

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM-BOR-KARBÜR KOMPOZİT MALZEMELERİN RADYASYON KARŞISINDAKİ
DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ, XCOM BİLGİSAYAR PROGRAMI İLE İNCELENMESİ VE
YENİ BİR HİBRİT KOMPOZİT RADYASYON ZIRH MALZEMESİ ÖNERİSİ**

DOKTORA TEZİ

Ayhan AKKAŞ

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM-BOR-KARBÜR KOMPOZİT MALZEMELERİN RADYASYON KARŞISINDAKİ
DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ, XCOM BİLGİSAYAR PROGRAMI İLE İNCELENMESİ VE
YENİ BİR HİBRİT KOMPOZİT RADYASYON ZİRH MALZEMESİ ÖNERİSİ**

DOKTORA TEZİ

**Ayhan AKKAŞ
(301082006)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Beril TUĞRUL

ARALIK 2015

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301082006 numaralı Doktora Öğrencisi Ayhan AKKAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ALÜMİNYUM-BOR-KARBÜR KOMPOZİT MALZEMELERİN RADYASYON KARŞISINDAKİ DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ, XCOM BİLGİSAYAR PROGRAMI İLE İNCELENMESİ VE YENİ BİR HİBRİT KOMPOZİT RADYASYON ZIRH MALZEMESİ ÖNERİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. A. Beril TUĞRUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa DEMİR
İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Nesrin ALTINSOY
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ş. İpek KARAASLAN
Yeditepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : **27 Ekim 2015**
Savunma Tarihi : **10 Aralık 2015**

Eşime ve canım kızıma,

ÖNSÖZ

Bu çalışma radyasyondan korunma açısından önemli bir konu olan radyasyon zırhlamasına yönelik olarak hazırlanmış ve tez kapsamında konuyla ilgili kapsamlı bilgiler verilmiştir.

Doktora tez çalışması boyunca bana bilgi birimikinden yararlanma fırsatı veren, bu alandaki engin tecrübelerini esirgemeyen, hep örnek aldığım çok değerli danışman hocam Prof. Dr. A. Beril TUĞRUL' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Malzeme temininde desteklerini aldığım Prof. Dr. Okan ADDEMİR, Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU ve Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU hocalarıma ve Araş. Gör. Onur TAZEGÜL ile Bengü AĞACAN' a teşekkürü borç bilirim.

Çalışma boyunca laboratuvar çalışmalarımnda yardımlarını esirgemeyen Dr. Bülent BÜYÜK ve Araş. Gör. Ertuğrul DEMİR' e, İ.T.Ü. TRIGA Mark-II Reaktörü İşletme Müdürü Dr. Muhittin OKKA ve Sağlık Fizikçisi Yük.Lis. Sahip KIZILTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Ç.N.A.E.M sağlık fiziği bölümünde çalışan mesai arkadaşlarıma, mekanik atölyede benimle birlikte emek veren, desteklerini hiç unutamayacağım tekniker Ahmet GÜLCAN ve Necmi GÜVEN' e çok teşekkür ederim.

Son olarak doktora çalışmam boyunca manevi olarak beni hep destekleyen, hep yanımda olan sevgili eşim Zahide Akkaya AKKAŞ' a, varlığı ile hayatıma anlam katan güzel kızım Duru AKKAŞ' a ve beni bugünlere gelmemde emekleri büyük olan annem Mahigül AKKAŞ ve babam Hüseyin AKKAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 2015

Ayhan AKKAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxv
ÖZET.....	xxix
SUMMARY	xxxiii
1. GİRİŞ	1
2. RADYASYON KAYNAKLARI	11
2.1 Radyoaktivitenin Keşfi ve Kısa Tarihçesi.....	11
2.2 Radyoaktif Bozunma Kanunu ve Doğal Radyoaktif Seriler	11
2.3 Radyasyon Tipleri	14
2.3.1 Alfa radyasyonu	14
2.3.2 Beta radyasyonu	14
2.3.2.1 β^- bozunması veya elektron yayınımlı	15
2.3.2.2 β^+ bozunması veya pozitron yayınımlı.....	16
2.3.2.3 Çekirdeğin elektron yakalaması.....	16
2.3.3 Gama radyasyonu.....	16
2.3.4 Nötronlar	17
2.4 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi	18
2.4.1 Alfa parçacıklarının madde ile etkileşimi	18
2.4.2 Beta parçacıklarının madde ile etkileşimi	19
2.4.3 Gama radyasyonunun madde ile etkileşimi	20
2.4.3.1 Fotoelektrik olay	21
2.4.3.2 Compton olayı.....	22
2.4.3.3 Çift oluşumu.....	23
2.4.3.4 Gama radyasyonu lineer zayıflatma katsayısı.....	23
2.4.4 Nötronların madde ile etkileşimi.....	24
2.4.4.1 Nötronların etkileşim mekanizmaları.....	25
2.4.4.2 Elastik saçılma	25
2.4.4.3 Elastik olmayan saçılma.....	25
2.4.4.4 Nötronların soğurulması	26
2.4.4.5 Nötron reaksiyon tesir kesiti	26
2.5 Radyasyon Kaynakları	27
2.5.1 Alfa ve beta kaynakları	27
2.5.2 Gama kaynakları	28
2.5.3 Nötron kaynakları.....	29
2.5.3.1 Radyoizotop nötron kaynakları	29
2.5.3.2 (α,n) Nötron kaynakları.....	29
2.5.3.3 (γ,n) Nötron kaynakları	30

2.5.3.4 Nükleer reaktörler	30
2.5.3.5 Hızlandırıcılar.....	31
3. RADYASYON ZIRH MALZEMLERİ	33
3.1 Genel Radyasyon Zırh Malzemeleri	33
3.1.1 Gama radyasyonu zırh malzemeleri	33
3.1.1.1 Kurşun	34
3.1.1.2 Demir.....	35
3.1.1.3 Tungsten	36
3.1.1.4 Seyreltilmiş uranyum	36
3.1.2 Nötron zırh malzemeleri.....	36
3.1.2.1 Su.....	37
3.1.2.2 Polietilen (CH ₂) _n	37
3.1.2.3 Grafit	38
3.1.2.4 Beton	38
3.1.2.5 Bor katkılı malzemeler	39
3.1.3 Beta radyasyonu zırh malzemeleri	39
3.2 Özel Zırh Malzemeleri	40
3.2.1 %5 Bor katkılı polietilen	40
3.2.2 Bizmut macun	41
3.2.3 Lityum polietilen	41
3.2.4 Polietilen tabanlı (Poly-Biz) gama zırh malzemesi.....	42
3.2.5 Bor-silikon malzeme	42
3.2.6 Tungsten alaşımları	43
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	45
4.1 Çalışılan Malzemeler.....	45
4.2 Deney Düzenekleri	50
4.2.1 Gama deney düzeneği	51
4.2.1.1 Gama radyoizotop kaynakları	52
4.2.1.2 Gama dedektör sistemi	52
4.2.1.3 Gama kolimatörleri	53
4.2.2 Nötron deney düzeneği.....	53
4.2.2.1 Nötron kaynağı.....	54
4.2.2.2 Nötron kolimatörleri.....	55
4.2.2.3 Nötron zırh elemanları	55
4.2.2.4 Nötron dedektörü.....	56
4.2.3 Beta deney düzeneği.....	57
4.2.3.1 Beta radyoaktif kaynak.....	57
4.2.3.2 Beta koruyucu zırh ve kolimatör.....	58
4.2.3.3 Beta dedektörü.....	58
4.2.4 Yoğunluk ölçüm kiti.....	59
4.2.5 Mikrometre ile kalınlık tayini	60
4.3 Deneylerin Yapılışı	60
4.3.1 Gama deneylerinin yapılışı.....	60
4.3.2 Nötron deneylerinin yapılışı.....	61
4.3.3 Beta deneylerinin yapılışı.....	61
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	63
5.1 Gama Radyoizotop Kaynakları ile Yapılan Deney Sonuçları.....	64
5.1.1 Al-B ₄ C kompozit malzemeleri için Am-241 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları	64

5.1.1.1 3 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	64
5.1.1.2 53 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	65
5.1.1.3 75-150 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	66
5.2.1.4 150-250 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	67
5.2.1.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	68
5.1.2 Al-B ₄ C kompozit malzemeleri için Cs-137 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları	69
5.1.2.1 3 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	69
5.1.2.2 53 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	70
5.1.2.3 75-150 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	71
5.1.2.4 150-250 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	72
5.1.2.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	73
5.1.3 Al-B ₄ C kompozit malzemeleri için Co-60 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları	74
5.1.3.1 3 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	75
5.1.3.2 53 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	76
5.1.3.3 75-150 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	77
5.1.3.4 150-250 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	78
5.1.3.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	79
5.2 Al-B ₄ C Kompozit Malzemeleri için Sr-90 Beta Radyoizotop Kaynağı ile Yapılan Deney Sonuçları	80
5.2.1 3 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	80
5.2.2 53 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler ..	81
5.2.3 75-150 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler .	82
5.2.4 150-250 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	83
5.2.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler .	84
5.3 Al-B ₄ C Kompozit Malzemelerin Pu-Be Nötron Kaynağı ile Yapılan Deney Sonuçları	85
5.3.1 3 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	85
5.3.2 53 µm ortalama tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler ..	86
5.3.3 75-150 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler .	87
5.3.4 150-250 µm arası tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler	88
5.3.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B ₄ C içeren Al-B ₄ C kompozit malzemeler .	89
5.4 Çalışılan Kompozit Malzemelerin Gama, Beta ve Nötron Radyasyonu ile Yapılan Deneyler Sonucu Lineer Zayıflatma Katsayılarının Hesaplanması ...	90

5.5 Deneyisel Sonuçlardan Hareketle Çalışılan Malzemelerin Yarı Tabaka Değer Kalınlıklarının Tayini.....	92
5.5.1 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini.....	93
5.5.2 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini	94
5.5.3 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini.....	94
5.5.4 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini.....	95
5.5.5 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Pu-Be nötron kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini.....	96
6. ÇALIŞILAN MALZEMELERİN ZAYIFLATMA KATSAYILARININ TAYİNİ	99
6.1 XCOM Bilgisayar Programının Tanıtımı.....	99
6.2 Çalışılan Al-B ₄ C Kompozit Malzemelerin XCOM Programı ile Teorik Olarak Hesaplanan Kütle Zayıflatma Katsayılarının, YDK ve ODK'larının Tayini	100
6.2.1 Al-B ₄ C kompozit malzemelerin Am-241 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri	101
6.2.2 Al-B ₄ C kompozit malzemelerin Cs-137 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri	102
6.2.3 Al-B ₄ C kompozit malzemelerin Co-60 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri	103
6.3 Çalışılan Al-B ₄ C kompozit malzemelerin deneyisel ve teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayı değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi.....	104
6.4 Al-B ₄ C Kompozit Malzemede B ₄ C Parçacık Boyutunun Kütle Zayıflatma Katsayısı Değerlerine Etkisi.....	106
6.4.1 Al-B ₄ C kompozit malzemede B ₄ C parçacık boyutunun Am-241 gama radyoaktif kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi ..	106
6.4.2 Al-B ₄ C kompozit malzemede B ₄ C parçacık boyutunun Cs-137 gama radyoaktif kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi	107
6.4.3 Al-B ₄ C kompozit malzemede B ₄ C parçacık boyutunun Co-60 gama radyoaktif kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi	108
7. YENİ ÖNERİLEN HİBRİT KOMPOZİT MALZEME.....	109
7.1 Alüminyum- Bor karbür- Tungsten İçerikli Malzemeler	109
7.2 Önerilen Malzeme ile Yapılan Deney Sonuçları.....	112
7.2.1 Gama radyoizotop kaynaklarla yapılan deney sonuçları.....	113
7.2.1.1 Al-WC-B ₄ C kompozit malzemeleri için Am-241 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları	113
7.2.1.2 Al-WC-B ₄ C kompozit malzemeleri için Cs-137gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları	114
7.2.1.3 Al-WC-B ₄ C kompozit malzemeleri için Co-60 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları.....	115

7.2.2 Al-WC-B ₄ C kompozit malzemeleri için Sr-90 beta radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları	116
7.2.3 Al-WC-B ₄ C kompozit malzemeleri için Pu-Be nötron kaynağı ile yapılan deney sonuçları.....	117
7.3 Çalışılan Kompozit Malzemelerin Gama, Beta ve Nötron Radyasyonu ile Yapılan Deneyler Sonucu Lineer Zayıflatma Katsayılarının Hesaplanması .	118
7.4 Deneysel Sonuçlardan Hareketle Çalışılan Malzemelerin Yarı Tabaka Değer Kalınlıklarının Tayini.....	119
7.4.1 Deneysel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini	119
7.4.2 Deneysel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini.....	120
7.4.3 Deneysel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini	120
7.4.4 Deneysel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini	121
7.4.5 Deneysel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Pu-Be nötron kaynağına ilişkin ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini.....	121
7.5 Çalışılan Al-B ₄ C-WC Hibrit Kompozit Malzemelerin XCOM Programı ile Teorik Olarak Hesaplanan Kütle Zayıflatma Katsayılarının, YDK ve ODK'lerinin Tayini.....	121
7.5.1 Al-B ₄ C-WC hibrit kompozit malzemelerin Am-241 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri	122
7.5.2 Al-B ₄ C-WC hibrit kompozit malzemelerin Cs-137 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri.....	122
7.5.3 Al-B ₄ C-WC hibrit kompozit malzemelerin Co-60 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri	123
7.5.4 Çalışılan malzemeler için XCOM ile yapılan teorik çalışmalarla elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	123
7.5.5 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi	125
7.5.5.1 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi.....	125
7.5.5.2 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Cs 137 gama radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi.....	126
7.5.5.3 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi.....	126
7.5.5.4 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Sr 90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi.....	127
7.5.5.5 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Pu-Be nötron radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi.....	128

7.5.5.6 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin gama, nötron ve beta radyasyonuna ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi	128
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	131
KAYNAKLAR.....	137
EKLER.....	143
ÖZGEÇMİŞ	153

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
RoHS	: Restriction of Hazardous Substances
OPEC	: Petrol İhraç Eden Ülkeler Birliği
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
SEM	: Scanning Electron Microscope
XRD	: X-ray Diffraction
NaI	: Sodium Iodide
NH-3	: Nötron Howitzer-3
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
ÇNAEM	: Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
TRIGA	: Trainning Research Isotopes General Atomic
YDK	: Yarı Değer Kalınlık Değerı
ODK	: Ondabir Kalınlık Değerı

SEMBOLLER

μ	: Lineer zayıflatma katsayısı
μ_m	: Kütle zayıflatma katsayısı
σ_s	: Nötron saçılma tesir kesiti
σ_α	: Nötron soğurma tesir kesiti
I	: Radyasyon şiddeti
$t_{1/2}$	: Fiziksel yarıömür
λ	: Parçalanma sabiti
Σ	: Makroskopik tesir kesiti
h	: Planc sabiti
ρ	: Yoğunluk
ν	: Frekans
E_f	: Gama fotonu enerjisi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Nötronların enerjiye bağlı sınıflandırılması	17
Çizelge 2.2 : Bazı alfa kaynakları	27
Çizelge 2.3 : Bazı saf beta kaynakları	28
Çizelge 2.4 : Gama ışını yayan bazı kaynakların genel özellikleri.....	28
Çizelge 2.5 : (α, n) nötron kaynakları	29
Çizelge 2.6 : (γ, n) nötron kaynakları	30
Çizelge 3.1 : Bazı malzemelere ait lineer zayıflatma katsayıları (cm^{-1}).....	34
Çizelge 3.2 : Kurşun malzemesine ait bazı özellikler	34
Çizelge 3.3 : Demir malzemesine ait bazı özellikler	35
Çizelge 3.4 : Bazı elementlerin termal nötronlara saçılma ve soğurma tesir kesiti ..	37
Çizelge 3.5 : Su' ya ait bazı özellikler	37
Çizelge 3.6 : Polietilen' e ait bazı özellikler.....	38
Çizelge 3.7 : Sıradan ve ağır betonun bazı özellikleri	39
Çizelge 3.8 : Farklı beta kaynakları için menzil değerleri.....	40
Çizelge 3.9 : %5 bor katkılı polietilen malzemenin bazı fiziksel özellikleri.....	40
Çizelge 3.10 : Bizmut içerikli kil malzemenin bazı fiziksel özellikleri	41
Çizelge 3.11 : Lityum katkılı polietilen malzemenin bazı fiziksel özellikleri.....	41
Çizelge 3.12 : Bizmut içerikli polietilen malzemenin bazı fiziksel özellikleri.....	42
Çizelge 3.13 : Bor-silikon içerikli malzemenin bazı fiziksel özellikleri	42
Çizelge 3.14 : Gama radyasyonu zırhlanmasında kullanılan bazı tungsten alaşımlarının özellikleri	43
Çizelge 4.1 : Alüminyum-bor karbür malzemelerin hacimsel içeriği ve kodlanması	46
Çizelge 4.2 : Alüminyum-bor karbür kompozit malzemelere ait teorik ve deneysel yoğunluk değerleri	47
Çizelge 4.3 : Deneylerde kullanılan gama radyoizotop kaynaklar ve özellikleri	52
Çizelge 4.4 : Pu-Be nötron kaynağının (NH_3 , Nötron Howitzer) özellikleri.....	54
Çizelge 4.5 : PM1401K sintilasyon detektörün genel özellikleri	56
Çizelge 4.6 : Beta radyoizotop kaynak ve bazı özellikleri	57
Çizelge 4.7 : RadEye marka AB100 model detektörün genel özellikleri.....	59
Çizelge 5.1 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Am-241 radyoaktif gama kaynağı için bağlı sayım - kalınlık değerleri	64
Çizelge 5.2 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı için bağlı sayım - kalınlık değerleri	65
Çizelge 5.3 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı için bağlı sayım - kalınlık değerleri	66
Çizelge 5.4 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı için bağlı sayım - kalınlık değerleri	67

Çizelge 5.5 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri	68
Çizelge 5.6 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Cs-137 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri	70
Çizelge 5.7: Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri	71
Çizelge 5.8 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	72
Çizelge 5.9 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	73
Çizelge 5.10 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	74
Çizelge 5.11 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Co-60 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	75
Çizelge 5.12 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	76
Çizelge 5.13 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	77
Çizelge 5.14 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	78
Çizelge 5.15 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerinCo-60 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	79
Çizelge 5.16 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	80
Çizelge 5.17 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	81
Çizelge 5.18 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	82
Çizelge 5.19 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	83
Çizelge 5.20 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	84

Çizelge 5.21 : Al-05-03, Al-10-03, A1-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.....	85
Çizelge 5.22 : Al-05-53, Al-10-53, A1-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.....	86
Çizelge 5.23 : Al-05-75, Al-10-75, A1-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.....	87
Çizelge 5.24 : Al-05-150, Al-10-150, A1-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.....	88
Çizelge 5.25 : Al-05-500, Al-10-500, A1-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.....	89
Çizelge 5.26 : Çalışılan kompozit malzemelerin Am-241, Cs-137 ve Co-60 gama radyoizotop kaynaklar kullanılarak hesaplanan deneysel lineer zayıflatma katsayıları.....	90
Çizelge 5.27 : Çalışılan kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı ile Sr-90 beta kaynak kullanılarak hesaplanan deneysel makroskopik tesir kesit değerleri ve lineer zayıflatma katsayıları.....	92
Çizelge 5.28 : Çalışılan kompozit malzemelerin Am-241gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	93
Çizelge 5.29 : Çalışılan kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	94
Çizelge 5.30 : Çalışılan kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	95
Çizelge 5.31 : Çalışılan kompozit malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	96
Çizelge 5.32 : Çalışılan kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	97
Çizelge 6.1 : Çalışılan kompozit malzemelere ait XCOM programından elde edilen Am-241 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.....	101
Çizelge 6.2 : Çalışılan kompozit malzemelere ait XCOM programından elde edilen Cs-137 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.....	102
Çizelge 6.3 : Çalışılan kompozit malzemelere ait XCOM programından elde edilen Co-60 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.....	103
Çizelge 6.4 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Am-241 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması.	104
Çizelge 6.5 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Cs-137 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması.	105
Çizelge 6.6 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Co-60 radyasyonuna karşı teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması.	106
Çizelge 7.1 : Alüminyum-bor karbür-tungsten karbür malzemelerin hacimsel içeriği ve kodlanması.....	110
Çizelge 7.2 : Alüminyum-bor karbür-tungsten karbür kompozit malzemelere ait bazı mekanik özellikler.....	110

Çizelge 7.3 : Al-0505, Al-1000, Al-1005, Al-0510 ve Al-0010 kodlu kompozit malzemelerinin Am-241 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri	113
Çizelge 7.4 : Al-0505, Al-1000, Al-1005, Al-0510 ve Al-0010 kodlu kompozit malzemelerinin Cs-137 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	114
Çizelge 7.5 : Al-0505, Al-1000, Al-1005, Al-0510 ve Al-0010 kodlu kompozit malzemelerinin Co-60 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	115
Çizelge 7.6 : Al-0505, Al-1000, Al-1005, Al-0510, Al-0010 kodlu kompozit malzemelerin ve saf alüminyumun Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.....	116
Çizelge 7.7 : Al-1000, Al-1005, Al-0505, Al-0510 ve Al-0010 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron howitzer (NH-3) kaynağı için kalınlık-bağıl sayım değerleri	117
Çizelge 7.8 : Çalışılan kompozit malzemelerin Am-241, Cs-137 ve Co-60 gama radyoizotop kaynaklar için hesaplanan deneysel lineer zayıflatma katsayıları değerleri	119
Çizelge 7.9 : Çalışılan kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı ile Sr-90 beta kaynağı için hesaplanan deneysel makroskopik tesir kesit değeri ve lineer zayıflatma katsayıları değerleri.....	119
Çizelge 7.10 : Çalışılan kompozit malzemelerin Am-241gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	120
Çizelge 7.11 : Çalışılan kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	120
Çizelge 7.12 : Çalışılan kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	120
Çizelge 7.13 : Çalışılan kompozit malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	121
Çizelge 7.14 : Çalışılan kompozit malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri	121
Çizelge 7.15 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Am-241 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.....	122
Çizelge 7.16 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Cs-137 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.....	123
Çizelge 7.17 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Co-60 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.....	123
Çizelge 7.18 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Am-241 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması. 124	
Çizelge 7.19 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Cs-137 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması. 124	
Çizelge 7.20 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Co-60 radyasyonuna karşı teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması. 124	
Çizelge 7.21 : Çalışılan tüm kompozit malzemelerin gama, nötron ve beta zırhlamasına karşı davranışının beraberce YDK değerlendirmesi ...	129
Çizelge A.1 : Al-B ₄ C kompozitlerin Am-241 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.....	143

Çizelge A.2 : Al-B ₄ C kompozitlerin Cs-137 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları	144
Çizelge A.3 : Al-B ₄ C kompozitlerin Co-60 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları	146
Çizelge A.4 : Al-B ₄ C kompozitlerin Pu-Be nötron kaynağı ile yapılan deney sonuçları	147
Çizelge A.5 : Al-B ₄ C kompozitlerin Sr-90 beta kaynağı ile yapılan deney sonuçları	148
Çizelge A.6 : Al-B ₄ C-WC kompozitlerin Am-241 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları	150
Çizelge A.7 : Al-B ₄ C-WC kompozitlerin Cs-137 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları	150
Çizelge A.8 : Al-B ₄ C-WC kompozitlerin Co-60 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları	151
Çizelge A.9 : Al-B ₄ C-WC kompozitlerin Pu-Be nötron kaynağı ile yapılan deney sonuçları	151
Çizelge A.10 : Al-B ₄ C-WC kompozitlerin Sr-90 beta kaynağı ile yapılan deney sonuçları	152

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Uranyum-238 serisi bozunum şeması	13
Şekil 2.2 : Aktinyum-238 serisi bozunum şeması..	13
Şekil 2.3 : Toryum-232 serisi bozunum şeması.	14
Şekil 2.4 : ³⁶ Cl radyoizotopunun beta yayılım spektrumu.....	15
Şekil 2.5 : Radyoaktif bozunmada gama ışınlarının yayımlanması	16
Şekil 2.6 : Alfa parçacıklarının kaynaktan çıktıktan sonra izlediği yol.....	18
Şekil 2.7 : Farklı alfa kaynaklarının havada kat ettikleri mesafeye bağlı malzeme içerisinde meydana getirdikleri iyon çifti miktarı.	19
Şekil 2.8 : Beta parçacığının yayımladığı bremsstrahlung ışıması	20
Şekil 2.9 : Gama fotonlarının alüminyum ile etkileşim mekanizmaları.....	21
Şekil 2.10: Fotoelektrik olay	22
Şekil 2.11: Compton olayı	23
Şekil 2.12: Çift oluşumu	24
Şekil 2.13: Gelen radyasyonun madde tarafından tutulması	24
Şekil 2.14: Elastik saçılma	25
Şekil 2.15: Elastik olmayan saçılma	26
Şekil 2.16: Fisyon reaksiyonu oluşum şeması	31
Şekil 4.1 : Çalışılan alüminyum-bor karbür kompozit bir malzemenin genel görüntüsü.....	46
Şekil 4.2 : %20 katkılı a) ortalama 3 µm b) ortalama 53µm c) 75-150 µm d) 150-250 µm ve e) ortalama 500 µm tane boyutlu B ₄ C içeren kompozit malzemelerin SEM fotoğrafları.....	47
Şekil 4.3 : %20 katkılı a) ortalama 3 µm b) ortalama 53µm c) 75-150 µm d) 150-250 µm ve e) ortalama 500 µm tane boyutlu B ₄ C içeren kompozit malzemelerin XRD grafikleri.....	49
Şekil 4.4 : Gama deney düzeneğinin görünümü.....	51
Şekil 4.5 : Gama deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	51
Şekil 4.6 : a) Canberra marka NaI dedektör ve önyükselteç'in görüntüsü b) gama dedektör sisteminin diğer elemanları	52
Şekil 4.7 : Kurşundan yapılmış kolimatörlerin görüntüsü.....	53
Şekil 4.8 : a) Nötron deney düzeneği görünümü, b) Nötron deney düzeneği şematik gösterimi.....	54
Şekil 4.9 : Nötron howitzer' in a) dış görünüşü b) iç yapısı	54
Şekil 4.10 : Nötron deney düzeneğinde kolimatör ve zırh elemanı olarak kullanılan borik asit.....	55
Şekil 4.11 : Polimaster marka PM1401K model çok amaçlı dedektörün görüntüsü.	56
Şekil 4.12 : Beta deney düzeneğinin a) görünümü ve b) şematik gösterimi	57
Şekil 4.13 : Sr-90 beta kaynağının görünümü	58
Şekil 4.14 : Pleksiglass malzemeden yapılmış koruyucu zırh malzeme	58
Şekil 4.15 : RadEye marka AB100 model α,β ölçüm dedektörü.....	59
Şekil 4.16 : Radwag marka hassas terazi.....	59
Şekil 4.17 : MİTUTOYO Digimatic marka mikrometre....	60

Şekil 5.1	: Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.	65
Şekil 5.2	: Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.	66
Şekil 5.3	: Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.	67
Şekil 5.4	: Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.	68
Şekil 5.5	: Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.	69
Şekil 5.6	: Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.	70
Şekil 5.7	: Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.	71
Şekil 5.8	: Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.	72
Şekil 5.9	: Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.	73
Şekil 5.10	: Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.	74
Şekil 5.11	: Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.	75
Şekil 5.12	: Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.	76
Şekil 5.13	: Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.	77
Şekil 5.14	: Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.	78
Şekil 5.15	: Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.	79
Şekil 5.16	: Beta parçacıklarının soğurulması ile oluşturulan logaritmik sayım-kalınlık grafiğinde ekstrapolasyon yapılması	80
Şekil 5.17	: Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.	81
Şekil 5.18	: Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.	82
Şekil 5.19	: Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.	83
Şekil 5.20	: Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.	84
Şekil 5.21	: Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.	85
Şekil 5.22	: Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.	86
Şekil 5.23	: Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.	87
Şekil 5.24	: Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.	88
Şekil 5.25	: Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.	89

Şekil 5.26 :	Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.....	90
Şekil 6.1 :	XCOM bilgisayar programının ara yüzü.....	100
Şekil 6.2 :	B ₄ C bileşiğinin farklı tane boyutları için Al-B ₄ C kompozit malzemelerde Am-241 gama kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerinin değişimi.....	107
Şekil 6.3 :	B ₄ C bileşiğinin farklı tane boyutları için Al-B ₄ C kompozit malzemelerde Cs-137 gama kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerinin değişimi.....	107
Şekil 6.4 :	B ₄ C bileşiğinin farklı tane boyutları için Al-B ₄ C kompozit malzemelerde Co-60 gama kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerinin değişimi.....	108
Şekil 7.1 :	Alüminyum- bor karbür- tungsten karbür kompozit malzemelerin genel görüntüleri	110
Şekil 7.2 :	a) Al-1000 b) Al-0505 c) Al-0010 d) Al-1005 e) Al-0510 kodlu malzemelere ait SEM görüntüleri	111
Şekil 7.3 :	a) Al-1000 b) Al-0505 c) Al-0010 d) Al-1005 e) Al-0510 kodlu malzemelere ait XRD grafikleri	112
Şekil 7.4 :	Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.....	114
Şekil 7.5 :	Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.....	115
Şekil 7.6 :	Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.	116
Şekil 7.7 :	WC katkılı Al-B ₄ C kompozit malzemelerin Sr-90 beta kaynağı karşısında zayıflatma eğrileri	117
Şekil 7.8 :	Al-1000, Al-1005, Al-0505, Al-0510 ve Al-0010 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron howitzer (NH-3) kaynağı karşısında zayıflatma eğrileri.	118
Şekil 7.9 :	Al-B ₄ C ve Al-B ₄ C-WC kompozit malzemelerinin Am-241 radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.....	125
Şekil 7.10 :	Al-B ₄ C ve Al-B ₄ C-WC kompozit malzemelerinin Cs-137 radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.....	126
Şekil 7.11 :	Al-B ₄ C ve Al-B ₄ C-WC kompozit malzemelerinin Co-60 radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.....	127
Şekil 7.12 :	Al-B ₄ C ve Al-B ₄ C-WC kompozit malzemelerinin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.....	127
Şekil 7.13 :	Al-B ₄ C ve Al-B ₄ C-WC kompozit malzemelerinin Pu-Be nötron radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.....	128
Şekil 7.14 :	Çalışılan kompozit malzemelerin yüksek olan YDK değerlerine göre karşılaştırılması	130
Şekil 7.15 :	Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin yoğunluk değerlerine karşı yüksek olan YDK değerlerine göre karşılaştırılması.	130

ALÜMİNYUM-BOR-KARBÜR KOMPOZİT MALZEMELERİN RADYASYON KARŞISINDAKİ DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ, XCOM BİLGİSAYAR PROGRAMI İLE İNCELENMESİ VE YENİ BİR HİBRİT KOMPOZİT RADYASYON ZIRH MALZEMESİ ÖNERİSİ

ÖZET

Bu doktora çalışmasında, farklı tiplerde iyonizan radyasyon çeşitlerinin zırhlanmasında kullanılmak üzere alüminyum-bor karbür kompozit malzemenin davranışının incelenmesi ve bu alanda kullanılabilecek yeni bir malzemenin önerilmesi amaçlanmıştır.

İyonizan radyasyon kaynakları endüstri, tıp, tarım ve araştırma amaçlı olarak birçok alanda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Radyasyon, kullanım alanına uygun olarak farklı tip ve enerjilerde olabilmektedir. Görevi gereği radyasyonla çalışan personelin ve toplum üyesi kişilerin radyasyondan korunmasının en önemli metodlarından biri radyasyon kaynağının veya kullanıldığı alanın zırhlanmasıdır. Radyasyonun tip ve enerjisinin değişmesi madde ile etkileşmesinde farklılıklar ortaya koyduğundan, zırhlama için kullanılan malzemeler de farklılık göstermektedir.

Nükleer reaktörler, uzay çalışmaları gibi alanlarda aynı anda farklı tip radyasyona maruz kalılabilmektedir. Karışık radyasyon alanlarında tek bir malzeme ile etkin zırhlama yapmak, zırhlama malzemesinin kapladığı hacmin azalmasında, gerekse de maliyet açısından fayda sağlamaktadır. Bununla beraber, radyasyon zırhlamasında en yaygın kullanılan malzeme olan kurşunun toksit etkilere sahip olması, insan sağlığı açısından olumsuz etkilere neden olmaktadır.

Öte yandan, Avrupa Birliği'nin yayınladığı RoHS direktifleri sonucunda kurşunun birçok alanda kullanılması yasaklanmış ve ileri süreçte tamamen kurşun kullanımından vazgeçilmesi planlanmaktadır. Bu çerçevede, bu doktora çalışmasında, kurşuna alternatif oluşturabilecek, farklı radyasyon tiplerinin zırhlanmasında etkili bir malzemenin önerilmesi benimsenmiştir.

DeneySEL çalışmalarda öncelikle alüminyum-bor karbür (Al-B₄C) malzeme bu doktora tezinin özgünlüğü içinde incelenmiştir. Bu malzemeler dört farklı hacimsel yüzde oranında, %5, %10, %15 ve %20 ve beş farklı tane boyutunda ortalama 3 µm, ortalama 53µm, 75-150 µm arası, 150-250µm arası ve ortalama 500 µm olmak üzere B₄C bileşiği içermektedir. Malzemelerin tümü için gama, nötron ve beta radyasyonları karşısındaki zırhlama davranışları incelenmiştir. Bir başka deyişle, B₄C bileşiğine ait tane boyutunun zırhlama davranışı üzerine etkisi ile gama, nötron ve beta radyasyonları ile yapılan çalışmalar doktora çalışmasının özgün kısımlarıdır.

Alüminyum-bor karbür (Al-B₄C) malzeme ile elde edilen sonuçlardan yararlanarak alüminyum-bor karbür-tungsten karbür kompozit malzemesi ile çalışılmış, gama, nötron ve beta radyasyonları karşısındaki zırhlama davranışları incelenmiştir. Bu

husus, doktora tezinin malzeme seçimi konusundaki önemli özgünlüğünü oluşturmaktadır.

Gama radyasyonu ile çalışmada, farklı gama radyasyon enerjilerinde yayınım yapan üç farklı radyoizotop kaynak kullanılmıştır. Bu yolla bağlı olarak Am-241 ile düşük enerjide (60 keV), Co-60 ile yüksek enerjide (1,17 ve 1,33 MeV' lik iki pik ortalaması 1,25 MeV) ve Cs-137 ile orta enerjilerde (662 keV) gama radyasyonu ile çalışma yapılmıştır. Nötron radyasyonu ile çalışmada Howitzer içerisinde bulunan Pu-Be nötron kaynağı kullanılmıştır. Bu kaynağın yaydığı nötronların ortalama enerjisi yaklaşık 4 MeV' dir. Beta radyasyonu ile yapılan çalışmada ise, kullanılan radyoizotop kaynak Sr/Y-90'dır. Söz konusu bu radyoaktif kaynaktan çıkan maksimum beta enerjisi 2,28 MeV' dir.

Deneyisel çalışmalar kapsamında transmisyon tekniği kullanılarak gama ve beta radyasyonları kullanılarak her bir malzeme için lineer zayıflatma ile kütle zayıflatma katsayısı değerleri, nötron radyasyonu için ise makroskopik tesir kesiti değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler yardımı ile her bir malzeme için kullanılan radyasyon tipine bağlı olarak Yarı-Değer Kalınlık (YDK) değerleri bulunmuştur. Ayrıca, gama kütle zayıflatma katsayı değerlerinin teorik olarak bulunması için, uluslararası boyutta kabul gören XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik hesaplamalar yapılmıştır. Kompozit malzemelere ait deneyisel olarak bulunan gama kütle zayıflatma katsayı değerleri, XCOM bilgisayar programından elde edilen teorik değerlerle karşılaştırılmıştır.

Gama kaynakları ile yapılan deney sonuçlarına göre; Al-B₄C bileşiği içerisinde B₄C bileşiğine ait tane boyutunun artması, kompozit malzemenin radyasyon tutuculuğunu azaltmaktadır. Gama radyasyonu enerjisi arttıkça tane boyutunun etkisi azalmaktadır. Bununla beraber kompozit malzeme içerisindeki B₄C hacimsel yüzde içeriğinin artması gama radyasyonunu tutuculuğunu azaltmaktadır. Bu azalma düşük enerjili gama radyasyonunda daha belirgin, yüksek enerjili gama radyasyonu için daha düşüktür. Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemesi için deneyisel çalışmada malzeme içerisindeki WC miktarı arttıkça, gama radyasyonuna karşı malzemelerin tutuculuğu da artmıştır. Bununla beraber, gama radyasyonu karşısında XCOM programından elde edilen teorik kütle zayıflatma katsayıları ile deneyisel olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayıları birbirleri ile uyumlu çıkmıştır. İki değer arasındaki yüzde fark, büyük çoğunluğu %3'ün altında, tümü % 6' nın altında kalmıştır.

Nötron deneyleri sonucunda, Al-B₄C kompozit bileşiği için elde edilen sonuçlara göre kompozit malzeme içerisindeki B₄C bileşiğinin hacimsel yüzde oranı ve tane boyutunun artması nötron tutuculuğunu arttırdığı saptanmıştır. Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemeleri içinde hacimsel yüzde olarak B₄C ve WC oranlarının artması nötron tutuculuğunu arttırdığı görülmüştür.

Beta deneyleri sonucunda, Al-B₄C kompozit bileşiği içerisindeki B₄C hacimsel yüzde miktarının artması, malzemenin beta tutuculuğunu arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemeleri içerisindeki B₄C ve WC bileşiklerinin hacimsel yüzde miktarlarının beraber artışı beta tutuculuğunu arttırdığı saptanmıştır. Deneyisel olarak kompozit malzemeler için bulunan kütle zayıflatma katsayıları, saf alüminyum için bulunan kütle zayıflatma katsayısı ile karşılaştırılmıştır.

Al-B₄C kompozit malzemeler içerisine belirli oranlarda WC bileşiğinin katılması farklı radyasyon kaynakları karşısında zırlama etkisini arttırması ile birlikte kompozit malzemelerin yoğunluğunu da arttırmaktadır. Özellikle uzay teknolojisi,

uçak teknolojisi, nano teknoloji gibi alanlarda kullanılan malzemelerin yoğunluğu da önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda bileşik içerisine katılan WC miktarı kısıtlı kalması gerekmektedir. Deneysel sonuçlar sonucunda Al-B₄C kompozit malzeme içerisine %5 ve %10 oranında katılan WC ile oluşturulan hibrit kompozit malzemelerin karışık radyasyon alanlarında etkin bir zırhlama malzemesi olarak kullanılabilirliği bu doktora tezinin özgünlüğü kapsamında gösterilmiştir.

ASSESSMENT OF BEHAVIOR FOR ALUMINUM-BORON CARBIDE COMPOSITE MATERIALS AGAINST RADIATION, INVESTIGATION BY XCOM SOFTWARE PROGRAM, SUGGESTION OF A NEW HYBRID COMPOSITE RADIATION SHIELDING MATERIAL

SUMMARY

This doctorate thesis aimed to assess how aluminum-boron-carbide composite material to be used for shielding different types of ionizing radiation behaves and to suggest a new material for this purpose.

Ionizing radiation sources are widely used in various industrial, medical, agricultural and research fields. Depending on its purpose of use, radiation may be of various types and at various energy levels. One of the most important methods to protect people working involve radiation and the public from radiation is to shield the source of radiation or the workplace where it is used. Since radiation's interaction with a material depends on its type and energy level, there are various materials used for shielding.

Such fields as nuclear reactor and aerospace may cause exposure to various types of radiation at the same time. Providing efficient shielding by means of a single material in such multiple radiation areas is useful for decreasing the volume of the shielding material and lowering the costs of shielding. Although lead is the widest used radiation shield material, it causes toxic effects harmful to human health.

Furthermore, RoHS Directive passed by the E.U. restricts the use of lead in various fields, and it is planned to impose an all-out ban of lead in the future. In this context, this doctorate thesis suggests a material which can be an alternative to lead and be efficient in shielding various types of radiation.

Experimental works were performed on aluminum-boron carbide (Al-B₄C) material for the original purpose of this doctorate thesis. The material in question contained B₄C compound in four different volume ratios (5%, 10%, 15%, 20%) and in five different particle sizes (average 3 μm, average 53μm, 75 to 150 μm, 150 to 250 μm, average 500 μm). Shielding behaviors of all these types of the material against gamma, neutron and beta radiations were examined. In other words, the effect of the particle sizes of B₄C compounds on shielding behavior and experiments conducted with gamma, neutron and beta radiations are original contents of this doctorate thesis.

Results obtained from aluminum-boron-carbide (Al-B₄C) material were used for working on aluminum-boron carbide-tungsten carbide material and examining its shielding behavior under gamma, neutron and beta radiations. This choice of material is an original content of this doctorate thesis.

Three different radioisotope sources emitting gamma radiation at different energy levels were used. Experiments with gamma radiation were performed by Am-241 at

low energy level (60 keV), by Co-60 at high energy level (two peaks at 1.17 and 1.33 MeV, average 1.25 MeV), and by Cs-137 at medium energy level (662 keV). Experiments with neutron radiation were conducted by using the Pu-Be neutron source within Howitzer. Average energy of the neutrons emitted by this source was approximately 4 MeV. The radioisotope source used for the experiments with beta radiation was Sr/Y-90. Maximum beta energy emitted by the said radioactive source was 2.28 MeV.

Transmission technique was employed for these experimental works on gamma and beta radiations to find linear attenuation and mass attenuation coefficients and on neutron radiations to find macroscopic effect cross-section values, for each type of material. The values in question were used for calculating half-value thickness (HVT) of each type of material depending on the type of radiation applied. Furthermore, theoretical calculations were made by using the internationally recognized XCOM software to calculate theoretical gamma mass attenuation coefficients. These theoretical gamma mass attenuation coefficients calculated for the composite materials were compared with the theoretical values calculated by XCOM software.

Results of the experiments conducted on gamma sources indicate that as the size of particles of B₄C compound within Al-B₄C compound increases, radiation absorbance of the composite material decreases. As energy level of gamma radiation increases, the effect of particle size decreases. However, as volume ratio content of B₄C within the composite material increases, gamma radiation absorbance of the composite material decreases. The decrease in question is higher for gamma radiation at low energy level, and lower for gamma radiation at high energy level. Experiments conducted on Al-B₄C-WC hybrid composite material indicate that as the amount of WC in the material increases, its absorbance of gamma radiation increases. Furthermore, the theoretical mass attenuation coefficients calculated by XCOM software program for gamma radiation are similar to the experimental theoretical mass attenuation coefficients found. Most of the differences between these two sets of coefficients are below 3%, all of them are below 6%.

Experiments conducted on neutron radiation for Al-B₄C composite compound indicate that as volume ratio and particle size of B₄C compound of the said composite material increases, its absorbance of neutrons increases. As B₄C and WC ratios as volume ratios in Al-B₄C-WC hybrid composite material increase, its absorbance of neutrons increases.

Experiments conducted on beta radiation indicate that as volume ratio of B₄C compound within Al-B₄C composite material increases, its absorbance of beta radiation increases. Furthermore, as volume ratios of B₄C and WC compounds within Al-B₄C-WC hybrid composite material increase, its absorbance of beta radiation increases. The mass attenuation coefficients found for the composite materials by experiments were compared with the mass attenuation coefficients found for pure aluminum.

If WC compound is added at certain ratios in Al-B₄C composite materials, the shielding effect of the said materials against different types of radiation increases, and their density increases too. Density of material is an important subject in space, aeronautical and nano technologies. Therefore the amount of WC added in such compound must be limited. This doctorate thesis arrives at the original finding that the results of the experiments performed for this study indicate that hybrid composite

materials produced by adding WC by 5% to 10% in Al-B₄C composite material can be used as an efficient shielding material against fields of mixed radiations.

1.GİRİŞ

Doğal radyasyon, gerçekte, insan yaşamı boyunca hep hayatın bir parçası olmuştur. Yaşam dünyanın başlangıcı ile birlikte var olan radyasyona zaman içinde adapte olmuştur. Teknoloji geliştikçe doğal radyasyonla beraber yapay radyasyonun payı da, ortaya çıkmış bulunmaktadır.

Radyasyonun yapay olarak kullanımı toplumsal yaşamı kolaylaştırmasının yanı sıra bazı üzerinde durulması gereken hususları da beraberinde getirmiştir. Radyasyon kaynakları ile çalışılırken, kullanıcının ve çevrenin, radyasyonun olabilecek zararlı etkilerine karşı korunması ve bunun için yeterli önlemlerin alınarak çalışılması benimsenen başlıca yol olmaktadır. Bu bağlamda, radyasyondan korunmada önemli yöntemlerinden biri, radyasyon kaynağının veya radyasyon kaynağının bulunduğu ortamın uygun bir malzeme ile zırhlamasıdır. Zırhlama ile radyasyon ışınlamasını sınırlandırarak gerek çalışan personel için gerekse de toplum üyesi kişilerin kabul edilen radyasyon seviyelerinde bulunmalarını sağlamaktadır.

Radyasyonun zararlı etkilerinin olduğu, 1895 yılında W. Roentgen tarafından X ışınlarının keşfinden hemen sonra fark edilmiştir. Ancak radyasyon doz limitleri, zaman sınırlaması ve zırhlama gibi kavramlar 1913 yılında etkin kullanılmaya başlanmıştır (Taylor,1981). 1913 yılında, Alman Radyoloji Derneği, X ışınlarının enerjisini göz önüne almadan 2 mm kurşun malzemenin zırhlama için yeterli olacağını ifade etmiştir. 1927' lere gelindiğinde Uluslararası X ışını ve Radyumdan Korunma Derneği 100 mg radyum kaynağından korunmak için en az 5 cm kurşun zırh kullanılmasını tavsiye etmiştir. İkinci dünya savaşının başlaması ile birlikte nükleer fisyon ile ilgili deneyler de başlamış bulunmaktaydı (Shultis, 2005).

Uranyumun zenginleştirilmesi, plütonyumun kullanılması, nükleer fisyon ürünlerinin ayrıştırılması, nükleer reaktörlerin kurulması, nükleer silahların yapılması farklı aktivitelere sahip radyoaktif kaynaklarla çalışılması durumunu ortaya çıkarmış bulunmaktadır. Bu nedenle radyasyonun biyolojik etkileri göz önüne alınarak radyoaktif kaynakların gerek zırhlaması gerekse de bu kaynaklarla çalışmalarda yeni kuralların getirilmesi söz konusu olmuştur.

1943'de Chicago' da faaliyete geçirilen grafit moderatörlü nükleer reaktörde Fermi ve Zinn tarafından zırhlama malzemesi olarak beton, parafin eklenmiş kereste kullanılmıştır. Daha sonraları inşa edilen reaktörlerde ise zırhlama malzemesi olarak 2 m'den daha kalın, yüksek yoğunluklu baritli beton kullanılmaya başlanmıştır. İlk inşa edilen reaktörler için temel problem; gama ve nötron radyasyonunun, zırhlama malzemenin içerisindeki gözeneklerden nüfuz edebilmesiydi. Daha sonra Hanford ve Washington'da imal edilen su soğutmalı plütonyum yakıt kullanan grafit reaktörlerde ısıtıcı zırhlama malzemesi olarak demir, biyolojik zırh malzemesi olarak da yüksek yoğunluğu ile limonit ve magnetit içeren beton kullanılmıştır (Shultis, 2005).

1960'lı yılların başlangıcında Apollo programı ile birlikte gözler uzaya, uzay araçlarının güneş patlamaları ve kozmik radyasyondan korunması için zırhlanmasına çevrilmiştir. Bununla beraber soğuk savaş dönemi, nükleer silahların etkilerinden (serpinti radyasyonundan) korunma amaçlı, yapısal zırhlamayı öne çıkarmıştır. Uzay teknolojisiyle, zamanla toplanan veriler uzayda iki radyasyon-tuzak kemerin bulunduğunu göstermiştir. İç kederde proton ve dış kederde elektron radyasyonu yer almaktadır. Bu kemerlerin dağılımını dünyanın manyetik alanı ve güneşten gelen elektron ve proton rüzgârları belirlemektedir. Bu radyasyon hassas cihazlara zarar verirken, astronotlar için de biyolojik tehdit oluşturmaktadır. Yüksek enerjili kozmik ışınlar, uzayda uzun zamanlı görevlerde astronotların yüklü parçacıklara karşı korunmasını (zırhlanmasını) gerektirmektedir (Shultis, 2005).

1970'li yıllarda petrol ihraç eden ülkeler birliği (OPEC) ambargosu ile başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere dünya genelinde nükleer güç santrallerinin sayısı artmıştır. Bununla beraber çevresel uygunluk şartları da ağırlaşmıştır. Bu iki durumun sonucu olarak nükleer güç santralleri, nükleer yakıtların korunması ve nükleer atıkların taşınması konularında radyasyonun zırhlanması daha da önem kazanmıştır.

1980'li yılların başlarından itibaren özellikle bilgisayar yazılımları radyasyon zırhlamasında önemli bir yer tutmuş ve XCOM, MCNP, Monte Carlo gibi birçok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu programlar sayesinde zırhlama hesapları daha kolay ve etkin hale gelmiştir.

İyonizan radyasyon nükleer teknoloji, tarım, tıp, endüstri, araştırma gibi birçok farklı alanda kullanım alanına sahiptir. Zırhlama için kullanılacak malzemenin öncelikle

yüksek radyasyon tutuculuğuna sahip olması istenmektedir. Bununla beraber, zırh malzemesinin sahip olması gereken ek özellikler malzemenin kullanılacağı alana göre değişiklikler gösterebilmektedir.

Nükleer güç reaktörlerinin zırhlaması amacıyla kullanılacak bir zırh malzemesinin sahip olması gereken bazı özellikler söz konusu olmaktadır. Bunlar arasında sayılabilecek önemli özelliklerinden bazıları şunlardır; malzemenin reaktör sisteminin bir parçası olması, iyi radyasyon tutuculuğu, iyi ısı iletkenlik, radyasyon hasarlarına karşı dayanıklılık, iyi mekanik özellikler (dayanımı) ve ekonomiklik olmaktadır (Porokhorenko, 2015).

Uzay teknolojilerinde özellikle çalışanların ve hassas cihazların kozmik radyasyondan korunması amacı ile zırhlama malzemeleri kullanılması ayrı bir önem taşımaktadır. Uzay teknolojilerinde kullanılacak malzemenin en önemli özellikleri ise; malzemenin farklı radyasyon tiplerine karşı tutuculuğunun iyi olmasının yanı sıra hafif ve az hacim kaplaması, kozmik radyasyonla etkileşiminden ikincil radyasyona neden olmaması, kolay işlenebilir olması ve ekonomik olmasıdır. Uzay teknolojilerinde özellikle hacim ve malzemenin kütlesi diğer parametrelere göre daha öne çıkmaktadır. Uzay araçlarında kütlenin artması daha fazla yakıt kullanılmasını, dolayısı ile ekonomik sorunların oluşmasına yol açmaktadır (Tripathi, 2007).

Radyasyon zırhlamasında kullanılacak malzemeler ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazılarının ve içerikleri aşağıda değinilmektedir

Kobayashi ve diğ. (1997), tungsten bileşiklerinin gama radyasyonunu zırhlama etkisini incelemişlerdir. Tungsten karbit ve tungsten bakır bileşiklerinin ^{133}Ba (356keV) ve ^{137}Cs (660keV) gama radyasyonuna karşı zırhlama etkilerini hesaplanmışlar ve elde edilen sonuçlarda, tungsten ve tungsten bakır bileşiğinin zırhlama açısından kurşundan daha etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Hussain (1997), polietilen-glikol ve kurşun-oksit bileşiklerinden yapılan kompozit malzemenin gama radyasyonu karşısında zırhlama özelliğini incelemiştir. Kompozit malzemedeki kurşun oksit bileşiğinin farklı miktarları için deneme yapılmış ve PbO oranı $\leq \%50$ 'nin altındaki değerler için incelenmiştir. Kurşun miktarının artmasının zırhlama etkisini arttırdığı belirtilmiştir. Malzeme istenilen şekle sokulabileceğinden birçok alanda kullanılabileceği belirtilerek tavsiye edilmiştir.

El- Hosiny ve diğ. (2000), sulandırılmış kurşun katkılı çimentonun gama radyasyonuna karşı zırhlama etkisini incelemişlerdir. %5 kurşun katkısının hem oluşan kalsiyum silikat miktarının artmasını hem de gama zırhlama etkisini geliştirdiğini belirlemişlerdir.

Singh ve diğ. (2003), $ZnO-PbO-B_2O_3$ cam malzemesi kullanmışlardır. $xZnO \cdot 2xPbO \cdot (1-3x)B_2O_3$ ($x=0,1-0,26$) bileşiklerinin molar oranlarını değiştirerek 511, 662, 1173 ve 1332 keV enerjili fotonlara karşı zırhlama özelliğini incelemişlerdir. Molar oranlara bakıldığında en iyi sonucun $2x \cong 0,5$ değerinde verdiğini bulmuşlardır.

Barghouty ve Thibeault (2006) NASA' nın uzay çalışmalarında, gerek kozmik kaynaklı gerekse de güneşten gelen parçacık radyasyonuna karşı polimer bazlı kompozit malzemelerle alüminyum malzemeyi karşılaştırmışlardır. Bu çalışma sonunda alüminyumun uzun zamanlı uzay görevlerinde zırhlama açısından yeterli olmadığını ve polimer bazlı kompozit malzemelerin gerek yapısal olarak kullanımında gerekse de radyasyon etkilerini azaltmada daha iyi sonuçlar verdiğini belirtilmiştir.

Fan ve diğ. (2008), $Al_{18}B_4O_{33} + BaPbO_3/Al$ hibrit kompozit malzemenin karakterizasyonunu yapmışlar, gama radyasyonu karşısında zırhlama etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, elde edilen malzemenin hem mekanik özellikleri açısından ve hem de radyasyon zırh malzemesi olarak iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Özellikle yapı içerisinde bulunan $BaPbO_3/Al$ bileşiğine bağlı Ba ve Pb gibi büyük atom numaralı elementlerin radyasyon zırhlama etkisini arttırdığı ifade edilmiştir.

Singh ve diğ. (2008), $xPbO(1-x)SiO_2$ ($x = 0,45 - 0,70$) bileşiğini; 662, 1173 ve 1332 keV enerjili fotonlar kullanılarak gama zırh malzemesi olarak denemişlerdir. Sonuçları beton malzeme ile karşılaştırmışlardır. Yarı değer kalınlığı (HVL) cinsinden daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Yue ve diğ. (2009), kurşun yerine kullanılabilecek yeni bir malzeme üzerinde çalışmışlardır. Bu malzeme tungsten ve hydrogene-styrene-butadiene-styrene copolymer (SEBS) karışımından oluşmuştur ve içeriğinin %80 kadarı tungsten olduğu ifade edilmiştir. Bu yeni malzeme, ışın tedavisinde düşük enerjili elektron zırhlamasında kurşuna göre daha az bremsstrahlung ışımasına neden olduğu için

daha kullanışlı olduğu belirtilmiştir. Ancak 12 MeV üzerinde enerjiye sahip fotonların zırhlamasında kurşuna göre daha kötü sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Fan ve diğ. (2009), BaPbO_3/Al kompozit malzeme üzerinde çalışmışlardır. Radyasyonu zayıflatma miktarını alüminyum ile karşılaştırıp kütle zayıflatma katsayısının (μ/ρ), kompozit malzeme için alüminyuma göre sırasıyla gama radyasyonu için % 14,74 oranında daha büyük olduğunu belirtmişlerdir.

Rahimi ve diğ. (2009), kurşun silikat camların içine Zr ve Ti ekleyerek kimyasal korozyon ve gama radyasyonu zayıflatma özelliklerini incelemişlerdir. Malzemedeki PbO bileşiği molar olarak arttığında gama radyasyonu zayıflatma miktarında da paralel olarak artış görüldüğünü belirtmişlerdir.

Limkitjaroenporn ve diğ. (2011), kurşun sodyum borür $(80-x)\text{B}_2\text{O}_3:x\text{PbO}:20\text{Na}_2\text{O}$ cam malzemeyi farklı molar oranlarda elde ederek, fiziksel, optik, yapısal ve gamma radyasyon zırh malzemesi olarak özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde 662 keV enerjili fotonlar kullanmışlardır. Sonuçları aynı kalınlıkta betonla karşılaştırıp betondan daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Korkut ve diğ. (2011), ametist taşının farklı enerjide gama radyasyonuna karşı zırhlama özelliklerini çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlarda, 276 keV ile 6 MeV arasında sekiz farklı foton enerjisi için betona göre daha uygun bir zırhlama malzemesi olduğunu bulmuşlardır.

Saudi ve diğ. (2011), cam malzeme olan $x\text{Bi}_2\text{O}_3-(30-x)\text{CdO}-10\text{B}_2\text{O}_3-2\text{Fe}_2\text{O}_3-40\text{P}_2\text{O}_5$ ($0 \leq x \leq 30$) bileşiği değişik oranlarda hazırlayarak radyasyon zırh malzemesi olarak denemişlerdir. Yapılan çalışmada kütle zayıflatma katsayısı ve yarı değer kalınlık değerlerini bulmuşlardır. Çalışma sonunda yüzdece $0 \leq x \leq 30$ değerleri arasında hazırlanan bileşiğin, özellikle % 5-20 arasında Bi_2O_3 içerdiğinde radyasyon zırhlama malzemesi için oldukça iyi sonuçlar verdiğini bulmuşlardır.

Baştuğ ve diğ. (2011), bor katkılı bileşiklerin (PbO ve $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ve (PbO ve H_3BO_3) değişen oranlarda hazırlayarak, 25.191 ile 57.903 keV enerjili X ışınlarına karşı zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinin, seçilen enerji aralığında gama radyasyonunu daha iyi soğuran bir bileşik olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışma ile birlikte boron bileşiklerin katkısının, X ışınlarına karşı malzemenin radyasyon geçirgenliğini azalttığını tespit etmişlerdir.

Kaloshkin ve diğ. (2012), polimer-matris yapıları nano parçacık teknolojisi ile yapılmış kompozit malzeme içerisine, B_4C ve W nano parçacıklar eklemiştir. Sonuçta, kompozit malzemenin gama radyasyonuna karşı etkinliğinin, içeriğindeki tungsten (W) miktarının artması ile orantılı olduğunu ve en iyi sonucun kompozit malzemeye %60 W katılımı ile olduğunu bulmuşlardır.

Kaewjaeng ve diğ. (2012) $SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3-CaO-Na_2O$ cam yapıdaki malzemede BaO bileşiğinin optik, fiziksel ve radyasyon zırhlama etkisini incelemiştir. Cam malzeme $(50-x)SiO_2:15B_2O_3:2Al_2O_3:10CaO:23Na_2O: xBaO$, içindeki bileşikler $x = 0, 5, 10, 15$ ve 20 % mol oranlarında üretmişlerdir. BaO bileşiğinin molar oranının artmasının, malzemenin gama radyasyonuna karşı daha iyi zırhlama etkisi gösterdiğini belirlemiştir. Malzemenin betonla karşılaştırılması yapılmış ve aynı hacimde kullanıldığında daha iyi bir zırhlama malzemesi olduğunu belirtmişlerdir.

Huang ve diğ. (2013) sandviç yapısında, bor karbür ile desteklenmiş karbon fiber malzemenin nötron zırhlamasındaki etkinliğini incelenmiştir. %20 oranında bor karbür katkısının hem malzemenin mekanik özelliklerini hem de nötron zırhlaması etkinliğini geliştirdiğini ifade etmişlerdir.

İçelli ve diğ. (2013) bazı bor içerikli bileşiklerin gama radyasyonu karşısında zırhlama etkisini incelemiştir. 15-100 keV enerjili gama radyasyonu ile deneyler yapılmış ve deney sonucunda bulunan değerler XCOM ve NXCOS programları kullanılarak teorik değerlerle karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlarda borik asit ve kolemanit malzemelerin en iyi sonuçları verdiğini bulmuşlardır.

Akkurt ve diğ. (2013), barit oranının değiştirilmesinin gama ve nötron radyasyonuna karşı zırhlama etkisini nasıl etkilediğini incelemiştir. Bulunan değerler, XCOM ve NXCOS programlarından bulunan teorik değerler ile karşılaştırılmış ve çalışma sonucunda barit miktarının artırılmasının gama radyasyonu zırhlama etkisini arttırdığı, nötron zırh etkisini azalttığını bulmuşlardır.

Azman ve diğ. (2013), nano ve mikro ölçekte hazırlanan tungsten oksit – epoksi karışımının diyagnostik X ışınlarına karşı zırhlama etkisini incelenmiştir. Yapılan çalışmada WO_3 katkısının artırılması zırhlama etkisini arttırdığı, bununla beraber malzemenin dayanıklılığını düşürdüğünü saptamışlardır.

Singh ve diğ. (2014), yaptıkları çalışmada bizmut-bor-silikat cam malzemeler kullanılarak gama ışını buildup faktörünü ve enerjisi 2-12 MeV olan hızlı nötronlar

için nötron tesir kesit değerlerini hesaplamışlardır. Kullanılan malzemenin içeriği $(50-x)\text{SiO}_2:15\text{B}_2\text{O}_3:2\text{Al}_2\text{O}_3:10\text{CaO}:23\text{Na}_2\text{O}:x\text{Bi}_2\text{O}_3$ ($x=0, 5, 10, 15$ ve $\% 20$ mol)' dir. Deney sonuçlarından $\% 20$ mol Bi_2O_3 içeren bizmut-bor-silikat cam malzemenin gama ve nötron deneylerinde en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir.

Lee ve diğ. (2014), $\text{B}_4\text{C}-\text{PbO}-\text{Al}(\text{OH})_3$ nanokompozit malzemenin nötron ve gama radyasyonu zırhlama etkisini incelemiştir. Malzemedeki B_4C ve PbO oranları değiştirilerek lineer zayıflatma katsayılarını bulmuşlardır. Çalışma sonunda B_4C oranı arttıkça nötron zırhlama kabiliyetinin arttığını, PbO miktarı arttırıldığında ise gama radyasyonu zırhlama etkisinin arttığını belirtmişlerdir.

Singh ve Badiger (2014), farklı bazı metal alaşımlarının gama ve nötron radyasyonuna karşı zırhlama etkisini incelemiştir. Bakır-Nikel alaşımının ($\%2$ Mn, $\%2$ Fe, $\%30$ Ni ve $\%66$ Cu) iyi gama radyasyon zırh etkisine ve SS-316 alaşımının da ($\%67.70$ Si, $\%18$ Cr, $\%12$ Ni ve $\%2,3$ Mo) 2-12 MeV enerji aralığında iyi nötron zırhlama etkisine sahip alaşım olduğunu bulmuşlardır.

Chen ve diğ. (2014) hacimli alüminyum, kapalı hücreli köpük kompozit ve açık hücreli köpük kompozit malzemelerin gama radyasyonu zırhlama etkinliklerini incelemiştir. Alansal yoğunlukları $2,5 \text{ g/cm}^2$ ile 10 g/cm^2 arasında değişen altı örnekten oluşan üç farklı set malzeme için kütle zayıflatma katsayıları 0.060, 0.662, 1.173 ve 1.332 MeV enerjili gama radyasyonu kullanarak bulunmuş ve teorik olarak XCOM programı ile elde edilen teorik değerlerle karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada, özellikle 0.662 MeV enerjili gama radyasyonuna karşı kapalı hücre köpük kompozit malzemenin diğer malzemelere göre çok daha iyi zırhlama etkinliği gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Buyuk ve Tuğrul (2014a) TiB_2 bor karbür-silisyum karbür kompozit malzemenin, Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynaklar kullanılarak gama radyasyonuna karşı zırhlama etkisini incelemiştir. Kompozit malzemelerin $\%70$ Bor karbür (B_4C) ve $\% 30$ silisyum karbür (SiC) içerdiğini ifade etmişlerdir. TiB_2 'ü $\%2$ ve $\%4$ hacimsel oranlarda kompozit malzemeye katmışlardır. Çalışma sonunda lineer ve kütle zayıflatma katsayıları bulunmuş ve deneysel veriler XCOM programından elde edilen teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Kompozit malzemedeki TiB_2 katılımı arttıkça ve TiB_2 parçacıklarının boyutları azaldıkça gama radyasyonuna karşı zırhlama etkisinin arttığını saptamışlardır.

Buyuk ve Tuğrul (2014b) bor karbür-silisyum karbür kompozit malzemenin gama ve nötron radyasyonuna karşı zırhlama etkisini incelemişlerdir. Gama kaynağı olarak Co-60 ve Cs-137 radyoizotopları, nötron kaynağı olarak da Pu-Be kaynağı kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar XCOM programından elde edilen teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda, malzeme içindeki silisyum karbür miktarının artması gama radyasyonuna karşı zırhlama etkisini düşürmekte iken nötron radyasyonuna karşı zırhlama etkisini arttırdığı ifade edilmiştir.

Kaur ve Singh (2014) kurşun bor cam malzemelere alüminyum eklenerek gama radyasyonu karşısında zırhlama etkisini incelemişlerdir. Malzemenin içeriğini $x\text{PbO}-(0.90 - x)\text{B}_2\text{O}_3-0.10 \text{Al}_2\text{O}_3$ ($x = 0.25, 0.30, 0.35, 0.40$ ve 0.45) şeklinde vermişlerdir. Bu kompozit malzemedan elde edilen sonuçlar ile standart beton malzeme ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı değerler WinXCOM programı kullanılarak da teorik olarak elde edilmiştir. Çalışma sonunda kompozit malzemenin daha büyük kütle zayıflatma katsayına sahip olduğunu bulmuşlardır.

Shin ve diğ. (2014) bor ve polietilen içeren kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama etkilerini incelemişlerdir. HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen malzeme) içerisine mBN (modifiye edilmiş bor nitrür) katılarak kompozit malzeme elde etmişlerdir. Çalışma sonunda bu kompozit malzemenin nötron zırhlama etkisinin HDPE/BN ve HDPE/B₄C kompozit malzemelerine göre daha iyi sonuç verdiğini saptamışlardır.

Park ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, bor ve polietilen içerikli beton malzemenin nötron zırhlama ve aktivasyon etkisi, Monte-Carlo programı MCNP-5 simülasyon kodu kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır. Bor içerikli betona polietilen katılımı nötron zırhlama etkisini artırırken, aktivasyondan kaynaklı aktiviteyi de düşürdüğünü saptamışlardır.

Yasaka ve diğ. (2014) çinko bizmut bor cam malzemelerin gama radyasyonu zırhlama etkisi ve optik ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Kompozit malzemenin içeriğinin $10\text{ZnO} : x\text{Bi}_2\text{O}_3 : (90-x) \text{B}_2\text{O}_3$ ($x = 15, 20, 25$ ve 30 mol %) olduğu ifade edilmiştir. Çalışma sonunda %25 ve %30 mol yüzdesi ile Bi₂O₃ katılımı ile oluşan kompozit malzemenin standart beton malzemedan daha iyi gama zırhlama etkisi gösterdiği ifade edilmiştir.

Singh, V. P. ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada bizmut bor silikat malzemenin nötron zırlama etkisi ve gama radyasyonu için build-up faktörünün tayinini gerçekleştirmişlerdir. Kompozit malzemenin içeriği $(50-x) \text{SiO}_2:15\text{B}_2\text{O}_3:2\text{Al}_2\text{O}_3 : 10\text{CaO} : 23\text{Na}_2\text{O} : x\text{Bi}_2\text{O}_3$ ($x = 5, 10, 15$ ve 20 mol%) şeklindedir. Çalışma sonunda kompozit malzemenin % 20 mol Bi_2O_3 içeriğinin hem nötron hem de gama radyasyonu zırlama etkisinin en iyi değer olduğunu bulmuşlardır.

Wang ve diğ. (2014) peridotit denilen kayaç yapılarında bulunan mineralin radyasyon zırlaması amacı ile kullanılan betona ilavesinin, nötron zırlama üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonunda ilave edilen peridotit ile betonun nötron zırlama etkinliğinin geliştiğini ifade etmişlerdir.

Elmarough ve diğ. (2014) farklı tipte reçinelerin nötron ve gama radyasyon zırlama etkisini incelemişlerdir. Malzemelerin makroskopik hızlı nötron tesir kesitleri ve gama radyasyonuna karşı foton enerjisi $1 \text{ MeV} - 1 \text{ GeV}$ aralığında kütle zayıflatma katsayılarını WinXCOM programını kullanarak bulmuşlardır. Çalışma sonunda yüksek yoğunluklu reçinelerin gama radyasyonu zırlamasında ve 250WD kodlu reçinenin nötron zırlamasında etkili olduğunu saptamışlardır.

Waly and Bourham (2015) beton içerisine farklı oranlarda Fe_3O_4 (magnetit) ve PbO (kurşun oksit) katkısı ile hazırlandığında, sıradan betona göre çok daha etkili gama radyasyonu zırlama özelliği gösterdiğini bildirmiştir. Deneysel çalışmayı $0,015 - 15 \text{ MeV}$ enerji aralığında yapmışlardır. Buna göre en iyi zırlama özelliğini % 39,195 Fe_3O_4 ve % 15,678 PbO katkısı ile oluşturulan betonda görüldüğü ifade edilmiştir.

Chang ve diğ. (2015) farklı yüzde oranlarında tungsten içeren tungsten/epoksi kompozitleri hazırlamışlar ve Co-60 radyoaktif kaynak kullanarak malzemenin mekanik ve radyasyon zırlama özelliğini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışma sonunda, kompozit malzeme içindeki tungsten miktarındaki artışın radyasyon zırlama özelliğini arttırdığını ifade etmişlerdir. Bununla beraber ışınlama dozunun artışı ile birlikte malzemenin ısıl stabilitesini ve mekanik özelliklerini önce azalttığını sonra biraz arttırdığını ve en son keskin bir biçimde düşürdüğünü bulmuşlardır.

Singh ve diğ. (2015) kütlece farklı oranlarda kurşun-uçucu kül (flyash)- %0, %20, %30, %40, %50 ve %60 içeren altı farklı beton malzeme hazırlayarak, 662 keV , 1173 keV ve 1332 keV enerjilerinde gama radyasyonu kullanarak deneysel ve teorik olarak zırlama parametreleri çalışılmıştır. Çalışma sonunda sıradan uçucu kül içeren

betonlara göre, kurşun-uçucu kül içeren betonların daha iyi zırhlama özelliği gösterdiği bulunmuştur.

Bu doktora tez çalışmasında, radyasyon karşısındaki zırhlama özelliklerinin araştırılması amacıyla alüminyum, bor karbür ve tungsten karbür içeren bazı özel kompozit malzemelerin radyasyon karşısındaki davranışlarının incelenmesi, teorik olarak XCOM bilgisayar programı ile irdelenmesi amaçlanmıştır. Fazla olarak, elde edilen sonuçlardan hareketle yeni bir radyasyon zırh malzemesi önerilmesi ve geliştirilmesi hedeflenmektedir.

2. RADYASYON KAYNAKLARI

2.1 Radyoaktivitenin Keşfi ve Kısa Tarihçesi

Atom ve çekirdeği hakkındaki fiziki bilgiler 1896'da Henri Becquerel'in radyoaktiviteyi keşfiyle başlamıştır denebilir. Becquerel, gerçekte, bazı floresans tuzların güneş ışınlarıyla aktifledikten sonra yayınladıkları radyasyonlar üzerinde çalışırken radyoaktivite olayını tesadüfen keşfetmiştir. Şöyle ki; deneyi tekrarlayan Becquerel, fotoğraf levhalarını etkileyen bazı tür radyasyonların, uranyum tuzundan yayınladıkları sonucuna varmıştı. Aynı radyasyonun havanın iyonlaşmasına neden olduğunu da buldu. Uranyum tuzu tarafından yayınlanan bu radyasyona önce Becquerel ışınları adı verildi. Bu isim daha sonra birçok maddelerce yayınlanan farklı radyasyon tiplerini de ihtiva edecek şekilde değiştirilmiştir (Arya, 1999).

Becquerel'in buluşunu takiben, uranyum tuzundan başka bazı maddelerin de radyasyon yayınladıkları gözlenmiştir. 1898 yılında Marie Curie ve eşi Pierre Curie, "radyum" ve "polonyum" adını verdikleri iki radyoaktif madde keşfettiler. Birkaç yıl içinde de toryum, aktinyum ve diğer radyoaktif elementler keşfedildi ve böylelikle, radyoaktivite ve radyoaktif olan çekirdekler hakkında bilgi sahibi olunmuş olundu (Arya, 1999).

2.2 Radyoaktif Bozunma Kanunu ve Doğal Radyoaktif Seriler

Bir atom çekirdeğinin bir alfa parçacığı, bir beta parçacığı, bir gama ışını veya başka herhangi bir parçacık yayınlaması ya da bir elektron yakalaması olayına *radyoaktif bozunma* denmektedir. Deneysel veriler radyoaktif bozunmanın üstel bir kanuna uyduğunu göstermektedir.

Bozunmamış her bir çekirdeğin gelecek bir saniye içinde bozunma olasılığının ölçüsüne λ diyelim (aynı zamanda $\lambda \ll 1$ olduğunu kabul edelim). İstatistik teorisinin temel varsayımı, λ ' nın zamandan ve mevcut diğer çekirdeklerin tip ve sayılarından bağımsız olmasıdır. Bu durumda, bir dt zaman aralığında her bir atomun bozunma

olasılığı $\lambda \cdot dt$ olarak verilebilir. Verilen bir zamanda N sayıda bozunmamış atom varsa dt küçük zaman aralığında bozunacak olan atomların sayısı;

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad (2.1)$$

olacaktır.

$t=0$ anında iken radyoaktif atomların sayısının N_0 olduğu varsayılır ise;

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

elde edilir. Burada $N(t)$, t anında mevcut radyoaktif atomların sayısını, λ ise parçalanma sabiti veya bozunma sabitini ifade etmektedir (Arya, 1999).

Radyoaktif bir maddede birim zamanda bozunuma uğrayan atomların sayısına, o maddenin aktifliği adı verilmektedir ve A ile gösterilmektedir. Bu bağlamda,

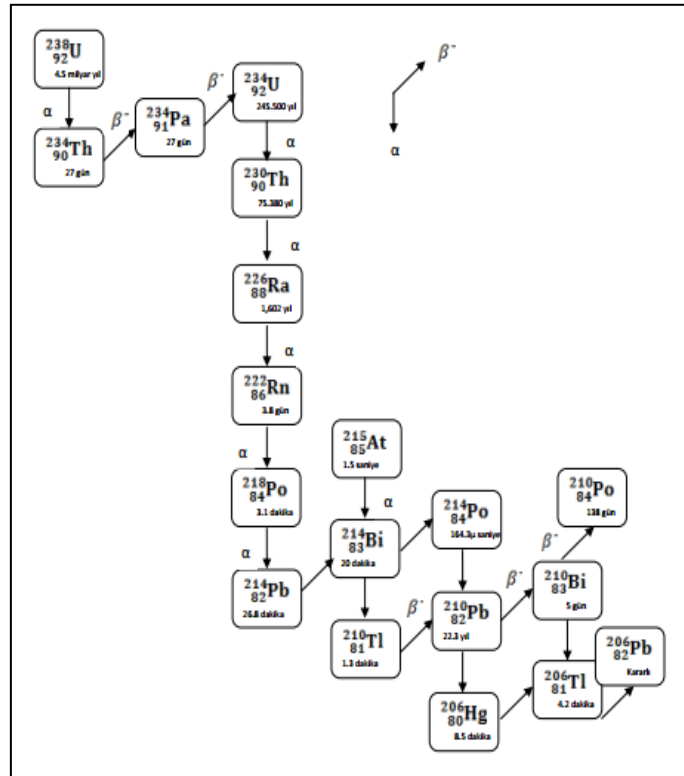
$$A = \lambda \cdot N \quad (2.3)$$

ile temsil edilebilir. Radyoaktivitede önemli bir başka nicelik de $t_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömür kavramıdır. Yarı ömür, aktifliğin yarıya düşmesi için geçen zaman olarak tarif edilmektedir ve

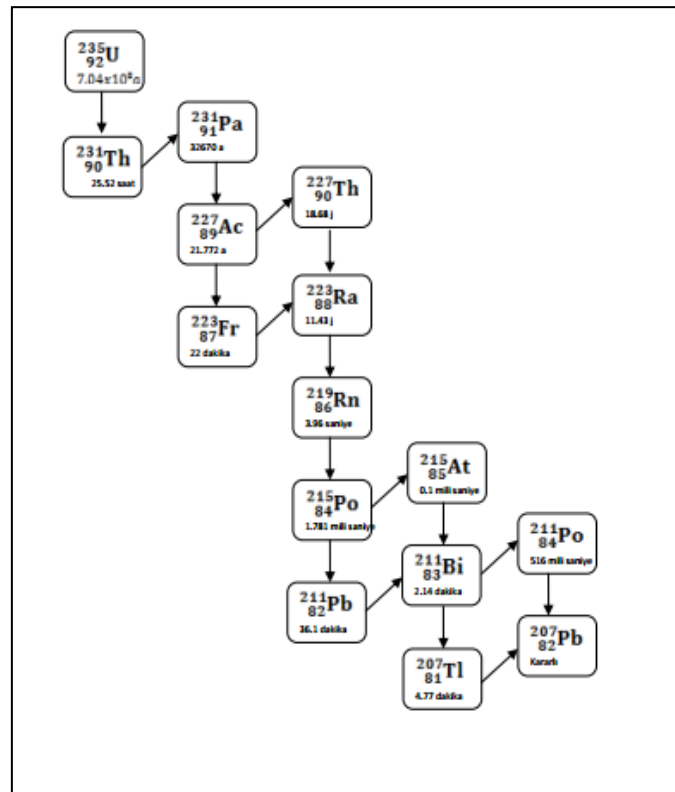
$$t_{1/2} = 0,693 / \lambda \quad (2.4)$$

olarak ifade edilebilmektedir (Arya, 1999).

Doğal olarak meydana gelen üç farklı bozunum zinciri mevcuttur. Bu üç bozunum zinciri, ^{232}Th (toryum bozunum zinciri) ($4n$), ^{238}U (uranyum bozunum zinciri) ($4n+2$) ve ^{235}U (aktinyum bozunum zinciri) ($4n+3$) olarak adlandırılır. Burada n , 50 ve 60 arasında bir tamsayı olmak üzere $4n$, $4n + 2$, $4n + 3$ sayıları radyoizotoplar için kütle numaralarını göstermektedir. Bu üç zincirin sonunda sırası ile ^{208}Pb , ^{206}Pb ve ^{207}Pb kararlı izotoplar oluşur (L'Annunziata, 2012). Şekil 2.1 ve Şekil 2.2' de sırası ile ^{238}U -Uranyum serisi ve ^{235}U -Aktinyum serisi verilmiştir.

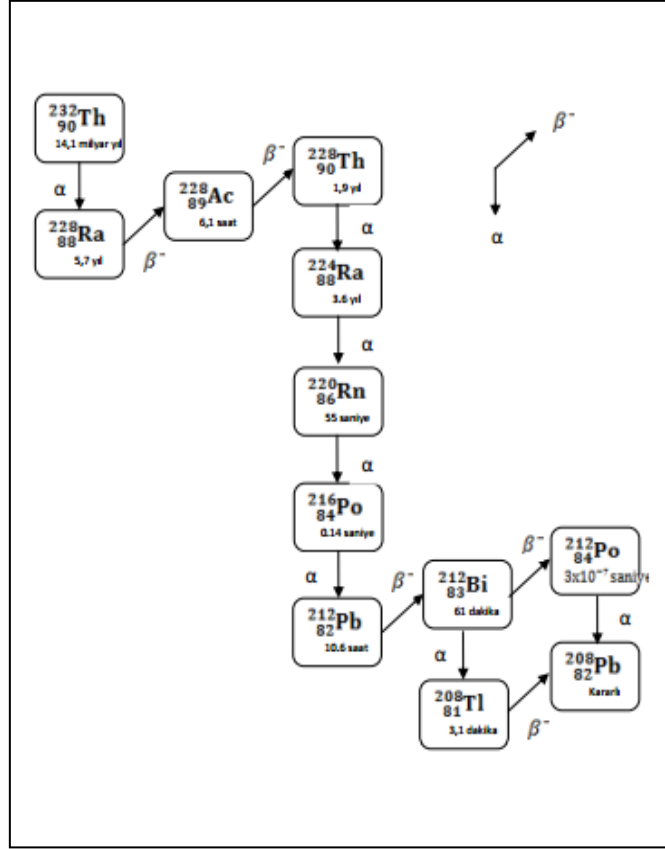


Şekil 2.1 : Uranyum-238 serisi bozunum şeması (Yener, 2006).



Şekil 2.2 : Aktinyum-238 serisi bozunum şeması (Yener, 2006).

Şekil 2.3' de ^{232}Th -Toryum bozunum şeması görülmektedir.

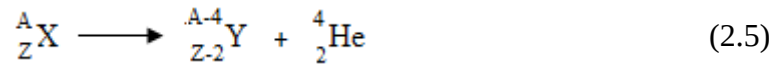


Şekil 2.3 : Toryum-232 serisi bozunum şeması (Yener, 2006).

2.3 Radyasyon Tipleri

2.3.1 Alfa radyasyonu

Çekirdek içerisinde proton sayısı nötron sayısına göre çok fazla olduğunda, elektrostatik itme kuvveti nükleer kuvvetlere baskın hale gelir. Bu durumda çekirdek kararsız olmakta ve alfa parçacığı yayımlamaktadır. Alfa bozunumu Eşitlik 2.5 ile ifade edilir.



Bu bozunumda çekirdek iki nötron ve iki proton kaybeder. Alfa bozunumu sonrasında atom numarası iki, kütle numarası 4 azalır (Nolan, 2014).

2.3.2 Beta radyasyonu

Radyoaktif çekirdek içinde parçacık sayılarının dengesiz olması durumunda, bir proton veya bir nötronun, sırası ile bir nötron veya protona dönüşmesi olayı meydana

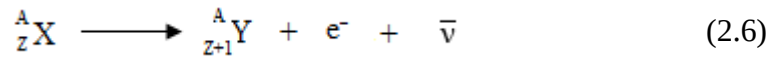
gelebilmekte veya çekirdek bir elektron yakalayabilmektedir. Bu olay beta bozunması olarak nitelenmektedir.

Eğer proton nötrona dönüşüyorsa, çekirdek içinde pozitif yük bir birim azalmakta ve protonlar arasındaki itme kuvveti azalmaktadır. Bunun aksine, çekirdek içinde bir nötron protona dönüşüyorsa çekirdek içindeki pozitif yükler bir birim artmakta ve protonlar arasındaki itme kuvveti artmaktadır. Bu Şekilde, çekirdek içindeki itme kuvvetindeki artış veya azalış, çekirdek içinde denge sağlayarak, çekirdeğin kararlı hale geçmesini sağlamaktadır.

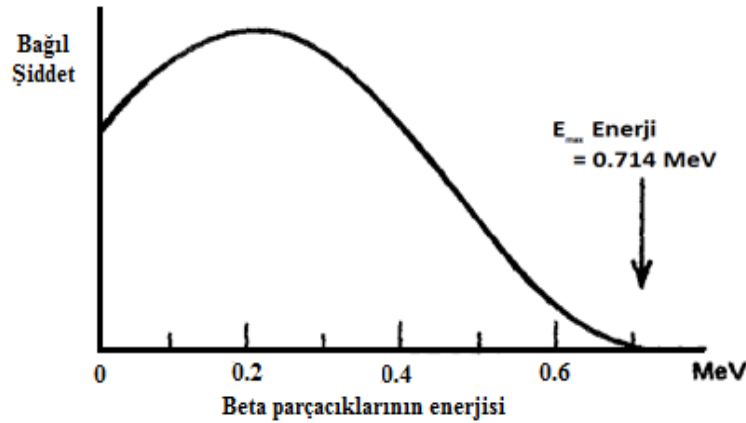
Böylece, beta bozunması üç yolla gerçekleşebilmektedir : β^- bozunması veya elektron yayını, β^+ bozunması veya pozitron yayını ve çekirdeğin elektron yakalaması (Chandra, 2004).

2.3.2.1 β^- bozunması veya elektron yayını

Bu bozunumda; radyoaktif çekirdek içindeki bir nötron, bir protona dönüşmekte ve fazla enerji çekirdek dışına bir elektron ve bir antinötrino parçacıkları yayını ile olmaktadır. Antinötrinolar çok nadir olarak madde ile etkileştiklerinden, biyolojik bir öneme sahip olmamaktadırlar. β^- bozunması Eşitlik 2.6 ile ifade edilebilmektedir.



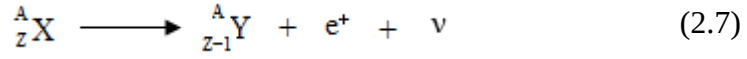
Bozunum sonrasında çekirdeğin kütle numarası değişmezken, atom numarası bir artmaktadır. Elektron ve antinötrino arasındaki enerji paylaşımı rastgele olduğundan, elektronlar farklı kinetik enerjilere sahip olmaktadır. Şekil 2.4’ de ^{36}Cl radyoizotopunun beta yayını spektrumu görülmektedir.



Şekil 2.4 : ^{36}Cl radyoizotopunun beta yayını spektrumu (Knoll, 2002).

2.3.2.2 β^+ bozunması veya pozitron yayını

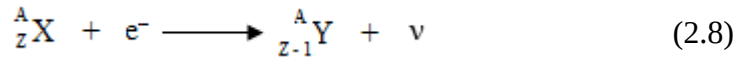
Bu bozunumda; çekirdek içindeki bir proton, bir nötrona dönüşmekte ve fazla enerji çekirdek dışına pozitron ve nötrino yayını ile gerçekleşmektedir. Pozitron pozitif yüklü elektrondur. Kütlesi ve madde ile etkileşimi elektronla aynıdır. β^+ bozunması Eşitlik 2.7 ile ifade edilebilmektedir.



Çekirdeğin pozitron yayınlaması sonrasında, çekirdeğin kütle numarası değişmez ancak atom numarası bir azalmaktadır (Chandra, 2004). Elektron yayımlanmasında olduğu gibi pozitron yayını da bir spektrum şeklinde meydana gelmektedir.

2.3.2.3 Çekirdeğin elektron yakalaması

Bu bozunumda çekirdek içindeki bir proton, yörünge elektronlarından birini yakalayarak bir nötrona dönüşmektedir. Bu dönüşüm sonucunda sadece nötrino yayını olmaktadır. Çekirdeğin elektron yakalaması Eşitlik 2.8 ile ifade edilebilmektedir.

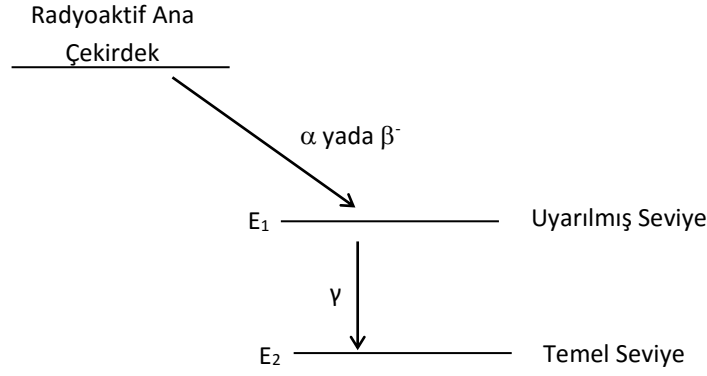


Çekirdeğin yörüngeden yakaladığı elektron sonrasında, yörüngede meydana gelen boşluğu bir üst seviyeden bir elektronun geçişi doldurmaktadır. Bu geçiş ile birlikte karakteristik X ışını yayını olmaktadır. Bu ışınlar madde içinde Auger elektronlarının oluşumuna da neden olmaktadır (Chandra, 2004).

2.3.3 Gama radyasyonu

Bir çekirdeğin radyoaktif bozunması sırasında ürün çekirdek en düşük enerji seviyesinde, bir başka deyişle temel durumda olmayabilmektedir. Diğer bir deyişle, ürün çekirdek temel durumun üstünde bir enerjide uyarılmış seviyede kalmaktadır. Oluşumundan çok kısa bir zaman sonra, yaklaşık 10^{-14} saniyede, uyarılmış çekirdek fazla enerjisini gama ışınları adı verilen elektromanyetik radyasyon şeklinde yayımlayabilmektedir.

Bu ışınlar X-ışınlarıyla benzer özelliklere sahip olup, kısa dalga boylu ve girici ışınlardır. Dalga boyları 10^{-9} ile 10^{-11} cm arasında değişmektedir. Gama ışınları foton olarak yayımlanmaktadır. Foton enerjisi, Şekil 2.5' de gösterilen temel seviye ile uyarılmış seviyenin enerjileri arasındaki farka eşit olmaktadır.



Şekil 2.5 : Radyoaktif bozunmada gama ışınlarının yayımlanması (Bilge, 1985).

Foton enerjisi, Eşitlik 2.9’ da verilmiştir.

$$E_{\gamma} = E_1 - E_2 \quad (2.9)$$

Eğer enerji nakli bir uyarılmış seviyeden temel seviyeye doğrudan doğruya oluyorsa, bir foton bütün uyarılma enerjisini taşımaktadır (Bilge, 1985).

2.3.4 Nötronlar

Nötronlar protonlarla birlikte atom çekirdeği içindeki temel parçacıklardan biridir. Kütlesi protona yaklaşık olarak eşittir, ancak net yükleri yoktur. Nötronlar sahip oldukları enerji miktarına göre farklı adlandırılmaktadırlar. Çizelge 2.1’ de nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Nötronların enerjiye bağlı sınıflandırılması (Martin, 2006).

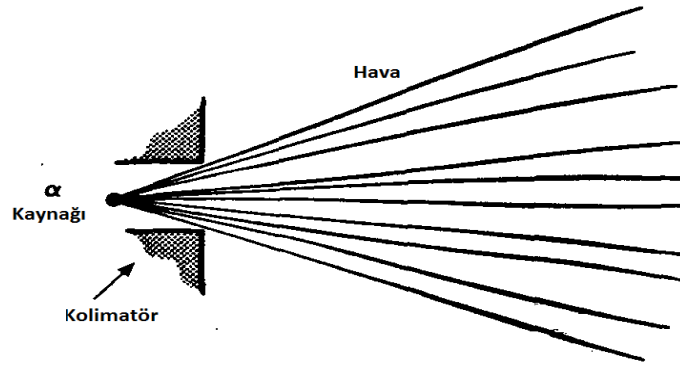
Nötron tipi	Enerji
Soğuk Nötronlar ($T < 20^0$)	$< 0.0253 \text{ eV}$
Termal Nötronlar	0.0253 eV
Epitermal Nötronlar	$0.0253 \text{ eV} - 1 \text{ eV}$
Epikadmium Nötronlar	$> 1 \text{ eV}$
Yavaş Nötronlar	$0.0253 - 100 \text{ eV}$
Ara Nötronlar	$0.5 - 10^4 \text{ eV}$
Hızlı Nötronlar	$0.01 - 10 \text{ MeV}$
Yüksek Enerjili Nötronlar	$> 10 \text{ MeV}$

Nötron kaynaklarından çıkan nötronlar yüksek enerjili grupta yer almaktadır. Nötronlar farklı maddelerle etkileşerek enerjilerini yitirmekte ve böylece düşük enerjili nötronlar elde edilmektedir.

2.4 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

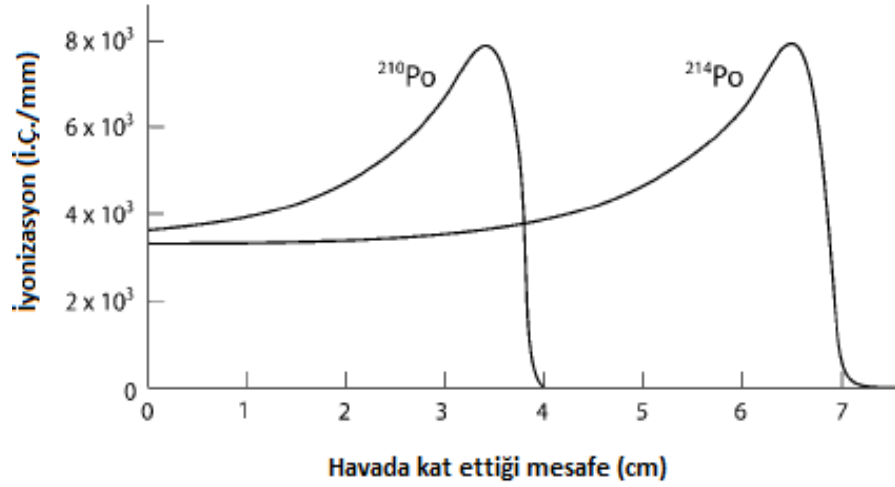
2.4.1 Alfa parçacıklarının madde ile etkileşimi

Alfa parçacıkları madde içerisinde geçerken sahip oldukları pozitif yük ile yörünge elektronların sahip olduğu negatif yük arasındaki Coulomb kuvveti ile etkileşmektedirler. Alfa parçacıklarının uyguladığı bu çekim kuvveti ile elektronlar bir üst enerji seviyesine geçebildikleri gibi, yörüngeden kopup serbest hale de geçebilmektedirler. Meydana gelen her etkileşme sonucu alfa parçacığının enerjisi azalmakta ve belli bir mesafede durdurulmaktadır. Şekil 2.6’ da kaynaktan çıkan alfa parçacıklarının izlediği yol verilmektedir. Bu yol yaklaşık olarak doğrusaldır. Çünkü etkileşmelerde alfa parçacığı kayda değer bir saçılmaya uğramamaktadır.



Şekil 2.6 : Alfa parçacıklarının kaynaktan çıktıktan sonra izlediği yol (Knoll, 2002).

Parçacıklar için madde içinde tamamen soğuruldukları mesafe olan “menzil” tanımı yapılmaktadır (Knoll, 2002). Bu bağlamda, alfa parçacıklarının menzili kısa olmaktadır. Malzeme içerisinde tüm enerjisini kaybeden alfa parçacıkları, iki yörünge elektronu alarak nötr helyum atomuna dönüşmektedir. Şekil 2.7’ de iki farklı alfa kaynağının hava içerisinde oluşturdukları iyonizasyonun havada kat ettikleri mesafe ile değişimi görülmektedir. Burada verilen alfa kaynakları ^{210}Po (5.304 MeV) ve ^{214}Po (7.687 MeV)’ dir.



Şekil 2.7 : Farklı alfa kaynaklarının havada kat ettikleri mesafeye bağlı malzeme içerisinde meydana getirdikleri iyon çifti miktarı (Martin, 2006).

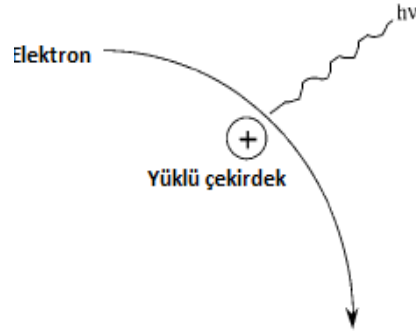
2.4.2 Beta Parçacıklarının Madde ile Etkileşimi

Beta parçacıkları çekirdekten yayınlanırken yüksek hıza sahip bulunmaktadır. MeV mertebelerinde enerjiye sahip olan beta parçacıkları ışık hızına yakın bir hıza sahip olmaktadır.

Beta parçacıkları malzeme içerisinde dört farklı yolla enerjilerini kaybetmektedirler. Bunlar, direkt iyonizasyon, Cherenkov ışıması, bremsstrahlung ışıması ve delta ışımalarıdır. Bunlardan baskın olanlar direkt iyonizasyon ve bremsstrahlung ışımasıdır.

Beta parçacıkları malzeme içerisinden geçerken yörünge elektronları üzerine oluşturduğu Coulomb kuvveti etkisi ile iyonizasyona veya yörünge elektronlarının uyarılmasına neden olmaktadır.

Beta parçacıklarının ikincil önemli enerji kaybettiği olay bremsstrahlung ışımasıdır. Beta parçacığı çekirdeğin yakınından geçerken ivmelenmesi nedeni ile bremsstrahlung fotonlarının yayımlanmasına neden olmaktadır. Meydana gelen ışıma miktarı, malzemenin atom numarası arttıkça artmaktadır. Şekil 2.8' de bremsstrahlung fotonunun yayımlanması görülmektedir.



Şekil 2.8 : Beta parçacığının yayımladığı bremsstrahlung ışıması (Martin, 2006).

Beta parçacıklarının malzeme içerisindeki menzili, beta parçacıklarının enerjisi ve malzemenin atom numarasına bağlı olarak değişmektedir. Beta parçacıklarının enerjisi $0.01 \leq E_\beta \leq 2.5$ MeV enerji aralığında olduğunda menzil (R), cm^2/g cinsinden Eşitlik 2.10' da verildiği gibi hesaplanabilmektedir (Martin, 2006).

$$R = 412 E_\beta^{1.262 - 0.0954 \ln E_\beta} \quad (2.10)$$

Malzeme içerisinde geçen beta parçacıklarının miktarı üstel bir fonksiyona bağlı olarak malzeme kalınlığı ile azalmaktadır. Eşitlik 2.11' de bu fonksiyon verilmiştir.

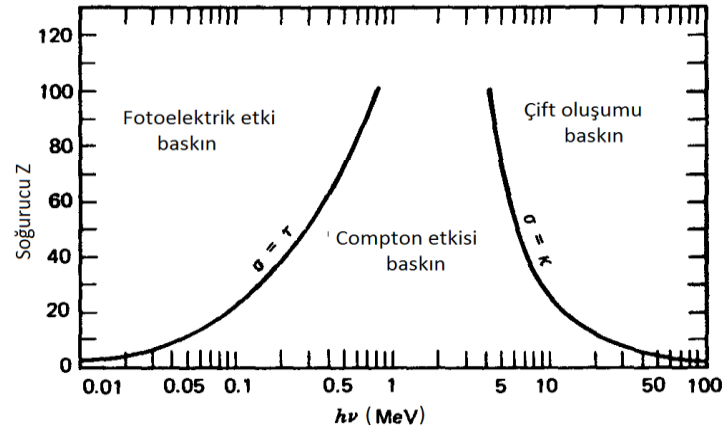
$$N(x) = N(0) \cdot e^{-\mu_B (\rho \cdot x)} \quad (2.11)$$

Burada $N(0)$ ve $N(x)$ sırası ile malzemeye gelen ve malzemedan geçen beta parçacıklarının sayısı, μ_B , beta zayıflatma katsayısı, ρ malzemenin yoğunluğu ve x malzeme kalınlığıdır (Martin, 2006).

2.4.3 Gama radyasyonun madde ile etkileşimi

Gama fotonları, içinden geçtikleri ortamın atomları ile etkileşime girerek soğurulabileceği gibi saçılmaya da uğrayabilirler. Gama fotonlarının madde ile etkileşimi çoğunlukla üç temel şekilde olmaktadır. Bunlar, “Fotoelektrik Olay”, “Compton Saçılımı” ve “Çift Oluşumu” olaylarıdır.

Gama radyasyonunun madde ile etkileşimi, Şekil 2.9' da görüldüğü gibi fotonun enerjisi ve etkileşime girdiği maddenin atom numarasına bağlı olmaktadır.



Şekil 2.9 : Gama fotonlarının malzeme ile etkileşim mekanizmaları (Knoll, 2002).

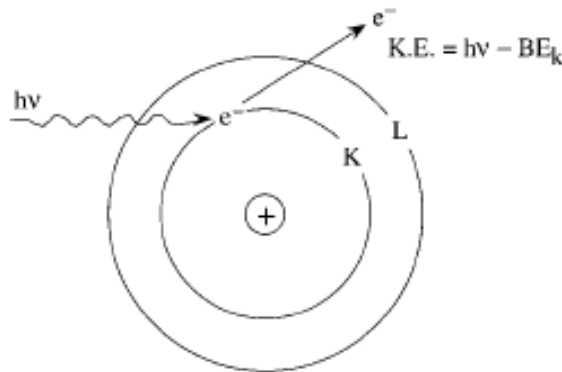
2.4.3.1 Fotoelektrik olay

Düşük foton enerjilerinde, gama fotonunun atomun yörünge elektronu ile etkileşerek, elektronu yörüngeden koparması olayıdır. Bu etkileşimde, gelen foton tamamen soğurulmaktadır. Yörünge elektronu ile etkileşime giren foton, enerjisini elektronun bağlanma enerjisine ve yörüngeden kopan elektronun kinetik enerjisine aktarmıştır. Bu enerjinin ifadesi Eşitlik 2.12’de verilmiştir.

$$K.E. = h\nu - E_{\text{bağlanma}} \quad (2.12)$$

Burada, K.E., yörüngeden kopan elektronun kinetik enerjisi, $h\nu$, gelen fotonun enerjisini ve $E_{\text{bağlanma}}$ ise elektronun yörünge bağlanma enerjisini temsil etmektedir.

Kopan elektronun yörüngede bıraktığı boşluğu, bir üst yörüngeden geçen elektron doldurmaktadır. Bunun neticesinde, geçiş olan iki yörüngenin enerjisi arasındaki fark kadar enerjiye sahip karakteristik X ışını yayınımı olmaktadır. Element için karakteristik olan bu ışınlara, Auger elektronları adı verilen elektronlarının yayınımına da neden olmaktadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Fotoelektrik olay (Martin, 2006).

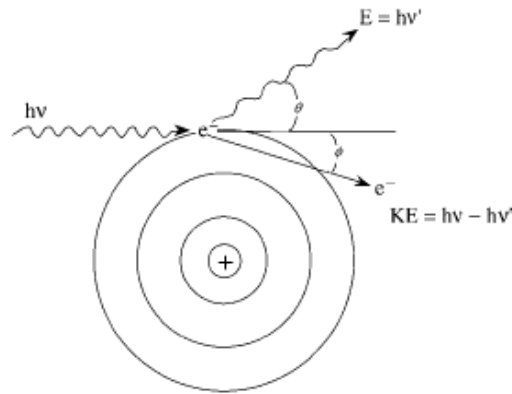
Fotoelektrik olay soğurma katsayısı τ , Eşitlik 2.13 ile verilmiştir.

$$\tau \sim \text{sabit.} (Z^5/E_f^3) \quad (2.13)$$

Burada Z , soğuran malzemenin atom numarası, E_f ise malzeme tarafından soğurulan fotonun enerjisidir. Bu eşitliğe göre fotoelektrik olayının görülmesi yüksek atom numaralı malzemelerde ve düşük enerjili fotonlarda daha baskın olmaktadır (Martin, 2006).

2.4.3.2 Compton saçılımı

Compton olayı, özellikle gama foton enerjisinin 0,5–1 MeV aralığındaki değerlerinde baskın görünmektedir. Compton olayı, gama fotonu ile atoma zayıf bağlı dış yörünge elektronu veya serbest elektron arasındaki etkileşim olmaktadır. Bu etkileşimde, gama fotonu, elektronla etkileşmesi sonucu enerjisinin bir kısmını elektrona aktarmaktadır. Etkileşme sonucunda Şekil 2.11’ de görüldüğü üzere, gama fotonunun enerjisi azalır, daha büyük bir dalgaboyu ile yeni bir doğrultuda yoluna devam eder.



Şekil 2.11 : Compton olayı (Martin, 2006).

Compton etkileşmesi sonrasında fotonun dalgaboyunda meydana gelen fark Eşitlik 2.14’ de verilmiştir.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 \cdot c} (1 - \cos\phi) = 0,024264 (1 - \cos\phi) \text{ \AA} \quad (2.14)$$

Burada λ ve λ' sırası ile etkileşmeden önce ve etkileşmeden sonra gama fotonunun dalgaboylarını temsil etmektedir. $h/m_0 \cdot c$ ise Compton dalgaboyu olarak ifade edilmektedir.

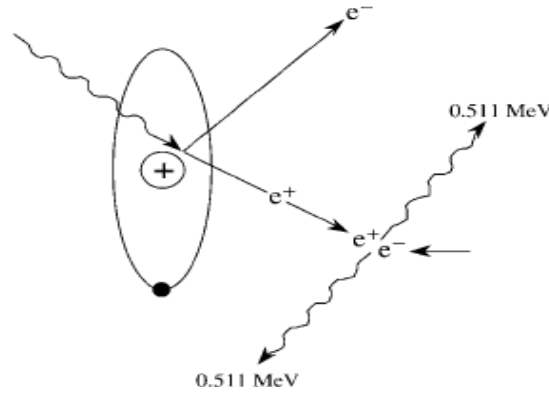
Compton etkileşme katsayısı σ , gelen fotonun enerjisi ve malzemenin atom numarasına bağlıdır. Bu bağlantı Eşitlik 2.15’ de verilmiştir.

$$\sigma \sim \text{sabit.} (Z/E_f) \quad (2.15)$$

Burada Z, fotonun etkileştiği malzemenin atom numarası, E_f ise malzeme tarafından soğurulan fotonun enerjisidir (Martin, 2006).

2.4.3.3 Çift oluşumu

Foton enerji 1.02 MeV enerjisinden büyük olduğunda Şekil 2.12’ de verildiği üzere, gama fotonu atom çekirdeğinin elektromanyetik alanı ile etkileşerek bir elektron-pozitron çiftine dönüşür. Şekil 2.12’ de şematik olarak verilen çift oluşumu olayında foton enerjisinin 1.02 MeV’lık kısmı elektron-pozitron çiftinin kütlesine dönüşmekte, geri kalan enerji ise parçacıklara kinetik enerji olarak aktarılmaktadır.



Şekil 2.12 : Çift oluşumu (Martin, 2006).

Çift oluşum etkileşim katsayısı κ , malzemenin atom numarası ve etkileşen gama fotonun enerjisine Eşitlik 2.16’da verildiği üzere bağlıdır.

$$\kappa \sim \text{sabit.} Z^2. (E_f - 1.022) \quad (2.16)$$

Burada Z, fotonun etkileştiği malzemenin atom numarası, E_f ise malzeme tarafından soğurulan fotonun enerjisidir (Martin, 2006).

2.4.3.4 Gama radyasyonu lineer zayıflatma katsayısı

Gama fotonları madde içinden geçerlerken soğurulmaktadırlar ve şiddetleri üstel olarak azalmaktadır. Maddenin dx gibi küçük bir kalınlığındaki soğurulma, Eşitlik 2.17 ve Eşitlik 2.18’ de verildiği üzere o noktadaki radyasyon şiddetiyle orantılı olmaktadır.

$$dI = - \mu. I. dx \quad (2.17)$$

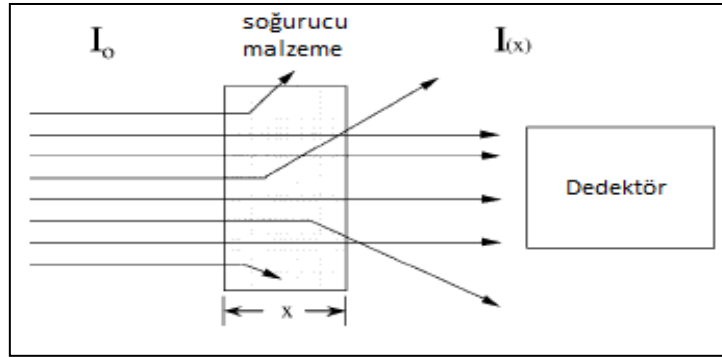
veya

$$dI/I = -\mu \cdot dx \quad (2.18)$$

Burada, I fotonun şiddetini (cm^2/s) ve μ orantı sabiti (cm^{-1}) olup verilen radyasyon için soğurucunun lineer zayıflatma katsayısıdır. Malzeme üzerine gelen foton demetinin dar bir demet olduğu kabul edilirse, tek enerjili gama ışın şiddeti I_0 , x cm kalınlığındaki maddeden geçtiğinde yayımlanan I_x şiddeti Eşitlik 2.19 ile;

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2.19)$$

olarak yazılabilir (Bilge, 1985). Şekil 2.13' de bu durum şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.13 : Gelen radyasyonun madde tarafından tutulması (Martin, 2006).

Lineer zayıflatma katsayısı, soğurucunun yoğunluğundan doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle soğurucu için daha geniş bir kullanım olarak kütle zayıflatma katsayısı tanımlanmaktadır. Kütle zayıflatma katsayısı,

$$\text{Kütle zayıflatma katsayısı } (\mu_m) = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.20)$$

Eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada μ , lineer zayıflatma katsayısını ve ρ ise soğurucunun yoğunluğunu göstermektedir. Soğurucu bir bileşik ise kütle zayıflatma katsayısı

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2.21)$$

ile hesaplanmaktadır (Knoll, 2002). Burada w_i , bileşiğin içindeki i elementinin ağırlık faktörünü temsil etmektedir.

2.4.4 Nötronların madde ile etkileşimi

Nötronların elektrik yükü olmadığından, çekirdek ile nükleer kuvvetler yoluyla etkileşimlere girerler. Nötron çekirdeğe yaklaştığı zaman, yüklü parçacıkların aksine

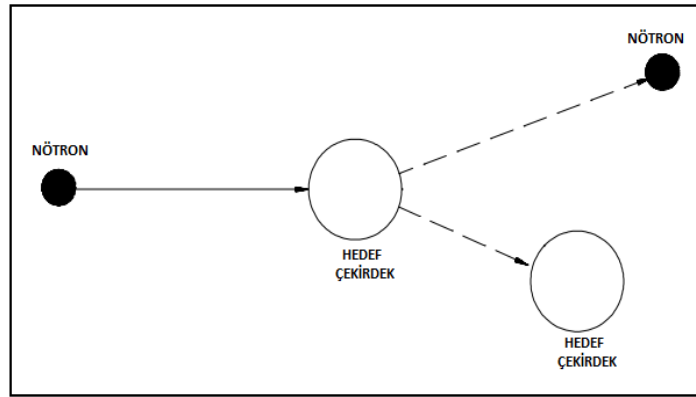
bir Coulomb bariyeri ile karşılaşmaz. Bu nedenle çekirdek ile etkileşmesi etkin olmaktadır. (Tsoulfanidis, 2011).

2.4.4.1 Nötronların etkileşim mekanizmaları

Nötronların malzeme ile etkileşiminde, temelde iki farklı etkileşim söz konudur. Bunlar nötronun çekirdek tarafından saçılması ve soğurulmasıdır.

2.4.4.2 Elastik saçılma

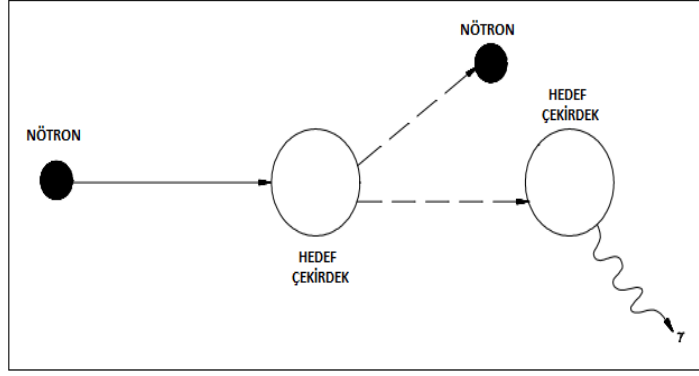
Hızlı nötronlar çekirdek ile etkileşime girdiğinde elastik saçılma yoluyla enerjilerini kaybetmektedirler. Elastik saçılma (n,n) reaksiyonu ile gerçekleşmektedir. Buna göre, çekirdek ile etkileşime giren nötron, kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktarmaktadır. Elastik saçılmada iki parçacığın toplam kinetik enerjisi korunmaktadır. Nötronun kaybettiği enerjinin oranı, çekirdeğin kütlesi nötronun kütlesine yaklaştıkça artmaktadır (Hallenbeck, 1994). Şekil 2.14’ de elastik saçılmanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.14 : Elastik saçılma (DOE, 1993).

2.4.4.3 Elastik olmayan saçılma

Bu saçılmada, nötron çekirdek ile etkileşime girdiğinde, gelen nötronun kinetik enerjisinin bir kısmı ile çekirdek üst enerji seviyesine çıkmaktadır. Elastik olmayan saçılmada (n, n') ve (n, n'γ) reaksiyonları meydana gelmektedir (Hallenbeck, 1994). Şekil 2.15’ de elastik olmayan saçılmanın şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.15 : Elastik olmayan saçılma (DOE, 1993).

2.4.4.4 Nötronların soğurulması

Soğurma tepkimelerinde, yavaş nötronlar ve hızlı nötronlar arasındaki tepkimeleri ayırt etmek gerekmektedir. Yavaş nötron tepkimelerinin farklı türleri bulunmaktadır.

Bunlarda; hedef malzeme tarafından nötron yakalanmakta ve bunu takiben;

- Gama radyasyonu yayınlanır (n,γ)
- Alfa parçacığı atılır (n,α)
- Proton atılır (n,p)
- İki nötron yayımlanır (n,2n)
- Bölünme (nükleer fisyon) (n,f)

Olabilmektedir. Bunlar arasında (n, γ) reaksiyonu en baskın olanıdır (Bilge, 1985).

2.4.4.5 Nötron reaksiyon tesir kesiti

Belirli bir enerjide, birim uzunluk başına nötronun madde ile etkileşme olasılığı, nötronun tüm etkileşim mekanizmalarında sabit olmaktadır (Knoll, 2002). Etkileşme olasılığı çekirdek başına kesit tesiri değeri σ cinsinden ifade edilmektedir. Tesir kesiti için kullanılan birim barn (10^{-28} m^2) 'dır.

Eşitlik 2.22'de verildiği üzere tesir kesiti, birim hacimdeki N tane çekirdek ile çarpılırsa makroskopik tesir kesit (Σ) değeri elde edilmektedir (Knoll, 2002).

$$\Sigma = \sigma.N \quad (2.22)$$

Makroskopik tesir kesit değeri, birim uzunluk başına makroskopik tesir kesit değeri için etkileşim olasılığını göstermektedir. Bu nedenle toplam makroskopik tesir kesit değeri, farklı etkileşimler için elde edilen makroskopik tesir kesit değerlerinin

toplamına eşit olmaktadır. Toplam makroskopik tesir kesit değeri Eşitlik 2.23’de verilmektedir (Knoll, 2002).

$$\Sigma_{\text{toplam}} = \Sigma_{\text{elastik saçılma}} + \Sigma_{\text{soğurma}} + \dots \quad (2.23)$$

Nötronlar madde içerisinde geçerken, nötronların sayısı üstel olarak azalmaktadır. Bu azalış Eşitlik 2.24’de verilmiştir. Bu eşitlik dar demet geometrisinde geçerlidir.

$$I = I_0 \cdot e^{-\Sigma \cdot \Delta x} \quad (2.24)$$

Burada I, I_0 ilk şiddetindeki akının, maddenin Δx kalınlığından geçtikten sonraki şiddetini temsil etmektedir (Knoll, 2002).

2.5 Radyasyon Kaynakları

2.5.1 Alfa ve beta kaynakları

Doğal radyoaktif ağır elementler, başlıca alfa aktif kaynakları oluşturmaktadır (uranyum, toryum vs.). Ağır elementlerin fisyon olayı ile bölünmesi sonucunda oluşan birçok element de yine alfa yayımlayıcısıdır (radyum, polonyum vb.). Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’ de sırası ile bazı alfa ve beta yayımlayıcısı kaynaklara ait bilgiler verilmektedir.

Çizelge 2.2 : Bazı alfa kaynakları (Knoll, 2002).

Kaynak	Yarı ömrü	Kinetik Enerjisi (MeV)	Yüzdesi (%)
¹⁴⁸ Gd	93 yıl	3.172887	100
²³² Th	1.4×10^{10} yıl	4.012	77
²³⁸ U	4.5×10^9 yıl	4.196	77
²³⁵ U	7.1×10^8 yıl	4.401	56
²³⁶ U	2.4×10^7 yıl	4.494	74
²³⁰ Th	7.7×10^4 yıl	4.6875	76.23
²³⁴ U	2.5×10^5 yıl	4.7739	72
²³¹ Pa	3.2×10^4 yıl	5.0141	25.4
²³⁹ Pu	2.4×10^4 yıl	5.1554	73.3
²⁴⁰ Pu	6.5×10^3 yıl	5.1683	76
²⁴³ Am	7.4×10^3 yıl	5.27540	87.4
²¹⁰ Po	138 gün	5.30451	99+
²⁴¹ Am	433 yıl	5.48574	85.2
²³⁸ Pu	88 yıl	5.49921	71.1
²⁴⁴ Cm	18 yıl	5.80496	76.4
²⁴³ Cm	30 yıl	5.7847	73.2
²⁴² Cm	163 gün	6.11292	74
^{254m} Es	276 gün	6.4288	93
²⁵³ Es	20.5 gün	6.63273	90

Atom çekirdeğinde nötron sayısı fazla olduğunda, atom beta parçacığı yayımlayarak kararlı hale geçmektedir.

Çizelge 2.3 : Bazı saf beta kaynakları (Knoll, 2002).

Kaynak	Yarı ömür	Maksimum enerji (MeV)
³ H	12.26 yıl	0.0186
¹⁴ C	5730 yıl	0.156
³² P	14.28 gün	1.710
³³ P	24.4 gün	0.248
³⁵ S	87.9 gün	0.167
³⁶ Cl	3.08x10 ⁵ yıl	0.714
⁴⁵ Ca	165 gün	0.252
⁶³ Ni	92 yıl	0.067
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	27.7 yıl/64 saat	0.546/2.27
⁹⁹ Tc	2.12x10 ⁵ yıl	0.292
¹⁴⁷ Pm	2.62 yıl	0.224
²⁰⁴ Tl	3.81 yıl	0.766

2.5.2 Gama kaynakları

Birçok gama kaynağı mevcuttur. Bunlar, radyoaktif izotop kaynaklar, ani fisyon gama fotonları (Prompt Fission Gamma Photons), fisyon ürünlerinden kaynaklı gama fotonları, yakalanmış gama fotonlar (Capture gamma photons), elastik olmayan nötron saçılması sonucu oluşan gama fotonları, aktivasyon yoluyla oluşan gama fotonları ve çift oluşumu sırasında ortaya çıkan gama fotonlarıdır (Shultis, 1996). En geniş anlamda kullanılan gama kaynakları, radyoizotoplardan elde edilenlerdir. Bunların birçoğu doğal olarak bulunabileceği gibi yapay olarak da üretilmektedir. Çizelge 2.4 'de bazı gama kaynakları ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Gama ışını yayan bazı kaynakların genel özellikleri (Standford University, 2015).

Radyonükleit	Γ faktörü (R.cm ² /mCi-sa)	Yarıömür	E _{γ} (MeV)	E _{γ} (%)
I-125	2.75	60.1 gün	0.027	113
Co-57	1.512	270.9 gün	0.122	86
Tc-99m	0.612	6.02 saat	0.140	90
I-131	2.83	8.0 gün	0.364	82
Cs-137	3.82	30.0 yıl	0.662	89
Mo-99	1.13	66 saat	0.140	91
Co-60	13.7	5.3 yıl	1.17 , 1.33	100
Ra-226	0.121	1600 yıl	0.186	3

2.5.3 Nötron kaynakları

Nötronlar en genelde, radyoizotop kaynaklardan, (α, n) reaksiyonu ile, (γ, n) reaksiyonu ile, nükleer reaktörlerde ve hızlandırıcılarda elde edilebilmektedir.

2.5.3.1. Radyoizotop nötron kaynakları

Nötron kaynağı olan doğal bir radyoizotop kaynağı bulunmamaktadır. Ancak yapay olarak elde edilmiş nötron yayan radyoizotoplar bulunmaktadır. Californium (Cf-252) haricinde genelde fiziksel yarı ömürleri hayli kısadır. Cf-252 radyoizotopunun 2,65 yıl yarı ömrü vardır ve fisyon başına 3,7 nötron yayımlamaktadır. Cf-252'nin nötron verimi $0,116 \text{ ns}^{-1}\text{Bq}^{-1}$ veya $2,3 \times 10^6 \text{ ns}^{-1}\mu\text{g}^{-1}$ dir (Hallenbeck, 1994).

2.5.3.2 (α, n) Nötron kaynakları

Nötron kaynağı için önemli reaksiyonlardan biri (α, n) reaksiyonu olmaktadır. Bu bağlamda, örneğin berilyum gibi bir elemanın alfa parçacıkları ile bombardımanı gereklidir. Bu reaksiyon için alfa parçacıklarının yaklaşık 5 MeV enerjiye sahip olmaları gerekmektedir (Delaney, 1992). Uygun alfa kaynakları Ac-227, Am-241, Cm-242, Cm-244, Po-210, Pu-238, Pu-239, Ra-226 radyoizotoplarıdır. Çizelge 2.5' de (α, n) reaksiyonu sonucu elde edilen nötron kaynakları ve bazı özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2.5 : (α, n) nötron kaynakları (Turner, 1995).

Kaynak	Ortalama Nötron Enerjisi (MeV)	Fiziksel Yarı ömür
²¹⁰ PoBe	4,2	138 gün
²¹⁰ PoB	2,5	138 gün
²²⁶ RaBe	3,9	1600 yıl
²²⁶ RaB	3,0	1600 yıl
²³⁹ PuBe	4,5	24100 yıl

Hedef malzeme olarak en çok Be-9 kullanımı tercih edilmektedir. Bunun dışında hedef malzeme olarak B-10, B-11, C-13, F-19 ve Li-7 de kullanılabilmektedir. Alfa-nötron kaynaklarından; özel araştırma alanları, kanser tedavisi, nükleer reaktörlerde başlangıç kaynağı ve endüstriyel nemölçer cihazlarda yararlanılmaktadır (Hallenbeck, 1994).

2.5.3.3 (γ,n) Nötron kaynakları

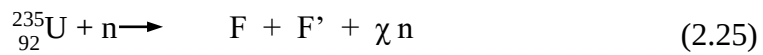
Nötron eldesi için kullanılan bu yöntem (γ,n) reaksiyonuna dayanmaktadır. (α,n) nötron kaynaklarının aksine tek enerjili gama fotonu yayan kaynak kullanılarak tek enerjili fotonötronlar elde edilebilmektedir (Turner,1995). Fotonötron kaynaklarının fiziksel yarı ömrü, kullanılan gama kaynaklarının fiziksel yarı ömrüne bağlı olmaktadır. Çizelge 2.6’ da verilen fotonötron kaynaklarından sadece ^{226}Ra kaynağı birçok enerjide gama fotonu yaydığından, tek enerjili fotonötron eldesi olamamaktadır.

Çizelge 2.6 : (γ,n) nötron kaynakları (Turner,1995).

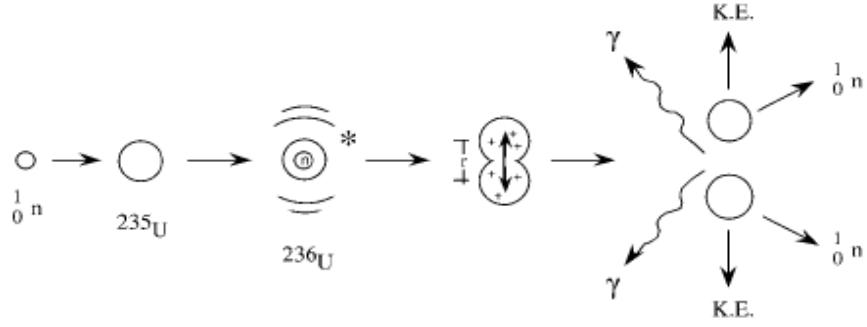
Kaynak	Nötron Enerjisi (MeV)	Fiziksel Yarı ömür
$^{24}\text{NaBe}$	0,97	15 saat
$^{24}\text{NaD}_2\text{O}$	0,26	15 saat
$^{116}\text{InBe}$	0,38	54 dakika
^{124}SbB	0,024	60 gün
$^{140}\text{LaBe}$	0,75	40 saat

2.5.3.4 Nükleer Reaktörler

Bir diğer nötron kaynağı, fisyon reaksiyonu kullanarak nötron elde edilen nükleer reaktörler olmaktadır. Bu yöntem karmaşık ve pahalı olması yanında mükemmel bir nötron kaynağı durumundadır. $^{235}_{92}\text{U}$ ile oluşan fisyon reaksiyonu Eşitlik 2.25’ de verilmiştir.



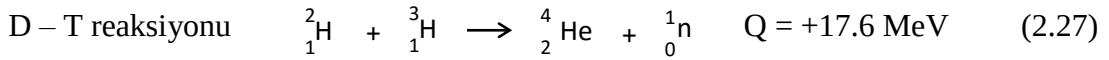
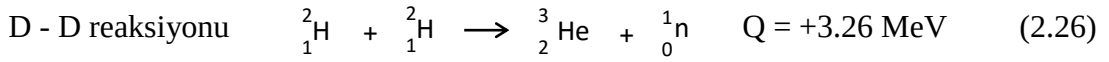
Burada F ve F’ fisyon ürünleri ve χ ortalaması 2,5 olan sayıyı temsil etmektedir. Bu yöntemle oluşturulan nötronların enerjisi 8-10 MeV mertebelerinde olabilmektedir. Eğer düşük enerjili termal nötronlar elde edilmek istenirse, reaktör içerisinde yavaşlatıcı (moderatör) malzeme kullanılması gerekmektedir. Böylece düşük atom numarasına sahip yavaşlatıcı malzeme ile etkileşime giren nötronlar elastik saçılmaya uğrayarak termal nötron haline dönüşebilmektedirler. Bir başka deyişle, nötronların enerjileri 0,025 MeV (oda sıcaklığında) seviyelerine indirilebilmektedir. Moderatör olarak en çok hafif su (H_2O), ağır su, (D_2O) ve grafit (^{12}C) kullanılmaktadır (Delaney, 1992). Şekil 2.16’ da fisyon olayı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.16: Fisyon reaksiyonu oluşum şeması (Martin, 2006).

2.5.3.5. Hızlandırıcılar

Proton, döteron gibi yüklü parçacıkların hızlandırılarak hedef malzemeye çaptırılması sonucu nötron açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonların en bilinen iki tanesi Eşitlik 2.26 ve 2.27’ de verilmiştir.



Hızlandırılan döteron ve hafif hedef malzeme arasındaki Coulomb bariyeri bağl olarak düşük olduğundan, döteronun yüksek enerjilere kadar hızlandırılması gerekmemektedir.

Birçok farklı parçacığın hızlandırılması ile de nötron elde edilmektedir. Bu parçacıkların girdiği reaksiyonlardan bazıları, ${}^9\text{Be(d,n)}$, ${}^7\text{Li(p,n)}$ ve ${}^3\text{H(p,n)}$ reaksiyonlarıdır (Knoll, 2002).

3. RADYASYON ZIRH MALZEMELERİ

3.1 Genel Radyasyon Zırh Malzemeleri

Teorik olarak tüm malzemeler, radyasyonu soğuracak yeterli kalınlık değeri kullanıldığında radyasyon zırhlanmasında kullanılabilir. Ancak sahip oldukları bazı özellikler nedeni ile bazı malzemeler radyasyon zırhlanmasında öne çıkmaktadır. Bir başka deyişle, radyasyon zırhlaması açısından etkin ve kullanımı yaygınlaşmış malzemeler radyasyon zırh malzemesi olarak nitelenmektedir.

Radyasyon zırh malzemesinin seçiminde birçok parametre etken olmaktadır. Söz konusu bu parametreler olarak;

- Malzemenin radyasyonu zayıflatma miktarı
- Malzemedede oluşacak ısıнын dağılım kolaylığı
- Radyasyon hasarına karşı gösterdiği direnç
- Radyasyonun zırhlanması için gerekli kalınlık ve kütle değeri
- Çoklu kullanıma uygun olması (örneğin hem radyasyon zırh malzemesi olarak hem de yapısal malzeme olarak kullanılabilmesi)
- Radyasyonun zırhlanmasında homojen etki göstermesi
- Malzemenin radyasyon zırhlanma etkisinin ve elde edilmesinin kalıcı olması
- Kolay bulunabilirlik
- Ekonomiklik

sayılabilir.

3.1.1 Gama radyasyonu zırh malzemeleri

Gama radyasyonuna ilişkin olarak zırh malzemesi seçilirken, gama radyasyonunun malzeme ile etkileşimi göz önüne alındığında yüksek atom numaralı malzemeler öne çıkmaktadır. Bu bağlamda ağır elementler gama radyasyonunun zırhlamasında etkin olmaktadır.

Gama radyasyonu zırh malzemesi olarak en çok kurşun ve baritli beton kullanılmaktadır. Bununla birlikte seyreltilmiş uranyum, çelik ve tungsten sıkça

kullanılan diğer malzemelerdir. Çizelge 3.1’ de gama zırhlanmasında kullanılan bazı malzemelere ait farklı gama enerjilerine karşı lineer zayıflatma katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.1: Bazı malzemelere ait lineer zayıflatma katsayıları (Glasstone, 1967).

Enerji (MeV)	Su (cm⁻¹)	Beton (cm⁻¹)	Alüminyum (cm⁻¹)	Demir (cm⁻¹)	Kurşun (cm⁻¹)
0,5	0,0966	0,204	0,227	0,651	1,64
1,0	0,0706	0,149	0,166	0,468	0,776
1,5	0,0575	0,121	0,135	0,381	0,581
2,0	0,0493	0,105	0,117	0,333	0,518
3,0	0,0396	0,0853	0,0953	0,284	0,477
4,0	0,0339	0,0745	0,0837	0,259	0,476
5,0	0,0301	0,0674	0,0761	0,246	0,483
8,0	0,0240	0,0571	0,0651	0,232	0,520
10,0	0,0219	0,0538	0,0618	0,231	0,554

3.1.1.1 Kurşun

Kurşun gama ışınlarını zırhlamada yüksek atom numarası ve yoğunluk özellikleri nedeniyle önemli bir elementtir. Kurşun ekonomik olarak nitelenebilecek bir malzeme olmasına karşın önemli dezavantajı, demir ve çelik malzemeye göre düşük kaynama sıcaklığına ve düşük mukavemet değerlerine sahip olması, yumuşak olmasıdır. Kurşun, beton ve çelik malzemeye göre aynı gama zırhlama etkisini daha az hacim kaplayarak gerçekleştirebilmektedir. Kurşun özellikle radyoaktif kaynak zırhlamasında, X ışını kullanılan radyoloji odalarının zırhlanmasında ve X ışını kolimasyonunda kullanılmaktadır. Kurşunun bazı özellikleri Çizelge 3.2’ de verilmektedir.

Çizelge 3.2 : Kurşun malzemesine ait bazı özellikler (Profio, 1979).

Özellik	Değer
Yoğunluk (g cm ⁻³)	11,35
Atom numarası	82
Atom kütlesi	207,15
Erime Sıcaklığı (°C)	327
Özısı (J g ⁻¹ °C ⁻¹)	0,13
Isıl İletkenlik (J cm ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹)	0,339
Isıl Genleşme Katsayısı (°C ⁻¹ lin.)	2,95 x 10 ⁻⁶
Sertlik (Brinell)	4
Akma dayanımı (psi)	860
Çekme dayanımı (psi)	1900
Sünme (psi, 100 °C’de 10 yılda %1’ i)	127
Uzama (%)	45
Young Modülü (psi)	2 x10 ⁶

Kurşun düşük kaynama sıcaklığı nedeni ile radyasyon nedeniyle oluşabilecek ısıyı uzaklaştırmak için soğutmaya gereksinim göstermektedir. Bunun yanında kurşun saf olduğu takdirde radyasyon hasarlarına karşı yüksek dirençlidir.

Öte yandan, kurşun buharları toksik etkiye sahip bulunmaktadır. Bu bağlamda iş güvenliği açısından sorun oluşturabilme potansiyeline sahiptir. Nitekim, AB (Avrupa Birliği) tarafından oluşturulan “Restriction of Hazardous Substances Directive (Belirli Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama) Direktifi” 27 Ocak 2003 tarihinde Avrupa Konseyi tarafından kabul edilmiştir. Bu kapsamda, kurşun, kadminyum, civa ve bromürlü bileşenler insan sağlığına zararlı maddelerin kullanımını yasaklar. Bu Direktif, ülkemizde de “EEE Yönetmeliği” adı ile Mayıs 2008’de Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Bu bağlamda, kurşundan vazgeçilmeye çalışılmaktadır (Birgör, 2009).

3.1.1.2 Demir

Demirin atom numarası ve yoğunluğu gama zırhlaması için kullanılan diğer malzemelere göre görece düşüktür. Buna rağmen demir ve çelik malzemeleri oksitlenmeden korunduğu takdirde görece diğer malzemelere göre daha yüksek sıcaklıklara kadar radyasyon zırhlamasında kullanılabilir. Eğer yapısında magnezyum, nikel, krom veya kobalt gibi safsızlık olmadığı takdirde aktivasyonu yüksek değildir ve radyasyon hasarlarına karşı dirençli olarak nitelenmektedir.

Demir nötron ile etkileşiminde elastik olmayan saçılma sonucu ve nötron yakalama reaksiyonları ile (n, γ) etkileşimi çerçevesinde gama ışınları yayımlar. Bu nedenle nötron zırhlamasında, ilave gama zırh malzemesi de kullanılmaktadır. Çizelge 3.3’ de demir malzemesine ait bazı özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Demir malzemesine ait bazı özellikler (Profio, 1979).

Özellik	Değer
Yoğunluk (g cm^{-3})	7,87
Atom numarası	26
Atom kütlesi	55,85
Erime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	1535
Özısı ($\text{J g}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,46
Isıl İletkenlik ($\text{J cm}^{-1} \text{s}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,67
Isıl Genleşme Katsayısı ($^{\circ}\text{C}^{-1}$ lin.)	11×10^{-6}
Sertlik (Brinell)	100
Akma dayanımı (psi)	25,000
Çekme dayanımı (psi)	40,000
Sünme (psi, $100 ^{\circ}\text{C}$ ’de 10 yılda %1’ i)	15,000

3.1.1.3 Tungsten

Tungsten pahalı olması ve zor şekillendirilebilir olmasına karşı, yüksek yoğunluğu ($19,3 \text{ g cm}^{-3}$) ve yüksek atom numarası (74) nedeni ile zırhlamada düşük kalınlık istenildiğinde tercih edilmektedir. Tungsten, görece diğer zırh malzemelerine göre çok yüksek erime noktasına ($3410 \text{ }^{\circ}\text{C}$) sahiptir. Tungsten'in radyasyon hasarlarına karşı ve korozyona karşı dirençli bir malzeme olmasına karşın ısıl nötron aktivasyonu yüksektir (Profio, 1979).

3.1.1.4 Seyreltilmiş uranyum

Uranyum içindeki ^{235}U izotopunun seyreltilmesi sonucu oluşturulmaktadır. Ekonomik açıdan, çok pahalı değildir. Bu malzemenin avantajı yüksek atom numarasına (92) ve yoğunluğa ($18,9 \text{ g cm}^{-3}$) sahip olmasıdır. Sert bir malzeme olmasının yanında görece yüksek erime sıcaklığına ($1132 \text{ }^{\circ}\text{C}$) sahip bulunmaktadır. Ancak, hava ile etkileşimi sonucu oluşacak oksitlenmeden ve korozyondan korunması gerekmektedir. Düşük de olsa radyoaktif olması nedeniyle dedektör zırhlanmasında kullanılması uygun değildir. Zırh malzemesi olarak daha çok radyoaktif maddelerin taşıyıcı elemanı olarak kullanılmaktadır. Radyasyon hasarı ve ısı sorunu ile birlikte ^{238}U izotopu'nun hızlı nötronlarla fisyon oluşturması, nötron yakalama reaksiyonu sonucu gama ışınları yayınlanması nedeni ile nötron zırhlanmasında tercih edilmemektedir (Profio, 1979).

3.1.2 Nötron zırh malzemeleri

Nötron zırhlanması diğer radyasyon tiplerinin zırhlanmasına göre daha zordur. Bunun nedeni nötronların birçok farklı enerjilere sahip olabilmeleridir. Düşük nötron enerjilerinde (0.1 MeV ' den az) nötron zırhlanmasında düşük atom numaralı malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle hidrojen içerikli malzemeler (su, parafin, polietilen, beton vs.), bor içerikli malzemeler (bor karbür) ve karbon içerikli malzemeler (grafit) amaca uygun olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3.4' de bazı malzemelere ait soğurma (σ_a) ve saçılma (σ_s) tesir kesitleri verilmektedir. Yüksek nötron enerjilerinde nötronların madde ile etkileşimlerinde daha çok elastik olmayan saçılma yaptıklarından, buna uygun malzemeler (demir, çelik vs.) seçilmektedir. Çizelge 3.4' de bu malzemelere ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Bazı elementlerin termal nötronlara saçılma ve soğurma tesir kesitleri (Glasstone, 1967).

Element	σ_s (barns)	σ_a (barns)	Element	σ_s (barns)	σ_a (barns)
Alüminyum	1,4	0,24	Hidrojen	38-100	0,33
Berilyum	7,0	0,10	Demir	11	2,62
Bizmut	9	0,034	Kurşun	11	0,17
Bor	4	755	Azot	10	1,88
Kadmiyum	7	2450	Oksijen	4,2	0,0002
Karbon	4,8	0,0034	Sodyum	4	0,53
Döteryum	7	0,0005	Uranyum	8,3	7,68
Helyum	0,8	0,007	Zirkonyum	8	0,185

3.1.2.1 Su

Su, içeriğindeki yüksek hidrojen oranı nedeni ile mükemmel bir nötron zırh malzemesidir. Korozyon etkisi olduğundan konulduğu bölüm kaplanmalıdır. En büyük dezavantajı düşük kaynama noktasıdır. Basınçlı kaplar dışında yüksek sıcaklıklarda kullanılamazlar. Saf su aktive olmaz ancak içinde safsızlıklar mevcutsa durum değişir. Çizelge 3.5’ de suya ait bazı özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Su’ ya ait bazı özellikler (Profio, 1979).

Özellik	Değer
Yoğunluk (g cm^{-3} , 20 °C)	1
Etkin Atom numarası	7,4
Elektron sayısı (gram başına)	$3,34 \times 10^{23}$
Hidrojen içeriği (atom cm^{-3})	$6,7 \times 10^{22}$
Kaynama sıcaklığı (°C)	100
Özısı ($\text{J g}^{-1} \text{°C}$)	4,18
Isıl İletkenlik ($\text{J cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	5,9
Isıl Genleşme Katsayısı (°C^{-1} hacimsel)	$4,1 \times 10^{-4}$
Radyasyon hasarı	Küçük

3.1.2.2 Polietilen (CH_2)_n

Polietilen en ünlü organik nötron zırh malzemesidir. En önemli dezavantajı radyasyon ve ısıya karşı gösterdiği düşük dirençtir. Polietilen düşük sıcaklıklarda yumuşamaktadır. Bu nedenle kaplanması gerekir. Polietilen malzeme, görece büyük ısı genleşme katsayısına ve düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Polietilen malzemenin

kokusu ve toksit etkisi yoktur. Asit ve alkalilerden etkilenmezler (Rockwell, 1956). Çizelge 3.6’ da bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Polietilen’ e ait bazı özellikler (Profio, 1979).

Özellik	Değer
Yoğunluk (g cm^{-3} , 20 °C)	0,95
Etkin Atom numarası	5,5
Hidrojen içeriği (atom cm^{-3})	$8,0 \times 10^{22}$
Yumuşama sıcaklığı (°C)	40
Özısı ($\text{J g}^{-1} \text{°C}$)	2,3
Isıl İletkenlik ($\text{J cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	3×10^{-3}
Isıl Genleşme Katsayısı (°C^{-1} lineer)	$1,2 \times 10^{-4}$
Çekme dayanımı (psi)	2800
Yanma durumu	orta
Radyasyon hasarı	büyük

3.1.2.3 Grafit

Hızlı nötronların zırhlanmasında hidrojen kadar etkili olamasa da, grafit yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen bir malzemedir ve daha çok yavaşlatıcı, yansıtıcı veya zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yoğunluğu değişken olsa da ortalama $1,65 \text{ g.cm}^{-3}$ değerindedir. Kullanılabildiği limit sıcaklık değeri 1 atm basınçta 3650 °C ’ dir. Öz ısı ve ısı genleşme katsayısı (lineer) değeri sırası ile $0,71 \text{ J g}^{-1} \text{°C}$ ve $3,8 \times 10^{-1} \text{ °C}^{-1}$ ’ dir. Grafit kırılğan ve çekme dayanımı oda sıcaklığında sadece 1400 psi’dir ve sıcaklıkla artmaktadır. Grafit orta derecede radyasyona karşı dirençlidir. Saf grafitin nötron aktivasyonu ve nötron yakalama gama yayımı bulunmamaktadır. Grafit, bor ile kaplanarak ısı nötron zırh malzemesi olarak da kullanılabilmektedir (Profio, 1979).

3.1.2.4 Beton

Beton doğal zırh malzemelerinden biridir. Adi beton, düşük atom numarası ve yoğunluğu nedeni ile gama zırhlaması için uygun olarak nitelenmemektedir. Bu nedenle daha yoğun beton elde edilmesi için betonun içine katkı malzemeleri (magnetit veya limonit demir cevheri, barit (baryum cevheri) ve demir) katkılanmaktadır.

Nötron radyasyonunun zırhlanmasını hidrojen içeriği ile gerçekleştirir. En önemli dezavantajlarından biri 93°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda su içeriği kaybı, dolayısı ile hidrojen kaybıdır. Çizelge 3.7' de adi ve ağır betonun bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Sıradan ve ağır betonun bazı özellikleri (Profio, 1979).

Özellik	Sıradan beton	Ağır beton
Yoğunluk (g cm^{-3} , 20 °C)	2,2 – 2,4	3,7 - 4,8
Etkin Atom numarası	11	~26
Hidrojen içeriği (atom cm^{-3})	$0,8 \times 10^{22}$ – $2,4 \times 10^{22}$	
Özısı ($\text{J g}^{-1} \text{°C}$)		0,8
Isıl İletkenlik ($\text{J cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	0,01	0,1
Isıl Genleşme Katsayısı (°C^{-1} lineer)		8×10^6
Çekme dayanımı (psi)		< 500
Maksimum sıcaklık (°C)		93,0
Maksimum ısıtma oranı (mW cm^{-3})		1,0
Maksimum sıcaklık gradyenti (°C cm^{-1})		0,8
Elastik modülü (psi)		2×10^{-5}
Radyasyon hasarı		İhmal edilebilir
Isıl nötron aktivasyonu	küçük	büyük

3.1.2.5 Bor katkılı malzemeler

Malzemelerin nötronlarla etkileşmelerinden doğan gama ışınları, zırhlamada üzerinde önemle durulması gereken konuyu oluşturmaktadır. Birçok malzeme ısı nötronları zırhlamada etkin olabilmektedir. Ancak, soğurma sonrası 5-10 MeV enerjili gama ışınları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, ikincil bir zırhlama gereksinimi ile birlikte ayrıca, ortaya çıkan ısının giderilmesi de gerekmektedir.

Bor, ısı nötronları soğurmada en etkin malzemelerin başında gelmektedir. Bor katkılı malzemelerden en çok kullanılanları bor içerikli plastik malzemeler ve bor kaplanmış çeliktir (Rockwell, 1956).

Nötron zırhlamasında, bor gibi sık kullanılan bir malzeme olan kadmiyum kullanılması halinde ise ısı nötronların soğurulması sonrası birçok yüksek enerjili gama ışını oluşmaktadır. Ayrıca, nötron etkileşmelerinin sonucunda dört radyoaktif izotop oluşmaktadır.

3.1.3 Beta radyasyonu zırh malzemeleri

Beta radyasyonu zırh malzemesi seçilirken özellikle düşük atom numaralı malzemeler seçilmesi gerekmektedir. Zira, beta ışınları, frenleme tipi X ışınlarının (Bremsstrahlung) oluşumuna neden olabilmektedir. Düşük atom numaralı

elementlerin kullanılması az miktarda X ışınlarının oluşmasını sağlamaktır (Martin, 2006). Çizelge 3.8’ de bazı beta yayınlayıcıları için beta parçacıklarının menzil değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Farklı beta kaynakları için menzil değerleri (Cherry, 2003).

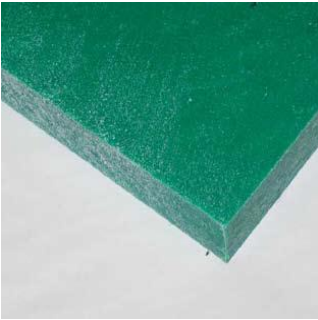
Kaynak	$E_{\beta}^{\max}$ (MeV)	Menzil (cm)		
		Hava	Su	Alüminyum
^3H	0,0186	4,5	0,00059	0,00022
^{11}C	0,961	302	0,39	0,145
^{14}C	0,156	21,9	0,028	0,011
^{13}N	1,19	395	0,51	0,189
^{15}O	1,723	617	0,80	0,295
^{18}F	0,635	176	0,23	0,084
^{32}P	1,70	607	0,785	0,290
^{82}Rb	3,35	1280	1,65	0,612

3.2 Özel Zırh Malzemeleri

3.2.1 % 5 Bor katkılı polietilen

Nükleer uygulamalarda nötron zırh malzemesi olarak geliştirilmiştir. İçeriğindeki %5 bor özellikle ısı nötronların zırhlanmasında etkilidir, ayrıca nötron yakalama sonrası yayınlanan gama ışınları (0,42 MeV enerjili) miktarını düşürmektedir. Bu malzeme içerisinde hidrojen içeriği zengin olduğundan hızlı nötronlar içinde oldukça iyi bir zırh malzemesidir. Hızlı nötronlar hidrojen atomları ile yavaşlatılarak ısı nötron haline gelmekte ve malzeme içeriğindeki bor ile ısı nötron zırhlanması sağlanmaktadır. Çizelge 3.9’ da bu malzeme ile ilgili özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.9 : %5 bor katkılı polietilen malzemenin bazı fiziksel özellikleri (Url-1).

Özellik	Değer	Görüntü
Yoğunluk (g/cm^3)	1,08	
Renk	Yeşil	
Baskı Dayanımı (psi)	800	
Maksimum Çalışma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	82,2	
Erime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	98,8	
Buharlaşma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	149	
Lineer Genleşme Katsayısı (cm^{-1})	2×10^4	
Su İçinde Çözünme	İhmal edilebilir	
Makroskopik Isıl Nötron Kesiti (cm^{-1})	2,00	
Gama Radyasyon Direnci (rad)	5×10^8	
Nötron Radyasyon Direnci (n/cm^2)	$2,5 \times 10^{17}$	

3.2.2 Bizmut macun

Bizmut yüksek atom numarası ve yoğunluğu ile tercih edilen bir gama radyasyonu zırh malzemesidir. En önemli dezavantajı kırılkan olması ve şekil vermekte yaşanan zorluklardır. Bizmut macunu, yüksek içerikli bizmut tozunun macun haline getirilerek kullanılmasıdır. Bu bileşiğin en önemli avantajı kurşun içermemesi, dolayısı ile toksit etkisi olmamasıdır. Çizelge 3.10’ da bu malzemeye ait özellikler verilmiştir.

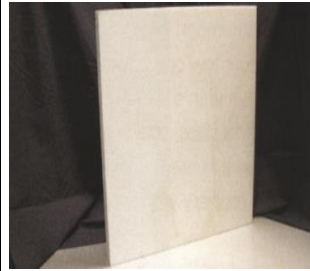
Çizelge 3.10 : Bizmut içerikli kil malzemenin bazı fiziksel özellikleri (Url-2).

Özellik	Değer	Görüntü
Yoğunluk (g/cm ³)	3,8	
Renk	gri	
Hidrojen atom yoğunluğu (atom/cm ³)	$3,3 \times 10^{22}$	
Lityum atom yoğunluğu (atom/cm ³)	$9,9 \times 10^{21}$	
Kurşun eşdeğer kalınlığı (inch)	0,39	
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	45	
Makroskopik Isıl Nötron Tesir Kesiti (cm ⁻¹)	0,01	
Gama Radyasyon Direnci (rad)	5×10^8	
Nötron Radyasyon Direnci (n/cm ²)	$2,5 \times 10^{17}$	

3.2.3 Lityum polietilen

%7.5 lityum katkılı polietilen malzemeler nötron zırhlama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeyi avantajlı kılan özelliği, nötron yakalama reaksiyonu sonrasında gama radyasyonu ortaya çıkmamasıdır. Bu malzemenin dezavantajı ise lityumun ısı nötron tesir kesit değeri bor elementine göre daha düşük olmasıdır. Bundan dolayı daha kalın hacimde kullanılmak durumundadır. Çizelge 3.11’de lityum içerikli polietilenin bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Lityum katkılı polietilen malzemenin bazı fiziksel özellikleri (Url-3).

Özellik	Değer	Görüntü
Yoğunluk (g/cm ³)	1,06	
Renk	Beyaz	
Hidrojen atom yoğunluğu (atom/cm ³)	$5,44 \times 10^{22}$	
Lityum atom yoğunluğu (atom/cm ³)	$6,7 \times 10^{21}$	
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	82,2	
Makroskopik Isıl Nötron Tesir Kesiti (cm ⁻¹)	0,48	
Gama Radyasyon Direnci (rad)	5×10^8	
Nötron Radyasyon Direnci (n/cm ²)	$2,5 \times 10^{17}$	

3.2.4 Polietilen tabanlı (Poly-Biz) gama zırh malzemesi

Bizmut tozlarının polietilen matris içerisine konulması ile oluşturulmuştur. Özellikle kurşun içerikli zırh malzemelerine alternatif olmaktadır. Gama radyasyonu zırhlamasının yanında içeriğindeki polietilen nedeni ile nötron içinde zırhlama etkisi göstermektedir. Çizelge 3.12’ de bu malzeme için bazı fiziksel özellikler verilmiştir.

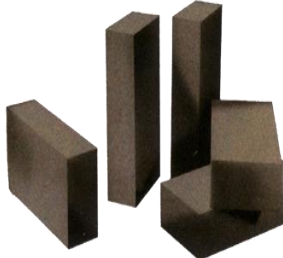
Çizelge 3.12 : Bizmut içerikli polietilen malzemenin bazı fiziksel özellikleri (Url-4).

Özellik	Değer	Görüntü
Yoğunluk (g/cm ³)	3,0	
Renk	Kahverengi	
Hidrojen atom yoğunluğu	$5,5 \times 10^{23}$	
Lityum atom yoğunluğu	$6,8 \times 10^{22}$	
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	82,2	
Makroskopik Isıl Nötron Kesiti	0,48	
Gama Radyasyon Direnci (rad)	5×10^8	
Nötron Radyasyon Direnci (n/cm ²)	$2,5 \times 10^{17}$	

3.2.5 Bor-silikon malzeme

Bor-silikon içerikli nötron zırhlama malzemesidir. Bu malzeme yüksek hidrojen içeriğine sahip bulunmaktadır. 204,4 °C sıcaklığa kadar içeriğindeki hidrojeni %90 oranında korumaktadır. Çizelge 3.13’ de bu malzemeye ait bazı özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.13 : Bor-silikon içerikli malzemenin bazı fiziksel özellikleri (Url-5).

Özellik	Değer	Görüntü
Yoğunluk (g/cm ³)	1,59	
Renk	Koyu gri	
Hidrojen atom yoğunluğu (atom/cm ³)	$4,49 \times 10^{22}$	
Bor atom yoğunluğu (atom/cm ³)	$9,4 \times 10^{20}$	
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	204,4	
Baskı dayanımı (psi)	450	
Çekme dayanımı (psi)	50	
Makroskopik Isıl Nötron Kesiti (cm ⁻¹)	0,71	
Gama Radyasyon Direnci (rad)	1×10^8	
Nötron Radyasyon Direnci (n/cm ²)	5×10^{18}	

3.2.6 Tungsten alaşımları

Tungsten, kurşuna göre daha yoğun bir malzeme olduğundan daha etkin bir gama radyasyonu zırhlama malzemesidir. Tungsten alaşımları genel olarak kurşuna göre daha iyi korozyon direncine ve daha iyi dayanıma sahiptir. Kurşun eşdeğeri tungsten alaşımları, daha az hacim kaplamaktadır. Bunun yanında toksit etkileri olmadığından biyolojik olarak da kullanımı kurşundan daha sağlıklıdır. Gama radyasyonu zırhlanmasında kullanılan bazı tungsten alaşımları Çizelge 3.14’ de verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Gama radyasyonu zırhlanmasında kullanılan bazı tungsten alaşımlarının özellikleri (Url-6).

Malzemeler	WSM-1	WSM-2	WSM-3	WSM-4	WSM-5
Yüzde bileşenler (%)					
Tungsten (W)	90	92,5	95	97	90
Nikel (Ni) /Bakır (Cu)	6	5,25	3,5	2,1	4
Demir (Fe)	4	2,25	1,5	0,9	2
Molibden (Mo)	-	-	-		4
Fiziksel özellikleri					
Yoğunluk (g/cm ³)	16,85 17,25	17,15 17,85	17,75 18,35	18,25 18,85	17,10 17,30
Isıl İletkenlik (W/m.K ⁻¹)	70/95	75/100	85/105	90/115	80
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	5,8	5,5	5,2	5,0	5,3
Mekanik Özellikleri					
Çekme dayanımı R _m (MPa)	750-1200	750-1400	720-1200	680-1000	700-1000
Akma gerilmesi (MPa)	517	517	517	517	650
Uzama (%)	5-30	5-25	3-15	2-10	2-15
Sertlik (HRC)	24-32	25-33	25-34	30-35	24-32

WSM: Tungsten High Density Alloy

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu doktora tezinde, Alüminyum-bor karbür kompozit malzemelerin farklı radyasyon tipleri karşısında zırlama etkisinin incelenmesi ve sonucunda yeni bir kompozit malzemenin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, uygun deney düzenekleri hazırlanmış ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

4.1 Çalışılan Malzemeler

Farklı radyasyon tiplerine karşı zırlama etkisi incelenen malzemeler farklı oran ve parçacık boyutunda bor karbür içeren alüminyum kompozit malzemelerdir. Söz konusu malzemeler kodlanarak nitelendirilmiştir.

Alüminyum-bor karbür içeren malzemeler içerisinde saf bor karbür (B_4C) ve saf alüminyum malzeme bulunmaktadır. Söz konusu malzemeler İTÜ Kimya ve Metalurji Mühendisliği bölümü ve Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya ve Metalurji Mühendisliği bölümü imkânlarıyla üretilmiştir. Malzemelere ait bazı mekanik özellikleri Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü olanaklarıyla belirlenmiştir (Ağacan, 2013).

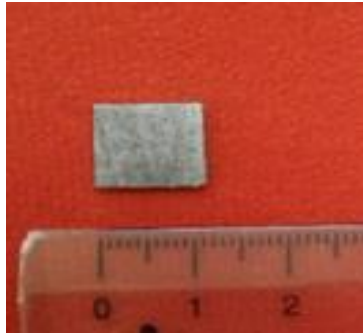
Kompozit malzemeler içerisinde beş farklı tane boyuna sahip (ortalama 3 μm , ortalama 53 μm , 75-150 μm arası, 150-250 μm arası ve 500 μm üzeri) bor karbür bileşiği kullanılmıştır. Bunun yanı sıra bor karbürün malzeme içerisindeki hacimsel yüzdesi değiştirilerek (hacimsel olarak %5, %10, %15 ve %20) malzemeler oluşturulmuştur. Çizelge 4.1’ de kullanılan kompozit malzemeler, bor karbürün hacimsel yüzde oranları ve tane boyutlarına göre kodlanarak verilmiştir.

Çizelge 4.1’ de verilen kodlarda sırası ile matris elementinin simgesi, sonraki ilk iki haneli rakam bor karbürün kompozit malzeme içerisindeki yüzdesel oranını, ikinci iki haneli rakam ise küçükten büyüğe doğru bor karbür tane boyutunu vermektedir.

Çizelge 4.1 : Alüminyum-bor karbür malzemelerin hacimsel içeriği ve kodlanması.

Malzemenin Kodu	Bor Karbür (Hac. %)	Alüminyum (Hac. %)	Bor Karbür Tane boyutu (µm)
Al-05-03	05	95	3
Al-10-03	10	90	3
Al-15-03	15	85	3
Al-20-03	20	80	3
Al-05-53	05	95	53
Al-10-53	10	90	53
Al-15-53	15	85	53
Al-20-53	20	80	53
Al-05-75	05	95	75-150
Al-10-75	10	90	75-150
Al-15-75	15	85	75-150
Al-20-75	20	80	75-150
Al-05-150	05	95	150-250
Al-10-150	10	90	150-250
Al-15-150	15	85	150-250
Al-20-150	20	80	150-250
Al-05-500	05	95	> 500
Al-10-500	10	90	> 500
Al-15-500	15	85	> 500
Al-20-500	20	80	> 500

Çizelge 4.1’de kodları verilen kompozit malzemelerin tümü 350 °C sıcaklıkta 2 MPa basınç altında soğuk presleme ile şekil verildikten sonra 3 dakika süre ile sıcak presleme uygulanarak oluşturulmuştur (Ağacan, 2014). Şekil 4.1’ de alüminyum-bor karbür kompozit malzemelerin görüntüleri verilmiştir.



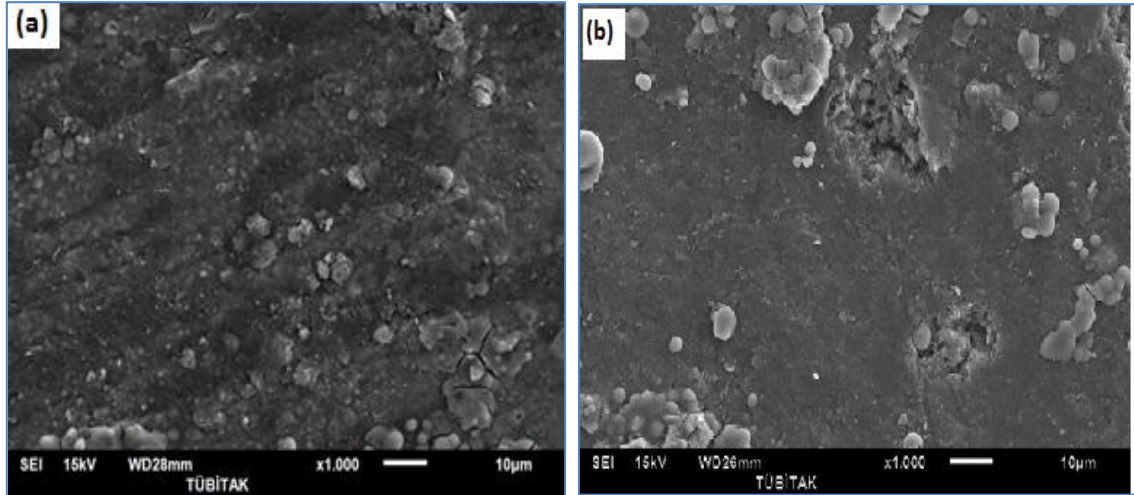
Şekil 4.1 : Çalışılan alüminyum-bor karbür kompozit bir malzemenin genel görüntüsü.

Bu malzemelere ait bazı mekanik özellikler Çizelge 4.2’ de verilmiştir (Akkas, 2015a).

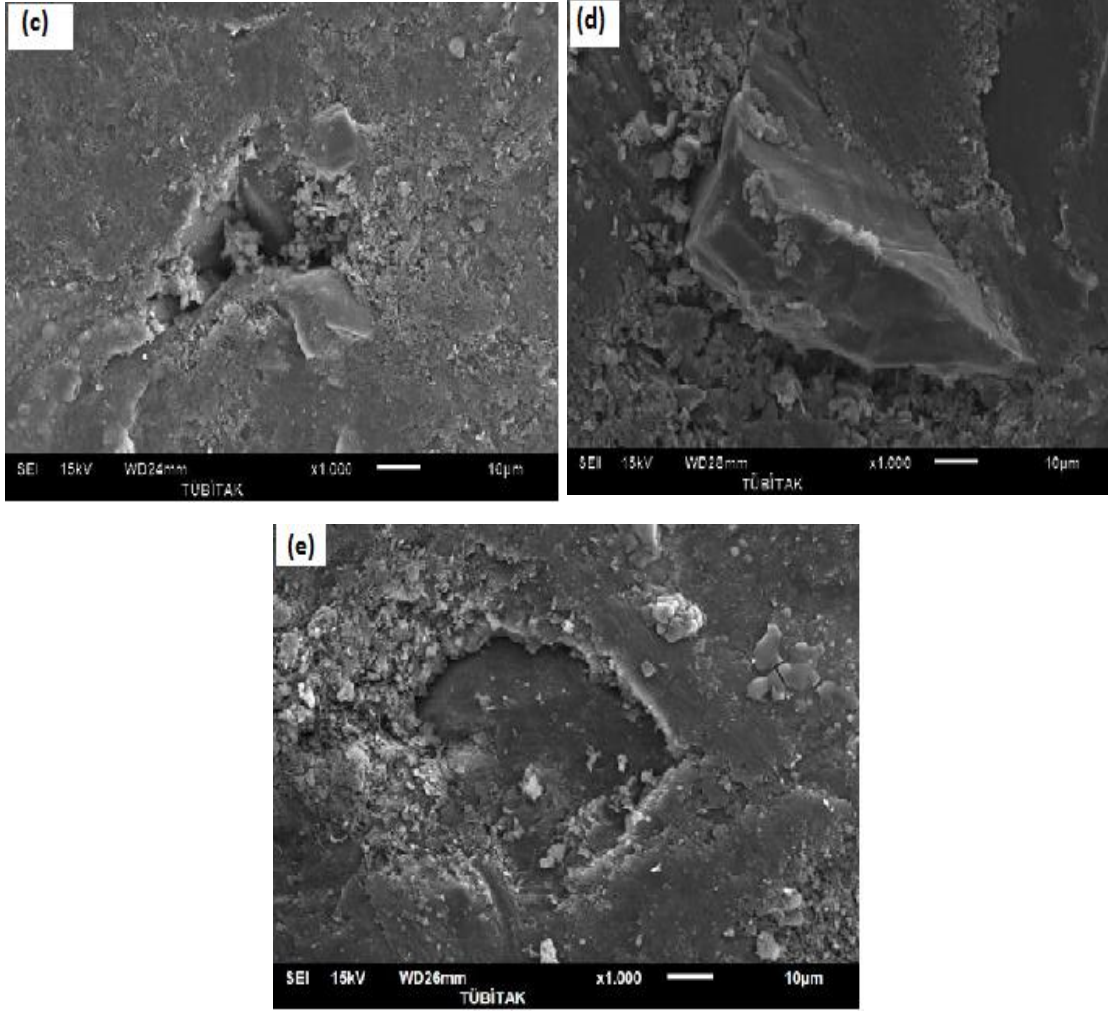
Çizelge 4.2 : Alüminyum-bor karbür kompozit malzemelere ait teorik ve deneysel yoğunluk değerleri.

Malzemenin Kodu	Teorik yoğunluk (g.cm ⁻³)	Deneysel yoğunluk (g.cm ⁻³) ± 0,001 (g.cm ⁻³)	Yüzde fark (%)
Al-05-03	2,691	2,637	2,0
Al-10-03	2,682	2,565	4,4
Al-15-03	2,673	2,511	6,1
Al-20-03	2,664	2,478	7,0
Al-05-53	2,691	2,616	2,8
Al-10-53	2,682	2,574	4,0
Al-15-53	2,673	2,591	3,1
Al-20-53	2,664	2,550	4,3
Al-05-75	2,691	2,619	2,7
Al-10-75	2,682	2,583	3,7
Al-15-75	2,673	2,528	5,4
Al-20-75	2,664	2,521	5,4
Al-05-150	2,691	2,604	3,2
Al-10-150	2,682	2,588	3,5
Al-15-150	2,673	2,579	3,5
Al-20-150	2,664	2,557	4,0
Al-05-500	2,691	2,607	3,1
Al-10-500	2,682	2,546	5,1
Al-15-500	2,673	2,565	4,0
Al-20-500	2,664	2,533	4,9

Şekil 4.2' de %20 B₄C katkılı malzemelerin SEM grafikleri görülmektedir.

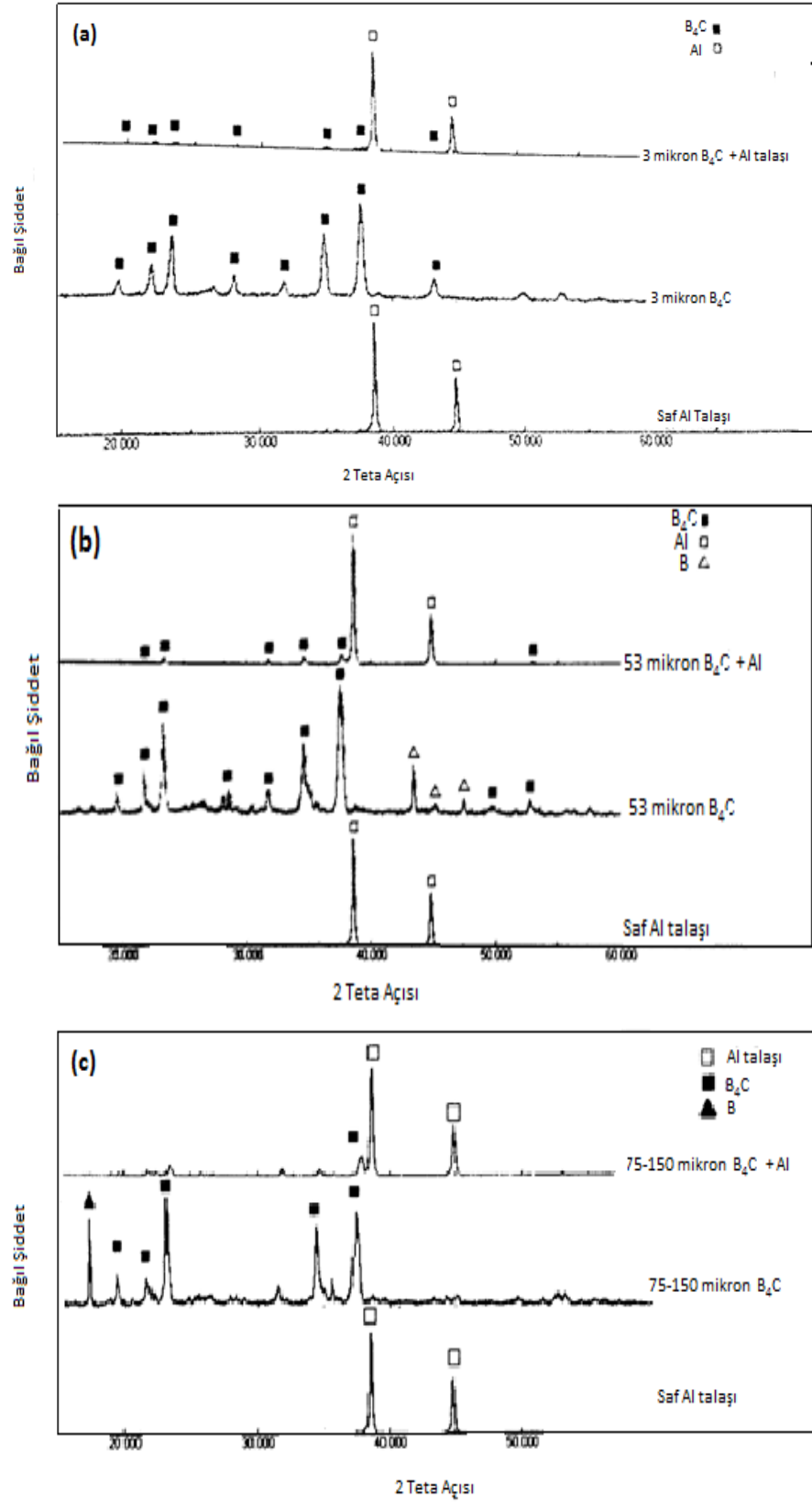


Şekil 4.2 : %20 katkılı a) ortalama 3 µm b) ortalama 53µm c) 75-150 µm d) 150-250 µm ve e) 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren kompozit malzemelerin SEM fotoğrafları.

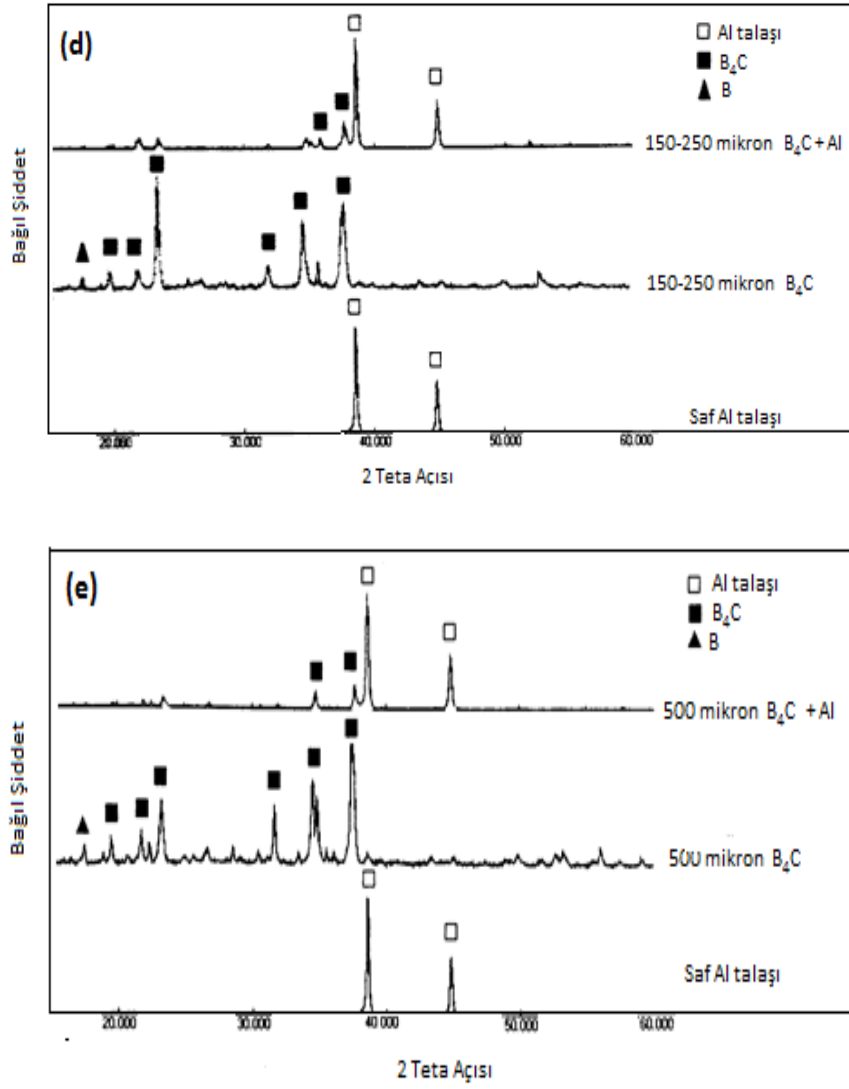


Şekil 4.2 (devam) : %20 katkılı **a)** ortalama 3 µm **b)** ortalama 53µm **c)** 75-150 µm **d)** 150-250 µm ve **e)** 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren kompozit malzemelerin SEM fotoğrafları.

Şekil 4.3' de %20 B₄C katkılı malzemelerin XRD grafikleri verilmiştir



Şekil 4.3 : %20 katkılı **a)** ortalama 3 μm **b)** ortalama 53 μm **c)** 75-150 μm **d)** 150-250 μm ve **e)** 500 μm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren kompozit malzemelerin XRD grafikleri.



Şekil 4.3 (devam) : %20 katkılı **a)** ortalama 3 μm **b)** ortalama 53 μm **c)** 75-150 μm **d)** 150-250 μm ve **e)** 500 μm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren kompozit malzemelerin XRD grafikleri.

4.2 Deney Düzenekleri

Kompozit malzemelerin farklı radyasyon tipleri karşısında davranışını incelemek üzere üç farklı deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu bağlamda tasarlanan deney düzeneklerini;

- Gama deney düzeneği,
- Nötron deney düzeneği,
- Beta deney düzeneği

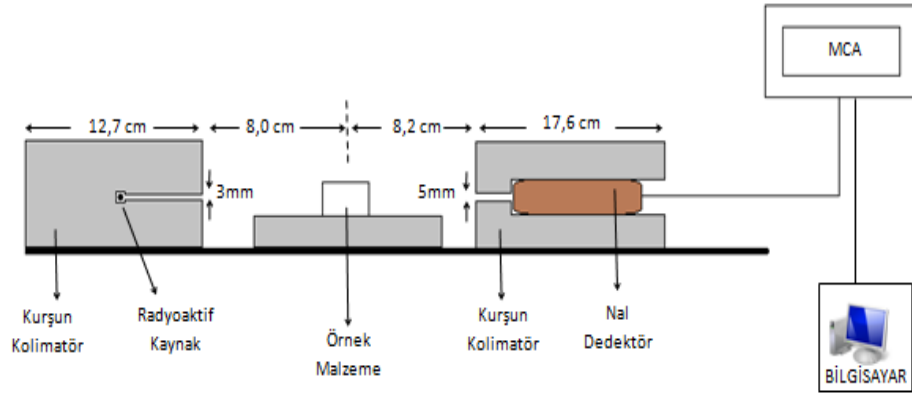
olarak gruplandırmak mümkündür.

4.2.1 Gama Deney Düzeneği

Gama deney düzeneği, transmisyon tekniği prensibi çerçevesinde oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde gama radyasyon kaynağından isotropik yayılan fotonlar, kurşun kolimatör kullanılarak paralel demet haline getirilmiştir. Oluşturulan gama hüzmesi malzeme üzerinden geçirilerek aynı ekseninde bulunan dedektör tarafından ölçülmektedir. Gama fotonlarının malzemeden geçerken saçılmaya uğrayanlarının detektöre ulaşmasını engellemek için, dedektör çevresi kurşun malzeme ile zırhlanmıştır. Sırası ile, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’ de gama deney düzeneğinin görünümü ve şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 4.4 : Gama deney düzeneğinin görünümü.



Şekil 4.5 : Gama deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Gama deney düzeneğinin başlıca elemanları;

- Gama radyoizotop kaynakları
- Gama dedektör sistemi
 - ✓ Sodyum iyodür (NaI) sintilasyon dedektörü
 - ✓ Önyükselteç ve yükselteç
 - ✓ Güç Kaynağı

- ✓ Çok kanallı analizör
- ✓ Bilgisayar
- Kurşun kolimatör ve kurşun zırh malzemeleridir.

4.2.1.1 Gama radyoizotop kaynakları

Gama deney düzeneğinde, radyoaktif kaynak olarak Am-241, Cs-137 ve Co-60 olmak üzere üç farklı radyoizotop kullanılmıştır. Bu radyoizotoplar farklı enerjilerde gama fotonu yayınlamaktadırlar. Bu radyoizotoplara ait genel bilgiler Çizelge 4.3’ de verilmiştir.

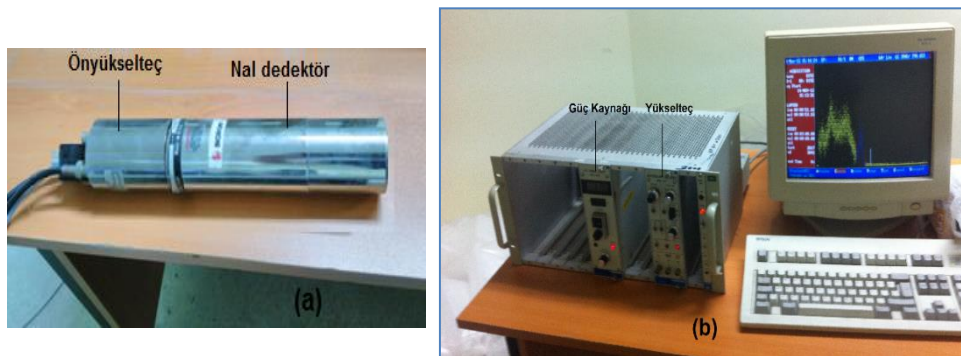
Çizelge 4.3 : Deneylerde kullanılan gama radyoizotop kaynaklar ve özellikleri (Delacroix ve diğ., 2002).

Gama Kaynağı	Çalışılan Aktivite	Gama Enerjileri(keV)	Fiziksel Yarıömür(yıl)	Özgül Aktivitesi(Bq/g)
Am-241	~60 µCi	60 (%36), 18 (%18), 14 (%13)	432,7	$1,27 \times 10^{11}$
Cs-137	~28 mCi	662 (%85), 36 (%1), 32 (%6)	30,2	$3,20 \times 10^{12}$
Co-60	~30 µCi	1173 (%100), 1333 (%100)	5,27	$4,18 \times 10^{13}$

Deneylerde, Am-241 gama kaynağı için 60 keV enerjili piki, Cs-137 gama kaynağı için 662 keV enerjili piki ve Co-60 için 1173 keV ile 1333 keV enerjili pikleri kullanılmıştır.

4.2.1.2 Gama dedektör sistemi

Gama dedektör sistemi Sodyum iyodür (NaI) sintilasyon dedektörü, önyükselteç ve yükselteç, güç kaynağı, çok kanallı analizör ve bilgisayar ile kolimatör ve zırh malzemelerinden oluşmaktadır. Şekil 4.6’ da kullanılan Canberra marka 802-3W model NaI dedektör ile önyükselteç ve ilgili elemanlar görülmektedir.



Şekil 4.6 : a) Canberra marka NaI dedektör ve önyükselteç'in görüntüsü b) gama dedektör sisteminin diğer elemanları.

Dedektörün arka kısmına Canberra marka 2007P model ön yükselteç bağlıdır. Ön yükselteçten çıkan veriler Canberra marka 2021 model yükseltece gelmektedir. Buradan yükseltile veriler bilgisayar içindeki Canberra marka çok kanallı analizöre gelerek değerlendirilmekte ve arayüz programı vasıtası ile ekrana yansıtılmaktadır.

4.2.1.3 Gama kolimatörleri

Gama deney düzeneğinde Şekil 4.7' de görüldüğü üzere kurşun elementinden yapılmış kolimatörler kullanılmıştır. Deney düzeneğinde kolimatörler radyoaktif kaynaktan çıkan gama fotonlarının demet haline getirilmesi, saçılan fotonların dedektöre ulaşmasını engellemek ve çalışanların radyasyondan korunması amacı ile kullanılmıştır.



Şekil 4.7 : Kurşundan yapılmış kolimatörlerin görüntüsü.

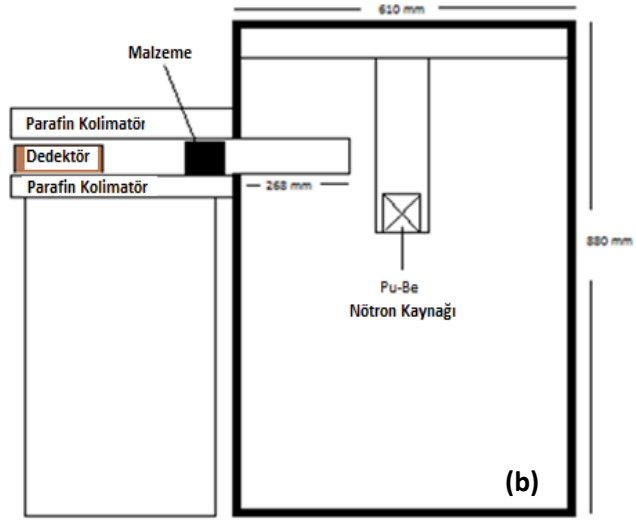
4.2.2 Nötron deney düzeneği

Nötron deney düzeneği transmisyon tekniği prensibi çerçevesinde oluşturulmuştur. Deney düzeneği;

- Nötron kaynağı,
- Kolimatörler ve
- Nötron dedektör'ünden

oluşmaktadır.

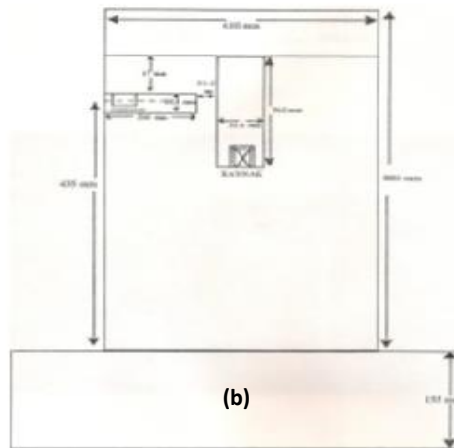
Nötron deney düzeneğinin görünümü ve şematik gösterimi Şekil 4.8' de verilmektedir.



Şekil 4.8 : a) Nötron deney düzeneği görünümü, b) Nötron deney düzeneği şematik gösterimi.

4.2.2.1 Nötron kaynağı

Nötron deneylerinde İ.T.Ü. Enerji Enstitüsü bünyesinde İ.T.Ü. Triga Mark II Eğitim ve Araştırma Reaktörü içinde bulunan Nuclear Chicago Corporation tarafından üretilen $1,85 \times 10^5$ MBq (5 Ci) aktiviteli (Pu-Be) Nötron Howitzer-3 (NH-3) kaynak kullanılmıştır (Yiğit 1996, Nuclear Chicago,1960). Şekil 4.9’da görüldüğü üzere, Howitzer 61 cm çap ve 91cm yüksekliğinde silindirik yapıda çelikten yapılmış bir kabuk içerisindedir. Termal ve epitermal nötronlar için iki adet ışınlama kanalı bulunmaktadır. Kaynağın etrafı yaklaşık 25 cm kalınlığında özel parafin ile kapatılmıştır (Gordus, 1967). Nötron akısı $10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ’ dir. Howitzerde üretilen nötronların ortalama enerjisi 4 MeV’dir (Yiğit, 1996).



Şekil 4.9 : a) Nötron howitzer’ in a) dış görünüşü b) iç yapısı.

Çizelge 4.4’ de deneylerde kullanılan nötron kaynağının özellikleri verilmektedir.

Çizelge 4.4 : Pu-Be nötron kaynağının (NH₃, Nötron Howitzer) özellikleri.

Nötron Kaynağı	Pu-Be Nötron Kaynağı
Nötron Kaynağı Tipi	Nuclear Chicago Corporation
Nötron Üretim Reaksiyonu	(α ,n)
Aktivite	1,85x10 ⁵ MBq (5 Ci)
Nötron Akısı	10 ⁵ n/cm ² s
Üreyen Nötronların Ortalama Enerjisi	4 MeV
Işınlama Kanal Sayısı	2
Howitzer'in boyutları	Ø 61 cm x 91 cm
Parafin kalınlığı	25 cm

Nötron howitzer kaynağında Pu-Be kaynağı üst ortadan 562 mm aşağıda yer almaktadır. Kaynağı ışınlama seviyesine çekmek için Howitzer'in üst yüzeyinde bulunan çubuk kullanılmaktadır (Yiğit, 1996).

4.2.2.2 Nötron kolimatörleri

Nötron deney düzeneğinde kolimatör olarak borik asit kullanılmıştır. Borik asit konulmuş plastik kaplar Howitzerin nötron çıkış kanalının önüne uygun bir biçimde yerleştirilerek, kanaldan çıkan nötronların düz bir demet haline getirilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.10' da kullanılan borik asit görülmektedir.



Şekil 4.10 : Nötron deney düzeneğinde kolimatör ve zırh elemanı olarak kullanılan borik asit.

4.2.2.3 Nötron zırh elemanları

Nötron zırh elemanı olarak borik asit ve ağır beton kullanılmıştır. Nötron dedektörünün zırhlanmasında borik asit kullanılırken biyolojik zırh elemanı olarak ağır beton kullanılmıştır. Kullanılan borik asit Şekil 4.10' da verilmiştir.

4.2.2.4 Nötron dedektörü

Nötron dedektörü olarak Şekil 4.11 'da görülen Polimaster marka PM1401K model çok amaçlı dedektör kullanılmıştır. Dedektör içinde bulunan He-3 dedektörü ile 0.025 eV - 14 MeV enerji aralığında nötron sayımı yapılabilmektedir. Çizelge 4.5' de dedektöre ait bilgiler verilmiştir.



Şekil 4.11: Polimaster marka PM1401K model çok amaçlı dedektörün görüntüsü.

Çizelge 4.5 : PM1401K sintilasyon dedektörün genel özellikleri (Url-7).

Standartlara Uygunluk	IEC 846, ANSI N42.33(2), ANSI N42.34, IEC
Araştırma ve spektrum γ-kanalı	
Dedektör	CsI(Tl)
^{137}Cs için hassasiyet	200 $\text{s}^{-1}/(\mu\text{Sv/h})$ (2 $\text{s}^{-1}/(\mu\text{R/h})$)
^{241}Am için hassasiyet	200 $\text{s}^{-1}/(\mu\text{Sv/h})$ (2 $\text{s}^{-1}/(\mu\text{R/h})$)
Enerji aralığı	0.03 - 3.0 MeV
Spektrum için kanal sayısı	1024
Nötron araştırma kanalı	
Dedektör	Yavaş nötron sayıcısı
Enerji aralığı	0.025 eV - 14 MeV (only in PM1401K)
γ-ölçüm kanalı	
Dedektör	GM-sayıcı
Doz hızı	0.1 $\mu\text{Sv/h}$ - 100 mSv/h
Enerji aralığı	0.015 - 15 MeV
Fiziksel özellikleri	
Boyutları	242 x 58 x 57 mm (9½" x 2¼" x 2¼")
Kütlesi	650 g (22.9 oz)
Çevresel Özellikleri	
Sıcaklık	-30°C ile 50°C arası
Nem	35 °C 'de %95'e kadar(95 °F)

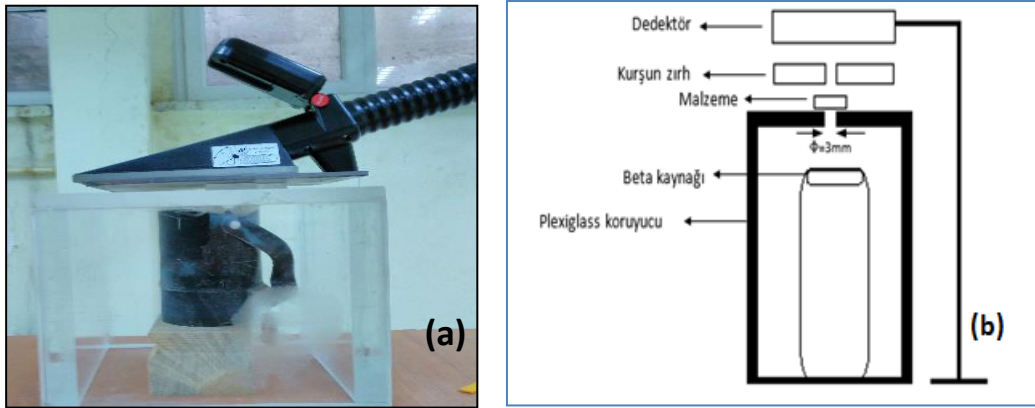
4.2.3 Beta deney düzeneği

Beta deney düzeneği transmisyon tekniği prensibi çerçevesinde oluşturulmuştur. Deney düzeneği;

- Beta radyoizotop kaynağı,
- Koruyucu zırh,
- Kolimatör ve
- Dedektör' den

oluşturmuştur.

Deneysel çalışma için kurulan beta deney düzeneği ve deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4.12 ' de görülmektedir.



Şekil 4.12 : Beta deney düzeneğinin a) görünümü ve b) şematik gösterimi.

4.2.3.1 Beta radyoaktif kaynak

Beta deneylerinde Sr^{90}/Y^{90} beta radyoizotop kaynağı kullanılmıştır. Çizelge 4.6' da bu radyoizotop ile ilgili genel özellikler verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Beta radyoizotop kaynak ve bazı özellikleri (Delacroix ve diğ., 2002).

Kaynak	Aktivitesi (mCi)	Beta E_{max} (keV)	Fiz. Yarıömür(yıl)	Özgül aktivitesi (Bq/g)
Sr-90/Y-90	~1,2	2284 (%100), 546 (%100), 253(<%1)	28,2	$5,21 \times 10^{12}$

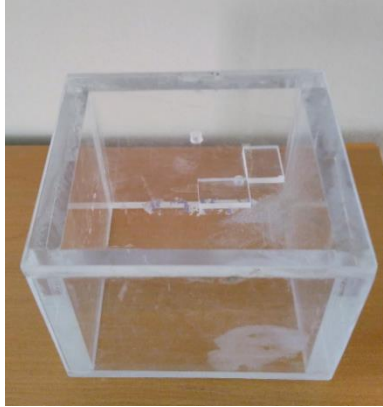
Şekil 4.13' de beta kaynağının görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.13 : Sr-90 beta kaynağının görünümü.

4.2.3.2 Beta koruyucu zırh ve kolimatör

Deneyde, beta radyoizotop kaynağın çevresi 2 cm kalınlığında plexiglass malzemeden yapılmış koruyucu kutu ile çevrili olarak kullanılmıştır. Bu kutunun tepe noktasından 3 mm çapında delik açılarak radyoizotop kaynaktan çıkan negatronların demet haline getirilmesi sağlanmıştır. Radyoizotop kaynağın çevreyle etkileşmesi sonucu çıkan bremsstrahlung ışımlarının konulan kurşun plaka ile detektöre ulaşması azaltılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan koruyucu zırh malzeme Şekil 4.14 ‘de verilmiştir.



Şekil 4.14 : Pleksiglass malzemeden yapılmış koruyucu zırh malzeme.

4.2.3.3 Beta dedektörü

Beta deney düzeneğinde RadEye marka AB100 model dedektör kullanılmıştır. Bu dedektörün görüntüsü Şekil 4.15’ de verilmiştir.



Şekil 4.15 : RadEye marka AB100 model α,β ölçüm dedektörü.

Dedektöre ait genel bilgiler Çizelge 4.7’ de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : RadEye marka AB100 model detektörün genel özellikleri (Url-8).

Ölçüm cihazı	AB100 alfa-beta kontaminasyon ölçüm cihazı
Dedektör	Çift fosfor sintilasyon
Yükseklik	18 cm
Genişlik	10 cm
Kütlesi	900 g
Verim	Am-241 : %36, Co-60 : %23, Sr/Y-90 : %49
Cevap verme süresi	Gama cevabı, yaklaşık 40s-1/(μ Sv/h) 0,4 s-1/(μ R/h)

4.2.4 Yoğunluk ölçüm kiti

Malzemelerin yoğunluk değerleri Radwag marka hassas terazi ve yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak hesaplanmıştır. Bu cihazın genel görünümü Şekil 4.16 ‘ da verilmiştir.



Şekil 4.16 : Radwag marka hassas terazi.

4.2.5 Mikrometre ile kalınlık tayini

Çalışılan malzemelerin kalınlıkları mikrometre yardımı ile tayin edilmiştir. Bu amaçla MİTUTOYO Digimatic marka mikrometre kullanılmıştır. Şekil 4.17 ‘ de mikrometrenin görünümü verilmiştir.



Şekil 4.17 : MİTUTOYO Digimatic marka mikrometre.

Mikrometre 0-25 mm arasında $\pm 0,0005\text{mm}$ hassasiyetle ölçüm yapmaktadır.

4.3 Deneylerin Yapılışı

Deney düzeneklerinin kurulmasının ardından temin edilen kompozit malzemeler ile deneysel çalışmalar ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler tablolar halinde düzenlendikten sonra grafik çizimlerinde, eğilim ve hata hesaplamalarında Origin 8 bilgisayar programından faydalanılmıştır (Url-9). Bileşik sonuçların standart hata hesaplarında Eşitlik 4.1 kullanılmıştır (Knoll, 2002).

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots \quad (4.1)$$

Burada u, x,y,z... değişkenlerinden elde edilen bileşik sonucu, σ_x , σ_y , σ_z ... ise sırasıyla x,y,z... değişkenlerinin standart sapmasını temsil etmektedir.

Deneylerin yapılışı kullanılan radyasyon tipine göre üç kısma ayrılmıştır.

- Gama deneylerinin yapılışı
- Nötron deneylerinin yapılışı
- Beta deneylerinin yapılışı

4.3.1 Gama deneylerinin yapılışı

Gama deneyleri ÇNAEM (Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi) Laboratuvarı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerin başlangıcında ilk olarak

doğal ortam radyasyonu (Background) ölçümü yapılmıştır. Bu işlemi takiben radyoizotop kaynak deney düzeneğine yerleştirilerek başlangıç sayımı (I_0) ölçülmüştür. Ardından ölçüm yapılacak her bir kompozit malzeme radyoizotop kaynak ile dedektör arasındaki belirlenmiş numune yerine konularak, farklı kalınlık değerlerinde sayım işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler en az üç kez tekrarlanmıştır. Deneylerde Am-241 radyoizotop kaynağı için sayım alma süresi 4 dk, Cs-137 radyoaktif kaynak için 2 dk ve Co-60 radyoaktif kaynak için 3 dk olarak (hata sayımı % 6' nın altına düşecek şekilde) belirlenmiştir. Elde edilen sayım değerlerinden doğal ortam radyasyon değerleri çıkarılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar (Bölüm 5 – Bölüm 7'de verildiği üzere) değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

4.3.2 Nötron deneylerinin yapılışı

Nötron Deneyleri, İ.T.Ü. Enerji Enstitüsü ve İ.T.Ü. TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü imkanları kullanılarak yapılmıştır. Deney düzeneği kurulduktan sonra kaynak ile dedektör arasına nötron zırhı yerleştirilerek ortam sayımı (Background) ölçülmüştür. Daha sonra Bölüm 4.2.2.2 içinde tanıtilan nötron kolimatörü yerleştirilerek başlangıç sayımı (I_0) ölçülmüştür. Ardından, her bir kompozit malzeme için, farklı kalınlık değerleri için sayım değerleri ölçülmüştür. Her sayım değeri en az 3 kez tekrarlanmıştır. Deneylerde sayım alma süresi 4 dk olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan ortam radyasyonu çıkartılarak net sayımlar elde edilmiş ve tablolar halinde kaydedilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar (Bölüm 5 – Bölüm 7'de verildiği üzere) değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

4.3.3 Beta deneylerinin yapılışı

Beta deneyleri ÇNAEM (Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi) Laboratuvarı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği kurulduktan sonra radyoizotop kaynak ile dedektör arasına beta zırhı yerleştirilerek ortam sayımı (Background) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra zırhı aradan çıkartılarak başlangıç sayımı (I_0) ölçülmüştür. Ardından, her bir kompozit malzeme için, farklı kalınlık değerleri için sayım değerleri ölçülmüştür. Her sayım değeri en az üç kez tekrarlanmıştır. Deneylerde sayım alma süresi 4 dk olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan ortam radyasyonu çıkartılarak net sayımlar elde edilmiş ve tablolar

halinde kaydedilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar (Bölüm 5 – Bölüm 7’de verildiği üzere) değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu doktora tezinde; beta, gama ve nötron radyasyon zırhlaması için kullanılabileceği düşünülen alüminyum matris içerisinde farklı tanecik boyutuna ve katkı oranlarına sahip B₄C bileşiği ile oluşturulan özel kompozit malzemeler oluşturulmuş ve farklı radyasyon tiplerine karşı zırhlama etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar; Bölüm 4 içinde anlatılan ve detayları açıklanan deney düzenekleri kullanılarak belli bir sistematik çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışılan özel kompozit malzemenin radyasyon karşısındaki davranışı bir ilk olarak yapılmakta olup, bu husus bu doktora tezinin özgünlüklerinden birini oluşturmaktadır.

Deneysel çalışmalarda; gama radyasyonu, nötron radyasyonu ve beta radyasyonu olmak üzere üç farklı radyasyon tipi ile çalışılmıştır. Gama radyasyonu olarak görece düşük, orta ve yüksek olmak üzere sırasıyla; Am-241, Cs-137 ve Co-60 gama radyoizotop kaynakları kullanılarak farklı enerjilerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışılan malzemelerin beta radyasyonu karşısındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla Sr-90 beta radyoizotop kaynağı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bunlardan da ayrı olarak, malzemelerin fisyon, hızlı üretken ve füzyon reaktörleri gibi ileri nükleer teknoloji reaktörlerinde kullanılabileceği düşünülerek, nötronlar karşısındaki davranışlarının incelenmesine yönelik olarak Pu-Be nötron kaynağı ile deneyler de gerçekleştirilmiştir (Akkas, 2015b).

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler her grup malzeme için bir araya toplanmış ve değerlendirilmiştir. Veriler çerçevesinde çizilen grafikler Origin 8 programı ile gerçekleştirilmiştir.

Ulaşılan deneysel sonuçlar, söz konusu kompozit malzemelere ilişkin olarak farklı radyasyon kaynakları için aşağıdaki alt bölümler içinde ayrı ayrı verilmektedir.

5.1 Gama Radyoizotop Kaynakları ile Yapılan Deney Sonuçları

Gama radyoizotop kaynakları ile gama transmisyon tekniği çerçevesinde oluşturulan (ve Bölüm 4 içinde detayı verilen) deney düzeneği kullanılarak kompozit malzemelere ilişkin gerçekleştirilen deneylerin sonuçları tablolar halinde Ek A.1- Ek A.5’ de verilmektedir. Bu bölümde Am-241, Cs-137 ve Co-60 radyoizotop gama kaynakları ile yapılan deney sonuçları ayrı ayrı ele alınacaktır.

5.1.1 Al-B₄C kompozit malzemeleri için Am-241 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları

Beş farklı tane boyutu ve dört farklı hacimsel yüzde oranlarında B₄C içeren alüminyum matrisli kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağıl sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafikleri de çizilmiştir.

5.1.1.1 3 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

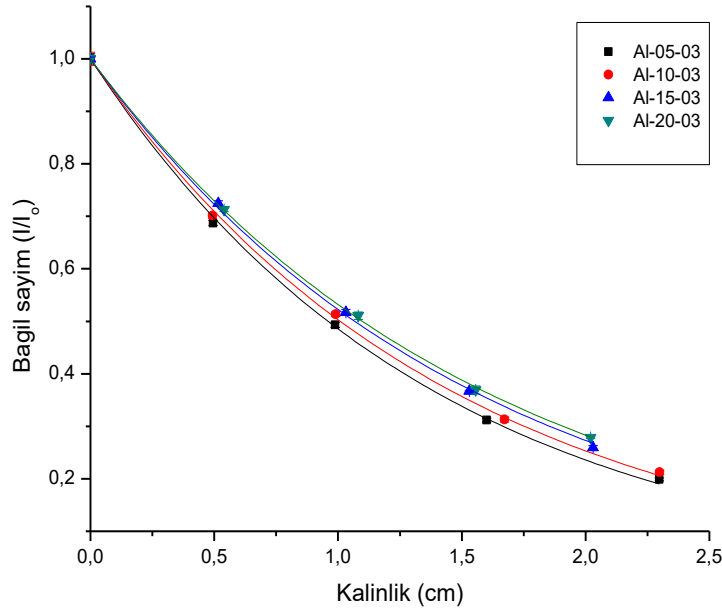
Bu grupta ortalama 3µm tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.1’ de verilmektedir.

Çizelge 5.1 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Am-241 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım- kalınlık değerleri.

Al-05-03		Al-10-03		Al-15-03		Al-20-03	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,495	0,687	0,493	0,702	0,517	0,725	0,540	0,713
0,989	0,493	0,990	0,514	1,032	0,517	1,082	0,511
1,600	0,312	1,672	0,313	1,530	0,367	1,556	0,369
2,298	0,199	2,299	0,213	2,031	0,259	2,020	0,279

Çizelge 5.1 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Am-241 gama kaynağı

karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.1’ de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.1 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.

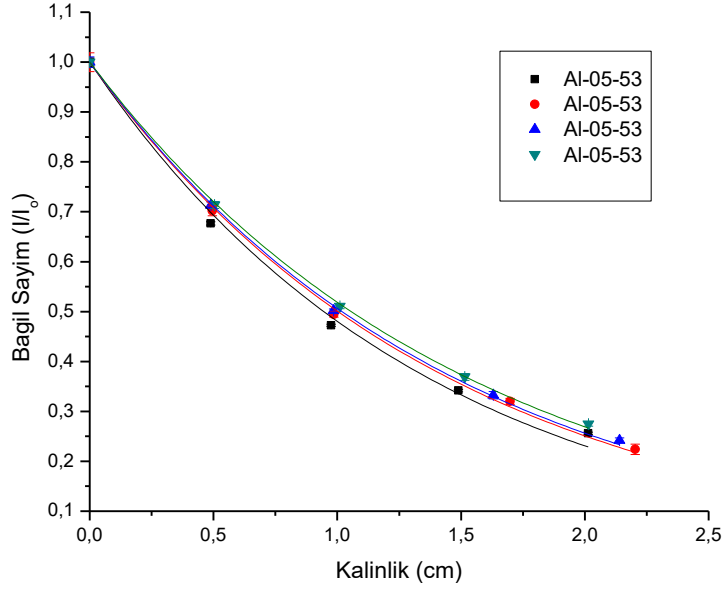
5.1.1.2 53 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta ortalama 53µm tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.2’ de verilmektedir.

Çizelge 5.2 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Am-241gama radyoizotop kaynağı için bağli sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-53		Al-10-53		Al-15-53		Al-20-53	
Kalınlık (cm)	Bağli sayım	Kalınlık (cm)	Bağli sayım	Kalınlık (cm)	Bağli sayım	Kalınlık (cm)	Bağli sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,489	0,677	0,495	0,702	0,490	0,714	0,504	0,714
0,975	0,473	0,986	0,494	0,985	0,502	1,011	0,511
1,489	0,342	1,699	0,320	1,630	0,333	1,515	0,369
2,013	0,257	2,204	0,224	2,140	0,242	2,015	0,275

Çizelge 5.2 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağli sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Am-241 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.2’ de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.2 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.

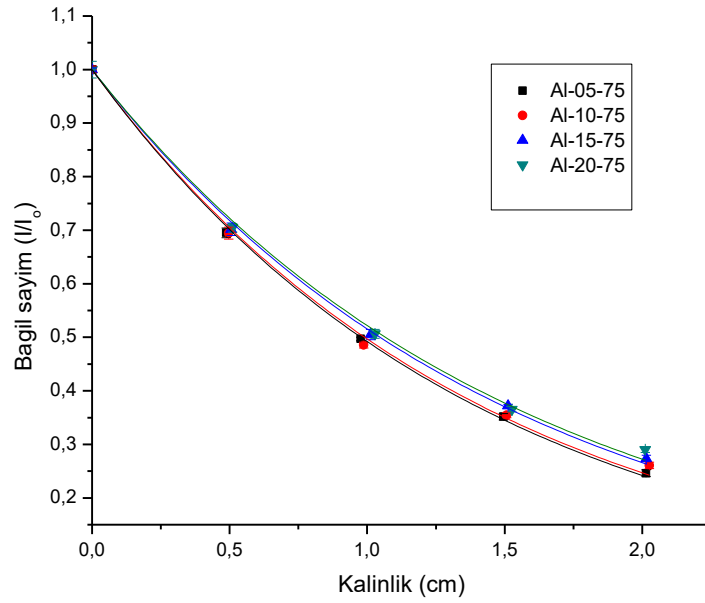
5.1.1.3 75-150 µm arası tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 75-150 µm arasında tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile % 5, % 10, % 15 ve % 20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.3' de verilmektedir.

Çizelge 5.3 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-75		Al-10-75		Al-15-75		Al-20-75	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,695	0,497	0,694	0,505	0,702	0,511	0,704
0,976	0,497	0,987	0,485	1,013	0,505	1,029	0,506
1,496	0,352	1,507	0,355	1,513	0,372	1,527	0,366
2,015	0,246	2,026	0,261	2,016	0,274	2,011	0,290

Çizelge 5.3 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Am-241 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.3' de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.3 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.

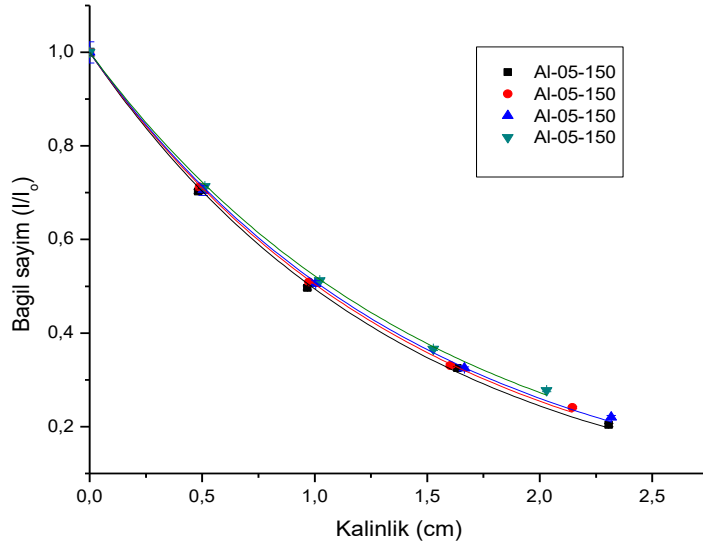
5.1.1.4 150-250 μm arası tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 150-250 μm arası tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.4' de verilmektedir.

Çizelge 5.4 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-150		Al-10-150		Al-15-150		Al-20-150	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,703	0,497	0,712	0,505	0,705	0,511	0,713
0,976	0,497	0,987	0,509	1,013	0,506	1,029	0,512
1,496	0,325	1,507	0,331	1,513	0,325	1,527	0,366
2,015	0,204	2,026	0,241	2,016	0,220	2,011	0,278

Çizelge 5.4 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Am-241 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.4' de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.4 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.

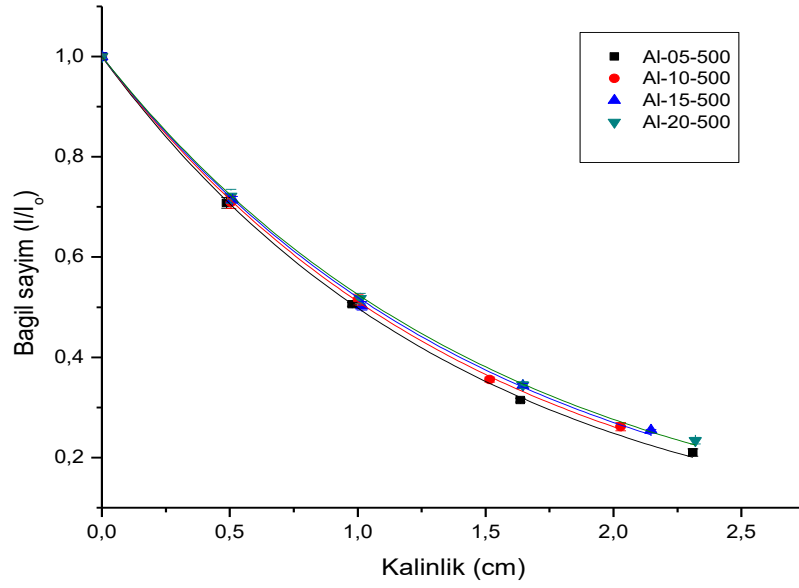
5.1.1.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.5' de verilmektedir.

Çizelge 5.5 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-500		Al-10-500		Al-15-500		Al-20-500	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,708	0,505	0,709	0,511	0,714	0,504	0,721
0,979	0,506	1,001	0,515	1,017	0,503	1,010	0,517
1,636	0,314	1,516	0,356	1,646	0,344	1,645	0,345
2,310	0,210	2,028	0,262	2,146	0,254	2,320	0,234

Çizelge 5.5 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Am-241 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.5' de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.5 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.

5.1.2 Al-B₄C kompozit malzemeleri için Cs-137 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları

Beş farklı tane boyutu ve dört farklı hacimsel yüzde oranlarında B₄C içeren alüminyum matrisli kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağıl sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafikleri de çizilmiştir.

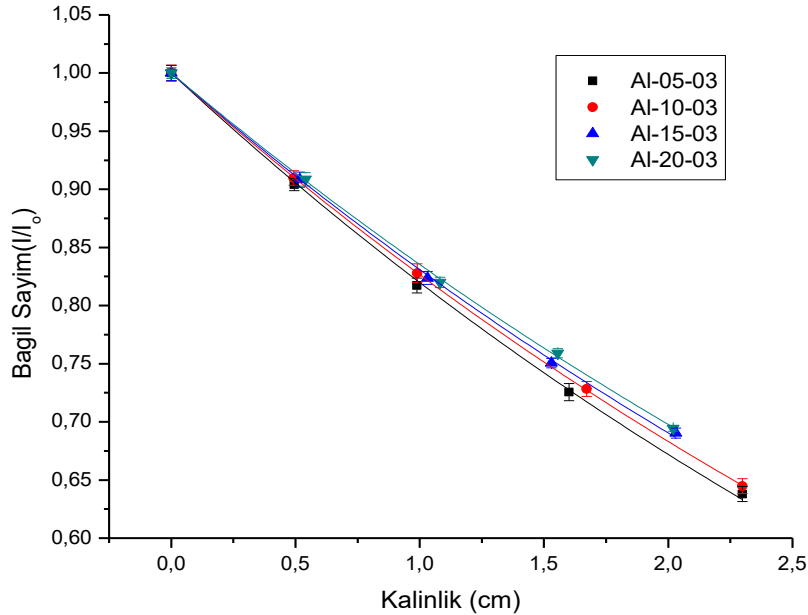
5.1.2.1 3 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta ortalama 3µm tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.6' da verilmektedir.

Çizelge 5.6 : Al-05-03, Al-10-03, A1-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Cs-137 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-03		Al-10-03		Al-15-03		Al-20-03	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,495	0,904	0,493	0,910	0,517	0,908	0,540	0,909
0,989	0,817	0,990	0,828	1,032	0,824	1,082	0,820
1,600	0,726	1,672	0,728	1,530	0,751	1,556	0,759
2,298	0,638	2,299	0,645	2,031	0,690	2,020	0,694

Çizelge 5.6 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Cs-137 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.6’ da elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.6 : Al-05-03, Al-10-03, A1-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.

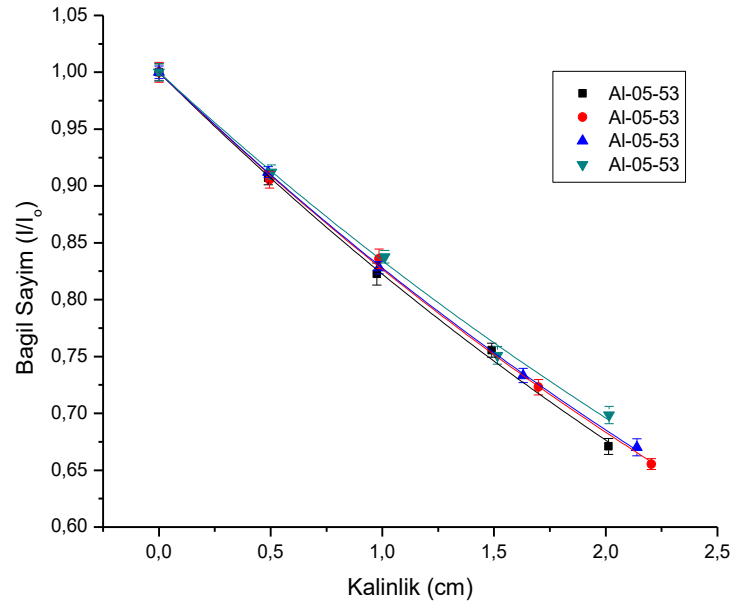
5.1.2.2 53 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta ortalama 53µm tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.7’ de verilmektedir.

Çizelge 5.7: Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-53		Al-10-53		Al-15-53		Al-20-53	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,489	0,907	0,495	0,906	0,490	0,912	0,504	0,912
0,975	0,823	0,986	0,836	0,985	0,828	1,011	0,837
1,489	0,756	1,699	0,723	1,630	0,733	1,515	0,750
2,013	0,671	2,204	0,655	2,140	0,670	2,015	0,697

Çizelge 5.7 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Cs-137 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.7’ de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.7 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.

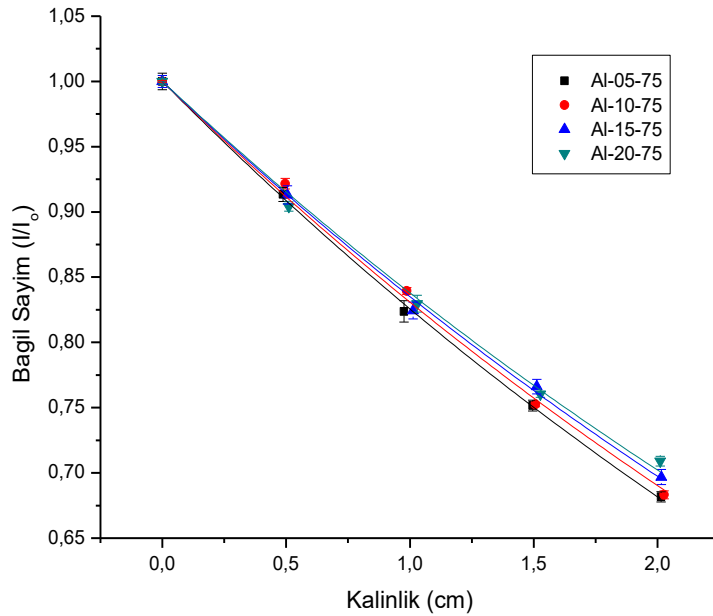
5.1.2.3 75-150 μm arası tane boyutlu B_4C içeren Al- B_4C kompozit malzemeler

Bu grupta 75-150 μm arasında tane boyutlu B_4C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B_4C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile % 5, % 10, % 15 ve % 20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.8’ de verilmektedir.

Çizelge 5.8 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-75		Al-10-75		Al-15-75		Al-20-75	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,913	0,497	0,922	0,505	0,913	0,511	0,903
0,976	0,824	0,987	0,839	1,013	0,824	1,029	0,828
1,496	0,752	1,507	0,752	1,513	0,766	1,527	0,757
2,015	0,682	2,026	0,683	2,016	0,697	2,011	0,706

Çizelge 5.8 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Cs-137 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.8’ de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.8 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.

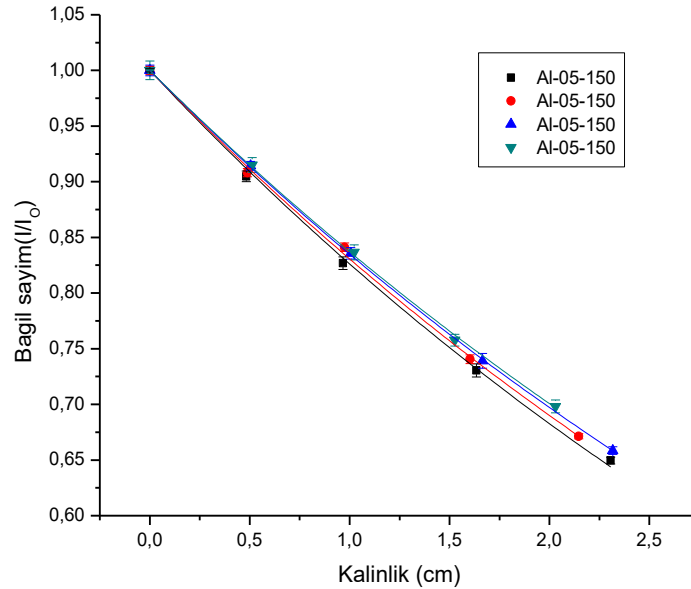
5.1.2.4 150-250 µm arası tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 150-250 µm arası tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.9’ da verilmektedir.

Çizelge 5.9 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-150		Al-10-150		Al-15-150		Al-20-150	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,905	0,497	0,908	0,505	0,913	0,511	0,914
0,976	0,827	0,987	0,841	1,013	0,834	1,029	0,835
1,496	0,731	1,507	0,741	1,513	0,736	1,527	0,755
2,015	0,650	2,026	0,671	2,016	0,654	2,011	0,695

Çizelge 5.9 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Cs-137 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.9’ da elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.9 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.

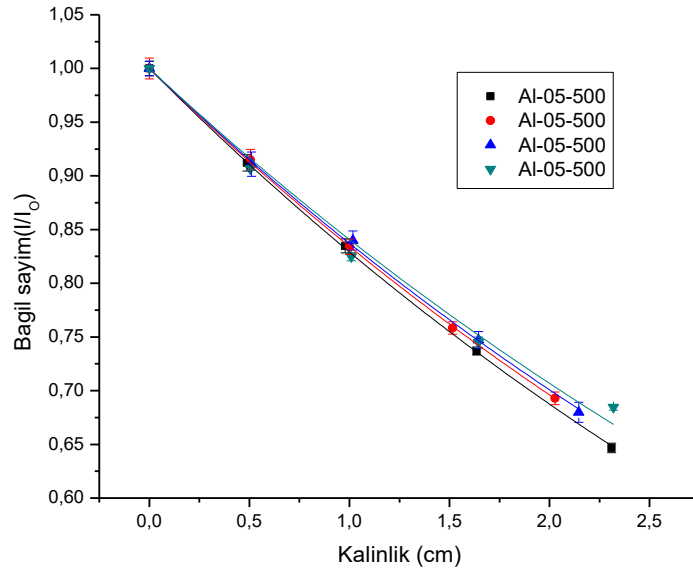
5.1.2.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.10’ da verilmektedir.

Çizelge 5.10 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-500		Al-10-500		Al-15-500		Al-20-500	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,912	0,505	0,915	0,511	0,910	0,504	0,904
0,979	0,835	1,001	0,834	1,017	0,837	1,010	0,819
1,636	0,737	1,516	0,758	1,646	0,743	1,645	0,737
2,310	0,647	2,028	0,693	2,146	0,675	2,320	0,675

Çizelge 5.10 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Cs-137 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.10’ da elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.10 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.

5.1.3 Al-B₄C kompozit malzemeleri için Co-60 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları

Beş farklı tane boyutu ve dört farklı hacimsel yüzde oranlarında B₄C içeren alüminyum matrisli kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağıl sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafikleri de çizilmiştir.

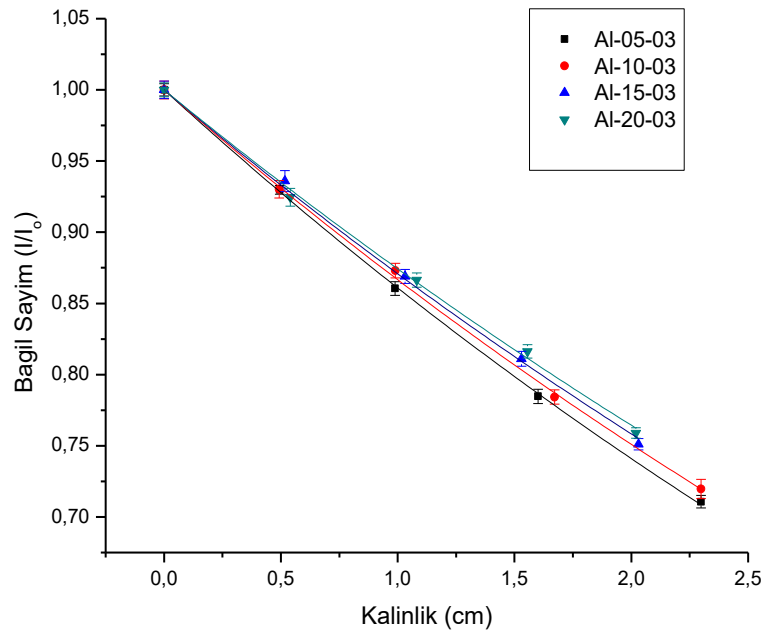
5.1.3.1 3 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta ortalama 3µm tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.11' de verilmektedir.

Çizelge 5.11 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Co-60 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-03		Al-10-03		Al-15-03		Al-20-03	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,495	0,930	0,493	0,930	0,517	0,936	0,540	0,925
0,989	0,860	0,990	0,873	1,032	0,869	1,082	0,866
1,600	0,785	1,672	0,784	1,530	0,811	1,556	0,816
2,298	0,711	2,299	0,720	2,031	0,751	2,020	0,759

Çizelge 5.11 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Co-60 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.11' de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir



Şekil 5.11 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.

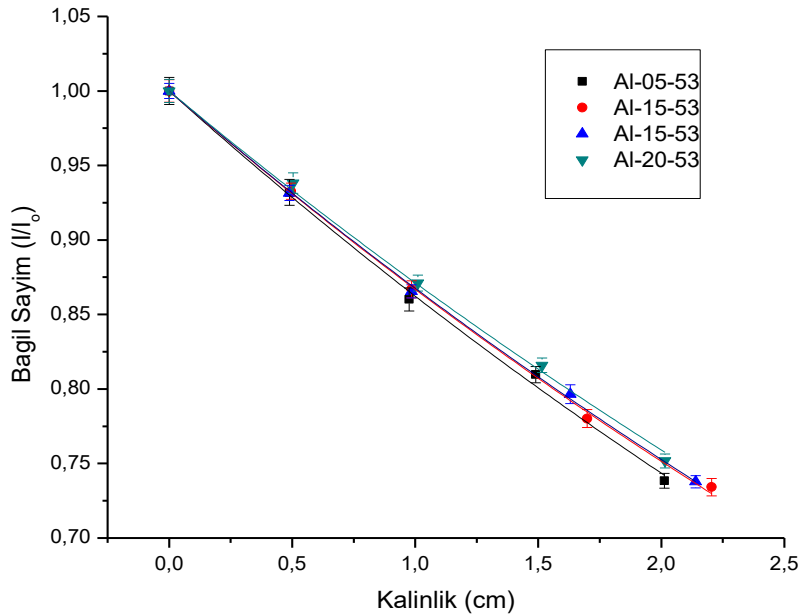
5.1.3.2 53 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta ortalama 53µm tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.12' de verilmektedir.

Çizelge 5.12 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-53		Al-10-53		Al-15-53		Al-20-53	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,489	0,932	0,495	0,933	0,490	0,932	0,504	0,938
0,975	0,860	0,986	0,867	0,985	0,866	1,011	0,871
1,489	0,810	1,699	0,780	1,630	0,797	1,515	0,816
2,013	0,738	2,204	0,734	2,140	0,738	2,015	0,752

Çizelge 5.12 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Co-60 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.12' de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.12 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.

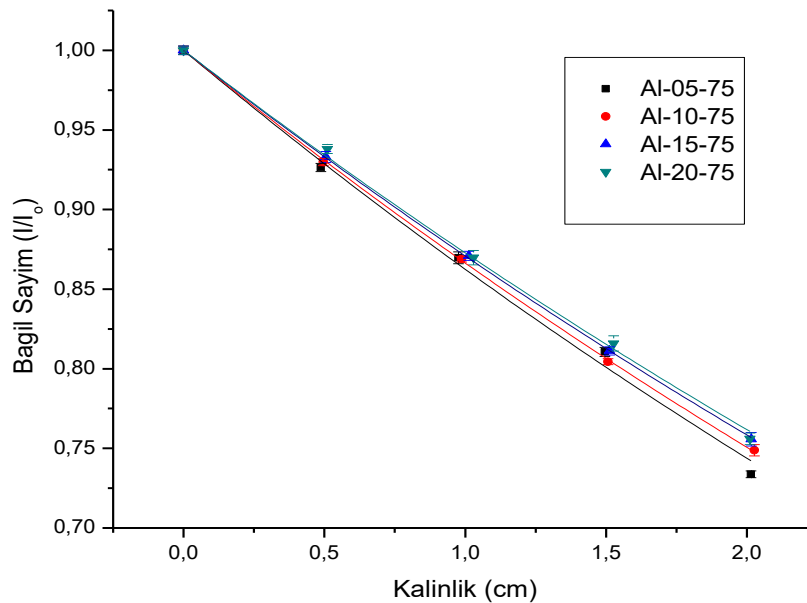
5.1.3.3 75-150 µm arası tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 75-150 µm arasında tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile % 5, % 10, % 15 ve % 20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.13' de verilmektedir.

Çizelge 5.13 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-75		Al-10-75		Al-15-75		Al-20-75	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,926	0,497	0,930	0,505	0,933	0,511	0,938
0,976	0,870	0,987	0,869	1,013	0,871	1,029	0,870
1,496	0,811	1,507	0,804	1,513	0,811	1,527	0,816
2,015	0,734	2,026	0,749	2,016	0,756	2,011	0,756

Çizelge 5.13 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Co-60 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.13' de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.13 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.

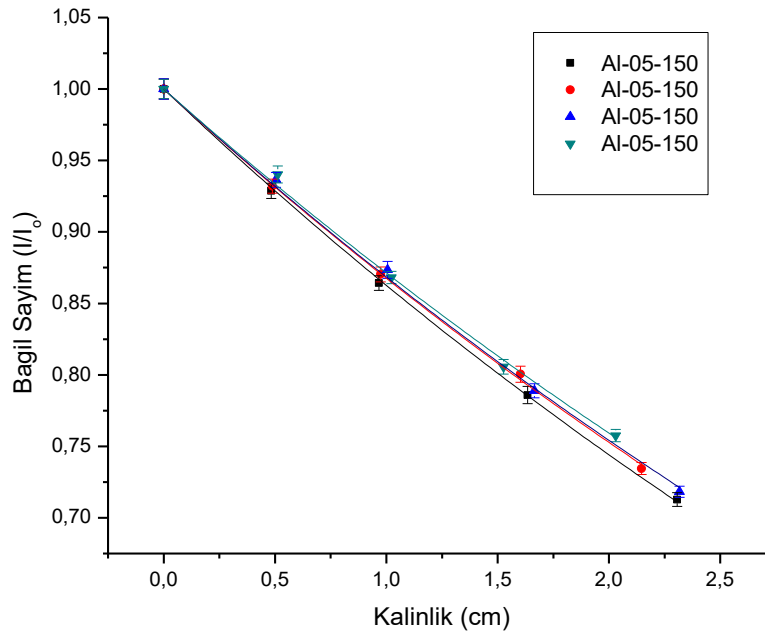
5.1.3.4 150-250 µm arası tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 150-250 µm arası tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.14' de verilmektedir.

Çizelge 5.14 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-150		Al-10-150		Al-15-150		Al-20-150	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,929	0,497	0,932	0,505	0,936	0,511	0,940
0,976	0,864	0,987	0,870	1,013	0,873	1,029	0,868
1,496	0,786	1,507	0,800	1,513	0,789	1,527	0,806
2,015	0,713	2,026	0,734	2,016	0,718	2,011	0,757

Çizelge 5.14 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Co-60 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.14' de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.14 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.

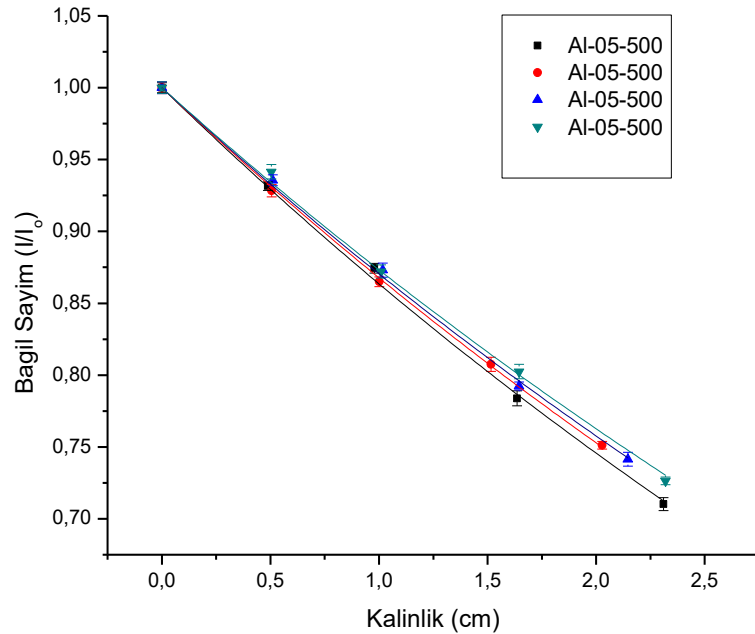
5.1.3.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.15' de verilmektedir.

Çizelge 5.15 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-500		Al-10-500		Al-15-500		Al-20-500	
Kalınlık	Bağıl	Kalınlık	Bağıl	Kalınlık	Bağıl	Kalınlık	Bağıl
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,932	0,505	0,928	0,511	0,936	0,504	0,941
0,979	0,874	1,001	0,865	1,017	0,873	1,010	0,872
1,636	0,784	1,516	0,807	1,646	0,792	1,645	0,802
2,310	0,710	2,028	0,751	2,146	0,741	2,320	0,726

Çizelge 5.15 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, kompozit malzemelerin Co-60 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 5.15' de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.

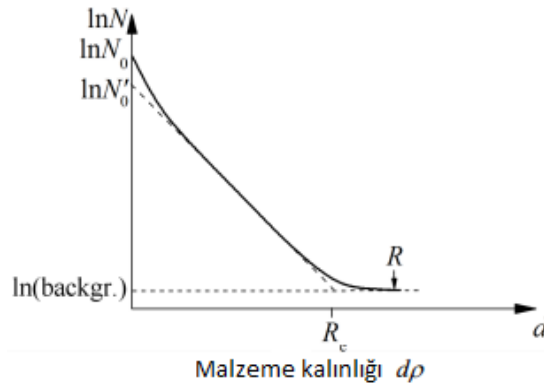


Şekil 5.15 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.

5.2 Al-B₄C Kompozit Malzemeleri için Sr-90 Beta Radyoizotop Kaynağı ile Yapılan Deney Sonuçları

Beta radyoizotop kaynağı ile transmisyon tekniği çerçevesinde oluşturulan (ve Bölüm 4 içinde detayı verilen) deney düzeneği kullanılarak kompozit malzemelere ilişkin gerçekleştirilen deneylerin sonuçları tablolar halinde Ek A.5’ de verilmektedir. Bu bölümde Sr-90 beta radyoizotop kaynak ile yapılan deney sonuçları ele alınacaktır.

Beta radyasyonunun madde ile etkileşmesi sırasında ortaya çıkan X ışınlarını ortadan kaldırmak için kalınlık-bağıl sayım grafiğinde Şekil 5.16’ da gösterildiği üzere ekstrapolasyon yapılarak değerler hesaplanmıştır.



Şekil 5.16 : Beta parçacıklarının soğurulması ile oluşturulan logaritmik sayım-kalınlık grafiğinde ekstrapolasyon yapılması (Poskus, 2012).

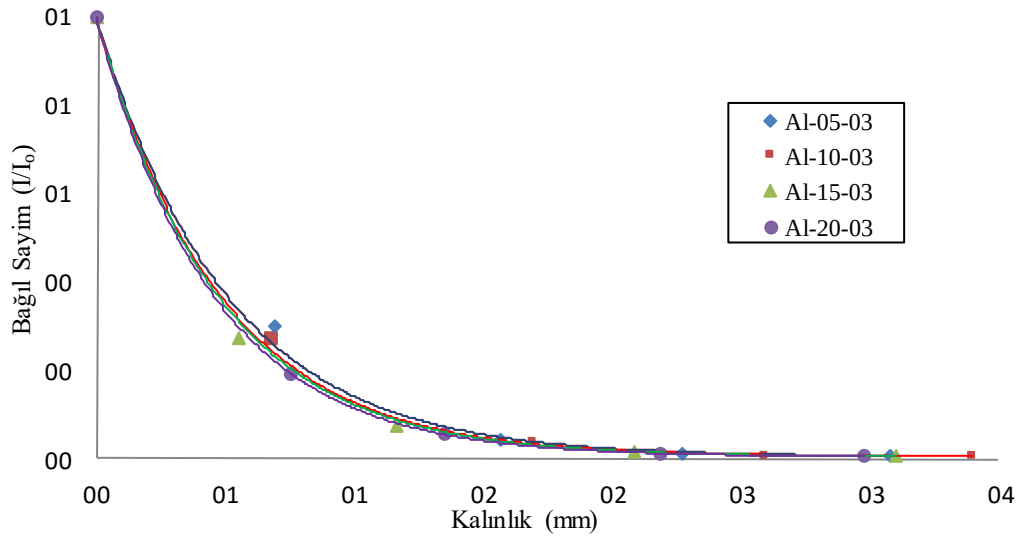
5.2.1 3 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta ortalama 3µm tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.16’ da verilmektedir.

Çizelge 5.16 : Al-05-03, Al-10-03, A1-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-03		Al-10-03		A1-15-03		Al-20-03	
Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,695	0,296	0,678	0,268	0,553	0,270	0,755	0,187
1,571	0,041	1,698	0,032	1,166	0,070	1,356	0,051
2,277	0,008	2,596	0,003	2,091	0,009	2,192	0,005
3,082	0,003	3,402	0,001	3,108	0,002	2,984	0,002

Çizelge 5.16 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.

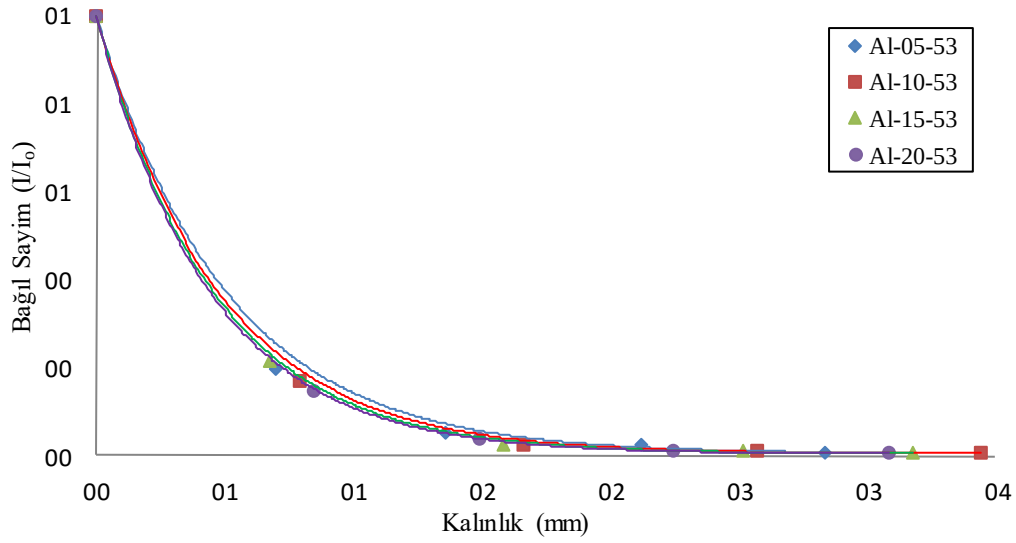
5.2.2 53 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta ortalama 53µm tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.17' de verilmektedir.

Çizelge 5.17 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53ve Al-20-53kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-53		Al-10-53		Al-15-53		Al-20-53	
Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,703	0,296	0,793	0,166	0,676	0,211	0,852	0,146
1,364	0,041	1,662	0,022	1,589	0,023	1,491	0,036
2,126	0,008	2,572	0,006	2,521	0,005	2,247	0,005
2,839	0,003	3,449	0,001	3,185	0,001	3,087	0,001

Çizelge 5.17 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.

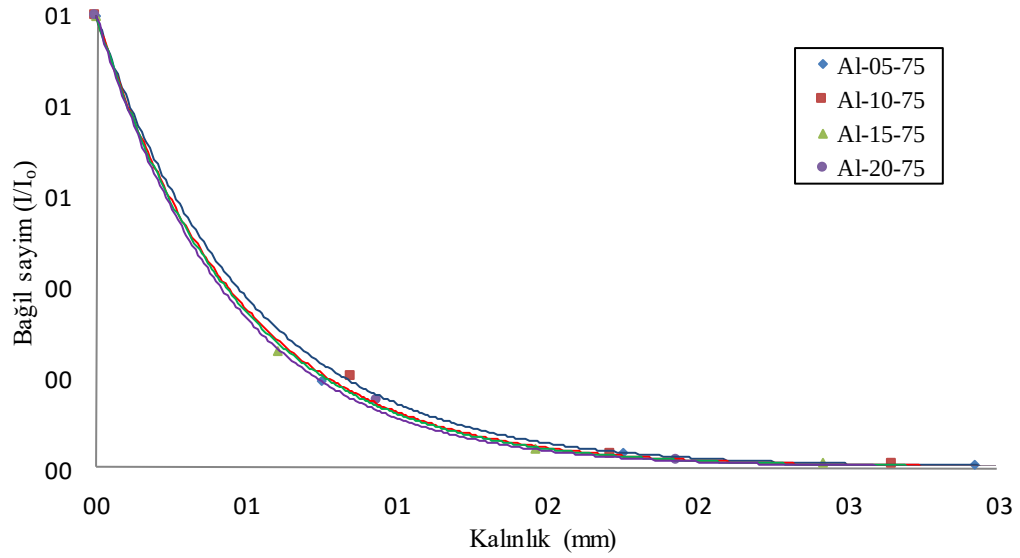
5.2.3 75-150 µm tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 75-150 µm arası tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.18' de verilmektedir.

Çizelge 5.18 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-75		Al-10-75		Al-15-75		Al-20-75	
Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,750	0,192	0,850	0,198	0,603	0,258	0,936	0,145
1,759	0,030	1,717	0,027	1,462	0,043	1,938	0,013
2,928	0,004	2,655	0,004	2,422	0,008	3,029	0,001
4,007	0,000	3,517	0,001	3,279	0,001	4,385	0,000

Çizelge 5.18 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.

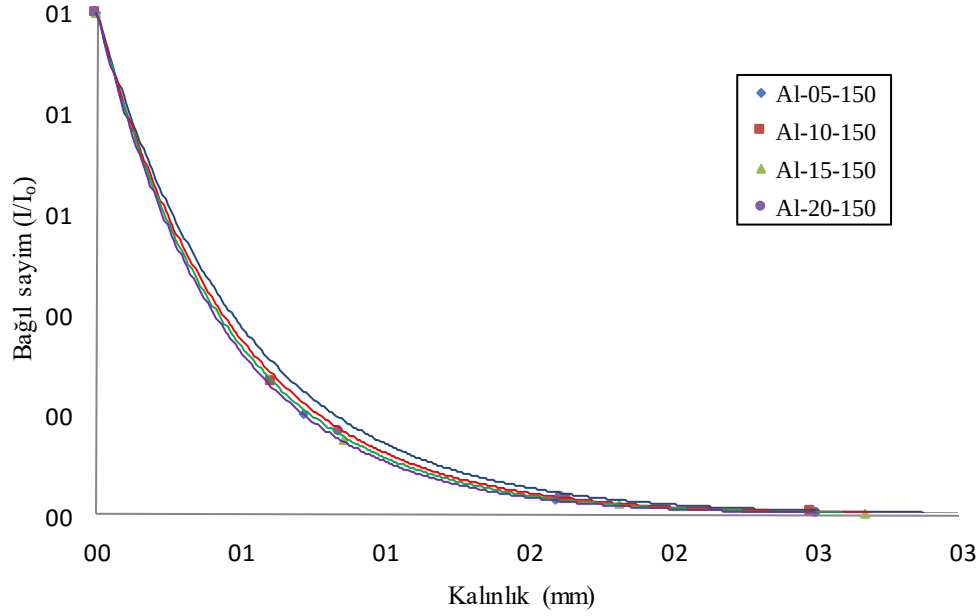
5.2.4 150-250 μm arası tane boyutlu B_4C içeren Al- B_4C kompozit malzemeler

Bu grupta 150 -250 μm arası tane boyutlu B_4C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B_4C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.19’ da verilmektedir.

Çizelge 5.19 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-150		Al-10-150		Al-15-150		Al-20-150	
Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,717	0,110	0,605	0,265	0,859	0,151	0,842	0,164
1,594	0,032	1,636	0,028	1,816	0,020	1,618	0,032
2,481	0,009	2,480	0,007	2,673	0,003	2,506	0,003
3,297	0,002	3,426	0,001	3,617	0,000	3,512	0,000

Çizelge 5.19 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.

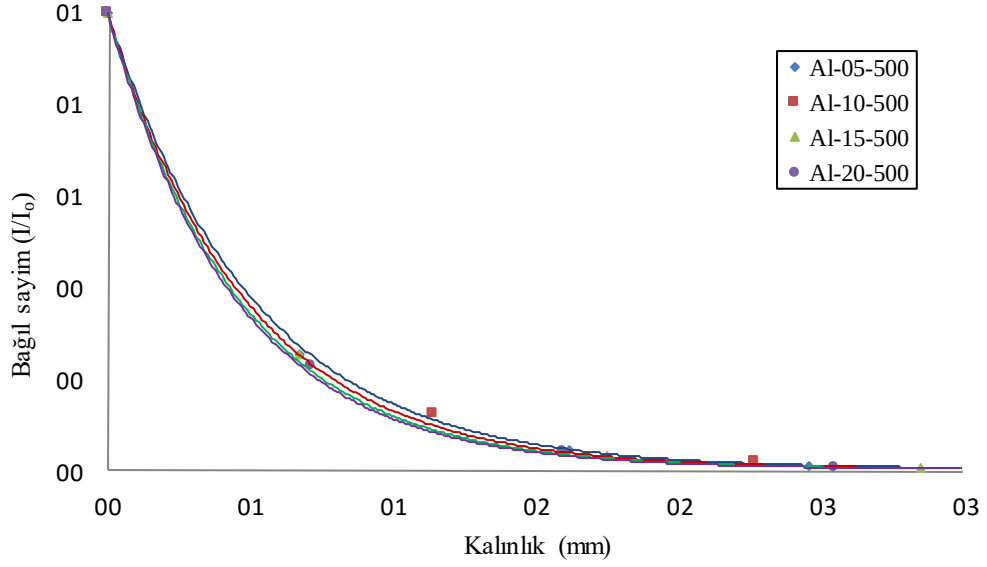
5.2.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.20’ de verilmektedir.

Çizelge 5.20 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerinin Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-05-500		Al-10-500		Al-15-500		Al-20-500	
Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım	Kalınlık (mm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,672	0,254	1,141	0,121	0,675	0,251	0,716	0,227
1,622	0,039	2,459	0,014	1,757	0,030	1,601	0,038
2,458	0,008	3,956	0,001	2,856	0,002	2,553	0,004
3,515	0,001	5,688	0,000	4,064	0,000	3,592	0,000

Çizelge 5.20 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Sr-90 radyasyon zayıflatma eğrileri.

5.3 Al-B₄C Kompozit Malzemelerin Pu-Be Nötron Kaynağı ile Yapılan Deney Sonuçları

Farklı tane boyutu ve oranlarda B₄C içeren alüminyum matrisli kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağıl sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafiği çizilmiştir.

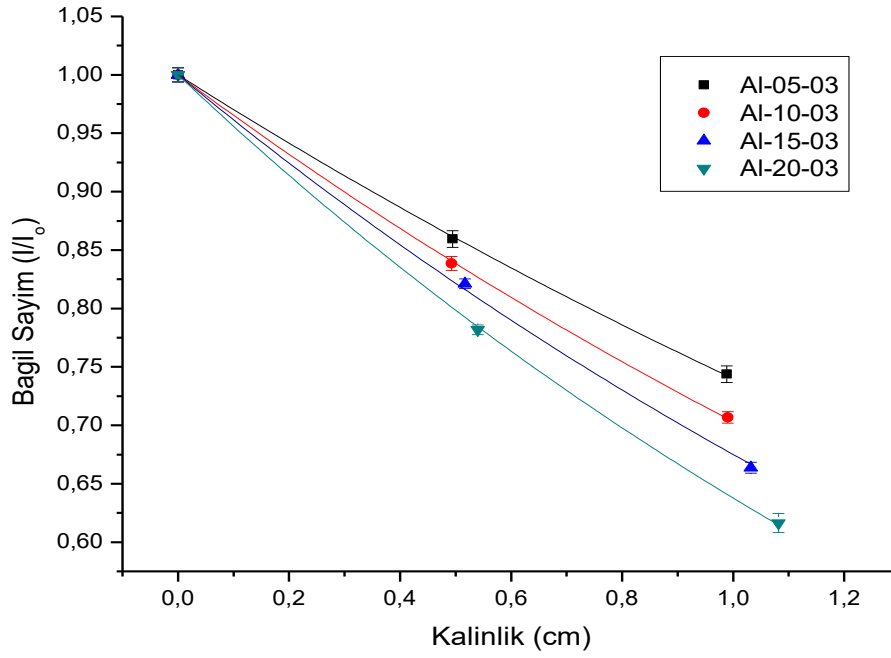
5.3.1 3 µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 3µm ortalama tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20' dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.21' de verilmektedir.

Çizelge 5.21 : Al-05-03, Al-10-03, A1-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.

Al-05-03		Al-10-03		A1-15-03		Al-20-03	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,495	0,860	0,492	0,839	0,517	0,821	0,540	0,782
0,988	0,744	0,990	0,707	1,032	0,664	1,082	0,616

Çizelge 5.21 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Şekil 5.22’ de çizilen grafik verilmiştir.



Şekil 5.22 : Al-05-03, Al-10-03, Al-15-03 ve Al-20-03 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.

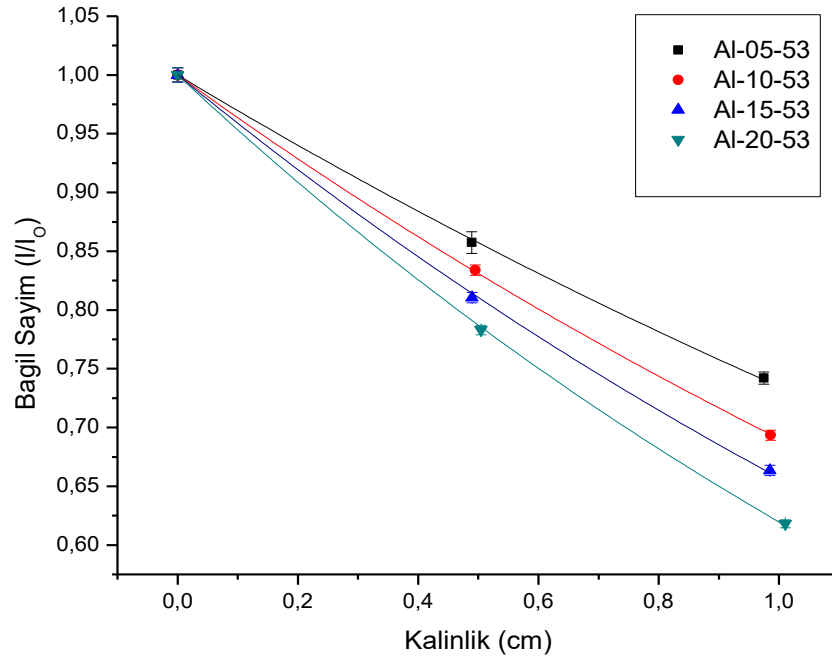
5.3.2 53 μm ortalama tane boyutlu B_4C içeren Al- B_4C kompozit malzemeler

Bu grupta 53 μm ortalama tane boyutlu B_4C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B_4C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.22’ de verilmektedir.

Çizelge 5.22 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.

Al-05-53		Al-10-53		Al-15-53		Al-20-53	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,489	0,857	0,495	0,834	0,486	0,810	0,504	0,783
0,975	0,742	0,986	0,693	0,985	0,664	1,011	0,618

Çizelge 5.22 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Şekil 5.23’ de çizilen grafik verilmiştir.



Şekil 5.23 : Al-05-53, Al-10-53, Al-15-53 ve Al-20-53 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.

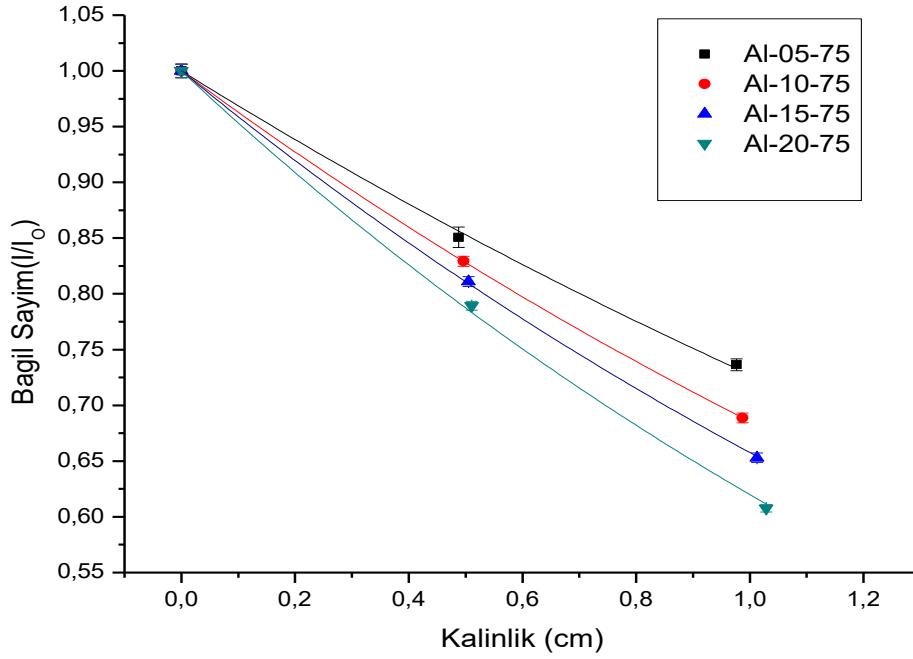
5.3.3 75-150 µm arası tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 75-150 µm arası tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.23’ de verilmektedir.

Çizelge 5.23 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.

Al-05-75		Al-10-75		Al-15-75		Al-20-75	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,851	0,496	0,829	0,505	0,811	0,511	0,789
0,976	0,736	0,987	0,689	1,013	0,653	1,030	0,608

Çizelge 5.23 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Şekil 5.24’ de çizilen grafik verilmiştir.



Şekil 5.24 : Al-05-75, Al-10-75, Al-15-75 ve Al-20-75 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.

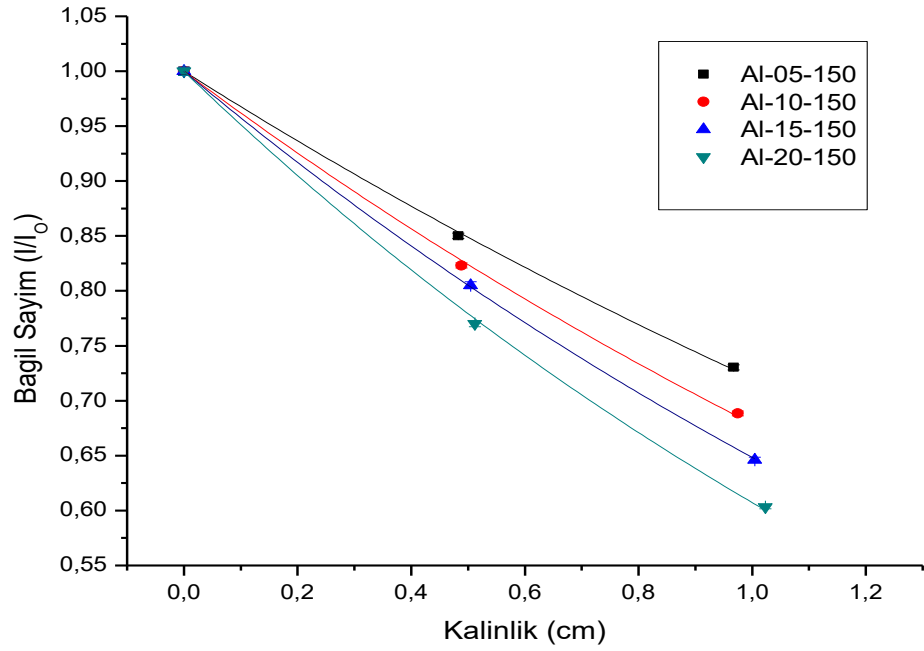
5.3.4 150-250 µm arası tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 150-250 µm arası tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.24’ de verilmektedir.

Çizelge 5.24 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.

Al-05-150		Al-10-150		Al-15-150		Al-20-150	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,483	0,850	0,488	0,823	0,505	0,805	0,512	0,770
0,967	0,730	0,975	0,688	1,005	0,646	1,023	0,603

Çizelge 5.24 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Şekil 5.25’ de çizilen grafik verilmiştir.



Şekil 5.25 : Al-05-150, Al-10-150, Al-15-150 ve Al-20-150 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.

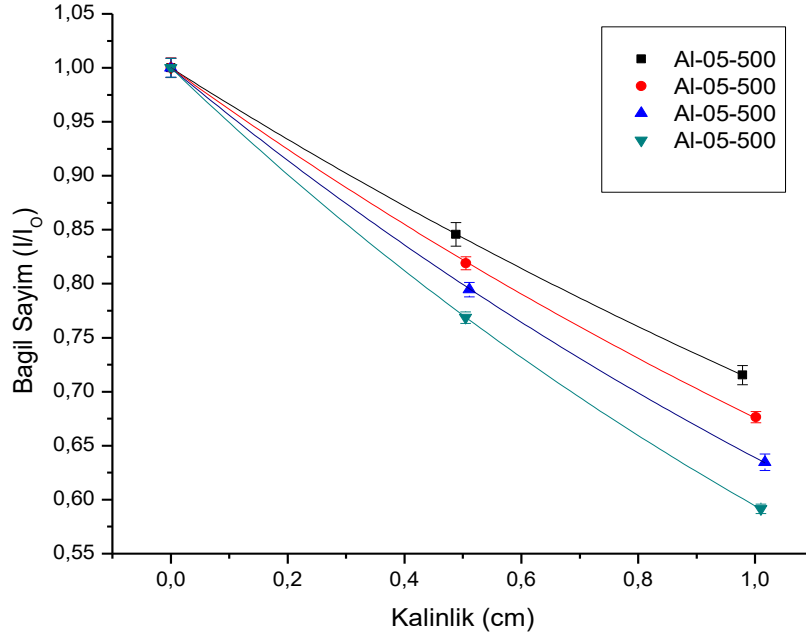
5.3.5 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren Al-B₄C kompozit malzemeler

Bu grupta 500 µm ve üzeri tane boyutlu B₄C içeren dört adet kompozit malzeme mevcuttur. Her bir kompozit malzemedeki B₄C içeriğinin hacimsel yüzde oranları sırası ile %5, %10, %15 ve %20’ dir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.25’ de verilmektedir.

Çizelge 5.25 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için bağıl sayım-kalınlık değerleri.

Al-05-500		Al-10-500		Al-15-500		Al-20-500	
Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım	Kalınlık (cm)	Bağıl sayım
0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,488	0,846	0,505	0,819	0,511	0,795	0,504	0,769
0,979	0,715	1,001	0,676	1,017	0,635	1,010	0,592

Çizelge 5.25 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Şekil 5.26’ da çizilen grafik verilmiştir.



Şekil 5.26 : Al-05-500, Al-10-500, Al-15-500 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için zayıflatma eğrileri.

5.4 Çalışılan Kompozit Malzemelerin Gama, Beta ve Nötron Radyasyonu ile Yapılan Deneyler Sonucu Lineer Zayıflatma Katsayılarının Hesaplanması

Çalışılan kompozit malzemelerin gama radyasyonuna karşı deneysel olarak çizilmiş zayıflatma eğrileri kullanılarak (sırasıyla Şekil 5.1 - Şekil 5.15), söz konusu kompozit malzemelerin lineer zayıflatma katsayıları değerleri Eşitlik 2.19 kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 5.26' de verilmiştir.

Çizelge 5.26 : Çalışılan kompozit malzemelerin Am-241, Cs-137 ve Co-60 gama radyoizotop kaynaklar kullanılarak hesaplanan deneysel lineer zayıflatma katsayıları.

Malzeme Kodu	Am-241		Cs-137		Co-60	
	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (cm ⁻¹)	Std. Hata (cm ⁻¹)	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (cm ⁻¹)	Std. Hata (cm ⁻¹)	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (cm ⁻¹)	Std. Hata (cm ⁻¹)
Al-05-03	0,7120	0,0088	0,1981	0,0017	0,1498	0,0008
Al-10-03	0,6804	0,0082	0,1905	0,0004	0,1433	0,0013
Al-15-03	0,6567	0,0069	0,1849	0,0013	0,1386	0,0015
Al-20-03	0,6330	0,0038	0,1799	0,0011	0,1344	0,0018
Al-05-53	0,7046	0,0219	0,1955	0,0025	0,1483	0,0024
Al-10-53	0,6811	0,0101	0,1906	0,0021	0,1431	0,0014

Çizelge 5.26 (devam) : Çalışılan kompozit malzemelerin Am-241, Cs-137 ve Co-60 gama radyoizotop kaynaklar kullanılarak hesaplanan deneysel lineer zayıflatma katsayıları.

	Am-241		Cs-137		Co-60	
Malzeme Kodu	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (cm ⁻¹)	Std. Hata (cm ⁻¹)	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (cm ⁻¹)	Std. Hata (cm ⁻¹)	Lineer Zayıflatma Katsayısı	Std. Hata (cm ⁻¹)
Al-15-53	0,6718	0,0071	0,1886	0,0009	0,1419	0,0012
Al-20-53	0,6504	0,0052	0,1819	0,0027	0,1382	0,0021
Al-05-75	0,7009	0,0148	0,1914	0,0016	0,1483	0,0032
Al-10-75	0,6819	0,0096	0,1861	0,0031	0,1433	0,0005
Al-15-75	0,6524	0,0122	0,1799	0,0025	0,1384	0,0004
Al-20-75	0,6373	0,0083	0,1783	0,0033	0,1364	0,0017
Al-05-150	0,6938	0,0094	0,1900	0,0024	0,1476	0,0008
Al-10-150	0,6760	0,0065	0,1856	0,0021	0,1431	0,0011
Al-15-150	0,6631	0,0067	0,1831	0,0006	0,1408	0,0018
Al-20-150	0,6433	0,0060	0,1803	0,0014	0,1379	0,0022
Al-05-500	0,6878	0,0065	0,1876	0,0008	0,1471	0,0020
Al-10-500	0,6682	0,0050	0,1813	0,0007	0,1418	0,0009
Al-15-500	0,6466	0,0075	0,1814	0,0015	0,1390	0,0015
Al-20-500	0,6362	0,0052	0,1781	0,0055	0,1359	0,0019

Çalışılan kompozit malzemelerin beta ve nötron radyasyonuna karşı deneysel olarak çizilmiş zayıflatma eğrileri kullanılarak (sırasıyla Şekil 5.17 - Şekil 5.26), söz konusu kompozit malzemelerin lineer zayıflatma katsayıları ve makroskopik tesir kesit değerleri Eşitlik 2.19 kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 5.27’de verilmiştir.

Çizelge 5.27 : Çalışılan kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı ile Sr-90 beta kaynak kullanılarak hesaplanan deneysel makroskopik tesir kesit değerleri ve lineer zayıflatma katsayıları.

Malzeme Kodu	Pu-Be Nötron Kaynağı		Sr-90 Beta Kaynağı	
	Makroskopik Tesir Kesiti σ (cm ⁻¹)	Std.Hata (cm ⁻¹)	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (mm ⁻¹)	Std. Hata (mm ⁻¹)
Al-05-03	0,292	0,002	1,982	0,051
Al-10-03	0,341	0,002	2,087	0,014
Al-15-03	0,388	0,005	2,127	0,020
Al-20-03	0,439	0,003	2,204	0,008
Al-05-53	0,323	0,003	1,968	0,052
Al-10-53	0,396	0,001	2,086	0,013
Al-15-53	0,458	0,004	2,182	0,011
Al-20-53	0,531	0,003	2,246	0,006
Al-05-75	0,304	0,006	1,956	0,030
Al-10-75	0,381	0,000	2,098	0,031
Al-15-75	0,403	0,002	2,130	0,017
Al-20-75	0,460	0,007	2,214	0,019
Al-05-150	0,349	0,004	1,948	0,020
Al-10-150	0,410	0,005	2,089	0,008
Al-15-150	0,453	0,002	2,166	0,006
Al-20-150	0,510	0,005	2,243	0,006
Al-05-500	0,335	0,000	1,942	0,009
Al-10-500	0,384	0,002	2,056	0,005
Al-15-500	0,459	0,001	2,149	0,009
Al-20-500	0,517	0,001	2,206	0,004

5.5 Deneysel Sonuçlardan Hareketle Çalışılan Malzemelerin Yarı Tabaka Değer Kalınlıklarının Tayini

Çalışılan kompozit malzemelerin gama, beta ve nötron radyasyonuna karşı yarıdeğer kalınlık (YDK) ve onda bir değer kalınlık (ODK) değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplama ile birlikte kompozit malzemelerin zırhlama özelliklerinin birbirleri ile karşılaştırılması sağlanmıştır. YDK, gelen radyasyon şiddetini yarıya düşürebilen malzeme kalınlığı olarak ifade edilmektedir. ODK ise gelen radyasyon şiddetini

ondabir değere düşürebilen malzeme kalınlığı olarak ifade edilmektedir. Bu değerler Eşitlik 5.1 ve 5.2 ile elde edilmektedir (Martin, 2006).

$$YDK = \ln 2 / \mu \quad (5.1)$$

$$ODK = \ln 10 / \mu \quad (5.2)$$

Burada μ , malzemeye ait lineer zayıflatma katsayısını göstermektedir.

5.5.1 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 5.28’de verilmektedir.

Çizelge 5.28 : Çalışılan kompozit malzemelerin Am-241gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

Malzeme Kodu	Am-241			
	YDK(cm)	Std. Hata (cm)	ODK(cm)	Std. Hata(cm)
Al-05-03	0,974	0,012	3,234	0,040
Al-10-03	1,019	0,012	3,384	0,041
Al-15-03	1,056	0,011	3,506	0,037
Al-20-03	1,095	0,007	3,638	0,022
Al-05-53	0,984	0,031	3,268	0,102
Al-10-53	1,018	0,015	3,381	0,050
Al-15-53	1,032	0,011	3,427	0,036
Al-20-53	1,066	0,009	3,540	0,028
Al-05-75	0,989	0,021	3,285	0,069
Al-10-75	1,016	0,014	3,377	0,048
Al-15-75	1,062	0,020	3,529	0,066
Al-20-75	1,088	0,014	3,613	0,047
Al-05-150	0,999	0,014	3,319	0,045
Al-10-150	1,025	0,010	3,406	0,033
Al-15-150	1,045	0,011	3,472	0,035
Al-20-150	1,077	0,010	3,579	0,033
Al-05-500	1,008	0,010	3,348	0,032
Al-10-500	1,037	0,008	3,446	0,026
Al-15-500	1,072	0,012	3,561	0,041
Al-20-500	1,090	0,009	3,619	0,030

5.5.2 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 5.29’da verilmektedir.

Çizelge 5.29 : Çalışılan kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

Malzeme Kodu	Cs-137			
	YDK (cm)	Std. Hata (cm)	ODK (cm)	Std. Hata (cm)
Al-05-03	3,499	0,030	11,623	0,100
Al-10-03	3,639	0,008	12,087	0,025
Al-15-03	3,749	0,026	12,453	0,088
Al-20-03	3,853	0,024	12,799	0,078
Al-05-53	3,546	0,045	11,778	0,151
Al-10-53	3,637	0,040	12,081	0,133
Al-15-53	3,675	0,018	12,209	0,058
Al-20-53	3,811	0,057	12,659	0,188
Al-05-75	3,621	0,030	12,030	0,101
Al-10-75	3,725	0,062	12,373	0,206
Al-15-75	3,853	0,054	12,799	0,178
Al-20-75	3,888	0,072	12,914	0,239
Al-05-150	3,648	0,046	12,119	0,153
Al-10-150	3,735	0,042	12,406	0,140
Al-15-150	3,786	0,012	12,576	0,041
Al-20-150	3,844	0,030	12,771	0,099
Al-05-500	3,695	0,016	12,274	0,052
Al-10-500	3,823	0,015	12,700	0,049
Al-15-500	3,821	0,032	12,693	0,105
Al-20-500	3,892	0,120	12,929	0,399

5.5.3 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 5.30’da verilmektedir.

Çizelge 5.30 : Çalışılan kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

Malzeme Kodu	Co-60			
	YDK (cm)	Std. Hata (cm)	ODK (cm)	Std. Hata (cm)
Al-05-03	4,627	0,025	15,371	0,082
Al-10-03	4,837	0,044	16,068	0,146
Al-15-03	5,001	0,054	16,613	0,180
Al-20-03	5,157	0,069	17,132	0,229
Al-05-53	4,674	0,076	15,527	0,251
Al-10-53	4,844	0,047	16,091	0,157
Al-15-53	4,885	0,041	16,227	0,137
Al-20-53	5,016	0,076	16,661	0,253
Al-05-75	4,674	0,101	15,527	0,335
Al-10-75	4,837	0,017	16,068	0,056
Al-15-75	5,008	0,014	16,637	0,048
Al-20-75	5,082	0,063	16,881	0,210
Al-05-150	4,696	0,025	15,600	0,085
Al-10-150	4,844	0,037	16,091	0,124
Al-15-150	4,923	0,063	16,354	0,209
Al-20-150	5,026	0,080	16,697	0,266
Al-05-500	4,712	0,064	15,653	0,213
Al-10-500	4,888	0,031	16,238	0,103
Al-15-500	4,987	0,054	16,565	0,179
Al-20-500	5,100	0,071	16,943	0,237

5.5.4 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 5.31’de verilmektedir.

Çizelge 5.31 : Çalışılan kompozit malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

Malzeme Kodu	Sr-90			
	YDK (mm)	Std. Hata (mm)	ODK (mm)	Std. Hata (mm)
Al-05-03	0,350	0,009	1,162	0,030
Al-10-03	0,332	0,002	1,103	0,007
Al-15-03	0,326	0,003	1,083	0,010
Al-20-03	0,314	0,001	1,045	0,004
Al-05-53	0,352	0,009	1,170	0,031
Al-10-53	0,332	0,002	1,104	0,007
Al-15-53	0,318	0,002	1,055	0,005
Al-20-53	0,309	0,001	1,025	0,003
Al-05-75	0,354	0,005	1,177	0,018
Al-10-75	0,330	0,005	1,098	0,016
Al-15-75	0,325	0,003	1,081	0,009
Al-20-75	0,313	0,003	1,040	0,009
Al-05-150	0,356	0,004	1,182	0,012
Al-10-150	0,332	0,001	1,102	0,004
Al-15-150	0,320	0,001	1,063	0,003
Al-20-150	0,309	0,001	1,027	0,003
Al-05-500	0,357	0,002	1,186	0,005
Al-10-500	0,337	0,001	1,120	0,003
Al-15-500	0,323	0,001	1,071	0,004
Al-20-500	0,314	0,001	1,044	0,002

5.5.5 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Pu-Be nötron kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Pu-Be nötron kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 5.32’de verilmektedir.

Çizelge 5.32 : Çalışılan kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

Malzeme Kodu	Pu-Be			
	YDK (cm)	Std. Hata (cm)	ODK (cm)	Std. Hata (cm)
Al-05-03	2,374	0,016	7,886	0,054
Al-10-03	2,033	0,012	6,752	0,040
Al-15-03	1,786	0,023	5,934	0,076
Al-20-03	1,579	0,011	5,245	0,036
Al-05-53	2,146	0,020	7,129	0,066
Al-10-53	1,750	0,004	5,815	0,015
Al-15-53	1,513	0,013	5,027	0,044
Al-20-53	1,305	0,007	4,336	0,024
Al-05-75	2,280	0,045	7,574	0,149
Al-10-75	1,819	0,000	6,044	0,000
Al-15-75	1,720	0,009	5,714	0,028
Al-20-75	1,507	0,023	5,006	0,076
Al-05-150	1,986	0,023	6,598	0,076
Al-10-150	1,691	0,021	5,616	0,068
Al-15-150	1,530	0,007	5,083	0,022
Al-20-150	1,359	0,013	4,515	0,044
Al-05-500	2,069	0,000	6,873	0,000
Al-10-500	1,805	0,009	5,996	0,031
Al-15-500	1,510	0,003	5,017	0,011
Al-20-500	1,341	0,003	4,454	0,009

6. ÇALIŞILAN MALZEMELERİN ZAYIFLATMA KATSAYILARININ TAYİNİ

Bu doktora çalışmasında, çalışılan kompozit malzemelerin gama, beta ve nötron radyasyonuna karşı lineer zayıflatma katsayıları deneysel olarak 5. Bölüm içerisinde bulunmuştu. Söz konusu kompozit malzemeler için teorik kütle zayıflatma katsayıları bulunarak deneysel olarak elde edilen değerlerle karşılaştırılması da yapılmıştır. Bu amaçla, uluslararası literatürde güvenilirliği kabul edilen XCOM bilgisayar programı ile teorik kütle zayıflatma katsayılarının hesaplanması yoluna gidilmiştir.

6.1 XCOM Bilgisayar Programının Tanıtımı

XCOM programı 1987 yılında M.J. Berger ve J.H. Hubbell tarafından ortaya konmuştur.

XCOM programı element, bileşik veya karışım malzemelerinin 1 keV ile 100 GeV enerjileri arasındaki radyasyon karşısındaki saçılma, fotoelektrik olay, çift oluşumu tesir kesitlerini, buradan toplam kütle zayıflatma katsayısı hesaplayabilen bir bilgisayar programıdır.

XCOM Bilgisayar programı ile, malzemenin radyasyonu toplam zayıflatma katsayısı, her bir malzemenin hacimce yüzdesi girilerek hesaplanmaktadır. Programın sınırlayıcı özelliği, malzeme içeriğindeki her bir atomu nötr kabul ederek hesaplamasıdır, bundan dolayı malzemelerin moleküler ve katı hal etkileri hesaba katılmamaktadır (Url-10). Şekil 6.1’de XCOM programının ara yüzü görülmektedir.

Fill out the form to select the data to be displayed:

[Help](#)

Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:

H2O 0.9
NaCl 0.1

Note: Weights not summing to 1 will be normalized.

Al 0.9
B4C 0.1

Optional output title:

Graph options:

☒ Total Attenuation with Coherent Scattering
☐ Total Attenuation without Coherent Scattering
☐ Coherent Scattering
☐ Incoherent Scattering
☐ Photoelectric Absorption
☐ Pair Production in Nuclear Field
☐ Pair Production in Electron Field
☐ None

Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed)

Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.

☒ Include the standard grid

Energy Range:

Minimum: MeV
Maximum: MeV

[Submit Information](#) [Reset](#)

Şekil 6.1. XCOM bilgisayar programının ara yüzü.

6.2 Çalışılan Al-B₄C Kompozit Malzemelerin XCOM Programı ile Teorik Olarak Hesaplanan Kütle Zayıflatma Katsayılarının, YDK ve ODK'lerinin Tayini

XCOM programında çalışılan kompozit malzemeler karışım olarak işaretlenmiş ve kompozit malzeme içindeki B₄C bileşiği ve Al elementi için yüzde katkı değerleri girilmiştir. Bunun yanısıra kullanılan radyoaktif gama kaynağına ilişkin foton enerji değerleri girilmiştir. İlk olarak kullanılan Am-241 radyoaktif gama kaynağı için yüzde olarak en büyük yüzde bolluğa sahip 60 keV enerji piki kullanılmıştır. Cs-137 gama kaynağı için 662 keV değerli tek enerji piki kullanılmıştır. Co-60 radyoaktif kaynak için ise, her ikisi de %100 bolluğa sahip 1,17 ve 1,33 MeV enerjili iki pikin ortalama değeri olan 1,25 MeV değeri kullanılmıştır. Elde edilen kütle zayıflatma katsayıları Eşitlik 2.20 kullanılarak, teorik yoğunluk değerleri ile çarpılarak lineer zayıflatma katsayıları elde edilmiştir. Bulunan lineer zayıflatma katsayıları Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 içinde kullanılarak çalışılan tüm kompozit malzemeler için teorik YDK ve ODK değerleri hesaplanmıştır.

6.2.1 Al-B₄C kompozit malzemelerin Am-241 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri

Am-241 gama radyoaktif kaynağına ilişkin hesaplanan teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri Çizelge 6.1’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Çalışılan kompozit malzemelere ait XCOM programından elde edilen Am-241 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.

Am-241			
Malzeme Kodu	Kütle Zayıflatma Katsayısı μ_m (cm²·g⁻¹)x10⁻¹	YDK (cm)	ODK (cm)
Al-05-03	2,720	0,947	3,146
Al-10-03	2,662	0,971	3,225
Al-15-03	2,604	0,996	3,308
Al-20-03	2,547	1,022	3,394
Al-05-53	2,720	0,947	3,146
Al-10-53	2,662	0,971	3,225
Al-15-53	2,604	0,996	3,308
Al-20-53	2,547	1,022	3,394
Al-05-75	2,720	0,947	3,146
Al-10-75	2,662	0,971	3,225
Al-15-75	2,604	0,996	3,308
Al-20-75	2,547	1,022	3,394
Al-05-150	2,720	0,947	3,146
Al-10-150	2,662	0,971	3,225
Al-15-150	2,604	0,996	3,308
Al-20-150	2,547	1,022	3,394
Al-05-500	2,720	0,947	3,146
Al-10-500	2,662	0,971	3,225
Al-15-500	2,604	0,996	3,308
Al-20-500	2,547	1,022	3,394

6.2.2 Al-B₄C kompozit malzemelerin Cs-137 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri

Cs-137 gama radyoaktif kaynağına ilişkin hesaplanan teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri Çizelge 6.2’ de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Çalışılan kompozit malzemelere ait XCOM programından elde edilen Cs-137 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.

Cs-137			
Malzeme Kodu	Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1})\times 10^{-2}$	YDK (cm)	ODK (cm)
Al-05-03	7,456	3,455	11,476
Al-10-03	7,446	3,471	11,530
Al-15-03	7,436	3,487	11,585
Al-20-03	7,426	3,504	11,639
Al-05-53	7,456	3,455	11,476
Al-10-53	7,446	3,471	11,530
Al-15-53	7,436	3,487	11,585
Al-20-53	7,426	3,504	11,639
Al-05-75	7,456	3,455	11,476
Al-10-75	7,446	3,471	11,530
Al-15-75	7,436	3,487	11,585
Al-20-75	7,426	3,504	11,639
Al-05-150	7,456	3,455	11,476
Al-10-150	7,446	3,471	11,530
Al-15-150	7,436	3,487	11,585
Al-20-150	7,426	3,504	11,639
Al-05-500	7,456	3,455	11,476
Al-10-500	7,446	3,471	11,530
Al-15-500	7,436	3,487	11,585
Al-20-500	7,426	3,504	11,639

6.2.3 Al-B₄C kompozit malzemelerin Co-60 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri

Co-60 gama radyoaktif kaynağına ilişkin hesaplanan teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri Çizelge 6.3’ de verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Çalışılan kompozit malzemelere ait XCOM programından elde edilen Co-60 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.

Co-60			
Malzeme Kodu	Kütle Zayıflatma Katsayısı μ_m (cm²·g⁻¹)x10⁻²	YDK (cm)	ODK (cm)
Al-05-03	5,715	4,507	14,972
Al-10-03	5,709	4,527	15,038
Al-15-03	5,702	4,548	15,107
Al-20-03	5,696	4,568	15,174
Al-05-53	5,715	4,507	14,972
Al-10-53	5,709	4,527	15,038
Al-15-53	5,702	4,548	15,107
Al-20-53	5,696	4,568	15,174
Al-05-75	5,715	4,507	14,972
Al-10-75	5,709	4,527	15,038
Al-15-75	5,702	4,548	15,107
Al-20-75	5,696	4,568	15,174
Al-05-150	5,715	4,507	14,972
Al-10-150	5,709	4,527	15,038
Al-15-150	5,702	4,548	15,107
Al-20-150	5,696	4,568	15,174
Al-05-500	5,715	4,507	14,972
Al-10-500	5,709	4,527	15,038
Al-15-500	5,702	4,548	15,107
Al-20-500	5,696	4,568	15,174

6.3 Çalışılan Al-B₄C kompozit malzemelerin deneysel ve teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayı değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Çalışılan Al-B₄C kompozit malzemelerin Am-241 radyoizotop kaynağına ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları Çizelge 6.1 – Çizelge 6.3’ de verilmiştir. Deneysel kütle zayıflatma katsayıları ise Çizelge 5.26 ve Eşitlik 2.20 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayıları ve aralarındaki yüzde fark değerleri Çizelge 6.4’ de verilmiştir.

Çizelge 6.4 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Am-241 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması.

Am-241			
Malzeme Kodu	Deneysel Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-1}$	Teorik Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-1}$	Yüzde Fark (%)
Al-05-03	2,7001	2,720	0,7
Al-10-03	2,6527	2,662	0,3
Al-15-03	2,6158	2,604	0,5
Al-20-03	2,5549	2,547	0,3
Al-05-53	2,6938	2,720	1,0
Al-10-53	2,6463	2,662	0,6
Al-15-53	2,5931	2,604	0,4
Al-20-53	2,5506	2,547	0,1
Al-05-75	2,6760	2,720	1,6
Al-10-75	2,6404	2,662	0,8
Al-15-75	2,5807	2,604	0,9
Al-20-75	2,5278	2,547	0,8
Al-05-150	2,6645	2,720	2,0
Al-10-150	2,6124	2,662	1,9
Al-15-150	2,5710	2,604	1,3
Al-20-150	2,5162	2,547	1,2
Al-05-500	2,6384	2,720	3,0
Al-10-500	2,6040	2,662	2,2
Al-15-500	2,5403	2,604	2,4
Al-20-500	2,5114	2,547	1,4

Çalışılan Al-B₄C kompozit malzemelerin Cs-137 radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayıları ve aralarındaki yüzde fark değerleri Çizelge 6.5’ de verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Cs-137 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması.

Cs-137			
Malzeme Kodu	Deneysel Kütle Zayıflatma Katsayısı μ_m (cm ² ·g ⁻¹)x10 ⁻²	Teorik Kütle Zayıflatma Katsayısı μ_m (cm ² ·g ⁻¹)x10 ⁻²	Yüzde Fark (%)
Al-05-03	7,513	7,456	0,8
Al-10-03	7,427	7,446	0,3
Al-15-03	7,365	7,436	1,0
Al-20-03	7,261	7,426	2,2
Al-05-53	7,474	7,456	0,2
Al-10-53	7,406	7,446	0,5
Al-15-53	7,280	7,436	2,1
Al-20-53	7,133	7,426	3,9
Al-05-75	7,308	7,456	2,0
Al-10-75	7,206	7,446	3,2
Al-15-75	7,116	7,436	4,3
Al-20-75	7,072	7,426	4,8
Al-05-150	7,297	7,456	2,1
Al-10-150	7,173	7,446	3,7
Al-15-150	7,099	7,436	4,5
Al-20-150	7,052	7,426	5,0
Al-05-500	7,196	7,456	3,5
Al-10-500	7,121	7,446	4,4
Al-15-500	7,071	7,436	4,9
Al-20-500	7,030	7,426	5,3

Çalışılan Al-B₄C kompozit malzemelerin Co-60 radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayıları ve aralarındaki yüzde fark değerleri Çizelge 6.6’ da verilmiştir.

Çizelge 6.6 : Çalışılan kompozit malzemelere ait Co-60 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması

Co-60			
Malzeme Kodu	Deneysel Kütle Zayıflatma Katsayısı μ_m (cm ² ·g ⁻¹)x10 ⁻²	Teorik Kütle Zayıflatma Katsayısı μ_m (cm ² ·g ⁻¹)x10 ⁻²	Yüzde Fark (%)
Al-05-03	5,681	5,715	0,8
Al-10-03	5,587	5,709	2,3
Al-15-03	5,521	5,702	3,3
Al-20-03	5,425	5,696	4,9
Al-05-53	5,670	5,715	1,0
Al-10-53	5,560	5,709	2,8
Al-15-53	5,477	5,702	4,1
Al-20-53	5,420	5,696	5,0
Al-05-75	5,662	5,715	1,1
Al-10-75	5,549	5,709	3,0
Al-15-75	5,475	5,702	4,2
Al-20-75	5,410	5,696	5,2
Al-05-150	5,668	5,715	1,0
Al-10-150	5,530	5,709	3,3
Al-15-150	5,459	5,702	4,4
Al-20-150	5,394	5,696	5,5
Al-05-500	5,643	5,715	1,5
Al-10-500	5,526	5,709	3,4
Al-15-500	5,461	5,702	4,4
Al-20-500	5,365	5,696	6,0

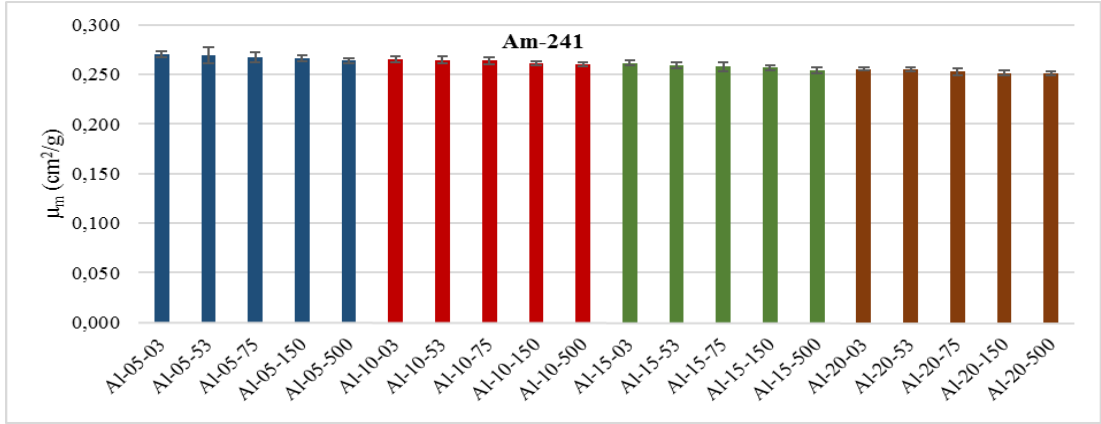
6.4 Al-B₄C Kompozit Malzemede B₄C Parçacık Boyutunun Kütle Zayıflatma Katsayısı Değerlerine Etkisi

Al-B₄C kompozit malzemeleri beş farklı tane boyutunda B₄C içermektedir. Kompozit malzemelerin yüzdece içeriği ve B₄C tane boyutları Bölüm 4 içerisinde Çizelge 4.1’ de verilmişti. Farklı gama kaynakları ile ilişkili olarak B₄C parçacık boyutunun kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi incelenmiştir.

6.4.1 Al-B₄C kompozit malzemede B₄C parçacık boyutunun Am-241 gama radyoaktif kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi

Ortalama 3 μ m, ortalama 53 μ m, 75-150 μ m arası, 150-250 μ m arası, 500 μ m ve üzeri B₄C tane boyutuna sahip kompozit malzemelerin Am-241 gama kaynağı ile ilişkili

olarak kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi Şekil 6.2’ de gösterilmiştir. Kompozit malzemelere ait Am-241 gama kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayı değerleri Çizelge 6.4’ de verilmiştir.

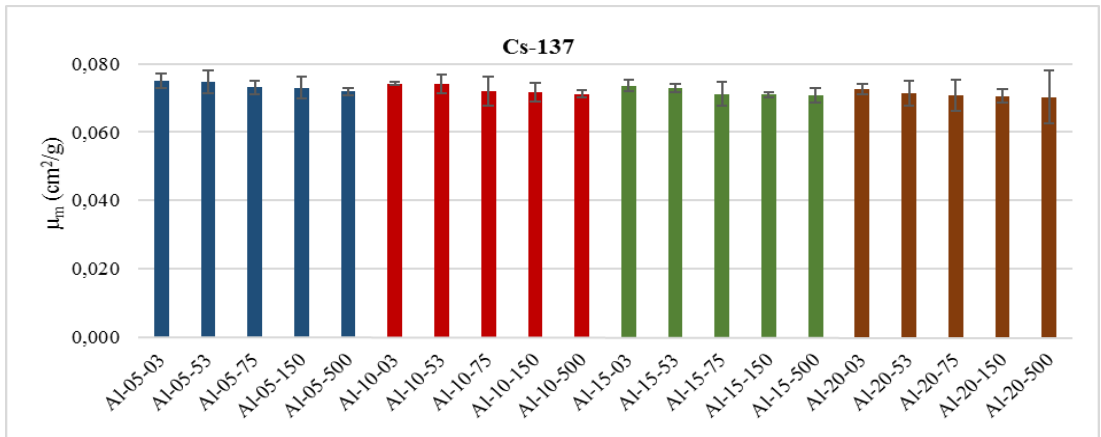


Şekil 6.2 : Al-B₄C kompozit malzemelerde Am-241 gama kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerinin değişimi

Şekil 6.2’ den görüleceği üzere, kompozit malzeme içinde artan B₄C tanecik boyutu, malzemenin kütle zayıflatma katsayısını azaltmaktadır.

6.4.2 Al-B₄C kompozit malzemede B₄C parçacık boyutunun Cs-137 gama radyoaktif kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi

Ortalama 3µm, ortalama 53 µm, 75-150 µm arası, 150-250 µm arası, 500 µm ve üzeri B₄C tane boyutuna sahip kompozit malzemelerin Cs-137 gama kaynağı ile ilişkili olarak kütle zayıflatma katsayısına etkisi Şekil 6.3’ de gösterilmiştir. Herbir tane boyutu farklı renklerde gösterilmiştir. Kompozit malzemelere ait kütle zayıflatma katsayı değerleri Çizelge 6.5’ de verilmiştir.

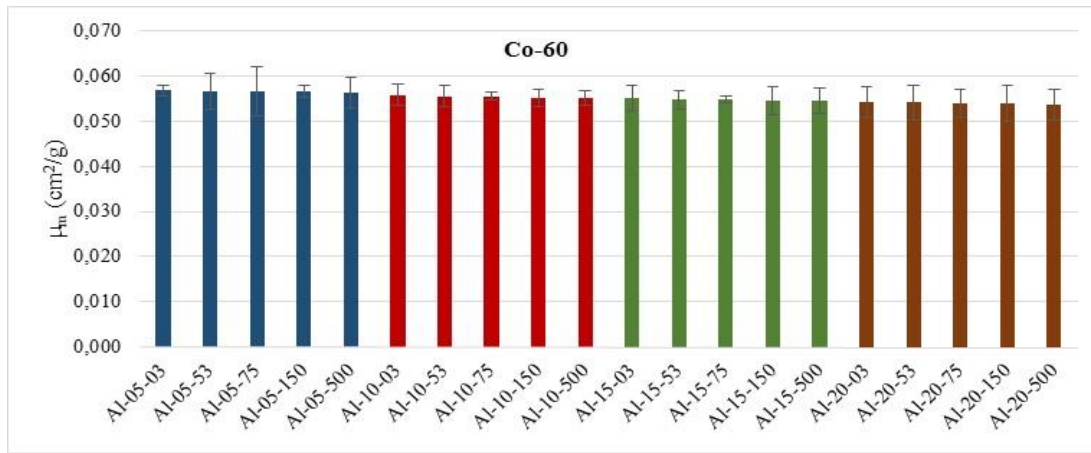


Şekil 6.3 : Al-B₄C kompozit malzemelerde Cs-137 gama kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerinin değişimi.

Şekil 6.3' den görüleceği üzere, kompozit malzeme içinde artan B₄C tanecik boyutu, malzemenin kütle zayıflatma katsayısını azaltmaktadır.

6.4.3 Al-B₄C kompozit malzemede B₄C parçacık boyutunun Co-60 gama radyoaktif kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi

Ortalama 3µm, ortalama 53 µm, 75-150 µm arası, 150-250 µm arası, 500 µm ve üzeri B₄C tane boyutuna sahip kompozit malzemelerin Co-60 gama kaynağı ile ilişkili olarak kütle zayıflatma katsayısı değerlerine etkisi Şekil 6.4' de gösterilmiştir. Kompozit malzemelere ait kütle zayıflatma katsayı değerleri Çizelge 6.6' da verilmiştir.



Şekil 6.4 : Al-B₄C kompozit malzemelerde Co-60 gama kaynağına ilişkin kütle zayıflatma katsayısı değerlerinin değişimi.

Şekil 6.4' den görüleceği üzere, kompozit malzeme içinde artan B₄C tanecik boyutu, malzemenin kütle zayıflatma katsayısını azaltmaktadır.

7. YENİ ÖNERİLEN HİBRİT KOMPOZİT MALZEME

Bu doktora tezinde farklı hacimsel yüzdelerde ve farklı B₄C parçacık boyutuna sahip olan Al-B₄C kompozit malzemeler kullanılarak yapılan çalışmalara ilişkin olarak Bölüm 5'te ulaşılan deneysel sonuçlar ile Bölüm 6' da XCOM bilgisayar programı kullanılarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bu değerler bağlamında Al-B₄C kompozit malzemelerin nötron ve beta radyasyonu için uygun bir zırh malzemesi oluşturduğu saptanmıştır. Bununla beraber kompozit malzemelerin gama radyasyonu için zırhlama etkisinin geliştirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu bağlamda Al-B₄C kompozit malzemelere WC (Tungsten Karbür) eklenmiştir. Böylece bu doktora tezinin özgünlüğü çerçevesinde farklı tip radyasyonlara karşı zırhlamada aynı anda etkinlik sağlayabilecek tek bir yeni radyasyon zırh malzemesi önerisine gidilmesi fikri benimsenmiştir.

7.1 Alüminyum- Bor karbür- Tungsten İçerikli Malzemeler

Deneylerde kullanılmak üzere geliştirilmesi önerilen kompozit malzemeler İTÜ Metalurji-Malzeme Mühendisliği Bölümü olanakları ve ilgili öğretim üye ve yardımcılarının desteği ile üretilmiştir.

Kompozit malzemeler içerisinde farklı oranlarda alüminyum, bor karbür ve tungsten bulunmaktadır. Söz konusu malzemeler 300 °C sıcaklıkta 100 psi basınç altında 10 dk süre ile sıcak presleme yöntemi ile oluşturulmuştur. Çizelge 7.1' de malzemelerin hacimsel yüzde içeriği ve kodları verilmiştir. Kodlamada ilk iki harf kompozit malzemenin matrisi, sonraki iki rakam hibrit kompozit malzeme içindeki B₄C hacimsel yüzdesini ve son iki rakam hibrit kompozit malzeme içindeki WC hacimsel yüzdesini göstermektedir.

Çizelge 7.1 : Alüminyum-bor karbür-tungsten karbür malzemelerin hacimsel içeriği ve kodlanması.

Malzemenin Kodu	Alüminyum (Hac. %)	Bor Karbür (Hac. %)	Tungsten Karbür (Hac. %)
Al-1000	90	10	-
Al-0505	90	5	5
Al-0010	90	-	10
Al-1005	85	10	5
Al-0510	85	5	10

Alüminyum- bor karbür- tungsten karbür hibrit kompozit malzemelere ait bazı mekanik özellikler Çizelge 7.2’ de verilmiştir. Şekil 7.1’ de hibrit kompozit malzemelerin görüntüsü verilmiştir.

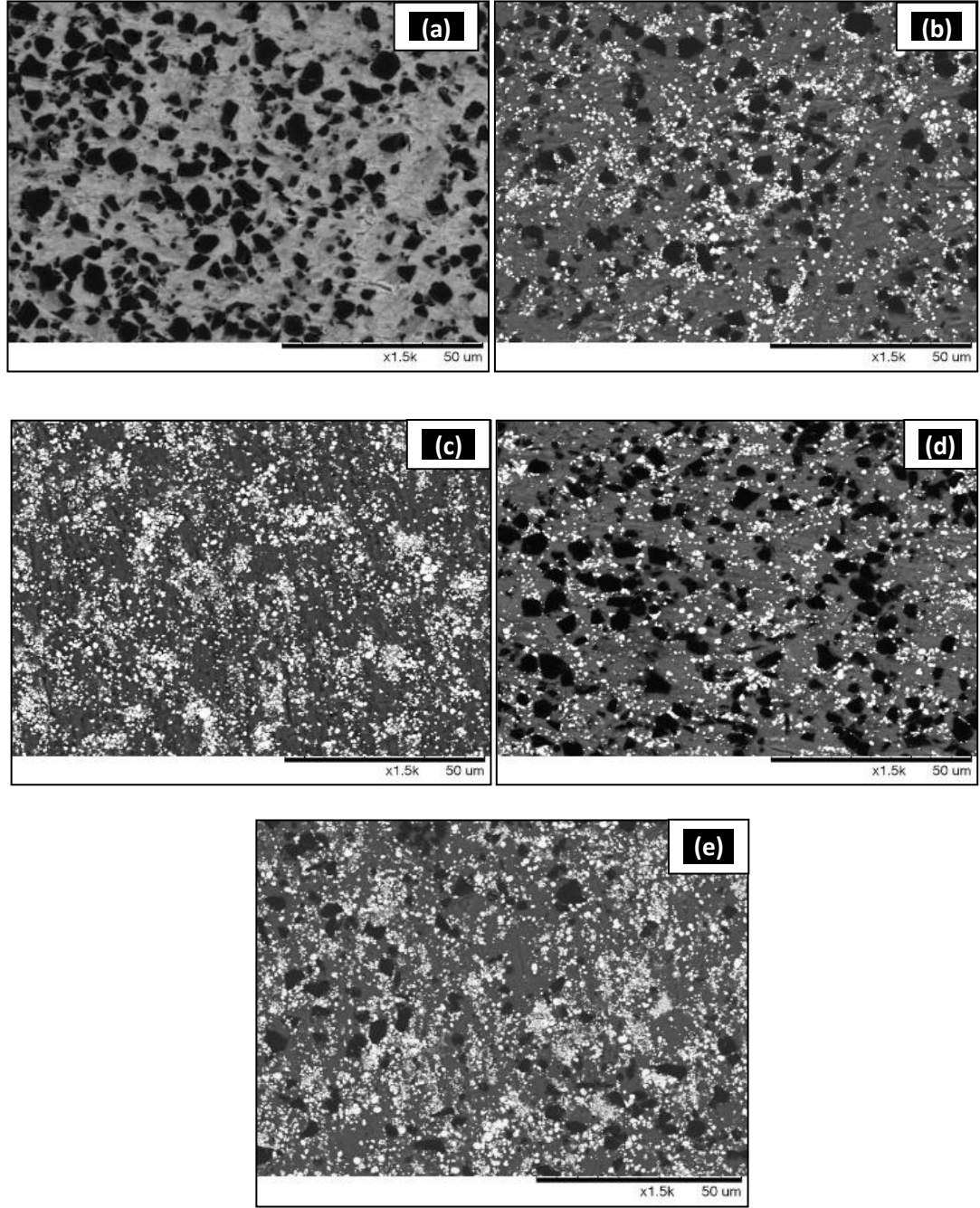


Şekil 7.1 : Alüminyum- bor karbür- tungsten karbür hibrit kompozit malzemelerin genel görüntüleri.

Çizelge 7.2 : Alüminyum-bor karbür-tungsten karbür hibrit kompozit malzemelere ait bazı mekanik özellikler.

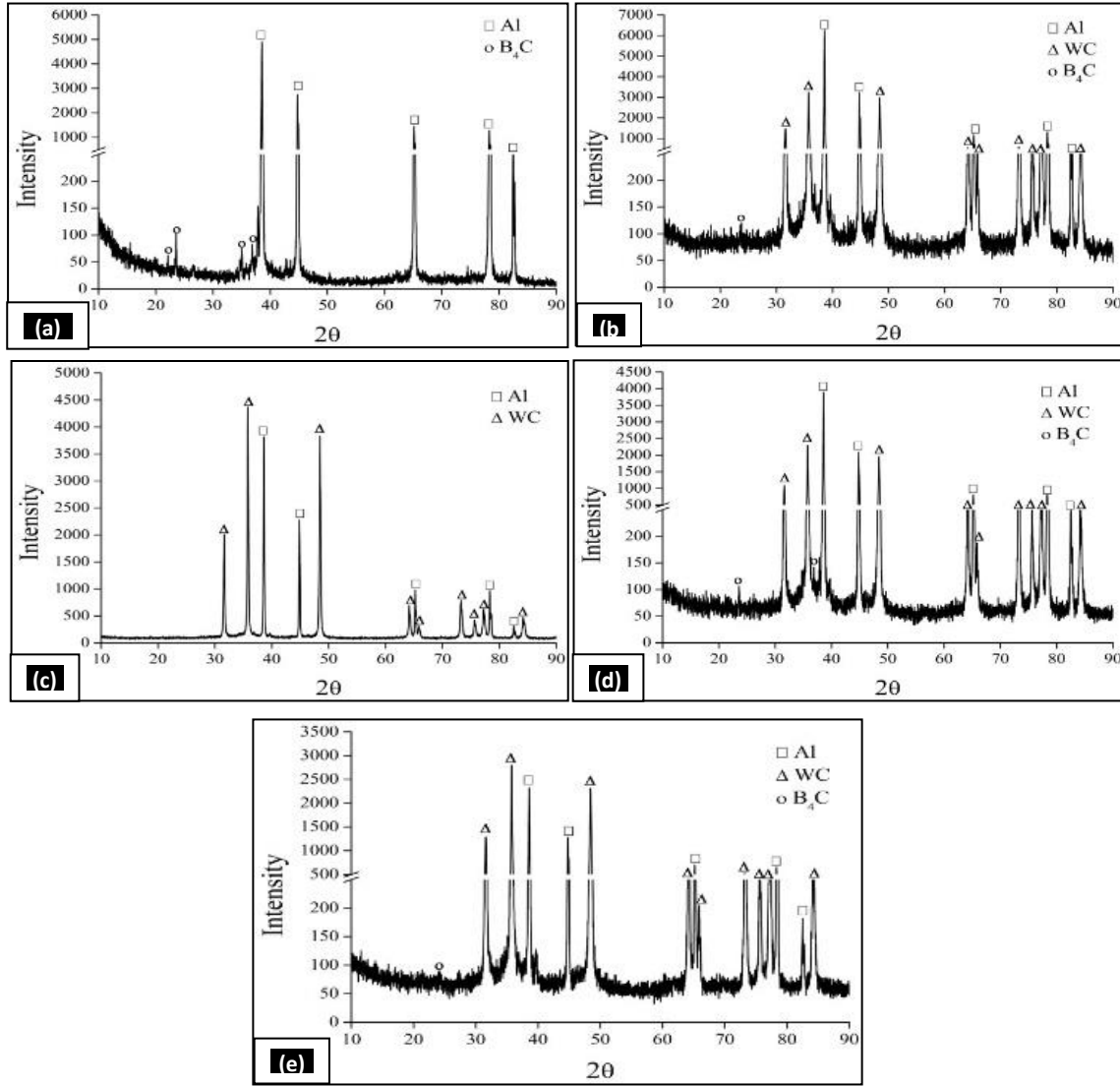
Malzemenin Kodu	Sertlik (Vickers)	Teorik Yoğunluk (g.cm ⁻³)	Deneysel yoğunluk (g.cm ⁻³) ± 0,001 (g.cm ⁻³)	Yüzde fark (%)
Al-1000	38,020 ± 0,249	2,682	2,622	2,2
Al-0505	38,948 ± 0,296	3,338	3,198	4,2
Al-0010	38,391 ± 0,175	3,993	3,716	6,9
Al-1005	36,893 ± 0,201	3,329	3,144	5,6
Al-0510	36,025 ± 0,230	3,984	3,649	8,4

Alüminyum- bor karbür- tungsten karbür hibrit kompozit malzemelere ait malzeme kalitelerinin gözlenmesi amacıyla mikroskopik yapı incelemesi yaptırılmıştır. Alüminyum- bor karbür- tungsten karbür hibrit kompozit malzemelere ilişkin SEM görüntüleri Şekil7.2’ de verilmiştir.



Şekil 7.2 : a) Al-1000 b) Al-0505 c) Al-0010 d) Al-1005 e) Al-0510 kodlu malzemelere ait SEM görüntüleri.

Alüminyum- bor karbür- tungsten karbür hibrit kompozit malzemelere ait XRD sonuçları ise Şekil7.3’ de verilmiştir.



Şekil 7.3 : a) Al-1000 b) Al-0505 c) Al-0010 d) Al-1005 e) Al-0510 kodlu malzemelere ait XRD grafikleri.

7.2. Önerilen Malzeme ile Yapılan Deney Sonuçları

Deneyisel çalışmalarda gama radyasyonu, nötron radyasyonu ve beta radyasyonu olmak üzere üç farklı radyasyon tipi kullanılmıştır. Gama radyasyonu olarak sırasıyla; Am-241, Cs-137 ve Co-60 gama radyoizotop kaynakları kullanılarak farklı enerjilerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışılan malzemelerin beta radyasyonu karşısındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla Sr-90 beta radyoizotop kaynağı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bunlardan da ayrı olarak, nötronlar karşısındaki davranışlarının incelenmesine yönelik olarak Pu-Be nötron kaynağı ile deneyler de gerçekleştirilmiştir.

7.2.1 Gama radyoizotop kaynaklarla yapılan deney sonuçları

Gama radyoizotop kaynakları ile gama transmisyon tekniği çerçevesinde oluşturulan (ve Bölüm 4 içinde detayı verilen) deney düzeneği kullanılarak hibrit kompozit malzemelere ilişkin gerçekleştirilen deneylerin sonuçları tablolar halinde Ek A.6- Ek A.10’ da verilmektedir. Bu bölümde Am-241, Cs-137 ve Co-60 radyoizotop gama kaynakları ile yapılan deney sonuçları ayrı ayrı ele alınacaktır.

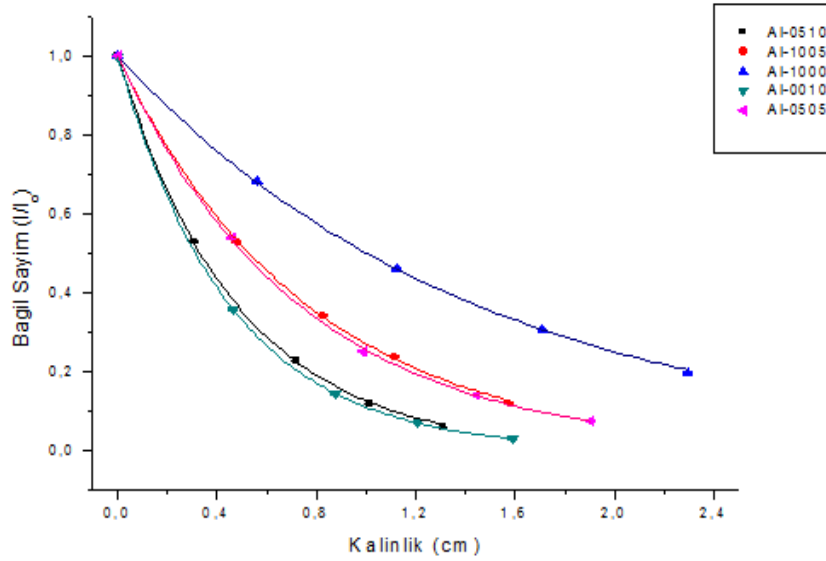
7.2.1.1 Al-WC-B₄C hibrit kompozit malzemeleri için Am-241 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları

Beş farklı hacimsel yüzde oranlarında Al, B₄C ve WC içeren Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu kompozit malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağı karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağıl sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafiği çizilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 7.3’ de verilmektedir.

Çizelge 7.3 : Al-0505, Al-1000, Al-1005, Al-0510 ve Al-0010 kodlu hibrit kompozit malzemelerinin Am-241 radyoaktif gama kaynağı için kalınlık – bağıl sayım değerleri.

Al-1000	Kalınlık (cm)	0,000	0,681	0,461	0,306	0,196
	Bağıl sayım	1,000	0,561	1,126	1,710	2,295
Al-1005	Kalınlık (cm)	0,000	0,481	0,827	1,117	1,576
	Bağıl sayım	1,000	0,528	0,341	0,237	0,119
Al-0505	Kalınlık (cm)	0,000	0,460	0,988	1,444	1,906
	Bağıl sayım	1,000	0,540	0,250	0,140	0,074
Al-0510	Kalınlık (cm)	0,000	0,310	0,716	1,016	1,312
	Bağıl sayım	1,000	0,528	0,227	0,117	0,060
Al-0010	Kalınlık (cm)	0,000	0,464	0,876	1,210	1,592
	Bağıl sayım	1,000	0,358	0,144	0,070	0,030

Çizelge 7.3 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, hibrit kompozit malzemelerin Am-241 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 7.4’ de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 7.4 : Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Am-241 radyasyon zayıflatma eğrileri.

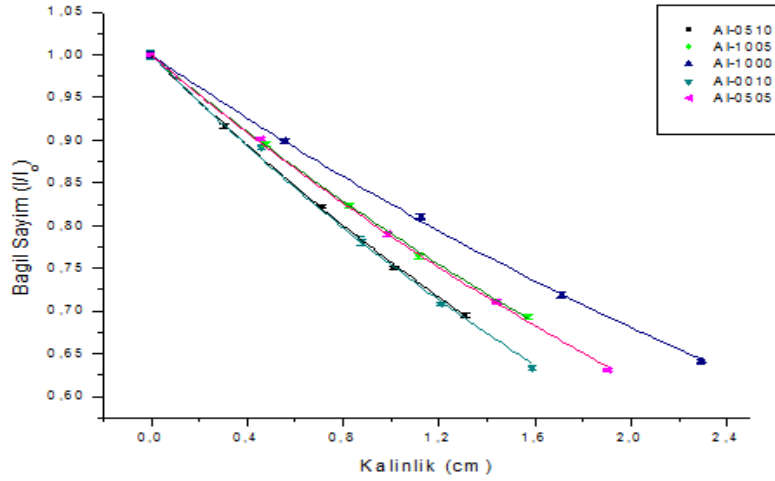
7.2.1.2 Al-WC-B₄C hibrit kompozit malzemeleri için Cs-137 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları

Beş farklı hacimsel yüzde oranlarında Al, B₄C ve WC içeren Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağli sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağli sayım değerlerinin grafiği çizilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 7.4’ de verilmektedir.

Çizelge 7.4 : Al-0505, Al-1000, Al-1005, Al-0510 ve Al-0010 kodlu hibrit kompozit malzemelerinin Cs-137 radyoaktif gama kaynağı için bağli sayım - kalınlık değerleri.

Al-1000	Kalınlık (cm)	0,000	0,561	1,126	1,710	2,295
	Bağli sayım	1,000	0,899	0,810	0,718	0,641
Al-1005	Kalınlık (cm)	0,000	0,481	0,827	1,117	1,576
	Bağli sayım	1,000	0,895	0,824	0,764	0,693
Al-0505	Kalınlık (cm)	0,000	0,460	0,988	1,444	1,906
	Bağli sayım	1,000	0,902	0,790	0,710	0,631
Al-0510	Kalınlık (cm)	0,000	0,310	0,717	1,016	1,312
	Bağli sayım	1,000	0,917	0,822	0,750	0,695
Al-0010	Kalınlık (cm)	0,000	0,464	0,876	1,210	1,592
	Bağli sayım	1,000	0,892	0,782	0,708	0,634

Çizelge 7.4 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, hibrit kompozit malzemelerin Cs-137 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 7.5’ de elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 7.5 : Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Cs-137 radyasyon zayıflatma eğrileri.

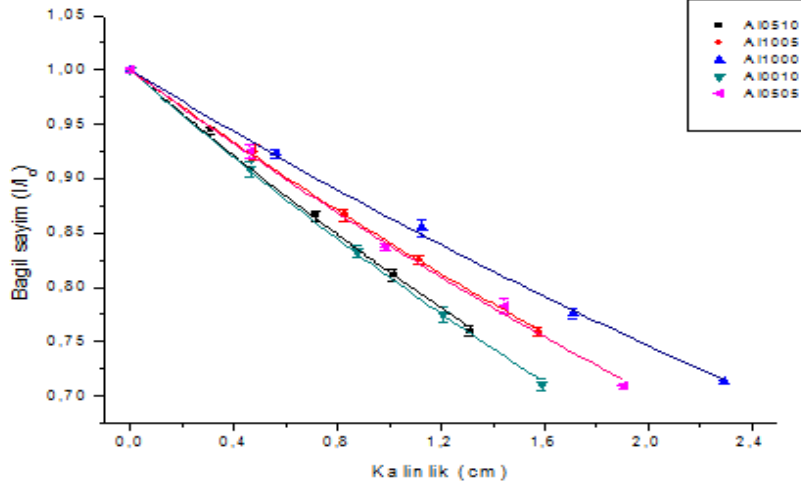
7.2.1.3 Al-WC-B₄C hibrit kompozit malzemeleri için Co-60 gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları

Beş farklı hacimsel yüzde oranlarında Al, B₄C ve WC içeren Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağıl sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafiği çizilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 7.5’ de verilmektedir.

Çizelge 7.5 : Al-0505, Al-1000, Al-1005, Al-0510 ve Al-0010 kodlu hibrit kompozit malzemelerinin Co-60 radyoaktif gama kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-1000	Kalınlık (cm)	0,000	0,561	1,126	1,710	2,295
	Bağıl sayım	1,000	0,923	0,854	0,775	0,713
Al-1005	Kalınlık (cm)	0,000	0,481	0,827	1,117	1,576
	Bağıl sayım	1,000	0,924	0,867	0,825	0,759
Al-0505	Kalınlık (cm)	0,000	0,460	0,988	1,444	1,906
	Bağıl sayım	1,000	0,925	0,837	0,783	0,709
Al-0510	Kalınlık (cm)	0,000	0,310	0,717	1,016	1,312
	Bağıl sayım	1,000	0,944	0,866	0,811	0,759
Al-0010	Kalınlık (cm)	0,000	0,464	0,876	1,210	1,592
	Bağıl sayım	1,000	0,918	0,841	0,781	0,717

Çizelge 7.5 kullanılarak her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşı bağıl sayım değerleri çizilmiştir. Bu bağlamda, hibrit kompozit malzemelerin Co-60 gama kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 7.6’ da elde edilen zayıflatma eğrileri verilmiştir.



Şekil 7.6 : Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Co-60 radyasyon zayıflatma eğrileri.

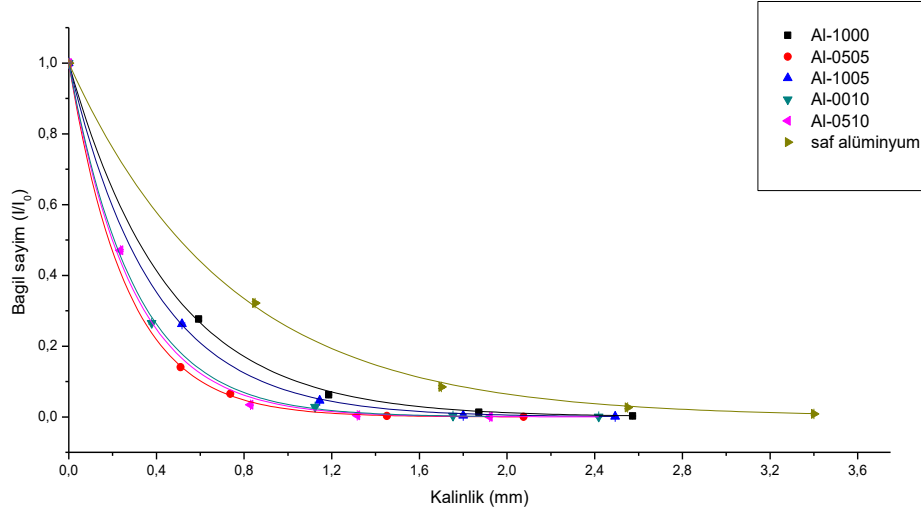
7.2.2 Al-WC-B₄C hibrit kompozit malzemeleri için Sr-90 beta radyoizotop kaynağı ile yapılan deney sonuçları

Beş farklı hacimsel yüzde oranlarında Al, B₄C ve WC içeren Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Sr-90 beta kaynağı karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağıl sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafiği çizilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 7.6’ da verilmektedir.

Çizelge 7.6 : Al-0505, Al-1000, Al-1005, Al-0510, Al-0010 kodlu hibrit kompozit malzemelerin ve saf alüminyumun Sr-90 radyoaktif beta kaynağı için bağıl sayım - kalınlık değerleri.

Al-1000	Kalınlık (mm)	0,000	0,592	1,186	1,871	2,573
	Bağıl sayım	1,000	0,276	0,063	0,013	0,003
Al-1005	Kalınlık (mm)	0,000	0,510	0,737	1,452	2,076
	Bağıl sayım	1,000	0,141	0,065	0,002	0,000
Al-0505	Kalınlık (mm)	0,000	0,517	1,145	1,803	2,493
	Bağıl sayım	1,000	0,263	0,046	0,004	0,001
Al-0510	Kalınlık (mm)	0,000	0,378	1,124	1,754	2,418
	Bağıl sayım	1,000	0,265	0,028	0,003	0,001
Al-0010	Kalınlık (mm)	0,000	0,235	0,828	1,316	1,921
	Bağıl sayım	1,000	0,471	0,034	0,004	0,000
Saf Alüminyum	Kalınlık (mm)	0,000	0,852	1,745	2,553	3,412
	Bağıl sayım	1,000	0,322	0,085	0,027	0,008

Çizelge 7.6’ da verilen değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafiği çizilmiştir. Bu grafik Şekil 7.7 ‘ de verilmiştir.



Şekil 7.7 : WC katkılı Al-B₄C hibrit kompozit malzemelerin Sr-90 beta kaynağı karşısında zayıflatma eğrileri.

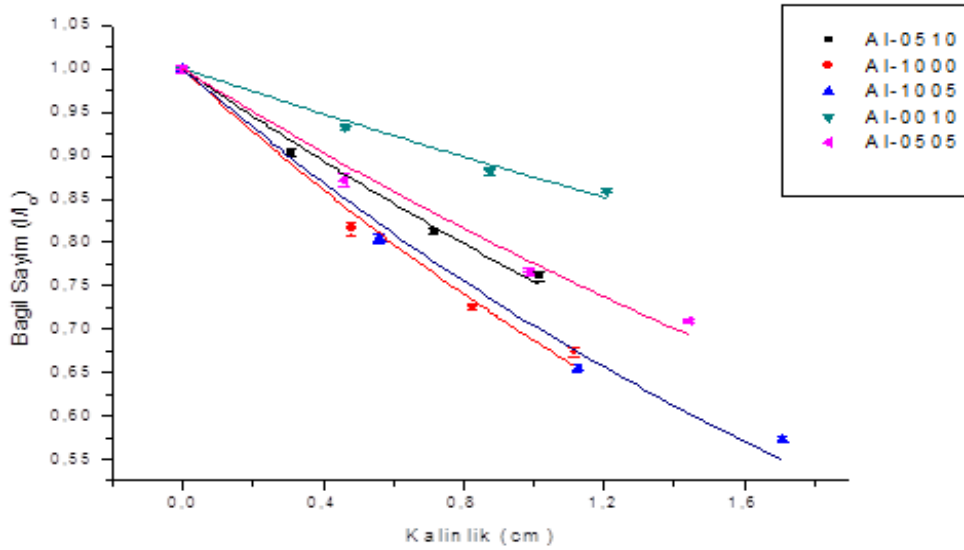
7.2.3 Al-WC-B₄C hibrit kompozit malzemeleri için Pu-Be nötron kaynağı ile yapılan deney sonuçları

Beş farklı hacimsel yüzde oranlarında Al, B₄C ve WC içeren Al-0505, Al-0510, Al-0010, Al-1000 ve Al-1005 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Pu-Be nötron howitzer (NH-3) karşısındaki radyasyon zayıflatma davranışının incelemesi amacıyla malzemelerin kalınlık-bağıl sayım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında her bir malzeme için kalınlık değerlerine karşılık bağıl sayım değerlerinin grafiği çizilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 7.7’ de verilmektedir.

Çizelge 7.7 : Al-1000, Al-1005, Al-0505, Al-0510 ve Al-0010 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Pu-Be nötron howitzer (NH-3) kaynağı için kalınlık-bağıl sayım değerleri.

Al-1000	Kalınlık (mm)	0,000	0,561	1,126	1,710
	Bağıl sayım	1,000	0,804	0,655	0,573
Al-1005	Kalınlık (mm)	0,000	0,481	0,827	1,117
	Bağıl sayım	1,000	0,816	0,726	0,673
Al-0505	Kalınlık (mm)	0,000	0,460	0,988	1,444
	Bağıl sayım	1,000	0,872	0,766	0,709
Al-0510	Kalınlık (mm)	0,000	0,310	0,716	1,016
	Bağıl sayım	1,000	0,904	0,812	0,760
Al-0010	Kalınlık (mm)	0,000	0,464	0,875	1,210
	Bağıl sayım	1,000	0,932	0,882	0,860

Çizelge 7.7’ deki değerlerden hareketle Pu-Be nötron howitzer (NH-3) kaynağına ilişkin WC katkılı Al-B₄C içerikli Al-1000, Al-1005, Al-0505, Al-0510 ve Al-0010 kodlu hibrit kompozit malzemelerin kalınlık-bağıl sayım grafikleri çizilmiştir. Bu bağlamda, Al-1000, Al-1005, Al-0505, Al-0510 ve Al-0010 kodlu kompozit malzemelerin Pu-Be nötron howitzer (NH-3) kaynağı karşısında zayıflatma eğrilerine ulaşılmıştır. WC katkılı hibrit kompozit malzemelerin Pu-Be nötron howitzer (NH-3) kaynağına ilişkin zayıflatma eğrileri Şekil 7.8’ de verilmektedir.



Şekil 7.8 : Al-1000, Al-1005, Al-0505, Al-0510 ve Al-0010 kodlu hibrit kompozit malzemelerin Pu-Be nötron howitzer (NH-3) kaynağı karşısında zayıflatma eğrileri.

7.3 Çalışılan Hibrit Kompozit Malzemelerin Gama, Beta ve Nötron Radyasyonu ile Yapılan Deneyler Sonucu Lineer Zayıflatma Katsayılarının Hesaplanması

Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin gama, beta ve nötron radyasyonuna karşı deneysel olarak çizilmiş zayıflatma eğrileri kullanılarak (sırasıyla Şekil 7.4 - Şekil 7.8 arası), söz konusu kompozit malzemelerin lineer zayıflatma katsayıları ve makroskopik tesir kesit değerleri Eşitlik 2.19 kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 7.8 ve Çizelge 7.9’ da verilmiştir.

Çizelge 7.8 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin Am-241, Cs-137 ve Co-60 gama radyoizotop kaynaklar için hesaplanan deneysel lineer zayıflatma katsayıları değerleri.

	Am-241		Cs-137		Co-60	
Malzeme Kodu	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (cm ⁻¹)	Std. Hata (cm ⁻¹)	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (cm ⁻¹)	Std. Hata (cm ⁻¹)	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (cm ⁻¹)	Std. Hata (cm ⁻¹)
Al-0510	2,124	0,014	0,279	0,002	0,207	0,003
Al-1005	1,326	0,011	0,235	0,002	0,174	0,001
Al-1000	0,701	0,005	0,193	0,001	0,147	0,002
Al-0010	2,208	0,002	0,284	0,005	0,212	0,001
Al-0505	1,368	0,013	0,239	0,002	0,177	0,002

Çizelge 7.9 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı ile Sr-90 beta kaynağı için hesaplanan deneysel makroskopik tesir kesit değerleri ve lineer zayıflatma katsayıları değerleri.

Malzeme Kodu	Pu-Be Nötron Kaynağı		Sr-90 Beta Kaynağı	
	Makroskopik Tesir Kesiti σ (cm ⁻¹)	Std.Hata (cm ⁻¹)	Lineer Zayıflatma Katsayısı μ (mm ⁻¹)	Std. Hata (mm ⁻¹)
Al-0510	0,280	0,009	4,305	0,034
Al-1005	0,372	0,014	3,138	0,033
Al-1000	0,344	0,016	2,304	0,026
Al-0010	0,133	0,006	4,047	0,042
Al-0505	0,251	0,012	2,876	0,138
Alüminyum	-	-	1,416	0,025

7.4 Deneysel Sonuçlardan Hareketle Çalışılan Malzemelerin Yarı Tabaka Değer Kalınlıklarının Tayini

Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin gama, beta ve nötron radyasyonuna karşılık YDK ve ODK değerleri Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

7.4.1 Deneysel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 7.10' da verilmektedir.

Çizelge 7.10 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin Am-241gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

	Am-241			
Malzeme Kodu	YDK (cm)	Std. Hata (cm)	ODK (cm)	Std. Hata (cm)
Al-0510	0,326	0,002	1,084	0,007
Al-1005	0,523	0,004	1,736	0,014
Al-1000	0,989	0,007	3,286	0,022
Al-0010	0,314	0,000	1,043	0,001
Al-0505	0,507	0,005	1,683	0,016

7.4.2 Deneysel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Cs-137gama radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 7.11’ de verilmektedir.

Çizelge 7.11 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

	Cs-137			
Malzeme Kodu	YDK (cm)	Std. Hata (cm)	ODK (cm)	Std. Hata (cm)
Al-0510	2,489	0,017	8,268	0,057
Al-1005	2,951	0,024	9,802	0,080
Al-1000	3,593	0,024	11,937	0,081
Al-0010	2,444	0,044	8,119	0,145
Al-0505	2,898	0,024	9,626	0,080

7.4.3 Deneysel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 7.12’ de verilmektedir.

Çizelge 7.12 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

	Co-60			
Malzeme Kodu	YDK (cm)	Std. Hata (cm)	ODK (cm)	Std. Hata (cm)
Al-0510	3,355	0,044	11,145	0,146
Al-1005	3,993	0,033	13,264	0,109
Al-1000	4,725	0,051	15,696	0,168
Al-0010	3,263	0,022	10,841	0,075
Al-0505	3,923	0,055	13,031	0,183

7.4.4 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 7.13’ de verilmektedir.

Çizelge 7.13 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

	Sr-90			
Malzeme Kodu	YDK (mm)	Std. Hata (mm)	ODK (mm)	Std. Hata (mm)
Al-0510	0,161	0,005	0,535	0,017
Al-1005	0,221	0,003	0,734	0,010
Al-1000	0,301	0,004	0,999	0,015
Al-0010	0,171	0,001	0,569	0,005
Al-0505	0,241	0,002	0,801	0,007
Alüminyum			1,626	0,029

7.4.5 Deneyisel sonuçlardan hareketle çalışılan malzemelerin Pu-Be nötron kaynağına ilişkin YDK ve ODK değerlerinin tayini

Çalışılan malzemelerin Pu-Be nötron kaynağına ilişkin hesaplanan YDK ve ODK değerleri Çizelge 7.14’ de verilmektedir.

Çizelge 7.14 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin Pu-Be nötron kaynağı için hesaplanan YDK ve ODK değerleri.

	Pu-Be			
Malzeme Kodu	YDK (cm)	Std. Hata (cm)	ODK (cm)	Std. Hata (cm)
Al-0510	2,478	0,084	8,232	0,278
Al-1005	1,862	0,072	6,186	0,239
Al-1000	2,013	0,091	6,686	0,304
Al-0010	5,208	0,230	17,300	0,763
Al-0505	2,760	0,128	9,170	0,426

7.5 Çalışılan Al-B₄C-WC Hibrit Kompozit Malzemelerin XCOM Programı İle Teorik Olarak Hesaplanan Kütle Zayıflatma Katsayılarının, YDK ve ODK’larının Tayini

XCOM programında çalışılan hibrit kompozit malzemeler karışım olarak işaretlenmiş ve hibrit kompozit malzeme içindeki B₄C bileşiği, WC bileşiği ve Al elementi için yüzde katkı değerleri girilmiştir. Bunun yanısıra kullanılan radyoaktif

gama kaynağına ilişkin foton enerji değerleri girilmiştir. İlk olarak kullanılan Am-241 radyoaktif gama kaynağı için yüzde olarak en büyük yüzde bolluğa sahip 60 keV enerji piki kullanılmıştır. Cs-137 gama kaynağı için 662 keV değerli tek enerji piki kullanılmıştır. Co-60 radyoaktif kaynak için her ikisinde %100 bolluğa sahip 1,17 ve 1,33 MeV enerjili iki pikin ortalama değeri olan 1,25 MeV değeri kullanılmıştır. Elde edilen kütle zayıflatma katsayıları Eşitlik 2.20 kullanılarak, teorik yoğunluk değerleri ile çarpılarak lineer zayıflatma katsayıları elde edilmiştir. Bulunan lineer zayıflatma katsayıları Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 içinde kullanılarak çalışılan tüm kompozit malzemeler için teorik YDK ve ODK değerleri hesaplanmıştır.

7.5.1 Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin Am-241 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri

Am-241 gama radyoaktif kaynağına ilişkin hesaplanan teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri Çizelge 7.15’ de verilmiştir.

Çizelge 7.15 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelere ait Am-241 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.

Am-241			
Malzeme Kodu	Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-1}$	YDK (cm)	ODK (cm)
Al-0510	5,938	0,293	7,859
Al-1005	4,271	0,488	4,723
Al-1000	2,662	0,971	2,372
Al-0010	5,996	0,290	7,953
Al-0505	4,326	0,480	4,797

7.5.2 Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin Cs-137 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri

Cs-137gama radyoaktif kaynağına ilişkin hesaplanan teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri Çizelge 7.16’ da verilmiştir.

Çizelge 7.16 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelere ait Cs-137 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.

Cs-137			
Malzeme Kodu	Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-2}$	YDK (cm)	ODK (cm)
Al-0510	7,674	2,267	1,016
Al-1005	7,555	2,756	0,835
Al-1000	7,446	3,471	0,663
Al-0010	7,684	2,259	1,019
Al-0505	7,565	2,745	0,839

7.5.3 Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin Co-60 radyoaktif kaynağına ilişkin XCOM bilgisayar programı kullanılarak teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri

Co-60gama radyoaktif kaynağına ilişkin hesaplanan teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri Çizelge 7.17’ de verilmiştir.

Çizelge 7.17 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelere ait Co-60 gama radyasyonuna ilişkin teorik kütle zayıflatma katsayıları ve buna ilişkin bulunan YDK ve ODK değerleri.

Co-60			
Malzeme Kodu	Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-2}$	YDK (cm)	ODK (cm)
Al-0510	5,744	3,029	0,760
Al-1005	5,728	3,635	0,633
Al-1000	5,719	4,519	0,510
Al-0010	5,751	3,018	0,763
Al-0505	5,735	3,621	0,636

7.5.4 Çalışılan malzemeler için XCOM ile yapılan teorik çalışmalarla elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçların karşılaştırılması

Çalışılan Al-B₄C-WC kompozit malzemelerin Am-241 radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayıları ve aralarındaki yüzde fark değerleri Çizelge 7.18’ de verilmiştir.

Çizelge 7.18 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelere ait Am-241 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması.

Am-241			
Malzeme Kodu	Deneysel Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-1}$	Teorik Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-1}$	Yüzde Fark (%)
Al-0510	5,820	5,938	2,0
Al-1005	4,218	4,271	1,2
Al-1000	2,673	2,662	0,4
Al-0010	5,941	5,996	0,9
Al-0505	4,278	4,326	1,1

Çalışılan Al-B₄C hibrit kompozit malzemelerin Cs-137 radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayıları ve aralarındaki yüzde fark değerleri Çizelge 7.19’ da verilmiştir.

Çizelge 7.19 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelere ait Cs-137 radyasyonuna ilişkin teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması.

Cs-137			
Malzeme Kodu	Deneysel Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-2}$	Teorik Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-2}$	Yüzde Fark (%)
Al-0510	7,631	7,674	0,6
Al-1005	7,471	7,555	1,1
Al-1000	7,358	7,446	1,2
Al-0010	7,631	7,684	0,7
Al-0505	7,481	7,565	1,1

Çalışılan Al-B₄C hibrit kompozit malzemelerin Co-60 radyoizotop kaynağına ilişkin hesaplanan teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayıları ve aralarındaki yüzde fark değerleri Çizelge 7.20’ de verilmiştir.

Çizelge 7.20 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelere ait Co-60 radyasyonuna karşı teorik ve deneysel kütle zayıflatma katsayılarının karşılaştırılması.

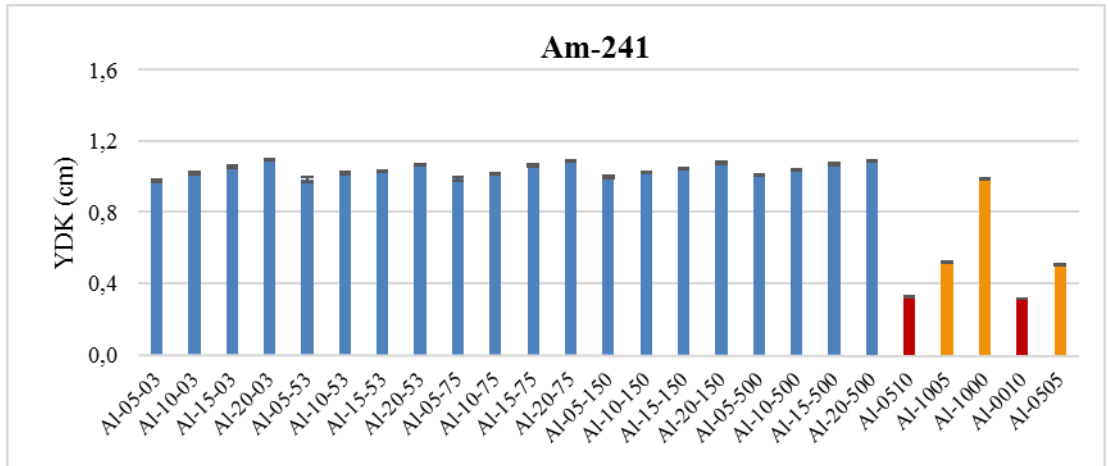
Co-60			
Malzeme Kodu	Deneysel Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-2}$	Teorik Kütle Zayıflatma Katsayısı $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) \times 10^{-2}$	Yüzde Fark (%)
Al-0510	5,661	5,744	1,4
Al-1005	5,521	5,728	3,6
Al-1000	5,596	5,719	2,2
Al-0010	5,715	5,751	0,6
Al-0505	5,526	5,735	3,6

7.5.5 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Al-B₄C kompozit malzemeler ile Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin deneysel olarak elde edilen Am-241, Cs-137 ve Co-60 gama kaynaklarına, Sr-90 beta kaynağına ve Pu-Be nötron kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi yapılmıştır.

7.5.5.1 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Am-241 gama radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin, Al-B₄C kompozit malzemeler ile Am-241gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırması Şekil 7.9’ da verilmektedir.

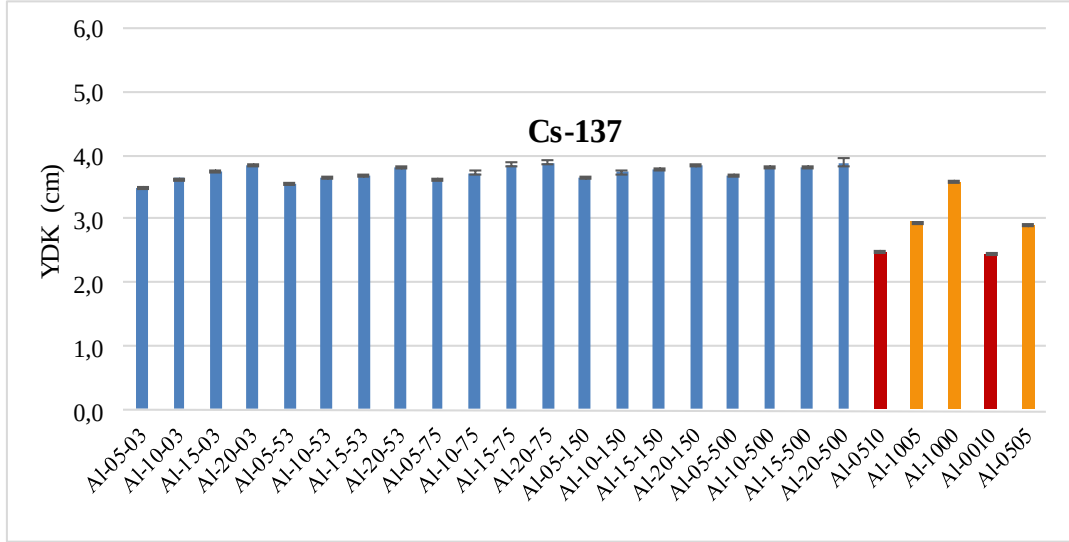


Şekil 7.9 : Al-B₄C ve Al-B₄C-WC kompozit malzemelerinin Am-241 radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.9 incelendiğinde Al-0510 ve Al-0010 hibrit kompozit malzemelerin YDK değerlerinin en küçük olduğu, dolayısı ile Am-241 gama radyasyonuna karşı çalışılan malzemeler içinde en iyi zırhlama malzemesi olduğu söylenebilir.

7.5.5.2 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Cs-137 gama radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin, Al-B₄C kompozit malzemeler ile Cs-137 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırması Şekil 7.10’ da verilmektedir.

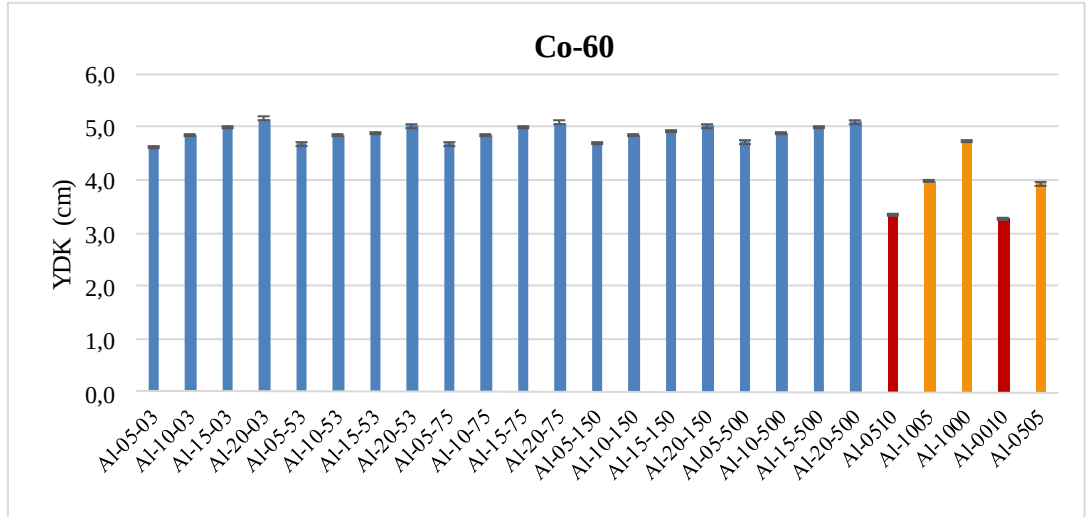


Şekil 7.10 : Al-B₄C ve Al-B₄C-WC kompozit malzemelerinin Cs-137 radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.10 incelendiğinde Al-0510 ve Al-0010 hibrit kompozit malzemelerin YDK değerlerinin en küçük olduğu, dolayısı ile Cs-137 gama radyasyonuna karşı çalışılan malzemeler içinde en iyi zırhlama malzemesi olduğu söylenebilir.

7.5.5.3 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin, Al-B₄C kompozit malzemeler ile Co-60 gama radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırması Şekil 7.11’ de verilmektedir.

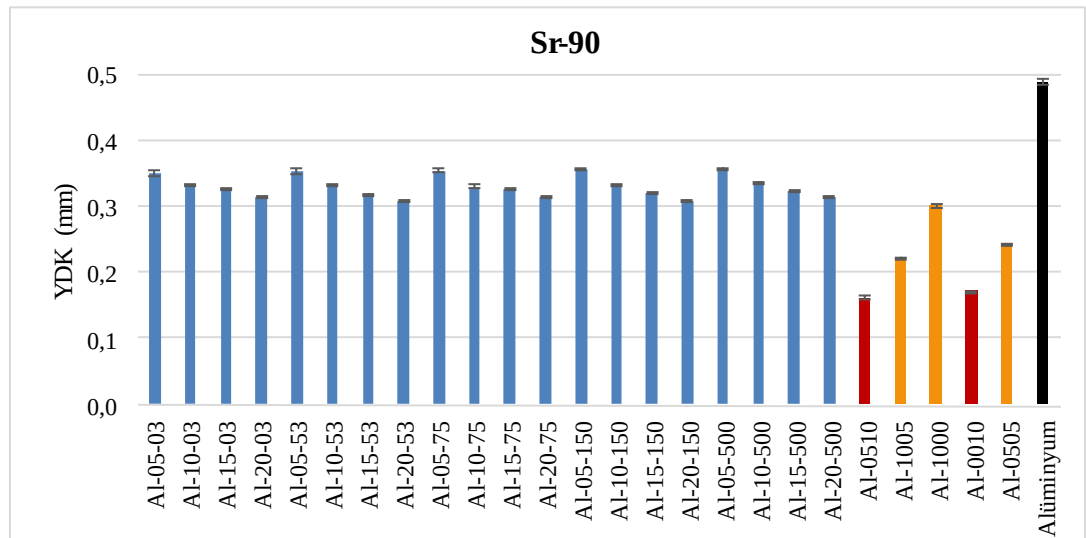


Şekil 7.11 : Al-B₄C ve Al-B₄C-WC kompozit malzemelerinin Co-60 radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.11 incelendiğinde Al-0510 ve Al-0010 hibrit kompozit malzemelerin YDK değerlerinin en küçük olduğu, dolayısı ile Co-60 gama radyasyonuna karşı çalışılan malzemeler içinde en iyi zırhlama malzemesi olduğu söylenebilir.

7.5.5.4 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin, Al-B₄C hibrit kompozit malzemeler ile Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırması Şekil 7.12' de verilmektedir.

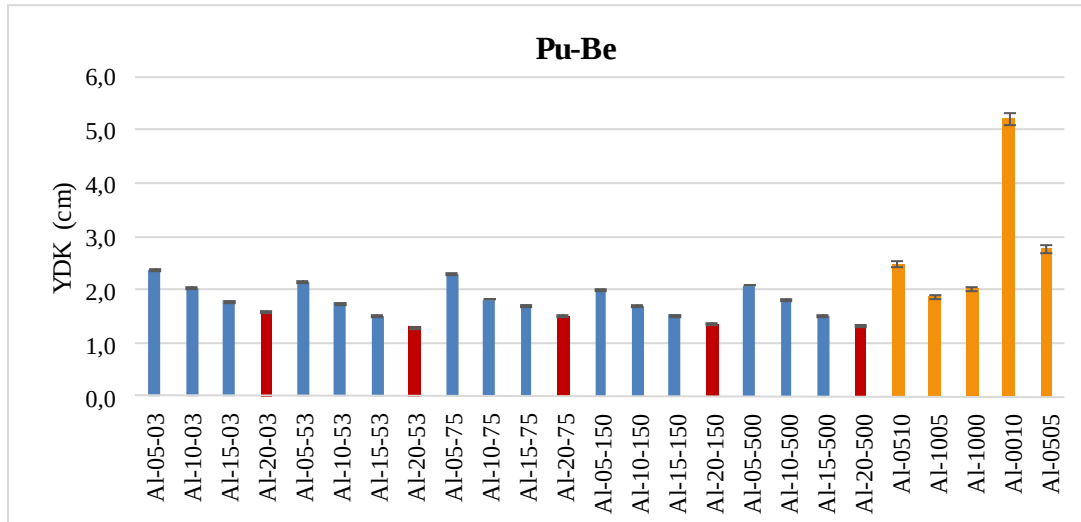


Şekil 7.12 : Al-B₄C ve Al-B₄C-WC kompozit malzemelerinin Sr-90 beta radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.12 incelendiğinde Al-0510 ve Al-0010 hibrit kompozit malzemelerin YDK değerlerinin en küçük olduğu, dolayısı ile Sr-90 beta radyasyonuna karşı çalışılan malzemeler içinde en iyi zırhlama malzemesi olduğu söylenebilir.

7.5.5.5 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin Pu-Be nötron radyoizotop kaynağına ilişkin radyasyon zırhlama özelliklerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerin, Al-B₄C kompozit malzemeler ile Pu-Be nötron radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırması Şekil 7.13’ de verilmektedir.



Şekil 7.13 : Al-B₄C ve Al-B₄C-WC kompozit malzemelerinin Pu-Be nötron radyoizotop kaynağına ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.13 incelendiğinde %20 B₄C katkılı Al-B₄C hibrit kompozit malzemelerin YDK değerlerinin en küçük olduğu, dolayısı ile Pu-Be nötron radyasyonuna karşı çalışılan malzemeler içinde en iyi zırhlama malzemesi olduğu söylenebilir. Bununla beraber Al-1005 diğer malzemelere nispeten oldukça iyi bir nötron yutucu olduğu görülmektedir.

7.5.5.6 Önerilen hibrit kompozit malzeme ile diğer çalışılan malzemelerin gama, nötron ve beta radyasyonuna ilişkin YDK değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

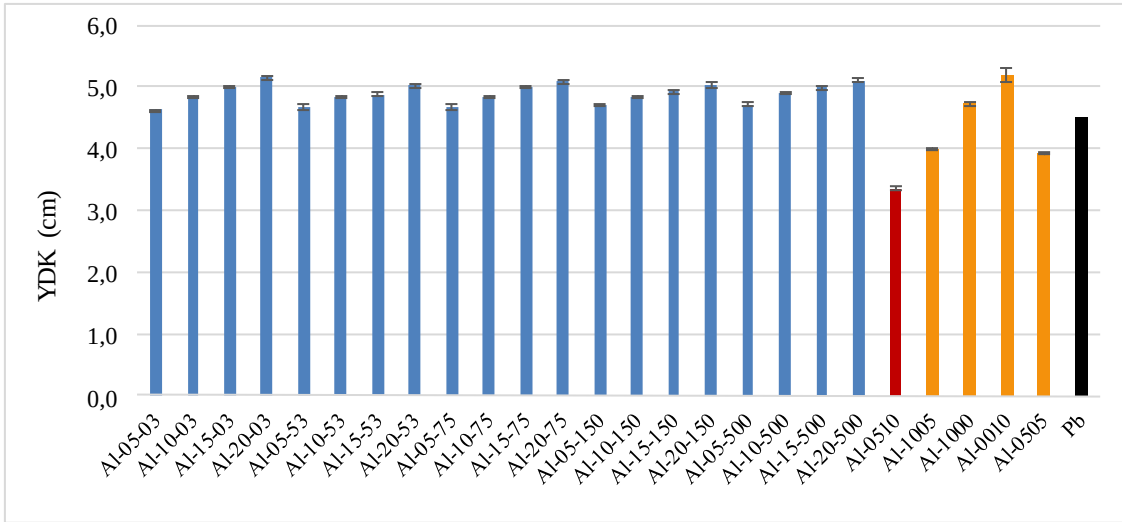
Çalışılan tüm hibrit kompozit malzemelerin YDK değerlerinin beraber değerlendirilebilmesi için Çizelge 7.21 oluşturulmuştur. Çizelge 7.21’ de çalışılan her malzeme için en yüksek YDK değeri belirlenmiştir. Böylece bir malzemenin

gama, nötron ve beta radyasyonlarının beraberce bulunduğu bir ortam için radyasyon tipine göre sahip olduğu en yüksek YDK değerinin belirlenmesi ve buna göre malzemenin seçilmesi mümkün olacaktır.

Çizelge 7.21 : Çalışılan tüm hibrit kompozit malzemelerin gama, nötron ve beta zırlamasına karşı davranışının beraberce YDK değerlendirmesi.

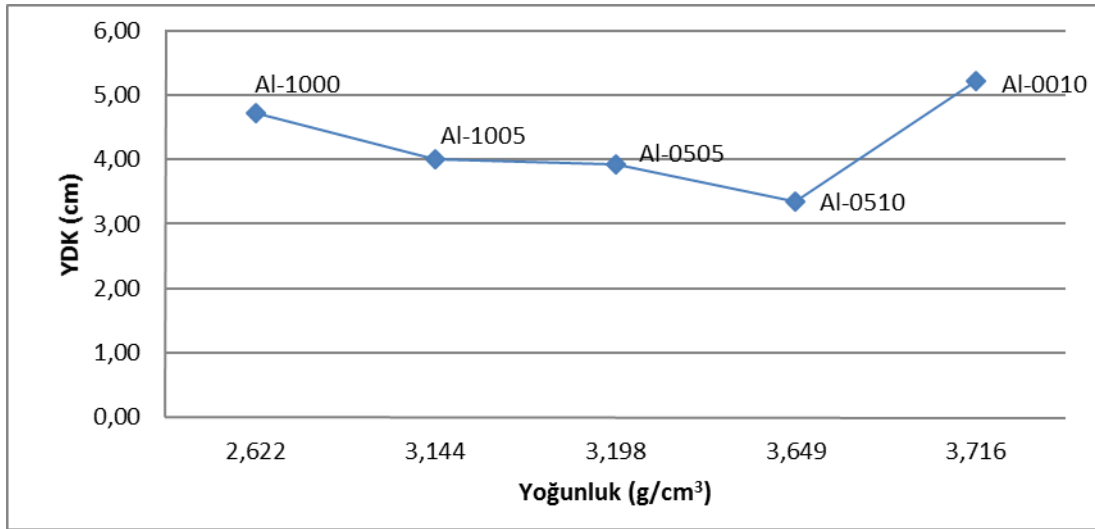
Malzeme Kodu	Am-241 (cm)	Cs-137 (cm)	Co-60 (cm)	Beta (mm)	Nötron (cm)	Gama, Nötron ve Beta (cm)
Al-05-03	0,974	3,499	5,715	0,350	2,374	5,715
Al-10-03	1,019	3,639	5,709	0,332	2,033	5,709
Al-15-03	1,056	3,749	5,702	0,326	1,786	5,702
Al-20-03	1,095	3,853	5,696	0,314	1,579	5,696
Al-05-53	0,984	3,546	5,715	0,352	2,146	5,715
Al-10-53	1,018	3,637	5,709	0,332	1,750	5,709
Al-15-53	1,032	3,675	5,702	0,318	1,513	5,702
Al-20-53	1,066	3,811	5,696	0,309	1,305	5,696
Al-05-75	0,989	3,621	5,715	0,354	2,280	5,715
Al-10-75	1,016	3,725	5,709	0,330	1,819	5,709
Al-15-75	1,062	3,853	5,702	0,325	1,720	5,702
Al-20-75	1,088	3,888	5,696	0,313	1,507	5,696
Al-05-150	0,999	3,648	5,715	0,356	1,986	5,715
Al-10-150	1,025	3,735	5,709	0,332	1,691	5,709
Al-15-150	1,045	3,786	5,702	0,320	1,530	5,702
Al-20-150	1,077	3,844	5,696	0,309	1,359	5,696
Al-05-500	1,077	3,695	5,715	0,357	2,069	5,715
Al-10-500	1,008	3,823	5,709	0,337	1,805	5,709
Al-15-500	1,037	3,821	5,702	0,323	1,510	5,702
Al-20-500	1,072	3,892	5,696	0,314	1,341	5,696
Al-0510	0,326	2,489	3,355	0,161	2,478	3,355
Al-1005	0,523	2,951	3,993	0,221	1,862	3,993
Al-1000	0,989	3,593	4,725	0,301	2,013	4,725
Al-0010	0,314	2,444	3,263	0,171	5,208	5,208
Al-0505	0,507	2,898	3,923	0,241	2,760	3,923
Pb	0,012	0,555	1,040	0,073	4,501	4,501

Çizelge 7.21’ de kurşun nötron için verilen YDK değerleri (Büyük, 2013)’ den, beta radyasyonu için YDK değeri (Ram, 1982)’ den Am-241, Cs-137 ve Co-60 için XCOM programından teorik olarak bulunmuştur. Çizelge 7.21’ den yola çıkılarak Şekil 7.14 çizilmiştir.



Şekil 7.14 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin yüksek olan YDK değerlerine göre karşılaştırılması.

Şekil 7.14' e göre hibrit kompozit malzemelerin en yüksek YDK değerlerine göre ve Şekil 7.15' de yoğunluk değerlerine göre değerlendirilmesi sonucunda gama, beta ve nötron radyasyonunu zırlama açısından en uygun malzeme bu doktora tezinin özgünlüğü çerçevesinde önerilen Al-0510 kodlu hibrit kompozit malzemedir.



Şekil 7.15 : Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin yoğunluk değerlerine karşı yüksek olan YDK değerlerine göre karşılaştırılması.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışması kapsamında farklı malzemelerin gama, nötron ve beta radyoaktif kaynakları karşısında transmisyon tekniği kullanılarak radyasyon zırhlama etkileri incelenmiştir. Deneylerde üç farklı değerde foton enerjisine sahip gama kaynağı kullanılmıştır. Gama fotonunun enerjisinin artması malzemeye daha fazla nüfuz etmesini sağlamaktadır. Böylece düşük, orta ve yüksek enerjilerde gama radyasyonunun madde ile etkileşmesi deneysel olarak çalışılmıştır. Gama radyasyonu ile yapılan deneysel çalışma kapsamında Am-241 (60 keV), Cs-137 (662 keV) ve Co-60 (1,17 ve 1,33 MeV) radyoizotop kaynakları kullanılmıştır. Bölüm 2' de anlatıldığı üzere farklı radyasyon tiplerinin madde ile etkileşimi birbirinden farklı olduğundan gama radyasyonunun yanı sıra malzemelerin nötron ve beta radyasyonlarını tutuculuğu da deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla Pu-Be nötron kaynağı ve Sr-90 beta kaynağı kullanılmıştır.

Avrupa Birliği'nin endüstride zararlı maddelerin kullanımını kısıtlayan RoHS direktifleri arasında yer alan kurşun, toksit bir malzemedir. Toksit malzemeler canlı organizmaya ağız, solunum, deri ve enfeksiyon yolu ile girdiğinde normal fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmaları bozarak canlıya zarar verebilmektedirler. Nükleer teknolojide gama ve X-ışını zırhlamasında önemli bir yer tutan kurşunun alternatifi olabilecek bir malzeme arayışı söz konusudur. Bu doktora konusu kapsamında çalışılan malzemelerin kurşun kullanımına alternatif olması amaçlanmıştır. Bununla beraber gerek nükleer teknolojide gerekse de uzay teknolojisinde aynı anda farklı radyasyon tiplerinin bulunduğu alanlar mevcuttur. Bu nedenle her bir radyasyon tipi için çoğu zaman farklı malzemeler kullanılarak radyasyonun zırhlaması gerçekleştirilmektedir.

Kullanılacak zırh malzemesinin farklı tip radyasyonlar karşısında etkili olması malzemelerin kapladığı hacim, maliyet ve imalat kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, gama radyasyonunun yanı sıra nötron ve beta radyasyonları ile çalışılmış ve kullanılan malzemenin karışık radyasyon alanlarında kullanılabilirliği sınanmıştır.

Deneysel çalışmanın ilk kısmında dayanımı ve işlenebilirliği açısından iyi mekanik özelliklere sahip olması nedeni ile teknolojiye yaygın kullanım alanı bulunan alüminyum bor karbür metal matrisli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan kompozit malzemeler dört farklı oranda bor karbür içermektedir. Bununla beraber herbir katkı oranında bor karbürün beş farklı tane boyutu kullanılmıştır. Bu malzemelere ait bilgiler Bölüm 4.1’ de verilmiştir. Böylece kompozit malzeme içerisindeki bor karbürün farklı yüzde katkı oranının ve tane boyutunun farklı radyasyon tipleri için zırhlama üzerindeki etkisi bu doktora çalışmasının özgünlüğü kapsamında incelenmiştir. Bir başka deyişle, radyasyon zırhlama etkisi açısından incelenen kompozit malzemeler ilk olma özelliği taşımaktadır. Bu açıdan doktora çalışmasının özgün kısmını oluşturmaktadır.

Çalışılan kompozit malzemelerin ilk olarak Bölüm 4’ de verildiği üzere yoğunluk ölçümleri yapılmış ve teorik hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. İki değer arasındaki yüzde fark tüm malzemeler için %7’ in altında çıkmıştır. Bu farkın nedeni kompozit malzeme içerisinde bulunan safsızlıklardan, malzeme içerisindeki boşluklardan ve ölçüm sisteminden gelen ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır.

Kompozit malzemelerin karakterizasyonu amacı ile SEM görüntüleri çekilmiş ve görüntülerden bor karbür parçacıklarının alüminyum matris içerisinde dağılımı görülmüştür (Şekil 4.2). Bor karbürün parçacık boyutu arttığında matris içerisinde daha az hasar vererek dağıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra kompozit malzemeler içerisinde olan ve üretim esnasında oluşabilecek bileşikler saptayabilmek için XRD çıktılarına bakıldığında, kompozit malzeme içerisinde Al ve B₄C bileşiği dışında bir bileşikle karşılaşmamıştır.

Deneysel çalışmanın ilk kısmında Am-241 gama radyoizotop kaynağının yaydığı 60 keV enerjili gama fotonları kullanılmıştır. Aynı deneyler 662 keV monokromatik enerjili foton yayan Cs-137 gama radyoizotop kaynağı ve 1,17 ile 1,33 MeV enerjili gama fotonu yayan Co-60 radyoizotop kaynağı için tekrarlanmıştır. Deneyler sonucunda lineer zayıflatma katsayı değerleri ve bu değerler kullanılarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları, Yarı Değer Kalınlığı (YDK) ve Ondabir Değer kalınlığı (ODK) değerleri bulunmuştur.

Deney sonuçlarına göre, tüm kompozit malzemelerde bor karbür miktarının yüzdesel olarak artışı, malzemenin gama radyasyonuna karşı kütle zayıflatma katsayısını

azalttığı, YDK ve ODK değerlerini arttırdığı görülmektedir. Bir başka parametre olan bor karbürün tanecik boyutunun artışı, kompozit malzemenin gama radyasyonuna karşı kütle zayıflatma katsayısını azalttığı, YDK ve ODK değerlerini arttırdığı saptanmıştır. Bu sonuçlara göre bor karbür miktarının yüzdesel olarak artışı ile bor karbürün tanecik boyutunun artışı kompozit malzemenin gama radyasyonu zırhlama etkisini azaltmaktadır.

Kullanılan gama fotonunun enerjisi arttıkça malzemelere ait YDK ve ODK değerlerinin artışı beklenen bir sonuçtur. Zira, gama foton enerjisinin artışı ile birlikte radyasyonun malzemeye nüfuz etme etkinliği de artmıştır. Aynı etkinlikte zırhlama yapabilmek için daha yüksek kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Her bir malzeme için elde edilen kütle zayıflatma katsayıları, teorik olarak XCOM programından elde edilen kütle zayıflatma katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Değerler arasında uyum olduğu ve yüzde farkın tüm malzemeler için %8' in altında çıktığı bulunmuştur.

Pu-Be nötron kaynağı ile yapılan deneysel çalışmalardan sonra kompozit malzeme içerisindeki bor karbür miktarının artışı nötron makroskopik tesir kesit değerlerini arttırdığı ve burdan hareketle hesaplanan YDK ve ODK değerlerini azalttığı saptanmıştır. Bunun en önemli nedeni kompozit malzeme içindeki bor miktarının artışıdır. Bölüm 3' te verildiği üzere bor elementinin ısı nötron tesir kesit değeri diğer malzemelere göre daha yüksektir. Bununla beraber kompozit malzeme içindeki bor karbür parçacık boyutunun artışı nötron makroskopik tesir kesit değerlerini arttırdığı, YDK ve ODK değerlerini azalttığı görülmüştür.

Sr-90 beta kaynağı ile yapılan deneylerde elektronlar içerisindeki malzeme ile etkileşerek Bremsstrahlung X-ışınlarının oluşmasına neden olmaktadır. Dolayısı ile dedektör ile yapılan sayım değerlerine malzeme ile etkileşmeden geçen elektronlarla birlikte malzeme ile etkileşimden kaynaklanan X-ışınları da eklenmektedir. Her bir malzeme için deneysel veriler alındıktan sonra yaklaşık olarak X-ışınlarından gelen katkı elde edilen lineer zayıflatma katsayısı – kalınlık grafiği üzerinde Bölüm 5' de verildiği üzere ekstrapolasyon yapılarak çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre malzeme içerisindeki bor karbür miktarının yüzdesel olarak artışı malzemenin beta radyasyonuna karşı lineer zayıflatma katsayısı, kütle zayıflatma katsayısı değerlerini arttırırken, YDK ve ODK değerlerini düşürmüştür. Bununla beraber bor karbür parçacıklarının tane boyutunun artması beta radyasyonuna karşı lineer zayıflatma

katsayısı, kütle zayıflatma katsayısı değerlerini düşürmekle beraber, YDK ve ODK değerlerini arttırmıştır. Bunun en önemli nedeni bor karbürün alüminyum malzemeye göre daha küçük yoğunluğa sahip olmasıdır. Dolayısı ile malzemenin beta radyasyonu ile etkileşiminden daha az X-ışını ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlar kapsamında bor karbür miktarının yüzde olarak artışı ve bor karbür parçacık boyutunun azalması kompozit malzemenin beta radyasyonu tutuculuğunu artırmaktadır.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan alüminyum, bor karbür içeren özel kompozit malzemeye tungsten karbür katkısıyla bu doktora tezinin özgünlüğü kapsamında yeni bir özel hibrit kompozit oluşturulması ve geliştirilmesi de mümkün olmuştur.

Deneyisel çalışmanın ikinci kısmında aynı deneyler alüminyum-bor karbür-tungsten karbür hibrit kompozit malzemeleri için tekrarlanmıştır. Bir başka deyişle, bu bölümde kullanılan malzemelerin seçimi doktora çalışmasının bir başka özgün kısmını oluşturmaktadır. İlk olarak hibrit kompozit malzemelere ait deneyisel yoğunluk değerleri bulunmuş ve teorik değerlerle karşılaştırılmıştır. İki değer arasındaki fark % 9' un altında çıkmıştır. Teorik değer ile deneyisel değerler arasındaki fark hibrit kompozit malzemelerin içindeki safsızlıklar ve boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çalışılan kompozit malzemelerin katkı oranlarının malzemenin sertlik değerlerine etkisini anlamak için Vicker sertliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerlerinde büyük değişmelerin olmadığı görülmektedir. Hibrit kompozit malzemelerin karakterizasyonu amacı ile çekilen SEM görüntülerinden, bor karbür ve tungsten karbürün malzeme içerisine homojene yakın bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bunun yanı sıra XRD çıktılarından hibrit kompozit malzeme içinde yeni bileşiklerin oluşmadığı, dolayısı ile başlangıçta malzemeye konulan bileşiklerin bozulmadığı anlaşılmaktadır.

Hibrit kompozit malzemeler ile Am-241, Cs-137 ve Co-60 radyoizotop kaynaklar kullanılarak yapılan gama radyasyonu deneylerinde tungsten karbürün kompozit malzemedeki oranı arttıkça, malzemenin lineer zayıflatma katsayısı ve kütle zayıflatma katsayısı artarken, YDK ve ODK değerleri azalmaktadır. Bu değerlerden hibrit kompozit malzeme içindeki tungsten karbür miktarının artması ile birlikte gama radyasyonu tutuculuğunun da arttığı görülmektedir. Gama radyasyonu ile

yapılan deneylerin sonuçları, teorik olarak XCOM programından elde edilen teorik kütle zayıflatma katsayı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda iki değer arasında uyumluluk olduğu ve değerler arasındaki farkın % 4'ün altında kaldığı bulunmuştur.

Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerinin Pu-Be nötron radyasyonu ile yapılan deneylerde, yüzde bor karbür miktarının en büyük olduğu Al-1000 ve Al-1005 kodlu hibrit kompozit malzemelerinin makroskopik tesir kesit değerleri en yüksek çıkmıştır. Hibrit kompozit malzemelerdeki tungsten karbür miktarının nötron tutuculuğu açısından etkisi küçüktür. Dolayısıyla hibrit kompozit malzeme içerisindeki bor karbür miktarının artışı makroskopik tesir kesiti değerini arttırırken, bunun sonucu olarak YDK ve ODK değerlerini düşürmektedir.

Al-B₄C-WC hibrit kompozit malzemelerinin Sr-90 beta kaynağı ile yapılan ölçümler sonucunda bor karbür ve tungsten karbür miktarlarının artması malzemenin lineer zayıflatma ve kütle zayıflatma katsayılarını arttırdığı, bunun sonucu olarak YDK ve ODK değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Karşılaştırma yapılabilmesi için beta radyasyonu zırhlamasında en sık kullanılan malzemelerden biri olan saf alüminyum için deney tekrarlanmış ve elde edilen değerler literatürde alüminyum için verilen değerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Çalışılan hibrit kompozit malzemelerin alüminyumdan elde edilen değerle karşılaştırılması yapıldığında, alüminyumdan daha etkin beta zırhlama malzemesi olarak kullanılabilecekleri bulunmuştur.

Deneyisel çalışmalar sonucunda çalışılan tüm malzemeler karşılaştırıldığında gama radyasyonuna karşı en etkin malzemelerin Şekil 7.9 – Şekil 7.11' de verildiği üzere Al-0010 ve Al-0510 kodlu hibrit kompozit malzemeler olduğu saptanmıştır. Hibrit kompozit malzemelerin yüzde tungsten karbür içeriği belirleyici olmuştur. Nötron deney sonuçları karşılaştırıldığında Şekil 7.13' te görüldüğü üzere Al-20-03, Al-20-53, Al-20-150 ve Al-20-500 kodlu kompozit malzemelerin en etkin zırhlama özelliği gösterdiği bulunulmuştur. Nötron zırhlamasında kompozit malzeme içerisindeki bor karbür miktarı etkin rol oynamıştır. Beta radyasyonu açısından bakıldığında Şekil 7.12' de görüldüğü üzere Al-0010 ve Al-0510 kodlu hibrit kompozit malzemelerin çalışılan malzemeler içerisinde beta radyasyonuna karşı en iyi zırhlama özelliği gösteren malzemeler olduğu bulunmuştur.

Özellikle uzay teknolojisinde radyasyon zırhlama amacı ile kullanılan malzemenin hafifliğinin önemli bir parametre olduğu giriş bölümünde ifade edilmişti. Bu nedenle teknolojik olarak kullanılabilmesi açısından malzemenin yoğunluğunu önemli miktarda arttırmadan farklı radyasyon tiplerine karşı zırhlama özelliğini geliştirmenin önemli olduğu görülmektedir.

Bu amaçla çalışılan tüm kompozit malzemeler en yüksek YDK değerlerine göre karşılaştırıldığında Al-0510 kodlu hibrit kompozit malzeme gama, beta ve nötron radyasyonunun beraber bulunduğu alanlarda radyasyon güvenliği açısından en etkin zırhlama malzemesi olduğu bu doktora tezinin özgünlüğü çerçevesinde belirlenmiş bulunmaktadır.

Al-0510 kodlu hibrit kompozit malzemenin mühendislik açısından önemli bir özelliği; farklı radyasyonlara karşı radyasyon zırh malzemesi olarak kullanılabilecek tek-hibrit kompozit malzeme olmasının yanısıra yoğunluğunun kurşunun yoğunluğunun yaklaşık 1/3'ü kadar olması, dolayısı ile (uzay teknolojisi gibi alanlarda) kullanımının daha tercih edilebilir olacağı anlaşılmaktadır.

Söz konusu hibrit kompozit malzemenin; nükleer teknolojide ileri termal reaktörler, hızlı üretken reaktörler ve füzyon reaktörlerinde kullanılabilir olabileceği ve bunların yanısıra uzay teknolojileri, savunma sanayi gibi alanlarda da kullanılabilirliğinin söz konusu olabileceği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Ağacan, B.** (2013). *Bor Karbür Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerde Atık Al Talaşlarının Değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Metalurji ve Malzeme Mühendiliği, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Akkas, A., Tugrul, A. B., Buyuk B., Addemir, A.O., Marsoglu, M. and Agacan B.** (2015a). Shielding Effect of Boron Carbide Aluminium Metal Matrix Composite against Gamma and Neutron Radiation, *Acta Physica Polonica A* (Vol.128).
- Akkas, A., Tugrul, A. B., Buyuk B., Addemir, A.O., Marsoglu, M. and Agacan B.** (2015b). Radiation Shielding Effect of Boron Carbide Aluminum Metal Matrix Composites, *Acta Physica Polonica A*, (Vol.127). doi: 10.12693/APhysPolA.127.947.
- Akkurt, I., El-Khayatt, A.M.** (2013). The Effect of Barite Proportion on Neutron and Gamma-Ray Shielding, *Annals of Nuclear Energy* 51, 5–9.
- Arya, A.P.** (1970). *Fundamentals of Nuclear Physics*, Allyn and Bacon Publications, Boston.
- Azman, N.Z., Siddiqui, S.A., Low, I.M.** (2013). Characterisation of Micro-Sized and Nano-Sized Tungsten Oxide-Epoxy Composites for Radiation Shielding of Diagnostic X-Rays, *Materials Science and Engineering C* 33, 4952–4957.
- Barghouty, A.F. and Thibeault, S.A.** (2006). *The Exploration Atmospheres Working Group's Report on Space Radiation Shielding Materials*, NASA/TM, Marshall Space Flight Center, Alabama, USA.
- Baştuğ, A., İçelli, O., Gürol, A., Şahin, Y.** (2011). Photon Energy Absorption Parameters for Composite Mixtures with Boron Compounds, *Annals of Nuclear Energy* 38, 2283-2290.
- Bilge, A.N.**, (1985). *Nükleer Tekniklerin Endüstriye Uygulanması*, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.
- Birgör, U.** (2009). *RoHS Nedir ? Yönetmeliği ve Uygulamaları-I*, Güncel, s. 31.
- Büyük, B.** (2013). *Tungsten, Titanyum, Bor İçeren Bazı Malzemelerin Gama ve Nötron Radyasyonu Karşısındaki Davranışının İncelenmesi, XCOM Bilgisayar Programı ile İrdelenmesi ve Yeni Bir Radyasyon Zırh Malzeme Önerisi*, (Doktora Tezi). Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Buyuk, B., Tuğrul, B.** (2014a). An Investigation on Gamma Attenuation Behaviour of Titanium Diboride Reinforced Boron Carbide – Silicon Carbide Composites, *Radiation Physics and Chemistry* 97, 354–359.

- Buyuk, B., Tuğrul, A. B.** (2014b). Gamma and Neutron Attenuation Behaviours of Boron Carbide–Silicon Carbide Composites, *Annals of Nuclear Energy* 71, 46–51.
- Chandra, R.,** (2004). *Nuclear Medicine Physics*, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia.
- Chang, L., Zhang, Y., Liu, Y., Fang, J., Luan, W., Yang, X. ve Zhang, W.** (2015). Preparation and Characterization of Tungsten/Epoxy Composites for γ -Rays Radiation Shielding, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 356–357, 88–93.
- Chen, S., Bourham, M., Rabiei, A.** (2014). Novel Light – Weight Materials for Shielding Gamma Ray, *Radiation Physics and Chemistry* 96, 27–37.
- Davis, J. R.** (1999). Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, *ASM International*, Materials Park, Ohio, USA.
- Delacroix, D., Guerre, J.P., Leblanc, P. ve Hickman, C.** (2002). *Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook*, Radiation protection Dosimetry (Vol 98).
- Delaney, C.F.G., Finch, E.C.** (1992). *Radiation Detectors Physical Principles and Applications*, Oxford University Press, Newyork, (pp:39).
- DOE Fundamentals Handbook** (1993). *Nuclear Physics and Reactor Theory (Volume 1 of 2)*, U.S. Department of Energy FSC-6910 Washington, D.C. 20585.
- Ediz, Ç.** (2011). *Alüminyumun Geri Dönüşüm Süreci ve Süreçte Kullanılan Malzemelerin Alüminyum Bileşenlerine Etkileri* (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine ve İmalat Mühendisliği.
- El-Hosiny, F. I., El- Faramawy, N. A.** (2000). Shielding of Gamma Radiation by Hydrated Portland Cement-Lead Pastes, *Radiation Measurements* 32, 93-99.
- Elmahroug, Y., Tellili, B. ve Souga, C.** (2014). Determination of Shielding Parameters for Different Types of Resins, *Annals of Nuclear Energy* 63, 619–623.
- Fan, G.H., Geng, L., Wang, G.S., Zheng, Z.Z.** (2009). A Novel Radiation Protection Material : BaPbO₃ /Al Composite, *Materials And Design* 30 862-868.
- Glasstone, S. ve Sesonske, A.** (1967). *Nuclear Reactor Engineering*, Princeton, New Jersey.
- Hallenbeck, W.H.** (1994). *Radiation Protection*, CRC press, Newyork (pp:58,60).
- Huang, Y., Zhang, W., Liang, L., Xu, J., Chen, Z.** (2013). A “Sandwich” Type of Neutron Shielding Composite Filled with Boron Carbide Reinforced by Carbon Fiber, *Chemical Engineering Journal* 220, 143–150.
- Hussain, R., Haq, Z. U., Mohammad, D.** (1997). A Study of The Shielding Properties of Poly Ethlene Glycol Lead Oxide Composite, *Journal of Islamic Academy of Sciences* 10:3, 81-84.

- İçelli, O., Mann, K.S., Yalçın, Z., Orak, S., Karakaya, V.** (2013). Investigation of Shielding Properties of Some Boron Compounds, *Annals of Nuclear Energy* 55, 341–350.
- Kaewjaenga, S., Kaewkhaob, J., Limsuwanc, P., Maghanemi, U.** (2012). Effect of BaO on Optical, Physical and Radiation Shielding Properties of SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-CaO-Na₂O Glasses System, *Procedia Engineering* 32, 1080 – 1086.
- Kaloshkin, S. D., Tcherdyntsev, V. V., Gorshenkov, M. V., Gulbin, V. N., Kuznetsov S. A.** (2012). Radiation-protective polymer-matrix nanostructured composites, *Journal of Alloys and Compounds*.
- Kaur, S. ve Singh, K.J.** (2014). Investigation of Lead Borate Glasses Doped with Aluminium Oxide as Gamma Ray Shielding Materials, *Annals of Nuclear Energy* 63, 350–354.
- Knoll, G. F.** (2002). *Radiation Detection and Measurement*, University of Michigan, John Wiley&Sons, Inc.
- Kobayashi, S., Hosoda, N., Takashima, R.** (1997). Tungsten alloys as radiation protection materials, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 390, 426-430.
- Korkut, T., Korkut, H., Karabulut, A., Budak, G.** (2011). A New Radiation Shielding Material: Amethyst ore, *Annals of Nuclear Energy* 38, 56-59.
- L'Annunziata, M. F.** (2012). *Handbook of Radioactivity Analysis*, Academic press, London, (pp: 33-35).
- Lee, M.K., Lee, J.L., Kim, J.W., Lee, G.J.** (2014). Properties of B₄C–PbO–Al(OH)₃-Epoxy Nanocomposite Prepared by Ultrasonic Dispersion Approach for High Temperature Neutron Shields, *Journal of Nuclear Materials* 445, 63–71.
- Limkitjaroenporn, P., Kaewkhao, J., Limsuwan, P., Chewpraditkul, W.** (2011). Physical, Optical, Structural and Gamma-ray Shielding Properties of Lead Sodium Borate Glasses, *Journal of Physics and Chemistry Solids* 72, 245-251.
- Martin, J.E.** (2006). *Physics for Radiation Protection*, Wiley-WHC, Weinheim.
- Nolan, P.** (2014). *Fundamentals of Modern Physics*, State University of New York.
- Park, S. J., Jang, J. G. ve Lee, H. K.** (2014). Computational Investigation of The Neutron Shielding and Activation Characteristics of Borated Concrete with Polyethylene Aggregate, *Journal of Nuclear Materials* 452, 205–211.
- Pierson, H.O.** (1996). *Handbook of Refractory Carbides and Nitrides Properties, Characteristics, Processing and Applications*, Noyes Publications (pp.113-114).
- Poskus, A.** (2012). *Absorption of Alpha Particles and Electrons*, Vilnius University Faculty of Physics Department of Solid State Electronics, Laboratory of Atomic and Nuclear Physics.
- Profio, A.** (1979). *Radiation Shielding and Dosimetry*, John Wiley & SONS, New York.

- Prokhorenko, E.M., Klepikov, V.F., Lvytvenko, V.V., Zaharchenko, A.A., Hazhmuradov, H.A.** (2015). Modification of Composite Materials Used for Radiation Protection, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* (Vol. 4) Issue 9 (pp.62).
- Rahimi, A. R., Raisali, G., Sadrnezhaad, S. K., Alipour, A.** (2009). Chemical Corrosion and Gamma-Ray Attenuation Properties of Zr And Ti Containing Lead Silicate Glasses, *Journal of Nuclear Materials* 385, 527-532.
- Ram, N., Rao, S. ve Mehta, M. K.** (1982). Mass Absorbtion Coefficients and Range of Beta Particles in Be, Al, Cu, Ag ve Pb, *Pramana* (Vol. 18), 121-126, India.
- Rockwell, T.** (1956). *Reactor Shielding Design Manual*, McGraw - Hill book company, Inc.
- Saudi, H. A., Mostafa, A. G., Sheta, N., El Kameesy, S. U., Sallam, H. A.** (2011). The Structural Properties of Cdo-Bi₂O₃ Borophosphate Glass System Containing Fe₂O₃ and Its Role in Attenuating Neutrons and Gamma Rays, *Physica B* 406, 4001-400.
- Shin, J. W., Lee, J.W., Yu, S., , Baek, B. K., Hong, J.P., Seo,Y., Kim, W. N., Hong, S. M. ve Koo, C. M.** (2014). Polyethylene/Boron-Containing Composites for Radiation Shielding, *Thermochimica Acta* 585, 5–9.
- Shultis, J.K. and Faw, R.E.** (2005). *Radiation Shielding Technology*, Health Physics, 88(4):297–322.
- Shultis, J.K. and Faw, R.E.** (1996). *Radiation Shielding*, American Nuclear Society, Illinois. P:515.
- Singh, H., Singh, K., Gerward, L., Singh, K., Sahota, H. S., Nathuram, R.** (2003). ZnO-PbO-B₂O₃ Glasses as Gamma Ray Shielding Materials, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 207, 257-262 .
- Singh, K., Singh,S., Dhaliwal, A.S. ve Singh, G.** (2015). Gamma Radiation Shielding Analysis of Lead-Flyash Concretes, *Applied Radiation and Isotopes* 95, 174–179.
- Singh, K. J., Singh, N., Kaundal, R. S., Singh, K.** (2008). Gamma-Ray Shielding and Structural Properties of PbO-SiO₂ Glasses, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 266, 944-948.
- Singh, V. P., Badiger, N. M., Chanthima, N. ve Kaewkhao, J.** (2014). Evaluation of Gamma-ray Exposure Buildup Factors and Neutron Shielding for Bismuth Borosilicate Glasses, *Radiation Physics and Chemistry* 98, 14–21.
- Singh, V.P., Badiger, N.M.** (2014). Gamma Ray and Neutron Shielding Properties of Some Alloy Materials, *Annals of Nuclear Energy* 64, 301–310.
- Standford University** (2015). *Radiation Safety Manual, Environmental Health and Safety*, Standford University, Standford California.
- Taylor, L.S.** (1981). *X-Ray Measurement and Protection 1913-1964*, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington.

- Tripathi, R.K., Nealy, J.E.** (2007). *Mars Radiation Risk Assessment and Shielding Design for Long-Term Exposure to Ionizing Space Radiation*, NASA Langley Research Center .
- Tsoufanidis, N. and Landsberger, S.** (2011). *Measurement and Detection of Radiation*, CRC press, Newyork (pp:132-133).
- Turner, J.E.** (1995). *Atoms, Radiation and Radiation Protection*, John Wiley & Interscience Publications, Newyork, P: 210.
- Url-1** <<http://www.deqtech.com/Shieldwerx/Products/swx201hd.htm> >, erişim tarihi 16.03.2015.
- Url-2** <<http://www.deqtech.com/Shieldwerx/Products/swx262hd.htm>>, erişim tarihi 16.03.2015.
- Url-3** <<http://www.johncaunt.com/shielding/neutron-shielding/jc215-lithium-poly/>>, erişim tarihi, 16.03.2015.
- Url-4** <<http://www.deqtech.com/Shieldwerx/Products/swx217.htm>>, erişim tarihi 16.03.2015.
- Url-5** <<http://www.johncaunt.com/shielding/neutron-shielding/jc237/>>, erişim tarihi 16.03.2015.
- Url-6** <http://www.whs-sondermetalle.de/english/pdf/Tungsten_WSM.pdf >, erişim tarihi 17.03.2015.
- Url-7** <http://www.polimaster.com/products/hand-held_search_instruments/pm1401_k_km/>, erişim tarihi, 24.07.2015.
- Url-8** <<http://www.thermoscientific.com/content/tfs/en/product/radeye-ab100-alpha-beta-contamination-monitor.html>>, erişim tarihi, 24.07.2015.
- Url-9** <<http://www.originlab.com>>, erişim tarihi, 12.06.2014.
- Url-10** <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/intro.html>>, erişim tarihi, 04.09.2015.
- Yasaka, P., Pattanaboonmee, N., Kim, H. J., Limkitjaroenporn, P. ve Kaewkhao, J.** (2014). Gamma Radiation Shielding and Optical Properties Measurements of Zinc Bismuth Borate Glasses, *Annals of Nuclear Energy* 68, 4–9.
- Yener, G.** (2006). *Radyasyon Ders Notları*, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Nükleer Bilimler Anabilim Dalı.
- Yue, K., Luo, W., Dong, X., Wang, C., Wu, G., Jiang, M., Zha, Y.** (2009). A New Lead-Free Radiaiton Shielding Material for Radiotherapy, *Radiation Protection Dosimetry*, (Vol.133), 256 – 260.
- Waly, E.A. ve Bourham M.A.** (2015). Comparative Study of Different Concrete Composition as Gamma-ray Shielding Materials, *Annals of Nuclear Energy* 85, 306-310.
- Wang, J., Li,G. ve Meng, D.** (2014). Evaluation of The Performance of Peridotite Aggregates for Radiation Shielding Concrete, *Annals of Nuclear Energy* 71, 436–439.

Weimer, A. W. (1997). *Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing*, Chapman & Hill, p 12-13.

EKLER

Çizelge A.1 : Al-B₄C kompozitlerin Am-241 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-05-03	0,000	25533	25849	25750	25824	25739	1,000	124	0,010
	0,495	17696	17677	17575	17822	17693	0,687	88	0,005
	0,989	12682	12667	12875	12577	12700	0,493	109	0,005
	1,600	8045	8120	8085	7889	8035	0,312	88	0,004
	2,298	5147	5191	5018	5159	5129	0,199	66	0,003
Al-10-03	0,000	25038	24924	24914	24612	24872	1,000	158	0,013
	0,493	17428	17479	17374	17512	17448	0,702	52	0,005
	0,990	12854	12840	12726	12688	12777	0,514	71	0,004
	1,672	7982	7772	7743	7683	7795	0,313	112	0,005
	2,299	5174	5248	5350	5410	5296	0,213	91	0,004
Al-15-03	0,000	25121	25068	25062	25172	25106	1,000	45	0,004
	0,517	18269	18293	17993	18215	18193	0,725	119	0,005
	1,032	12941	12839	13223	12931	12984	0,517	144	0,006
	1,530	9268	9223	9215	9168	9219	0,367	35	0,002
	2,031	6544	6539	6611	6361	6514	0,259	93	0,004
Al-20-03	0,000	24924	25019	24916	25111	24993	1,000	79	0,006
	0,540	17706	17904	17787	17858	17814	0,713	75	0,004
	1,082	12664	13053	12592	12753	12766	0,511	176	0,007
	1,556	9280	8976	9500	9152	9227	0,369	191	0,008
	2,020	7013	6904	6958	6979	6964	0,279	40	0,002
Al-05-53	0,000	25020	25287	25033	25110	25020	1,000	107	0,008
	0,489	16979	16980	17083	16973	16979	0,677	46	0,003
	0,975	11915	11897	11831	11854	11915	0,473	33	0,002
	1,489	8532	8573	8677	8603	8532	0,342	53	0,003
	2,013	6492	6456	6472	6349	6492	0,257	55	0,002
Al-10-53	0,000	25022	25335	24669	25047	25022	1,000	236	0,019
	0,495	17376	17403	17820	17629	17376	0,702	181	0,010
	0,986	12415	12271	12481	12317	12415	0,494	82	0,006
	1,699	8156	7828	8093	7949	8156	0,320	127	0,006
	2,204	5249	5964	5680	5523	5249	0,224	259	0,011
Al-15-53	0,000	25151	25360	25531	25323	25151	1,000	135	0,011
	0,490	18100	18143	18205	17881	18100	0,714	122	0,006
	0,985	12664	12765	12766	12710	12664	0,502	42	0,003
	1,630	8280	8682	8501	8242	8280	0,333	178	0,007
	2,140	5946	6128	6189	6276	5946	0,242	121	0,005
Al-20-53	0,000	25066	24862	24942	24949	25066	1,000	73	0,006
	0,504	17618	17870	17714	18030	17618	0,714	157	0,007
	1,011	12584	12823	12687	12879	12584	0,511	116	0,005
	1,515	9053	9419	9046	9323	9053	0,369	164	0,007
	2,015	6949	6913	6872	6676	6949	0,275	105	0,004
Al-05-75	0,000	25157	25311	25272	25107	25212	1,000	83	0,007
	0,488	17748	17753	17296	17310	17527	0,695	224	0,009
	0,976	12611	12413	12514	12573	12528	0,497	75	0,003
	1,496	8932	8626	8860	9038	8864	0,352	151	0,006
	2,015	6371	6347	6126	5985	6207	0,246	160	0,006
Al-10-75	0,000	25167	25322	25283	25117	25222	1,000	83	0,007
	0,497	17957	17224	17518	17359	17515	0,694	276	0,011
	0,987	12258	12205	12232	12283	12244	0,485	29	0,006
	1,507	9033	8819	9084	8842	8945	0,355	116	0,005
	2,026	6404	6735	6710	6447	6574	0,261	149	0,006
Al-15-75	0,000	25140	25086	25200	25136	25140	1,000	40	0,003
	0,505	17750	17608	17198	18002	17639	0,702	291	0,012
	1,013	12693	12357	13042	12705	12699	0,505	242	0,010
	1,513	9324	9341	9458	9268	9348	0,372	69	0,003
	2,016	7004	6627	6914	6981	6882	0,274	151	0,006

Çizelge A.1 (devam) : Al-B₄C kompozitlerin Am-241 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-20-75	0,000	25062	24857	25398	25062	25095	1,000	194	0,015
	0,511	17779	17878	17544	17506	17677	0,704	157	0,008
	1,029	12512	12951	12821	12551	12709	0,506	184	0,008
	1,527	9289	9237	9059	9108	9173	0,366	93	0,005
	2,011	7215	7188	7495	7231	7282	0,290	124	0,005
Al-05-150	0,000	25126	25307	25274	25407	25279	1,000	101	0,008
	0,483	17796	17875	17650	17727	17762	0,703	83	0,004
	0,967	12686	12618	12458	12452	12554	0,497	101	0,004
	1,634	8212	8249	8147	8283	8223	0,325	50	0,002
	2,306	5009	5176	5145	5252	5145	0,204	88	0,004
Al-10-150	0,000	25005	25151	25304	25193	25163	1,000	107	0,009
	0,488	17959	18012	17712	17996	17920	0,712	121	0,006
	0,975	12845	12770	12854	12789	12814	0,509	36	0,003
	1,603	8410	8239	8202	8420	8318	0,331	98	0,004
	2,146	6113	5996	6028	6105	6060	0,241	50	0,002
Al-15-150	0,000	24718	25450	25374	25179	25180	1,000	285	0,023
	0,505	17665	17523	17985	17804	17744	0,705	171	0,010
	1,005	12791	12732	12765	12648	12734	0,506	54	0,006
	1,665	8285	8062	8313	8098	8189	0,325	111	0,002
	2,317	5556	5510	5638	5495	5550	0,220	56	0,003
Al-20-150	0,000	24924	25070	25224	25113	25083	1,000	108	0,009
	0,512	17950	17771	17836	18012	17892	0,713	94	0,005
	1,023	12794	12957	12812	12852	12854	0,512	63	0,003
	1,527	9087	9135	9300	9203	9181	0,366	80	0,004
	2,031	6956	7068	6873	6953	6963	0,278	69	0,003
Al-05-500	0,000	24930	24868	24930	24700	24857	1,000	94	0,008
	0,488	17878	17825	17288	17406	17599	0,708	256	0,011
	0,979	12593	12667	12576	12441	12569	0,506	82	0,004
	1,636	7660	7851	7878	7874	7816	0,314	90	0,004
	2,310	5084	5102	5526	5175	5222	0,210	179	0,007
Al-10-500	0,000	25109	25051	25010	25128	25075	1,000	47	0,004
	0,505	18080	17326	18034	17693	17783	0,709	303	0,012
	1,001	13130	12778	13215	12548	12918	0,515	269	0,011
	1,516	8792	8864	9121	8892	8917	0,356	123	0,005
	2,028	6235	6528	6735	6742	6560	0,262	207	0,008
Al-15-500	0,000	25046	24983	25046	24811	24972	1,000	96	0,008
	0,511	17618	17833	17859	18052	17840	0,714	154	0,007
	1,017	12674	12822	12363	12339	12550	0,503	205	0,008
	1,646	8466	8533	8571	8758	8582	0,344	108	0,005
	2,146	6335	6297	6376	6410	6354	0,254	42	0,002
Al-20-500	0,000	25022	24962	24920	25042	24986	1,000	48	0,004
	0,504	18032	17468	18390	18204	18023	0,721	345	0,014
	1,010	12913	13305	12895	12570	12921	0,517	261	0,010
	1,645	8643	8836	8590	8373	8611	0,345	165	0,007
	2,320	5922	5686	6062	5679	5837	0,234	163	0,007

Çizelge A.2 : Al-B₄C kompozitlerin Cs-137 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-05-03	0,000	179013	176709	178290	178413	178106	1,000	852	0,007
	0,495	160398	161556	160585	161574	161028	0,904	541	0,005
	0,989	144760	144815	147009	145634	145555	0,817	908	0,006
	1,600	128158	128243	130971	129530	129226	0,726	1145	0,007
	2,298	113357	113430	115255	112408	113613	0,638	1030	0,007
Al-10-03	0,000	179013	176709	178290	178413	178106	1,000	852	0,007
	0,493	161791	161429	161471	163396	162022	0,910	806	0,006
	0,990	146832	145870	149233	147849	147446	0,828	1247	0,008
	1,672	128389	130446	130801	129279	129729	0,728	957	0,006
	2,299	115605	115974	113526	114189	114824	0,645	1003	0,006
Al-15-03	0,000	186013	183709	185290	185413	185106	1,000	852	0,007
	0,517	169163	168399	168333	166674	168142	0,908	908	0,006
	1,032	152094	151585	152646	153569	152474	0,824	735	0,005
	1,530	139176	138282	139104	139192	138939	0,751	380	0,004
	2,031	127736	128443	126941	128050	127793	0,690	552	0,004

Çizelge A.2 (devam) : Al-B₄C kompozitlerin Cs-137 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
A-20-03	0,000	180984	180434	179987	181515	180730	1,000	575	0,004
	0,540	163044	163865	165574	164365	164212	0,909	917	0,006
	1,082	147374	147744	148940	148649	148177	0,820	640	0,004
	1,556	137159	136336	137302	137868	137166	0,759	548	0,004
	2,020	125165	125690	125493	125549	125474	0,694	192	0,002
Al-05-53	0,000	178114	177520	179867	179476	178744	1,000	961	0,008
	0,489	161178	162737	161892	162751	162140	0,907	655	0,006
	0,975	145572	149381	147482	145692	147032	0,823	1553	0,010
	1,489	135899	133746	135575	135011	135058	0,756	821	0,006
	2,013	121147	120856	118946	118780	119932	0,671	1076	0,007
Al-10-53	0,000	183565	185479	183416	185998	184615	1,000	1140	0,009
	0,495	168563	166845	167048	166226	167171	0,906	859	0,007
	0,986	153721	154627	152787	156221	154339	0,836	1266	0,009
	1,699	134580	131995	133605	133756	133484	0,723	936	0,007
	2,204	120981	120344	120960	121715	121000	0,655	486	0,005
Al-15-53	0,000	180367	179792	181461	181426	180762	1,000	712	0,006
	0,490	165170	165164	165343	163890	164892	0,912	583	0,005
	0,985	149009	150621	150288	148783	149675	0,828	792	0,005
	1,630	132405	133107	130984	133673	132542	0,733	1006	0,006
	2,140	121332	122686	119132	121385	121134	0,670	1277	0,008
Al-20-53	0,000	177414	176820	179167	178776	178044	1,000	961	0,008
	0,504	162528	163329	161319	162248	162356	0,912	718	0,006
	1,011	149168	148051	149368	149576	149041	0,837	589	0,006
	1,515	135405	133647	132586	132495	133533	0,750	1172	0,008
	2,015	124727	125692	123820	122436	124169	0,697	1200	0,008
Al-05-75	0,000	168569	168979	167019	167826	168098	1,000	748	0,007
	0,488	153645	153452	152689	154369	153539	0,913	598	0,005
	0,976	138703	140318	137941	136940	138476	0,824	1234	0,006
	1,496	126507	126325	125728	126819	126345	0,752	397	0,007
	2,015	113908	114690	114986	114742	114582	0,682	405	0,007
Al-10-75	0,000	173505	173269	173413	173423	173403	1,000	85	0,007
	0,497	159061	160487	160503	159167	159805	0,922	692	0,006
	0,987	145806	144888	145428	146105	145557	0,839	455	0,008
	1,507	130885	130354	130139	130473	130463	0,752	272	0,006
	2,026	118254	118040	118259	119390	118486	0,683	530	0,006
Al-15-75	0,000	161868	160843	161104	160416	161058	1,000	528	0,007
	0,505	146317	147306	145978	148626	147057	0,913	1029	0,006
	1,013	131864	132509	132380	134376	132782	0,824	951	0,005
	1,513	124005	123604	122019	123942	123393	0,766	808	0,004
	2,016	112631	113043	110802	112434	112228	0,697	852	0,004
Al-20-75	0,000	173676	174266	174070	173677	173922	1,000	255	0,004
	0,511	157534	156099	157449	157172	157064	0,903	573	0,006
	1,029	142954	145751	143070	144015	143948	0,828	1120	0,004
	1,527	131620	131911	132189	131259	131745	0,757	345	0,004
	2,011	122919	121943	123646	122460	122742	0,706	626	0,002
Al-05-150	0,000	185335	185280	184913	185411	185235	1,000	191	0,001
	0,483	166369	168659	167316	168092	167609	0,905	860	0,005
	0,967	151407	153942	153564	153738	153163	0,827	1022	0,006
	1,634	135148	134331	134702	137127	135327	0,731	1079	0,006
	2,306	119919	121135	120516	119734	120326	0,650	549	0,003
Al-10-150	0,000	182103	181425	181027	182196	181688	1,000	484	0,004
	0,488	165193	164224	165654	164951	165006	0,908	517	0,004
	0,975	153483	151961	152731	153130	152826	0,841	566	0,004
	1,603	134042	133860	135378	134891	134543	0,741	620	0,004
	2,146	122115	122229	121549	122044	121984	0,671	260	0,002
Al-15-150	0,000	165400	164114	164001	164283	164450	1,000	558	0,005
	0,505	150813	149952	149735	150224	150181	0,913	404	0,004
	1,005	137826	137737	136703	136099	137091	0,834	723	0,005
	1,665	121377	121565	121863	119268	121018	0,736	1025	0,007
	2,317	107087	108087	107944	107261	107595	0,654	428	0,003
Al-20-150	0,000	173285	171677	173112	174595	173167	1,000	1034	0,008
	0,512	157791	157779	158207	159383	158290	0,914	654	0,007
	1,023	143601	143974	145569	145020	144541	0,835	789	0,007
	1,527	131513	130290	130828	130284	130729	0,755	504	0,005
	2,031	120951	119867	119358	120984	120290	0,695	701	0,006
Al-05-500	0,000	188735	188632	188802	190808	189244	1,000	905	0,007
	0,488	173847	171836	171057	173629	172592	0,912	1181	0,008
	0,979	157577	156608	158914	158841	157985	0,835	956	0,006
	1,636	139177	139453	139469	139749	139462	0,737	202	0,004
	2,310	122213	122935	121514	122945	122402	0,647	592	0,004

Çizelge A.2 (devam) : Al-B₄C kompozitlerin Cs-137 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-10-500	0,000	184270	182086	184224	185601	184045	1,000	1259	0,010
	0,505	170210	168573	166416	168341	168385	0,915	1346	0,010
	1,001	153780	152622	152915	154657	153494	0,834	795	0,007
	1,516	139590	138850	140105	139769	139579	0,758	459	0,006
	2,028	128557	127488	127164	126888	127524	0,693	633	0,006
Al-15-500	0,000	185735	185632	185802	187808	186244	1,000	905	0,007
	0,511	168500	167062	172457	169548	169392	0,910	1978	0,011
	1,017	157705	155050	157056	153972	155946	0,837	1502	0,009
	1,646	138461	137024	137703	140479	138417	0,743	1295	0,008
	2,146	124128	124226	128130	126168	125663	0,675	1640	0,009
Al-20-500	0,000	167907	167880	167261	167438	167622	1,000	279	0,002
	0,504	151475	151435	151455	151619	151496	0,904	72	0,002
	1,010	136742	138257	136802	137474	137319	0,819	613	0,004
	1,645	122450	124301	123075	124330	123539	0,737	807	0,005
	2,320	112531	112887	113217	113703	113085	0,675	432	0,003

Çizelge A.3 : Al-B₄C kompozitlerin Co-60 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-05-03	0,000	12696	12635	12702	12630	12666	1,000	39	0,004
	0,495	11777	11795	11774	11758	11776	0,930	15	0,003
	0,989	10899	10968	10846	10882	10899	0,860	51	0,005
	1,600	9936	9862	9983	9973	9939	0,785	55	0,005
	2,298	9058	8985	9018	8943	9001	0,711	49	0,004
Al-10-03	0,000	12499	12641	12577	12627	12586	1,000	56	0,006
	0,493	11636	11770	11758	11669	11708	0,930	57	0,006
	0,990	10987	10921	11030	11013	10988	0,873	41	0,005
	1,672	9873	9815	9939	9854	9870	0,784	45	0,005
	2,299	9115	9060	9122	8932	9057	0,720	76	0,007
Al-15-03	0,000	12619	12761	12697	12747	12706	1,000	56	0,006
	0,517	11800	11839	11927	11999	11891	0,936	77	0,007
	1,032	11053	11031	11092	10986	11041	0,869	38	0,005
	1,530	10334	10221	10344	10321	10305	0,811	49	0,005
	2,031	9556	9460	9562	9595	9543	0,751	50	0,004
Al-20-03	0,000	12569	12561	12487	12607	12556	1,000	43	0,005
	0,540	11687	11525	11664	11562	11610	0,925	68	0,006
	1,082	10898	10952	10825	10841	10879	0,866	50	0,005
	1,556	10215	10296	10193	10295	10250	0,816	46	0,005
	2,020	9505	9526	9585	9505	9530	0,759	33	0,004
Al-05-53	0,000	11907	11997	12083	12049	12164	1,000	66	0,009
	0,489	11211	11095	11182	11278	11413	0,932	56	0,009
	0,975	10254	10313	10336	10413	10597	0,860	31	0,008
	1,489	9746	9700	9706	9740	9925	0,810	23	0,006
	2,013	8891	8849	8875	8858	9144	0,738	26	0,005
Al-10-53	0,000	12217	12307	12393	12359	13119	1,000	25	0,008
	0,495	11457	11472	11511	11520	12306	0,933	29	0,005
	0,986	10712	10640	10726	10639	11411	0,867	55	0,006
	1,699	9625	9668	9525	9626	10703	0,780	60	0,006
	2,204	9071	8995	8992	9117	9918	0,734	45	0,006
Al-15-53	0,000	12620	12530	12560	12500	11904	1,000	57	0,005
	0,490	11747	11628	11733	11666	11194	0,932	46	0,005
	0,985	10872	10841	10926	10821	10335	0,866	14	0,004
	1,630	9954	9968	10121	9952	9591	0,797	41	0,006
	2,140	9328	9213	9296	9207	9017	0,738	28	0,004
Al-20-53	0,000	12239	12221	12097	12100	12556	1,000	43	0,008
	0,504	11329	11414	11421	11488	11610	0,938	68	0,007
	1,011	10522	10543	10708	10613	10879	0,871	50	0,005
	1,515	9936	9930	9887	9947	10250	0,816	46	0,005
	2,015	9132	9156	9109	9180	9530	0,752	33	0,005
Al-05-75	0,000	13522	13512	13498	13564	12164	1,000	66	0,003
	0,488	12510	12538	12497	12567	11413	0,926	56	0,003
	0,976	11841	11731	11739	11738	10597	0,870	31	0,004
	1,496	10986	10949	10997	10915	9925	0,811	23	0,003
	2,015	9898	9959	9911	9922	9144	0,734	26	0,002
Al-10-75	0,000	13287	13277	13263	13329	13119	1,000	25	0,003
	0,497	12352	12359	12330	12382	12306	0,930	29	0,002
	0,987	11557	11551	11535	11541	11411	0,869	55	0,002
	1,507	10705	10686	10666	10702	10703	0,804	60	0,002

Çizelge A.3 (devam) : Al-B₄C kompozitlerin Co-60 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-15-75	0,000	13347	13337	13323	13389	11904	1,000	57	0,003
	0,505	12503	12417	12487	12414	11194	0,933	46	0,003
	1,013	11672	11616	11586	11631	10335	0,871	14	0,003
	1,513	10794	10870	10826	10826	9591	0,811	41	0,003
	2,016	10175	10039	10034	10105	9017	0,756	28	0,004
Al-20-75	0,000	13117	13107	13093	13159	12556	1,000	43	0,003
	0,511	12319	12269	12290	12345	11610	0,938	68	0,003
	1,029	11419	11488	11333	11404	10879	0,870	50	0,005
	1,527	10756	10769	10647	10640	10250	0,816	46	0,005
	2,011	9935	9921	9847	9970	9530	0,756	33	0,004
Al-05-150	0,000	12383	12320	12245	12363	12164	1,000	66	0,007
	0,483	11421	11473	11421	11481	11413	0,929	56	0,005
	0,967	10660	10645	10615	10695	10597	0,864	31	0,005
	1,634	9744	9642	9728	9638	9925	0,786	23	0,006
	2,306	8777	8745	8841	8784	9144	0,713	26	0,005
Al-10-150	0,000	12443	12380	12305	12423	13119	1,000	25	0,007
	0,488	11555	11561	11555	11511	12306	0,932	29	0,005
	0,975	10829	10770	10780	10745	11411	0,870	55	0,005
	1,603	9849	9912	9936	9967	10703	0,800	60	0,006
	2,146	9124	9086	9117	9068	9918	0,734	45	0,004
Al-15-150	0,000	12193	12130	12055	12173	11904	1,000	57	0,007
	0,505	11373	11376	11388	11329	11194	0,936	46	0,005
	1,005	10574	10669	10603	10561	10335	0,873	14	0,006
	1,665	9532	9576	9619	9574	9591	0,789	41	0,005
	2,317	8726	8780	8698	8670	9017	0,718	28	0,004
Al-20-150	0,000	11879	11961	11837	11940	12556	1,000	43	0,007
	0,512	11148	11233	11234	11159	11610	0,940	68	0,006
	1,023	10314	10340	10343	10341	10879	0,868	50	0,004
	1,527	9554	9574	9586	9649	10250	0,806	46	0,005
	2,031	9044	8986	9038	9001	9530	0,757	33	0,004
Al-05-500	0,000	11537	11527	11513	11579	11539	1,000	28	0,003
	0,488	10734	10734	10747	10782	10749	0,932	23	0,003
	0,979	10045	10104	10103	10109	10090	0,874	30	0,003
	1,636	9040	9096	8969	9074	9045	0,784	56	0,005
	2,310	8217	8245	8135	8185	8196	0,710	47	0,004
Al-10-500	0,000	11239	11288	11322	11248	11274	1,000	33	0,004
	0,505	10460	10506	10407	10492	10466	0,928	38	0,004
	1,001	9745	9786	9763	9713	9752	0,865	27	0,003
	1,516	9105	9129	9025	9156	9104	0,807	49	0,005
	2,028	8467	8498	8457	8457	8470	0,751	17	0,003
Al-15-500	0,000	11329	11378	11412	11338	11364	1,000	33	0,004
	0,511	10594	10659	10612	10664	10632	0,936	30	0,004
	1,017	9944	9984	9899	9858	9921	0,873	47	0,005
	1,646	9006	9021	9016	8979	9006	0,792	16	0,003
	2,146	8468	8386	8359	8491	8426	0,741	55	0,005
Al-20-500	0,000	11219	11268	11302	11228	11254	1,000	33	0,004
	0,504	10662	10561	10618	10542	10596	0,941	47	0,005
	1,010	9846	9859	9748	9805	9815	0,872	43	0,005
	1,645	9021	9055	9092	8957	9031	0,802	50	0,005
	2,320	8201	8171	8178	8152	8176	0,726	18	0,003

Çizelge A.4 : Al-B₄C kompozitlerin Pu-Be nötron kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-05-03	0,000	2693	2698	2678	2675	2686	1,000	7	0,006
	0,495	2328	2335	2307	2302	2318	0,863	10	0,007
	0,989	2031	1997	2005	2026	2015	0,750	10	0,007
Al-10-03	0,000	2693	2698	2678	2675	2686	1,000	7	0,006
	0,493	2257	2280	2262	2252	2263	0,843	7	0,006
	0,990	1914	1917	1932	1907	1918	0,714	6	0,005
Al-15-03	0,000	2693	2698	2678	2675	2686	1,000	7	0,006
	0,517	2254	2264	2239	2246	2251	0,838	6	0,005
	1,032	1782	1762	1780	1792	1779	0,662	8	0,005
Al-20-03	0,000	2693	2698	2678	2675	2686	1,000	7	0,006
	0,540	2112	2104	2107	2119	2111	0,786	4	0,004
	1,082	1655	1670	1670	1703	1675	0,623	12	0,008
Al-05-53	0,000	2674	2670	2676	2703	2681	1,000	7	0,008
	0,489	2252	2245	2212	2228	2234	0,833	8	0,008
	0,975	1949	2016	1982	1969	1979	0,738	13	0,011

Çizelge A.4 (devam) : Al-B₄C kompozitlerin Pu-Be nötron kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-10-53	0,000	2674	2670	2676	2703	2681	1,000	7	0,008
	0,495	2179	2168	2181	2148	2169	0,809	7	0,011
	0,986	1837	1825	1848	1797	1827	0,681	10	0,005
Al-15-53	0,000	2674	2670	2676	2703	2681	1,000	7	0,008
	0,490	2195	2186	2155	2217	2188	0,816	12	0,011
	0,985	1677	1697	1702	1686	1691	0,631	5	0,005
Al-20-53	0,000	2674	2670	2676	2703	2681	1,000	7	0,008
	0,504	1958	1976	1985	1956	1969	0,734	6	0,007
	1,011	1565	1596	1611	1620	1598	0,596	11	0,010
Al-05-75	0,000	2628	2632	2613	2610	2621	1,000	7	0,006
	0,488	2275	2230	2241	2230	2244	0,856	13	0,012
	0,976	1950	1966	1943	1963	1956	0,746	7	0,008
Al-10-75	0,000	2628	2632	2613	2610	2621	1,000	7	0,006
	0,497	2143	2151	2140	2159	2148	0,820	5	0,008
	0,987	1821	1789	1803	1823	1809	0,690	10	0,009
Al-15-75	0,000	2628	2632	2613	2610	2621	1,000	7	0,006
	0,505	2082	2072	2058	2077	2072	0,791	6	0,009
	1,013	1757	1787	1776	1763	1771	0,676	8	0,008
Al-20-75	0,000	2628	2632	2613	2610	2621	1,000	7	0,006
	0,511	1951	1945	1964	1985	1961	0,748	11	0,010
	1,029	1665	1673	1692	1682	1678	0,640	7	0,008
Al-05-150	0,000	2644	2628	2634	2640	2637	1,000	8	0,004
	0,483	2179	2183	2168	2173	2176	0,825	7	0,003
	0,967	1885	1895	1907	1914	1900	0,721	15	0,005
Al-10-150	0,000	2644	2628	2634	2640	2637	1,000	8	0,004
	0,488	2073	2066	2066	2088	2073	0,786	13	0,005
	0,975	1812	1794	1802	1810	1805	0,684	9	0,004
Al-15-150	0,000	2644	2628	2634	2640	2637	1,000	8	0,004
	0,505	1985	1963	1980	1964	1973	0,748	13	0,005
	1,005	1729	1733	1718	1721	1725	0,654	8	0,003
Al-20-150	0,000	2644	2628	2634	2640	2637	1,000	8	0,004
	0,512	1946	1950	1929	1937	1941	0,736	11	0,004
	1,023	1608	1585	1601	1611	1601	0,607	14	0,005
Al-05-500	0,000	2485	2507	2448	2454	2474	1,000	14	0,016
	0,488	2126	2109	2091	2073	2100	0,849	11	0,013
	0,979	1779	1761	1795	1801	1784	0,721	9	0,011
Al-10-500	0,000	2485	2507	2448	2454	2474	1,000	14	0,016
	0,505	1962	1983	2005	1995	1986	0,803	9	0,012
	1,001	1699	1691	1705	1724	1705	0,689	7	0,009
Al-15-500	0,000	2485	2507	2448	2454	2474	1,000	14	0,016
	0,511	1977	1983	1938	1960	1965	0,794	10	0,012
	1,017	1526	1532	1575	1557	1548	0,626	11	0,011
Al-20-500	0,000	2485	2507	2448	2454	2474	1,000	14	0,016
	0,504	1860	1852	1887	1901	1875	0,758	11	0,012
	1,010	1469	1499	1467	1485	1480	0,598	8	0,009

Çizelge A.5 : Al-B₄C kompozitlerin Sr-90 beta kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (mm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-05-03	0,000	34699	34429	34551	34531	34553	1,0000	111	0,005
	0,695	13483	13559	13470	13433	13487	0,2959	53	0,001
	1,571	5663	5654	5709	5805	5708	0,0406	69	0,002
	2,277	4421	4308	4386	4284	4350	0,0084	64	0,002
	3,082	4236	4201	4157	4130	4182	0,0027	47	0,002
Al-10-03	0,000	34699	34429	34551	34531	34553	1,0000	111	0,005
	0,678	12586	12631	12576	12544	12585	0,2675	36	0,001
	1,697	5506	5343	5367	5462	5420	0,0323	77	0,003
	2,596	4302	4380	4275	4377	4334	0,0034	53	0,002
	3,402	4170	4217	4242	4281	4228	0,0010	47	0,002
Al-15-03	0,000	34699	34429	34551	34531	34553	1,0000	111	0,006
	0,553	13433	13454	13425	13425	13435	0,2695	14	0,000
	1,166	7459	7275	7345	7408	7372	0,0697	80	0,003
	2,091	4841	4868	4848	4866	4856	0,0093	13	0,000
	3,108	4263	4313	4365	4361	4326	0,0017	48	0,002

Çizelge A.5 (devam) : Al-B₄C kompozitlerin Sr-90 beta kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (mm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-20-03	0,000	34699	34429	34551	34531	34553	1,0000	111	0,005
	0,755	10707	10658	10633	10630	10658	0,1871	36	0,001
	1,356	6479	6394	6402	6404	6420	0,0507	40	0,001
	2,192	4601	4587	4554	4545	4572	0,0056	27	0,001
	2,984	4229	4196	4278	4247	4238	0,0018	34	0,001
Al-05-53	0,000	34699	34429	34551	34531	34553	1,0000	111	0,005
	0,703	10864	10802	10825	10843	10834	0,1919	26	0,001
	1,364	6287	6396	6302	6337	6331	0,0470	48	0,002
	2,126	4690	4584	4631	4661	4642	0,0213	45	0,002
	2,839	4406	4327	4300	4350	4346	0,0037	45	0,002
Al-10-53	0,000	34699	34429	34551	34531	34553	1,0000	111	0,005
	0,793	9579	9504	9595	9621	9575	0,1655	50	0,002
	1,662	5150	5167	5131	5154	5151	0,0224	15	0,001
	2,572	4248	4330	4386	4312	4320	0,0064	57	0,002
	3,449	4143	4204	4225	4085	4165	0,0007	63	0,002
Al-15-53	0,000	34745	34700	34755	34732	34743	1,0000	24	0,001
	0,676	11496	11446	11469	11467	11479	0,2105	21	0,001
	1,589	5609	5624	5660	5666	5649	0,0232	28	0,001
	2,521	4641	4687	4593	4675	4659	0,0053	42	0,001
	3,185	4442	4423	4398	4377	4420	0,0009	28	0,001
Al-20-53	0,000	34745	34700	34755	34732	34743	1,0000	24	0,001
	0,852	9350	9338	9387	9354	9367	0,1461	21	0,001
	1,491	5956	5845	5977	5902	5930	0,0357	59	0,002
	2,246	4655	4643	4657	4658	4663	0,0053	7	0,000
	3,087	4452	4406	4467	4363	4432	0,0011	47	0,002
Al-05-75	0,000	34910	34948	34762	34895	34879	1,0000	81	0,004
	0,750	10295	10461	10369	10327	10364	0,1924	72	0,002
	1,759	5452	5366	5294	5394	5377	0,0299	66	0,002
	2,928	4400	4376	4414	4357	4387	0,0042	25	0,001
	4,007	4299	4303	4383	4278	4316	0,0004	46	0,002
Al-10-75	0,000	34910	34948	34762	34895	34879	1,0000	81	0,004
	0,850	10719	10714	10660	10646	10685	0,1984	37	0,001
	1,717	5340	5433	5284	5472	5383	0,0265	86	0,003
	2,655	4427	4465	4425	4413	4433	0,0035	23	0,001
	3,517	4239	4296	4344	4296	4294	0,0007	43	0,001
Al-15-75	0,000	34583	34604	34490	34542	34555	1,0000	50	0,002
	0,603	12588	12614	12684	12712	12650	0,2582	58	0,002
	1,462	6039	6130	6099	6057	6082	0,0428	41	0,001
	2,422	4601	4584	4538	4488	4553	0,0078	51	0,002
	3,279	4313	4261	4373	4329	4320	0,0008	46	0,002
Al-20-75	0,000	34910	34948	34762	34895	34879	1,0000	81	0,004
	0,936	9236	9181	9124	9183	9182	0,1446	46	0,002
	1,938	5174	5139	4973	5087	5094	0,0129	88	0,003
	3,029	4578	4504	4557	4466	4527	0,0012	51	0,002
	4,385	4337	4314	4334	4297	4321	0,0001	19	0,001
Al-05-150	0,000	34253	34329	34345	34262	34298	1,0000	47	0,002
	0,717	10716	10667	10680	10594	10665	0,1998	51	0,002
	1,595	5563	5573	5539	5529	5552	0,0315	20	0,001
	2,481	4384	4422	4441	4514	4441	0,0086	55	0,002
	3,297	4280	4218	4304	4338	4286	0,0019	51	0,002
Al-10-150	0,000	34253	34329	34345	34262	34298	1,0000	47	0,002
	0,606	12784	12874	12781	12710	12788	0,2654	67	0,002
	1,636	5539	5603	5683	5589	5604	0,0284	60	0,002
	2,480	4562	4596	4589	4469	4555	0,0069	59	0,002
	3,426	4263	4384	4303	4263	4304	0,0007	57	0,002
Al-15-150	0,000	34260	34305	34278	34302	34287	1,0000	21	0,001
	0,859	9221	9225	9157	9297	9226	0,1506	57	0,002
	1,816	5200	5215	5021	5197	5159	0,0200	92	0,003
	2,673	4407	4370	4420	4382	4395	0,0031	23	0,001
	3,617	4141	4120	4193	4159	4154	0,0004	31	0,001
Al-20-150	0,000	34260	34305	34278	34302	34287	1,0000	21	0,001
	0,842	9598	9555	9630	9512	9574	0,1642	51	0,002
	1,619	5488	5642	5491	5562	5546	0,0324	73	0,002
	2,506	4422	4371	4449	4428	4418	0,0033	33	0,001
	3,512	4202	4202	4234	4258	4225	0,0004	27	0,001
Al-05-500	0,000	34585	34606	34492	34544	34557	1,0000	50	0,002
	0,672	12261	12245	12164	12311	12246	0,2535	61	0,002
	1,623	5672	5791	5747	5839	5763	0,0398	71	0,002
	2,458	4446	4525	4454	4459	4472	0,0078	36	0,001
	3,515	4338	4412	4377	4234	4341	0,0012	77	0,003

Çizelge A.5 (devam) : Al-B₄C kompozitlerin Sr-90 beta kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (mm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-10-500	0,000	34253	34329	34345	34262	34298	1,0000	47	0,002
	1,141	8026	8154	8060	8057	8075	0,1213	55	0,002
	2,269	4852	4769	4963	4881	4867	0,0142	80	0,003
	3,388	4423	4407	4430	4403	4416	0,0009	13	0,000
	4,554	4424	4426	4418	4333	4401	0,0001	45	0,002
Al-15-500	0,000	34253	34329	34345	34262	34298	1,0000	47	0,002
	0,676	12143	12097	12214	12175	12158	0,2512	50	0,002
	1,757	5519	5592	5476	5526	5529	0,0305	48	0,002
	2,856	4446	4533	4514	4484	4495	0,0015	38	0,001
	4,063	4388	4390	4358	4282	4355	0,0002	51	0,002
Al-20-500	0,000	34585	34606	34492	34544	34557	1,0000	50	0,002
	0,716	11589	11445	11471	11570	11519	0,2271	71	0,002
	1,600	5745	5728	5653	5779	5727	0,0376	53	0,002
	2,554	4378	4480	4499	4353	4428	0,0043	73	0,002
	3,591	4247	4253	4198	4237	4234	0,0003	25	0,001

Çizelge A.6 : Al-B₄C-WC kompozitlerin Am-241 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-0510	0,000	69156	69234	69076	69123	69147	1,000	67	0,001
	0,310	36548	36366	36701	36416	36508	0,528	150	0,001
	0,717	15704	15678	15612	15794	15697	0,227	75	0,001
	1,016	8087	8105	8123	7997	8078	0,117	56	0,000
	1,312	4177	4078	4045	4172	4118	0,060	67	0,000
Al-1005	0,000	69156	69234	69076	69123	69147	1,000	67	0,001
	0,481	36566	36471	36478	36594	36527	0,528	62	0,001
	0,827	23442	23384	23689	23767	23571	0,341	186	0,001
	1,117	16302	16518	16462	16289	16393	0,237	115	0,001
	1,576	8089	8355	8297	8140	8220	0,119	126	0,001
Al-1000	0,000	69156	69234	69076	69123	69147	1,000	67	0,001
	0,561	47134	47092	46919	47174	47080	0,681	112	0,001
	1,126	31765	31889	31906	32032	31898	0,461	109	0,001
	1,710	21098	21203	21435	21031	21192	0,306	177	0,001
	2,295	13696	13578	13522	13443	13560	0,196	106	0,001
Al-0010	0,000	69156	69234	69076	69123	69147	1,000	67	0,001
	0,464	24674	24673	24933	24812	24773	0,358	125	0,001
	0,876	10163	9987	9831	9918	9975	0,144	141	0,001
	1,210	4865	4856	4742	4767	4808	0,070	62	0,000
	1,592	2084	2132	2003	1989	2052	0,030	68	0,000
Al-0505	0,000	69156	69234	69076	69123	69147	1,000	67	0,001
	0,460	37179	37345	37549	37238	37328	0,540	163	0,001
	0,988	17234	17456	17280	17173	17286	0,250	122	0,001
	1,444	9677	9743	9606	9775	9700	0,140	75	0,001
	1,906	5087	5234	5123	5109	5138	0,074	66	0,000

Çizelge A.7 : Al-B₄C-WC kompozitlerin Cs-137 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-0510	0,000	240095	240833	239154	240817	240225	1,000	354	0,002
	0,310	218931	221717	219308	221359	220329	0,917	632	0,003
	0,717	196962	197504	197162	198298	197481	0,822	263	0,002
	1,016	180176	179010	180962	180091	180060	0,750	359	0,002
	1,312	168107	166221	165653	168287	167067	0,695	594	0,003
Al-1005	0,000	237392	238562	234408	236607	236742	1,000	783	0,005
	0,481	211370	213047	211236	212332	211996	0,895	382	0,003
	0,827	194600	195158	195148	194959	194966	0,824	117	0,003
	1,117	181699	181361	180964	179699	180931	0,764	391	0,003
	1,576	163834	163235	164619	164820	164127	0,693	327	0,003
Al-1000	0,000	244941	243656	244249	246671	244879	1,000	584	0,003
	0,561	220999	219630	220605	219441	220169	0,899	337	0,003
	1,126	198731	199778	197724	197214	198362	0,810	508	0,003
	1,710	174179	175407	177698	176171	175864	0,718	659	0,003
	2,295	158062	157366	155038	157094	156890	0,641	581	0,003

Çizelge A.7 (devam) : Al-B₄C-WC kompozitlerin Cs-137 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-0010	0,000	237392	238562	234408	236607	236742	1,000	783	0,005
	0,464	211246	210809	211035	211682	211193	0,892	166	0,003
	0,876	184984	182431	186641	186678	185184	0,782	893	0,005
	1,210	167657	168063	167145	167462	167582	0,708	172	0,002
	1,592	149313	150385	149291	151047	150009	0,634	385	0,003
Al-0505	0,000	255973	256775	254950	256758	256114	1,000	385	0,002
	0,460	230680	230553	231358	231300	230973	0,902	186	0,002
	0,988	203543	201047	202992	201982	202391	0,790	494	0,002
	1,444	183625	182896	180590	180620	181933	0,710	698	0,003
	1,906	162353	161963	161596	160383	161574	0,631	381	0,002

Çizelge A.8 : Al-B₄C-WC kompozitlerin Co-60 gama kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-0510	0,000	11234	11245	11249	11336	11266	1,000	47	0,003
	0,310	10703	10647	10658	10551	10640	0,944	64	0,003
	0,717	9786	9676	9677	9875	9754	0,866	96	0,005
	1,016	9060	9212	9029	9249	9138	0,811	109	0,005
	1,312	8656	8549	8414	8605	8556	0,759	104	0,005
Al-1005	0,000	11234	11245	11249	11336	11266	1,000	47	0,003
	0,481	10295	10324	10645	10390	10414	0,924	159	0,007
	0,827	9871	9609	9825	9744	9762	0,867	115	0,005
	1,117	9236	9371	9217	9355	9295	0,825	79	0,004
	1,576	8615	8468	8505	8599	8547	0,759	71	0,004
Al-1000	0,000	11234	11245	11249	11336	11266	1,000	47	0,003
	0,561	10366	10409	10309	10510	10399	0,923	85	0,004
	1,126	9695	9546	9826	9435	9626	0,854	171	0,008
	1,710	8796	8608	8819	8718	8735	0,775	95	0,005
	2,295	7998	8028	8050	8059	8034	0,713	27	0,002
Al-0010	0,000	11834	11845	11849	11936	11866	1,000	41	0,003
	0,464	10695	10786	10817	10852	10788	0,918	58	0,007
	0,876	9906	9824	9832	9974	9884	0,841	61	0,006
	1,210	9277	9268	9152	9074	9193	0,781	84	0,007
	1,592	8380	8402	8475	8456	8428	0,717	39	0,006
Al-0505	0,000	11234	11245	11249	11336	11266	1,000	47	0,003
	0,460	10236	10431	10593	10426	10422	0,925	146	0,007
	0,988	9455	9352	9516	9402	9431	0,837	70	0,004
	1,444	8869	8977	8602	8816	8816	0,783	158	0,007
	1,906	7968	8044	7994	7960	7992	0,709	38	0,002

Çizelge A.9 : Al-B₄C-WC kompozitlerin Pu-Be nötron kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (cm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-0510	0,000	3012	3002	2991	3018	3006	1,000	10	0,005
	0,310	2736	2721	2707	2698	2716	0,904	14	0,005
	0,717	2436	2445	2431	2456	2442	0,812	10	0,003
	1,016	2302	2258	2281	2296	2284	0,760	17	0,006
Al-1005	0,000	3012	3002	2991	3018	3006	1,000	10	0,005
	0,481	2478	2436	2468	2426	2452	0,816	22	0,007
	0,827	2192	2196	2166	2174	2182	0,726	12	0,004
	1,117	2038	1996	2033	2027	2024	0,673	16	0,005
Al-1000	0,000	3012	3002	2991	3018	3006	1,000	10	0,005
	0,561	2414	2435	2396	2428	2418	0,804	15	0,005
	1,126	1963	1987	1971	1949	1968	0,655	14	0,005
	1,710	1718	1723	1739	1708	1722	0,573	11	0,004
Al-0010	0,000	3012	3002	2991	3018	3006	1,000	10	0,005
	0,464	2814	2806	2786	2801	2802	0,932	10	0,003
	0,876	2658	2644	2633	2672	2652	0,882	15	0,005
	1,210	2578	2582	2577	2597	2584	0,860	8	0,003
Al-0505	0,000	3012	3002	2991	3018	3006	1,000	10	0,005
	0,460	2647	2592	2611	2631	2620	0,872	21	0,007
	0,988	2320	2314	2289	2292	2304	0,766	13	0,004
	1,444	2141	2134	2122	2131	2132	0,709	7	0,002

Çizelge A.10 : Al-B₄C-WC kompozitlerin Sr-90 beta kaynağı ile yapılan deney sonuçları.

Malz. Kodu	Kalınlık (mm)	1. sayım	2. sayım	3. sayım	4. sayım	Ort. sayım	Bağıl sayım	Std Sapma	Bağıl Hata (±)
Al-0510	0,000	28788	28769	28879	28946	28845	1,000	64	0,004
	0,592	12279	12369	12488	12305	12360	0,276	72	0,003
	1,186	7060	6963	7046	7038	7027	0,063	34	0,002
	1,871	4914	5003	4979	4980	4969	0,013	30	0,001
Al-1005	2,573	4375	4273	4377	4326	4338	0,003	38	0,002
	0,000	28788	28769	28879	28946	28846	1,000	64	0,004
	0,511	8185	8054	8032	8081	8089	0,141	52	0,002
	0,737	6145	6240	6143	6342	6218	0,065	73	0,003
Al-1000	1,452	4423	4367	4466	4579	4459	0,002	70	0,003
	2,076	4282	4358	4269	4281	4298	0,000	32	0,001
	0,000	28788	28769	28879	28946	28846	1,000	64	0,004
	0,517	11243	11200	11303	11382	11283	0,263	61	0,003
Al-0010	1,145	5831	5993	5950	5887	5916	0,046	55	0,002
	1,800	4640	4625	4462	4488	4554	0,004	71	0,003
	2,494	4320	4316	4241	4240	4280	0,001	35	0,001
	0,000	28788	28769	28879	28946	28846	1,000	64	0,004
Al-0505	0,378	10075	9966	9851	9951	9961	0,265	71	0,003
	1,124	3757	3695	3758	3766	3744	0,028	25	0,001
	1,754	2944	2882	2886	2846	2890	0,003	32	0,001
	2,418	2755	2740	2755	2812	2766	0,001	25	0,001

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ayhan AKKAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : Zara - 1981
E-Posta : akkasayhan@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2002, Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fak., Fizik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2006, Hacettepe Üniversitesi, Fen Fak., Fizik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2002-2004 Araştırma Görevlisi - Hacettepe M.Y.O - Hacettepe Üniversitesi
- 2004-2006 Öğretim Görevlisi - Hacettepe M.Y.O - Hacettepe Üniversitesi
- 2008-..... Sağlık Fizikçisi - Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi - Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.

Bu alanda görev yaptığı konular;

- ✓ Araştırma Reaktörü Sağlık Fizikçisi
- ✓ Çevresel Radyoaktivite İzlenmesi
- ✓ Radyolojik ve Nükleer Kazalarda Acil Durum Müdahale
- ✓ Ülkemizde Kullanılan Radyoaktif Maddelerin ve Radyasyon Kaynaklarının Lisansa Esas Radyasyon Kontrolleri
- ✓ Radyasyondan Korunma Kurs Eğitimliği
- ✓ Kapalı Ortam, Su ve Havada Aktif ve Pasif Radon Ölçümü ve Değerlendirilmesi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Akkas, A.**, Tugrul, A. B., Buyuk B., Addemir, A.O., Marsoglu, M. and Agacan B., 2015. Shielding Effect of Boron Carbide Aluminium Metal Matrix Composite against Gamma and Neutron Radiation, *Acta Physica Polonica A*, Vol.128 (Doi: 10.12693/APhysPolA.128.B-176).
- **Akkas, A.**, Tugrul, A. B., Buyuk B., Addemir, A.O., Marsoglu, M. and Agacan B., 2015. Radiation Shielding Effect of Boron Carbide Aluminum Metal Matrix Composites, *Acta Physica Polonica A*, Vol.127 (Doi: 10.12693/APhysPolA.127.947).

Projeler

- Beril TUĞRUL (Yürütücü), **Ayhan Akkaş**, Mayıs 2014- Devam Ediyor. “Özel Kompozit Malzemelerin Radyasyon Karşısında Davranışının İncelenmesi, XCOM Bilgisayar Programı ile İrdelenmesi”, İTÜ-BAP Doktora Tezi Araştırma Projesi.

Ulusal Bildiri :

- **A. Akkaş**, B. Ataksor, Hidrolojide Radyasyondan Korunma Teknikleri, 4. *Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu*, 05-09 Ekiim 2015.

Uluslararası Bildiri :

- **Akkas, A.**, Tugrul, A. B., Buyuk B., Addemir, A.O., Marsoglu, M. and Agacan B., Shielding Effect of Boron Carbide Aluminium Metal Matrix Composite against Gamma and Neutron Radiation, *4th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition*, 24-27 April, 2014.
- **Akkas, A.**, Tugrul, A. B., Buyuk B., Addemir, A.O., Marsoglu, M. and Agacan B., Radiation Shielding Effect of Boron Carbide Aluminum Metal Matrix Composites, *2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering*, 25-29 October, 2014.