve hava sürtünmesini azaltır [130].

3.5.13. Radyasyon zırlama testi

Radyasyonun varlığının anlaşılması duyu organları ile mümkün değildir. Bu nedenle, radyasyonun algılanması ve ölçümleri radyasyona hassas cihazlar ile yapılmaktadır. Radyasyonun ölçümünde radyasyon ile maddenin etkileşmesi esas alınmaktadır. Bu esasa dayanarak geliştirilmiş olan cihazlara “radyasyon dedektörü” adı verilir. Radyasyon, bir

maddenin içerisinde geçerken maddenin atom veya molekülleri ile etkileşerek enerjisinin bir kısmını veya tamamını etkileştiği ortamda çeşitli olaylara sebebiyet vererek (kimyasal, fotokimyasal, iyonizasyon, fosforesans, floresans) kaybeder [131]. Dedektörler, radyasyonun madde içinde sebep olduğu iyonlaştırma ve uyarma mekanizmalarının elektrik sinyallerine çevrilmesi prensibiyle çalışırlar. Radyasyon dedektörlerinden yararlanarak; ortamda radyasyon olup olmadığı, radyoaktif kaynağın parçalanma hızı, aktivitesi, miktarı, yarı ömrü, belli bir zamanda dedektör yüzeyine çarpan parçacık sayısı, her parçacığın enerjisi vb. belirlenmektedir [59]. Radyasyon dedektörleri arasında sintilasyon tabanlı NaI (TI) dedektörleri, gama ışınlarını algılama etkinliklerinin daha yüksek olması nedeniyle radyasyon spektroskopisi ve tıbbi ve endüstriyel alanlar dahil olmak üzere radyoizotop tabanlı uygulamalar için kullanılmaktadır [132]. NaI (TI), kristaldeki talyumu aktive ederek üretilir. Kaynak-dedektör sistemi, deneysel kurulumu gösteren Şekil 3.15'te gösterildiği gibi arka plan radyasyonunun etkilerini azaltmak için kurşunla korunmaktadır.



Şekil 3.15. Kaynak-dedektör sistemi, deneysel kurulumu

Kaynak-dedektör arası belirli bir mesafede tutulmakta ve soğurucu madde, gama ışını kaynağı ile NaI (TI) detektörü arasına yerleştirilmektedir. Soğurucu madde, çalışılan radyoizotoplardan yayılan gama ışınları ile belirli bir süreyle ışınlanır ve oluşturulan sabit deneysel geometride spektrumlar kaydedilir. MAESTRO-32 çok kanallı analizör öykünme yazılımı (Ortec, South Illinois Ave., ABD), deneysel spektrumların analizi için kullanılabilir. MAESTRO, endüstriyel,

öğretim, araştırma ve diğer bilimsel uygulamalarda gama spektroskopi sistemleriyle uyumlu çok kanallı analizör (MCA) "emülasyon" yazılım paketidir. En önemli zayıflama parametrelerinden biri olan lineer zayıflama katsayısı ve kütle zayıflama katsayısı bu yolla belirlenebilir. Lineer zayıflama katsayısı, Beer Lambert yasasına göre numune kalınlığına karşı spektrumdaki fotopik altındaki sayıların doğal logaritmasının çiziminden hesaplanır. Radyasyon ölçümünde, bir dedektörün en önemli özelliklerinden biri, dedektörün pratik ve doğru kullanımı ve operasyonel davranışını anlamak için verimliliğidir. Birçok araştırma, verimliliği belirlemek için hesaplamalı tekniklerin geliştirilmesine odaklanmıştır [133]. Bu hesaplamalı tekniklerden biri Monte Carlo simülasyon yöntemidir [134, 135]. Monte Carlo simülasyon yöntemi, radyasyona maruziyetin boyutunu deney yapmadan hesaplamak için kullanılır. Deney yapmadan önce deney geometrisi ve deney şartları Monte Carlo simülasyon programlarına girilerek deney sonuçlarını tahmin edecek bir ön çalışma yapılır. Monte Carlo yöntemi doğruluğu ve performansı nedeniyle tercih edilmektedir [136]. Yöntemi kullanışlı kılan, parçacık etkileşimlerinin istatistiksel bir doğaya sahip olması ve parçacık taşınımı gibi karmaşık problemleri çözmede etkin çözümler sunmasıdır. Fotonun hangi doğrultuda hareket edeceği, etkileşimi ve etkileşim türleri, etkileşimde ne kadar enerji kaybedeceği ve sonrasında nasıl yol alacağı vb. birçok olay belli olasılıklar dahilinde gerçekleşir. Monte Carlo yöntemi bu varsayımlardan yola çıkarak madde içinde yol alan her parçacığın davranışlarını takip eder. Programın içinde bulunan bir alt programda, kullanılacak radyasyon (gama, X-ışını vb.), etkileşimde kullanılacak malzeme, deney geometrisi gibi parametreler girilir. Simülasyon yapıldıktan sonra araştırılan sonuçlar grafik edilerek bulunur. Foton şiddeti, enerji kaybı, soğurulan doz vb. nicelikler kaydedilir ve bu dağılımlar için ortalama değerler hesaplanır [137]. Bunun yanı sıra, hesaplama varsayımları sunan (XCOM, NCNR, WinXCOM, MCNPX ve Phy-X/PSD vb.) platformlar, teorik olarak elementler, bileşikler ve kompozitler tarafından oluşturulan malzemelerin kütle ve lineer zayıflama katsayısı, ortalama serbest yol, yarı ve onda bir değer katmanlarını hesaplamaktadır [138].

4. CU/EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Çalışmada, polimer matris olarak epoksi reçine, dolgu maddesi olarak ise dendritik bakır tozu kullanılmıştır. Polimer döküm yöntemi kullanılarak kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen Cu/epoksi kompozitlerin FTIR, DSC, TGA, SEM, elektriksel iletkenlik, sertlik, yoğunluk ve mekanik testler dahil olmak üzere çeşitli testler yoluyla özellikleri incelenmiştir. Ayrıca 59,5 keV, 661,6 keV ve 1332,5 keV enerjili gama ışınları için kompozitlerin zırhlama özellikleri değerlendirilmiştir.

4.1. Malzemeler ve Yöntemler

Kompozit üretiminde kullanılan epoksi reçine ve kürleme ajanı olarak “Teknomarin Era 4000 A ve Teknomarin Era 4000 B” ikili seti kullanılmıştır. Epoksi reçinenin yoğunluğu 1,1 g/cm³ olup şeffaf renktedir ve karışım oranı ağırlıkça 2A/1B şeklinde uygulanmıştır. Kullanılan bakır “Makin Metal Powders” firmasının “dendritik bakır (Orta)” çeşididir. Bakır, toz formunda olup %99,5 oranından daha büyük saflığa sahiptir, parçacık boyutu 45 mikrometrenin (µm) altındadır ve yoğunluğu 8,96 g/cm³’tür.

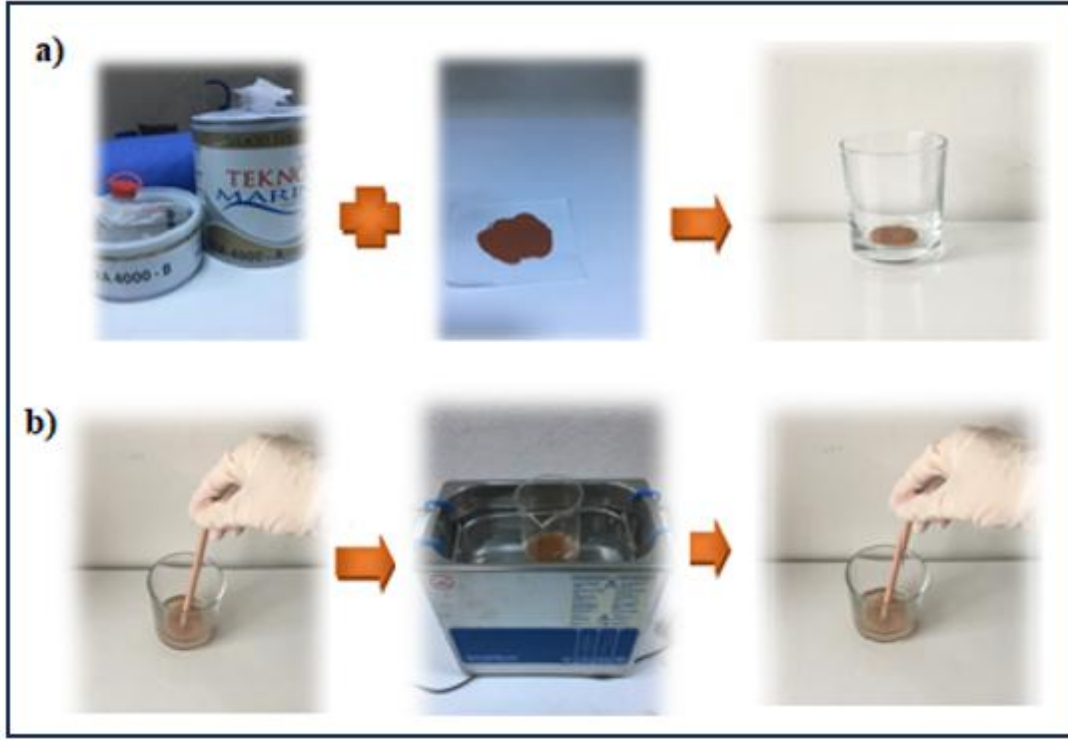
Cam kaba konulan epoksi reçineye ağırlıkça %1, %2, %3, %4, %5 ve %6 oranında bakır tozu eklenmiş ve tahta çubuk yardımıyla elle 5 dk. ön karıştırma yapılmıştır. Tablo 4.1. bakır tozu içeren epoksi bazlı kompozitlerin formülasyonunu sunmaktadır.

Tablo 4.1. Cu/epoksi kompozitlerin formülasyonu

Numune kodu	Epoksi (%)	Kürleştirici ajan (%)	Bakır tozu (%)
Referans (E)	66,66	33,33	-
ECU-1	66,00	33,00	1
ECU-2	65,32	32,66	2
ECU-3	64,66	32,33	3
ECU-4	64,00	32,00	4
ECU-5	63,33	31,66	5
ECU-6	62,66	31,33	6

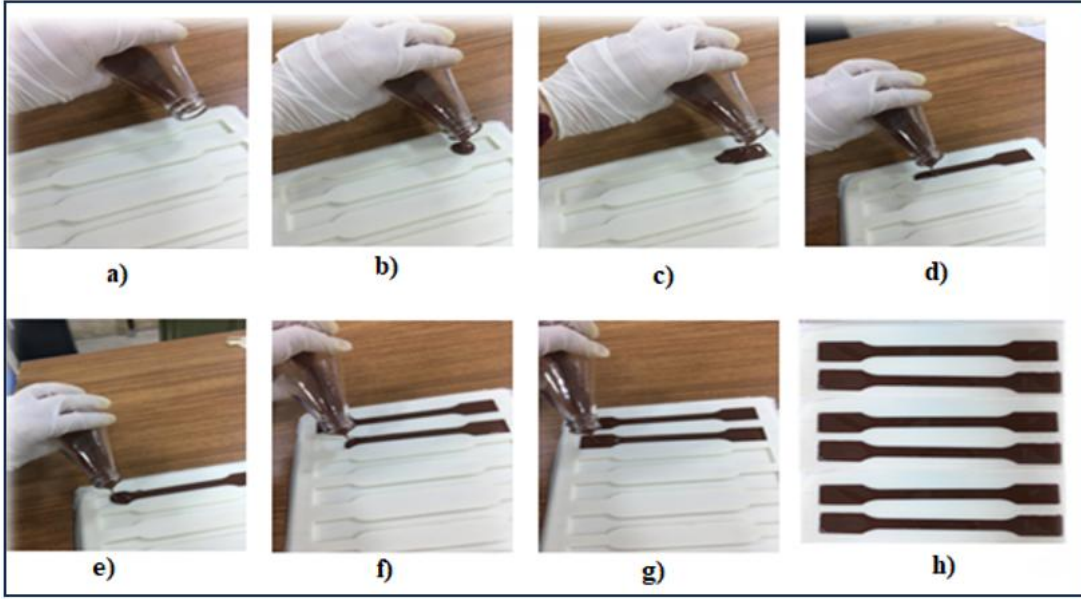
Bakır tozlarının homojen dağılmasını sağlamak amacıyla karışım, banyo sıcaklığı 25°C- 40°C arasında olan ultrasonik banyoda (Sonics VCX 130) 30 dk. boyunca karıştırılmak üzere

bırakılmıştır. Ultrasonik banyodan çıkarılan karışıma, epoksi/kürleme ajanı oranı 2A/1B olacak şekilde kürleme ajanı eklenmiş ve 5 dk. elle karıştırılmıştır. Karışımın homojen olması için tekrar 5 dk. ultrasonik banyoda bekletilmiştir. Epoksi/bakır kompozitlerin karışım elde etme aşamaları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Epoksi/bakır kompozit üretim aşamaları

Epoksiye göre daha yüksek yoğunluğa sahip olan bakırın dibe çökmesini engellemek amacıyla 2 dk. daha elle karıştırılmış ve kürleme başlayınca silikon kalıba ($200 \times 200 \times 25$ mm) döküm yöntemi ile kalıplanmış ve kürlenmeye bırakılmıştır. Numuneler, kürlemeyi tamamlamak için döküm işleminden sonra 24 saat boyunca oda sıcaklığında kalıpta tutulmuştur. Epoksi/bakır kompozitlerin kalıplanma aşamaları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Epoksi/bakır kompozitlerin kalıplanma aşamaları

4.2. Testler ve Analizler

4.2.1. Mekanik inceleme

Malzemelerin çekme ve eğilme özellikleri, 50 kN yük hücresi ile donatılmış bir Zwick Z020 Model test makinesi kullanılarak test edildi. Çekme testi, ASTM D638 standartlarına uygun olarak 5 mm/dk çekme hızı ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Eğilme testi de aynı makine kullanılarak, TS EN ISO 178 standartlarına uygun olarak, 16:1 açıklık-derinlik oranı ve 1,7 mm/dk çapraz kafa hızı ile oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Darbe testi, 2,5 J sarkaç çekicine sahip ASTM D256 uyumlu bir sarkaç evrensel darbe test cihazı kullanılarak bir Izod darbe testi gerçekleştirildi.

4.2.2. FTIR, DSC ve TGA analizleri

FTIR testleri ASTM D6348 standardına uygun olarak Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR model cihaz kullanılarak gerçekleştirildi. Çeşitli oranlarda bakır tozu ile güçlendirilmiş epoksi kompozitlerin kimyasal yapılarını analiz etmek için Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi kullanıldı. Bu analiz, 4000 cm^{-1} ila 400 cm^{-1} dalga sayısı aralığındaki fonksiyonel gruplara karşılık gelen tepe noktalarını belirlemeyi içeriyordu. Isıl özellikler, ASTM D3417 standardına uygun olarak diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC, Seiko DSC 7020 Model) kullanılarak araştırıldı. Isıtma hızı $20^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olarak ayarlandı ve elde edilen malzemelerin ısıl geçişlerini gözlemlemek için ölçümler bir azot atmosferi altında

gerçekleştirildi. Termogravimetrik analiz (TGA), bir azot akışı altında bir Seiko Exstar TG/DTA 6300 kullanılarak gerçekleştirildi. Epoksi kompozit numuneler 10°C/dk ısıtma hızıyla 600°C sıcaklığa kadar ısıtıldı.

4.2.3. Mikro yapı karakterizasyonu

Epoksi matris içindeki Cu parçacıklarının dağılımını ve kırılma yüzeyinin morfolojisini incelemek için mikro yapı karakterizasyonunda bir taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI 450) kullanıldı. İncelemeden önce, numuneler elektron iletimini kolaylaştırmak ve yükleme etkilerini azaltmak için bir püskürtme kaplayıcı (Cressington 108 Auto) kullanılarak ince bir altın tabakasıyla kaplandı. Daha sonra, numuneler optimum görüntü kalitesini sağlamak için yüksek vakum koşulları altında gözlendi. Bu mikro yapısal analiz, epoksi matris içindeki Cu parçacıklarının dağılımı ve kompozitlerin kırılma davranışı üzerindeki etkileri hakkında daha derin bir anlayış sağladı.

4.2.4. Elektriksel iletkenlik testi

Alternatif akım (AC) iletkenlik ölçümleri, Solartron SI 1260 Empedans/Kazanç Faz Analizörü ve Solartron Dielektrik Arayüzü 1296 cihazlarından oluşan bir empedans spektroskopisi analizörü kullanılarak numuneler üzerinde gerçekleştirildi. Ölçümler, 107–100 Hz frekans aralığında 100 mV'da gerçekleştirildi. Her konsantrasyon için on numune ölçüldü. Elektrotlar numunelerin yüzeyleriyle doğrudan temas halindeydi ve tüm ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

4.2.5. Yoğunluk ve sertlik ölçümleri

Saf epoksi ve epoksi/Cu kompozitlerinin yoğunluğu, ISO 1183 standartlarına uygun olarak sıvı piknometre yöntemi kullanılarak ölçüldü. ASTM D2240 standardına uygun olarak Shore D ölçeği ve Zwick Roel cihazı kullanılarak bir sertlik testi gerçekleştirildi. Tüm numuneler için beş yoğunluk ölçümü alındı ve sertlik ölçümü on kez tekrarlandı. Tüm numuneler için on darbe ölçümü alındı ve çekme ve eğilme testleri beş kez tekrarlandı.

4.2.6. Radyasyon zırhlama testleri

İnsanlar sürekli olarak iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadır. Yüksek iyonlaştırıcı radyasyon seviyeleri için istenmeyen maruziyeti en aza indirmek için zırhlama gereklidir. Bu çalışmada, bakır tozu içeren seçilmiş epoksi bazlı kompozitlerin zırhlama özellikleri, üç radyoaktif kaynak kullanılarak gama radyasyonu için değerlendirilmiştir; (i) 59,5 keV

karakteristik enerjiye ve 74 kBq aktiviteye sahip Americium-241 kaynağı ve (ii) 661,6 keV karakteristik enerjiye ve 333 kBq aktiviteye sahip bir Sezyum-137 kaynağı ve (iii) 1173,2 keV ve 1332,5 keV karakteristik enerjilere ve 74 kBq aktiviteye sahip bir Kobalt-60 kaynağı. Numunelerden geçen gama ışınlarını tespit etmek için 3×3 inçlik bir NaI (TI) dedektörü, kullanılmıştır. Sintilasyon tabanlı NaI (TI) dedektörleri, gama ışınları için yüksek algılama verimlilikleri nedeniyle tıbbi ve endüstriyel alanlar da dahil olmak üzere radyasyon spektroskopisi ve radyoizotop tabanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. NaI (TI), kristaldeki talyumun aktive edilmesiyle üretilir. Kaynak-dedektör sistemi arka plan radyasyonunun etkilerini en aza indirmek için kurşunla kaplanmıştır. Kaynak-dedektör mesafesi 35 cm'de tutuldu ve kompozit soğurucu, gama ışını kaynağı ile NaI (TI) dedektörü arasına yerleştirildi. Her numune, incelenen radyoizotoplardan yayılan gama ışınlarıyla 60 dakika ışılandı ve her biri için sabit deneysel geometride spektrumlar kaydedildi. Toplam soğurucu kalınlığı 0 ila 20 mm arasında 4 mm'lik artışlarla değiştirildi. MAESTRO-32 çok kanallı analizör emülasyon yazılımı (Ortec, South Illinois Ave., ABD), kaynağın önünde soğurucu kompozit malzeme ile ve olmadan deneysel spektrumları analiz etmek için kullanıldı.

Ekranlama/zayıflama için en önemli parametrelerden biri olan lineer zayıflama katsayıları, incelenen kompozitler arasında farklı enerji seviyelerinde iyonlaştırıcı radyasyonu zırlamak için en etkili malzemeyi belirlemek amacıyla araştırıldı. Lineer zayıflama katsayısı, radyasyonun bir malzemeyle birim yol uzunluğu başına etkileşim olasılığı olarak tanımlanır. Lineer zayıflama katsayısı, Beer Lambert yasasına göre, spektrumlardaki fotopik altındaki sayımların doğal logaritmasının kompozit numunenin kalınlığına göre çizilmesiyle hesaplandı.



5. NAB5O8 / BASO4 / ABS KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Çalışmada, polimer matris olarak ABS, dolgu maddesi olarak ise barit (BaSO_4) ve sodyum pentaborat (NaB_5O_8) kullanılmıştır. Ekstrüder makinası kullanılarak karışım hazırlama ve ön şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Polimer kompozitin nihai şekillendirmesinde ise enjeksiyon makinası kullanılmıştır. Elde edilen kompozitlerin FTIR, DSC, TGA, SEM, parlaklık (gloss), su absorpsiyon, sertlik, yoğunluk ve mekanik testler dahil olmak üzere çeşitli testler yoluyla özellikleri incelenmiştir. Ayrıca 59,5 keV, 661,6 keV ve 1332,5 keV enerjili gama ışınları için zırlama özellikleri değerlendirilmiştir.

5.1. Malzemeler ve Yöntemler

Çalışmada, farklı oranlarda barit (BaSO_4) ve sodyum pentaborat (NaB_5O_8) katkıları ABS polimere ilave edilmiş ve belli ölçülere sahip kalıplarda kalıplanmıştır. Çalışmada kullanılan ABS polimeri “Korea Kumho Petrochemical Co. Ltd.” firmasının “Kumho ABS 750” adlı ürünüdür. Dolgu maddeleri olarak kullanılan barit (BaSO_4) ve sodyum pentaborat (NaB_5O_8) ise “Kale Naturel” firmasından temin edilmiştir. Karışım hazırlama ve ön şekillendirme işleminde ekstrüder makinası kullanılmıştır. Polimer kompozitin nihai şekillendirmesinde ise enjeksiyon makinasından yararlanılmıştır. Kompozit formülasyonu Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerin formülasyonu

Numune Kodu	ABS (wt.%)	NaB_5O_8 (wt.%)	BaSO_4 (wt.%)
ABS	100	-	-
20NaABS	80	20	-
15Na5BaABS	80	15	5
10Na10BaABS	80	10	10
5Na15BaABS	80	5	15
20BaABS	80	-	20

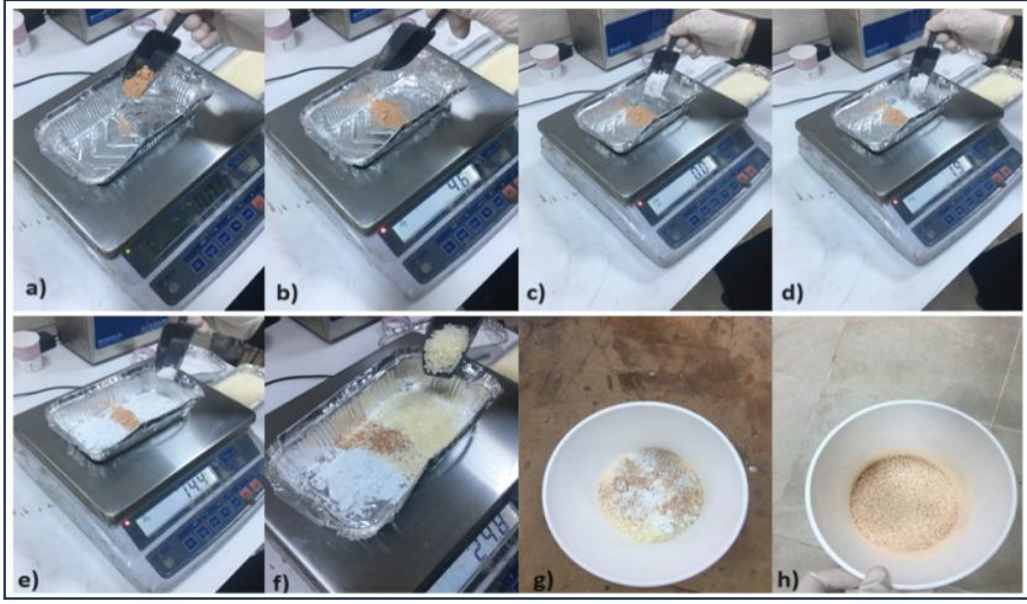
5.1.2. Karışım hazırlama ve ön şekillendirme

Öncelikle, toz halindeki barit ve sodyum pentaborat, 200 mesh numaralı elekten elenmiştir (Şekil 5.1). 200 mesh elek altı barit ve sodyum pentaborat, parçacık boyutu 100 mikron (μm) altındadır (yaklaşık olarak 77 μm). Eleme işlemi yapılan dolgular nemin uzaklaştırılması amacıyla 80°C’de 8 saat fırında kurutulmuştur.



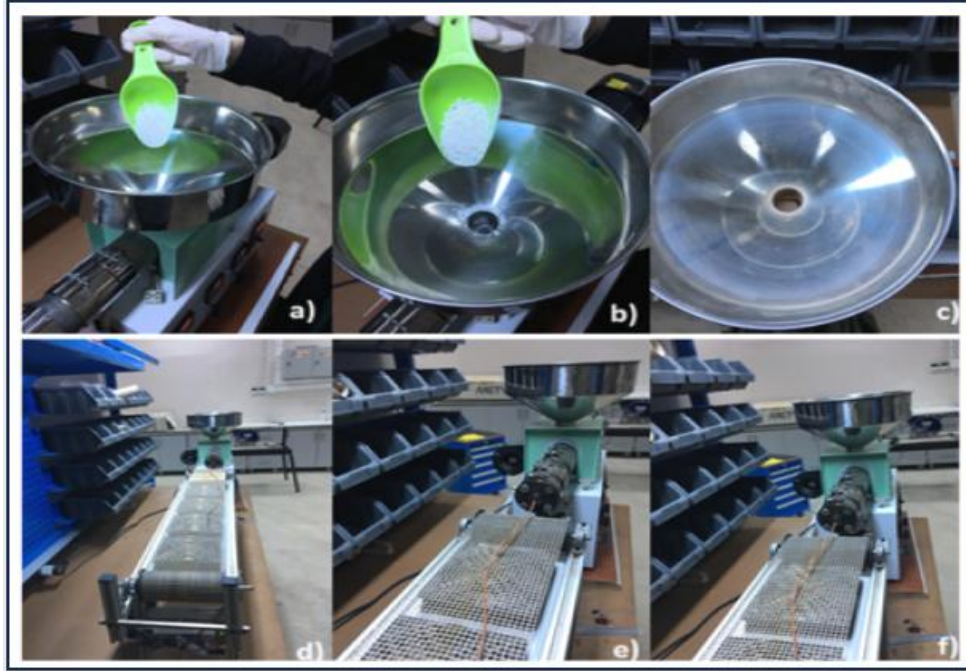
Şekil 5.1. Dolguların elekten geçirilmesi

Daha sonra, belirlenen oranlarda barit (BaSO_4) ve sodyum pentaborat (NaB_5O_8) katkıları ABS polimere ilave edilmiş ve fiziksel olarak katı karıştırma işlemi yapılmıştır. Katı karıştırma işlemi Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Malzemelerin katı karıştırma işlemi

Daha sonra bu katı karışım ekstrüderden geçirilerek vida hareketi, sıcaklık ve basınç altında eritilip makarna şeridi şeklinde lifler elde edilmiştir (Şekil 5.3). Kullanılan ekstrüder laboratuvar boyutunda olup, L/D oranı 16'dır. Sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerinin ekstrüder işleme koşulları katkısız ABS polimere göre belirlenmiştir. Ekstrüderden geçirme işlemi 190-230°C sıcaklıkta ve 1300 rpm (bir dakikadaki devir sayısı) devirde yapılmıştır.



Şekil 5.3. Ekstrüder ile ön şekillendirme işlemi

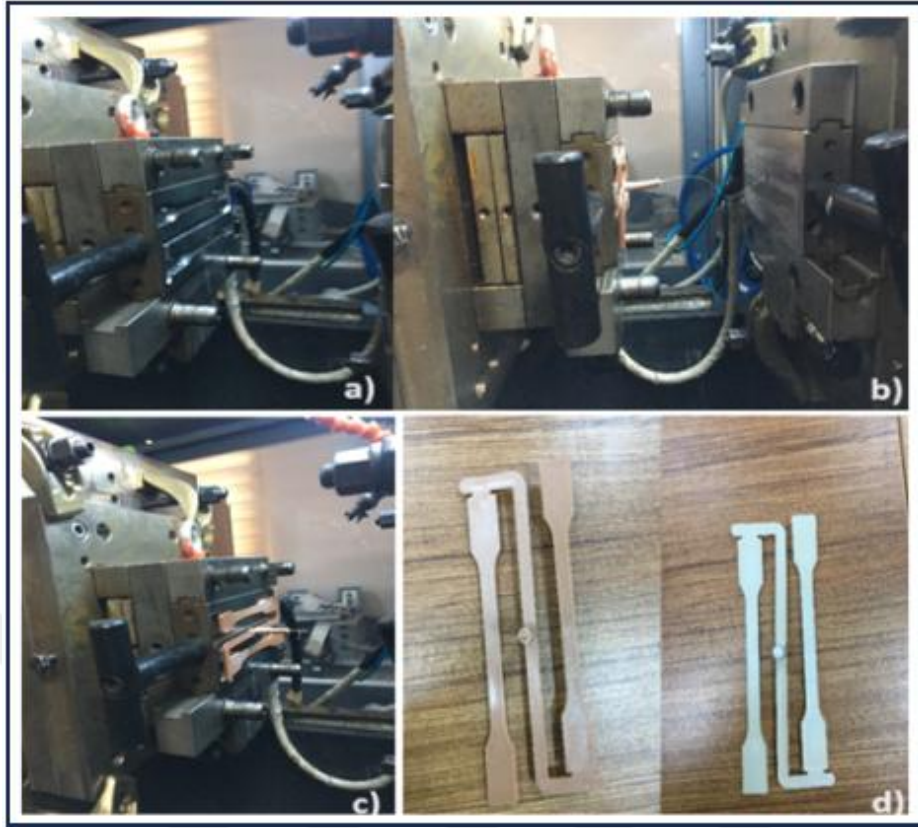
Makarna şeridi şeklinde elde edilen kompozit lifler kırma makinası kullanılarak granül haline getirilmiştir. Kırma makinası ile yapılan işlem Şekil 5.4’te verilmiştir. Ön şekillendirme işlemi tamamlanan kompozitler enjeksiyon makinasına gönderilmiştir.



Şekil 5.4. Liflerin kırma makinası ile granül hale getirilmesi

5.1.3. Polimer kompozitin şekillendirilmesi

Ön şekillendirme işlemi tamamlanan kompozitlerin nihai şekillendirme işlemi enjeksiyon makinası kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5.5). Uygulanacak testlere göre standartlarla belirlenen numune boyutlarında kalıplama işlemi tamamlanmıştır. Sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerinin enjeksiyon işleme koşulları katkısız ABS polimere göre belirlenmiştir. Enjeksiyonla şekillendirme işlemi 200-230°C sıcaklıkta ve 7.15 s(saniye) çevrimde yapılmıştır.



Şekil 5.5. Enjeksiyonla kalıplama işlemi

5.2. Testler ve Analizler

5.2.1. Mekanik inceleme

Malzemelerin çekme ve eğilme özellikleri, 50 kN yük hücresi ile donatılmış bir Zwick Z020 Model test makinesi kullanılarak test edildi. Çekme testi, ASTM D638 standartlarına uygun olarak 5 mm/dk çekme hızı ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Eğilme testi de aynı makine kullanılarak, TS EN ISO 178 standartlarına uygun olarak, 16:1 açıklık-derinlik oranı ve 1,7 mm/dk çapraz kafa hızı ile oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Darbe testi, 2,5 J sarkaç çekicine sahip ASTM D256 uyumlu bir sarkaç evrensel darbe test cihazı kullanılarak bir Izod darbe testi gerçekleştirildi.

5.2.2. FTIR, DSC ve TGA analizleri

FT-IR testleri ASTM D6348 standardına uygun olarak Perkin Elmer Spectrum 100 FT-IR model cihaz kullanılarak gerçekleştirildi. Kompozitlerin kimyasal yapılarını analiz etmek için Fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi kullanıldı. Bu analiz, 4000 cm^{-1} ila 400 cm^{-1} dalga sayısı aralığındaki fonksiyonel gruplara karşılık gelen tepe noktalarını belirlemeyi

içeriyordu. Isıl özellikler, ASTM D3417 standardına uygun olarak diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC, Seiko DSC 7020 Model) kullanılarak araştırıldı. Isıtma hızı 20°C/dk olarak ayarlandı ve elde edilen malzemelerin ısı geçişlerini gözlemlemek için ölçümler bir azot atmosferi altında gerçekleştirildi. Termogravimetrik analiz (TGA), bir azot akışı altında bir Seiko Exstar TG/DTA 6300 kullanılarak gerçekleştirildi. Kompozit numuneler 10°C/dk ısıtma hızıyla 600°C sıcaklığa kadar ısıtıldı.

5.2.3. Mikro yapı karakterizasyonu

Polimer matris içindeki dolgu parçacıklarının dağılımını ve kırılma yüzeyinin morfolojisini incelemek için mikro yapı karakterizasyonunda bir taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI 450) kullanıldı. İncelemeden önce, numuneler elektron iletimini kolaylaştırmak ve yükleme etkilerini azaltmak için bir püskürtme kaplayıcı (Cressington 108 Auto) kullanılarak ince bir altın tabakasıyla kaplandı. Daha sonra, numuneler optimum görüntü kalitesini sağlamak için yüksek vakum koşulları altında gözlendi. Bu mikro yapısal analiz, polimer matris içindeki dolgu parçacıklarının dağılımı ve kompozitlerin kırılma davranışı üzerindeki etkileri hakkında daha derin bir anlayış sağladı.

5.2.4. Parlaklık (gloss) testi

Sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerin parlaklık tayini testlerinde, ASTM D 523 standardına uygun sonuçlar veren, 60° projeksiyon açısına sahip Elcometer marka mikro parlaklık ölçer kullanılmıştır. Uygulanan standart test yöntemine göre, parlaklık değerleri; parlak yüzeylerde en az 80, yarı mat yüzeylerde en az 70, mat yüzeylerde en çok 10 olmalıdır.

5.2.5. Su absorpsiyon testi

Sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerin su absorpsiyonu için standart test olarak ASTM D570 yöntemi kullanılmıştır. Su emilimi, belirtilen koşullar altında emilen su miktarını belirlemek için kullanılır. Veriler, malzemelerin su veya nemli ortamlardaki performansına ışık tutar.

5.2.6. Yoğunluk ve sertlik (Shore D) ölçümleri

Sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerinin yoğunluğu, ISO 1183 standartlarına uygun olarak sıvı piknometre yöntemi kullanılarak ölçüldü. ASTM D2240 standardına uygun olarak Shore D ölçeği ve Zwick Roel cihazı kullanılarak bir sertlik testi gerçekleştirildi. Tüm numuneler için beş yoğunluk ölçümü alındı ve sertlik ölçümü on kez tekrarlandı.

5.2.7. Radyasyon zırlama testleri

Bu çalışmada, sodyum pentaborat ve barit tozu içeren ABS bazlı kompozitlerin zırlama özellikleri, üç radyoaktif kaynak kullanılarak gama radyasyonu için değerlendirilmiştir; (i) 59,5 keV karakteristik enerjiye ve 74 kBq aktiviteye sahip Americium-241 kaynağı ve (ii) 661,6 keV karakteristik enerjiye ve 333 kBq aktiviteye sahip bir Sezyum-137 kaynağı ve (iii) 1173,2 keV ve 1332,5 keV karakteristik enerjilere ve 74 kBq aktiviteye sahip bir Kobalt-60 kaynağı. Numunelerden geçen gama ışınlarını tespit etmek için 3×3 inçlik bir NaI (TI) dedektörü kullanıldı. Sintilasyon tabanlı NaI (TI) dedektörleri, gama ışınları için yüksek algılama verimlilikleri nedeniyle tıbbi ve endüstriyel alanlar da dahil olmak üzere radyasyon spektroskopisi ve radyoizotop tabanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. NaI (TI), kristaldeki talyumun aktive edilmesiyle üretilir. Kaynak-dedektör sistemi arka plan radyasyonunun etkilerini en aza indirmek için kurşunla kaplanmıştır. Kaynak-dedektör mesafesi 35 cm'de tutuldu ve kompozit soğurucu, gama ışını kaynağı ile NaI (TI) dedektörü arasına yerleştirildi. Her numune, incelenen radyoizotoplardan yayılan gama ışınlarıyla 60 dakika ışınladı ve her biri için sabit deneysel geometride spektrumlar kaydedildi. Toplam soğurucu kalınlığı 0 ila 20 mm arasında 4 mm'lik artışlarla değiştirildi. MAESTRO-32 çok kanallı analizör emülasyon yazılımı (Ortec, South Illinois Ave., ABD), kaynağın önünde soğurucu kompozit malzeme ile ve olmadan deneysel spektrumları analiz etmek için kullanıldı. Ekranlama/azaltma için en önemli parametrelerden biri olan lineer azaltma katsayıları, incelenen kompozitler arasında farklı enerji seviyelerinde iyonlaştırıcı radyasyonu zırlamak için en etkili malzemeyi belirlemek amacıyla araştırıldı. Lineer azaltma katsayısı, radyasyonun bir malzemeyle birim yol uzunluğu başına etkileşim olasılığı olarak tanımlanır. Lineer azaltma katsayısı, Beer Lambert yasasına göre, spektrumlardaki fotopik altındaki sayımların doğal logaritmasının kompozit numunenin kalınlığına göre çizilmesiyle hesaplandı.

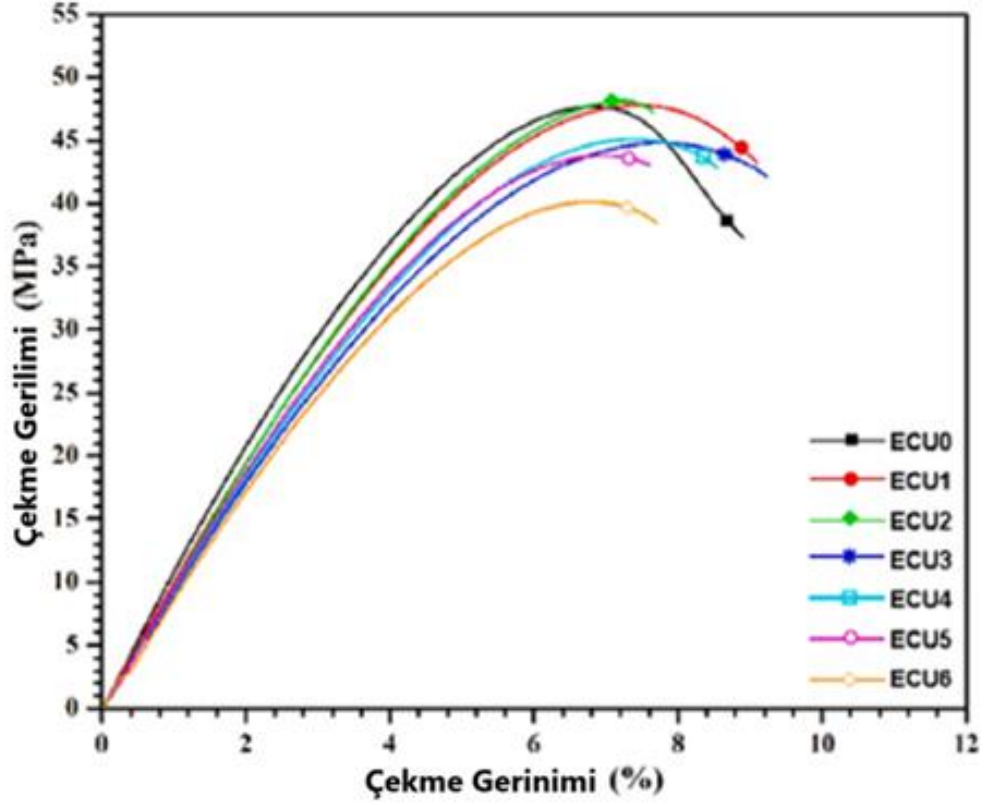


6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Cu/Epoksi Kompozitler Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

6.1.1. Çekme test sonuçları

Çekme test sonuçlarının sayısal değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir, Şekil 6.1 ise çekme testlerinin grafiğini göstermektedir. Çekme testi sonuçlarına göre, saf epoksiden oluşan ECU0 kodlu numune en yüksek çekme dayanımını göstermiştir. Saf epoksi, bakır katkılı epoksi kompozit numunelerle karşılaştırıldığında üstün dayanım göstermiştir. Ancak, bakır katkılı epoksi numuneleri arasındaki farklar, saf epoksi ile karşılaştırıldığında daha az değişkenlik göstermiştir. Bu sonuçlar, bakır tozu eklemenin epoksinin çekme özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bakır konsantrasyonunun tek başına çekme dayanımını bağımsız olarak etkilemediğini belirtmekte fayda vardır [139]. Yapının içindeki bakır parçacıklarının dağılımı, epoksi matrisi ile bakır parçacıkları arasındaki arayüz etkileşimleri ve bakır parçacıklarının boyutu ve geometrisi gibi çeşitli faktörler bu durumu etkiler [139, 144]. Partikül dolgulu kompozitleri etkileyen önemli bir faktör, parçacık boyutuna büyük ölçüde bağlı olan ayrılma stresidir [141, 145]. Parçacıklar mevcut olduğunda, yerel olarak stres dağılımını değiştirirler ve kavitasyon kaynaklı deformasyon modlarını belirli bir dereceye kadar önlerler [146]. Bunun yerine, bu, parçacıkları çevreleyen matrisin yerel kayma akmasını tetikleyebilir [147]. Yapıda farklı boyutlarda bakır parçacıkları kullanmak veya parçacıkların arayüz özelliklerini iyileştirmek, çekme özelliklerini olumlu yönde etkileyebilir [140, 141].



Şekil 6.1. Epoksi-Cu kompozitlerin Çekme gerilim/gerinim grafiği

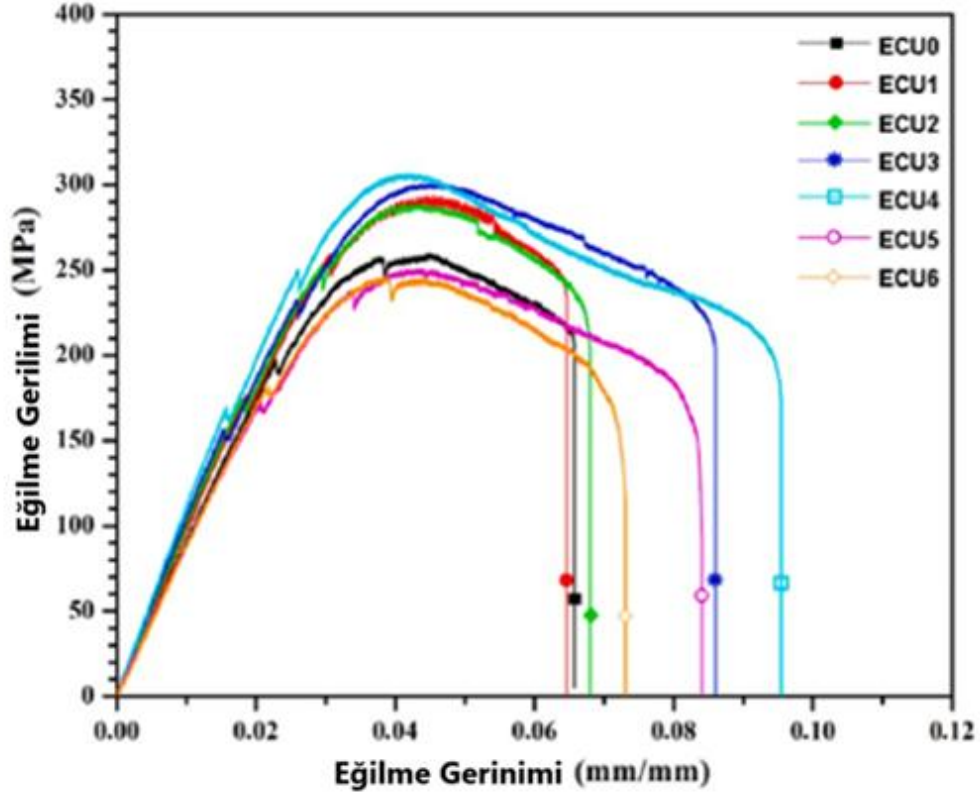
Tablo 6.1. Cu/epoksi kompozitleri üzerinde yapılan çekme testlerinin deneysel sonuçları.

Numune Kodu	Çekme Özellikleri		
	Elastik Modül (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
ECU0	963,1 ± 23,4	48,8 ± 0,8	9,7 ± 0,7
ECU1	844,6 ± 35,5	42,9 ± 2,3	8,9 ± 0,4
ECU2	842,1 ± 69,7	43,3 ± 2,9	8,1 ± 0,2
ECU3	840,1 ± 39,3	41,7 ± 1,8	8,9 ± 0,4
ECU4	849,2 ± 22,4	41,2 ± 1,7	8,1 ± 0,2
ECU5	871,7 ± 89,1	43,1 ± 2,1	7,4 ± 0,3
ECU6	890,2 ± 33,3	42,6 ± 1,3	7,9 ± 0,4

6.1.2. Üç nokta eğme test sonuçları

Eğme test sonuçlarının sayısal değerleri Tablo 7.2'de verilmiştir, Şekil 6.2 ise eğilme testlerinin grafiğini göstermektedir. Tablo 6.2'deki verilere göre, değişen bakır parçacık

konsantrasyonlarına sahip numuneler arasında eğilme dayanımı değerlerinde önemli bir fark vardır. ECU4 numunesi 298,7 MPa ile en yüksek eğilme dayanımı değerini gösterirken, bunu 293,1 MPa ile ECU3 numunesi ve 281,3 MPa ile ECU1 numunesi takip etmektedir. Diğer numunelerin (ECU0, ECU2, ECU5 ve ECU6) eğilme dayanımı değerleri 240 ile 253 MPa arasında değişerek yakından kümelenmiştir. Cu parçacıklarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi numuneler arasında değişmektedir. ECU2 numunesinde de eğilme dayanımında bir artış beklenmektedir. Ancak elde edilen düşük değerlerin test koşulları, parçacık dağılımı, yapı içindeki yönelim ve arayüz özelliklerinden etkilendiği düşünülmektedir [140]. Özellikle, %4 Cu parçacık konsantrasyonuna sahip numune (ECU4) en yüksek eğilme mukavemetini göstermektedir. Benzer çalışmalar, Cu parçacık konsantrasyonundaki bir artışın belirli bir seviyeye kadar artan eğilme mukavemetine yol açtığını, ancak bu artışın daha yüksek konsantrasyonlarda sınırlı hale geldiğini göstermiştir [148, 150]. Bu bağlamda, %100 epoksi içeren kompozitin (ECU0) en yüksek çekme mukavemetini ve eğilme mukavemetini sergilediği, %4 Cu parçacıklarına sahip kompozitin (ECU4) ise en yüksek eğilme mukavemetini sergilediği görülmektedir. Matrise güçlü bağlanan Cu parçacıkları daha yüksek eğilme modülüne katkıda bulunurken, zayıf bağlananlar çatlak başlangıcını tetikleyen içsel kusurların yerleri olarak hizmet edebilir [140, 146]. Bu sonuçlar, epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için optimum Cu parçacık konsantrasyonunu öneren önceki çalışmalarla uyumludur [139, 142-144, 150].



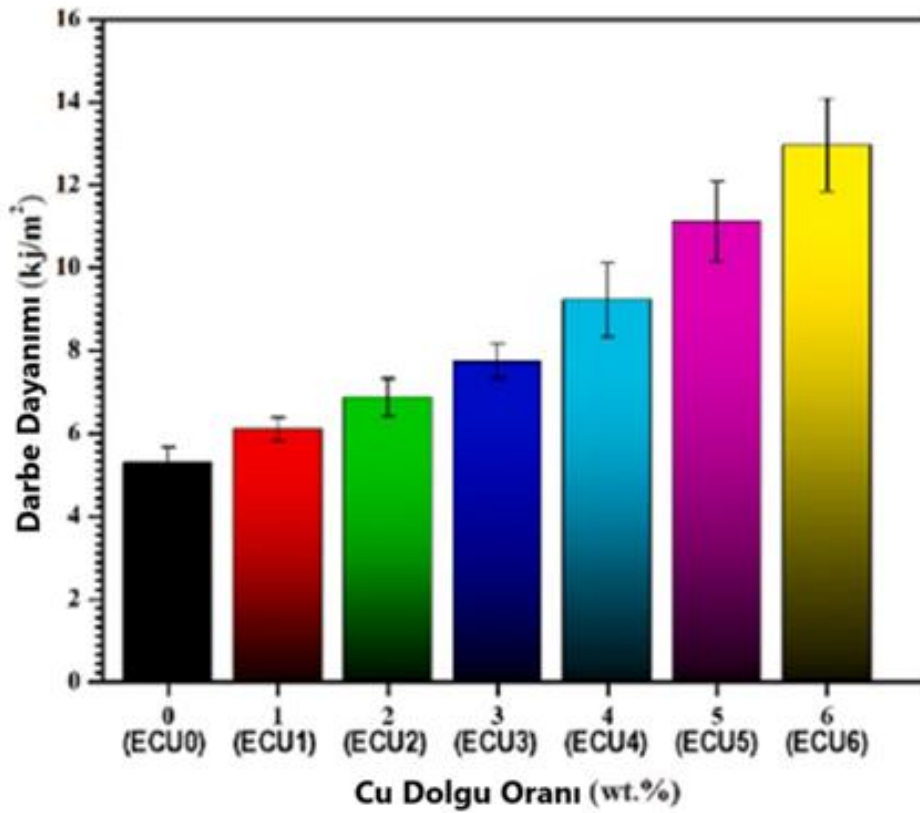
Şekil 6.2. Epoksi-Cu kompozitlerin Eğilme gerilim/gerinim grafiği

Tablo 6.2. Cu/epoksi kompozitleri üzerinde yapılan eğilme testlerinin deneysel sonuçları.

Numune Kodu	Eğme Özellikleri		
	Elastik Modül (GPa)	Eğme Dayanımı (MPa)	Gerinim (mm)
ECU0	2,47 ± 0,06	252,8 ± 8,42	0,065 ± 0,011
ECU1	2,66 ± 0,80	281,3 ± 11,3	0,061 ± 0,005
ECU2	2,78 ± 0,13	275,3 ± 12,4	0,067 ± 0,012
ECU3	2,86 ± 0,17	293,1 ± 10,2	0,078 ± 0,005
ECU4	3,03 ± 0,16	298,7 ± 12,7	0,087 ± 0,013
ECU5	2,37 ± 0,18	245,1 ± 14,9	0,073 ± 0,010
ECU6	2,32 ± 0,21	241,6 ± 13,3	0,066 ± 0,009

6.1.3. Darbe test sonuçları

Şekil 6.3 Izod darbe testlerinin grafiğini göstermektedir. Bakır parçacık içeriğindeki artışla birlikte, Izod darbe dayanımında önemli bir artış gözlemlenmiştir. Bu iyileştirme, darbe kuvvetinin emilimini artıran epoksi matris içindeki bakır parçacıklarının homojen dağılımına bağlanabilir [139]. Benzer şekilde, bakır parçacık içeriğindeki artış, mekanik testlerde kompozitlerin eğilme dayanımı özelliklerinde gelişmelere yol açmıştır. Bu nedenle, epoksi kompozitlere bakır parçacıkları dahil etmenin hem darbe hem de eğilme özelliklerini iyileştirmede etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

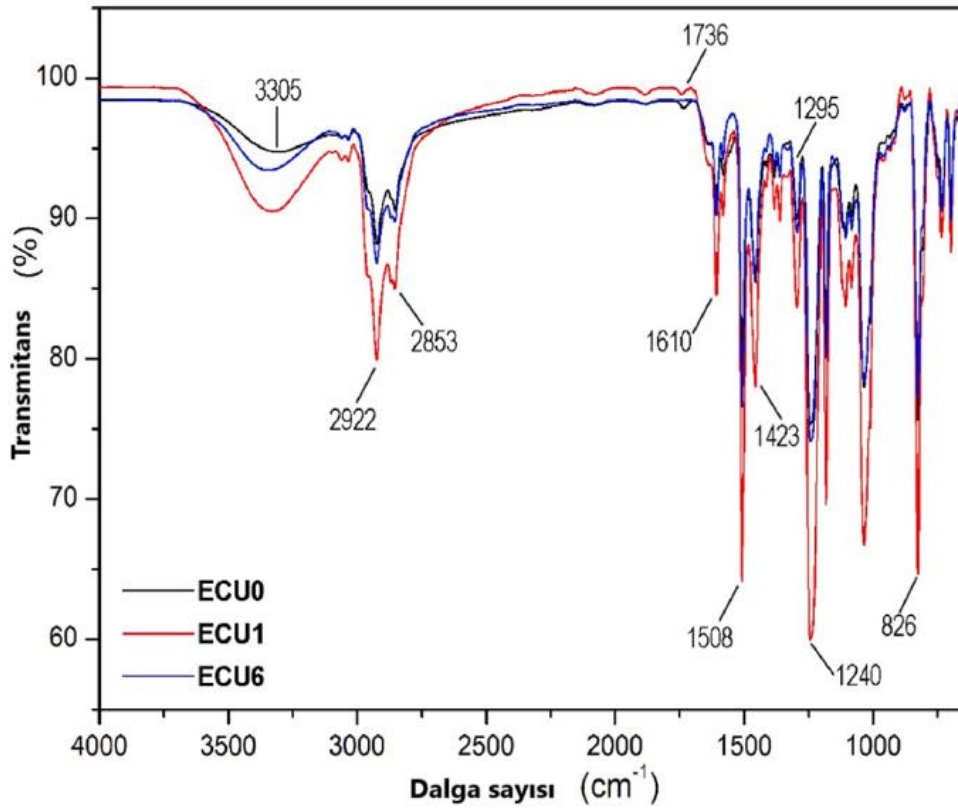


Şekil 6.3. Epoksi-Cu kompozitlerin Darbe dayanımı.

6.1.4. FTIR analiz sonuçları

Şekil 6.4'te gösterildiği gibi hem epoksi malzemenin hem de Cu parçacıkları içeren epoksi kompozitlerin kızılötesi spektrumu benzer özellikler sergilemiştir. Spektrum özellikle iki belirgin emilim zirvesi göstermiştir: biri 3305 cm^{-1} 'de, hidroksil (OH) gruplarının gerilme titreşimlerine atfedilmiştir ve diğeri 2922 cm^{-1} 'de, sp^3 karbon-hidrojen (C-H) bağlarının varlığını göstermektedir [151]. Bu emilim zirveleri, epoksi ve kompozitlerinin kimyasal bileşimi ve moleküler yapısının önemli göstergeleridir. 3305 cm^{-1} 'deki zirve hidroksil gruplarının varlığını doğrularken, 2922 cm^{-1} 'deki zirve sp^3 C-H bağlarının varlığını

doğrulamaktadır; bunların ikisi de epoksi malzemelerin FTIR spektrumlarında yaygın olarak gözlemlenen temel özelliklerdir. Ayrıca, 2853 cm^{-1} dalga sayılarında, epoksi reçinesinin moleküler bir bileşenini temsil eden alifatik C-H bağlarının varlığı gözlemlendi. Karbonil gruplarının emilim pikleri 1736 cm^{-1} dalga sayısında gözlenir. C-O (karbonil) gruplarının gerilme titreşim bölgesi 1610 cm^{-1} ile 1736 cm^{-1} arasında, C-O (karbon-oksijen) gruplarının titreşim bölgesi ise epoksi ve epoksi kompozitlerin FTIR spektrumunda 826 cm^{-1} ile 1295 cm^{-1} arasında gözlenir. Epoksi halkanın açılmasıyla oluşan bir oksijen atomunun (epoksi halkasında) birincil aminler, fenoller ve tiyofenoller gibi aktif hidrojen içeren gruplarla reaksiyonu nedeniyle 900 cm^{-1} ile 1240 cm^{-1} arasında bir etki gözlenir. İçerisinde dağılmış alınan dendritik Cu parçacıkları bulunan epoksinin FTIR spektrumu yeni bağ oluşumuna dair bir kanıt göstermedi. Epoksi reçinesi ile Cu parçacıkları arasında kimyasal bağ oluşmamıştır. Epoksi ile yürütülen benzer çalışmalar da epoksi ile metal parçacıkları arasında bağ oluşumu olmadığını bildirmiştir [152].

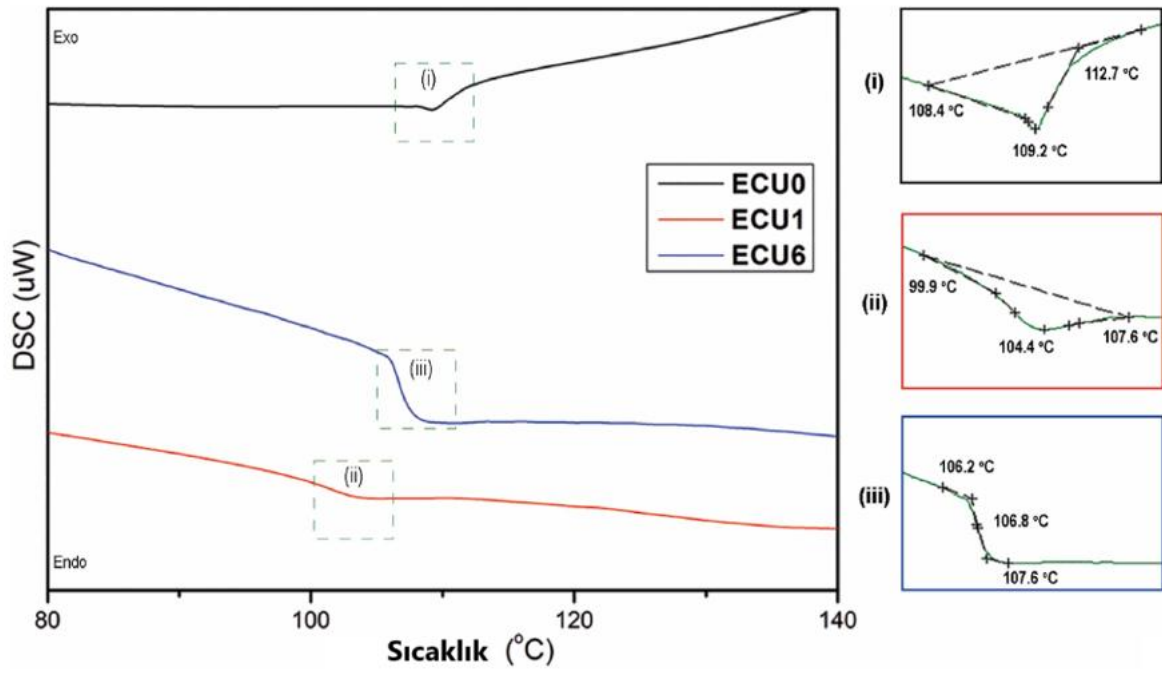


Şekil 6.4. Epoksi ve epoksi-Cu kompozitlerin $650\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki FTIR spektrumlarındaki önemli pikler.

6.1.5. DSC analiz sonuçları

İkili sistem, epoksi (ECU0) ve Cu katkılı epoksi kompozitler (ECU1 ve ECU6) için elde edilen DSC grafikleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Katı ve cam benzeri sert yapı arasındaki geçiş noktasını gösteren cam geçiş sıcaklığı (Tg), saf epoksida (ECU0) 109,2°C olarak belirlenmiştir. Bu değer, kullanılan epoksi reçine sisteminin uzun vadeli termal kararlılık gerektiren uygulamalarda kolayca uygulanabileceğini göstermektedir. Yüksek Tg'li epoksi sistemleri, mukavemetleri ve dayanıklılıklarıyla bilinir [153, 154], bu da hem saf epoksiyi hem de Cu katkılı epoksi kompozitleri mekanik stres altındaki endüstriyel uygulamalar için uygun hale getirir. Literatürle karşılaştırıldığında elde edilen Tg değerlerinin DGEBA (bisfenol-A'nın diglisidil eteri) epoksi reçinesinin değerlerine benzer olduğu bulunmuştur [155, 156]. Cu ilavesi açısından, Cu ilavesinin epoksi kompozitlerin Tg'sini azalttığı gözlenmiştir.

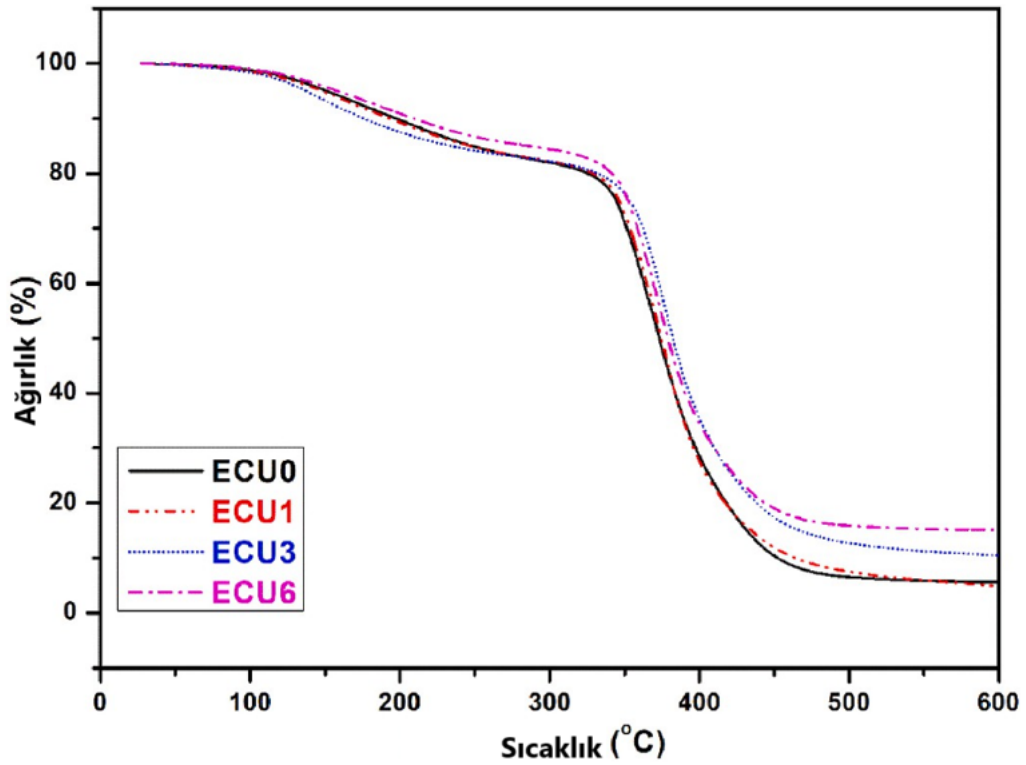
ECU01 ve ECU06 etiketli numuneler için Tg değerleri sırasıyla 104,4°C ve 106,8°C olarak belirlendi. Cu ekleme oranı %1'den %6'ya çıktığında Tg'de bir artış kaydedildi. Cu parçacıklarının eklenmesi, bileşiğin içindeki moleküler zincirlerin hareketini kısıtlayarak Tg'de değişikliklere yol açtı [141, 157]. Karıştırmadan önce yüzey özelliklerini geliştirmek için Cu parçacıklarını önceden kaplamak, matris içindeki uyumluluklarını iyileştirdi ve Tg'yi yükseltti [158-160]. Saf epoksi ECU0, ECU1 ve ECU6 numunelerinin füzyon entalpileri sırasıyla 1,41 J/g, 0,60 J/g ve 0,34 J/g olarak ölçüldü. Aşırı ekzotermik ısılar aşırı ısınma ve yangın tehlikeleri oluşturabilir. Pratik uygulamalarda, ekzotermik ısının değeri epoksi sistemleri için bir güvenlik endeksi görevi görür [161]. Özellikle elektrik ve elektronik endüstrisinde epoksi kompozitlere az miktarda Cu eklenmesi ısı iletimi artırır ve ısıyı çevreye dağıtarak aşırı ısınma ve yangın risklerini azaltır [162-164].



Şekil 6.5. DSC Eğrileri, i) ECU0 kodlu saf epoksi, ii) ECU1 kodlu %1Cu dolgulu epoksi kompozit ve iii) ECU6 kodlu %6 Cu dolgulu epoksi kompozit.

6.1.6. TGA analiz sonuçları

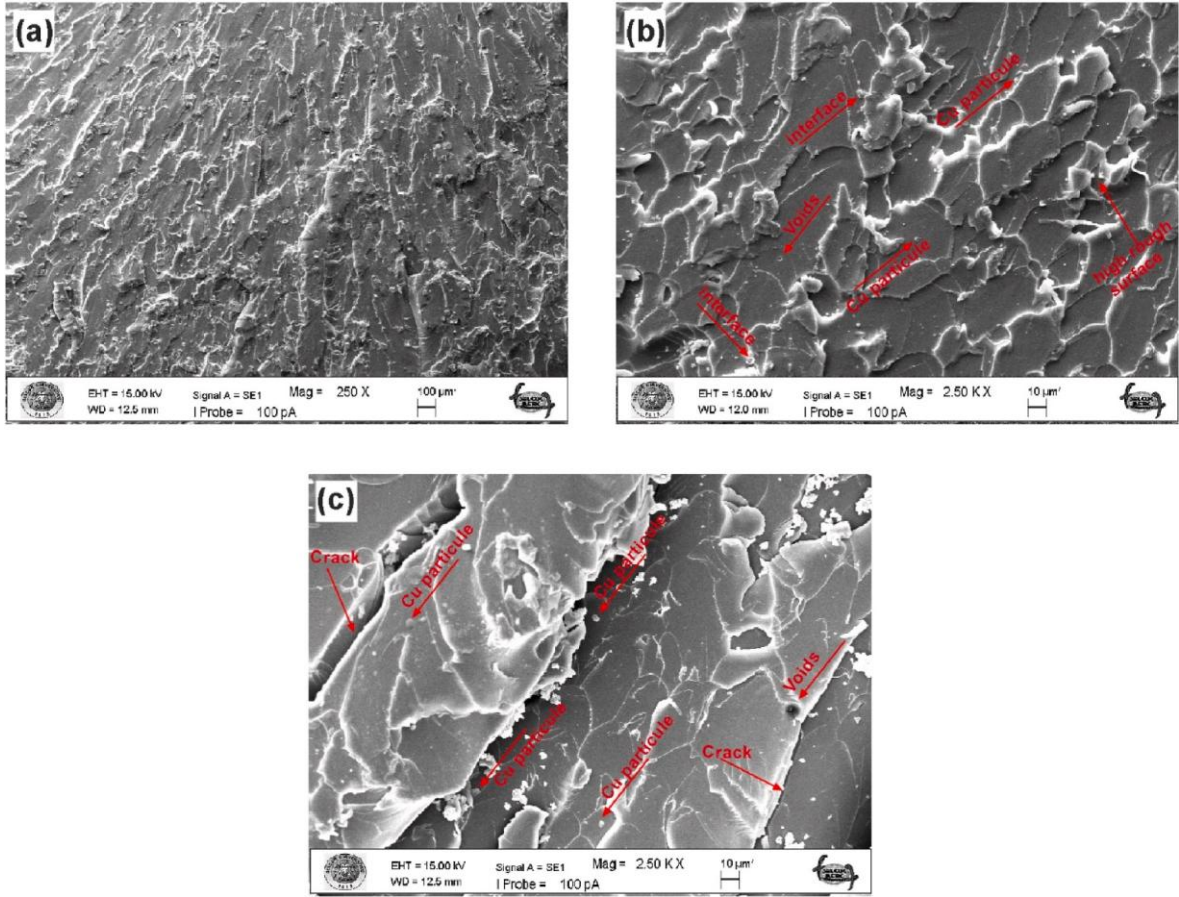
Epoksi ve epoksi-Cu kompozit numunelerin termal kararlılığı Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Tüm numunelerin süreç boyunca iki ana bozunma aşamasından geçtiği açıktır. İlk aşama, kürlenmiş epoksi ağının bozunmasına karşılık gelen 100°C ile 350°C arasında gerçekleşir ve yaklaşık %20'lik bir ağırlık kaybına neden olur. İkinci aşama, kürlenmiş epoksi ağının kalan bileşenlerinin ayrışmasına atfedilen 350°C ile 450°C arasında gerçekleşir ve yaklaşık %70'lik daha önemli bir ağırlık kaybına neden olur [141, 165]. Cu parçacıklarının dahil edilmesi, saf epoksiye kıyasla epoksi reçinesinin ayrışma sıcaklığını artırdı. Şekil 2.30'da gösterildiği gibi, 100°C–450°C sıcaklık aralığında, saf epoksi gruplarının ayrışma oranı %85 ile %95 arasındadır. Epoksi içindeki Cu katkı maddesi muhtemelen polimer zincirlerinin hareketini kısıtlayan bir sabitleme maddesi olarak hareket etmiştir [141].



Şekil 6.6. Sıcaklıkla birlikte ağırlık kaybını gösteren termogravimetrik analiz eğrileri.

6.1.7. Mikro yapı inceleme sonuçları

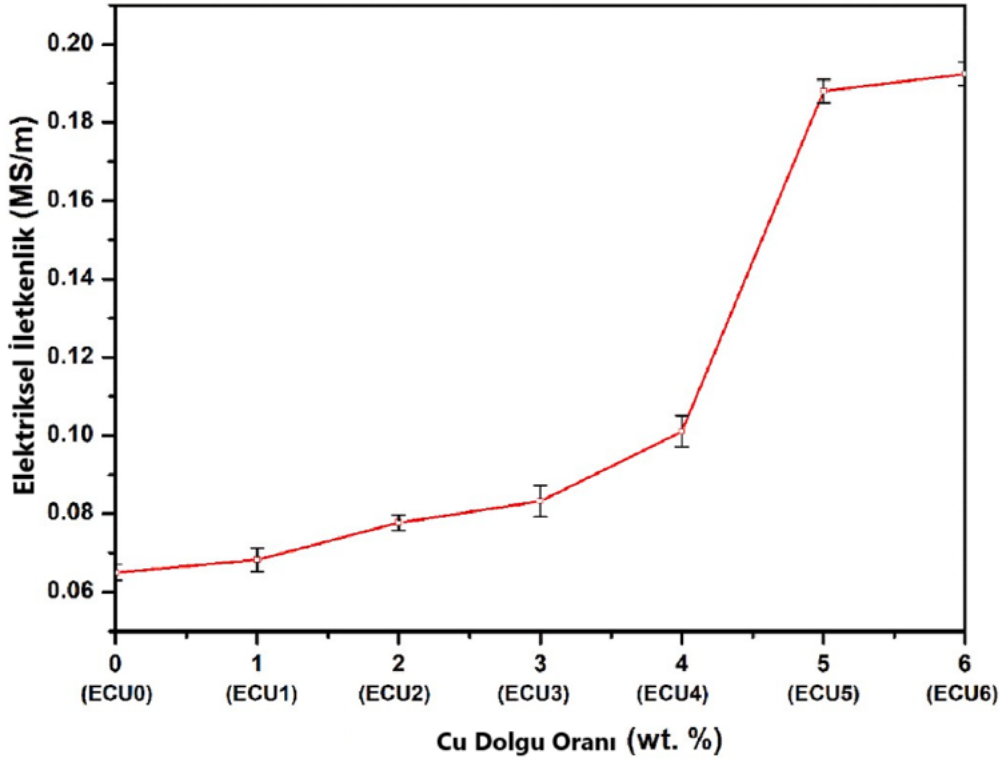
Şekil 6.7a'da gösterildiği gibi saf epoksi numunesinin yüzeyinde, herhangi bir çatlak veya hasar belirtisi olmaksızın nispeten pürüzsüz ve homojen bir yapı gözlemlenir. Cu parçacıkları eklendiğinde, bu parçacıklar epoksi matrisiyle etkileşime girerek iyi bir yapışma ve güçlü bir bağ oluşturur. Şekil 6.7b ve c'de sağlanan SEM görüntüleri ayrıca parçacıklar ve matris arasında iyi kurulmuş bir arayüzün yanı sıra düzgün bir dağılım olduğunu da göstermektedir. Ancak, kompozitin kırılma yüzeyi düzensiz ve pürüzlü görünmektedir. Cu dolgulu epoksi kompozitlerin mikro yapısında, katmanlaşma ve çatlak oluşumları gözlemlenir. Yapı içinde katmanlaşma ve çatlak oluşumunun oluşumu, daha yüksek Cu parçacık içeriğiyle artar. Cu dolgulu epoksi kompozitler içindeki katmanlaşma eğiliminin, çekme testi sırasında çatlak oluşumuna yol açtığı ve malzemenin çekme özelliklerini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Çekme testinden elde edilen sonuçlar SEM görüntülerinden elde edilen gözlemleri doğrulamaktadır. Epoksi kompozitlere bakır parçacıklarının eklenmesinin kırılmalıklarını artırdığı ve çekme özelliklerini azalttığı tespit edilmiştir [139].



Şekil 6.7. SEM mikrografı (a) ECU0, (b) ECU1, (c) ECU6'yı göstermektedir.

6.1.8. Elektriksel iletkenlik sonuçları

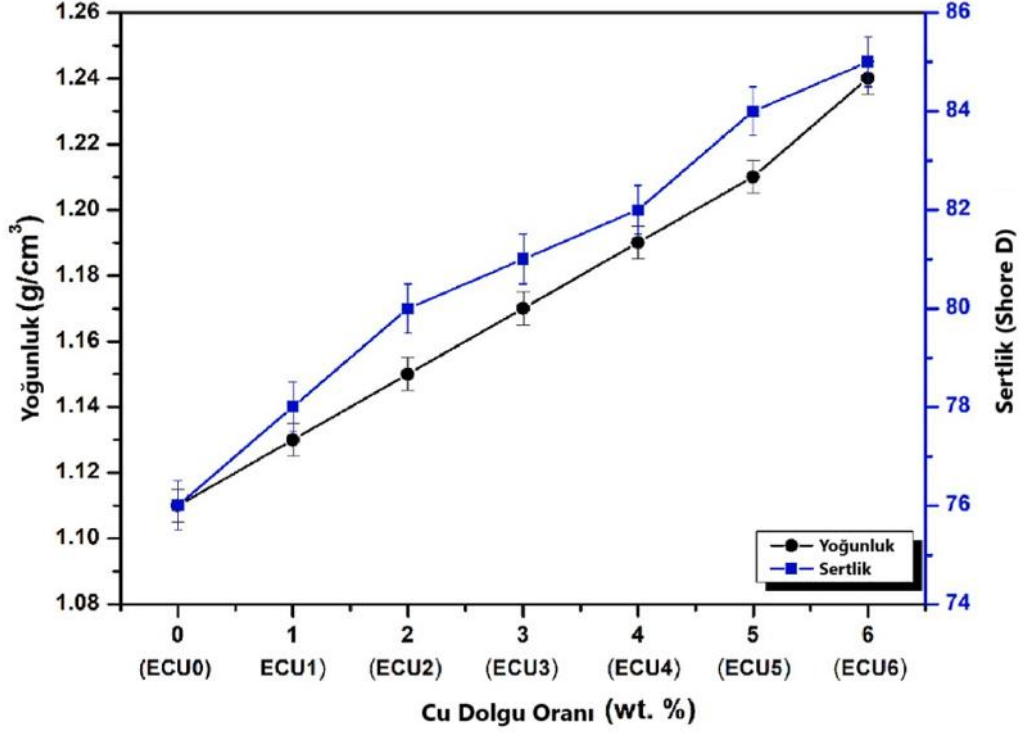
Epoksi ve epoksi-Cu kompozitlerinin elektriksel iletkenliği Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Bakır olağanüstü yüksek elektriksel iletkenlik sergiler. 20°C'de saf bakırın iletkenlik katsayısı yaklaşık 58,1 MS/m (metre başına milyon siemens) veya %100 IACS'dir (Uluslararası Tavlanmış Bakır Standardına göre). Bu, saf bakırın elektrik akımının mükemmel bir iletkeni olduğu, yüksek akım akışı ve düşük direnç sunduğu anlamına gelir. Bunun aksine, epoksinin elektriksel iletkenliği 0,065 MS/m'den çok daha düşüktür. Epoksi içindeki bakır parçacıklarının oranı arttıkça, elektriksel iletkenliği de yükselir. Epoksi içindeki bakır oranı %4'ten %5'e ulaştığında bir sızma eşiği gözlemlenir. Bu sonuçlar, karışıma eklenen bakır parçacıklarının epoksi matris içinde iletken bir yol oluşturduğunu ve elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir [142, 166].



Şekil 6.8. Epoksi ve epoksi-Cu kompozitlerin Cu konsantrasyonlarına bağlı elektriksel iletkenliği.

6.1.9. Yoğunluk ve sertlik ölçüm sonuçları

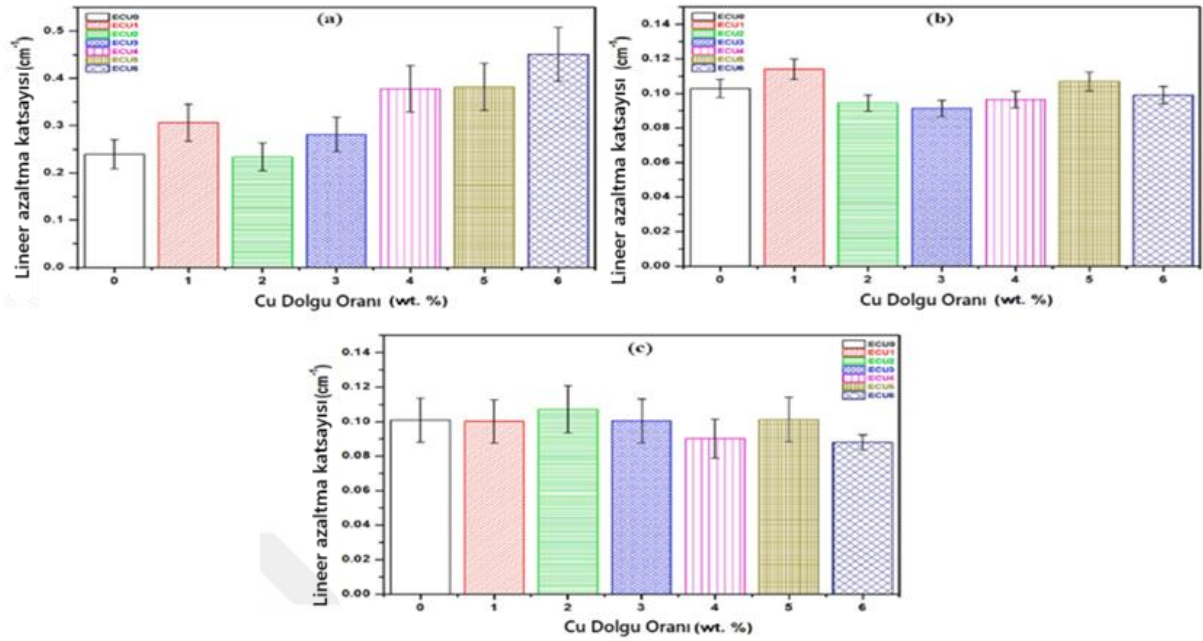
Yoğunluk ve sertlik testlerinin sonuçlarını gösteren grafik Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Bakır, epoksiye kıyasla daha yüksek bir yoğunluğa ($8,96 \text{ g/cm}^3$) ve sertliğe sahiptir. Epoksi içindeki bakır içeriği arttıkça, ortaya çıkan kompozitlerin yoğunluğu da artar. Benzer şekilde, epoksi/Cu kompozitlerinin sertliği, artan bakır içeriğiyle birlikte artar. Bu davranış, bakır parçacıklarının epoksi zincirleri arasında dağılmasıyla açıklanabilir ve bu da cihazın girintisinin epoksi içinde çeşitli küçük boyutlu parçacıklar içeren numunenin yüzeyiyle temas etmesine neden olur. Bakır tozundaki artışla, bakır parçacıkları numune boyunca toplanır ve kümelenir ve girintisinin bu kümelenmiş bakır parçacıklarının yüzeyiyle temas etmesine yol açar [157]. Sonuç olarak, bu sertlik değerlerinde bir artışa neden olur. Bu nedenle epoksi içerisindeki bakır tozu konsantrasyonunun artırılması, elde edilen kompozitlerin sertliğinde de buna bağlı bir artışa yol açmaktadır.



Şekil 6.9. Epoksi ve epoksi-Cu kompozitlerin yoğunluk ve sertliği.

6.1.10. Radyasyon zırlama test sonuçları

Zayıflama, bir ışının maddeden geçerken kademeli olarak enerji kaybetmesi anlamına gelir. Foton ışınlarının zayıflaması düşünüldüğünde, bazı temel kavramlar faydalıdır. Lineer azaltma katsayısı, malzemelerin gama ışınlarına karşı zırlama kabiliyetini tanımlamak için en yaygın kullanılan terim olarak öne çıkmaktadır [167]. Bu önemli parametrenin epoksi ve epoksi/Cu katkılı numuneler için 59,5, 661,6 ve 1332,5 keV enerjilerdeki değerleri Şekil 6.10'da sunulmuştur. Ölçüm sonuçlarına göre, 59,5 keV'de ECU6 numunesi en yüksek lineer zayıflama katsayısını sergiler ve bu da numunenin daha yoğun olduğunu ve ışınların numuneden daha zor geçtiğini gösterir. 661,6 keV'de, ECU1 örneği en yüksek lineer zayıflama katsayısını gösterirken, ECU3 örneği en düşük katsayıya sahiptir. Bu sonuçlar, ışınların farklı enerji seviyelerinde farklı yapılar sahip örneklerle etkileşime girme biçimlerinin çeşitliliğini yansıtabilir. 1332,5 keV'de, ECU2 örneği en yüksek lineer zayıflama katsayısını gösterirken, ECU4 örneği en düşük katsayıyı göstermektedir. Bu durum, ışınların Cu içerik oranı, yapı içindeki Cu parçacıklarının dağılımı ve yüksek atom numaralı Cu varlığı fotoelektrik etkiyi arttırdığından ve daha yoğun bir numune olduğundan numuneye giren foton daha kısa mesafeli ardışık çarpışmalar yaparak enerjilerini kaybederek numune içinde kaldığı için gerçekleşmiş olabilir.

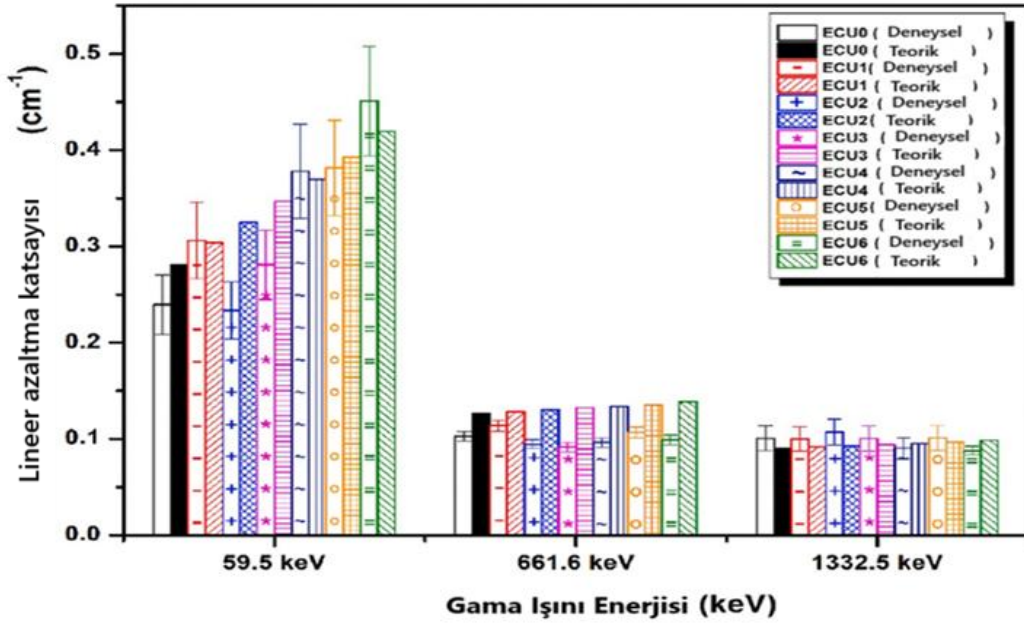


Şekil 6.10. (a) 59,5 keV, (b) 616,6 keV (c) 1332,5 keV enerjili gama ışınları için incelenen kompozitlerin lineer azaltma katsayıları.

Ek olarak, 59,5, 661,6 ve 1332,5 keV enerjileri için teorik lineer azaltma katsayıları, kompozitlerin yoğunluk değerleri ve element bileşimlerine dayalı olarak XCOM yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır [168]. Teorik sonuçlar ile deneysel veriler arasındaki bir karşılaştırma Şekil 6.11'da sunulmuştur. Kompozitlerin deneysel ve teorik lineer azaltma katsayıları arasındaki sapmaların; deneysel kurulum, numune hazırlamadaki kayıplar, ölçümdeki (dedektör özelliği, verimi vb.) belirsizlikler ve kompozitler içindeki elementlerin homojen olmayan dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir.

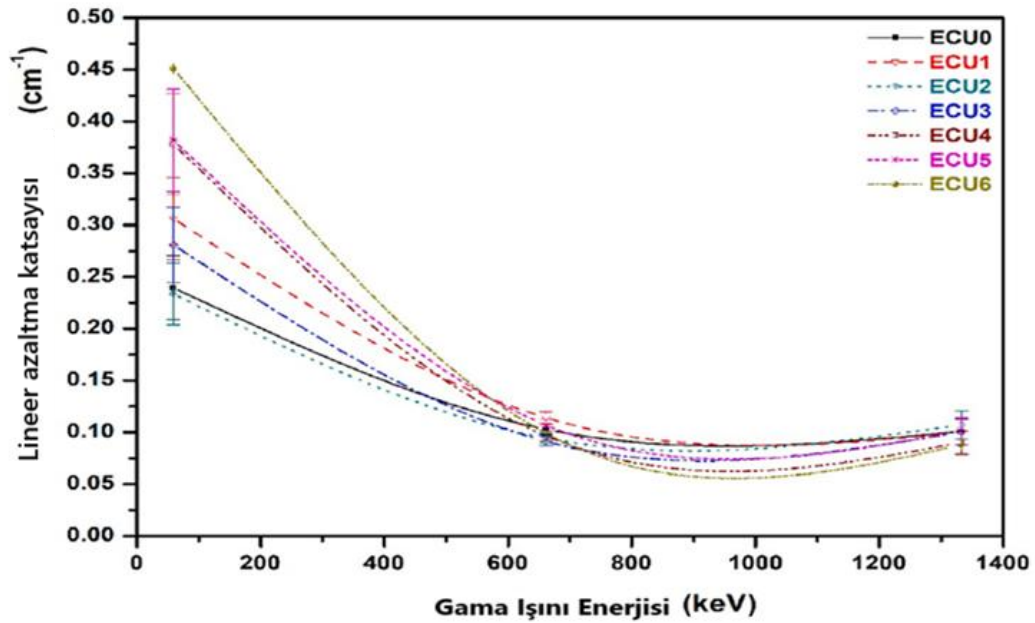
Burada sunulan gama ışını azaltma sonuçları, gama ışını etkileşimi ve zırhlama çalışmalarında sıklıkla kullanılan diğer nicelikleri tanımlamak için kullanılabilir, örneğin ortalama serbest yol, yarı kalınlık ve onda bir kalınlık. Bu nicelikler lineer azaltma katsayısıyla ters orantılıdır, yani daha yüksek lineer azaltma katsayıları daha düşük yarı kalınlık, onda bir kalınlık ve ortalama serbest yol değerleriyle sonuçlanır.

Epoksi ve epoksi/Cu katkılı numunelerin lineer azaltma katsayılarındaki değişimler 59,5 1332,5 keV gama ışını enerji aralığında Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Gözlemlenen bu değişim, literatürde bulunan beklenen sonuçlarla tutarlıdır. Lineer azaltma katsayısı, artan gama ışını enerjisiyle oldukça hızlı bir şekilde azalır ve bu da nüfuz etme yeteneğinde bir artışa yol açar [169, 170].



Şekil 6.11. Epoksi ve epoksi kompozitlerde 59,5, 661,6 ve 1332,5 keV gama enerjileri için teorik ve deneysel lineer azaltma katsayılarının karşılaştırılması.

Sonuç olarak, bu ölçümler çeşitli enerjilere sahip gama ışınları ile düşük Cu katkılı epoksi kompozitler arasındaki etkileşim özelliklerini anlamak için çok önemlidir. Bu anlayış, özellikle nükleer bağlamlarda ve elektronik endüstrisinde zırhlama uygulamaları için önemlidir. Bulgular, alandaki benzer çalışmalar için değerli bir referans görevi görebilir.

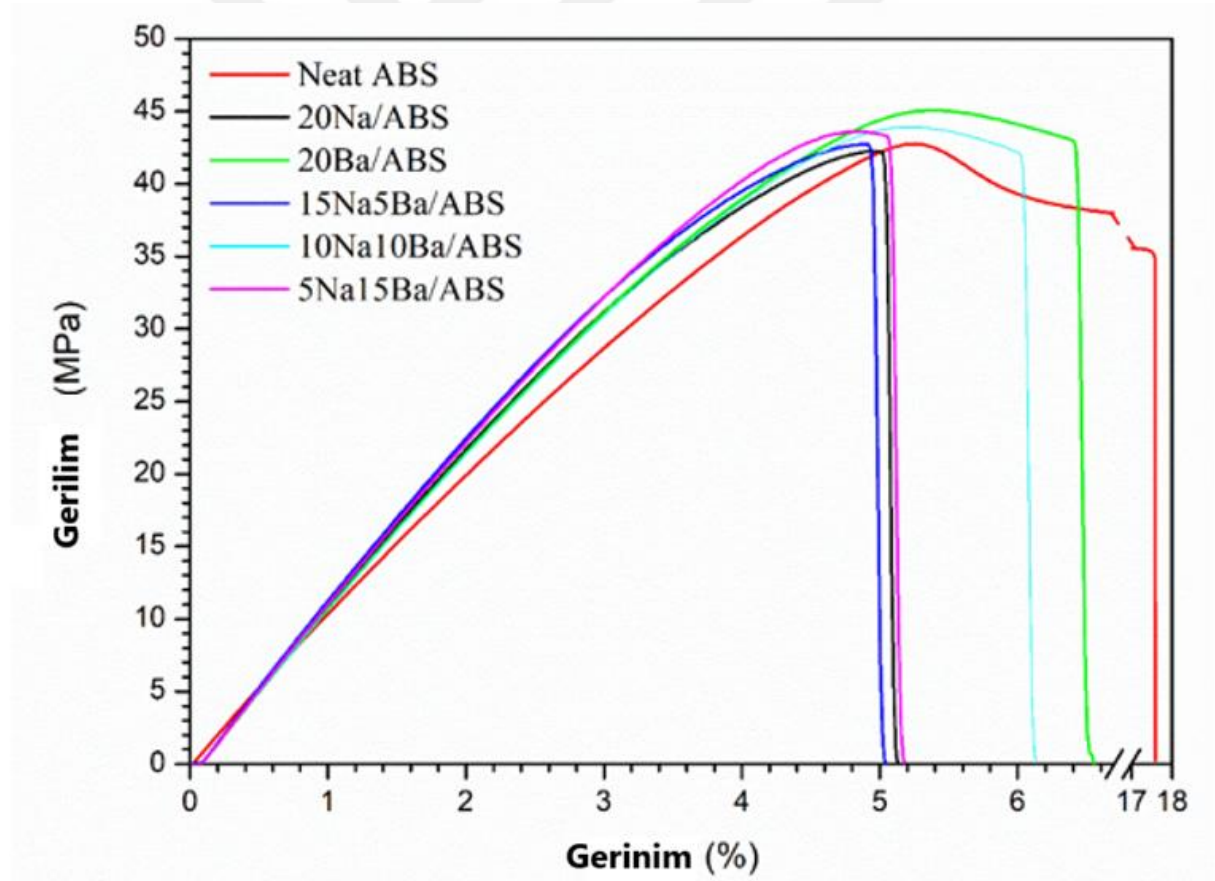


Şekil 6.12. Epoksi ve epoksi kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için lineer azaltma katsayısının değişimi

6.2. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS Kompozitler Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

6.2.1. Çekme test sonuçları

NaB₅O₈/BaSO₄/ABS kompozitlerin gerilim/uzama test sonuçları Şekil 6.13'te verilmiştir. Grafikte dolgu oranı arttıkça kompozitin uzamasında azalma gözlenmektedir. Matristen daha sert olan dolgu maddelerinin eklenmesi, modülde bir artışa ve matrisin nihai uzamasında bir azalmaya yol açtığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin hazırlanmasında, dolgu özelliklerini optimize ederken dolgu yüklemesini optimum düzeyde tutmak önemlidir [171, 172]. Kullanılan dolgular kendi içinde değerlendirildiğinde %20 barit içeren kompozitin daha yüksek uzama değerine ulaştığı görülmektedir. Sodyum pentaborat oranı %20 olan kompozit düşük bir uzama sergilemiştir. En düşük uzama değerini ise %5 oranında barit içeren kompozitte görmek mümkündür. Kompozitlerin çekme testinden elde edilen sayısal veriler Tablo 6.13'te verilmiştir.



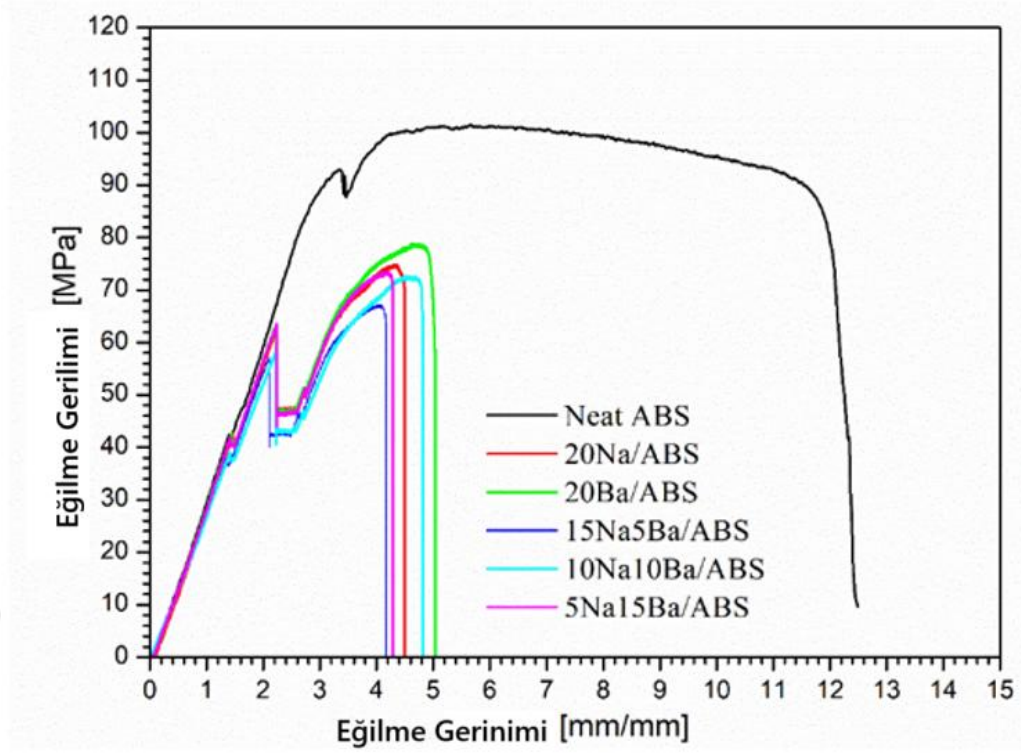
Şekil 6.13. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin gerilim/gerinim grafiği

Tablo 6.3. Kompozitlerin çekme testinden elde edilen sayısal veriler

Numune Kodu	Çekme Özellikleri		
	Elastik Modül (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
ABS	971,63±17,81	42,23±0,39	20,77±4,40
20NaABS	1080,75±14,49	41,65±1,35	5,19±0,31
15Na5BaABS	1130,82±7,29	42,27±0,47	4,82±0,23
10Na10BaABS	1055,35±19,08	42,66±1,20	5,54±0,31
5Na15BaABS	1106,12±4,30	42,99±0,44	5,06±0,27
20BaABS	1064,08±11,13	44,53±0,32	6,30±0,33

6.2.2. Üç nokta eğme test sonuçları

NaB₅O₈/BaSO₄/ABS kompozitlerin eğilme gerilimi/gerinim grafiği Şekil 6.14'te verilmiştir. Eğilme dayanımı, eğilme geriliminin % uzama dediğimiz gerinime bölünmesiyle elde edilen bir değerdir. Grafikler incelendiğinde; kompozitteki dolgu ilavesine bağlı olarak eğilme dayanımının düştüğü görülmektedir. Saf ABS'ten sonra en yüksek eğilme dayanımı %20 Barit içeren kompozitte görülmekte iken %20 sodyum pentaborat içeren kompozit daha düşük bir eğilme dayanımı sergilemiştir. Bu durum barite göre daha büyük bir molekül yapısına sahip olan sodyum pentaboratın polimer zincirleri arasındaki etkileşimi azalttığı dolayısıyla eğilme dayanımını düşürdüğü şeklinde ifade edilebilir [173, 174]. Kompozitlerin eğme testinden elde edilen sayısal veriler Tablo 6.4'te verilmiştir. Dolgu oranı ve dolgu çeşidi dikkate alındığında %10 barit ve %10 sodyum pentaborat içeren kompozitin eğilme dayanımının, ayrı ayrı %20 barit ve %20 sodyum pentaborat içeren kompozitlerin arasında bir değer aldığı görülmektedir. Bu değer optimum dolgu oranının eğilme dayanımını arttırabileceğini düşündürmüştür. Sonuç olarak; kompozite belli bir oranda dolgu eklenmesinin polimer zincirleri arasındaki boşluk oranını arttırdığı ve kompozitin mukavemet özelliklerini azalttığı görülmüştür [175, 176].



Şekil 6.14. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin eğilme gerilimi/uzama grafiği

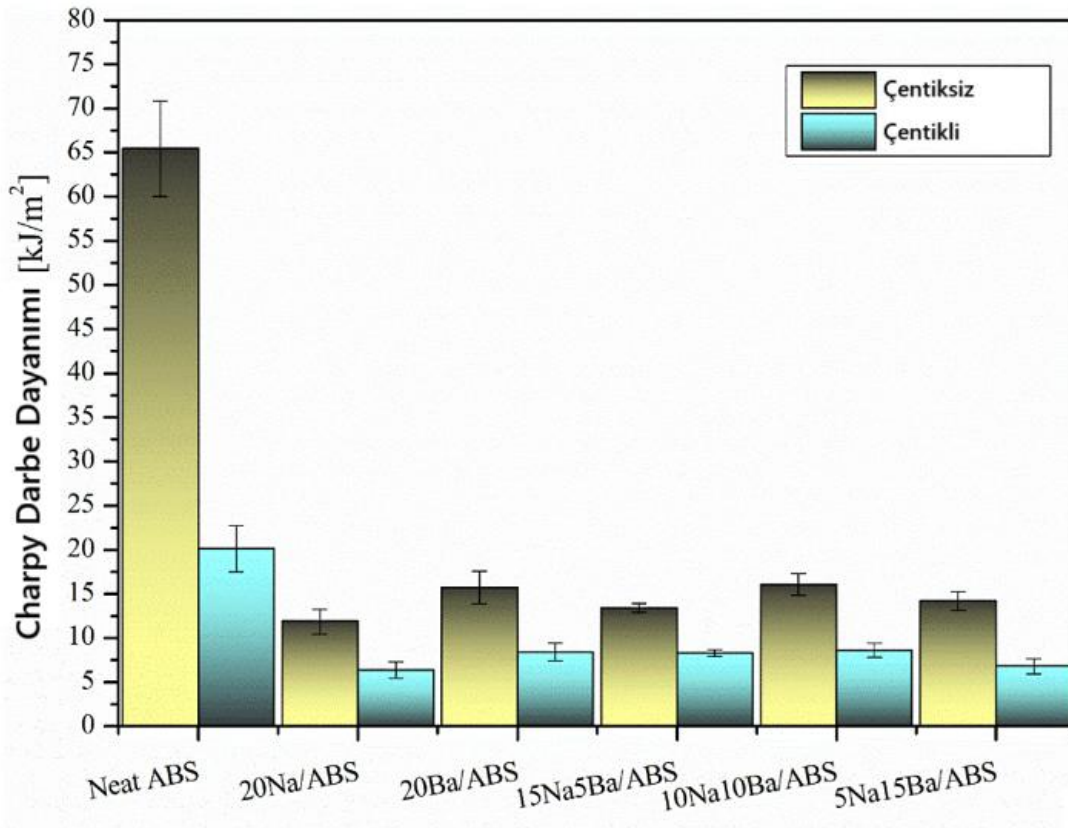
Tablo 6.4. Kompozitlerin eğme testinden elde edilen sayısal veriler

Numune Kodu	Eğme Özellikleri		
	Elastik Modül (MPa)	Eğme Dayanımı (MPa)	Uzama (mm/mm)
ABS	3155,03±66,47	98,40±2,17	18,88±5,07
20NaABS	2993,29±24,46	72,84±3,70	4,23±0,29
15Na5BaABS	3135,37±11,83	65,57±1,46	4,27±0,15
10Na10BaABS	2925,83±39,14	70,54±2,95	4,98±0,29
5Na15BaABS	2967,36±44,45	72,49±1,38	4,52±0,10
20BaABS	2966,46±22,29	75,10±5,15	5,46±0,18

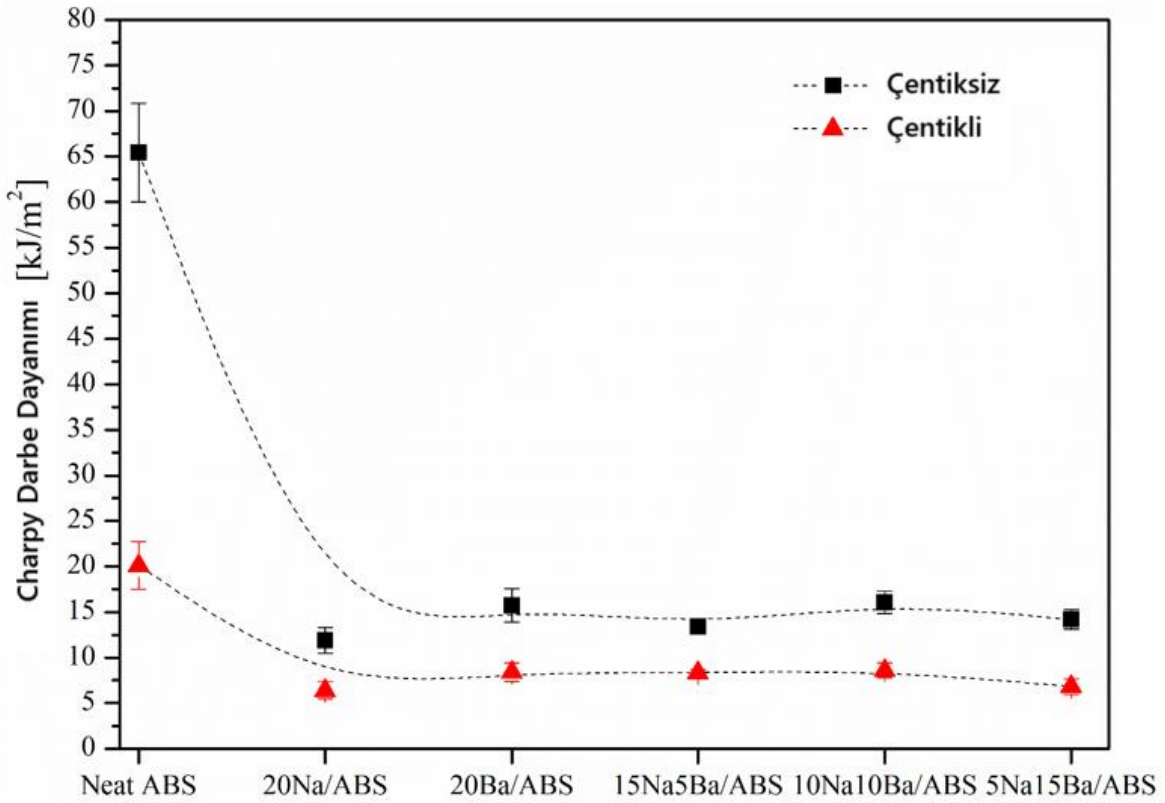
6.2.3. Darbe test sonuçları

Saf ABS ve NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin dolgu yüklemesine karşı darbe dayanımı grafiği Şekil 6.15'te ve Şekil 6.16'da verilmiştir. Saf ABS ve her kompozit çeşidi için çentikli ve çentiksiz darbe testleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Grafikte görüldüğü üzere, kompozite eklenen dolgu oranı (ağırlıkça) arttıkça darbe dayanımının azaldığı gözlenmektedir.

Saf ABS'ten sonra en yüksek darbe dayanımı %20 Barit içeren kompozitte görülmekte iken %20 sodyum pentaborat içeren kompozit daha düşük bir darbe dayanımı sergilemiştir. Bu durum barite göre daha büyük bir molekül yapısına ve yoğunluğa sahip olan sodyum pentaboratın polimer zincirleri arasındaki etkileşimi azalttığı dolayısıyla darbe dayanımını düşürdüğü şeklinde ifade edilebilir [173, 177]. Kompozitlerin darbe testinden elde edilen sayısal veriler Tablo 6.5'te verilmiştir. Dolgu oranı ve dolgu çeşidi dikkate alındığında %10 barit ve %10 sodyum pentaborat içeren kompozitin darbe dayanımının, %20 barit içeren kompozite yakın bir değerde olduğu görülmektedir. Bu değer optimum dolgu oranının darbe dayanımını arttırabileceğini düşündürmüştür. Sonuç olarak; kompozite belli bir oranda dolgu eklenmesinin polimer zincirleri arasındaki boşluk oranını arttırdığı ve kompozitin mukavemet özelliklerini azalttığı görülmüştür [175, 176].



Şekil 6.15. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin dolgu yüklemesine karşı darbe dayanımı grafiği



Şekil 6.16. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin dolgu yüklemesine karşı darbe dayanımı grafiği

Tablo 6.5. Kompozitlerin Charpy Darbe testinden elde edilen sayısal veriler

Numune Kodu	Charpy Darbe Özellikleri	
	Çentiksiz Darbe Dayanımı kJ/m ²	V-Çentikli Darbe Dayanımı kJ/m ²
ABS	65,44±5,40	20,11±2,62
20NaABS	11,89±1,41	6,39±0,92
15Na5BaABS	13,41±0,52	8,31±0,38
10Na10BaABS	16,06±1,21	8,61±0,79
5Na15BaABS	14,20±1,06	6,82±0,87
20BaABS	15,73±1,83	8,41±1,03

6.2.4. FTIR analiz sonuçları

Toz barit, toz sodyum pentaborat ve bunların ABS ile yaptıkları kompozitlerin FTIR spektrumu, 400–4000 cm⁻¹ aralığında kaydedilmiş, kaydedilen spektrum. Şekil 6.17'de

gösterilmiştir. Farklı oranlarda sodyum pentaborat ve barit ile güçlendirilmiş ABS kompozitlerin kimyasal yapılarını aydınlatmak amaçlanmış ve 4000 cm^{-1} ila 400 cm^{-1} dalga sayıları aralığında fonksiyonel gruplara karşılık gelen tepe noktaları belirlenmiştir. Şekil 14'te, ABS'deki alkenik karbonlara bağlı hidrojen atomları için C-H'nin titreşimi, 1,4 bütadien birimleri için 967 cm^{-1} 'de ve 1,2 bütadien birimleri için 911 cm^{-1} 'de görülmektedir. 1638 cm^{-1} 'deki emilim, bütadien birimlerinden C=C çift bağının gerilme titreşimini temsil ederken, stiren biriminden aromatik halkanın gerilme titreşimi 1495 cm^{-1} 'de görülmektedir. C $\equiv$ N bağıyla temsil edilen akrilonitril biriminin karakteristik emilimi yaklaşık 2237 cm^{-1} 'de görülmektedir. 2853 cm^{-1} ve 2922 cm^{-1} 'lik pikler, ABS'nin metilen gruplarının simetrik ve asimetrik gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. Aromatik ve alifatik C-H'nin gerilme titreşimleri sırasıyla 3200-3000 cm^{-1} ve 3000-2800 cm^{-1} aralığında açıkça görülmektedir. [178].

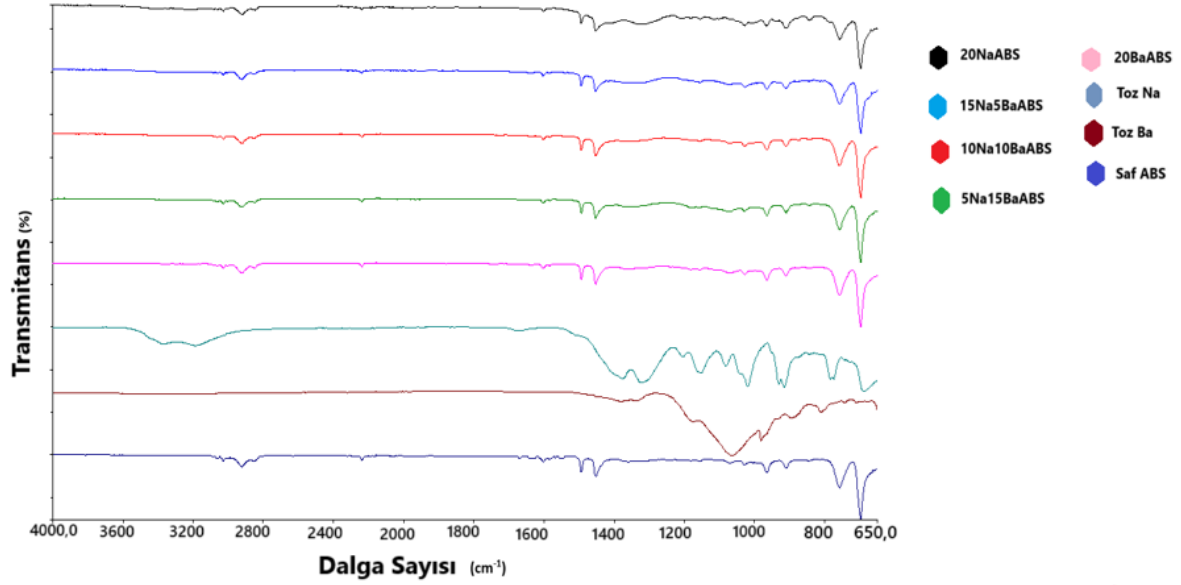
743 ve 711 cm^{-1} 'deki bantlar, sülfat gruplarının düşük enerjili bükülme titreşimleri ve sülfatın simetri özelliklerine işaret etmektedir. 931 cm^{-1} ve 895 cm^{-1} civarındaki iki tepe, baritin SO_4^{2-} iyonunun bükülme titreşimini belirler [179]. 980 cm^{-1} 'deki omuz tepesi ve 1070 cm^{-1} 'deki yoğun tepe, SO_4^{2-} grubunun simetrik titreşimlerinden kaynaklanmaktadır [180]. Bu pikler karakteristik sülfat bazlı S-O germe bantlarından dolayı görülmektedir. 1200 cm^{-1} ile 1400 cm^{-1} arasındaki bölgede bulunan tepeler, oksijenle ilgili bağlara atanır [181]. Spektrumda gözlemlenen 1382 ve 1335 cm^{-1} 'deki pikler, SO_4^{2-} grubunun asimetrik gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir.

Sodyum pentaborat yapısında bulunan Na alkali metaldir. Alkali metaller yüksek metalik karaktere veya elektropozitif karaktere sahiptir ve bu nedenle IR'deki dipol absorpsiyonları çok güçlüdür. NaB O_5 'un IR spektrumunda 784 cm^{-1} , 844 cm^{-1} ve 915 cm^{-1} 'deki pikler, bor bileşiklerinin iç yapısındaki asimetrik gerilmeleri temsil eder ve bu dalga boylarında önemli bor oksijen etkileşimlerini gösterir. 789 ve 932 cm^{-1} 'de gözlenen güçlü bağlar, halka B-O simetrik gerilme titreşimlerine atanmıştır. Halka B-O asimetrik germe titreşimleri 1082 ve 1359 cm^{-1} 'de ortaya çıkar. IR spektrumlarında 1082 cm^{-1} 'deki çok güçlü tepe, B-O terminal simetrik germe titreşimlerine atfedilmiştir. 1042 cm^{-1} , 1082 cm^{-1} ve 1154 cm^{-1} 'deki pikler de bor-oksijen bağlarının bir başka yansımasıdır. Bu dalga boylarındaki pikler, bor içeren bileşiklerin yapısal bir işareti olabilir ve pentaborat yapılarına dair bilgiyi yansıtır. 1376 cm^{-1} , 1323 cm^{-1} ve 1205 cm^{-1} 'deki pikler, genellikle boron oksijen bağları (B-O) ile ilişkili olabilir. Bu pikler, sodyum pentaboratın bor içeren yapısal özelliklerini belirginleştirir. 3365 cm^{-1} ve 3184 cm^{-1} 'deki pikler, genellikle OH grubu gerilme titreşimlerini yansıtır. Sodyum pentaboratın su içerdiği veya hidrojen bağlarıyla etkileşime girdiği izlenimini verir. Sodyum

pentaboratın hidrofilik özelliğinden dolayı neme bağlı olarak böyle bir pik gösterdiği düşünülebilir. Bu yüksek dalga boylarındaki geniş piki, suyun veya suya bağlı grupların varlığını gösteriyor olabilir [182].

%10 Barit %10 Sodyum pentaborat içeren ABS kompozit spektrumu incelendiğinde hem organik hem de inorganik bileşiklerin etkilerini göstermek mümkündür. Spektrumda yer alan 3059 cm^{-1} ve 3027 cm^{-1} pikleri, ABS'nin metilen ve metil gruplarına ait C-H bağlarının asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerine işaret etmektedir. 2922 cm^{-1} ve 2853 cm^{-1} 'lik pikler, ABS'nin metilen gruplarının simetrik ve asimetrik gerilme titreşimlerini temsil etmektedir. 2234 cm^{-1} 'deki pik, ABS'nin akrilonitril biriminin $\text{C}\equiv\text{N}$ nitril grubuna özgü titreşimleri yansıtmaktadır. Ayrıca, 1603 cm^{-1} ve 1493 cm^{-1} 'deki pikler, ABS'nin aromatik yapılarındaki $\text{C}=\text{C}$ bağlarının gerilme titreşimlerine işaret etmektedir. Kompozitteki sodyum pentaboratın varlığı, 1183 cm^{-1} , 1157 cm^{-1} , 1083 cm^{-1} ve 1030 cm^{-1} 'deki piklerle belirginleşmektedir. Bu pikler, bor oksijen (B-O) bağlarının titreşimlerine işaret etmektedir. Barit (BaSO_4), 697 cm^{-1} 'lik pik ile temsil edilmekte olup, bu pik sülfat grubu (SO_4^{2-}) titreşimlerini yansıtmaktadır. Bu bulgular, ABS'nin organik yapısal özellikleri ile barit ve sodyum pentaborat gibi inorganik bileşiklerin etkileşimini açıkça göstermektedir [183]. Farklı oranlarda dolgu içeren kompozit spektrumları barit ve sodyum pentaborat varlığını kanıtlamaktadır.

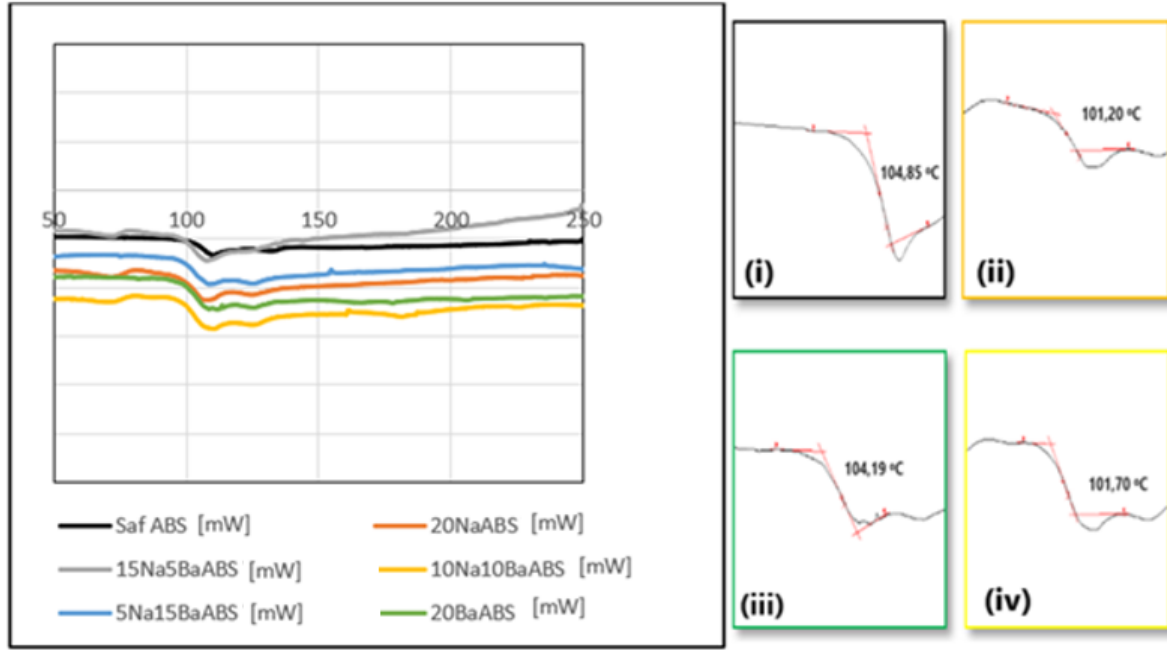
Barit/sodyum pentaborat/ABS kompozitlerin FTIR spektrumu, yeni bağ oluşumuna dair hiçbir kanıt göstermemiştir. ABS polimeri ile dolgu parçacıkları arasında hiçbir kimyasal bağ oluşmamıştır. Polimer matris kullanılarak yapılan benzer çalışmalarda da polimer matris ile barit-sodyum pentaborat partiküller arasında bağ oluşmadığı bildirilmiştir [184].



Şekil 6.17. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin FTIR analizi

6.2.5. DSC analiz sonuçları

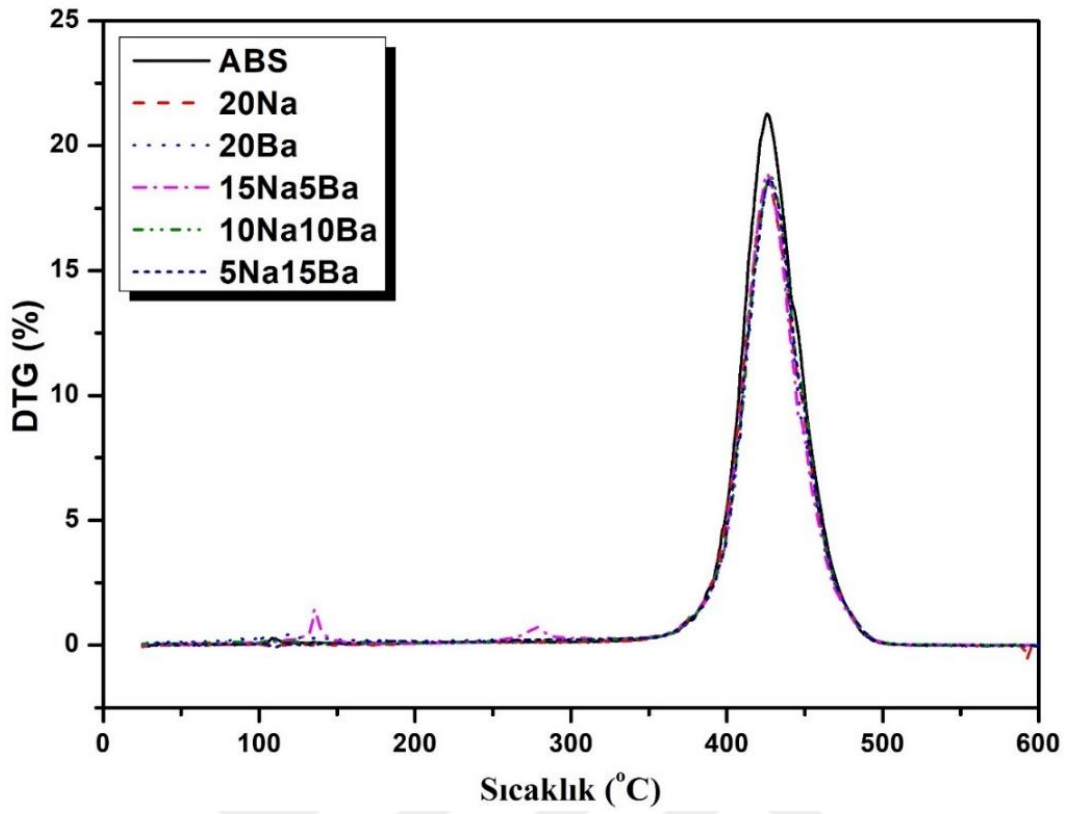
NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerine ait DSC analiz sonuçları şekil 6.18’de verilmiştir. İkili sistem saf ABS ve dolgu katkılı kompozitler (20NaABS, 15Na5BaABS, 10Na10BaABS, 5Na15BaABS ve 20BaABS) için elde edilen DSC grafikleri değerlendirilmiştir. Saf ABS’in Tg sıcaklığı 104,85°C olarak elde edilmiştir. Bu değer, kullanılan ABS sisteminin uzun süreli ısı kararlılık gerektiren uygulamalarda rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Yüksek Tg sıcaklıklarına sahip ABS sistemlerin yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağladığı bilinmektedir [77, 185]. Bu nedenle çalışmada kullanılan saf ABS ve sodyum pentaborat/barit dolgulu kompozitler, endüstriyel uygulamalarda mekanik stres altında rahatlıkla kullanılabilir. Sonuçlar dolgu ilavesi açısından incelendiğinde, dolgu ilavesinin ABS kompozitlerin Tg sıcaklıklarını düşürdüğü görülmüştür. 20NaABS ve 20BaABS etiketli numuneler için Tg sıcaklıkları sırasıyla 101,20°C ve 104,19°C olarak elde edildi. Barit ilave oranı %10’dan %20’ye çıktığında Tg sıcaklığında bir artış gözlemlendi. Tg sıcaklıklarının dolgu oranı ile değişebileceği ve uygun aralıklarda ayarlanabileceği belirlenmiştir. Tg’nin bileşik içindeki moleküler zincir hareketi ile ilgili olduğuna dikkat edilmelidir. Kompozite dolgu parçacıklarının eklenmesi, sıcaklık arttıkça moleküler zincirlerin serbestçe hareket etmesini zorlaştırmıştır [141, 157, 185].



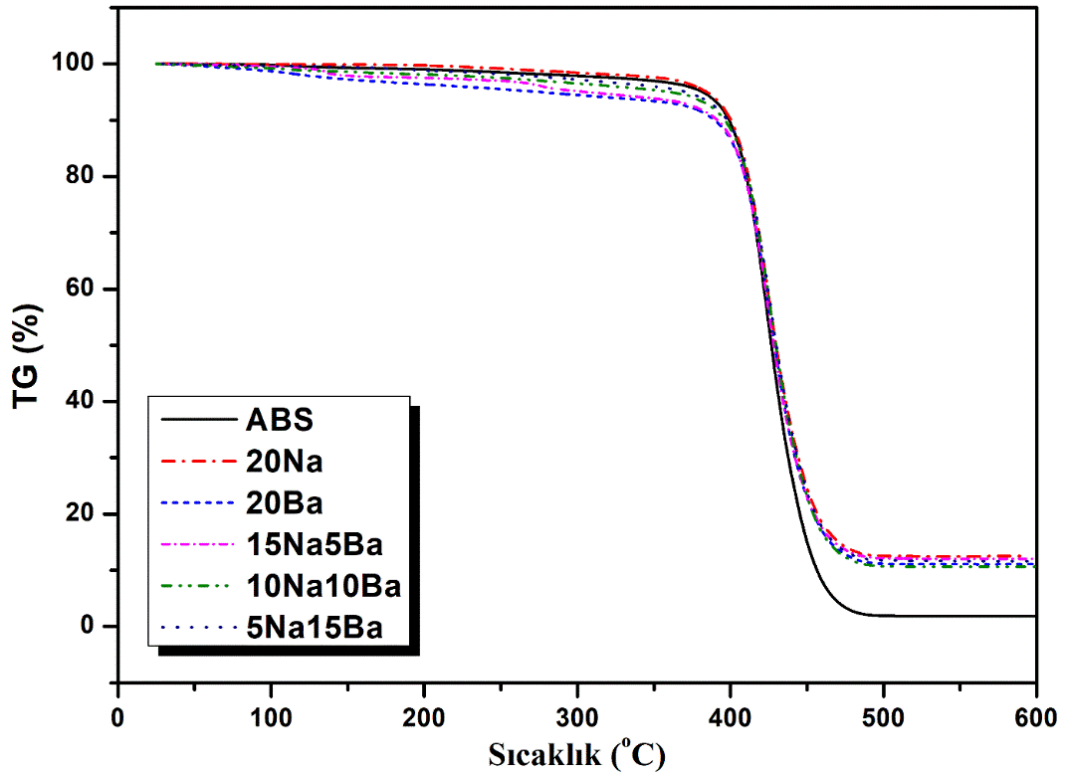
Şekil 6.18. DSC Eğrileri; (i) Saf ABS, (ii) 20NaABS, (iii) 20BaABS, (iv) 10Na10BaABS

6.2.6. TGA (DTG) analiz sonuçları

NaB₅O₈/BaSO₄/ABS kompozitlerin termogravimetrik analizi sonucu elde edilen kütle kaybı (TG) ve kütle kaybı hızı (DTG) eğrileri Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde tüm numunelerin genel süreç boyunca tek bir ana bozunma aşaması sergilediği görülmüştür. Bozunma ABS matris yapısının bozulmasına karşılık gelen 350°C ‘de başlamıştır. ABS matris yapıdan kalıntıların ayrışmasıyla 500°C’de bozunma tamamlanmıştır. Matris yapıya eklenen dolguların bozunma sıcaklığı üzerinde çok büyük bir etkisi görülmemiştir [174, 186]. Bozunma sonucunda ABS matris yapının %100 bozunduğu, mineral dolguların ise çok az kütle kaybıyla yaklaşık olarak %10 civarında kaldığı görülmüştür. Mineral dolgu ilavesi sonucunda kompozitlerin bozunma hızlarında düşüş görülmektedir [77, 78, 96]. Verilen ısı hem matris hem de dolguları etkilediği için bozunma hızının düşmesi beklenen bir durumdur [174, 187]. Kompozitlerin TGA testinden elde edilen sayısal veriler Tablo 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.19. $\text{NaB}_5\text{O}_8/\text{BaSO}_4/\text{ABS}$ kompozitlerin DTG Eğrileri



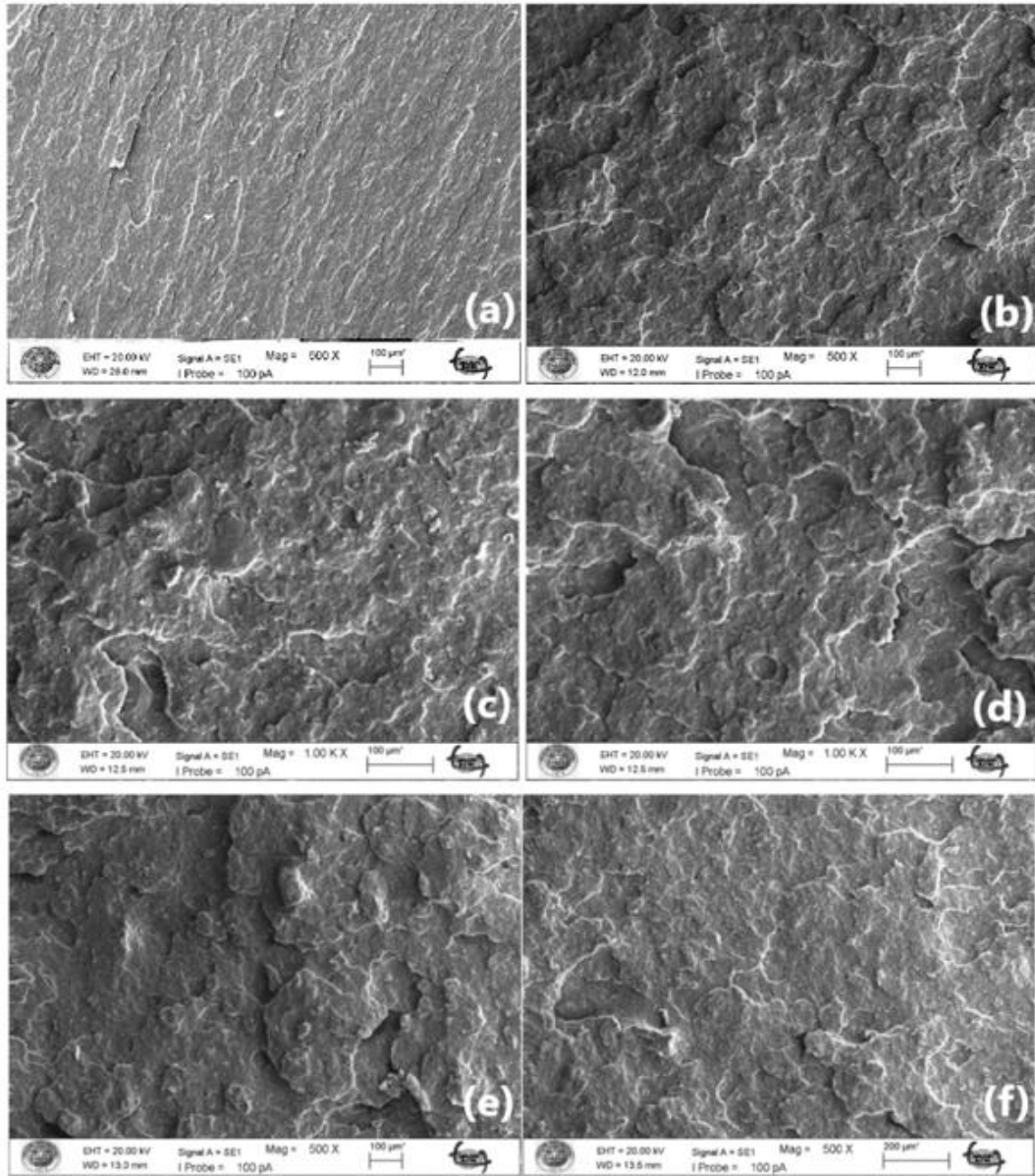
Şekil 6.20. $\text{NaB}_5\text{O}_8/\text{BaSO}_4/\text{ABS}$ kompozitlerin TGA Eğrileri

Tablo 6.6. Kompozitlerin TGA testinden elde edilen sayısal veriler

Numune Kodu	T ₅ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _{max} (°C)	600°C'deki kalıntı (%)
ABS	396,7	425,7	471,6	1,9
20NaABS	397,9	427,9	462,6	11,1
15Na5BaABS	399,0	425,4	459,3	12
10Na10BaABS	394,0	427,8	462,8	10,6
5Na15BaABS	395,4	427,3	463,1	11,6
20BaABS	395,6	425,9	469,5	12,7

6.2.7. Mikroyapı inceleme sonuçları

Şekil 6.21'de sağlanan SEM görüntüleri, homojen bir dağılımın yanı sıra parçacıklar ve matris arasında iyi bir arayüz gösterir. Bununla birlikte, kompozitin kırılma yüzeyi düzensiz ve pürüzlü hale gelmiştir. Saf ABS numunesinin yüzeyinde, Şekil 6.21a'da gösterildiği gibi, herhangi bir çatlak veya hasar belirtisi olmaksızın nispeten düzgün ve homojen bir yapı gözlenmektedir. ABS matrise eklenen dolgu parçacıkları matris ile etkileşime girerek iyi bir yapışma ve güçlü bir bağ sağlar. Dolgu yüklemesine bağlı olarak kompozit yüzeyinde tabakalaşma, çatlak oluşumu ve partiküllerin topaklaşmasına bağlı olarak yer yer boşluk oluşumu görülebilir. Şekil 6.21b ve 6.21f'de görüldüğü gibi barit partikülleri ile matris arasında iyi bir yapışma olduğu ve artan bir tabakalaşmanın meydana geldiği görülmüştür. Tabakalaşmanın kompozit malzemelerde darbe dayanımını arttırdığı bilinmektedir. Darbe testinden elde edilen sonuçlar, SEM görüntülerinden elde edilen gözlemleri doğrulamaktadır [171]. Şekil 6.21c, d ve e'de görüldüğü gibi sodyum pentaborat içeriğine bağlı olarak kompozit yüzeyde tabakalaşmanın yanı sıra yer yer topaklaşma, boşluk ve çatlak oluşumları gözlenmiştir. Topaklaşma, boşluk ve çatlak oluşumlarının malzemenin çekme özelliklerini olumsuz etkilediğine inanılmaktadır. Çekme testinden elde edilen sonuçlar, SEM görüntülerinden elde edilen gözlemlerle desteklenmiştir [172]. Mekanik testlerde dolgulu malzemelerin mekanik özellikleri, dolgunsuz polimerlere göre önemli ölçüde daha düşüktü. Bu, bir polimer-dolgu ara yüzü boyunca çatlak büyümesine karşı direncin, homojen bir polimerden daha az olduğu gerçeğini yansıtır [171, 172].



Şekil 6.21. SEM mikrografı (a) Saf ABS (b) 20BaABS, (c) 20NaABS, (d) 15Na5BaABS, S, (e) 10Na10BaABS, (f) 5Na15BaAB 'yı gösterir.

6.2.8. Parlaklık (Gloss) ve su absorpsiyon ölçüm sonuçları

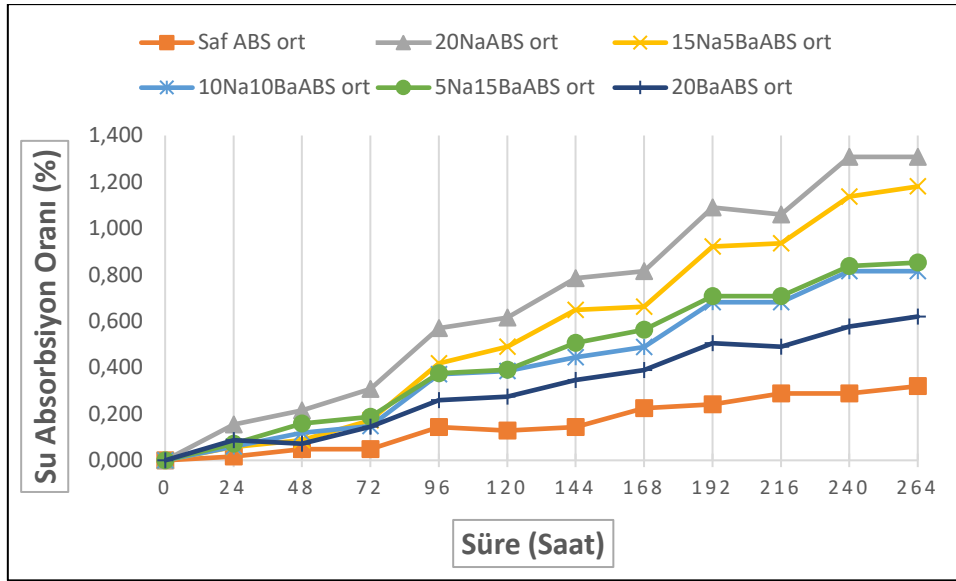
Yüzey parlaklığı, malzemelerin görünümüne, estetik değerine ve kullanım amacına bağlı olarak önemli bir özellik olup, üretim süreçlerinde kontrol edilmesi gereken bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Parlaklık test sonuçları incelendiğinde genel olarak, ipek-mat bir yüzey parlaklığına sahip olan saf ABS polimere dolgu eklenmesinin polimer kompozitin matlığını arttırdığı görülmüştür. En yüksek matlık değerine sahip olan 20NaABS kompozit içeriğinde %20 sodyum pentaborat bulunmaktadır. Kompozit yapıdaki sodyum pentaborat oranı azaldıkça barit oranı artırılmış ve buna paralel olarak kompozit yüzey parlaklığının arttığı görülmüştür.

Kompozitlerin yüzey parlaklık değerleri yarı-parlak sınıfında değerlendirilmiştir. Saf ABS ve NaB₅O₈/BaSO₄/ABS kompozitlerin yüzey patlaklık değerleri Tablo 6.7’de verilmiştir. Sonuçlar, numunelerin yüzey parlaklığının malzeme bileşimi, işleme veya yüzey işlemi gibi faktörlere bağlı olarak değişebileceğini ve numuneler arasında belirli bir desenin bulunduğunu göstermektedir.

Tablo 6.7. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerinin yüzey parlaklığı

Numune Kodu	Yüzey Parlaklığı (GU 60°)	Standart Sapma
ABS	49,3	0,2
20NaABS	28,8	0,4
15Na5BaABS	29,6	0,2
10Na10BaABS	31,5	0,2
5Na15BaABS	36,2	0,1
20BaABS	39,9	0,4

Hem saf ABS hem de NaB₅O₈/BaSO₄/ABS kompozitlerin zaman içindeki su emme kapasiteleri Şekil 6.22’de gösterilmiştir. Saf ABS’in su emme kapasitesi ABS kompozitlere kıyasla daha düşüktür. NaB₅O₈ ilavesi arttıkça göreceli olarak kompozitlerin daha yüksek su emme kapasiteleri sergilediği görülmüştür. Bunun NaB₅O₈ ‘da bulunan bor içeriğinin hidrofilik özelliğine bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir [188, 189]. Genel olarak tüm kompozitlerin 240 saat sonra bozunmaya başladığı görülmüştür. Kompozitlerdeki NaB₅O₈ dolgu oranı arttıkça başlangıçta yüksek olan su emme kapasitesinin 192 saat sonra azalmaya başladığını görmek mümkündür. Bu olgu, NaB₅O₈’nin hidrofilik yapısıyla ilişkilendirilebilir. Hidrofilik yapı maksimum bir şişme değerinden sonra partiküllerdeki şişmeyi sınırlayabilir ve yapıya daha fazla su girmesini önleyebilir [188-190].



Şekil 6.22. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin su absorpsiyon grafiği

6.2.9. Yoğunluk ve sertlik ölçüm sonuçları

Dolgu arttıkça kompozit yoğunluğunun göreceli olarak arttığı görülmüştür. Dolguların yoğunluğu ABS polimer yoğunluğuna göre daha yüksektir, dolayısıyla dolgu oranının artmasına bağlı olarak kompozit yoğunluğunun artması tabii bir sonuçtur. Her ne kadar mineral dolgu miktarına bağlı olarak kompozitin yoğunluğu artmış olsa da geleneksel radyasyon tutucu maddelere kıyasla sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerin gayet cazip bir yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Düşük yoğunluğa sahip sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerin, kurşun vb. ağır metal içeren radyasyon koruyuculara iyi bir alternatif olacağı öngörülmektedir. Saf ABS ve sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerinin yoğunluğu, ISO 1183'e göre sıvı piknometre yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Kompozit yapımında kullanılan ABS yoğunluğu 1,04 g/cm³ iken, sodyum pentaborat yoğunluğu 1,69 g/cm³, barit yoğunluğu ise 4,45 g/cm³'tür. Saf ABS ve sodyum pentaborat/barit/ABS kompozitlerinin yoğunluk değerleri Tablo 6.8'de verilmiştir.

Tablo 6.8. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin yoğunluğu

Numune Kodu	ABS (wt.%)	NaB ₅ O ₈ (wt.%)	BaSO ₄ (wt.%)	Yoğunluk(g/cm ³)
ABS	100	-	-	0,95
20NaABS	80	20	-	0,99
15Na5BaABS	80	15	5	1,01
10Na10BaABS	80	10	10	1,03
5Na15BaABS	80	5	15	1,09
20BaABS	80	-	20	1,11

Kompozit yapımında kullanılan ABS yoğunluğu (1.04 g/cm³) ve sertliği kompozite dolgu olarak eklenen sodyum pentaborat (1.69 g/cm³) ve baritin yoğunluğu (4.45 g/cm³) ve sertliğine göre daha düşüktür. Mineral dolgu maddelerinin polimer kompozit yoğunluğunu ve sertliğini arttırması beklenen bir durumdur. Bu davranış, dolgu parçacıklarının polimer zincirleri arasında dağılmasıyla açıklanabilir. Sertlik ölçüm cihazının ucu polimer yanında çeşitli küçük boyutlu parçacıklar içeren numunenin yüzeyiyle temas etmiş olur. Dolgu miktarı arttıkça, dolgu parçacıkları numune boyunca toplanır ve kümelenir, bu da cihazın indenterinin kümelenmiş dolgu yüzeyi ile temasını arttırır [157]. Bu durum sertlik değerlerinin yükselmesiyle sonuçlanır. Polimer matris içindeki dolgu konsantrasyonunun arttırılması, elde edilen kompozitlerin sertliğinde bir artışa neden olur [191]. Çalışmada dolgu konsantrasyonu ağırlıkça %20 olarak sabit tutulmasına rağmen sert bir mineral olan barit oranı arttıkça kompozit sertliğinin arttığı görülmektedir. Sertlik test sonuçları Tablo 6.9’da verilmiştir.

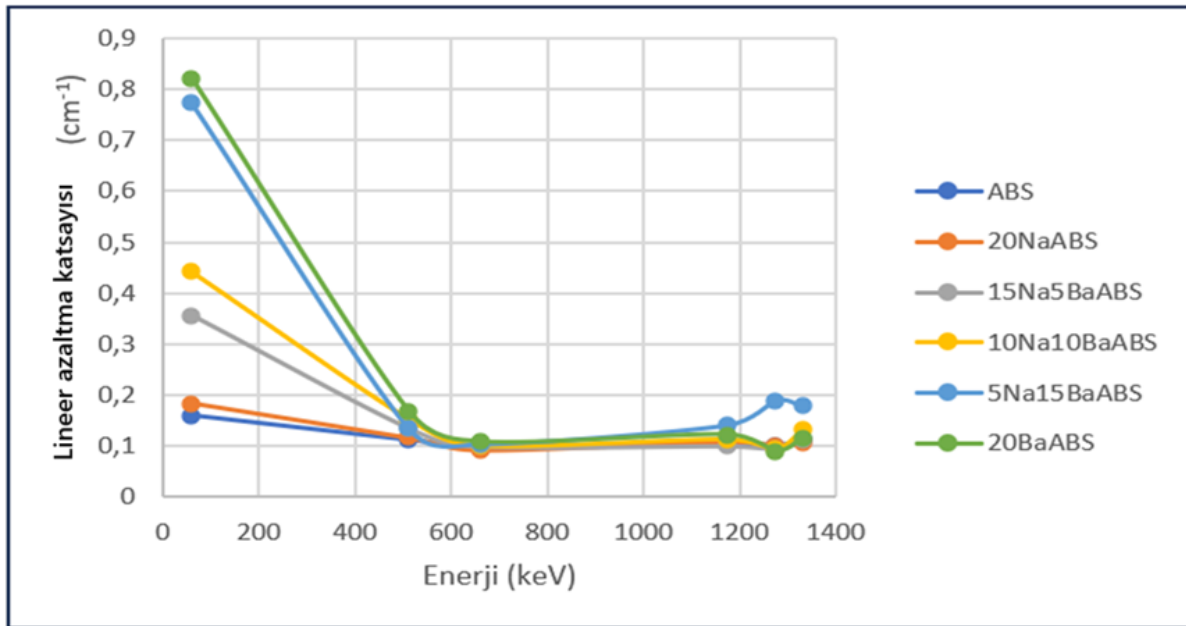
Tablo 6.9. NaB₅O₈/ BaSO₄/ABS kompozitlerin sertlik değerleri

Numune Kodu	ABS (wt.%)	NaB ₅ O ₈ (wt.%)	BaSO ₄ (wt.%)	Sertlik (Shore D)
ABS	100	-	-	82,2
20NaABS	80	20	-	79,8
15Na5BaABS	80	15	5	80,0
10Na10BaABS	80	10	10	80,4
5Na15BaABS	80	5	15	81,0
20BaABS	80	-	20	82,6

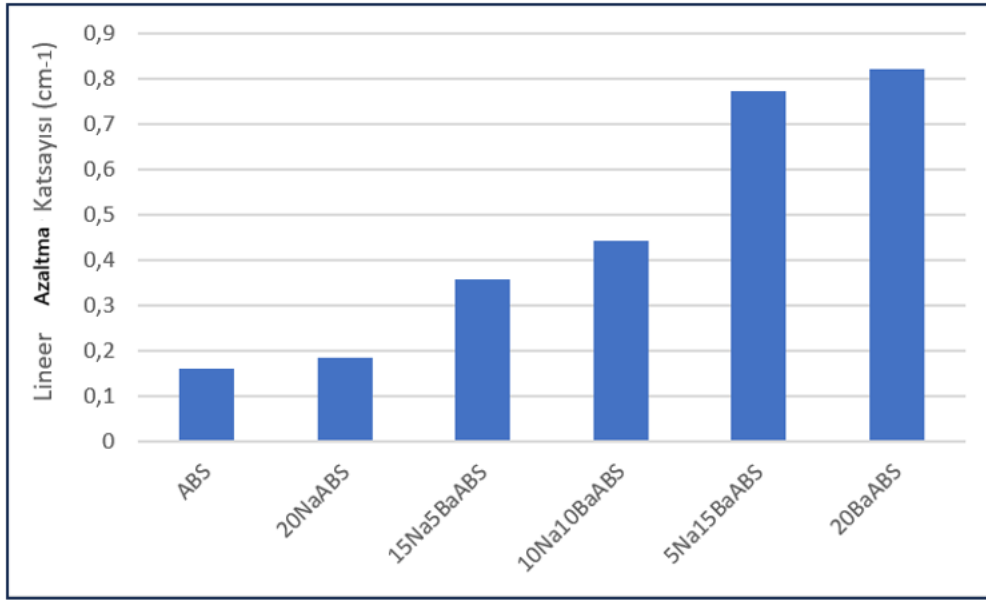
6.2.10. ABS Kompozitler için Radyasyon Zırhlama test sonuçları

Lineer azaltma katsayısı, malzemelerin gama ışınlarına karşı zırhlama kabiliyetini tanımlamak için en yaygın kullanılan terim olarak öne çıkmaktadır [167]. Bu önemli parametrenin ABS ve NaB₅O₈/BaSO₄/ABS kompozitler için 59,5-1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları kullanılarak elde edilen değerleri Şekil 6.23'te sunulmuştur. Numunelerin 59,5, 661,6 ve 1332,5 keV enerjili gama ışınları için lineer zayıflama katsayısı ayrı ayrı ele alınmış ve sırasıyla Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da verilmiştir.

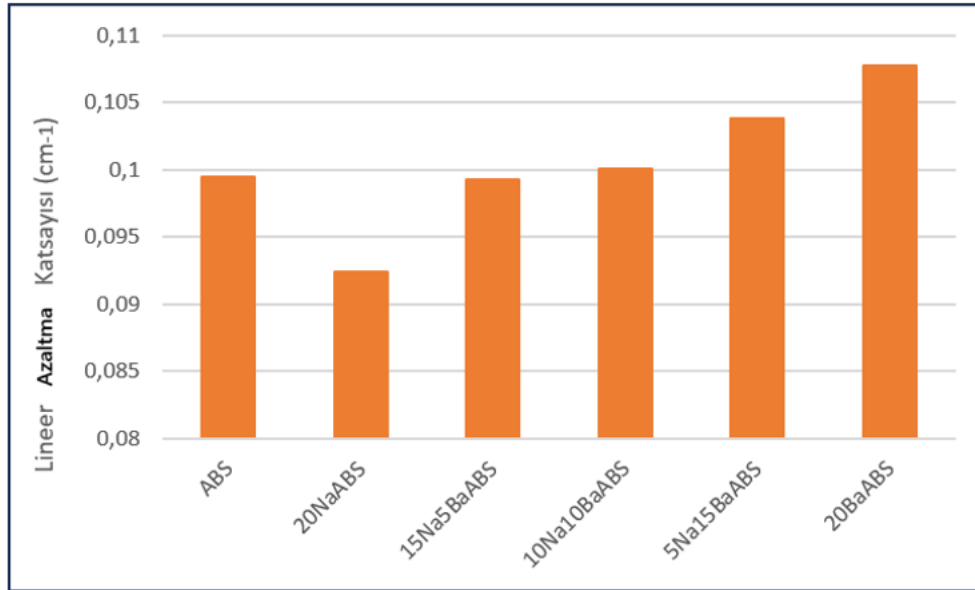
Ölçüm sonuçlarına göre, 59,5 keV enerjili gama ışınları için 20BaABS numunesi en yüksek lineer azaltma katsayısını sergiler ve bu da numunenin daha yoğun olduğunu ve ışınların numuneden daha zor geçtiğini gösterir. Saf ABS 59,5 keV enerjide en düşük katsayıya sahiptir, bu durum beklenen bir sonuçtur. 661,6 keV'de, 20BaABS örneği en yüksek lineer azaltma katsayısını gösterirken, 20NaABS örneği en düşük katsayıya sahiptir. Bu sonuçlar, ışınların farklı enerji seviyelerinde farklı yapılara sahip örneklerle etkileşime girme biçimlerinin çeşitliliğini yansıtmaktadır. 1332,5 keV enerjili gama ışınları için 5Na15BaABS örneği en yüksek lineer azaltma katsayısını gösterirken, 20NaABS örneği en düşük katsayıyı göstermektedir. Bu durum, ışınların sodyum pentaborat ve barit içerik oranı, dolgu parçacıklarının yapı içindeki dağılımı, yüksek enerjili ışınlarda compton saçılma ihtimallerinin artması ve buna bağlı numune içinde azaltılma oranlarının düşmesi nedeniyle gerçekleşmiş olabilir.



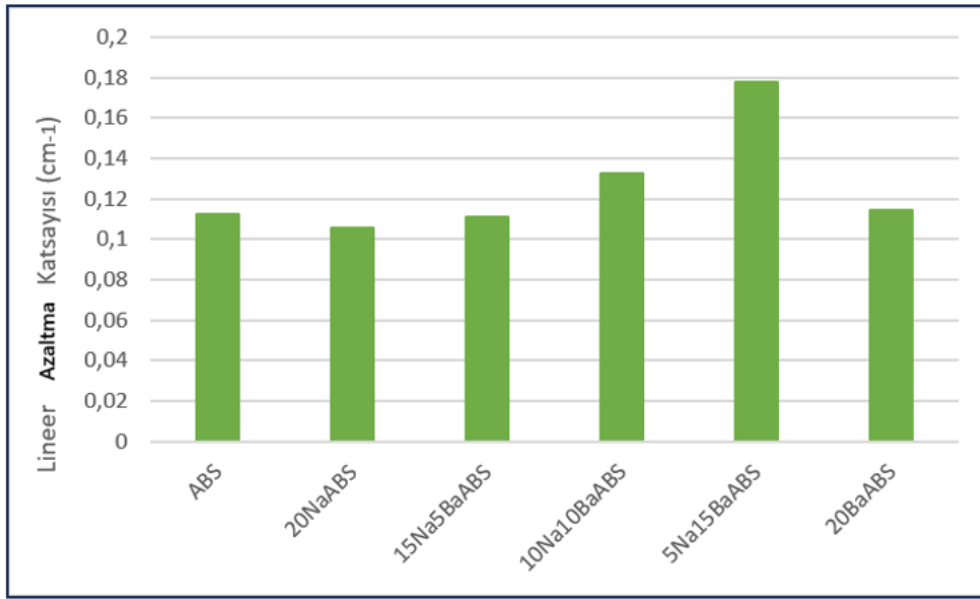
Şekil 6.23. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için ABS kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının değişimi



Şekil 6.24. ABS kompozitlerde 59,5 keV enerjili gama ışınları için ABS kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının değişimi



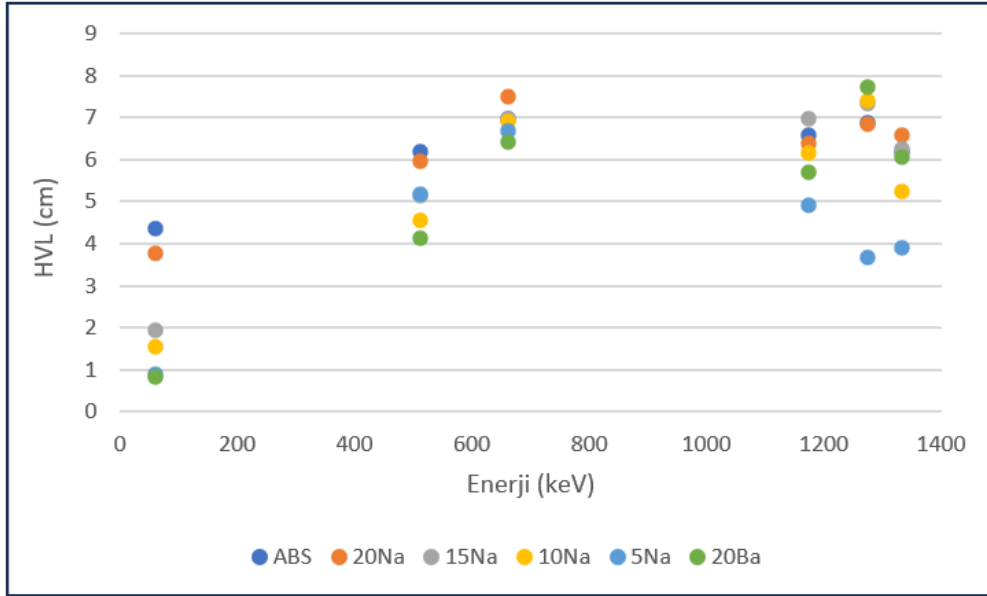
Şekil 6.25. ABS kompozitlerde 661.6 keV enerjili gama ışınları için ABS kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının değişimi



Şekil 6.26. ABS kompozitlerde 1332,5 keV enerjili gama ışınları için ABS kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının değişimi

Numunelerin yarı kalınlık, onda bir kalınlık ve ortalama serbest yol değerleri hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Bir foton demetinin şiddetini yarıya düşürecek olan zayıflatıcı levhasının kalınlığı yarı kalınlık (HVL) olarak ifade edilir [62]. Yarı kalınlık, radyasyonun nesnelere nüfuz etmesini ve nüfuz etme yeteneğini tanımlamada kullanılan bir parametredir. Radyasyon zırhlamada en iyi malzemeyi seçmek için bir diğer önemli parametre yarı kalınlık değerlerini ortaya koymaktır. Numunelerin 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için yarı kalınlık değerlerinin değişimi Şekil 6.27’te gösterilmiş, bu değerlerin sayısal verileri ise Tablo 6.10’da verilmiştir. Herhangi bir katkı maddesi içermeyen saf ABS polimer matrisinin 59,5 keV enerjideki HVL değeri 4,359 cm iken 20NaABS, 15Na5BaABS, 10Na10BaABS, 5Na15BaABS ve 20BaABS kompozitler için sırasıyla 3,783 cm, 1,948 cm, 1,565 cm, 0,895 cm, 0,843 cm olarak listelenebilir. Bu sayısal verilere dayanarak 59,5 keV enerjide tüm kompozit örneklerin saf ABS polimerden daha iyi gama koruma yeteneğine sahip olduğu sonucuna varılabilir. Bu nedenle, herhangi bir miktarda barit ve/veya sodyum pentaborat eklenmesinin düşük enerjilerde fotoelektrik olay, yüksek enerjilerde compton saçılması ihtimalini arttırarak ışınların numune içinde azaltılmasını sağladığı ve ABS malzemenin gama koruma yeteneğini iyileştirdiği güvenle söylenebilir. 59,5 keV ve 661,6 keV enerjilerde en düşük yarı kalınlık değeri 20BaABS numunesinde görülmektedir. En düşük yarı kalınlık (HVL) değerleri daha iyi zırhlama malzemelerine atfedilmektedir [29]. 1332,5 keV enerjide en düşük yarı kalınlık değerini 5Na15BaABS numunesi sergilemektedir. Kullanılan dolgu maddelerinin

yoğunluğu ve birlikte kullanımlarının etkisi göz önüne alındığında yarı kalınlık değerlerinin dolgu yüklemesine bağlı olarak değiştiği değerlendirilebilir.



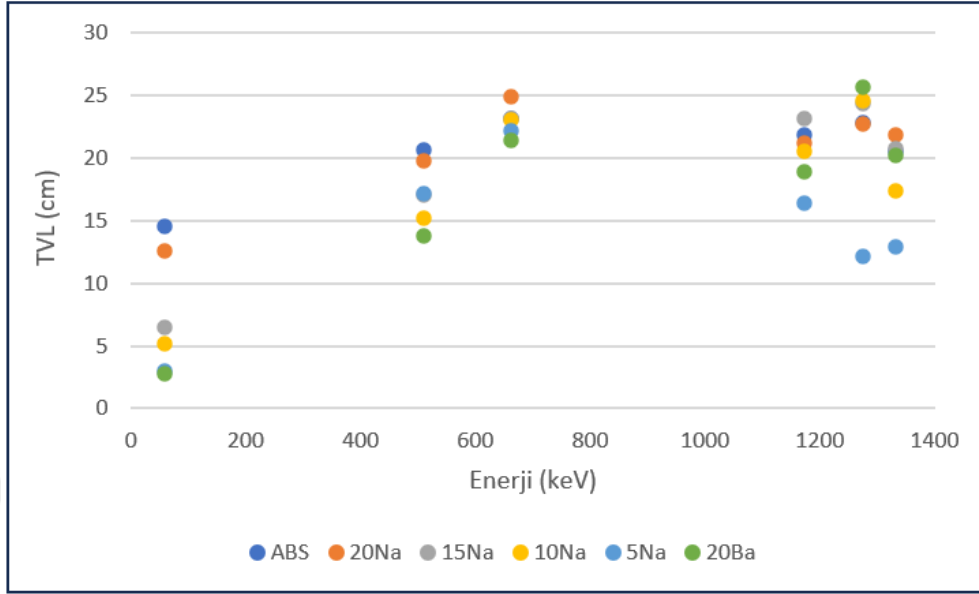
Şekil 6.27. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için yarı kalınlık değerlerinin değişimi.

Tablo 6.10. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için yarı kalınlık değerleri

Gama ışını enerjisi	Saf ABS	20NaABS	15Na5BaABS	10Na10BaABS	5Na15BaABS	20BaABS
59,5	4,359	3,783	1,948	1,565	0,895	0,843
511	6,199	5,959	5,142	4,560	5,165	4,130
661,6	6,966	7,501	6,980	6,924	6,677	6,429
1173,2	6,576	6,370	6,966	6,166	4,919	5,686
1274,5	6,876	6,829	7,334	7,405	3,657	7,710
1332,5	6,177	6,570	6,255	5,239	3,894	6,064

Foton şiddetini onda bire düşürebilmek için gereken malzeme kalınlığı onda bir kalınlık (TVL) olarak ifade edilir [47, 67]. NaB₅O₈/BaSO₄/ABS kompozitler için onda bir kalınlık değerinin enerjiye bağlı değişimi Şekil 6.28’de verilmiştir. 59,5 keV ve 661,6 keV enerjilerde en düşük onda bir kalınlık değeri 20BaABS numunesi sergilemektedir. 1332,5 keV enerjide en düşük onda bir kalınlık değeri 5Na15BaABS numunesinde görülmektedir (Tablo 6.11). Düşük onda

bir kalınlık değeri HVL değeriinde olduğu gibi daha iyi zırlama yapıldığını göstermektedir [192].



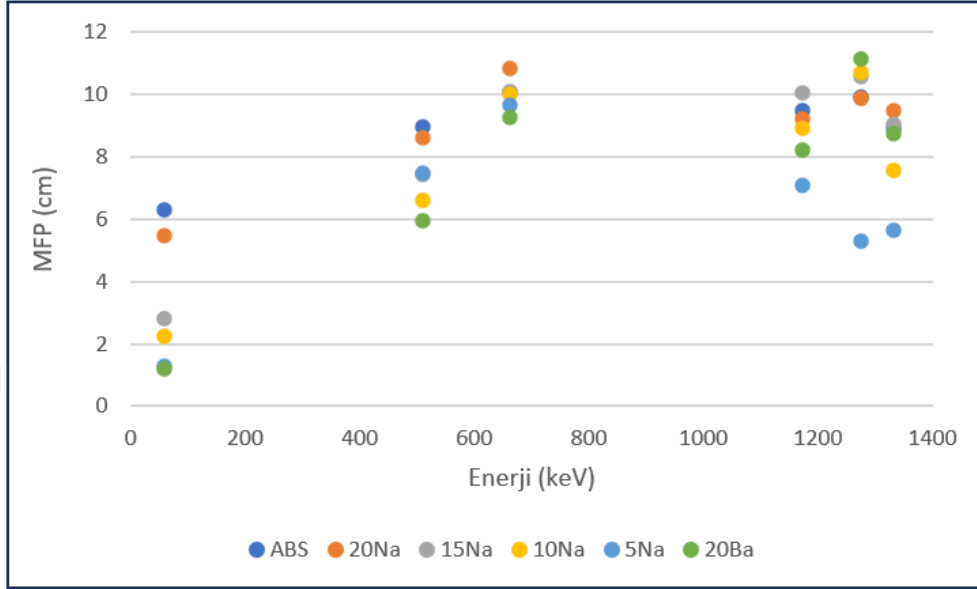
Şekil 6.28. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için onda bir kalınlık değeriinin değışimi

Tablo 6.11. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için onda bir kalınlık değeri

Gama ışını enerjisi	Saf ABS	20NaABS	15Na5BaABS	10Na10BaABS	5Na15BaABS	20BaABS
59,5	14,481	12,568	6,473	5,201	2,975	2,802
511	20,595	19,798	17,081	15,148	17,157	13,722
661,6	23,141	24,919	23,188	23,002	22,182	21,359
1173,2	21,846	21,163	23,141	20,485	16,341	18,889
1274,5	22,843	22,685	24,365	24,600	12,150	25,612
1332,5	20,522	21,825	20,781	17,404	12,935	20,145

Fotonlar madde içerisinde belli bir mesafe alana kadar madde ile etkileşimde bulunmadan ilerleyebilir. Bir fotonun etkileşim gerçekleştirmeden önce soğurucuda kat ettiği ortalama penetrasyon mesafesi ya da iki etkileşme arası gidebildiği ortalama uzaklığa “ortalama serbest yol (MFP)” adı verilir [59]. Numunelerin 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için ortalama serbest yol değeriinin değışimi Şekil 6.29’da, değışimin sayısal değeri ise Tablo

6.12’de verilmiştir. 59,5 keV ve 661,6 keV enerjilerde en düşük ortalama serbest yol değerini 20BaABS numunesi sergilemektedir. 1332,5 keV enerjide en düşük ortalama serbest yol değeri 5Na15BaABS numunesinde görülmektedir. Düşük ortalama serbest yol değeri fotonların malzeme içinde etkileşme yapmadan kısa mesafeler katettiğini gösterir [192].



Şekil 6.29. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için ortalama serbest yol değerlerinin değişimi

Yarı kalınlık, onda bir kalınlık ve ortalama serbest yol nicelikleri lineer azaltma katsayısıyla ters orantılıdır, yani daha yüksek lineer azaltma katsayıları daha düşük yarı kalınlık, onda bir kalınlık ve ortalama serbest yol değerleriyle sonuçlanır. Numunelerin lineer azaltma katsayılarındaki değişimler 59,5 1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için değerlendirilmiştir. Gözlemlenen bu değişimler literatürde bulunan beklenen sonuçlarla tutarlıdır [169, 170]. Mevcut çalışma ile literatürde yapılan bazı çalışmaların karşılaştırılması tablo 6.13’te verilmiştir.

Tablo 6.12. ABS kompozitlerde 59,5–1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için ortalama serbest yol değerleri

Gama ışını enerjisi	Saf ABS	20NaABS	15Na5BaABS	10Na10BaABS	5Na15BaABS	20BaABS
59,5	6,289	5,458	2,811	2,258	1,292	1,217
511	8,944	8,598	7,418	6,578	7,451	5,959
661,6	10,050	10,822	10,070	9,990	9,633	9,276
1173,2	9,487	9,191	10,050	8,896	7,097	8,203
1274,5	9,920	9,852	10,582	10,683	5,277	11,123
1332,5	8,912	9,478	9,025	7,558	5,617	8,748

Tablo 6.13. NaB₅O₈ ve BaSO₄ dolgulu ABS kompozitlerin zırhlama özelliklerinin literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırılması.

Malzeme	Enerji (keV)	Numune Kodu	HVL (cm)	MFP (cm)	Referans
Sıradan beton	511	-	-	4,951	[193]
Sıradan beton	662	-	3,87	5,596	[193, 194]
TeO ₂ , PbO	511	80TeO ₂ 20PbO glass	-	1,558	[195]
TeO ₂ , PbO	662	80TeO ₂ 20PbO glass	-	1,967	[195]
Pb, Cu	511	Pb10Cu90	-	1,550	[196]
Pb, Cu	662	Pb10Cu90	-	1,828	[196]
Baryum borat	662	I	-	4,296	[197]
TeO ₂ , Sb ₂ O ₃ , WO ₃	662	TSW20	-	2,29	[198]
Ticari cam	662	RS253 G18	3,65	-	[199]
Hematit Beton	662	Hematite- serpentine	3,60	-	[199]
Barit beton	662	Barite concrete	2,67	-	[199]
İlmenit Beton	662	Ilmenite concrete	2,63	-	[199]
Mevcut çalışma	511	20BaABS	4,130	5,959	-
Mevcut çalışma	661,6	20BaABS	6,420	9,276	-

Sonuç olarak, bu ölçümler çeşitli enerjilere sahip gama ışınları ile düşük oranda sodyum pentaborat ve barit katkılı ABS kompozitler arasındaki etkileşim özelliklerini anlamak için çok önemlidir. Bu anlayış, özellikle nükleer sanayide, tıbbi tanı ve tedavi uygulamalarında ve elektronik endüstrisinde zırhlama uygulamaları için önemlidir. Bulgular, alandaki benzer çalışmalar için değerli bir referans görevi görebilir.





7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında polimer kompozitlerin ve doğal polimerlerin radyasyondan korunma amacıyla kullanılabilirliğinin test edilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda, epoksi matrise Cu eklenerek kompozit elde edilmiş ve kompozitlerin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, epoksi kompozitlere Cu parçacıklarının eklenmesinin saf epoksiye kıyasla epoksi-Cu kompozitlerin çekme mukavemetinde ve çekme elastik modülünde bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. %1 ila %4 oranında bakır parçacıkları eklenen epoksi-Cu kompozitlerde, saf epoksiye kıyasla eğilme mukavemeti ve eğilme elastik modülü artmıştır. Ancak, %5 ve %6 oranında bakır parçacıklarının eklenmesiyle, eğilme mukavemeti ve eğilme elastik modülü saf epoksiye kıyasla azalmıştır. Bulgular epoksi kompozitlere az miktarda Cu eklemenin, özellikle elektrik ve elektronik endüstrisinde olmak üzere çeşitli endüstriyel uygulamalar için özelliklerini artırabileceğini göstermektedir. SEM incelemeleri, Cu parçacıklarının eklenmesinin epoksi kompozitlerin mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymuştur. Saf epoksi numunesi, doğal mukavemetini gösteren düzgün ve homojen bir yüzey sergilerken, Cu parçacıklarının dahil edilmesi düzensiz ve pürüzlü bir kırılma yüzeyiyle sonuçlanmış olup, yapısal bütünlüğün azaldığını göstermektedir. Epoksi kompozitlerin gama ışını azaltma özellikleri araştırılmış ve Epoksi-Cu kompozitler 59,5 keV gama ışınları için en iyi sonuçları vermiştir. Epoksi kompozitlerin gama ışını azaltma özellikleri, 59,5, 661,6 ve 1332,5 keV enerjili gama ışınları için değişmiştir. Çalışmada ayrıca, sodyum pentaborat ve barit parçacıklarının ABS kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, sodyum pentaborat ve barit parçacıklarının eklenmesinin, saf ABS kıyasla $\text{NaB}_5\text{O}_8/\text{BaSO}_4/\text{ABS}$ kompozitlerin çekme mukavemetinde ve çekme elastik modülünde genel olarak bir artışa neden olduğunu göstermiştir. Kullanılan dolgular kendi içinde değerlendirildiğinde %20 barit içeren kompozitin daha yüksek uzama değerine ulaştığı ve daha iyi çekme mukavemeti sergilediği görülmektedir. Sodyum pentaborat oranı %15 olan kompozit yüksek elastik modül ve düşük bir uzama sergilemiştir. Saf ABS'ten sonra en yüksek eğilme dayanımı %20 Barit içeren kompozitte görülmekte iken %20 sodyum pentaborat içeren kompozit daha düşük bir eğilme dayanımı sergilemiştir. Dolgu oranı ve dolgu çeşidi dikkate alındığında %10 barit ve %10 sodyum pentaborat içeren kompozitin eğilme dayanımının, ayrı ayrı %20 barit ve %20 sodyum pentaborat içeren kompozitlerin arasında bir değer aldığı görülmektedir. Bu değer optimum dolgu oranının eğilme dayanımını arttırabileceğini düşündürmüştür. En yüksek darbe dayanımı %20 Barit içeren kompozitte

görülmekte iken %20 sodyum pentaborat içeren kompozit daha düşük bir darbe dayanımı sergilemiştir. Dolgu ilavesinin ABS kompozitlerin Tg sıcaklıklarını düşürdüğü görülmüştür. Tg sıcaklıklarının ilave oranı ile değişebileceği ve uygun aralıklarda ayarlanabileceği belirlenmiştir. Bulgular ABS kompozitlere belirli miktarda sodyum pentaborat ve barit eklemenin, özellikle otomotiv sanayi, tıbbi cihaz ve medikal sanayi, elektrik ve elektronik endüstrisi vb. çeşitli endüstriyel uygulamalar için özelliklerini artırabileceğini göstermektedir. SEM incelemeleri, dolgu parçacıklarının eklenmesinin ABS kompozitlerin mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymuştur. Saf ABS numunesi, doğal mukavemetini gösteren düzgün ve homojen bir yüzey sergilerken, dolgu parçacıklarının dahil edilmesi düzensiz ve pürüzlü bir kırılma yüzeyiyle sonuçlanmış olup, yapısal bütünlüğün azaldığını göstermektedir. Mekanik testlerden elde edilen sonuçlar, SEM görüntülerinden elde edilen gözlemlerle desteklenmiştir. $\text{NaB}_5\text{O}_8/\text{BaSO}_4/\text{ABS}$ kompozitler için 59,5-1332,5 keV enerji aralığındaki gama ışınları için lineer azaltma katsayısı incelenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, 59,5 keV'de 20BaABS numunesi en yüksek lineer azaltma katsayısını sergilerken Saf ABS en düşük katsayıya sahiptir. Lineer azaltma katsayısının yüksek olması numunenin daha yoğun olduğunu ve ışınların numuneden daha zor geçtiğini dolayısıyla iyi bir zırhlama özelliği sergilediğini gösterir. 661,6 keV'de, 20BaABS örneği en yüksek lineer azaltma katsayısını gösterirken, 20NaABS örneği en düşük katsayıya sahiptir. 1332,5 keV'de, 5Na15BaABS örneği en yüksek lineer azaltma katsayısını gösterirken, 20NaABS örneği en düşük katsayıyı göstermektedir. Bu durum, ışınların sodyum pentaborat ve barit içerik oranı, dolgu parçacıklarının yapı içindeki dağılımı ve diğer faktörlere bağlı olarak numunelerle farklı şekilde etkileşime girdiğini göstermektedir. 59,5 keV enerjide sunulan çalışmada, yarı kalınlık değerlerinin önerilen tüm kompozit örnekleri için polimer matristen daha iyi gama zırhlama yeteneğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, herhangi bir miktarda barit ve/veya sodyum pentaborat eklenmesinin seçilen ABS malzemenin gama ışını zırhlama yeteneğini iyileştirdiği güvenle söylenebilir. 59,5 keV ve 661,6 keV enerjilerde en düşük yarı kalınlık değeri 20BaABS numunesinde görülmektedir. 1332,5 keV enerjide en düşük yarı kalınlık değerini 5Na15BaABS numunesi sergilemektedir. En düşük yarı kalınlık değerleri daha iyi zırhlama malzemelerine atfedilmektedir. Onda bir kalınlık ve ortalama serbest yol nicelikleri yarı kalınlık değeriyle paralel sonuçlar vermektedir.

7.2. Öneriler

Bu tez çalışması sonucunda, metal ve/veya mineral katkılı polimer kompozitlerin gama radyasyonuna karşı zırh olarak değerlendirilebileceği görülmüştür. Bu bağlamda farklı dolgular

ve dolgu oranları belirlenerek bu tür çalışmalar çeşitlendirilebilir. Yakın gelecekte esnek, sert, şeffaf, renkli, ısıya veya ışığa duyarlı, kaplama veya şekillendirilmiş formlarda polimer kompozit zırh malzemeleri geliştirilebilir. Geleneksel radyasyon tutucu malzemelere alternatif olarak polimerler ve çeşitli polimer kompozitler araştırılmalıdır.





KAYNAKLAR

- [1] S. Daşdağ, “İyonlaştırıcı Radyasyonlar ve Kanser”, *Dicle Tıp Dergisi*, c. 37, sy 2., 2010
- [2] M. I. Sayyed *vd.*, “Evaluation of gamma-ray and neutron shielding features of heavy metals doped Bi₂O₃-BaO-Na₂O-MgO-B₂O₃ glass systems”, *Progress in Nuclear Energy*, c. 118, s. 103118, Oca. 2020, doi: 10.1016/j.pnucene.2019.103118.
- [3] S. Özavci, “Farklı Katkılanmış Betonların Radyasyon Zırhlama Üzerine Etkileri” YL, Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 504227, 2017.
- [4] A. S. Abouhaswa, M. I. Sayyed, K. A. Mahmoud, ve Y. Al-Hadeethi, “Direct influence of mercury oxide on structural, optical and radiation shielding properties of a new borate glass system”, *Ceramics International*, c. 46, sy 11, ss. 17978-17986, Ağu. 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.04.112.
- [5] A. Hamisu *vd.*, “The use of nanomaterial polymeric materials as ionizing radiation shields”, *Radiation Physics and Chemistry*, c. 216, s. 111448, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.111448.
- [6] E. Al-Sarray, “Organic compound that excels Barite and polymer in gamma ray’s attenuation”, *Int J Energ Water Res*, c. 3, sy 3, ss. 247-251, Eyl. 2019, doi: 10.1007/s42108-019-00034-8.
- [7] J. K. Shultis ve R. E. Faw, *Radiation Shielding*. 2000. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=d1eca8b518045423a4530ac0c1717197> (30 Ocak 2025)
- [8] E. Şakar, M. Büyükyıldız, B. Alım, B. C. Şakar, ve M. Kurudirek, “Leaded brass alloys for gamma-ray shielding applications”, *Radiation Physics and Chemistry*, c. 159, ss. 64-69, Haz. 2019, doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.02.042.
- [9] M. I. Sayyed, I. A. El-Mesady, A. S. Abouhaswa, A. Askin, ve Y. S. Rammah, “Comprehensive study on the structural, optical, physical and gamma photon shielding features of B₂O₃-Bi₂O₃-PbO-TiO₂ glasses using WinXCOM and Geant4 code”, *Journal of Molecular Structure*, c. 1197, ss. 656-665, 2019, doi: 10.1016/j.molstruc.2019.07.100.
- [10] İ. Akkurt, S. Emikönel, F. Akarslan, K. Günoğlu, Ş. Kiliçarslan, ve İ. S. Üncü, “Barite Effect on Radiation Shielding Properties of Cotton-Polyester Fabric”, *Acta Phys. Pol. A*, c. 128, sy 2B, s. B-53-B-54, Ağu. 2015, doi: 10.12693/A Phys PolA. 128. B-53.
- [11] I. Akkurt ve A. M. El-Khayatt, “The effect of barite proportion on neutron and gamma-ray shielding”, *Annals of Nuclear Energy*, c. 51, ss. 5-9, Oca. 2013, doi: 10.1016/j.anucene.2012.08.026.

- [12] Elmas, " Development Of A Novel Radiation Shielding Material", International Journal of Advances in Science, Engineering and Technology (IJASEAT), 2016, pp. 226-232, Volume 4, Issue-2, Spl. Iss-2
- [13] M. Butson *vd.*, "Reducing shield thickness and backscattered radiation using a multilayered shield for 6–10 MeV electron beams", *Australas Phys Eng Sci Med*, c. 38, sy 4, ss. 619-626, Ara. 2015, doi: 10.1007/s13246-015-0382-1.
- [14] E. Gallego, A. Lorente ve H. R. Vega-Carrillo, "Testing of a High-Density Concrete as Neutron Shielding Material", *Nuclear Technology*, c. 168, sy 2, ss. 399-404, 2009, doi: 10.13182/NT09-A9216.
- [15] A. K. Singh, R. K. Singh, B. Sharma ve A. K. Tyagi, "Characterization and biocompatibility studies of lead free X-ray shielding polymer composite for healthcare application", *Radiation Physics and Chemistry*, c. 138, ss. 9-15, 2017, doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.04.016.
- [16] H. M. Soylu, F. Yurt Lambrecht ve O. A. Ersöz, "Gamma radiation shielding efficiency of a new lead-free composite material", *J Radioanal Nucl Chem*, c. 305, sy 2, ss. 529-534, Ağu. 2015, doi: 10.1007/s10967-015-4051-3.
- [17] A. M. Sürücü ve S. Subaşı, "Nanomateriyallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, Oca. 2021, doi: 10.31202/ecjse.812372.
- [18] D. Bor, "Radyasyon Nedir", Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Bilgilendirme Kılavuzu, 2015.
- [19] Ş. Kiliçarslan, C. Başyigit, T. Molla ve S. Sancar, "Radyoaktif Işınlardan Korunaklı Ekolojik Yapılar", *Politeknik Dergisi*, 2011.
- [20] D. F. Gökharman, S. Aydın ve P. N. Koşar, "Radyasyon Güvenliğinde Mesleki Olarak Bilmemiz Gerekenler", *SDÜ Sağlık Bilimleri Dergisi*, c. 7, sy 2, ss. 35-35, Ağu. 2016, doi: 10.22312/sdusbed.261237.
- [21] U. Akçaalan, "Farklı Maddelerle Katkılanmış Beton Malzemenin Gama Soğurma Katsayılarının DeneySEL ve Teorik Olarak İncelenmesi", YL, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015
- [22] A. Al-Sharkawy, T. Sharshar, ve H. M. Badran, "The use of mercury as a supplementary inner shielding material for low-background gamma-ray spectrometry", *J. Inst.*, c. 8, sy 07, ss. P07006-P07006, Tem. 2013, doi: 10.1088/1748-0221/8/07/P07006.

- [23] M. A. Masoud, W. A. Kansouh, M. G. Shahien, K. Sakr, A. M. Rashad ve A. M. Zayed, “An experimental investigation on the effects of barite/hematite on the radiation shielding properties of serpentine concretes”, *Progress in Nuclear Energy*, c. 120, s. 103220, 2020, doi: 10.1016/j.pnucene.2019.103220.
- [24] C. Başıyigit ve A. Kaçar, “Bazı Yapı Malzemelerinin Radyasyon Tutuculuk Özellikleri”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt: 10 Sayı: 2, 307-310, 2009
- [25] E. M. A. Hussein ve A. M. Madbouly, “Chemical and radiation shielding effectiveness of some heavy metal oxide glasses for immobilizing radioactive wastes”, *J Aust Ceram Soc*, c. 60, sy 1, ss. 127-142, Şub. 2024, doi: 10.1007/s41779-023-00951-2.
- [26] I. Akkurt, A. Calik, H. Akyıldırım ve B. Mavi, “The Effect of Boronizing on the Radiation Shielding Properties of Steel”, *Zeitschrift für Naturforschung A*, c. 63, sy 7-8, ss. 445-447, Ağu. 2008, doi: 10.1515/zna-2008-7-810.
- [27] I. Akkurt, H. Akyıldırım, F. Karipçin ve B. Mavi, “Chemical corrosion on gamma-ray attenuation properties of barite concrete”, *Journal of Saudi Chemical Society*, c. 16, sy 2, ss. 199-202, Nis. 2012, doi: 10.1016/j.jscs.2011.01.003.
- [28] A. Tasnim, M. H. Sahadath ve M. N. Islam Khan, “Development of high-density radiation shielding materials containing BaSO₄ and investigation of the gamma-ray attenuation properties”, *Radiation Physics and Chemistry*, c. 189, s. 109772, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.radphyschem.2021.109772.
- [29] C. V. More, Z. Alsayed, Mohamed. S. Badawi, Abouzeid. A. Thabet, ve P. P. Pawar, “Polymeric composite materials for radiation shielding: a review”, *Environ Chem Lett*, c. 19, sy 3, ss. 2057-2090, Haz. 2021, doi: 10.1007/s10311-021-01189-9.
- [30] C. V. More, R. R. Bhosale ve P. P. Pawar, “Detection of new polymer materials as gamma-ray-shielding materials”, *Radiation Effects and Defects in Solids*, c. 172, sy 5-6, ss. 469-484, Haz. 2017, doi: 10.1080/10420150.2017.1336765.
- [31] A. A. Plionis, S. R. Garcia, E. R. Gonzales, D. R. Porterfield ve D. S. Peterson, “Replacement of lead bricks with non-hazardous polymer-bismuth for low-energy gamma shielding”, *J Radioanal Nucl Chem*, c. 282, sy 1, ss. 239-242, Eki. 2009, doi: 10.1007/s10967-009-0245-x.
- [32] A. Sharma, B. Singh ve B. S. Sandhu, “Investigation of photon interaction parameters of polymeric materials using Monte Carlo simulation”, *Chinese Journal of Physics*, c. 60, ss. 709-719, Ağu. 2019, doi: 10.1016/j.cjph.2019.06.011.

- [33] S. Kilincarslan, I. Akkurt, I. S. Uncu ve F. Akarslan, “Determination of Radiation Shielding Properties of Cotton Polyester Blend Fabric Coated with Different Barite Rate”, *Acta Phys. Pol. A*, c. 129, sy 4, ss. 878-879, Nis. 2016, doi: 10.12693/APhysPolA.129.878.
- [34] M. A. El-Sarraf ve A. El-Sayed Abdo, “Insulating epoxy/barite and polyester/barite composites for radiation attenuation”, *Applied Radiation and Isotopes*, c. 79, ss. 18-24, Eyl. 2013, doi: 10.1016/j.apradiso.2013.04.026.
- [35] L. Chang vd., “Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for γ -rays radiation shielding”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, c. 356-357, ss. 88-93, Ağu. 2015, doi: 10.1016/j.nimb.2015.04.062.
- [36] M. R. Ambika, N. Nagaiah ve S. K. Suman, “Role of bismuth oxide as a reinforcer on gamma shielding ability of unsaturated polyester based polymer composites”, *J of Applied Polymer Sci*, c. 134, sy 13, s. app.44657, Nis. 2017, doi: 10.1002/app.44657.
- [37] T. Jevremovic, *Nuclear Principles in Engineering*. Boston, MA: Springer US, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-85608-7.
- [38] A. G. M. van Melsen, *From atomos to atom: the history of the concept atom*, Dover phoenix editions. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2004.
- [39] J. K. Shultis ve R. E. Faw, *Fundamentals of nuclear science and engineering*, Nachdr. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002.
- [40] B. Çimen, M. Erdoğan ve R. Oğul, “İyonlaştırıcı Radyasyon ve Korunma Yöntemleri”, *Selcuk University Journal of Science Faculty*, Volume: 43 Issue: 2, 139-147, 2017.
- [41] R. D. Evans, *The Atomic Nucleus*. Erişim: [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=51675fb53dbdcda634b8709259b11f4> (Erişim Tarihi: 26 Ocak 2025)
- [42] F. M. Khan ve J. P. Gibbons, *Khan's the physics of radiation therapy*, 5th edition. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
- [43] H. Cember ve T. E. Johnson, *Introduction to Health Physics*, 4. bs. McGraw-Hill, 2009. [Çevrimiçi]. Erişim, adresi: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=0ef2af24d5751f8535c0fdee9be39d48>, (Erişim Tarihi: 26 Ocak 2025)
- [44] D. Brune, Ed., "Radiation: at home, outdoors and in the workplace." *American Journal of Physics* 82(6), Publisher: Scandinavian Science Publisher Oslo: Scandinavian Science, 2001.

- [45] M. H. Lombardi, *Radiation safety in nuclear medicine*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2007.
- [46] K. S. Krane, *Introductory nuclear physics*, 1. bs. içinde Wiley International Editions. Wiley, 1987. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=01ef77390c4f90ac8c32b5bab2fefc4c>, (Erişim Tarihi: 26 Ocak 2025)
- [47] I. A. E. Agency, “Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation”, International Atomic Energy Agency, Text, 2005. Erişim: 22 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.iaea.org/publications/7230/protection-of-the-environment-from-the-effects-of-ionizing-radiation>
- [48] J. A. M. Bleeker, J. Geiss ve M. Huber, Ed., "The century of space science." Dordrecht ; Boston: *Kluwer Academic Publishers*, 2001.
- [49] M. S. Longair, *The cosmic century: a history of astrophysics and cosmology*. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2006.
- [50] The Pierre Auger Collaboration vd., “Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} eV”, *Science*, c. 357, sy 6357, ss. 1266-1270, Eyl. 2017, doi: 10.1126/science.aan4338.
- [51] S. H. Benedict, “Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students”, *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, c. 5, sy 3, ss. 91-92, Tem. 2004, doi: 10.1120/jacmp.2021.25315.
- [52] I. Couret, “Unit 2 Uses of Radiation" Nuclear Regulatory Commission (.gov), Education for Student, 2015”.
- [53] T. Henriksen “Radiation and Health”, Biophysics group at UiO, ISBN 0-415-27162-2, 2003.
- [54] F. W. Aston, “Atoms and isotopes”, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, c. 43, sy 23, ss. 598-600, Haz. 1924, doi: 10.1002/jctb.5000432306.
- [55] European Commission vd., *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. International Atomic Energy Agency, 2014. doi: 10.61092/iaea.u2pu-60vm.
- [56] M. Charles, “Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2006 Report, Volume 1--Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B”, *Radiation Protection Dosimetry*, c. 138, sy 2, ss. 187-189, Şub. 2010, doi: 10.1093/rpd/ncp262.

- [57] *Sources and effects of ionizing radiation. 1: Sources*, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, no. 2000. New York: United Nations, 2001.
- [58] E. B. Podgorsak ve I. A. E. Agency, *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers And Students*. International Atomic Energy Agency, 2005. Erişim: 30 Ocak 2025. [Çevrimiçi].Erişimadresi:<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=c0d2950299a6707e21f71739acc27eef>
- [59] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, 3rd ed. New York: Wiley, 2000.
- [60] F. M. Khan, *The Physics of Radiation Therapy*, Fourth. Lippincott Williams & Wilkins, 2009.[Çevrimiçi].Erişimadresi:<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=1179855f1e6ad1a933969ca341787c1f>, (Erişim Tarihi: 30 Ocak 2025)
- [61] “Radiation in Daily-life”, Nuclear Safety Commission of Japan, The disaster prevention countermeasure of Nuclear Institutes (in Japanese), June 2001.
- [62] S. J, *Radiation protection: A guide for scientists, regulators and physicians*, 4ed bs. Harvard,2002.[Çevrimiçi].Erişimadresi:<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=5e2be4d2f4ad017e25594188b3df4bc3>, (Erişim Tarihi: 29 Ocak 2025)
- [63] R. A. Powsner ve E. R. Powsner, *Essentials of Nuclear Medicine Physics*, 1st bs. 1998. [Çevrimiçi].Erişimadresi:<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=920cc0c06b860aa044a7d0c28773bf3f> (Erişim Tarihi: 29 Ocak 2025)
- [64] G. & Critchfield ve C. L. Gamow, *Theory of Atomic Nucleus and Nuclear Energy-Sources*. Oxford University Press, 1949. Erişim: 09 şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=a080d614ef45e78b41b3913417e1fccf>
- [65] E. B. Podgorşak ve International Atomic Energy Agency, Ed., *Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.
- [66] B. Alım, E. şakar, A. Baltakesmez, İ. Han, M. I. Sayyed ve L. Demir, “Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I”, *Radiation Physics and Chemistry*, c. 166, s. 108455, Oca. 2020, doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108455.
- [67] D. R. M. Muneer, “The calibration in %T has the drawbacks of being non- linear and readings decreasing with increasing concentration.”, Al-Mustaqbal University College Department of Medical Device Technologies Engineering, *Clinical Chemistry*, sy 4., 2021

- [68] D. F. Jackson ve D. J. Hawkes, “X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures”, *Physics Reports*, c. 70, sy 3, ss. 169-233, Nis. 1981, doi: 10.1016/0370-1573(81)90014-4.
- [69] P. Kaur, K. J. Singh, S. Thakur, P. Singh ve B. S. Bajwa, “Investigation of bismuth borate glass system modified with barium for structural and gamma-ray shielding properties”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, c. 206, ss. 367-377, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.saa.2018.08.038.
- [70] D. A. Aykaç, “Radioactivity and Measurement”, NEU Faculty of Medicine Dep of biophysics, Page 2. (Erişim Tarihi: Şubat 2025)
- [71] D. K. M. Salih, “Types of Radiation Units & Doses”, Mustansiriyah University, media lectures, (Erişim Tarihi: Şubat 2025)
- [72] J. A. Gannon, “History and Development of Epoxy Resins”, içinde *High Performance Polymers: Their Origin and Development*, R. B. Seymour ve G. S. Kirshenbaum, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 1986, ss. 299-307. doi: 10.1007/978-94-011-7073-4_29.
- [73] D. M. Saçak, "Basamaklı Polimerizasyon", *Polimer Kimyasına Giriş*, A.Ü.F.F. Döner Sermaye işletmesi Yayınları, Ankara, 1998, sayfa 70
- [74] S. K. Gupta ve A. Kumar, “Epoxy Polymers”, içinde *Reaction Engineering of Step Growth Polymerization*, içinde The Plenum Chemical Engineering Series, Boston, MA: Springer US, 1987, ss. 365-385. doi: 10.1007/978-1-4613-1801-9_10.
- [75] J. Pascault ve R. J. J. Williams, “General Concepts about Epoxy Polymers”, içinde *Epoxy Polymers*, 1. bs, J. Pascault ve R. J. J. Williams, Ed., Wiley, 2010, ss. 1-12. doi: 10.1002/9783527628704.ch1.
- [76] J. Pascault ve R. J. J. Williams, “Thermosetting Polymers”, içinde *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing*, 1. bs, E. Saldívar-Guerra ve E. Vivaldo-Lima, Ed., Wiley, 2013, ss. 519-533. doi: 10.1002/9781118480793.ch28.
- [77] D. M. Kulich, S. K. Gagar, V. Lowry, ve R. Stepień, “Acrylonitrile–Butadiene–Styrene (ABS) Polymers”, içinde *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 1. bs, Kirk-Othmer, Ed., Wiley, 2003. doi: 10.1002/0471238961.01021911211209.a01.pub2.
- [78] V. E. Dreval, G. B. Vasil’ev, E. K. Borisenkova, ve V. G. Kulichikhin, “Rheological and mechanical properties of ABS plastics prepared by bulk polymerization”, *Polym. Sci. Ser. A*, c. 48, sy 3, ss. 338-345, Mar. 2006, doi: 10.1134/S0965545X06030151.

- [79] H. Harman, "Hidrometalurjik Yöntemlerle Bakır Kimyasalları Üreten Tesislerden Çıkan Bakır İçerikli Atık Suların İyon Değişimi Metodu ile Temizlenmesi", YL Tez, "İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 292055
- [80] M. I. Sayyed, I. A. El-Mesady, A. S. Abouhaswa, A. Askin, ve Y. S. Rammah, "Comprehensive study on the structural, optical, physical and gamma photon shielding features of B₂O₃-Bi₂O₃-PbO-TiO₂ glasses using WinXCOM and Geant4 code", *Journal of Molecular Structure*, c. 1197, ss. 656-665, 2019, doi: 10.1016/j.molstruc.2019.07.100.
- [81] A. Agirre, M. Aguirre ve J. R. Leiza, "Characterization of grafting properties of ABS latexes: ATR-FTIR vs NMR spectroscopy", *Polymer*, c. 253, s. 124997, Haz. 2022, doi: 10.1016/j.polymer.2022.124997.
- [82] H. Al-Ghamdi, M. Elsafi, M. I. Sayyed, A. H. Almuqrin ve P. Tamayo, "Performance of newly developed concretes incorporating WO₃ and barite as radiation shielding material", *Journal of Materials Research and Technology*, c. 19, ss. 4103-4114, Tem. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.06.145.
- [83] United States. National Bureau of Standards, *Copper wire tables*. Washington Govt. Print.Off,1914.[Çevrimiçi].Erişimadresi:<http://archive.org/details/copperwiretables31unituoft>, (Erişim Tarihi: 27 Şubat 2025)
- [84] M. Y. Ethem, Bakırın Özellikleri, Alaşımları ve Mineralleri, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, Cilt: 13 Sayı: 2, 3-7, 1974.
- [85] N. Tamzok, Bakır Madenciliğindeki Son Gelişmeler ve Türkiye, TMMOG Sekreteri Maden Mühendisleri Odası, 2005
- [86] T. Christie ve B. Brathwaite, Mineral Commodity Report 4-Copper, Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd, New Zealand Petroleum and Minerals, 2001
- [87] R. İzbirak, "Türkiyede Madencilik", *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, ss. 213-226, doi: 10.1501/Dtcfder_0000000340, 1945
- [88] H. Aral, "The Stratigraphy, Sedimentology And Origin of The Copper (Silver-Uranium) Deposits Found in an Area Between Delice And Yerköy (Middle Anatolia)", *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, Cilt: 110 Sayı: 110, 39-60, 1990
- [89] ICSG, "What Is Copper", International Copper Study Group. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://icsg.org/what-is-copper/>, (Erişim Tarihi: 21 Şubat 2025)
- [90] J. M. Cork ve R. W. Pidd, "The Absorption of Gamma-Radiation in Copper and Lead", *Phys. Rev.*, c. 66, sy 9-10, ss. 227-230, Kas. 1944, doi: 10.1103/PhysRev.66.227.

- [91] O. K. Köksal, E. Cengiz, A. Tozar, İ. H. Karahan ve G. Apaydın, “A Comprehensive Research on Gamma-Ray Attenuation Characteristics of the Metal-Doped Hap and Natural Animal Bone”, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Oca. 2020, doi: 10.17714/gumusfenbil.555646.
- [92] Md. A. B. Aziz, Md. F. Rahman, ve Md. M. H. Prodhan, “Comparison of Lead, Copper and Aluminium as Gamma Radiation Shielding Material through Experimental Measurements and Simulation Using MCNP Version 4c”, *Int J Cont Res Rev*, c. 9, sy 08, ss. 20193-20206, Ağu. 2018, doi: 10.15520/ijcrr/2018/9/08/584.
- [93] C. Helvacı, “Bor Yataklarını İçeren Neojen Havzalarının Jeolojik Özellikleri: Yatakların Genel Değerlendirmesi ve Gelecek Öngörüsü, Türkiye”, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, c. 0, sy 151, Ara. 2015, doi: 10.19076/mta.75175.
- [94] C. Helvacı, Minerals | Borates, *Encyclopedia of Geology*, Elsevier, 2005, ss. 510-522. doi: 10.1016/B0-12-369396-9/00279-3.
- [95] D. Bayrak, F. Bozbeyoğlu, D. Çağlan, İ. Cengiz ve A. Çelebi, Özelleştirmenin Odağındaki Bor Raporu, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası*, 2020.
- [96] M. Benderdour, T. Van Bui, K. Hess, A. Dicko, F. Belleville, ve B. Dousset, “Effects of boron derivatives on extracellular matrix formation”, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, c. 14, sy 3, ss. 168-173, Eki. 2000, doi: 10.1016/S0946-672X(00)80006-1.
- [97] A. Oskarsson, “Barium”, içinde *Handbook on the Toxicology of Metals*, Elsevier, 2015, ss. 625-634. doi: 10.1016/B978-0-444-59453-2.00029-9.
- [98] R. Kresse vd., “Barium and Barium Compounds”, içinde *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 1. bs, Wiley, 2007. doi: 10.1002/14356007.a03_325.pub2.
- [99] H. Ak, M. Aksoy ve A. Konuk, “Dünya Barit Madenciliğinin Durumu ve Piyasalarda Rekabet Düzeyinin Gelişimi”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 29, sy 2, ss. 210-223, Ağu. 2021, doi: 10.31796/ogummf.934462.
- [100] G. Wu, H. Zhou, ve S. Zhu, “Precipitation of barium sulfate nanoparticles via impinging streams”, *Materials Letters*, c. 61, sy 1, ss. 168-170, Oca. 2007, doi: 10.1016/j.matlet.2006.04.096.
- [101] P. M. Dibello, J. L. Manganaro, E. R. Aguinaldo, T. Mahmood, ve C. B. Lindahl, “Barium Compounds”, içinde *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 1. bs, Kirk-Othmer, Ed., Wiley, 2003. doi: 10.1002/0471238961.0201180904090205.a01.pub2.

- [102] C. B. Moore, Principles of Geochemistry, Fourth Edition, *John Wiley & Sons, Inc, Hong Kong, 1982*
- [103] L. Ferrante, *Handbook of Applied Polymer Processing Technology*, 1. bs. içinde Plastics Engineering. CRC Press, 1996. Erişim: 11 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=7fefb3f83f4fcfd53db0abdefdc497e6>
- [104] “Polymer Casting-EngineeringTechnology.org”, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://engineeringtechnology.org/manufacturing/casting-processes/polymer-casting/>, (Erişim Tarihi: 21 Şubat 2025)
- [105] B. Kandola, J. Ebdon ve K. Chowdhury, “Flame Retardance and Physical Properties of Novel Cured Blends of Unsaturated Polyester and Furan Resins”, *Polymers*, c. 7, sy 2, ss. 298-315, Şub. 2015, doi: 10.3390/polym7020298.
- [106] J. Bouvier ve O. H. Campanella, *Extrusion Processing Technology: Food and Non-Food Biomaterials*, 1. bs. Wiley, 2014. doi: 10.1002/9781118541685.
- [107] R. J. Crawford ve R. J. Crawford, *Plastics engineering*, 3rd ed. Oxford Boston: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [108] Z. Tadmor ve C. G. Gogos, “Principles of polymer Processing”, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, New Jersey, 2006.
- [109] R. Brown ve Rapra Technology Limited, Ed., *Handbook of polymer testing: short-term mechanical tests*, 1. publ. içinde Rapra polymer testing series. Shawbury: Rapra Technology Ltd, 2002.
- [110] J. R. Fried, *Polymer science and technology*, 3. ed. içinde Always Learning. Upper Saddle River, New Jersey Munich [u.a.]: Prentice Hall, 2014.
- [111] R. O. Ebewele, *Polymer science and technology*. Boca Raton: CRC Press, Printed in the United States of America 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0, 2000.
- [112] J. R. Fried, *Polymer science and technology*, Third edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2014.
- [113] D. F. Erdemir ve A. G. G. Hekimoğlu, “Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü”, 2024
- [114] A. G. E. Çakır, “Termal Analizler Deneyi”, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü, 2024.

- [115] R. Bhargava, S.-Q. Wang, ve J. L. Koenig, “FTIR Microspectroscopy of Polymeric Systems”, içinde *Liquid Chromatography / FTIR Microspectroscopy / Microwave Assisted Synthesis*, c. 163, içinde *Advances in Polymer Science*, vol. 163. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, ss. 137-191. doi: 10.1007/b11052.
- [116] L.-H. Lee, *Characterization of metal and polymer surfaces*. içinde Academic Press rapid manuscript reproductions. New York: Academic Press, 1977.
- [117] A. Alkan, “Taramalı Elektron Mikroskopisi”, 22. *Ulusal Elektron Mikroskopi Kongresi Emk 2015 Çalıştay, Kocaeli, 2015*.
- [118] K. A. T. Kapakin, “Scanning- Elektron Mikroskobu”, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, Cilt: 17 Sayı: 1, 55- 58, 2006.
- [119] M. B. Heaney, “Electrical Conductivity and Resistivity”, *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays* (pp.7-1 to 7-14), Chapter: 7, Publisher: CRC PressEditors: John G. Webster, 2004.
- [120] E. Yelda, “Cfrp Kompozit Malzemelerin Elektriksel ve Termal Davranışlarının DeneySEL ve Nümerik Olarak İncelenmesi”. Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 2017.
- [121] G. Baschek, G. Hartwig, ve F. Zahradnik, “Effect of water absorption in polymers at low and high temperatures”, *Polymer*, c. 40, sy 12, ss. 3433-3441, Haz. 1999, doi: 10.1016/S0032-3861(98)00560-6.
- [122] D20 Committee, *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States doi: 10.1520/D0570-98R10E01.
- [123] H. Judawisastra, R. D. R. Sitohang, L. Marta, ve Mardiyati, “Water absorption and its effect on the tensile properties of tapioca starch/polyvinyl alcohol bioplastics”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, c. 223, s. 012066, Tem. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/223/1/012066.
- [124] M. A. A. Najafabadi, S. N. Khorasani, ve J. M. Esfahani, “Water Absorption Behaviour and Mechanical Properties of High Density Polyethylene/ Pistachio Shell Flour Nanocomposites in Presence of Two Different Uv Stabilizers”, *Polymers and Polymer Composites*, c. 22, sy 4, ss. 409-416, May. 2014, doi: 10.1177/096739111402200407.
- [125] V. K. Thakur ve A. S. Singha, “Mechanical and Water Absorption Properties of Natural Fibers/Polymer Biocomposites”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, c. 49, sy 7, ss. 694-700, Haz. 2010, doi: 10.1080/03602551003682067.

- [126] G. R. Blake ve K. H. Hartge, “Particle Density”, içinde *SSSA Book Series*, A. Klute, Ed., Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 2018, ss. 377-382. doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14.
- [127] M. Bulut, “Sertlik Ölçme Metodları ve Cihazları”, *Metal Dünyası Dergisi*, 2013
- [128] “Plastic Gloss: Definition, Units, Test Methods & Material Table”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/gloss>, (Erişim Tarihi: 05 Haziran 2024)
- [129] “Prof. Dr. Bilsen Beşergil: Polimerler; Analiz Yöntemleri (analysis methods)”, Prof. Dr. Bilsen Beşergil. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/1_21.html, (Erişim Tarihi: 05 Haziran 2024.)
- [130] Q. Yong, J. Chang, Q. Liu, F. Jiang, D. Wei ve H. Li, “Matt Polyurethane Coating: Correlation of Surface Roughness on Measurement Length and Gloss”, *Polymers*, c. 12, sy 2, s. 326, Şub. 2020, doi: 10.3390/polym12020326.
- [131] S. Dönmez, “Radiation Detection and Measurement”, *nts*, c. 3, sy 3, ss. 172-177, Ara. 2017, doi: 10.4274/nts.2017.018.
- [132] D. Demir, A. Un, ve Y. Sahin, “Efficiency Determination for NaI (Tl) Detectors in the 23 keV to 1333 keV Energy Range”, *Instrumentation Science & Technology*, c. 36, sy 3, ss. 291-301, Mar. 2008, doi: 10.1080/10739140801944092.
- [133] M. Abd-Elzaher, M. S. Badawi, A. El-Khatib, ve A. A. Thabet, “Determination of Full Energy Peak Efficiency of NaI(Tl) Detector Depending on Efficiency Transfer Principle for Conversion Form Experimental Values”, *WJNST*, c. 02, sy 03, ss. 65-72, 2012, doi: 10.4236/wjnst.2012.23011.
- [134] C. D. Zerby ve H. S. Moran, “Calculation of the pulse-height response of NaI(Tl) scintillation counters”, *Nuclear Instruments and Methods*, c. 14, ss. 115-124, Kas. 1961, doi: 10.1016/0029-554X(61)90062-3.
- [135] C. M. Salgado, L. E. B. Brandão, R. Schirru, C. M. N. A. Pereira, ve C. C. Conti, “Validation of a NaI(Tl) detector’s model developed with MCNP-X code”, *Progress in Nuclear Energy*, c. 59, ss. 19-25, Ağu. 2012, doi: 10.1016/j.pnucene.2012.03.006.
- [136] A. Jehouani, R. Ichaoui, ve M. Boulkheir, “Study of the NaI(Tl) efficiency by Monte Carlo method”, *Applied Radiation and Isotopes*, c. 53, sy 4-5, ss. 887-891, Kas. 2000, doi: 10.1016/S0969-8043(00)00254-2.
- [137] A. Bozkurt, “Radyodiyagnostikte Monte Carlo Tekniği”, *XI. Ulusal Medikal Fizik Kongresi*, 14 -18 Kasım 2007.

- [138] H. S. Gökçe, B. Canbaz Öztürk, N. F. Çam, ve Ö. Andiç-Çakır, “Natural radioactivity of barite concrete shields containing commonly used supplementary materials”, *Construction and Building Materials*, c. 236, s. 117569, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117569.
- [139] V. Srivastava ve A. Verma, “Mechanical Behaviour of Copper and Aluminium Particles Reinforced Epoxy Resin Composites”, c. 2015, ss. 84-89, Oca. 2015, doi: 10.5923/j.materials.20150504.02.
- [140] M. N. F. Pargi, T. P. Leng, S. Husseinsyah, ve C. K. Yeoh, “The Effect of Coarse Particle Size on the Properties of Recycled Copper-Filled Epoxy Composites”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, c. 54, sy 3, ss. 265-269, Şub. 2015, doi: 10.1080/03602559.2014.977053.
- [141] X. Zeng, Z. Zhang, Y. Pan, Y. Zhang ve L. Hou, “Supplemental Material-Epoxy-based composites with enhanced thermal properties through collective effect of different particle size fillers”, Haz. 2022, doi: 10.25384/SAGE.19982331.v1.
- [142] M. R. Ambika ve N. Nagaiah, “Gamma Shielding Ability and Chemical Stability of Polyester-Based Polymer Composites”, 2017.
- [143] I. H. Tavman, “Thermal and mechanical properties of copper powder filled poly (ethylene) composites”, *Powder Technology*, c. 91, sy 1, ss. 63-67, Nis. 1997, doi: 10.1016/S0032-5910(96)03247-0.
- [144] A. Białkowska, M. Bakar, W. Kucharczyk ve I. Zarzyka, “Hybrid Epoxy Nanocomposites: Improvement in Mechanical Properties and Toughening Mechanisms-A Review”, *Polymers*, c. 15, sy 6, s. 1398, Mar. 2023, doi: 10.3390/polym15061398.
- [145] B. Pukanszky ve G. Vörös, “Mechanism of interfacial interactions in particulate filled composites”, *Composite Interfaces*, c. 1, sy 5, ss. 411-427, Oca. 1993, doi: 10.1163/156855493X00266.
- [146] A. S. Luyt, J. A. Molefi, ve H. Krump, “Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites”, *Polymer Degradation and Stability*, c. 91, sy 7, ss. 1629-1636, Tem. 2006, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.09.014.
- [147] M. E. J. Dekkers ve D. Heikens, “Crazing and shear deformation in glass bead-filled glassy polymers”, *J Mater Sci*, c. 20, sy 11, ss. 3873-3880, Kas. 1985, doi: 10.1007/BF00552375.

- [148] J. Chen, Y.-J. Dong, F.-L. Jin, ve S.-J. Park, “Flexural Properties and Electrical Conductivity of Epoxy Resin/Carbon Fiber Cloth/Metallic Powder Composites”, *Macromol. Res.*, c. 27, sy 1, ss. 10-13, Oca. 2019, doi: 10.1007/s13233-019-7006-7.
- [149] A. E. Ellakwa, M. A. Morsy, ve A. M. El-Sheikh, “Effect of Aluminum Oxide Addition on the Flexural Strength and Thermal Diffusivity of Heat-Polymerized Acrylic Resin”, *Journal of Prosthodontics*, c. 17, sy 6, ss. 439-444, Ağu. 2008, doi: 10.1111/j.1532-849X.2008.00318.x.
- [150] A. V. Eremin ve A. V. Burkov, “Flexural properties of copper-filled carbon fiber reinforced polymers”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, c. 1118, sy 1, s. 012034, Mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1118/1/012034.
- [151] S. Saber-Samandari, H. O. Gulcan, S. Saber-Samandari ve M. Gazi, “Efficient Removal of Anionic and Cationic Dyes from an Aqueous Solution Using Pullulan-graft-Polyacrylamide Porous Hydrogel”, *Water Air Soil Pollut*, c. 225, sy 11, s. 2177, Kas. 2014, doi: 10.1007/s11270-014-2177-5.
- [152] P. Maity, S. Kasisomayajula, V. Parameswaran, S. Basu, ve N. Gupta, “Improvement in surface degradation properties of polymer composites due to pre-processed nanometric alumina fillers”, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, c. 15, sy 1, ss. 63-72, 2008, doi: 10.1109/T-DEI.2008.4446737.
- [153] H. Lee, *Handbook Of Epoxy Resins*. 1967. Erişim: 05 Mart 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.141978>
- [154] H. R. Kricheldorf, O. Nuyken, ve G. Swift, *Handbook of polymer synthesis*, 2nd ed. içinde *Plastics engineering* (Marcel Dekker, Inc.). New York: Marcel Dekker, 2005. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://catdir.loc.gov/catdir/enhancements/fy0647/2005276158-d.html>, (Erişim Tarihi: 05 Mart 2025)
- [155] D. Roşu, C. N. Caşcaval, F. Mustăţă, ve C. Ciobanu, “Cure kinetics of epoxy resins studied by non-isothermal DSC data”, *Thermochimica Acta*, c. 383, sy 1-2, ss. 119-127, Şub. 2002, doi: 10.1016/S0040-6031(01)00672-4.
- [156] M. G. Lu, M. J. Shim, ve S. W. Kim, “Dynamic DSC Characterization of Epoxy Resin by Means of the Avrami Equation”, 1999.
- [157] K. A. Jasim vd., “The effects of copper additives on the glass transition temperature and hardness for epoxy resin”, *PIE*, c. 13, sy 2, s. 163, 2019, doi: 10.1504/PIE.2019.099357.
- [158] K. Wu, Y.-K. Zhang, K. Zhang, M.-M. Shen, ve Y. Hu, “Effect of microencapsulation on thermal properties and flammability performance of epoxy composite”, *Journal of*

Analytical and Applied Pyrolysis, c. 94, ss. 196-201, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.jaap.2011.12.009.

- [159] J. Yu, X. Huang, C. Wu, X. Wu, G. Wang, ve P. Jiang, “Interfacial modification of boron nitride nanoplatelets for epoxy composites with improved thermal properties”, *Polymer*, c. 53, sy 2, ss. 471-480, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.polymer.2011.12.040.
- [160] Z. Liu, Z. Li, X. Zhao, L. Zhang ve Q. Li, “Highly Efficient Flame Retardant Hybrid Composites Based on Calcium Alginate/Nano-Calcium Borate”, *Polymers*, c. 10, sy 6, s. 625, Haz. 2018, doi: 10.3390/polym10060625.
- [161] B. Yang vd., “A novel liquid imidazole-copper (II) complex as a thermal latent curing agent for epoxy resins”, *Polymer*, c. 178, s. 121586, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.polymer.2019.121586.
- [162] L. Chen ve Y.-Z. Wang, “A review on flame retardant technology in China. Part I: development of flame retardants”, *Polym. Adv. Technol.*, s. n/a-n/a, 2009, doi: 10.1002/pat.1550.
- [163] D. C. B. Alves, R. Silva, D. Voiry, T. Asefa ve M. Chhowalla, “Copper nanoparticles stabilized by reduced graphene oxide for CO₂ reduction reaction”, *Mater Renew Sustain Energy*, c. 4, sy 1, s. 2, Mar. 2015, doi: 10.1007/s40243-015-0042-0.
- [164] M. Sookhakian, M. A. Mat Teridi, G. B. Tong, P. M. Woi, M. Khalil, ve Y. Alias, “Reduced Graphene Oxide/Copper Nanoparticle Composites as Electrochemical Sensor Materials for Nitrate Detection”, *ACS Appl. Nano Mater.*, c. 4, sy 11, ss. 12737-12744, Kas. 2021, doi: 10.1021/acsanm.1c03351.
- [165] C. Hao vd., “High-performance epoxy composites reinforced with three-dimensional Al₂O₃ ceramic framework”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 127, s. 105648, Ara. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105648.
- [166] N. A. Mohd Radzuan, A. B. Sulong, ve J. Sahari, “A review of electrical conductivity models for conductive polymer composite”, *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 42, sy 14, ss. 9262-9273, Nis. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.045.
- [167] J. H. Hubbell, “Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV”, Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1969, s. NBS NSRDS 29. doi: 10.6028/NBS.NSRDS.29.
- [168] M. J. Berger, “XCOM: photon cross sections on a personal computer”, U.S. Department Of Commerce National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1987

- [169] E.-S. A. Waly, M. A. Fusco, ve M. A. Bourham, "Gamma-ray mass attenuation coefficient and half value layer factor of some oxide glass shielding materials", *Annals of Nuclear Energy*, c. 96, ss. 26-30, Eki. 2016, doi: 10.1016/j.anucene.2016.05.028.
- [170] U. A. Tarim, E. N. Ozmutlu, S. Yalcin, O. Gundogdu, D. A. Bradley, ve O. Gurler, "Evaluation of gamma-ray attenuation properties of bismuth borate glass systems using Monte Carlo method", *Radiation Physics and Chemistry*, c. 140, ss. 403-405, Kas. 2017, doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.03.031.
- [171] S. A. Madkour, S. Tirkes ve U. Tayfun, "Development of barite-filled acrylonitrile butadiene styrene composites: Mechanical, thermal, melt-flow and morphological characterizations", *Applied Surface Science Advances*, c. 3, s. 100042, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.apsadv.2020.100042.
- [172] D. M. Bigg, "Mechanical properties of particulate filled polymers", *Polymer Composites*, c. 8, sy 2, ss. 115-122, Nis. 1987, doi: 10.1002/pc.750080208.
- [173] A. I. Ebunu, Y. A. Olanrewaju, O. Ogolo, A. R. Adetunji ve A. P. Onwualu, "Barite as an industrial mineral in Nigeria: occurrence, utilization, challenges and future prospects", *Heliyon*, c. 7, sy 6, s. e07365, Haz. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07365.
- [174] A. Shenavar ve F. Abbasi, "Morphology, thermal, and mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene/carbon black composites", *J of Applied Polymer Sci*, c. 105, sy 4, ss. 2236-2244, Ağu. 2007, doi: 10.1002/app.26219.
- [175] Universiti Sains Malaysia, Ed., *Constructing future higher education scenarios: insights from Universiti Sains Malaysia*. [Minden], Pulau Pinang: Penerbit Universiti Sains Malaysia: Distributors, Universiti Sains Malaysia Co-operative Bookshop: MPH Distributors, 2007.
- [176] J. Sandler, M. S. P. Shaffer, T. Prasse, W. Bauhofer, K. Schulte, ve A. H. Windle, "Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties", *Polymer*, c. 40, sy 21, ss. 5967-5971, Eki. 1999, doi: 10.1016/S0032-3861(99)00166-4.
- [177] V. Selimoğlu, "Kalsine Üleksitin Sulu Ortamda Karbonatlaştırılması ve Sodyum Pentaborat Eldesi", *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, Cilt: 3 Sayı: 2, 153-163, 2018
- [178] J. Li, F. Chen, L. Yang, L. Jiang, ve Y. Dan, "FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, c. 184, ss. 361-367, Eyl. 2017, doi: 10.1016/j.saa.2017.04.075.

- [179] Y. Shen, C. Li, X. Zhu, A. Xie, L. Qiu ve J. Zhu, “Study on the preparation and formation mechanism of barium sulphate nanoparticles modified by different organic acids”, *J Chem Sci*, c.119, sy 4, ss. 319-324, Tem. 2007, doi: 10.1007/s12039-007-0043-3.
- [180] V. Ramaswamy, R. M. Vimalathithan ve V. Ponnusamy, “Synthesis and characterization of BaSO₄ nano particles using micro emulsion technique”, *Pelagia Research Library*, Advances in Applied Science Research, 1 (3): 197-204 2010.
- [181] S. D. Dogan, U. Tayfun, ve M. Dogan, “New route for modifying cellulosic fibres with fatty acids and its application to polyethylene/jute fibre composites”, *Journal of Composite Materials*, c. 50, sy 18, ss. 2477-2485, Ağu. 2016, doi: 10.1177/0021998315604706.
- [182] S. Stella Mary, S. Shahil Kirupavathy, P. Mythili, ve R. Gopalakrishnan, “Growth and characterization of sodium pentaborate [Na(H₄B₅O₁₀)] single crystals”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, c. 71, sy 4, ss. 1311-1316, Ara. 2008, doi: 10.1016/j.saa.2008.04.021.
- [183] J. Cañavate, P. Pagés, J. Saurina, X. Colom, ve F. Carrasco, “Determination of small interactions in polymer composites by means of FTIR and DSC”, *Polymer Bulletin*, c. 44, sy 3, ss. 293-300, Nis. 2000, doi: 10.1007/s002890050605.
- [184] F. Hacıoğlu, Production and Characterization of Flame-Retardant Poly (Butylene Terephthalate) Composites Containing Boron Compounds, *Polymer-Plastics Technology and Materials* 63(16):1-11, 2024, DOI:10.1080/25740881.2024.2368879
- [185] G. S. Ananthapadmanabha ve V. V. Deshpande, “Thermal Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene Composites” *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, India, 2016.
- [186] Y. Liu, J.-X. Deng, ve C.-Y. Pan, “Synthesis and Structural Manipulation of a Polyanionic Zincoborate [Zn(H₂O)₆](NO₃)₂·[Zn{B₃O₃(OH)₄}₂(H₂O)₄].2H₂O by the Molten Salt Method and its Potential Application as a Flame Retardant”, *J Clust Sci*, c. 32, sy 2, ss. 469-477, Mar. 2021, doi: 10.1007/s10876-020-01806-7.
- [187] B. Ramaraj, “Mechanical and thermal properties of ABS and leather waste composites”, *J of Applied Polymer Sci*, c. 101, sy 5, ss. 3062-3066, Eyl. 2006, doi: 10.1002/app.24113.
- [188] A. Bentis, A. Boukhriss, ve S. Gmouh, “Flame-retardant and water-repellent coating on cotton fabric by titania–boron sol–gel method”, *J Sol-Gel Sci Technol*, c. 94, sy 3, ss. 719-730, Haz. 2020, doi: 10.1007/s10971-020-05224-z.
- [189] S. Stella Mary, S. Shahil Kirupavathy, P. Mythili, ve R. Gopalakrishnan, “Growth and characterization of sodium pentaborate [Na(H₄B₅O₁₀)] single crystals”, *Spectrochimica*

Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, c. 71, sy 4, ss. 1311-1316, Ara. 2008, doi: 10.1016/j.saa.2008.04.021.

- [190] M. Dogan, S. D. Dogan, L. A. Savas, G. Ozcelik ve U. Tayfun, “Flame Retardant Effect of Boron Compounds in Polymeric Materials”, *Composites Part B: Engineering*, c. 222, s. 109088, Eki. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109088.
- [191] A. Gungor, “The Physical And Mechanical Properties Of Polymer Composites Filled With Fe-Powder”, *J. Appl. Polym. Sci.*, c. 99, sy 5, ss. 2438-2442, Mar. 2006, doi: 10.1002/app.22637.
- [192] F. Akman vd., “Gamma, Charged Particle And Neutron Radiation Shielding Capacities of Ternary Composites Having Polyester/Barite/Tungsten Boride”, *Radiation Physics and Chemistry*, c. 212, s. 111120, Kas. 2023, doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.111120.
- [193] A.Kumar, “Gamma ray Shielding Properties of PbO-Li₂O-B₂O₃ Glasses”, *Radiation Physics and Chemistry*, c.136, ss.50-53,2017,doi:10.1016/j.radphyschem.2017.03.023.
- [194] K. Singh vd., “Gamma-Ray Attenuation Coefficients in Bismuth Borate Glasses”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, c. 194, sy 1, ss. 1-6, Tem. 2002, doi: 10.1016/S0168-583X(02)00498-6.
- [195] M. I. Sayyed, “Half Value Layer, Mean Free Path And Exposure Buildup Factor For Tellurite Glasses With Different Oxide Compositions”, *Journal of Alloys and Compounds*, c. 695, ss. 3191-3197, Şub. 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.11.318.
- [196] T. Singh, A. Kaur, J. Sharma ve P. S. Singh, “Gamma Rays’ Shielding Parameters for Some Pb-Cu Binary Alloys”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, c. 21, sy 5, ss. 1078-1085, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.jestch.2018.06.012.
- [197] S. Singh, A. Kumar, D. Singh, K. S. Thind ve G. S. Mudahar, “Barium–Borate–Flyash Glasses: as Radiation Shielding Materials”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, c. 266, sy 1, ss. 140-146, Oca. 2008, doi: 10.1016/j.nimb.2007.10.018.
- [198] M. I. Sayyed, H. O. Tekin, E. E. Altunsoy, S. S. Obaid ve M. Almatari, “Radiation Shielding Study of Tellurite Tungsten Glasses With Different Antimony Oxide As Transparent Shielding Materials Using MCNPX Code”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, c. 498, ss. 167-172, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.jnoncrsol.2018.06.022.
- [199] N. Chanthima vd., “Development of BaO–ZnO–B₂O₃ Glasses as a Radiation Shielding Material”, *Radiation Physics and Chemistry*, c. 137, ss. 72-77, Ağu. 2017, doi: 10.1016/j.radphyschem.2016.03.015.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Muş ve Aydın'da tamamladı. 2011 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Polimer Mühendisliği Bölümü'nden 2016 yılında mezun oldu. Aynı yıl Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Polimer Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve 2019 yılında mezun oldu. 2020 yılında Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Polimer Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı ve 2025 yılında doktora eğitimini tamamladı.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

[1] Mutlu Derya, Karagöz İdris, Sepetcioglu Harun, Akar Tarım Urkiye, Gurler Orhan (2023) Synergizing Electrical, Mechanical, And Radiation Shielding Properties of Dendritic Copper Filled Epoxy Polymer Composites, Doi.Org/10.1016/J.Radphyschem.2023.111416

DİĞER YAYIN VE ESERLER

[1] Karagöz İdris, Mutlu Derya, Çavuşoğlu Aysu, Çelebi Mithat, Ceylan Özgür (2024) A Comprehensive Study on the Effect of Small Rates of Walnut Shell And Talc Fillers on the Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Epoxy Hybrid Composites, Biomass Conversion and Biorefinery, DOI:10.1007/s13399-024-05660-9

[2] Mutlu Derya, Karagöz İdris (2023). Akıllı Malzeme Olarak Polimerler ve Uygulamaları. Konya Muhendislik Bilimleri Dergisi, 11(1), 274-299., Doi: 10.36306/Konjes.1106955 (Kontrol No: 8232392) (2023)

[3] Adıbelli Üzeyir, Mutlu Derya, Çakır Yiğit Neşe, Karagöz İdris (2022). Ceviz Kabuğu Dolgulu Epoksi Hibrit Kompozit Malzemelerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu. 10th International Fiber and Polymer Research Symposium (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:7735024) (2022)

[4] Mutlu Derya, Karahan Toprakçı Aylin, Toprakçı Ozan, Investigation of Electrical Properties of Printed Polymer Composites. 4th International Congress On Engineering Architecture and Design (2019)

[5] Mutlu Derya, Karahan Toprakçı Aylin, Toprakçı Ozan, Mechanical Characterization of Polyvinylidene Fluoride (Pvdf) Electrospun Nanocomposite Fibers. 2nd International Conference on Material Science And Technology in Cappadocia (Imstec'17) (2017)