



**BURSA MERMERLERİNİN GAMA IŞINI ZAYIFLATMA
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Ola Taha HİJAZİ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BURSA MERMERLERİNİN GAMA IŞINI ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Ola Taha HİJAZİ
901507004

Prof. Dr. Orhan GÜRLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2023

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BURSA MERMERLERİNİN GAMA IŞINI ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Ola Taha HİJAZİ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Orhan GÜRLER

Radyasyon insan hayatında büyük bir öneme sahiptir; tarımsal, endüstriyel, tıbbi ve gıda sterilizasyonu gibi çeşitli alanlarda kullanımı mevcuttur. Alfa, beta ve gama radyasyonları radyasyonun üç ana formudur. İyonlaştırıcı parçacıklara veya radyasyona maruz kalmak tüm canlılar için son derece zararlı olduğundan çeşitli zırh malzemeleriyle radyasyondan korunma, günümüz temel çalışmalarından birisi olarak kabul edilmektedir. Özellikle nükleer araştırmalarda gama ışınlarından korunmanın zorluğu, malzemelere nüfuz etmelerini kolaylaştıran yüksüz ve kütsüz olma özelliklerinden kaynaklanır. Bu çalışmada, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nden bazı mermer türleri toplanmış ve bunların gama ışını zırhlama özellikleri, gama ışını transmisyon tekniği kullanılarak belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu malzemelerin sertlikleri ve bileşimleri, koruyucu bir kalkan olarak kullanılabilirliklerini düşünmemizi sağlamıştır. Kimyasal bileşimleri bilinen yedi çeşit doğal Türk Mermeri (TM) ^{60}Co (1173,2 ve 1332,5 keV), ^{137}Cs (661,6 keV), ^{241}Am (59,5 keV) ve ^{22}Na (511 ve 1274,5 keV) gama radyoizotop kaynaklarına karşı koruyucu malzeme olarak test edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, Türk mermerlerinin çeşitli enerjilere sahip gama ışınlarına karşı zırhlama özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılabilecek verilerin toplanmasına katkı sağlamaktır. Bu amaçla kütle zayıflatma katsayıları (MAC), lineer zayıflatma katsayıları (LAC), yarı-değer kalınlığı (HVL), onda-bir değer kalınlığı (TVL) ve ortalama serbest yol değerleri (MFP) gibi dikkate alınması gereken bazı temel gama ışını zayıflatma parametreleri, 3"x3" NaI(Tl) sintilasyon dedektörü ve çok kanallı analizör içeren gama ışını spektrometre sisteminden elde edilen deneysel verilerle hesaplanmıştır. Her bir mermer türüne ve kalınlığına ait, iyi istatistiklere sahip gama ışını spektrumu elde etmek için sayım süresi 3600 saniye olarak seçilmiştir. Çalışılan örneklerin zırhlamadaki etkinlikleri ile ilgili sonuçlar, bu tür malzemeler için literatürde mevcut olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mermer, zırhlama, gama ışını, zayıflatma katsayıları ve NaI(Tl) dedektörü

2023, xiii + 61 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DETERMINATION OF GAMMA-RAY ATTENUATION PROPERTIES OF BURSA MARBLES

Ola Taha HİJAZİ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Orhan GÜRLER

Radiation is extremely important in human life; it is used in a variety of agricultural, industrial, medical, and food sterilizing applications. Alpha, beta, and gamma radiations are the three main forms of radiation. Because exposure to ionizing particles or radiation is extremely harmful to all living creatures, radiation protection by shielding materials is regarded as one of the most essential studies. Especially, the challenge of protecting against the photons in nuclear research derives from the fact that gamma-ray has no charge and no mass, making it simple for them to penetrate materials. In this work, some marble types were collected from Marmara Region of Turkey, and their gamma-ray shielding characteristics were estimated by using gamma-ray transmission method. Their rigidity and their composition led us to consider their use as a protective shield. Seven kinds of natural Turkish Marbels (TM) with known their chemical compositions have been tested as shielding materials against ^{60}Co (1173,2 and 1332,5 keV), ^{137}Cs (661,6 keV), ^{241}Am (59,5 keV) and ^{22}Na (511 and 1274,5 keV) gamma radioisotope sources. The main goal of this experiment was to collect data that could be used to evaluate Turkish marbles and make predictions about how they might attenuate gamma-rays with several energies. Some essential attenuation parameters to be taken into account, such as mass attenuation coefficients (MAC), linear attenuation coefficients (LAC), half-value layers (HVL), tenth-value layers (TVL) and mean free path values were calculated by the experimental data derived from gamma-ray spectrometer system with 3"x3" NaI(Tl) scintillation detector and multichannel analyzer. For each type of marble and for each thickness the counting time was selected to be 3600 second to obtain the gamma-ray spectrum with good statistics. The results on shielding effectiveness of the studied samples were compared to that of available in literature for such kind of materials.

Keywords: Marbel, shielding, gamma-ray, attenuation coefficients and NaI(Tl) detector
2023, xiii + 61 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Fen- Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın planlanması ve yürütülmesinde tecrübelerini ve kıymetli bilgilerini esirgemeyen çok değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Orhan GÜRLER ve Doç.Dr.Ürkiye AKAR TARIM'a en içten şükranlarımı arz ederim.

Yaşamım ve eğitim hayatım boyunca her an desteklerini hissettiğim ve bana inanan ve güvenen, emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili AİLEM'e ve bana yardımcı olan arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ola Taha HİJAZİ
05/07 /2023

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI.....	iii
TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iiix
ÇİZELGELER DİZİNİ	ixv
1.GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	6
2.1. Radyasyon Tanım ve Türleri.....	6
2.1.1. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon	6
2.1.2. İyonlaştırıcı radyasyon	7
2.2. Radyasyon Kaynakları	11
2.2.1. Doğal radyasyon kaynakları.....	11
2.2.2. Yapay radyasyon kaynakları	12
2.3. Radyasyondan Korunma	13
2.3.1. Radyasyon kaynağından uzaklık.....	13
2.3.2. Işınlama süresi.....	14
2.3.3. Radyasyon kaynağının zırhlanması.....	14
2.4. Gama Işınlamalarının Madde ile Etkileşimi	15
2.4.1. Fotoelektrik etkileşme	17
2.4.2. Compton saçılması	18
2.4.3. Çift oluşumu.....	19
2.5. Elektromanyetik Radyasyonun Absorpsiyonu	20
2.5.1. Lineer (μ) ve kütle zayıflatma katsayıları (μ_m)	21
2.5.2. Yarı-değer (HVL) ve onda-bir değer kalınlığı (TVL).....	22
2.5.3. Ortalama serbest yol (MFP).....	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Deneyde Kullanılan Gama Işını Kaynakları	24
3.2. Zırh Malzemeleri.....	25
3.3. Radyasyon Ölçüm Sistemi	28
3.4. Gama Işını Zırhlama Deneyleri.....	29
4.BULGULAR ve TARTIŞMA.....	33
5.SONUÇ	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
λ	Ortalama serbest yol
ν	Frekans
E	Enerji
c	Işık hızı (3×10^8 m/s), I: Işık şiddeti
h	Planck sabiti ($6,62 \times 10^{-34}$ J.sn)
m	Kütle
μ	Lineer zayıflatma katsayısı
μ / ρ	Kütleli radyasyon zayıflatma katsayısı
e	Elektron Yüğü ($1,6 \times 10^{-19}$ C)
ρ	Yoğunluk
e^-	Elektron
e^+	Pozitron
α	Alfa parçacığı
β	Beta parçacığı
γ	Gama ışınası
β^+	Pozitron
β^-	Negatron
n	Nötronlar
p	Protonlar
τ	Fotoelektrik katsayısı
σ	Compton katsayısı
κ	Çift oluşum katsayısı
I	Malzemeyi kateden radyasyonun şiddeti
I_0	Radyasyonun malzemeyi katetmeden önceki şiddeti
X	Malzeme kalınlığı
MeV	Mega elektron volt
keV	Kilo elektron volt

Kısaltmalar	Açıklama
LAC	Linear Attenuation Coefficients (Lineer Zayıflatma Katsayıları)
MAC	Mass Attenuation Coefficients (Kütle Zayıflatma Katsayıları)
HVL	Half Value Layers (Yarı-Değer Kalınlığı)
TVL	Tenth Value Layers (Ona-Bir Değer Kalınlığı)
MFP	Mean Free Path (Ortalama Serbest Yol)
Nal (TI)	Talyumla aktivite edilmiş Sodyum İyodür
ALARA	As Low As Reasonable Achievement



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	X-Işınları: Bir atomun elektron bulutundan yüksek enerjili bir dalganın yayılması.....	9
Şekil 2.2.	Radyasyon kaynakları.....	11
Şekil 2.3.	Doğal radyasyon kaynaklarının dağılımı.....	12
Şekil 2.4.	Yapay radyasyon kaynaklarının dağılım oranlar.....	13
Şekil 2.5.	Fotoelektrik Etki	18
Şekil 2.6.	Compto Saçılması	19
Şekil 2.7.	Çift Oluşum	20
Şekli 3.1.	Deneyde kullanılan mermer örnekleri	27
Şekil 3.2.	Kaynak-mermer ve dedektör düzeni	30
Şekil 3.3.	Örnek spectrum ve Maestro programı ile net alan ölçümü (Kaynak: Am-241; Mermer örneği: Emperador)	31
Şekil 4.1.	Tüm mermer örnekleri için lineer zayıflatma katsayılarının enerji ile değişimi.....	33
Şekil 4.2.	Tüm mermer örnekleri için kütle zayıflatma katsayılarının enerji ile değişimi.....	34
Şekil 4.3.	Tüm mermer örnekleri için yarı-değer kalınlık değerlerinin enerji ile değişimi	36
Şekil 4.4.	Tüm mermer örnekleri için onda-bir değer kalınlıklarının enerji ile değişimi	37
Şekil 4.5.	Tüm mermer örnekleri için ortalama serbest yol kalınlık değerlerinin enerji ile değişimi.....	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Ölçümlerde kullanılan radyoaktif kaynakların özellikleri	25
Çizelge 3.2. Mermerlerin örneklerinin yoğunluk değerleri ve kimyasal..... kompozisyonu..	26
Çizelge 4.1. Mermer örneklerinin lineer zayıflatma katsayıları (LAC)	32
Çizelge 4.2. Mermer örneklerinin kütle zayıflatma katsayıları (MAC)	33
Çizelge 4.3. Mermer örneklerinin yarı-değer kalınlığı (HVL)	36
Çizelge 4.4. Mermer örneklerinin onda-bir değer kalınlığı (TVL)	37
Çizelge 4.5. Mermer örneklerinin ortalama serbest yol değerleri (MFP)	38

1. GİRİŞ

Tüm canlı organizmalar kozmik ışınlar, toprak, su, hava ve bitkilerdeki karasal radyonüklidler ve nükleer deneyler, tıbbi kullanımlar, araştırma tesisleri, nükleer endüstri ve enerji üretiminden kaynaklanan radyoaktivite dahil olmak üzere hem doğal hem de endüstriyel kaynaklardan gelen yapay radyasyona maruz kalmaktadırlar (Knoll, 2010). Önemli bilimsel keşifler yeni teknolojilerle sonuçlanmış ve radyasyon ve radyoaktif maddelerin yapay olarak üretilmesine katkıda bulunmuştur. Yirminci yüzyıl boyunca radyasyon ve radyoaktivite yeni teknolojilerin en temel bileşenlerinden birisi haline gelmiştir. Artan sanayileşme ve teknolojik ilerleme nedeniyle, nükleer enerji ve sağlık da dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde radyasyon ve radyoaktif kaynakların kullanımına yönelik araştırmalar hızla ilerlemektedir. Sağlık alanında hastalık teşhis ve tedavisinde, enerji alanında nükleer santrallerde, sanayi alanında endüstriyel ürünlerde, tarım alanında tohum ıslahında, askeri alanda silah olarak ve tüketici ürünlerinde olmak üzere hemen her alanda kullanılmaktadırlar. Radyasyon kullanımının birçok avantajına rağmen, doğasında var olan zararlı olma ihtimali insanlığı her zaman risk altına sokmuştur (Aral, 2019).

Yüksek dozda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan bir insan zarar görebilir (Jawad vd, 2019). Radyasyonun tehlikelerini önlemek veya en aza indirmek için radyasyon güvenliğinin üç temel ilkesi;maruz kalma süresi, kaynaktan uzaklık ve zırhlama ile ilgili parametreleri kullanmak mümkündür. Alınan radyasyon dozu maruziyet süresi ile ters orantılı olduğundan, bu sürenin pratik olarak mümkün olduğunca kısa olması zorunludur. Radyasyon dozaj seviyesi, kaynaktan uzaklığın artırılmasıyla da büyük ölçüde azaltılabilir, çünkü bu mesafenin karesiyle ters orantılıdır, ancak en etkili radyasyon koruması, uygun kalınlık ve malzemelerden oluşan korumalı katmanlar kullanılarak yani zırhlama ile elde edilir (Murray,2001; Akbulut vd, 2015).

Kütle zayıflatma katsayısı (MAC), lineer zayıflatma katsayısı (LAC), ortalama serbest yol (MFP), yarı-değer kalınlığı (HVL) ve onda-bir değer kalınlığı (TVL) gibi gama radyasyonu ve madde etkileşme parametreleri gama ışını zırhlama malzemelerini değerlendirmek için

kullanılır. Büyüklükleri, gelen gama ışını enerjisi, atom numarası ve koruyucu malzemelerin yoğunluğu ile belirlenir. Zırhlama radyasyon güvenliği için çok önemli olduğundan, çeşitli malzemelerin ilgili zırhlama parametrelerinin araştırıldığı teorik ve deneysel pekçok çalışma mevcuttur (Sharaf ve Saleh, 2015).

Literatürde zırhlama malzemesi olarak çeşitli doğal ve kompozit malzemeler erastlanmaktadır. Doğal malzemelerden biri mermer olup, Türkiye 'nin çeşitli mermer yataklarından, Bilecik, Finike, Muğla, Antalya, Marmara, Burdur, Isparta ve Amasya mermerlerinin gama ışını zırhalama özellikleri incelenmiştir (Basyigit vd, 2005; Mavi vd, 2015).

Hatipoğlu (2017) Kırklareli mermeri, kalker tozu ve alüminyum numunelerinin soğurma katsayılarını Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynaklarından yayınlanan farklı enerjilere sahip gama ışınları için karşılaştırmıştır. Kırklareli mermerinin ve basınç uygulanmış kalker tozunun lineer ve kütle zayıflatma katsayılarının, yarı-değer kalınlığı (HVL) ve onda-bir değer kalınlığı (TVL) değerlerinin radyasyon zırhlamada kullanılan malzemenin özelliklerine bağlı olduklarını belirtmiştir.

Akkurt vd. (2010) Barit ve baritten üretilen betonlar için 662, 1173 ve 1332 keV'de kütle zayıflatma katsayılarını bir NaI (TI) detektörü kullanarak elde etmişlerdir. Sonuçlarını standart koruyucu malzeme olan kurşun için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve Barit ($BaSO_4$)'in inşaatlarda kullanılan betona alternatif malzeme olarak doğrudan kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Mann (2017) altı adet cam numunenin radyasyon zırhlama özelliklerini 15 keV ve 15 MeV enerji aralığında araştırmış ve optik kalınlıkta bazı opak malzemelerle karşılaştırmıştır. Çalışmayı kütle zayıflatma katsayısı, eşdeğer atom numarası (Z_{eq}) ve foton kuvvetlendirme

faktörü gibi çeşitli radyasyon zırhlama parametrelerini hesaplayarak gerçekleştirmiştir.

Singh vd. (2014) beş farklı toprak örneğinin gama ışını ve nötron zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada toprak örneklerinin kütle zayıflatma katsayılarını, yarı-değer kalınlıklarını ve foton kuvvetlendirme faktörlerini elde etmişlerdir. Seçilen toprak numuneleri arasındaki kilin, toprağın radyasyon zırhlama özelliğini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Günoğlu ve Akkurt (2013) andezit ve bazalt kayalarının radyasyon soğurma niteliklerini incelemiş, ve bazalt örneğinin 662, 1173 ve 1332 keV gama enerjileri için maksimum soğurma katsayısına sahip olduğunu, andezit örneğinin ise en düşük değere sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Kharita vd. (2008) Suriye'de kullanılan iki beton türünün ve kendi yaptıkları dört farklı beton türünün, toplamda altı farklı beton türünün radyasyon zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. Gama kaynağı olarak Cs-137 ve Co-60, nötron kaynağı olarak ise Am-Be nötron kaynak sistemini kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda, her bir radyasyon türü için lineer zayıflatma katsayılarını ve yarı-değer kalınlıklarını hesaplamışlardır.

Akkurt vd. (2010) farklı konsantrasyonlarda agrega halinde zeolit içeren betonlar için lineer zayıflatma katsayılarını deneysel olarak elde etmişler ve sonuçları teorik hesaplamalar ile karşılaştırmışlardır. Dört beton blok ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarından, lineer zayıflatma katsayılarının artan zeolit konsantrasyonu ile azaldığını rapor etmişlerdir.

Alam vd. (2001) Bangladeş'in çeşitli bölgelerindeki toprak ve inşaat malzemelerinin 276,1 - 302,8 - 356,0 - 383,8 - 661,6 - 1173,2 ve 1332,5 keV enerjili ışınlara karşı soğuruculuklarını araştırmışlar ve bu malzemelerin lineer ve kütle zayıflatma katsayılarını hesaplamışlardır.

Demir (2010) yaptığı çalışmada sintilasyon dedektörü ve Am-241 nokta kaynak kullanarak tinkal, uleksit ve kolemanit gibi bazı bor filizlerinin kütle zayıflatma katsayılarını hesaplamış ve bu maddelerin gama ve nötron zırlamasında kullanabilirliğini açıklamıştır.

Yukarıda belirtilen çalışmalarla gösterildiği üzere, araştırmacıların radyasyondan en iyi korunma özelliklerine sahip zırh malzemelerinin üretimi veya tespiti konusundaki çalışmaları devam etmektedir.

Bu çalışmada, ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am ve ^{22}Na olmak üzere dört farklı radyoaktif kaynak ve farklı bileşimlere sahip mermer numuneleri kullanılarak 3"x3" NaI (TI) sintilasyon dedektörü ile ölçümler gerçekleştirilmiş ve MCA kartı ile ölçüm sonuçları analiz edilmiştir. Türkiye'de yaygın olarak kullanılan bu mermer örneklerinin gama ışını zayıflatma katsayıları ve diğer zırlama parametreleri (serbest yol, yarı-değer kalınlığı ve onda-bir değer kalınlığı), gama ışını zayıflatma özelliklerini ve bazı bileşenlerin bu işlenmiş mermer örneklerinin gama ışını zayıflatma özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla deneysel olarak elde edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Radyasyon Tanım ve Türleri

Radyasyon, bir atom çekirdeğinin kararsız bir durumdan daha kararlı bir duruma geçtiğinde, elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar şeklinde yaydığı enerji olarak tanımlanır. En eski radyasyon araştırmaları 19 yüzyıl'da yapılmıştır. Wilhelm Conrad Röntgen 1895 yılında X-ışınlarını keşfetmiştir. X-ışınları insan vücuduna nüfuz edebilir ve vücudun birçok bölgesinde değişikliklere neden olabilir. Röntgen bu ışınları, fotoğraf filminde renk kaymasına neden olan yeni bir ışın türü olarak tanımlamıştır. 1898'de Pierre ve Mary Curie ilk radyoaktif madde olan radyumu keşfetmiştir. Aynı yıl, Becquerel radyoaktivite kavramı ortaya koyulmuştur. Radyasyon araştırmaları günümüzde hala devam etmektedir (Çimen vd., 2017).

İki tür radyasyon vardır: elektromanyetik ve parçacık. Beta parçacıkları, alfa parçacıkları, nötronlar, protonlar ve elektronlar parçacık radyasyonlarıdır. Elektromanyetik radyasyon, foton yayan tüm radyasyon biçimlerini içeren bir radyasyon sınıfıdır. Maddeye ne kadar derinden nüfuz edebildiklerine ve maddeyi oluşturan atomları iyonize edip etmediklerine göre, radyasyonlar iki grupta incelenebilir (Şeker ve Çerezci, 1997).

2.1.1. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar bir moleküldeki atomları titreşime zorlamak veya hareket ettirmek için yeterli enerjiye sahiptirler, ancak sahip oldukları bu enerji atomlardan elektronları koparmak için yeterli değildir. Mikrodalgalar, görünür ışık ve radyo dalgaları bu tür radyasyona örnektir. Bu dalgalar ısınmaya neden olur, ancak üretilen enerjinin insan dokuları üzerinde çok az etkisi vardır. Uzun süre ve yüksek seviyelerde iyonlaştırıcı olmayan radyasyona maruz kalan kişilerde yorgunluk, baş ağrısı, uykusuzluk ve görme bozukluğu gelişebilir (Cember ve Johnson, 2009).

2.1.2. İyonlaştırıcı radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon birkaç form alır: Alfa, beta, nötron parçacıkları, gama ve X-ışınları. İyonizasyon, nötr bir atomun pozitif veya negatif yük kazanması sürecidir. Atomlar bir ortam boyunca hareket ettiklerinde, iyonlaştırıcı radyasyonlar etkileştikleri atomların elektronlarını çıkarma yeteneğine sahiptir. Pozitif bir iyon, elektronu alınmış bir atomdur. Bazı durumlarda, koparılan elektron daha sonra nötr bir atomla birleşerek negatif bir iyon oluşturabilir. İyon çiftleri iki negatif yüklü iyon (tipik olarak serbest elektronlar) ve bir pozitif yüklü iyondan oluşur (Khan, 2014). Elektronlar, protonlar, β ve α -parçacıkları gibi yüklü parçacıklar, bir malzemeye girdiklerinde çarpışma yoluyla iyonlaşmaya neden olacak kadar kinetik enerjiye sahiplerse, doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon olarak adlandırılırlar.

Alfa parçacıkları, helyum atomlarının çekirdeğidir. Alfa parçacığı iki proton ve iki nötrondan oluşur ve pozitif yükü elektronun yükünün iki katıdır. Yüğü, $\alpha^+ = 2 \times 1,6 \times 10^{-16} \text{ C}$ ve kütlesi bir helyum çekirdeğinin kütlesidir $m_\alpha = 6,69 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 'dır. Alfa parçacıkları, yükleri ve kütleleri nedeniyle madde ile güçlü etkileşimlere sahiptir ve havada sadece birkaç santimetre hareket ederler (Kazeebra, 2016). Alfa yayan bir madde gıdalar veya hava yoluyla alındığında, alfa parçacıkları ölü deri hücrelerinin dış katmanına nüfuz edemese bile hücrelere ciddi zarar verebilir (Mirion, 2015). Yüklü parçacıklar maddeye nüfuz ettiklerinde, maddenin elektronları ve atom çekirdekleri ile çarpışır ve onlara enerji aktarırlar. Parçacıkların enerjisindeki azalma, enerjileri ortamdaki atomların termal kinetik enerjisine eşit olana kadar devam eder ve ardından parçacıklar yüklerini değiştirdikten sonra hareket etmeyi bırakır.

Proton, bir hidrojen atomunun çekirdeğidir, pozitif yüklüdür ve yükü (e^+) mutlak değer olarak bir elektronun yüküne eşittir, kütlesi $m_p = 1,6724 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 'dır.

Beta parçacıkları, çekirdek tarafından yayınlanan yüksek hızlı parçacıklardır ve elektronların özelliklerine sahiptirler. Aralarındaki temel fark, elektronlar atomik orbitallerden yayınlanırken beta parçacıklarının çekirdeklerin içinden yayınlanmasıdır (Kazeebra, 2016).

Kararsız bir çekirdekte bir nötronun bir protona ya da bir protonun bir nötrona bozunması sırasında ortaya çıkan ekstra enerji, ekstra parçacıkların yayınlanmasına neden olur. Bu parçacıklar; pozitif elektron ve elektron nötrinosu ya da negatif yüklü elektron ve elektron antinötrinosudur. Pozitif yüklü elektronlar pozitron (β^+), negatif yüklü elektronlar ise negatron (β^-) olarak adlandırılır. Çekirdekdeki fazla enerji protonların fazlalığından kaynaklanıyorsa pozitronun, nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa negatronun serbest kaldığı reaksiyon gerçekleşir (Özge, 2019). Kalın bir plastik parçası hatta bir kağıt yığını ile bu parçacıkların hareket etmeleri engellenebilir. Deriye birkaç santimetre nüfuz edebildiği için sağlık açısından küçük bir risk oluşturur (Mirion, 2015).

Nötronlar ve fotonlar, yüksüz olduklarından doğrudan iyonizasyon gerçekleştiremezler, dolaylı olarak iyonlaştırıcı radyasyondurlar. Madde ile etkileşime girdiklerinde doğrudan iyonlaştırıcı parçacıklar salarlar. Nötronlar 1932 yılında Chadwick tarafından keşfedilmiştir, kütlesi protonunkine yakındır. Düşük enerjili nötronlara termal nötronlar denir ve enerjileri yaklaşık 0,025 eV'dir (Kazeebra, 2016). Nötronlar, yüklü parçacıklara ve gama ışınlarına kıyasla madde içinde farklı davranırlar. Nötronlar yüksüz parçacıklar olduklarından dolaylı bir çekirdeğe yaklaştıklarında elektron veya Coulomb alanından etkilenmezler.

Nötronlar enerjilerine göre sınıflandırılırlar:

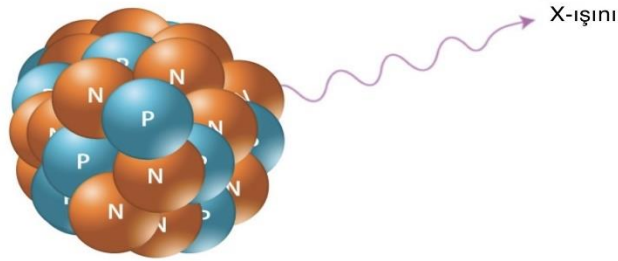
- a. Termal (Isıl) nötronlar [enerjileri 0,025 – 0,5 eV].
- b. Epitermal (Orta enerjili) nötronlar [enerjileri 0,5 eV - 10 keV].
- c. Hızlı nötronlar [enerjileri 10keV - 10MeV].
- d. Relativistik nötronlar [enerjileri 10 MeV den büyük].

Nötronlar enerjilerine göre birçok etkileşme meydana getirirler. Bunlardan başlıcaları elastik (esnek) saçılma, inelastik (esnek olmayan) saçılma, nötron yakalama, nükleer reaksiyonlar, fisyon ve yüksek enerji hadron sağanağı üretimidir (Yülek, 1992).

Işık dalgaları, ısı dalgaları, radyo dalgaları, mikrodalgalar, ultraviyole ışınlar, X-ışınları ve gama ışınları Maxwell tarafından ilk olarak elektrik ve manyetik alanlar cinsinden tanımlandığı için "elektromanyetik" radyasyonlar olarak bilinirler (Khan, 2014). Elektromanyetik radyasyon, kütlesi ve elektriksel özellikleri olmayan bir fotonun dalga hareketi olarak da tanımlanır. X ve gama ışınları kısa dalga boyuna sahip ve malzemelere nüfuz edebilen elektromanyetik radyasyonlardır.

Radyasyondan korunma açısından ilk öncelik verilmesi (odaklanması) gereken grup, nüfuz edici elektromanyetik radyasyondur. Bu yüksek lisans tezi kapsamında yürütülen deneysel araştırmada gama radyasyonu kaynakları ile çalışılmıştır. Sonuç olarak, nüfuz eden elektromanyetik radyasyonun bir parçası olan gama ışınlarına özel önem verilmiştir (McMaster, 1963).

X-ışınları görünür ışıkla aynı yapıdadır. Görünür ışık dalgalarına kıyasla bunlar çok kısa dalga boyuna sahip (son derece yüksek frekanslı) elektromanyetik dalgalardır. Bu ışınlar, elektronların frenlenmesi sonucu oluşabilir ve Bremsstrahlung (Frenleme) ışınları adını alırlar ya da yüksek atom numarasına sahip atomların iç katmanlarından elektronların ayrılması sonucu oluşur ve karakteristik X-ışınları adını alırlar (Kazeebra, 2016).



Şekil 2.1. X-ışınları: Bir atomun elektron bulutundan yüksek enerjili bir dalganın yayınlanması (Mirion, 2015).

Radioaktif çekirdekler kararsızdır ve fazla enerji içerebilirler. Bu çekirdekler, fazla enerjilerini elektromanyetik radyasyon (foton) olarak yayınlar ve daha kararlı hale gelebilirler. Bu arada çekirdeğin kütlesi ve elektrik yükü sabit kalır (Aybers ve Karasulu, 1980). Uyarılmış durum daha uzun olsa bile, γ fotonunun çekirdekten fırlatılması önemli miktarda zaman gerektirir (yaklaşık 10^{-12} s). Gerçekte, ana çekirdeğe atanmış olsa bile, γ -ışını ana çekirdekten ziyade izomerçekirdekten salınır (Qittner, 1972). Çekirdeğin fazla enerjisini sadece foton olarak saldığı, α veya β gibi bir parçacığın fırlatılmasının eşlik etmediği durum "izomerik geçiş" olarak tanımlanır. Bu durumda γ -ışınları salınırken çekirdek başka bir çekirdeğe dönüşmez, kütle ve atom numaraları sabit kalır. Bazı izomerik çekirdekler birkaç saat boyunca uyarılmış halde kalabilir. Bu durum metastabil izomerik durum olarak adlandırılır ve ${}_Z X^{A*}$ şeklinde sembolize edilir. Radyoizotoplardaki gama foton enerjileri 3 MeV'e kadar ulaşabilir (Algünes, 2002).

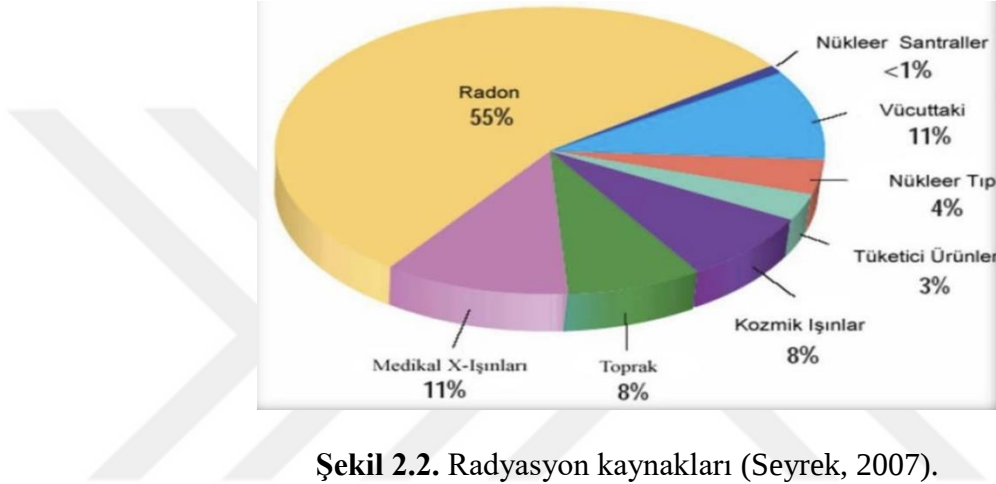
Gama ışınları bir tür elektromanyetik radyasyon olmasına rağmen, elektromanyetik radyasyon ailesinin geri kalanının sahip olmadığı bazı özellikler sergilerler (Özden, 1990).

Bunlar :

- ❖ Elektromanyetik radyasyon spektrumunun enerjik kısmında yer alırlar. Enerjileri genellikle 10 keV'in üzerindedir.
- ❖ Maddeye nüfuz etme yeteneğine sahiptirler.
- ❖ Madde ile etkileşimleri vardır.
- ❖ Fotoğraf filmine zarar verirler.
- ❖ Dolaylı iyonlaştırıcı radyasyonlardır.
- ❖ Uzun süre maruz kalındığında, canlıların yaşamsal fonksiyonları üzerinde zararlı etkileri vardır.
- ❖ Atom çekirdekleri tarafından üretilirler. Kararsız atom çekirdeklerinin yeniden düzenlenmesi sırasında fazla enerji gama fotonu olarak salınır. Bu nedenle gama ışınları radyoizotoplar tarafından üretilir.
- ❖ Doğrusal bir spektruma sahiptirler. Gama ışınları atom çekirdeklerinden bir veya daha fazla enerji seviyesinde yayınlanabilir, ancak yayınlanan gama ışınları belirli enerji seviyelerindedir.

2.2. Radyasyon Kaynakları

Dünya üzerindeki tüm canlı ve cansız türler havada, suda, toprakta ve hatta kendi vücutlarında bulunan doğal radyasyon kaynaklarının yanı sıra insanlar tarafından üretilen yapay radyasyon kaynaklarının etkilerine de maruz kalmaktadır (Şekil 2.2) (TAEK).



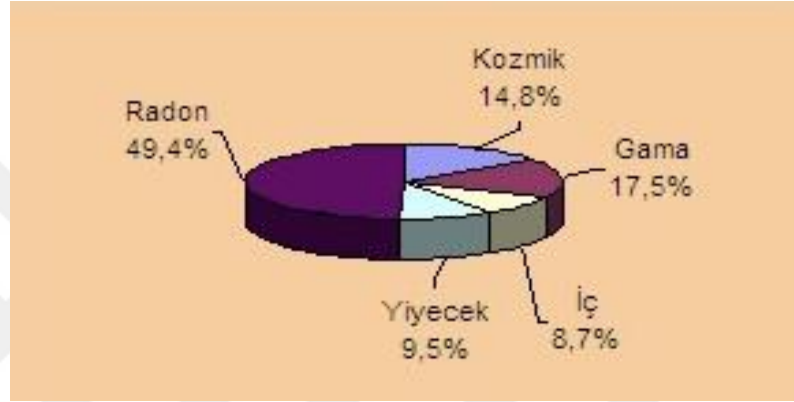
Şekil 2.2. Radyasyon kaynakları (Seyrek, 2007).

2.2.1. Doğal radyasyon kaynakları

Uzun ömürlü (milyarlarca yıl) radyoaktif maddeler, yaşadığımız çevrede normal kabul edilen ve beklenen doğal bir radyasyon seviyesi oluşturmıştır. Nükleer bomba denemeleri ve geçtiğimiz yüzyılda çeşitli teknoloji ürünlerinin kullanılmasıyla bu doğal seviye önemli ölçüde artmıştır.

Doğal radyasyonun bir kısmı uzaydan gelen kozmik ışınlardan kaynaklanmaktadır. Bu ışınların büyük bir kısmı dünya atmosferinden geçerken yakalanır. Sadece küçük bir kısmı Dünya'ya ulaşır. Bir dağın tepesindeki veya havada uçan bir kişi, deniz seviyesindeki bir kişiye göre çok daha fazla kozmik ışına maruz kalır. Günlük yaşamımızda maruz kaldığımız kozmik ışınlardan kaynaklanan küresel ortalama radyasyon dozu 0,39 mSv/yıl'dır (ICRP, 1991). İnsanların maruz kaldığı küresel ortalama radyasyon dozu 0,46 mSv/yıl'dır. Ayrıca vücudumuzdaki radyoaktif elementler (özellikle Potasyum - 40) nedeniyle de belirli miktarda radyasyona maruz kalırız. Bir yıl boyunca bu şekilde maruz kaldığımız iç radyasyon dozunun

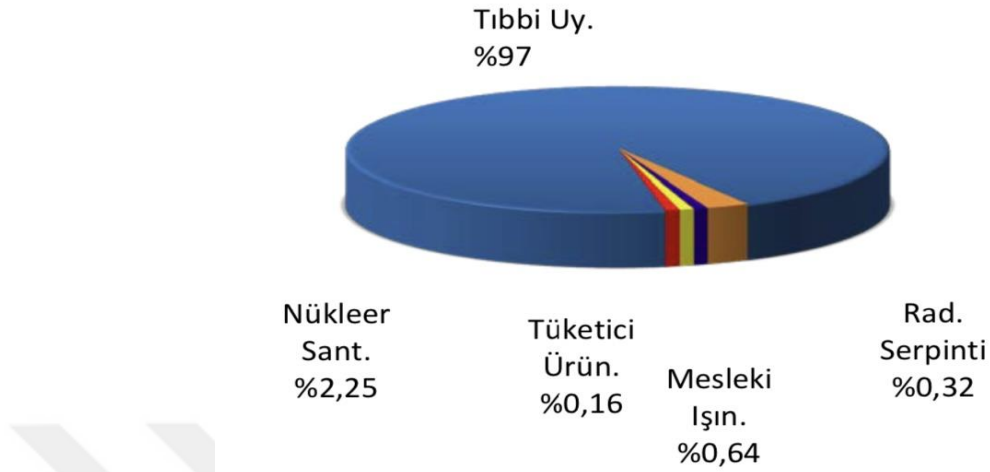
küresel ortalaması 0,23 mSv'dir. Yiyecek, içecek ve soluduğumuz hava yoluyla maruz kaldığımız dozun küresel ortalaması ise kabaca 0,25 mSv/yıl'dır. Yerkabuğunda yaygın olarak bulunan radon gazı, doğal radyasyon seviyelerine katkıda bulunan önemli bir unsurdur (Şekil 2.3). Ne yazık ki radon toprağın üstüne yükselirken, bu bozunma sırasında ortaya çıkan diğer radyoaktif kimyasallar toprakta kalır (IAEA, 1996).



Şekil 2.3. Doğal radyasyon kaynaklarının dağılımı (Kaçar, 2006).

2.2.2. Yapay radyasyon kaynakları

Teknolojik gelişimin bir sonucu olarak, insanoğlu bazı radyasyon kaynaklarını yapay olarak üretme şansına sahip olmuştur. Doğal radyasyon kaynaklarına benzer şekilde, yapay radyasyon kaynakları da belirli bir radyasyon dozuna maruz kalmaya neden olur. Ancak bu doz, doğal kaynaklardan alınan doza kıyasla çok düşük olmakla birlikte, bazı hallerde artabilmektedir. Doğal radyasyon kaynaklarının aksine tam kontrollü olmaları da maruz kalınacak doz açısından önemli bir özelliktir. Başlıca yapay radyasyon kaynakları tıbbi, tarımsal ve endüstriyel amaçlarla kullanılan X-ışınları ve yapay radyoaktif maddeler, nükleer bomba denemelerinden kaynaklanan nükleer serpinti, nükleer enerji üretiminden salınan radyoaktif maddeler ve bazı tüketici ürünlerinde kullanılan radyoaktif maddelerdir (Şekil 2.4). Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından kaynaklanan küresel radyasyon dozu ortalama 2,7 mSv/yıl'dır (IAEA, 1996).



Şekil 2.4. Yapay radyasyon kaynaklarının dağılım oranları (TAEK, 2009).

2.3. Radyasyondan Korunma

İnsanların radyasyona maruz kalmasının biyolojik zararları olduğu tespit edildiğinden, maruz kalınacak dozun izin verilen seviyelerin altında kalması yeterli olmayıp, mümkün olduğunca düşük tutulmalı ve bunun için gerekli tüm önlemler alınmalıdır. Radyasyon güvenliğinin yol gösterici ilkesi "ALARA" (As Low As Reasonable Achievement)'dır, yani ulaşılabilecek en az radyasyon miktarıdır (NRC, 1991). Dış radyasyon kaynaklarından korunmanın üç temel kuralı zaman, mesafe ve zırhtır.

2.3.1. Radyasyon kaynağından uzaklık

İlk önemli faktör radyasyon kaynağından olan uzaklıktır. Burada "ters kare" yasası geçerlidir. Ters kare yasasına göre, radyasyon alanının şiddeti kaynaktan uzaklaştıkça azalır. Radyasyon kaynağına yaklaştıkça maruz kalınabilecek doz miktarı artar (Shapiro, 1990).

2.3.2. Işınlama süresi

Radyasyon maruziyetinde alınan doz, doz hızı ve zamanın çarpımıdır. Bu ilişki radyasyon alanında geçirilen süre ne kadar kısa ise alınan dozun o kadar az olduğunu gösterir. Radyoaktif kaynaktan ve cihazdan ne kadar hızlı uzaklaşırsak, alınan doz o kadar az olacaktır. Radyoaktif kaynak bulunan bir alanda çalışacak kişilerin ne kadar süre çalışmasına izin verileceğine, başlamadan önce dozhesabı yapılarak karar verilir.

2.3.3. Radyasyon kaynağının zırhllanması

Zırhlama, radyasyondan korunmada üçüncü faktördür. Çoğu zaman, kaynağa olan mesafeyi ve kaynağın yakınında geçirilen süreyi azaltmak radyasyon maruziyetini yeterince azaltamayacaktır (Onur, 2002). Bu durumda radyasyon kaynağının zırhllanması gerekli hale gelir. Zırhlama, radyasyon kaynağı ile nüfuz edeceği alan arasına radyasyonu tamamen soğuracak ya da şiddetini izin verilen seviyelere sınırlayacak bir bariyer yerleştirilmesine dayanır (Powsner ve Powsner, 1998). Genel olarak, zırhlama radyasyon risklerinden kaçınmanın en etkili yöntemidir.

Farklı radyasyonlar farklı türde zırhlama malzemeleri ve zırhlama teknikleri gerektirir. Radyasyonun türü ve enerjisi, zırh malzemesinin türünü ve kalitesini belirlemede en temel kriterlerdir. Zırhlamanın temel prensibi, elektromanyetik veya parçacık radyasyonu şiddet seviyelerinin, kalkan olarak kullanılan malzemenin atomlarından geçerken doğrudan veya dolaylı olarak iyonize olması, enerjilerinin tamamını veya bir kısmını kaybetmesi ve canlı organizmalar için güvenli olan seviyelere indirilmesidir (Kahya, 1985).

Alfa parçacıkları ağır ve yüklü olduklarından, cildin dış tabakasını geçip vücuda giremedikleri için dış radyasyon endişesi oluşturmazlar. Alfa parçacıklarını engellemek için 0,5 mm kalınlığında alüminyum bir levha veya birkaç cm kalınlığında kağıt tabakası yeterlidir. İnsanların normal kıyafetleri alfa radyasyonuna karşı iyi bir koruyucu önlemdir. Yüksek enerjili beta parçacıkları hava katmanındaki atomlarla temas ettikçe enerji

kaybettiğinden, kaynak ile kişi arasındaki hava katmanı kalkan olarak kullanılabilir (Gängör, 1991). Yüksüz oldukları için gama ışınları özellikle nüfuz edicidir. Gama ışınları, kurşun, demir ve beton gibi büyük atom numaralarına sahip malzemeler kullanılarak zırhlanabilir (Göksel, 1973).

2.4. Gama Işınlarının Madde İle Etkileşimi

Gama ışınlarının zararlı etkilerinden korunmak için madde ile etkileşimlerini incelemek ve anlamak çok önemlidir. Gama ışınlarının saçılmasına veya soğurulmasına neden olabilecek bir dizi süreç vardır. Etkileşme türleri,

- I. Atomik elektronlar ile etkileşme
- II. Nükleonlarla etkileşme
- III. Çekirdekleri veya elektronları çevreleyen elektrik alan ile etkileşme
- IV. Nükleonları çevreleyen mezon alanı ile etkileşme

olarak gruplandırılırken, etkileşme etkileri de

- a. Tam soğurulma
- b. Elastik (esnek) saçılma
- c. İnelastik (esnek olmayan) saçılma

olarak gruplandırılabilir.

Etkileşme türleri ve etkileşme etkileri kombine edildiğinde gama ışınlarının soğurulabileceği veya saçılabilceği teoride 12 farklı sürecin varolduğu sonucuna ulaşılır. Bu süreçlerin birçoğu nadiren gerçekleşir. Nükleer geçişlerde en sık karşılaşılan enerji aralığında, örneğin 0,01 ila 10 MeV arasında, çok küçük etkilerin birkaçı hariç hepsinin yukarıdaki 12 süreçten sadece üçü üzerinden açıklanabilir olduğu ortaya koyulmuştur.

Bunlar Compton saçılması (*Ic*), Fotoelektrik etkileşme (*Ia*) ve çift oluşumdur (*IIla*). Bu üç etkileşme kısım 2.4.1, 2.4.2 ve 2.4.3'te ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Özel durumlarda araştırmacıların ilgilenebilecekleri minör etkili diğer süreçler aşağıdaki gibidir:

Rayleigh Saçılması (Ib): 0,1 MeV ve üzeri enerjilerde bile sıkıca bağlı atomik elektronlar tarafından elastik koherent saçılma, ağır elementlerde önemli olabilir. İzin verilen Rayleigh saçılma açıları her zaman küçüktür, çünkü atoma verilen geri tepme atomik uyarılma veya iyonizasyon üretmemelidir. Küçük $h\nu$ ve büyük Z için Rayleigh saçılma tesir kesitleri (White, 1952) tarafından sayısal tablolar halinde verilmiştir.

Çekirdek tarafından Thomson saçılması (2b): Thomson saçılması Rayleigh saçılması ile uyumlu bir şekilde birleştirilebilir. Çekirdeğin büyük kütlesi nedeniyle, etkiler küçüktür ancak tespit edilebilir görünmektedir.

Delbruck Saçılması (IIlb): Delbruck saçılması veya elastik "nükleer potansiyel saçılması", çekirdek alanında sezilgen elektron çifti oluşumundan kaynaklanır.

Nükleer Rezonans Saçılması (IIc): Bu tür saçılma, bir nükleer seviyenin gelen bir foton tarafından uyarılmasını ve ardından uyarma enerjisinin yeniden yayılmasını içerir. Birçok başarısız araştırmadan sonra, saçılma rezonansı ile örtüşecek kadar geniş bir Doppler genişlemeli emisyon çizgisi üretmek ve böylece nükleer rezonans saçılmasını tespit etmek için uygun koşullar bulunmuş gibi görünmektedir.

Çekirdeklerin Fotoparçalanması (IIa): Foto parçalanma ya da "nükleer fotoetki", foton enerjisinin nötron ya da protonun koparılma enerjisini aştığı her durumda enerji bakımından mümkündür. $Be^9(\gamma, n)$ ve $H^2(\gamma, n)$ hariç, bu etkiler genellikle yaklaşık 8 MeV'in üzerindeki yüksek enerji bölgesiyle sınırlıdır. Foto parçalanma enerji

bakımından mümkün olsa bile, tesir kesitleri Compton saçılması ve nükleer çift oluşumu tesir kesitlerine kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir.

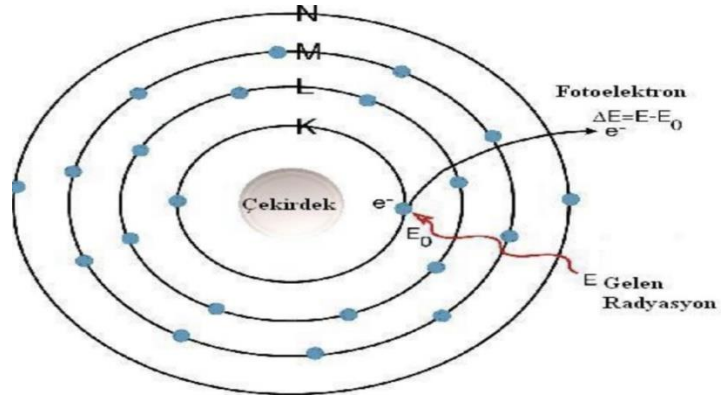
Mezon Üretimi (IVa): Mezon üretimi yaklaşık 150 MeV'in üzerindeki foton enerjilerinde mümkündür. Bu durumda bile tesir kesitleri diğer etkileşme süreçlerine kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir ($\sim 10^{-3}$ barn/atom) (Evans, 1955).

2.4.1. Fotoelektrik etkileşme

Fotoelektrik etki, bir fotonun bir atom tarafından soğurulması ve bunun sonucunda atomun yörüngesindeki elektronlardan birinin dışarı atılmasıyla meydana gelir (Şekil 2.5). Bu süreçte fotonun tüm enerjisi ($h\nu$) önce atom tarafından soğurulur ve ardından atomik elektrona aktarılır. Fırlatılan elektronun (fotoelektron olarak adlandırılır) kinetik enerjisi $h\nu - E_B$ 'ye eşittir, burada E_B elektronun bağlanma enerjisidir. Bu etkileşme K, L, M veya N kabuklarındaki elektronlarla gerçekleşebilir. Elektron atomdan atıldıktan sonra, kabukta bir boşluk oluşur ve atomu uyarılmış bir durumda bırakır. Boşluk, karakteristik bir X-ışını emisyonu ile bir dış yörünge elektronu tarafından doldurulabilir.

$$E_{\text{foton}} = E_B + KE_{\text{fotoelektron}} \quad (2.1)$$

$$KE_{\text{fotoelektron}} = E_{\text{foton}} - E_B \quad (2.2)$$

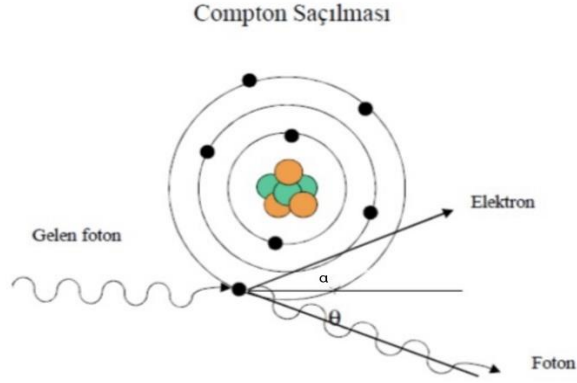


Şekil 2.5. Fotoelektrik Etkileşme (Ersöz, 2014).

2.4.2. Compton saçılması etkileşme

Foton, Compton saçılması sürecinde bir atomik elektronla "serbest" bir elektronmuş gibi etkileşime girer, bu da elektronun bağlanma enerjisinin bombardıman eden fotonun enerjisinden çok daha düşük olduğu anlamına gelir. Elektron bu temas sırasında fotondan bir miktar enerji kazanır ve α açısıyla saçılır (Şekil 2.6). Foton, enerjisi azalmış olarak θ açısında saçılır. Compton süreci iki parçacığın, bir foton ve bir elektronun çarpışması olarak tanımlanabilir. Aşağıdaki bağıntılar enerji ve momentumun korunumu ilkeleri kullanılarak türetilir:

$$E = h\nu_0 \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (2.3)$$



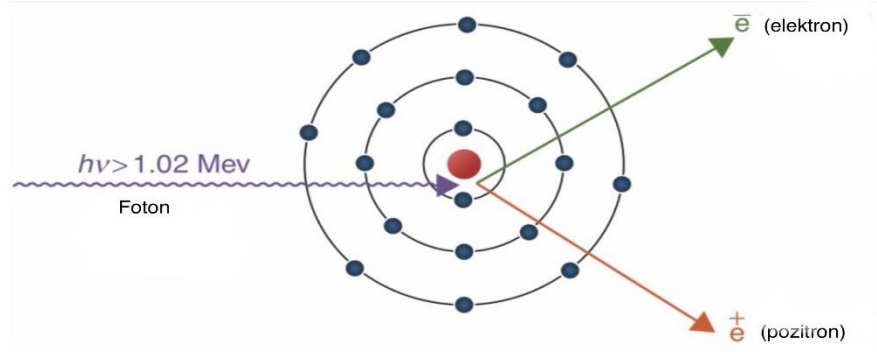
Şekil 2.6. Compton Saçılması (Gedik, 2014).

$$h\nu' = h\nu_0 = \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (2.4)$$

Burada $h\nu_0$, $h\nu'$ ve E sırasıyla gelen fotonun, saçılan fotonun ve elektronun enerjileridir. Ayrıca, $\alpha = h\nu_0/m_0c^2$ ve m_0c^2 elektronun durgun kütle enerjisidir (0,511 MeV). Eğer $h\nu_0$ MeV cinsinden ifade edilirse, $\alpha = h\nu_0/0,511$ olur.

2.4.3. Çift oluşumu

Fotonun enerjisi 1,02 MeV'den fazla ise, çift oluşum mekanizması yoluyla madde ile etkileşime girebilir. Foton bu süreçte atom çekirdeğinin elektromanyetik alanıyla güçlü bir etkileşime girer (Şekil 2.7) ve negatif bir elektron (e^-) ile pozitif bir elektrondan (e^+) oluşan bir çift oluşturma sürecinde tüm enerjisini kaybeder.



Şekil 2.7. Çift Oluşumu (Khan, 2014).

Elektronun durgun kütle enerjisi 0,511 MeV olduğundan, elektron çifti oluşturmak için minimum 1,022 MeV'lik bir enerji gereklidir. Sonuç olarak, çift oluşum süreci 1,022 MeV'lik bir eşik enerjisine sahiptir. Artan foton enerjisi parçacıklar arasında kinetik enerji olarak paylaşılır. Elektron-pozitron çifti için mevcut olan toplam kinetik enerji ($h\nu - 1,02$) MeV ile verilir. Parçacıklar, gelen fotona göre ileri yönde yayılma eğilimindedir. Herhangi bir enerji dağılımı düşünülebilir olsa da, en olası enerji dağılımı her bir parçacığın mevcut kinetik enerjinin yarısını kazanmasıdır. Nadiren, bir parçacık enerjinin tamamını alırken diğeri hiç enerji almayabilir. Einstein'ın $E = mc^2$ denkleminde öngörüldüğü gibi, çift oluşum süreci enerjinin kütleye dönüştüğü bir olay örneğidir. Bir pozitron ve bir elektron birleşerek iki foton ürettiğinde, kütlenin enerjiye dönüştürülmesi süreci yok olma olayı olarak bilinir (Khan, 2014).

2.5. Elektromanyetik Radyasyonun Absorpsiyonu

Radyasyonun türü ne olursa olsun, radyasyon yayıldığı ortama enerji aktararak çeşitli etkileşimlere neden olur. Fotonların madde içinde enerji kaybetmelerine ve malzemenin enerji depolamasına neden olan birincil etkileşimler arasında Fotoelektrik etkileşme, Compton saçılması ve çift oluşumu yer alır. Fotonlar madde ile etkileşime girdikçe Thomson saçılması, Rayleigh saçılması, Delbruck saçılması, Nükleer rezonans saçılması, Nükleer foto-parçalanma ve Mezon oluşumu da gerçekleştirebilirler. Bu saçılma etkileşmelerine zayıf etkileşmeler denir. Yüksek enerjili nükleer fotofragmentasyon ve mezon üretimi zırh

tasarımlarında ve radyasyondan korunma uygulamalarında dikkate alınması gereken etkileşimlerdir.

Madde ile foton etkileşimleri yüklü parçacık etkileşimlerinden oldukça farklıdır. Fotonlar maddeye nüfuz ederken bazıları soğurulur, bazıları etkileşime girmeden taşınır ve bazıları da düşük enerjili fotonlar gibi gelen fotonunkinden farklı, çeşitli yönlerle saçılır. Bu süreçlerin gerçekleşme olasılığı, gelen fotonunun enerjisine, etkileşeceği malzemeye ve deneysel koşullara büyük ölçüde bağlıdır (Alım vd, 2020).

2.5.1. Lineer (μ) ve kütle (μ_m) zayıflatma katsayıları

Fotoelektrik etkileşme, Compton saçılması, çift oluşumu ve diğer etkileşimler nedeniyle, gama ve X-ışını şiddeti bir malzeme içinden geçerken azalır ve bu azalma üsteldir. Başlangıç şiddeti I_0 olan bir foton demeti dx kalınlığındaki bir malzemeden geçtiğinde, şiddeti dI kadar azalır. Denklem (2.5), ışın şiddetindeki azalmanın fotonun içinden geçtiği malzemenin kalınlığıyla nasıl doğrudan ilişkili olduğunu açıklar.

$$dI = -\mu I_0 dx. \quad (2.5)$$

$$dI/I_0 = -\mu dx. \quad (2.6)$$

Dar bir foton demetinin x kalınlığındaki bir soğurucudan geçerken foton şiddetindeki değişimi, Denklem (2.6)'y sınırlı bir x kalınlığı boyunca integralini alarak aşağıdaki şekilde hesaplayabiliriz.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.7)$$

Bu üstel ilişkiye göre, bir foton demetiasla tamamen soğurulamaz. Bununla birlikte, pratikte, demetin şiddeti üstel zayıflatma veya soğurma yasasına göre tespit edilemeyecek seviyelere düşürülebilir. Lineer zayıflatma katsayısı, soğurucu ortamdaki birim uzunluk başına

etkileşme olasılığını verir. Birimi cm^{-1} 'dir. Toplam lineer zayıflatma katsayısı (μ), Fotoelektrik etkileşme (τ), Compton saçılması (σ) ve çift oluşumu (κ) katsayılarının toplamıyla denklem (2.8) ile verilir.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.8)$$

Lineer zayıflatma katsayısının maddenin yoğunluğuna (ρ) oranıkütle zayıflatma katsayısı olarak tanımlanır ve μ_p ($\mu_p = \mu / \rho$) ile gösterilir (Kaplan, 1989).

2.5.2. Yarı-değer (HVL) ve onda-bir değer (TVL) kalınlıkları

Bir koruyucu malzemenin ya da zırh malzemesinin yarı-değer kalınlığı (HVL), bu malzeme ile etkileşme gerçekleştiren monoenerjik fotonların başlangıç şiddetinin (I_0) yarısına ($I = \frac{I_0}{2}$) düşmesi için gereken malzeme kalınlığıdır. Birçok radyasyon uygulamasında kullanılan bir parametredir. Herhangi bir malzeme için monoenerjik fotonun yarı-değer kalınlığının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}} \quad (2.9)$$

Böylece, yarı-değer kalınlığı için Eşitlik (2.10) elde edilir (Alım vd, 2020).

$$X_{1/2} = HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (2.10)$$

Benzer şekilde, onda-birdeğer kalınlığı (TVL), radyasyonun başlangıç şiddetinin %10'una düşmesi için gerekli soğurucu madde kalınlığı olarak tanımlanır ve herhangi bir malzeme için onda-birdeğer kalınlığı Eşitlik (2.11) kullanılarak belirlenir (Krane, 2001).

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2.11)$$

2.5.3. Ortalama serbest yol (MFP)

Birimi cm olan ortalama serbest yol parametresi, foton-madde etkileşimi sırasında fotonların iki ardışık etkileşimi arasındaki ortalama mesafe olarak tanımlanır. Rahatlama uzunluğu (λ) olarak da adlandırılabilir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir (Alım vd, 2020).

$$\text{MFP} = \lambda = \frac{1}{\mu} \quad (2.12)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Günümüzde radyasyondan korunma nükleer çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Light Beige (LB), Ottoman Bordeaux (OB), OliveMarone (OM), O.Beyaz (OB), Adranos black (AB), Emperador (EA) ve Kleos Travertin (KT) isimli yedi farklı doğal Türk Mermer örneğinin ^{60}Co , ^{241}Am , ^{137}Cs ve ^{22}Na radyoaktif kaynaklarından yayınlanan gama ışınları için zırlama özelliklerini belirlemek ve radyasyondan korunmada zırh malzemesi olarak kullanılıp kullanılamayacağını araştırmaktır.

3.1. Deneyde Kullanılan Gama Işını Kaynakları

Mermer örneklerine ait zırlama parametrelerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen deneylerde dört farklı gama ışını kaynağı kullanılmıştır. Bu kaynaklar, çeşitli nükleer uygulamalarda yaygın olarak kullanılan,

➤ ^{60}Co

➤ ^{241}Am

➤ ^{137}Cs

➤ ^{22}Na

radyoizotoplarıdır.

Kobalt-60 (^{60}Co) kaynağı 1173,2 keV ve 1332,5 keV olmak üzere çift enerjili bir radyoizotoptur. Yarılanma ömrü 5,26 yıldır. Endüstri ve tıpta farklı amaçlar için yaygın olarak kullanılır (Ağma, 2003).

Amerisyum-241 (^{241}Am) yarılanma ömrü 432 yıldır. Amerisyum -241 kaynağı makine ve teçhizatın tahribatsız muayenesinde ve cam endüstrisinde kalınlık ölçer olarak kullanılır (Jefferson Lab, 1997).

Sezyum-137 (^{137}Cs) tıbbi cihazlarda ve ölçümlerde kullanılır. Yarılanma ömrü 30 yıldır (NCEH, 2018). Tek enerjisi nedeniyle, bu 661,6 keV gama ışını kaynağı nükleer prosedürlerde, çalışmalarda kullanılır (Ağma, 2003).

Sodyum-22 (^{22}Na) kaynağı 511 keV ve 1274,5 keV olmak üzere çift enerjili bir radyoizotopdur. Kalibrasyon/ test ve araştırma amacıyla kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Ölçümlerde kullanılan radyoaktif kaynakların özellikleri

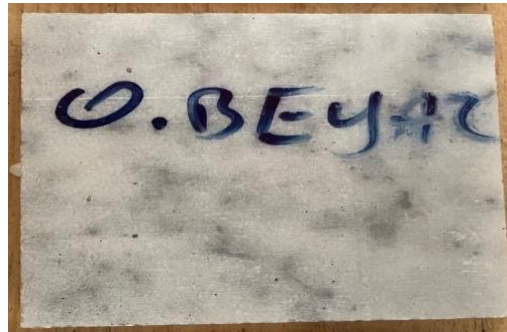
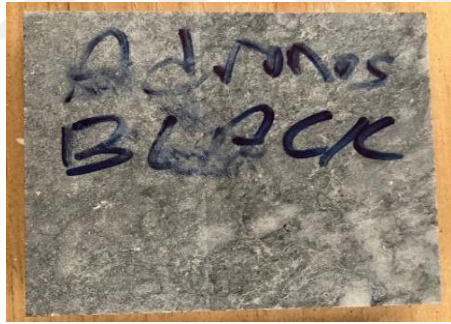
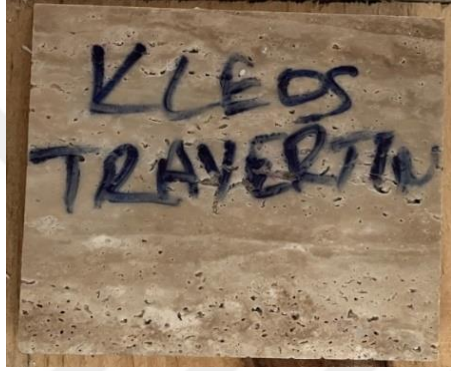
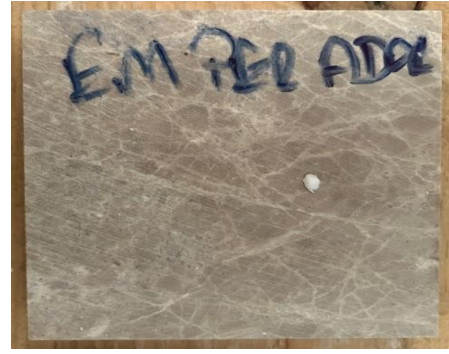
Nüklid	Enerji (keV)	Emisyon Olasılığı (%)	Etkinlik (kBq)	Yarılma Ömrü (yıl)	Referans Tarihi
Am-241	59,5	35,92	74	432,6	19/12/2006
Cs-137	661,6	85,1	333	30,08	
Na-22	1274,5	99,94	74	2,6018	
Co-60	1173,2	99,85	74	5,2711	
	1332,5	99,9826			

3.2. Zırh malzemeleri

Deneylerde kullanılan mermer örnekleri Bursa bölgesine ait olup, Altınsoy Madencilik ve Tic. A.Ş.'ye ait ocaklarda üretilmiş, 10 cm × 10 cm × 2 cm ölçülerinde kesilmiş ve ebatlandırılmıştır. Gama ışınları için farklı bileşime sahip mermerlerin zırhlama özelliklerini incelemek amacıyla mümkün olduğunca farklı oranlarda kimyasal bileşenlere sahip mermerler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan mermerlerin yoğunluk değerleri ve kimyasal bileşimleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Mermer örneklerinin kimyasal analizleri Akredite Doğal Taş Analiz Laboratuvarı'nda üretici firma tarafından gerçekleştirilmiştir (Akbal S., 1999).

Çizelge 3.2. Mermerlerin örneklerinin yoğunluk değerleri ve kimyasal kompozisyonu (Altınsoy Marbel)

Element %	Mermer Örnekleri						
	Light Beige	Ottoman Bordeux	Olive Marone	O.Beyaz	Adranos black	Emper- ador	Kleos Travertine
Yoğunluk (g/cm³)	2,679	2,816	2,679	2,685	2,755	2,637	2,533
CaO	55,69	44,6000	55,56	56,20	59,1102	34,50	56,10
MgO	0,61	3,8100	0,34	0,11	0,1525	17,10	0,22
Na ₂ O	0,09	0,2040	0,09	0,09	-	0,07	0,09
K ₂ O	0,13	0,0444	0,11	0,24	-	0,21	0,16
TiO ₂	0,01	-	0,02	0,01	-	-	0,004
SiO ₂	-	5,4400	0,25	-	0,1185	0,24	-
Al ₂ O ₃	-	1,0800	0,27	-	0,0527	0,10	-
Fe ₂ O ₃	-	6,1800	0,12	-	0,0438	0,06	-
P ₂ O ₅	-	0,0485	-	-	-	0,02	-
SO ₃	-	0,0546	-	-	-	0,12	-
NiO	-	0,0999	-	-	-	-	-
MnO	-	0,0583	-	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0,3600	-	-	-	-	-
V ₂ O ₅	-	0,0183	-	-	-	-	-
SrO	-	0,0297	-	-	0,0660	0,02	-
Cl	-	-	-	-	0,0093	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	0,01	-
F	-	-	-	-	-	0,67	-



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan mermer örnekleri.

3.3. Radyasyon Ölçüm Sistemi

Bursa Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Anabilim dalı laboratuvarında kullanılan, OUAP (F)-2016/10 numaralı bilimsel araştırma projesi (BAP) imkanları dahilinde Nel Elektronik Cihazlar İmalat ve Tic.A.Ş.'den temin edilmiş olan Ortec (9054) 3"x3" sodyum iyodür (NaI) sintilasyon dedektörü ve sintilasyon dedektörü için 14 pin PMT ana modül, dijital MCA, Ön yükseltici, Yüksek voltaj kaynağı ve maestro yazılımı kullanılmıştır. Kullanılan dedektör sistemi Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

NaI kristali nem tutucu olduğundan, fotomultiplier ile optik temas sağlayan tarafı hariç tüm yüzeyini kaplayan bir alüminyum plakaya sahiptir. Bu plakanın iç yüzeyi magnezyum oksitle kaplıdır ve ışık yansıtıcı görevi görür. Kristal içinde, bir yük veya foton tarafından oluşturulan ilk iyonizasyonun bir sonucu olarak serbest elektronlar yaratılır. Bu elektronların kristalin atomlarına veya moleküllerine bağlanması, 3300 ila 5000 Angstrom arasında değişen görünür dalga boylarında ışık yayılmasına yol açar. Bu ışınlar fotoçoğaltıcı tüpün fotokatoduna çarpar. Fotokatodun yüzeyi ince bir Cs-Antimon alaşımı tabakası ile kaplanmıştır. Foto çoğaltıcı 800-1500 volt arasında çalışacak şekilde ayarlanır ve her bir çoğaltıcının voltajı sırayla artar. Radyasyonu tespit etmek için ışık dağılımının bir yük darbesine dönüştürülmesi gerekir. Bu amaçla fotoçoğaltıcı tüpler ve bir sintilatör kullanılır. Tüpün katoduna ulaşan sintilasyon fotonları elektronlara dönüştürülür. Tüp anodu daha sonra bir yük darbesi üretir. Dedektör çıkış darbe yüksekliği absorbe edilen enerji ile orantılıdır. Bir sintilasyon NaI kristali ve bir foto çoğaltıcı tüp doğrudan NaI (TI) sintilasyon dedektörünün arkasına bağlanır. NaI sintilatöründeki yüksek iyot atom numarası, büyük gama ışını algılama verimliliği sağlar. NaI (TI) dedektörü, kristale talyumun aktive edilmesiyle üretilir (Özavci, 2017).

Sintilasyon tabanlı NaI (TI) dedektörleri, gama ışınlarını daha yüksek tespit etme verimlilikleri nedeniyle tıbbi ve endüstriyel alanlar da dahil olmak üzere radyasyon spektroskopisi ve radyoizotop bazlı uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ortec Maestro: “MAESTRO, çok çeşitli endüstriyel, öğretim, araştırma ve diğer bilimsel uygulamalardaki gama ve alfa spektroskopi sistemleriyle uyumlu bir çok kanallı analizör (MCA) "emülasyon" yazılım paketidir. Diğer ORTEC uygulama yazılımlarında olduğu gibi MAESTRO da donanım kontrol işlevleri, veri toplama ve yerel alan ağı üzerinden 250'ye kadar dedektör sistemi için otomasyon dahil olmak üzere cihaz kontrolünü kolaylaştırmak için CONNECTIONS yazılım/donanım yazılımı katmanını kullanır. MAESTRO, temel spektroskopi uygulamaları için mükemmel bir seçimdir ve çoğu ORTEC Çok Kanallı Analizör ile standart olarak gelir (<https://www.ortec-online.com/products/application-software/maestro-mca>).

DigiBASE: DigiBASE, NaI (TI) sintilasyon dedektörleri ile gama ışını spektroskopisi uygulamaları için 14 pinli bir foto çoğaltıcı tüp tabanıdır. DigiBASE'in benzersiz konsepti, minyatürleştirilmiş bir ön amplifikatör ve dedektör yüksek voltajını (0 ila +1200 V bias) güçlü dijital sinyal işleme, çok kanallı analizör ve ince zaman çözünürlüğü ölçümleri için özel özelliklerle birleştirir. Hepsi düşük güçlü (<500 mA), hafif (10 oz, 280 g), küçük boyutlu (63 mm çap × 80 mm uzunluk) USB bağlantılı bir tüp tabanında bulunur. NaI (TI) dedektörünüze bağlanmak için ihtiyacınız olan herşey tüp tabanına dahildir. DigiBASE, MAESTRO MCA emülasyon yazılımını içerir ve eksiksiz kantitatif analiz için A66SV-BW GammaVision Gamma Spectroscopy for Scintillation Detectors ile birlikte kullanılabilir (<https://www.ortec-online.com/products/electronics/photomultiplier-tube-bases/digibase>).

3.4. Gama Işını Zırlama Deneyleri

Mermerlerin gama ışını soğurma ve zırlama özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla kütle zayıflatma katsayıları (MAC), lineer zayıflatma katsayıları (LAC), yarı-değer kalınlığı (HVL), onda-bir değer kalınlığı (TVL) ve ortalama serbest yol değerleri (MFP) gibi dikkate alınması gereken bazı temel gama ışını zayıflatma parametrelerinin hesaplanması için gama ışını transmisyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde kaynak-dedektör mesafesi 35 cm'de tutulmuş ve mermer örneği gama ışını kaynağı ile NaI (TI) dedektörü arasına yerleştirilmiştir. Mermer-dedektör ve mermer-kaynak mesafelerinin eşit olmasına dikkat

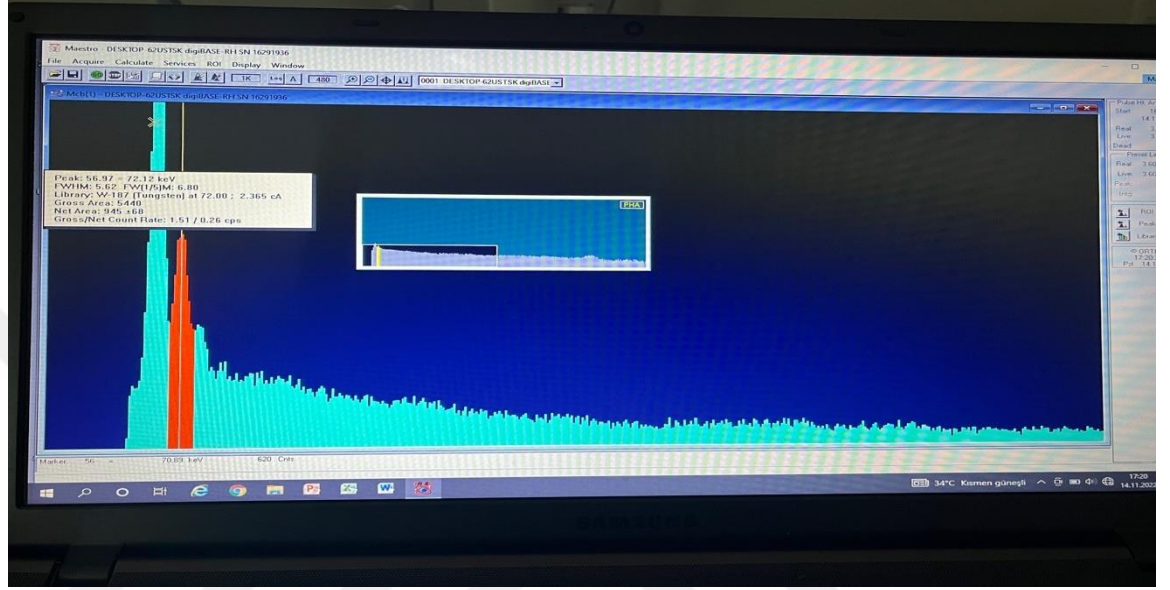
edilmiştir. Doğal fon etkilerini azaltmak için ölçüm sistemi 5 cm × 10 cm × 20 cm boyutlarında kurşun bloklar ile zırhlanmıştır. Mermer örneklerinden geçen gama ışınlarını tespit etmek için 3600 saniyelik ölçmeler yapılmıştır.



Şekil 3.2. Ölçüm sistemi.

Ölçümler sonucunda elde edilen spektrumların analizi, otomatik pik arama, pik değerlendirme, pik alanı hesabı ve enerji hesaplaması yapılabilen MAESTRO-32 çok kanallı analizör emülasyon yazılımı (Ortec, South Illinois Ave., ABD) ile gerçekleştirilmiştir. Örnek bir spectrum ve pik alanı hesabı Şekil 3.3'te verilmiştir. Öncelikle, kaynak ile dedektör arasında mermer örneği olmadan başlangıç sayımları elde edilmiştir (I_0). Daha sonra her bir malzemenin 5 farklı kalınlığı için ayrı ayrı sayımlar alınarak malzemedeki atkileşmeden geçen radyasyon şiddeti değerleri (I) elde edilmiştir. Deney süresince kaynak ve dedektör arasında malzeme varken alınan sayımlar, kaynak dedektör arasında malzeme yokken alınan sayımlara oranlanarak bağıl sayım sonuçlarına ulaşılmıştır (I/I_0). Analiz sonuçları kullanılarak gama ışınları için tüm zırhlama parametreleri arasında en yaygın kullanılan terim

olan lineer zayıflama katsayısı değerleri Beer-Lambert eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır (Gürler ve Tarım, 2019).



Şekil 3.3. Örnek spectrum ve Maestro programı ile net alan ölçümü (Kaynak: Am-241; Mermer örneği: Emperor).

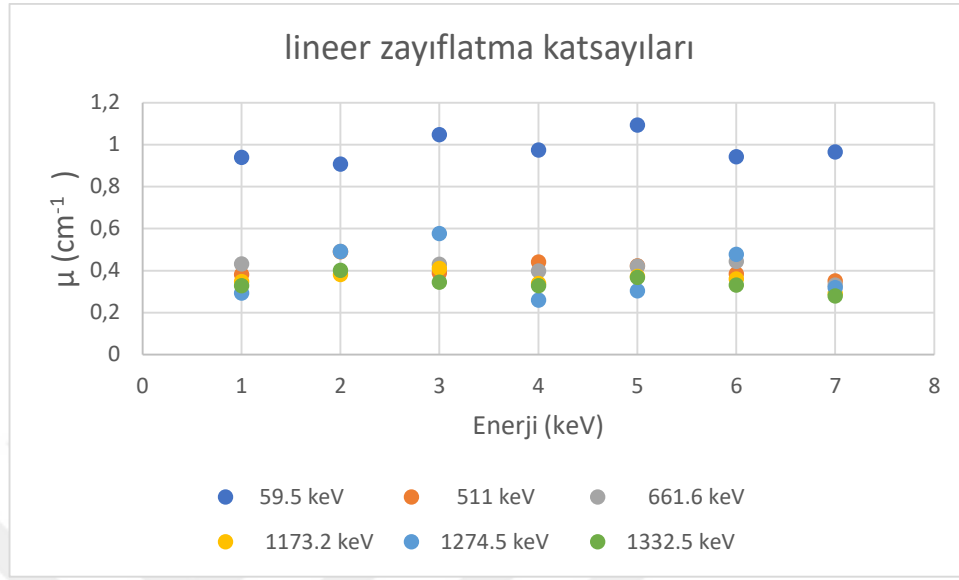
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tezde, elde edilen yedi farklı tipteki mermerlerin lineer soğurma katsayıları, kütle soğurma katsayıları, yarı-değer kalınlıkları, onda-bir değer kalınlıkları ve ortalama serbest yol değerleri Bursa Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Nükleer Fizik Araştırma Laboraturunda bir gama spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.1, dört farklı radyoaktif kaynaktan (^{241}Am , ^{22}Na , ^{137}Cs ve ^{60}Co) yayınlanan altı farklı enerjili fotonların (59,5 keV; 511 keV; 661,6 keV; 1173,2 keV; 1274,5 keV ve 1332,5 keV) gönderildiği farklı kimyasal bileşime sahip mermer formlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler halinde raporlanmıştır. İncelenen radyasyon zırlama parametreleri aşağıdaki gibi ayrı ayrı sunulmuştur (Bashter, 1997).

Maestro programı kullanılarak çalışılan tüm gama ışını enerjileri ve mermer örnekleri için elde edilen lineer zayıflatma katsayıları ve kütle zayıflatma katsayıları Çizelge 4.1 ve 4.2 'de verilmiştir. Ayrıca bu çizelgelerde sunulan veriler, Şekil 4.1 ve 4.2'de enerjinin bir fonksiyonu olarak da sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Mermer örneklerinin lineer zayıflatma katsayıları (μ)

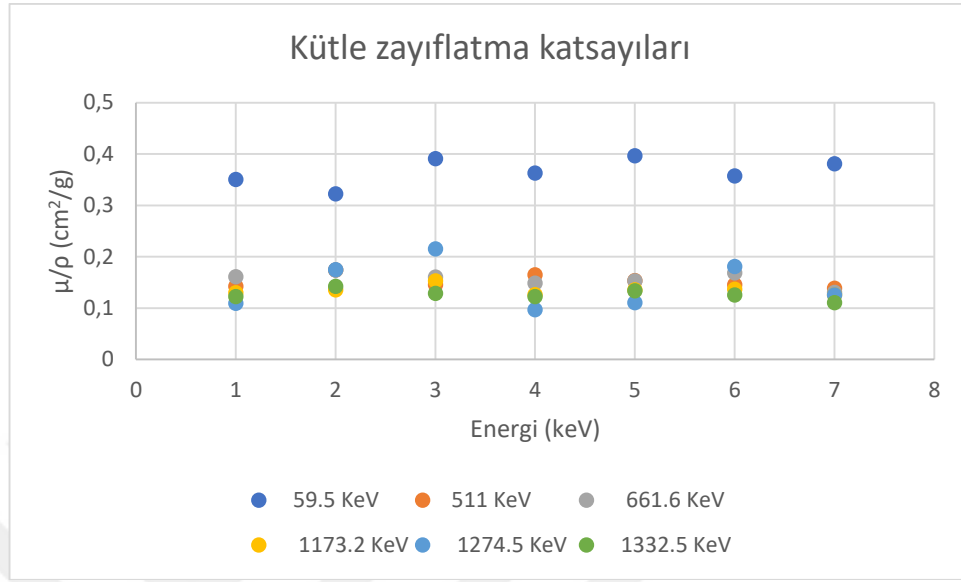
Kaynak	Am-241	Na-22(1)	Cs-137	Co-60(1)	Na-22(2)	Co-60(2)
Enerji	59,5 keV	511 keV	661,6 keV	1173,2 keV	1274,5 keV	1332,5 keV
Light Beige	0,9391	0,381	0,4307	0,3471	0,2921	0,3271
Ottoman Bordex	0,9069	0,4892	0,4903	0,3805	0,4907	0,4004
Olive Maron	1,0477	0,3892	0,4299	0,4092	0,5755	0,3439
O.Beyaz	0,9736	0,4411	0,3984	0,3378	0,2591	0,3279
Adriaos Black	1,093	0,4218	0,4202	0,372	0,3035	0,3671
Emper Aldo	0,9415	0,3836	0,4434	0,3599	0,4773	0,3309
Kleos Travertin	0,9649	0,3507	0,3302	0,2911	0,3181	0,2795



Şekil 4.1. Tüm mermer örnekleri için lineer zayıflatma katsayılarının enerji ile değişimi.

Çizelge 4.2. Mermer örneklerinin kütlezayıflatma katsayıları (μ/ρ)

Kaynak	Am-241	Na-22(1)	Cs-137	Co-60(1)	Na-22(2)	Co-60(2)
Enerji	59,5 keV	511 keV	661,6 keV	1173,2 keV	1274,5 keV	1332,5 keV
Light Beige	0,3505	0,1422	0,1607	0,1295	0,1090	0,1220
Ottoman Bordex	0,3220	0,1737	0,1741	0,1351	0,1742	0,1421
Olive Maron	0,3910	0,1452	0,1604	0,1527	0,2148	0,1283
O.Beyaz	0,3626	0,1642	0,1483	0,1258	0,0964	0,1221
Adrmos Black	0,3967	0,1531	0,1525	0,1350	0,1101	0,1332
Emper Aldo	0,3570	0,1454	0,1681	0,1364	0,1810	0,1254
Kleos Trayertın	0,3809	0,1384	0,1303	0,1255	0,1255	0,1103



Şekil 4.2. Tüm mermer örnekleri için kütle zayıflatma katsayılarının enerji ile değişimi.

Am-241 kaynağından yayınlanan 59,5 keV enerjili gama ışınları için en yüksek lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ), Adriaos Black numunesi için ($1,093 \text{ cm}^{-1}$ - $0,396733212 \text{ cm}^2/\text{g}$), en düşük lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ) ise Ottoman Bordex numunesi için ($0,9069 \text{ cm}^{-1}$ - $0,322052557 \text{ cm}^2/\text{g}$) bulunmuştur.

Na-22 kaynağından yayınlanan 511 keV enerjili gama ışınları için en yüksek lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ), Ottoman Bordex numunesi için ($0,4892 \text{ cm}^{-1}$ - $0,173721591 \text{ cm}^2/\text{g}$), en düşük lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ) ise Kleos Travertin numunesi için ($0,3507 \text{ cm}^{-1}$ - $0,138452428 \text{ cm}^2/\text{g}$) bulunmuştur.

Cs-137 kaynağından yayınlanan 661,6 keV enerjili gama ışınları için en yüksek lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ), Ottoman Bordex numunesi için ($0,4903 \text{ cm}^{-1}$ - $0,174112216 \text{ cm}^2/\text{g}$), en düşük lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ) ise Kleos Travertin numunesi için ($0,3302 \text{ cm}^{-1}$ - $0,130359258 \text{ cm}^2/\text{g}$) bulunmuştur.

Co-60 kaynağından yayınlanan 1173,2 keV enerjili gama ışınları için en yüksek lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ), Olive Maron numunesi için ($0,4092 \text{ cm}^{-1}$ - $0,152743561$

cm^2/g), en düşük lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ) ise Kleos Travertin numunesi için ($0,2911 \text{ cm}^{-1} - 0,125582313 \text{ cm}^2/\text{g}$) bulunmuştur.

Na-22 (2) kaynağından yayınlanan $1274,5 \text{ keV}$ enerjili gama ışınları için en yüksek lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ), Olive Maron numunesi için ($0,5755 \text{ cm}^{-1} - 0,214818962 \text{ cm}^2/\text{g}$), en düşük lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ) ise O.Beyaz numunesi için ($0,2591 \text{ cm}^{-1} - 0,096499069 \text{ cm}^2/\text{g}$) bulunmuştur.

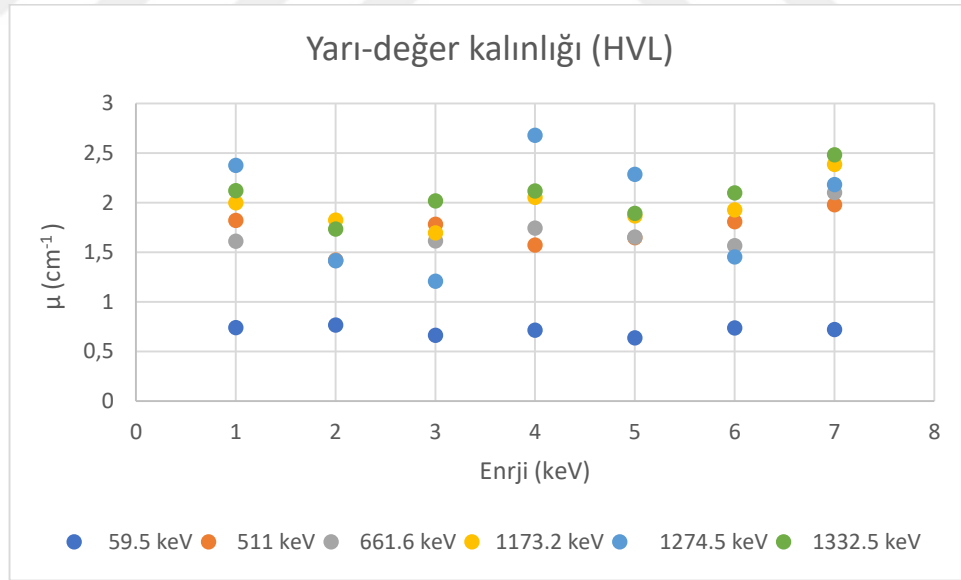
Co-60 (2) kaynağından yayınlanan $1332,5 \text{ keV}$ enerjili gama ışınları için en yüksek lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ), Ottoman Bordex numunesi için ($0,4004 \text{ cm}^{-1} - 0,1421875 \text{ cm}^2/\text{g}$), en düşük lineer ve kütle zayıflatma katsayıları (μ , μ/ρ) ise Kleos Travertin numunesi için ($0,2795 \text{ cm}^{-1} - 0,110343466 \text{ cm}^2/\text{g}$) bulunmuştur.

Çizelge 4.1 ve 4.2'den de görülebileceği üzere, Ottoman Bordex örneğinin 3 farklı gama ışını enerjisinde en yüksek lineer zayıflatma katsayısı değerlerine, Kleos Travertin örneğinin ise 4 farklı gama ışını enerjisinde en düşük lineer zayıflatma katsayı değerlerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yarı-değer kalınlığı, HVL, koruyucu malzemenin etkinliğini belirlemek için önemli bir parametredir; Eşitlik (2.14) uygulanarak hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir. HVL değerleri, foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak Şekil 4.3'te sunulmuş olup, burada tüm numuneler için foton enerjisindeki artışla birlikte yarı-değer katmanının arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.3. Mermer örneklerinin yarı-değer kalınlığı (HVL)

Kaynak	Am-241	Na-22(1)	Cs-137	Co-60(1)	Na-22(2)	Co-60(2)
Enerji	59,5 keV	511 keV	661,6 keV	1173,2 keV	1274,5 keV	1332,5 keV
Light Beige	0,7380	1,8192	1,6093	1,9969	2,3729	2,1190
Ottoman Bordex	0,7643	1,4168	1,4137	1,8216	1,4125	1,7311
Olive Maron	0,6615	1,7809	1,6123	1,6939	1,2044	2,0155
O.Beyaz	0,7119	1,5714	1,7398	2,0519	2,6752	2,1138
Adrios Black	0,6341	1,6433	1,6495	1,8632	2,2838	1,8881
Emper Aldo	0,7362	1,8069	1,5632	1,9259	1,4522	2,0947
Kleos Travertin	0,7183	1,9764	2,0991	2,3811	2,1790	2,4799



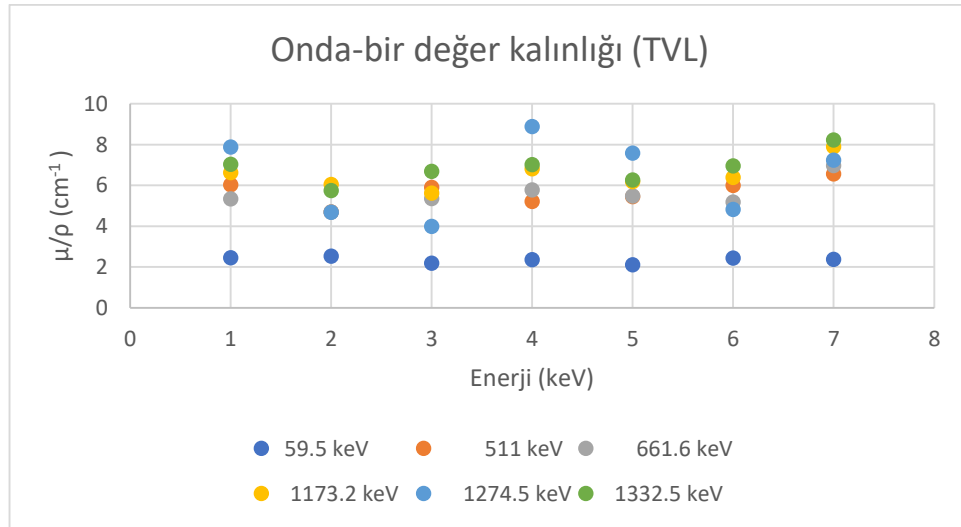
Şekil 4.3. Tüm mermer örnekleri için yarı-değer kalınlık değerlerinin enerji ile değişimi.

Çizelge 4.4'te gelen gama radyasyonunun şiddetini 10 kat azaltmak için gerekli soğurucu kalınlıklarının, yanionda-bir değer kalınlıklarının (TVL) deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil

4.4'te onda-bir değer kalınlıklarının enerjiye bağlı değişimi elde edilmiş ve literatür ile uyumlu sonuçlar gözlenmiştir.

Çizelge 4.4. Mermer örneklerinin onda-bir değerkalınlığı (TVL)

Kaynak	Am-241	Na-22(1)	Cs-137	Co-60(1)	Na-22(2)	Co-60(2)
Enerji	59,5 keV	511 keV	661,6 keV	1173,2 keV	1274,5 keV	1332,5 keV
Light Beige	2,4519	6,0435	5,3461	6,6337	7,8828	7,0393
Ottoman Bordex	2,5389	4,7068	4,6962	6,0514	4,6924	5,7507
Olive Maron	2,1977	5,9162	5,3560	5,6270	4,0010	6,6955
O.Beyaz	2,3650	5,2200	5,7795	6,8164	8,8868	7,0222
Adrios Black	2,1066	5,458	5,4797	6,1897	7,5867	6,2723
Emper Aldo	2,4456	6,0025	5,1930	6,3978	4,8241	6,9585
Kleos Travertın	2,3863	6,5656	6,9733	7,9099	7,2385	8,2382

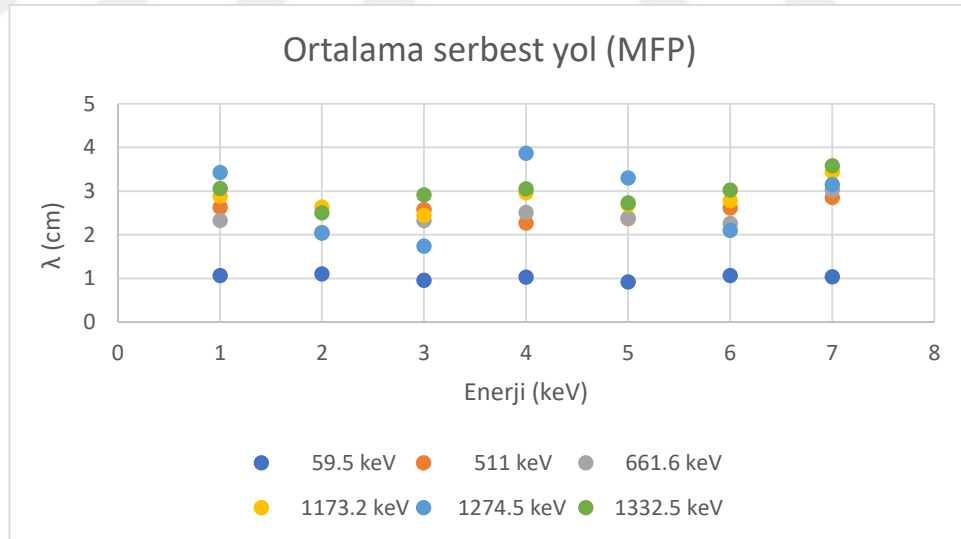


Şekil 4.4. Tüm mermer örnekleri için onda-bir değerkalınlıklarının enerji ile değişimi.

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.5'te tüm mermer örnekleri için ortalama serbest yol değerlerine ait deneysel sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.5. Mermer örneklerinin ortalama serbest yol değerleri (MFP)

Kaynak	Am-241	Na-22(1)	Cs-137	Co-60(1)	Na-22(2)	Co-60(2)
Enerji	59,5 keV	511 keV	661,6 keV	1173,2 keV	1274,5 keV	1332,5 keV
Light Beige	1,0648	2,6246	2,3218	2,8810	3,4234	3,0571
Ottoman Bordex	1,1026	2,0441	2,0395	2,6281	2,0379	2,4975
Olive Maron	0,9544	2,5693	2,3261	2,4437	1,7376	2,9078
O.Beyaz	1,0271	2,2670	2,5100	2,9603	3,8595	3,0497
Adrinos Black	0,9149	2,3707	2,3798	2,6881	3,2948	2,7240
Emper Aldo	1,0621	2,6068	2,2552	2,7785	2,0951	3,0220
Kleos Travertin	1,0363	2,8514	3,0284	3,4352	3,1436	3,5778



Şekil 4.5. Tüm marbel örnekleri için ortalama serbest yol kalınlık değerlerinin enerji ile değişimi.

Am-241 kaynağından yayınlanan 59,5 keV enerjili gama ışınları için en yüksek yarı-değer veonda-bir değerkalınlığı ile ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP) değerleri, Ottoman

Bordex numunesi için (0,7643 cm - 2,5389 cm - 1,1026 cm), en düşük yarı-değer ve onda-bir değer kalınlığı ile ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP) değerleri ise Adriaos Black numunesi için (0,6341 cm - 2,1066 cm - 0,9149 cm) bulunmuştur.

Na-22 (1) kaynağından yayınlanan 511 keV enerjili gama ışınları için en yüksek yarı-değer ve onda-bir değer kalınlığı ile ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP) değerleri, Kleos Travertin numunesi için (1,9764 cm - 6,5656 cm - 2,8514 cm), en düşük yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP) ise Ottoman Bordex numunesi için (1,4168cm - 4,7068 cm - 2,0441 cm) bulunmuştur.

Cs-137 kaynağından yayınlanan 661,6 keV enerjili gama ışınları için en yüksek yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP), Kleos Travertin numunesi için (2,0991 cm - 6,9733 cm - 3,0284 cm), en düşük yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP) ise Ottoman Bordex numunesi için (1,4137 cm - 4,6962 cm - 2,0395 cm) bulunmuştur.

Co-60 (1) kaynağından yayınlanan 1173,2 keV enerjili gama ışınları için en yüksek yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP), Kleos Travertin numunesi için (2,9099 cm - 7,9099 cm - 3,4352 cm), en düşük yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP) ise Olive Maron numunesi için (1,6939 cm - 5,6270 cm - 2,4437 cm) bulunmuştur.

Na-22 (2) kaynağından yayınlanan 1274,5 keV enerjili gama ışınları için en yüksek yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP), O.Beyaz numunesi için (2,6752cm - 8,8868 cm - 3,8595 cm), en düşük yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP) ise Olive Maron numunesi için (1,2044cm - 4,0010 cm - 1,7376 cm) bulunmuştur.

Co-60 (2) kaynağından yayınlanan 1332,5 keV enerjili gama ışınları için en yüksek yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP), Kleos Travertin

numunesi için (2,4799 cm - 8,2382 cm - 3,5778 cm), en düşük yarı-değer, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol (HVL,TVL ve MFP) ise Ottoman Bordex numunesi için (1,7311cm - 5,7507 cm - 3,5778 cm) bulunmuştur.



5. SONUÇ

Zırhlama, radyasyondan korunmanın önemli bir yolu olduğundan uygun zırh malzemelerinin geliştirilmesi günümüz araştırmacıları için oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada özellikle Marmara bölgesinde yaygın olarak kullanılan yedi farklı mermer örneği Altınsoy Madencilik ve Tic. A.Ş.den temin edilmiş ve bunların gama ışını zırhlama özellikleri araştırılmıştır.

Bu çalışma, Light Beige, O.Beyaz, Olive Maron, Ottoman Bordex, Adriaos Black, Emper Aldo ve Kleos Travertin isimli mermer örneklerinin çeşitli enerjilerdeki gama ışınlarının zırhlamasında kullanılabilirliğini göstermek için dört farklı gama ışını kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

59,5 keV foton enerjisi için, Adriaos Black mermeri ($\mu=1,093 \text{ cm}^{-1}$, $\mu/\rho= 0,3967 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\text{HVL}= 0,6341 \text{ cm}$, $\text{TVL} = 2,1066 \text{ cm}$, $\text{MFP}=0,9149 \text{ cm}$), örneklerimizden ottoman Bordex için elde edilen lineer ve kütle zayıflatma katsayısı, HVL, TVL ve MFP değerleri ile daha iyi radyasyonu zayıflatma parametrelerine sahiptir.

511 keV foton enerjisi için, Ottoman Bordex mermeri ($\mu= 0,4892 \text{ cm}^{-1}$, $\mu/\rho= 0,1737 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\text{HVL}=1,4168 \text{ cm}$, $\text{TVL}= 4,7068 \text{ cm}$, $\text{MFP}= 2,0441 \text{ cm}$), örneklerimizden Kleos Trayertın için elde edilen lineer ve kütle zayıflatma katsayısı, HVL, TVL ve MFP değerleri ile daha iyi radyasyonu zayıflatma parametrelerine sahiptir.

661,6 keV keV foton enerjisi için, Ottoman Bordex mermeri ($\mu= 0,4903 \text{ cm}^{-1}$, $\mu/\rho= 0,1741 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\text{HVL}= 1,4137 \text{ cm}$, $\text{TVL}= 4,6962 \text{ cm}$, $\text{MFP}= 2,0395 \text{ cm}$), örneklerimizden Kleos Trayertın için elde edilen lineer ve kütle zayıflatma katsayısı, HVL, TVL ve MFP değerleri ile daha iyi radyasyonu zayıflatma parametrelerine sahiptir.

1173,2 keV foton enerjisi için, Olive Maron mermeri ($\mu = 0,4092 \text{ cm}^{-1}$, $\mu/\rho = 0,1527 \text{ cm}^2/\text{g}$, HVL= 1,6939 cm, TVL= 5,6270 cm, MFP= 2,4437 cm), örneklerimizden Kleos Trayertın için elde edilen lineer ve kütle zayıflatma katsayısı, HVL, TVL ve MFP değerleri ile daha iyi radyasyonu zayıflatma parametrelerine sahiptir.

1274,5 keV foton enerjisi için, Olive Maron mermeri ($\mu = 0,5755 \text{ cm}^{-1}$, $\mu/\rho = 0,2148$, HVL= 1,2044 cm, TVL= 4,0010 cm, MFP= 1,7376 cm), örneklerimizden O.Beyaz için elde edilen lineer ve kütle zayıflatma katsayısı, HVL, TVL ve MFP değerleri ile daha iyi radyasyonu zayıflatma parametrelerine sahiptir.

1332,5 keV foton enerjisi için, Ottoman Bordex mermeri ($\mu = 0,4004 \text{ cm}^{-1}$, $\mu/\rho = 0,1421 \text{ cm}^2/\text{g}$, HVL= 1,7311cm, TVL= 5,7507 cm, MFP= 3,5778 cm), örneklerimizden Kleos Trayertın için elde edilen lineer ve kütle zayıflatma katsayısı, HVL, TVL ve MFP değerleri ile daha iyi radyasyonu zayıflatma parametrelerine sahiptir.

Bu tez çalışması ile zırhlama ile ilgili araştırmalara katkıda bulunacak bilgiler elde edilmiştir ve ileride yapılacak zırhlama çalışmaları için teşvik edici olacağı umut edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ağma, N. (2003). Radyasyon çalışanlarının maruz kalabilecekleri parmak ve el ışınlamasına ilişkin üç farklı gama radyoizotop için bir inceleme. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Akbal, S. (1999). Toprak numunelerde foton zayıflatma katsayısının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Akbulut, S., Sehhatigdiri, A., Eroglu, H., Çelik, Ş. (2015). A research on the radiation shielding effects of clay, silica fume and cement samples. Radiation Physics and Chemistry, 117, 88-92.
- Akkurt, I., Kilincarslan, S., & Basyigit, C. (2004). The photon attenuation coefficients of barite, marble and limra. Annals of Nuclear Energy, 31, 577-582.
- Akkurt, I., Akyildirim, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., Basyigit, C. (2010). Gamma- ray shielding properties of concrete including barite at different energies. Progress in Nuclear Energy, 52, 620-623.
- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., Basyigit, C. (2010). Radiation shielding of concrete containing zeolite. Radiation Measurements, 45, 827-830.
- AMETEK ORTEC, Nuclear Instrumentation, <https://www.ortec-online.com/products/application-software/maestro-mca>
- AMETEK ORTEC, Nuclear Instrumentation, <https://www.ortec-online.com/products/electronics/photomultiplier-tube-bases/digibase>
- Alam M.N., Miah M.M.H., Chowdhury M.I., Kamal M., Ghose S., Rahman R. (2001). Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276-1332 keV. Applied Radiation and Isotopes, 54, 973-976.
- Algüneş, Ç. (2002). Radyasyon biyofiziği. Edirne: Trakya Üniversitesi Rektörlüğü Yayınları, 51, 59-62.
- Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M.I., Demir, L. (2020). Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I. Radiation Physics and Chemistry, 166, 108455.
- Altınsoy Marbel, <http://www.altinsoy.com.tr/index.php?Dil=EN&Kid=5>
- Aral, İ. (2019). Alumina ve zirkonya esaslı seramiklerin nükleer zırhlama kabiliyetlerinin MCNP-X kodu ile araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi.

Aybers, N., & Karasulu, M. (1980). Nükleer enerjiye giriş. Nükleer Enerji Enstitüsü Genel Yayınlar No: 15, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Bashter, I.I. (1997). Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes. *Annals of Nuclear Energy*, 24, 1389-1401.

Basyigit, C., Akkurt, I., Kılınçarslan, Ş., Akkurt, A. (2005). Investigation of photon attenuation coefficients for marble. *Journal of Radiological Protection*, 25, 189-92.

Cember, H., & Johnson, T.E. (2009). Introduction to health physics (4th Edition). External Radiation Safety, The McGraw-Hill Companies, 873p.

Çimen, B., Erdoğan, M., & Oğul, R. (2017). İyonlaştırıcı radyasyon ve korunma yöntemleri. *Fen Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Dergisi*, 43, 139-147.

Davisson, C. M. (1965). Interaction gamma radiation with matter. *Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy*, 1, 37-38.

Gedik, S. (2014). Gözenekli malzemelerde radyasyonun zayıflaması. Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Demir F. (2010). Determination of mass attenuation coefficients of some boron ores at 59,54 keV by using scintillation detector, *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 175–179.

Ersöz, O. (2014). Tungsten polimer kompozitin gama ışın zırlama malzemesi olarak etkinliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi.

Evans, R. D. (1955). *The Atomic Nucleus*. McGraw-Hill Book Company Inc., New York, Toronto, London, 972p.

Göksel, S.A. (1973). Radyasyon korunması için temel güvenlik standartlar. Başbakanlık Atom Enerjisi Komisyonu Yayınları 6.

Gurler, O., & Tarim, U.A. (2019). Potential use of concretes for gamma-ray shielding. *Bursa Uludag University, Fresenius Environmental Bulletin*, 28, 10029-10034.

Güngör, N. (1991). Sağlık fizigi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Yayınları, İstanbul.

Günoğlu, K., & Akkurt, I. (2013). Isparta’da çıkarılan andezit ve bazalt kayalarının radyasyon soğurma özelliklerinin incelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17, 59-62.

Hatipoğlu, D. (2017). Kalker tozu, Kırklareli mermerleri ve alüminyum için gama zayıflatma katsayılarının hesaplanması. Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, Edirne.

International Atomic Energy Agency (IAEA). (1996). "Radiation safety", Division of Public Information, 96-00725.

Jawad, A. A., Demirkol. N., Gunoğlu, K., Akkurt, I. (2019). Radiation shielding properties of some ceramic wasted samples. Islamic Azad University, International Journal of Environmental Science and Technology, 16, 5039-5042.

Kaçar, A. (2006).Yapılarda radyasyon kalkanı olarak kullanılan barit agregalı ağır beton elemanların zırh kalınlık hesaplarının belirlenmesi. Yüksek lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.

Kahya, S. (1985). Yüksek aktiviteli bir nokta gama kaynağının zırhlama problemleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.

Kaplan, M.F. (1989). Concrete radiation shielding. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Kazeebra, Z. (2016). Measuring patient's skin dose resulting from x-ray diagnostic imaging. Master Thesis, University of Aleppo.

Khan, F., & Gibbons, J. (2014). The physics of radiation therapy (5thedition).584p.

Kharita, M. H., Takeyeddin, M., Alnassar, M., Yousef, S. (2008). Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics. Progress in Nuclear Energy, 50, 33-36.

Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement (4th edition). John Wiley & Sons, Inc., USA, 830p.

Krane, K. S. (2001). Nükleer fizik I. Palme yayıncılık. 404s.

Mann, K.S. (2017). Gamma-ray shielding behaviors of some nuclear engineering materials. Nuclear Engineering and Technology, 49,792-800.

Mavi, B., Oner, F., & Akkurt, I. (2015). Determination of gamma-ray attenuation coefficients at different energies in Amasya marbles. Acta Physica Polonica A, 128, 395-396.

McMaster, R.C. (1965). Nondestructive testing handbook. The Ronald Prees Company, New York, 1850p.

Mirion Technologies, (2015). <https://www.mirion.com/discover/knowledge-hub/articles/education/types-of-ionizing-radiation>

Murray, R. L. (2001). Nuclear energy: An introduction to the concepts, and systems of applications of nuclear processes (5th edition). Radiation protection, USA, 490p.

National Center for Environmental Health (NCEH). (2018).

Nuclear Regulatory Commission (NRC). (1991). 56 Federal Register, 58 Washington.

Onur, S. (2002). Gama radyasyonu zırhlaması amacıyla farklı betonların değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Özavcı, S. (2017). Farklı katkılanmış betonların radyasyon zırhlama. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya Üniversitesi.

Özden, N. (1990). Sanayide radyasyondan korunmanın esasları. Aliğa Petrokimya San.ve Tic. A.Ş., İzmir, 90s.

Özge, Ö. (2019). Kurşun alaşımının kütle azaltma katsayısının co-60 radyoaktif kaynağı ve geant 4 simülasyon programı ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.

Powsner, R. A., & Powsner, E. R. (1998). Essentials of nuclear medicine physics (1st edition). Maple-Vail Book Manufacturing Group, Hong Kong, 199p.

Qittner, P. (1972). Gamma-ray spectroscopy with particular reference to detector and computer evaluation techniques. United Kingdom, 111p.

Seyrek, E. (2007). Radyoizotopların üretimi ve radyoterapide kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi.

Shapiro, J. (1990). Radiation protection: a guide for scientists and physicians (3th edition). United States, 520p.

Sharaf, J. M., & Saleh, H. (2015). Gamma-ray energy build up factor calculations and shielding effects of some Jordanian building structures. Radiation Physics and Chemistry, 110, 87-95.

Singh, V. P., Medhat, M. E., & Shirmardi, S. P. (2014). Comparative studies on shielding properties of some steel alloys using geant4, MCNP, WinXCOM and experimental results. Radiation Physics and Chemistry, 106, 255-26.

Şeker, S., & Çerezci, O. (1997). Çevremizdeki radyasyon ve korunma yöntemleri. Boğaziçi Üniversitesi Yayinevi, İstanbul, 468p.

TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Nükleer Enerji Bilgiler-Haberler Sayı 57. İstanbul.

TAEK, (2009), <http://www.taek.gov.tr/bilgi-kosesi/184-radyasyonla-birlikte-yasiyoruz/501-dogal-radyasyon-kaynaklari.html>

ICRP, (1991). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).

White, G. R. (1952). X-ray attenuation coefficients from 10 keV to 100 MeV. Report 1003, National Bureau of Standards, U. S.

Yülek, G. (1992). Radyasyonfiziği ve radyasyondan korunma.SEK Yayınları 14, 198s. Ankara.