

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

**SAF VE BOR KATKILI VERMİKÜLİT'İN GAMA RADYASYON
GEÇİRGENLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEKLİSANS TEZİ

Hasan GÜLBİÇİM

Fizik Anabilim Dalı

**HAZİRAN 2015
SAMSUN**



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



FİZİK ANABİLİM DALI

**SAF VE BOR KATKILI VERMİKÜLİT'İN GAMA RADYASYON
GEÇİRGENLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEKLİSANS TEZİ

**Hasan GÜLBİÇİM
(12210080)**

Tezin Savuma Tarihi : 26 Haziran 2015

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. M. Çağatay TUFAN
İkinci Danışman : Doç. Dr. M. Nureddin TÜRKAN**

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalında

Hasan Gülbiçim Tarafından Hazırlanan

**SAF VE BOR KATKILI VERMİKÜLİT'İN GAMA RADYASYON
GEÇİRGENLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından 26/06/2015 tarihinde yapılan sınav ile
YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.**

Başkan : Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet KÖROĞLU
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Doç. Dr. M. Çağatay TUFAN
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Doç. Dr. M. Nureddin TÜRKAN
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Doç. Dr. İrfan ŞAKA
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

....../....../2015

Prof. Dr. Hüseyin DEMİR

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Radyoaktifliğin keşfinden sonra radyasyonun madde ile etkileşmesi temeline dayanarak geliştirilen ve bir sanayi alanı haline gelmiş olan radyoaktif zırhlamanın önemi çağımızın enerji talebine bağlı olarak giderek artmaktadır. Bu konuda incelenen onlarca çalışma yapılmış olmasına rağmen, özgünlüğünü koruyan her çalışma bu alanın gelişmesine ve alternatiflerin artmasına katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada, radyasyondan korunma alanında kullanılan standart malzemelere alternatif olabilecek doğal bir malzemenin radyoaktif zırhlama özelliklerinin tespit edilmesi ve bu alana katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasının ilk safhası lisans döneminde Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Fonu "BAP" tarafından 2012FEF/A13 no'lu "*Gama Radyasyonu Zırhlamasında Alternatif Bir Madde Olarak Vermikülitin İncelenmesi*" adlı proje kapsamında desteklenmiştir. O süreçteki desteklerinden dolayı BAP birimine ve yardımcı olan personeline,

Bu projenin hazırlanması için gerekli ortamın sağlanması, karşılaşılan her türlü problemlerin aşılması ve çalışmanın sonuçlandırılmasının yanında bana yön veren, ilgi, destek ve tecrübelerini lisans döneminde ve hala ikinci tez danışmanım olarak sağlayan değerli hocam sayın Doç.Dr. M.Nureddin TÜRKAN'a,

Bu tez çalışmasının literatüre kazandırılması ve hazırlanmasında gerekli tüm imkanları sağlayan, konuyla ilgili donanım ve tecrübemin artmasına önemli katkılarda bulunan, geleceğe yönelik yardım ve desteklerinden bu süreçte oldukça yararlandığım değerli hocam tez danışmanım sayın Doç.Dr. M.Çağatay TUFAN'a,

Bilime ve insanlığa faydalı olmak bilinciyle beni bu seviyeye getiren emeği geçen bütün hocalarıma,

Benim bu günlere gelmemde tüm maddi ve manevi desteklerini her zaman bir dağ gibi arkamda hissettiğim değerli AİLEM'in her ferdine ayrı ayrı teşekkür ederim.

Haziran 2015

Hasan Gülbiçim

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	7
2.1 İyonlaştırıcı Radyasyon Türleri	7
2.1.1 Alfa radyasyonu.....	7
2.1.2 Beta radyasyonu.....	8
2.1.3 Gama radyasyonu	10
2.1.4 X ışını.....	10
2.2 Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşimi	11
2.2.1 Fotoelektrik olay.....	11
2.2.2 Compton olayı	12
2.2.3 Çift oluşumu	12
2.3 Radyasyondan Korunma Metotları.....	13
2.3.1 Zaman kuralı.....	13
2.3.2 Mesafe kuralı	13
2.3.3 Zırhlama kuralı	14
2.4 Üstel Soğurma Kanunu.....	14
2.5 Radyasyon Dozimetrisi.....	19
3. MATERİYAL VE YÖNTEM	23
3.1 Materyal.....	23
3.2 Örneklerin Temini ve Hazırlanışı	28
3.3 Yöntem	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	53

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Radyasyon madde etkileşmesindeki muhtemel olayların atom numarasına ve radyasyonun enerjisine bağlılığı	18
Çizelge 2.2. Radyasyon dozu birimleri.....	20
Çizelge 2.3. Radyasyon kalite faktörleri.....	21
Çizelge 3.1. Vermikülitin tipik fiziksel özellikleri	24
Çizelge 3.2. Toz kırınımı deneyi analiz sonuçları	30
Çizelge 4.1. N1 örneği için ölçüm verileri.....	33
Çizelge 4.2. N2 örneği için ölçüm verileri	34
Çizelge 4.3. N3 örneği için ölçüm verileri.....	34
Çizelge 4.4. N4 örneği için ölçüm verileri.....	34
Çizelge 4.5. N5 örneği için ölçüm verileri.....	35
Çizelge 4.6. Saf ve bor katkılı vermikülitin lineer ve kütle azaltma katsayılarının deneysel verileriyle XCOM'dan elde edilen verilerin karşılaştırılması	35
Çizelge 4.7. Kurşun, vermikülit, borsilikat, beton ve granitin XCOM 'dan elde edilen kütle azaltma katsayısı verileri	37
Çizelge 4.8. Vermikülit için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.....	39
Çizelge 4.9. Kurşun için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.....	39
Çizelge 4.10. Demir için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri	39
Çizelge 4.11. Borsilikat için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.....	40
Çizelge 4.12. Beton için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.....	40
Çizelge 4.13. Vermikülitin için HVL, TVL ve MFP değerlerinin deneysel ve teorik olarak karşılaştırılması	42
Çizelge 4.14. Kurşun, demir, vermikülit, beton, granit ve borsilikat'ın farklı enerjilerdeki HVL (Half Value Layer) değerlerinin karşılaştırılması.....	42
Çizelge 4.15. Kurşun, demir, vermikülit, beton, granit ve borsilikat'ın farklı enerjilerdeki TVL (Tenth Value Layer) değerlerinin karşılaştırılması	42
Çizelge 4.16. Kurşun, demir, vermikülit, beton, granit ve borsilikat'ın farklı enerjilerdeki MFP (Mean Free Path) değerlerinin karşılaştırılması.....	43

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Radyasyonun bazı kullanım alanları.....	3
Şekil 1.2. Çevresel radyasyon felaketi örneği.....	4
Şekil 2.1. Alfa bozunumu	7
Şekil 2.2. Alfalar için kararlılık eğrisi.....	8
Şekil 2.3. Beta bozunumu	8
Şekil 2.4. Betalar için kararlılık eğrisi	9
Şekil 2.5. Gama bozunumu	10
Şekil 2.6. X ışınlarının oluşumu.....	10
Şekil 2.7. Fotoelektrik olay	11
Şekil 2.8. Compton olayı.....	12
Şekil 2.9. Çift oluşumu	12
Şekil 2.10. Radyasyonun soğurulması ve tesir kesitinin geometrik yorumu	15
Şekil 2.11. Radyasyon madde etkileşimindeki baskın üç olay	19
Şekil 3.1. Vermikülitin (a) genleşmemiş hali, (b) genleşmiş hali, (c) parça hali.....	24
Şekil 3.2. ^{60}Co 'ın bozunum şeması	25
Şekil 3.3. ^{152}Eu 'un bozunum şeması	26
Şekil 3.4. ^{152}Eu ve ürünlerinden yayınlanan gama ışını enerjileri	26
Şekil 3.5. ^{226}Ra 'un bozunum şeması	27
Şekil 3.6. Deney düzeneğinin görüntüsü	28
Şekil 3.7. Vermikülitin XRD grafisi	29
Şekil 3.8. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	31
Şekil 4.1. Saf ve bor katkılı vermikülit için elde edilen kütle azaltma katsayılarının XCOM'daki sonuçlarla karşılaştırılması	36
Şekil 4.2. Kurşun, beton, vermikülit, granit ve borsilikatın kütle soğurma katsayılarının karşılaştırılması.....	38
Şekil 4.3. Vermikülit, demir, borsilikat ve beton için foton enerjisine göre (a) Toplam atomik tesir kesiti değişimi, (b) Toplam elektronik tesir kesiti değişimi	40
Şekil 4.4. Kurşun, demir, vermikülit, borsilikat ve beton malzemelere göre (a) etkin atom sayısı Z_{eff} , (b) etkin elektron yoğunluğu N_{eff} gösterimi.	41
Şekil 4.5. Kurşun, demir, vermikülit, beton, granit ve borsilikat için (a) HVL, (b) TVL, (c) MFP değerlerinin enerjiye göre değişimi	43

KISALTMALAR

λ	: Dalga Boyu (cm)
ν	: Frekans (Hertz)
c	: Işık Hızı (3×10^8 m/sn)
E	: Enerji (Joule)
I	: Foton Şiddeti
h	: Planck Sabiti (6.62×10^{-34} J.sn)
m	: Kütle (gr)
μ	: Lineer Azaltma Katsayısı (cm^{-1})
μ_m	: Kütle Azaltma Katsayısı (cm^2/gr)
e	: Elektron Yüğü (1.6×10^{-19} C)
ρ	: Yoğunluk (gr/cm^3)
$\bar{\nu}$	: Antinötrino
e^-	: Elektron
e^+	: Pozitron
α	: Alfa Parçacığı
β	: Beta Parçacığı
γ	: Gama Işıması
σ	: Tesir Kesiti
σ_t	: Toplam Atomik Tesir Kesiti (barn/atom)
σ_e	: Toplam Elektronik Tesir Kesiti (barn/atom)
Z_{eff}	: Etkin Atom Sayısı
N_{eff}	: Etkin Elektron Yoğunluğu ($\text{elektron}/\text{cm}^3$)
N_A	: Avagadro Sayısı (6.02×10^{23} mol $^{-1}$)
N	: Ortalama Atomik Kütle

SAF VE BOR KATKILI VERMİKÜLİTİN GAMA RADYASYON GEÇİRGENLİĞİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Genellikle değişik alanlarda radyasyon zırhlamasında farklı durumlar için kurşun, beton, tungsten, uranyum metali vs. gibi farklı malzemeler kullanılır. Bu çalışmada, volkanik aktivite sonucu oluşan düşük yoğunluklu saf vermikülit yeni bir gama radyasyonu zırh malzemesi olarak ilk kez incelenmektedir. Buna ek olarak vermikülitin gama radyasyonu zırhlama özellikleri, farklı oranlarda karıştırılmış bor katkı vermikülit malzeme üzerinde ölçülerek zırhlama kapasitesindeki değişim incelendi. Bunun için toplam lineer ve kütle azaltma katsayıları ^{60}Co , ^{152}Eu ve ^{226}Ra radyoaktif kaynaklarından yayınlanan 0.186, 0.244, 0.262, 0.342, 0.600, 0.778, 1.173, 1.332, 1.408 ve 1.728 MeV enerjili gama ışınları kullanılarak NaI(Tl) sintilasyon dedektörlü gama spektrometre sisteminde deneysel olarak belirlendi. Saf ve bor katkı vermikülit için teorik veriler ise XCom adlı bilgisayar programıyla hesaplandı ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldı. Yapılan karşılaştırmada teorik ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görüldü. Bununla birlikte bor katkı vermikülit için elde edilen kütle azaltma katsayısı değerlerinin arttığı tespit edildi.

Bu çalışmada, literatürde incelenen kurşun, beton, borsilikat ve granit için kütle azaltma katsayıları (μ_m) XCom programıyla elde edildi ve elde edilen sonuçlar saf ve bor katkı vermikülit için elde edilenler ile karşılaştırıldı. Ayrıca bu malzemelerin radyasyon zırhlamada atomik ölçekteki fiziksel özelliklerini gösteren etkin atom sayısı (Z_{eff}), etkin elektron sayısı (N_{eff}), toplam atomik tesir kesiti (σ_t), toplam elektronik tesir kesiti (σ_e), değerleri XCom'daki veriler kullanılarak hesaplandı ve birbirleriyle karşılaştırıldı. Ek olarak radyasyon zırhlamada fizik, mühendislik ve teknoloji alanlarında kullanılan radyasyon şiddetini yarı değerine düşüren malzeme kalınlığı (HVL), onda bir değerine düşüren malzeme kalınlığı (TVL) ve radyasyonun malzeme içinde aldığı ortalama serbest yol (MFP) parametreleri vermikülit için hem deneysel hemde teorik olarak hesaplandı. Bu parametreler, vermikülit ile kıyaslama yapmak amacıyla kurşun, demir, borsilikat ve beton için de XCom verileri kullanılarak hesaplandı.

Sonuç olarak, elde edilen sonuçlar vermikülitin gama radyasyonuna karşı yeni bir zırh malzemesi olarak tercih edilebileceğini gösterdi. Ayrıca vermikülitte eşit oranda ilave edilen boraxın vermikülitin zırhlama kapasitesini artırdığı görüldü.

Anahtar Kelimeler: Vermikülit; Zırhlama; Gama Radyasyonu; Soğurma Katsayısı.

DETERMINATION OF GAMMA RADIATION TRANSMISSION FOR PURE AND BORON MIXED VERMICULITE

ABSTRACT

Generally, different materials like lead, concrete, tungsten, uranium metal, etc. are used for the radiation shielding in different areas and for different situations. In this study, a new lightweight shielding material formed by the result of volcanic activity vermiculite has been investigated for the first time as shielding material for gamma radiation. In addition, gama radiation shielding properties and variation in the shielding capacity of vermiculite examined on vermiculite-borax mixture by measuring Therefore, the total linear attenuation coefficients (μ) and the total mass attenuation coefficients (μ_m) were experimentally determined at the gamma spectrometer system with the NaI(Tl) scintillation detector by using 0.186, 0.244, 0.262, 0.342, 0.600, 0.778, 1.173, 1.332, 1.408 and 1.728 MeV photon energies emitted from ^{60}Co , ^{152}Eu and ^{226}Ra radioactive sources. The theoretical data for pure and vermiculite borax mixture were calculated with a computer program called XCom and the results were compared with each other. It was seen good agrement in the comparison between the theoretical and the experimental data. Furthermore, it was seen that the obtained mass attenuation coefficient values for vermiculite borax mixture have increased.

In this study, the total mass attenuation coefficients for lead, concrete, borosilicate and granite which are investigated before in literature were calculated with the XCom code and the obtained results were compared with the obtained results of vermiculite and vermiculite borax mixture. The effective atomic number, Z_{eff} , the effective electron number, N_{eff} , the total atomic cross-section, σ_t , the total electronic cross-section, σ_e values showing the physical properties of these materials at shielding in the atomic scale were also calculated by using XCom data and compared with each other. In addition, the half value layer, HVL, the tenth value layer, TVL and the mean free path, MFP parameters of vermiculite which are used in the physics, engineering and technology areas in the radiation shielding were calculated both theoretically and experimentally. With the purpose of comparison with vermiculite, these parameters were also calculated for lead, iron, borosilicate and concrete by using XCom data.

Consequently, the obtained results showed that vermiculite could be preferred as a new shielding material against gamma radiation. It was also seen that vermiculite borax mixture which is mixed with equal rate improved the radiation shielding capacity of vermiculite.

Key Words: Vermiculite; Shielding; Gamma Radiation; Attenuation Coefficients.

1. GİRİŞ

Evreni oluşturan bütün maddeler atomlardan meydana gelmektedir. Atomlar ise; çekirdeğinde pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlar ile birlikte çekirdeğin etrafındaki belli enerji seviyelerinde dolanan negatif yüklü elektronlardan oluşur. Bu pozitif yükler ile negatif yükler atomu dengede tutar. Aynı zamanda çekirdekdeki protonlar ile nötronlar da nükleer anlamda bir denge halindedir. Bu dengeyi bozan her şey çekirdeği kararsız hale getirir. Bu dengeyi sağlamak için bazı atomlar, kararlı durum olarak bilinen en düşük enerjili seviyeye geçmek için bünyesindeki fazla enerjiyi atmak zorundadırlar. Dengeye gelmemiş çekirdeklerdeki bu fazla enerji parçacık ya da dalga formlarında ortama salınmaktadır. İşte ortama salınan bu enerjiye radyasyon denir.

Radyasyon ilk olarak Henri Becquerel tarafından 1896 yılında gözlenmiştir. Floresans olayı incelenirken keşfedilen X ışınlarından sonra, floresans özelliği taşıyan her maddenin ışın yayıp yaymayacağını merak eden Becquerel Uranyum tuzlarıyla bir deney yaptı. Bu deneyde Becquerel, floresans maddeden aldığı parçayı güneş ışınlarına tutarak elektron-hole tuzaklarını boşaltıyordu. Daha sonra da bu maddeyi tıpkı X ışınlarında olduğu gibi siyah bir film ile sarıp arasına metal levha yerleştirerek bekletiyordu. Becquerel yağmurlu havadan dolayı birkaç gün uranyum tuzlarını güneş ışığına maruz bırakmadı. Siyah kağıda sarılı film ve üstüne konmuş uranyum bileşiği birkaç gün çekmecesinde güneşin doğmasını bekliyordu. Ancak bir gün belli bir sebebi olmaksızın, çekmecedeki filmi banyo etti ve uranyum kristalinin güneş ışığına maruz kalmadığı halde filmde iz bıraktığını gördü. Becquerel bunun X ışınlarına benzer görünmez bir ışın olarak tanımlamasına rağmen beklenmeksizin radyasyonun ilk keşfini gerçekleştirmişti.

Radyasyonu temel olarak “parçacık” ve “dalga” tipi olmak üzere iki şekilde sınıflandırabiliriz. Parçacık ve dalga tipi radyasyonları da yine iki gruba ayırmamız mümkündür. Bunlar, “iyonlaştırıcı” ve “iyonlaştırıcı olmayan” radyasyonlardır. Zararlı ve ölümcül etkilerinden dolayı İyonlaştırıcı radyasyon, içinden geçtiği maddede iyonlaşmaya sebep olur ve bu nedenle oldukça tehlikelidir. Başlıca beş

iyonlaştırıcı radyasyon çeşidi vardır. Bunlar; Alfa parçacıkları, Beta parçacıkları, X ışınları, Gama ışınları ve Nötronlardır (Knoll 1979).

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte özellikle tıp alanındaki geniş kullanım alanlarıyla radyoaktif maddelerin kullanımı artmış bulunmaktadır. Örneğin kanserli hücrelerin tespiti ve radyoaktif madde ile nokta atışı yapılarak yalnızca kanserli hücrenin imhası gibi birçok yöntem kullanılarak teknolojik anlamda tıpta birçok ilerleme kaydedilmiştir. Bundan başka, günümüzde nükleer enerjinin kullanımının yaygınlaşması neticesinde radyasyondan korunmanın önemi artmaktadır. Teknolojiyle birlikte gama ve X ışını radyasyonlarının kullanımının diğerlerine nazaran artması ve parçacık radyasyonunun çok daha kolay zırhlanabilmesi nedeniyle, X ve gama radyasyonlarından korunma ihtiyacının giderilmesi çok önemli bir konudur. Radyasyondan korunmada temel olarak kaynağa olan uzaklık, ortamda geçirilen zaman ve zırhlama şeklinde belirtebileceğimiz üç önemli parametre vardır. Bu üç parametreden özellikle zırhlama konusu geliştirilmeye açık ve zırhlama kalitesiyle diğer iki parametreyi de doğrudan etkileyen bir faktördür.

X ışınları 0,125 - 125 keV aralığındaki enerji değerlerine sahip olup gama radyasyonuna göre bir avantajı bulunmaktadır. O da X ışını radyasyonu herhangi bir tehlike anında basitçe elektrikle ilişkisi kesilerek önlenebilmektedir (Gündüz 1989). Ancak gama radyasyonunda böyle bir durum söz konusu değildir. Ayrıca 1 MeV den fazla enerji değerlerine de sahip olup x ışını radyasyonu gibi kontrol edilemediği için gama radyasyonundan korunmak büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple amaca uygun bir zırh malzemesi kullanımı da hem korunma olarak hem de pratiklik olarak avantaj sağlayacaktır. Bu sayede ortamda geçirilen sürenin de minimum olarak gerçekleşmesi sağlanabilmektedir. Gama ve X ışınları elektromanyetik dalga türleri olduklarından alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine nüfuz etme kabiliyetleri çok daha fazladır. Bu tür radyasyonlar madde içerisinden geçerken ya atom çekirdekleri ile ya da yörünge elektronları ile etkileşirler. Etkileşimde rol oynayan en önemli olaylar fotoelektrik soğurma, koharent saçılma, compton saçılması ve çift oluşumdur. Bu olaylar sonucunda radyasyon ya soğurulur veya enerjisinin bir kısmını maddede bırakarak saçılır ya da hiç enerji bırakmadan orijinal yönünden sapar (Meriç 2005). Bu etkileşimler neticesinde foton madde içerisinden geçerken üstel şekilde bir şiddet azalmasına uğrar. Yüksüz olduklarından dolayı da elektrik ve manyetik alanda sapma göstermezler, ancak uygun zırh malzemeleri kullanılarak şiddetleri azaltılabilir.

1902 yılında Piere ve Marie Curie tarafından Radyumun keşfini takiben, radyasyon kaynakları tıpta, sanayide, tarım ve araştırmada artan bir hızla kullanılmaya başlanmıştır. Sonuç olarak günümüzde insanlar ve tüm canlılar radyasyonla iç içe yaşamaktadır. Bundan dolayı canlı hayatı radyasyon tarafından tehlike altında olduğu için radyasyonların zararlı etkilerinden korunmak elzem bir konudur.



Şekil 1.1 Radyasyonun bazı kullanım alanları.

Bahsettiğimiz iyonlaştırıcı radyasyon, hücrenin genetik materyali olan DNA'yı parçalayabilecek kadar enerji taşımakta ve DNA'nın parçalanmasıyla hücreler ölmektedir. Bunun sonucunda doğal olarak dokular zarar görür ve kansere yol açabilir.

Çevreye rastgele atılan radyoaktif maddeler insan, hayvan ve bitki sağlığına olumsuz etkiler yaparak çevreyi ve ekolojik dengeyi bozmaktadır. Ayrıca radyasyon canlıda genetik değişikliklere ya da vücutta kalıcı değişikliklere sebep olabilir. Radyasyonun etkileri cins, yaş ve organa göre değişmekle birlikte, çocuklar ve gelişme çağındaki gençlerde genellikle gözü etkileyerek görme bozukluğu, katarakt gibi rahatsızlıklara da neden olmaktadır. Bunun yanında radyasyonun etkileri zamanla ortaya çıkmaktadır. Geçmişte yapılan nükleer silah denemelerinden dolayı radyoaktif maddelerle yüklenmiş toz bulutları, atmosferin yüksek tabakalarına ve stratosfere yerleşerek, radyoaktif yağışlar halinde yavaş yavaş yeryüzüne inmekte ve

çevrenin, özellikle yüzeysel suların kirlenmesine sebep olmaktadır. Radyasyon çevreye zararları sınır tanımaksızın yayılmakta ve kilometrelerce uzağa etki etmektedir. En bilinen örneklerden biri olan Ukrayna'daki Çernobil kazası sadece Ukrayna'da oluşan bir kaza olarak kalmamış birçok bölgeyi etkilediği gibi Karadeniz bölgesini de önemli ölçüde etkilemiştir.



Şekil 1.2 Çevresel radyasyon felaketi örneği (URL-1).

Çevresel radyasyon felaketine ve binlerce insanın ölümüne sebebiyet veren diğer bir olay da 1945 yılında Hiroşima ve Nagazaki'ye atılan atom bombalarıdır. Hiroşima'da 69 kg lık ^{235}U (Uranyum) içeren bomba yerden 600 metre yüksekte patlatılmış ve 140 000 kişi hayatını kaybetmiştir. 13 000 tonluk TNT'ye eşdeğer olan 1,6 km çapındaki 11,4 km² alanda yakmıştır. Nagazaki'de ise 6,4 kg ^{239}Pu (Plutonyum) içeren bomba yerden 469 m yüksekte patlatılmış ve 74 000 kişi hayatını kaybetmiştir. 21 000 tonluk TNT'ye eşdeğer olan bomba 38870 °C' lik sıcaklık ve saatte 624 mil şiddetinde yıkıcı rüzgar yaratmıştır. Bu tür çevresel felakete sebep olan olayların en tehlikeli yanı kullanılan radyoaktif üründen etrafa yayılan radyasyonun şiddetinin oldukça yüksek ve etkisinin çok uzun sürmesidir. Radyasyonun böyle zararlı etkilerinden korunmak ve enerji anlamında faydalı işlerde onunla iç içe bulunacaksak iyi bir zırh malzemesi seçilmelidir. Yüksek yoğunluk ve etkin elektron yoğunluğunun büyüklüğü radyasyon zırh malzemesi seçiminde önemli rol oynar.

Radyasyondan korunmada bilinen en iyi zırh malzemesi kurşundur. Ayrıca tungsten ve barit agregalı betonların da radyasyon tutucu özelliğinin var olduğu bilinmektedir. Nitekim bu maddelerin yoğunlukları oldukça yüksektir. Ancak bu malzemeler çok ağır, hantal, pahalı ve özellikle kurşun zehirlidir. Bu malzemelerin dışında radyasyon tutuculuk özelliği incelenen birçok çalışma vardır fakat hiçbir kurşunun yerine geçebilecek bir alternatif olma niteliği taşımamaktadır. Bu tez çalışmasının konusu olan saf vermikülit ile yaptığımız ön çalışmalarda, teknolojik olarak en çok kullanılan enerji aralığında (0.1-2 MeV) kurşun ile kıyaslanabilecek bir zırhlama kapasitesine sahip olduğu anlaşılmıştır (Türkan vd. 2013).

Farklı malzemelerin radyasyon geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi için yapılmış bir çok çalışma mevcuttur. Radyasyon zırhlama konusunda incelenen malzemelerin, özellikleri ve kullanım alanları ile radyasyonun zararlı etkilerini kabul edilebilir seviyelere indirgeyecek zırh kalınlıkları hesaplanmakta ve bileşim olarak kullanılan malzemelerin en verimli oranlarının soğurma katsayıları belirlenmektedir. Bu çalışmalardan başlıca literatüre geçenler şunlardır:

Bor ve çeşitli bor bileşiklerinin ve bunların katılandırılmasıyla oluşturulan malzemelerin elektromanyetik radyasyonu soğurma özellikleri bir çok çalışmada incelenmiştir (Çalık ve ark. 2009, Demir 2010, Singh ve ark. 2002, Bootjomchai ve ark. 2012, İçelli ve ark. 2011, 2013, Yasaka ve ark. 2014). Bu çalışmalarda çoğunlukla 59,54 keV, 356, 662, 1173 ve 1332 keV enerjili gama ışınları kullanılmış ve XCom programı ile de teorik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Çeşitli yapılarda kullanılan ve kurşun içerikli katı atıklardan hazırlanan bir malzemenin gama radyasyonu tutuculuk özellikleri incelenmiş (Erdem ve ark. 2010). Bir başka zırhlama malzemesi olarak düşünülen beton ise barit, zeolit ve kolemanit katkılı olarak incelenmiş ve gama radyasyonunu soğurma özellikleri belirlenmiştir (Akkurt ve ark. 2010, Demir ve ark. 2011, Akkurt ve El-Khayatt 2013). Ayrıca bazı beton ve çimento karışımlarından elde edilen numunelerin soğurma katsayıları Monte Carlo yöntemi kullanılarak incelenmiştir (Gurler ve Tarım 2012).

Bunlardan başka çeşitli yapı malzemelerinin ve doğal olarak bulunan çeşitli minerallerin gama radyasyonunu zırhlama özellikleri bir çok çalışmada incelenmiştir (Akkurt ve ark. 2007, Başığit ve Kaçar 2006, Medhat 2009, Han ve ark. 2009, Un ve Sahin 2011, Korkut ve ark. 2011, Baştuğ ve ark. 2011, Mavi 2012, Kharita ve ark. 2012, Limkitjaroenporn ve ark 2013, Mann ve ark. 2013, Chen ve ark. 2014, Singh ve ark. 2015).

Bu çalışmalardan farklı olarak Toprak (2001) tarafından yapılan çalışmada gama radyasyonunun, içerisinde Si minerali fazla olan toprak tarafından daha iyi zırhladığı tespit edilmiştir.

şimdiye kadar yapılan çalışmalarda vermikülitin veya vermikülit içeren herhangi bir malzemenin gama radyasyonunu zırhlama özellikleri incelenmemiştir. Sadece Korkut ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada vermikülit katkılı betonların nötron zırhlama özellikleri incelenmiştir.

Vermikülit doğal olarak oluşmuş bir magnezyum alüminyum silikat minerali olması ve içerisindeki Si miktarının oldukça yüksek olması, gama radyasyonunun zırhlaması açısından uygun olabileceği kanaati uyandırmış ve tarafımızdan yapılan ön çalışmalar neticesinde bu kanaatimiz daha da güçlenmiştir. Yukarıdaki literatür özetinde verdiğimiz çalışmalarda da Si miktarının yüksek olmasının radyasyon zırhlamasındaki etkisi ayrıca incelenmiştir.

Günümüz dünyasında teknoloji ve enerjiye olan bağımlılık ve ilgiden dolayı insanlar radyasyonun zararlı etkilerine gün geçtikçe daha fazla maruz kalmaktadır. Radyasyon zırhlama üzerine yapılan çalışmalar bu zararlı etkileri ortadan kaldırmak veya en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Radyasyon zırh malzemesi bulmak için kaydadeğer bir çok çalışma yapılmasına rağmen gama radyasyonu zırhlamasında vermikülit kullanılarak daha önce yapılan bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmanın amacı standart zırh malzemelerine alternatif olarak saf haldeki ve bor katkılı vermikülitin zırhlama özelliklerini tespit etmektir.

Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimi temel alınarak radyasyon zırhlamada bilinmesi gereken temel parametreler ikinci bölümde ele alınmıştır. Teorik kısımda belirtilen parametrelerin deneysel ve teorik sonuçlarının elde edilmesinde kullanılan materyaller ve deney sisteminin ayrıntılı açıklaması üçüncü bölümde verilmiştir. Daha sonra bu çalışmada vermikülitin gama radyasyonu zırhlama parametreleri deneysel ve teorik olarak incelenerek elde edilen bulgular ve literatürde incelenen malzemelerle karşılaştırmalar dördüncü bölümde sunulmuştur. Son bölümde ise vermikülitin radyasyon zırhlama konusundaki sonuçları tartışılarak kendi alanında bir sanayi olan zırhlamada kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

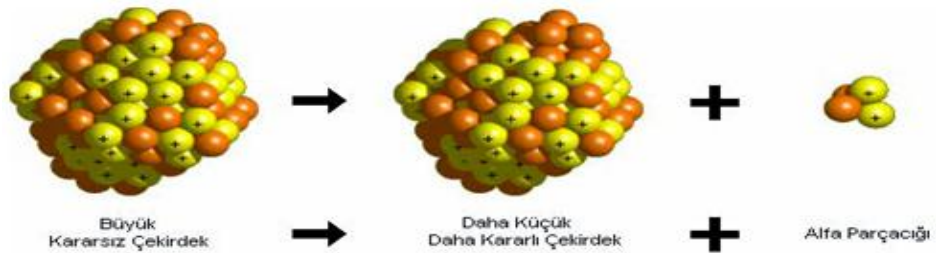
2. GENEL BİLGİLER

2.1 İyonlaştırıcı Radyasyon Türleri

Başlıca dört adet iyonlaştırıcı radyasyon çeşidi vardır. Bunlar, parçacık tipindeki Alfa parçacıkları ve Beta parçacıkları ile dalga tipindeki Gama ışınları ve X ışınlarıdır. Parçacık tipi radyasyon; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden parçacıkları ifade eder. Dalga tipi radyasyon ise; belli bir enerjiye sahip ancak kütsüz radyasyon çeşididir. Bunlar, titreşim yaparak ilerleyen elektromanyetik dalgalar gibidir. Bütün dalga tipi radyasyonlar boşlukta ışık hızıyla (3×10^8 m/s) hareket ederler.

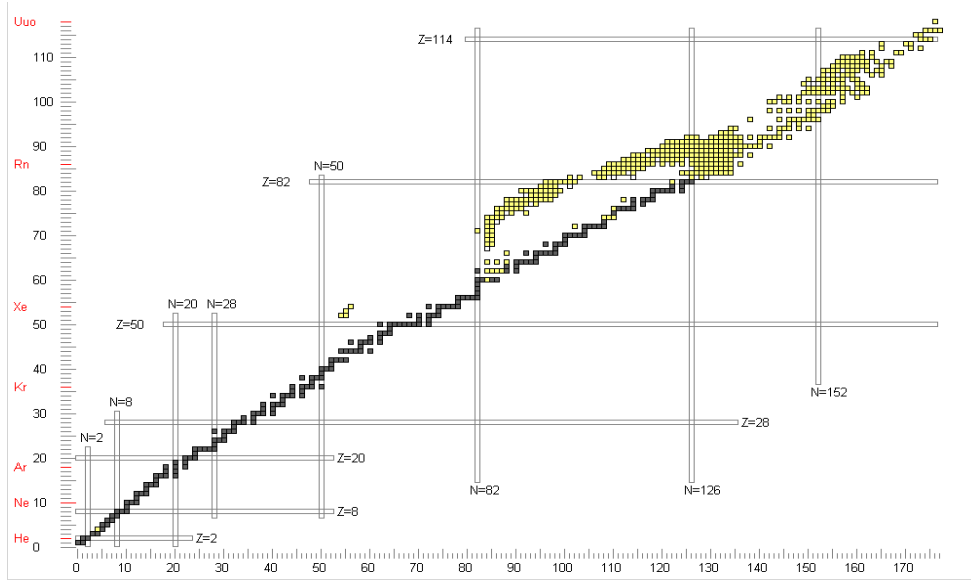
2.1.1 Alfa radyasyonu

Alfa parçacığı iki proton ve iki nötrondan oluşmuş bir helyum (${}^4_2\text{He}$) çekirdeğidir (Şekil 2.1) ve pozitif yüklüdür. Çoğunlukla atom numarası 82'den büyük çekirdekler alfa bozunumu yaparlar (Şekil 2.2). Alfa parçacıklarını çok küçük kalınlıklardaki maddelerle (örneğin ince bir kağıt tabaka ile) durdurmak mümkündür. Bunun sebebi, diğer radyasyon çeşitlerine göre sahip oldukları büyük elektrik yükü ve kütlesidir. Sahip oldukları bu elektrik yükü, alfa parçacıklarının herhangi bir madde içerisinden geçerken yolları üzerinde yoğun bir iyonlaşma meydana getirmelerine ve bu yüzden de enerjilerini çabucak kaybetmelerine yol açar. Enerjilerini bu şekilde çabucak kaybeden alfa parçacıklarının menzilleri de dolayısıyla çok kısadır. Bu yüzden de normal olarak dış radyasyon tehlikesi oluşturmazlar. Ancak, besinler, solunum ve yaralar vasıtasıyla vücuda girdiklerinde tehlikeli olabilirler.



Şekil 2.1 Alfa bozunumu (Kaçar 2006).

Alfa parçacığı yayınlayan radyoaktif çekirdeklerin yarı ömürleri 10^{-6} saniyeden 10^{17} yıla kadar uzanmakta ve yayınlanan parçacıkların enerjileri 4 ila 8 MeV arasında değişmektedir. Örneğin ^{236}U çekirdeğinin yarı ömrü $2,39 \times 10^7$ yıl ve yayınlanan parçacığın enerjisi de 4,49 MeV değerindedir (Wong 1998).

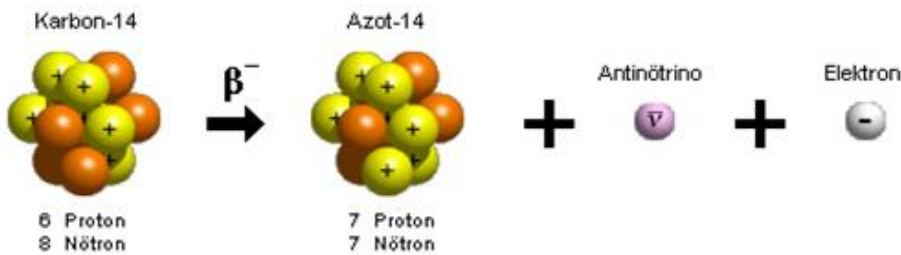


Şekil 2.2 Alfalar için kararlılık eğrisi (Normand 2008).

Şekil 2.2'de genellikle ağır çekirdeklerde yayınlanan alfa parçacıklarının dağılımı gösterilmektedir. Siyah renkler kararlı çekirdekleri, sarı renkler ise alfa bozunumu yapan radyoaktif çekirdekleri göstermektedir.

2.1.2 Beta radyasyonu

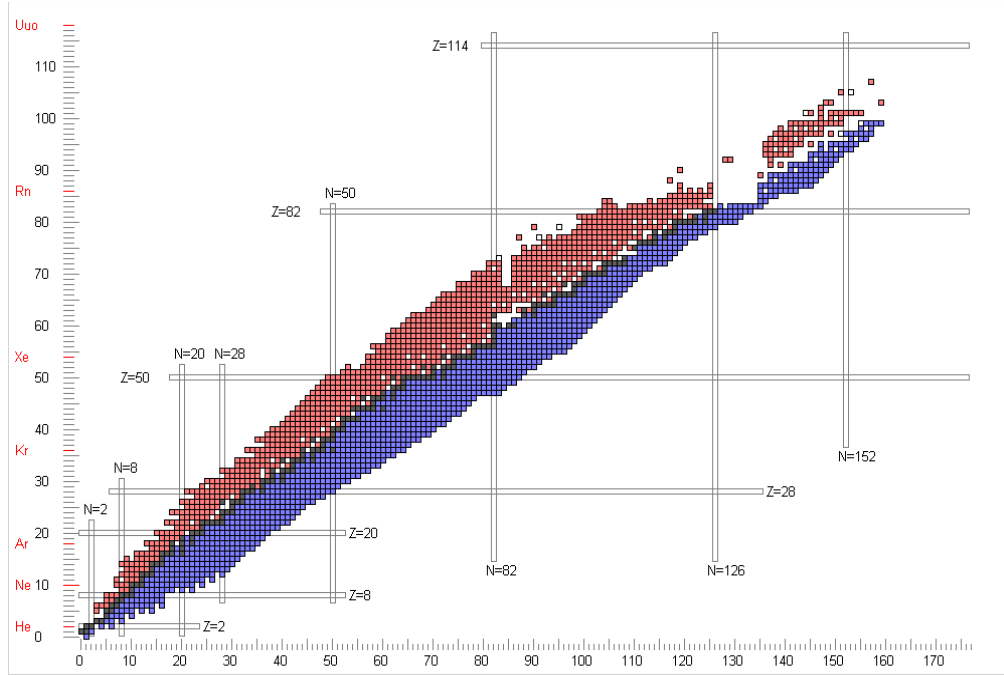
Proton ve nötron dengesi bozuk kararsız çekirdekler fazla enerjisinden kurtulmak için belli bir kütle ve enerjiye sahip elektron veya pozitron yayımlar (Şekil 2.3). Burada açığa çıkan parçacıklar nötronun protona dönüşmesi veya protonun nötrona dönüşmesi sonucunda oluşur. Şekil 2.3'de Karbon-14 çekirdeğindeki bir nötronun protona dönüşmesi sonucu ortaya çıkan beta (β^-) parçacığı ve momentumun korunmasını sağlaması için yayınlanan antinötrino gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Beta bozunumu (Kaçar 2006).

Beta radyasyonu olarak bilinen parçacıklar alfa parçacıklarına göre daha küçüktür ve bu sebeple madde içerisine nüfuz edebilme kabiliyeti alfa parçacıklarına göre daha yüksektir. Havada birkaç metre yol alabilen bu parçacıklar enerjileri yüksek olduğunda göz ve deri için problem oluşturmaktadır. Kağıt ve deriden rahatça geçebilen beta parçacıkları ince bir alüminyum levha ya da plastik malzemeler kullanılarak durdurulabilmektedir.

Beta radyasyonundan korunmada zırhlama malzemesi olarak kurşun tercih edilmemektedir. Çünkü beta bozunumunda açığa çıkan hızlı elektronlar kurşun gibi yoğun malzeme kullanıldığında ani olarak durdurulur. İşte bu sırada hızlı elektronların ani olarak durdurulmasıyla oluşan Bremsstrahlung radyasyonu dediğimiz X ışını radyasyonu türü açığa çıkar. Yani farklı bir tür radyasyon oluşumu söz konusu olduğundan beta radyasyonunu zırhlamada kurşun kullanılmaz.

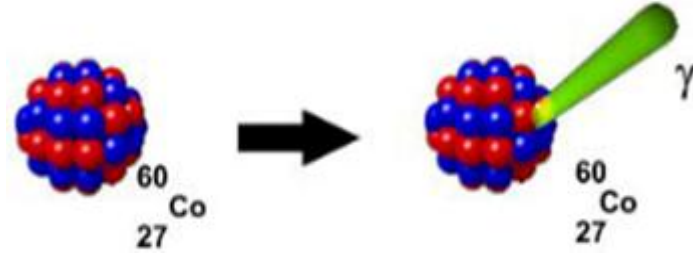


Şekil 2.4 Betalar için kararlılık eğrisi (Normand 2008).

Şekil 2.4'de görüldüğü gibi beta radyasyonu kararlı çekirdeklerin farklı bütün kararsız izotoplarında oluşabilmektedir. Mavi renkli radyoizotoplarla nötron fazlalığı olan çekirdeklerin nötronu protona dönüştürmesiyle yayımlanan β^- (elektron) radyasyonu, kırmızı renkli radyoizotoplarla da proton fazlalığı olan çekirdeklerin protonu nötrona dönüştürmesiyle yayımlanan β^+ (pozitron) radyasyonu gösterilmektedir.

2.1.3 Gama radyasyonu

Gama radyasyonu çekirdekteki diğer bozunumları takiben yayınlanan elektromanyetik dalgalardır. Yani öncesinde bir alfa ya da bir beta bozunumu sonucunda oluşan çekirdek genelde kararlı halde bulunmaz. Bu çekirdek kararlı hale geçebilmek için fazla enerjisini gama radyasyonu dediğimiz elektromanyetik dalga şeklinde ortama salar (Şekil 2.5).

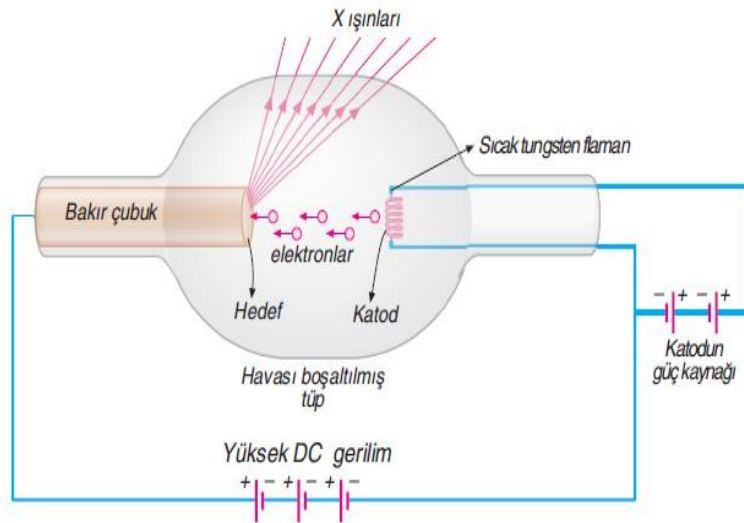


Şekil 2.5 Gama bozunumu (Kaçar 2006).

Gama radyasyonu yüksek enerjili ve dalga tipi radyasyon olduğundan parçacık tipi radyasyonlara göre giriciliği daha yüksektir. Havada kilometrelerce mesafe alabilen bu radyasyon türü oldukça tehlikeli olduğu için ancak kurşun gibi yoğun maddelerle durdurulabilir.

2.1.4 X ışını

İlk olarak W.C. Roentgen tarafından 1895 yılında keşfedilen X-ışınları Crookes tüpü kullanılarak elde edilmektedir. Gama ışınlarından sonra giriciliği en yüksek olan iyonlaştırıcı radyasyon türüdür. Radyografi ve radyoskopi teknikleriyle tıpta ve endüstride en çok kullanılan radyasyon çeşitlerinden bir tanesi de X-ışınlarıdır.



Şekil 2.6 X ışınlarının oluşumu (Bueche ve Jerde 1994).

Crookes tüpünün ayrıntılı yapısı Şekil 2.6’da görülmektedir. T p içersinde katot ve anottan oluşmuş iki elektrot ve katot levhaya sarılı bir Tungsten Filament bulunmaktadır. Filament, elektrik akımı verilerek ısıtılır. Bu sayede yeterli enerjiye sahip elektronlar filamentin ucunda birikerek elektron bulutu oluştururlar. Eğer filamente verilen akım kaldırılırsa bu elektronlar filament tarafından tekrar absorbe edilirler. Filamentin karşısında pozitif (+) yüklü bir hedef (anot) bulunmaktadır. Anotla katot arasında bir elektrik alan oluşturulursa elektronlar çok yüksek bir hızla anot levhaya çarparlar. Bu esnada yüksek enerjili elektronların yavaşlatılması veya atomun i  yörüngelerinden elektron koparıldıktan sonra oluşan boşluklara üst enerji seviyelerinden elektron geçişi sırasında X ışınları açığa çıkar (Tarakçıoğlu 2005).

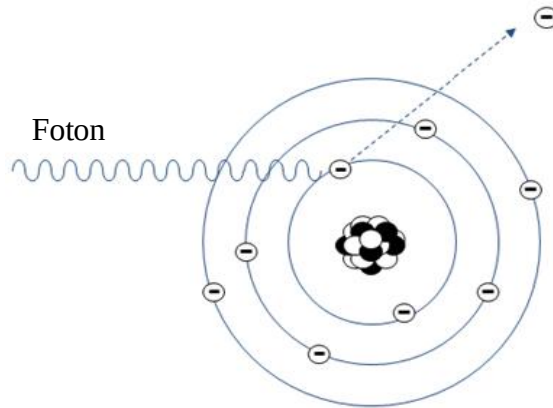
2.2 Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Elektromanyetik ışın (foton) madde içerisinde ya soğurulur ya da saçılır. Bu nedenle de fotonun şiddetinde azalma olur. Bu esnada radyasyon ile madde arasındaki etkileşimde olabilecek reaksiyon tipleri; Fotoelektrik olay, Compton olayı ve çift oluşumudur.

2.2.1 Fotoelektrik olay

Belli bir $h\nu$ enerjisine sahip foton maddenin atomlarının sahip olduğu elektronlarla etkileşir. Fotonun enerjisindeki değişim denklem (2.1)’deki gibidir. Genelde atomun i  yörünge elektronlarıyla gerçekleşen bu olayda foton bir miktar enerjisini elektronu atomdan sökmek için kullanır. Geri kalan fazla enerjiyi de elektrona kinetik enerji olarak aktararak soğurulur (Şekil 2.7).

$$h\nu = E_b + E_k \quad (2.1)$$

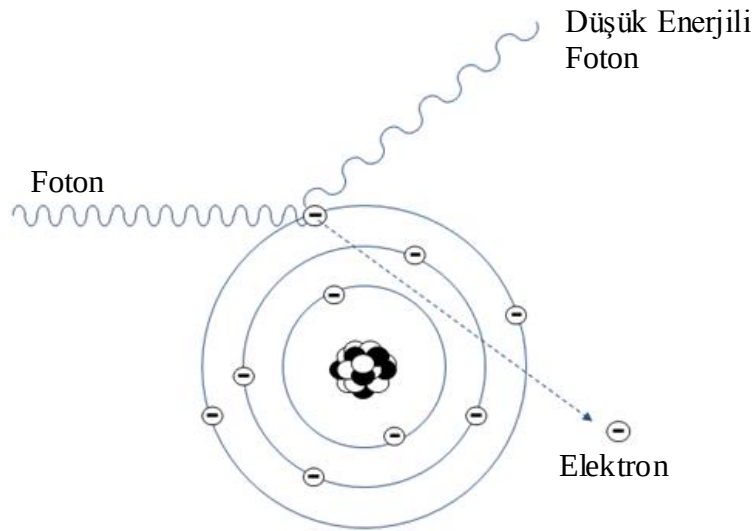


Şekil 2.7 Fotoelektrik olay.

2.2.2 Compton olayı

Bu olayda foton daha çok atomun dış yörünge elektronlarıyla etkileşir. Gelen foton atomun zayıf bağlı elektronuna bir miktar enerji aktardıktan sonra geliş doğrultusuyla θ açısı yaparak daha düşük enerjili halde yoluna devam eder (Şekil 2.8). Burada enerji ve momentumun korunumu ilkesi gereğince elektrona aktarılan enerji (denklem 2.2) ve saçılan fotonun enerjisi belirlenmektedir.

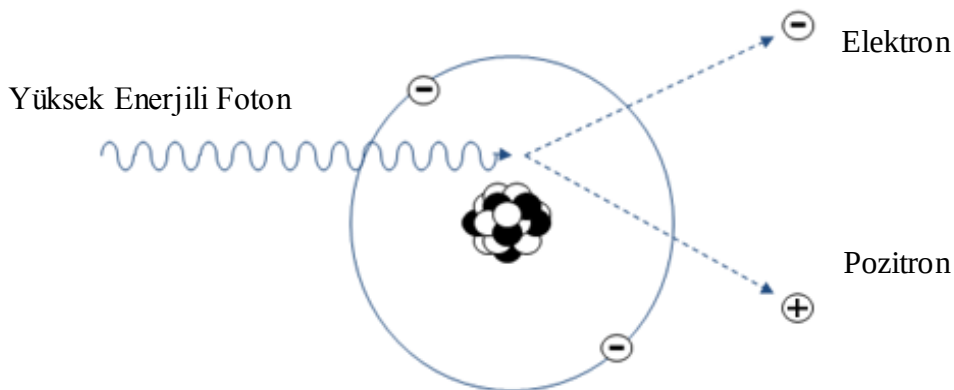
$$E_e = E_\gamma - \left[\frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{511 \text{ keV}} (1 - \cos(\theta))} \right] \quad (2.2)$$



Şekil 2.8 Compton olayı.

2.2.3 Çift oluşumu

Çift oluşumu yüksek enerjili fotonların ağır çekirdeklerin yanından geçerken elektron ve pozitron çiftine dönüşmesi olayıdır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Çift oluşumu.

Elektronun ve pozitronun durgun kütle enerjileri $m_0c^2 = 0,511 \text{ MeV}$ olduğundan, çift oluşum olayının gerçekleşmesi için fotonun sahip olması gereken en düşük enerji $2m_0c^2 = 1,022 \text{ MeV}$ 'dir. Gelen fotonun enerjisi $1,022 \text{ MeV}$ 'den düşük ise elektron-pozitron çifti meydana gelmez ve çift oluşumu olayı gözlenmez.

2.3 Radyasyondan Korunma Metotları

Radyasyon etkilerinden bir kısmı herhangi bir eşik dozu almadan meydana gelebilmektedir, bu tür radyasyon etkilerine stokastik etkiler denir. Bununla beraber, belirli bir eşik dozunun üzerinde radyasyona maruz kalınmasına ve ciddiyeti radyasyon dozuna bağlı olarak değişen radyasyon etkilerine belirleyici etkiler denilmektedir. Radyasyondan korunmanın amacı deterministik radyasyon etkilerinin meydana gelmesini önlemek, stokastik etkilerin meydana geliş olasılıklarını ise kabul edilebilir bir düzeye indirmektir.

İnsanların radyasyona maruz kalmasının biyolojik zararları olduğu bilindiği için maruz kalınacak dozun sadece müsaade edilen seviyelerin altında kalması yeterli olmayıp, olabildiği kadar düşük tutulmalı ve bunun için gerekli her türlü tedbir alınmalıdır. Dış radyasyon kaynaklarından korunmanın zaman, mesafe ve zırhlama gibi üç temel kuralı vardır.

2.3.1 Zaman kuralı

Radyasyonla yapılan işlemlerde alınan doz; doz hızı ile zamanın çarpımıdır ($D=D_0.\Delta t$). Zaman ne kadar çok artarsa alınan dozda o kadar artar. Bu bağıntıdan radyasyon alanında ne kadar az süre kalınırsa o kadar az doz alınacağı açıktır. Radyoaktif kaynağın ve cihazın yanında ne kadar kısa sürede işlem tamamlanırsa alınan doz o kadar az olacaktır. Doz hızının önceden bilinmesi ile bu bölümde çalışacak personelin ne kadar zaman çalışmasına izin verileceği belirlenir.

2.3.2 Mesafe kuralı

Bir radyasyon alanının şiddeti kaynaktan olan uzaklık arttıkça azalır. Bir radyasyon kaynağından belli bir uzaklıkta iken maruz kalınabilecek doz miktarı $D_r=D_0(r_0/r)^2$ ilişkisi ile hesaplanır (Togay 2002). Burada, $r_0=1\text{m}$, r kaynağa olan uzaklık, D_0 kaynaktan 1 metre uzaklıktaki ve D_r ise kaynaktan r uzaklıktaki doz miktarlarıdır.

2.3.3 Zırhlama kuralı

Radyasyon kaynağı ile bu kaynağın sebep olduğu doza maruz kalma ihtimali olan kişiler arasına kurşun, tuğla, beton, duvar gibi malzeme konulmasına zırhlama denilmektedir. Radyasyon dozunu azaltan malzemeye de zırhlama malzemesi denir. Zırhlama malzemelerinin yoğunluğu ne kadar fazla ise x ve gama ışınlarını zırhlama özelliği o kadar artar. Zırhlama, cihazın zırhlanması ve cihazın bulunduğu odanın zırhlaması olarak iki farklı şekilde yapılır. Cihazın zırhlaması kolimatörlerin kullanılması ve de dışkoruyucu bölmelerinin takviyesi ile yapılır. Zıhlama hesaplamaların yapılmasında malzemelerin belirli radyasyonlara karşı gösterdikleri onuncu tabaka kalınlığının ölçülen değerleri kullanılarak yapılır.

Farklı radyasyonlar için kullanılan zırhlama maddeleri ve zırhlama işlemleri birbirinden farklıdır. Zırhlamanın esası, elektromanyetik veya parçacık radyasyonların doz seviyelerinin, zırhlama için kullanılan malzemenin atomları arasından geçerken doğrudan doğruya veya dolaylı olarak iyonizasyon yapmaları ve bu şekilde enerjilerini tamamen veya kısmen kaybederek canlılar için zararsız seviyelere gelmeleridir (Kahya 1985). Zırhlamanın gerekliliği zırhlanacak radyasyon tipine bağlıdır. Kaynağın aktivitesi, kabul edilebilir doz oranı zırhlamada esas alınır. Zırh malzemesi seçiminde ilk düşünülmesi gereken bireylerin korunmasıdır. Etkili bir zıhlama ile radyasyonun zararlı etkileri en aza düşürülebilir. Bununla birlikte ekonomiklik, hafiflik ve boşluklu yapı gibi faktörler zırh malzemesi seçiminde etkili olurlar.

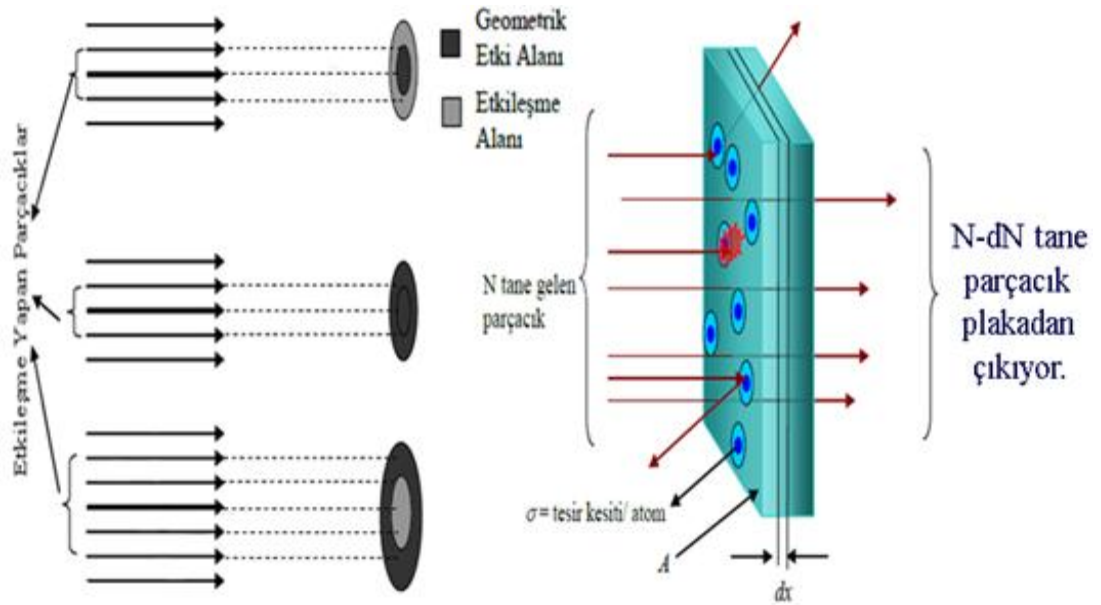
2.4 Üstel Soğurma Kanunu

Fotoelektrik olay, Compton olayı ve çift oluşumu gibi olaylar neticesinde madde içerisinde fotonun şiddetinde bir azalma meydana gelir. Bu azalma Beer - Lambert (Erdem vd. 2010) yasası olarak da bilinen üstel soğurma kanunu ile açıklanabilmektedir. Matematiksel ifadesi denklem 2.3'teki gibidir.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

Burada I_0 gelen fotonun şiddeti, μ ise soğurma katsayısıdır. X ve gama radyasyonunu zırhlamada kullanılan madde için önemli bir parametre olan soğurma katsayısı, esasında etkileşme sırasında olabilecek olayların meydana gelme olasılığını veren tesir kesiti ifadesiyle ilişkilidir.

Nükleer fizikte yapılan bütün çalışmalar da radyasyonun madde ile etkileşmesi esasına dayandığından dolayı gelen bir radyasyonun, hedef madde ile belli bir biçimde etkileşme olasılığını ifade etmenin en kullanışlı yolu tesir kesiti kavramıdır. Tesir kesiti, bu etkileşmelerin gerçekleşme olasılığının bir ölçüsü olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle bir çekirdeğin belli bir etkileşme için tesir kesiti, belli bir parçacık çekirdeğin üstüne geldiğinde, etkileşmenin gerçekleşme olasılığını ifade etmenin matematiksel bir yoludur. Tesir kesiti ve onun geometrik biçimi Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Radyasyonun soğurulması ve tesir kesitin geometrik yorumu.

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, gelen her parçacık hedef madde üzerinde belli bir kesit görmektedir. Bu kesite tesir kesiti denir. Bu kesite yönelen her parçacık hedef madde ile etkileşir. Etkileşme neticesinde parçacıklar ya enerjilerini tamamen kaybederek durdurulurlar ya da etkileşme tesir kesitine göre saçılarak yoluna devam ederler. Bu saçılma koharent veya inkoharent olarak gerçekleşebilir. Rayleigh saçılması olarak da bilinen koharent saçılmasında gelen parçacık enerjisinde herhangi bir değişiklik olmadan yoluna devam eder. İnkoharent saçılmada ise gelen parçacığın enerjisinde bir miktar azalma görülür. Bu azalma tesir kesitiyle doğrudan ilgilidir. Dolayısıyla gelen parçacık ne kadar büyük bir kesit görürse, etkileşme olasılığı da o kadar büyüktür. Hedef maddenin tesir kesiti, etkileşmenin cinsine ve gelen parçacığın enerjisine bağlı olup, parçacığın geometrik kesitinden büyük, küçük veya eşit olabilir.

Yüzey alanı A ve kalınlığı dx olan yassı bir levha düşünelim. Levha birim hacminde n tane atom içeriyorsa, hacmi Adx olduğundan, levhadaki toplam atom sayısı $nAdx$ tir. Her bir çekirdek σ etkileşme tesir kesitine sahip ise, levhadaki bütün çekirdeklerin toplam etkileşme tesir kesiti $nA\sigma dx$ olur. Gelen demetteki parçacık sayısı N ise, levhadaki çekirdeklerle etkileşen parçacık sayısı dN ,

$$f = \frac{\text{Etkileşen Parçacıklar}}{\text{Gelen Parçacıklar}} = \frac{\text{Toplam Etkin Alan}}{\text{Hedef Alanı}} \quad (2.4)$$

denklem 2.4'te yerlerine yazılırsa,

$$\frac{dN}{N} = \frac{n\sigma Adx}{A} \quad (2.5)$$

eşitliği elde edilir.

Aynı parçacık demeti, sonlu bir x kalınlığındaki bir levhaya geldiğini düşünelim. Eğer parçacık sadece bir defa etkileşiyorsa, levhanın dx kalınlığından geçerken demetten dN kadarı ayrılır. Dolayısıyla (2.5) denklemi

$$-\frac{dN}{N} = \frac{n\sigma Adx}{A} \quad (2.6)$$

olur. Başlangıçtaki parçacık sayısı N_0 olmak üzere,

$$-\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -n\sigma \int_0^x dx \quad (2.7)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade integre edilirse,

$$\ln N - \ln N_0 = -n\sigma x \quad (2.8)$$

$$N = N_0 e^{-n\sigma x} \quad (2.9)$$

bağıntısı elde edilir. Burada σ mikroskobik tesir kesitidir ve birimi Barn “dır. ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). $n\sigma$ ise makroskobik tesir kesiti olarak tanımlanır ve Σ ile gösterilir. Gamma ışınları için makroskobik tesir kesiti Σ yerine μ ile gösterilir ve lineer azaltma katsayısı olarak tanımlanır (denklem 2.10).

$$\mu = n\sigma \quad (2.10)$$

Buradan hareketle denklem 2.9,

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (2.11)$$

olarak yeniden yazılır (Öz vd. 2000).

Bir ortama giren gamma radyasyonunun madde ile etkileşmesi, ortamın lineer zayıflama katsayısına bağlıdır. Gelen fotonun enerjisine ve ortamın atom numarasına bağlı olan lineer zayıflama katsayısı, gelen fotonun madde içindeki giriciliğini ve davranışını karakterize eder. Lineer zayıflama katsayısı soğurucu ortamın yoğunluğuna da bağlıdır. Yoğunluğa bağımlılığından kurtulmak için “kütle azaltma katsayısı” kullanılır. Kütle azaltma katsayısı $\mu_m = \mu/\rho$ olarak tanımlanır. Eğer μ [cm^{-1}], soğurucu maddenin yoğunluğu [g/cm^3] ise kütle azaltma katsayısı μ_m [cm^2/g] boyutunda olacaktır (Knoll 1979).

Eğer madde bir çok elementten meydana geliyorsa toplam μ_m değeri her bir elementin bileşimini hesaba katan aşağıdaki karışım kuralıyla verilir (Limkitjaroenporn vd. 2013).

$$\mu_m = \sum w_i (\mu_m)_i \quad (2.12)$$

Burada w_i her bir elementin ortalama kısmi ağırlığıdır. Maddeyi oluşturan elementlerin kısmi ağırlıkları;

$$w_i = \frac{n_i A_i}{\sum n_j A_j} \quad (2.13)$$

denklemlerle verilir (Limkitjaroenporn vd 2011).

Burada A_i i'inci elementin atomik ağırlığı ve n_i formülasyondaki birimlerin sayısıdır.

X ve gama radyasyonunu saçılma ve soğurma katsayıları elementlerin atom numaraları ve yoğunluklarıyla ilişkilidir. Kompozit malzemeler için ayrıca etkin atom sayısı Z_{eff} ile de ilişkilidir ve malzemeye gelen radyasyonun enerjisiyle değişmektedir. Etkin atom sayısı toplam atomik tesir kesitinin toplam elektronik tesir kesitine oranı ile ifade edilir (Un vd. 2011).

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_e} \quad (2.14)$$

Etkin atom sayısı Z_{eff} aynı zamanda etkin elektron yoğunluğu N_{eff} ile ilişkilidir (Han vd. 2009).

$$N_{\text{eff}} = \frac{N_A}{N} Z_{\text{eff}} \sum n_i = \frac{\mu_m}{\sigma_e} \quad (2.15)$$

Z_{eff} değeri kompozit materyaller için radyasyon geçirgenlik özelliklerini ortaya koymada fizik, teknoloji ve mühendislik gibi alanlarda oldukça önemli bir parametredir.

Toplam atomik tesir kesiti;

$$\sigma_t = \frac{\mu_m N}{N_A} \quad (2.16)$$

ilişkisiyle verilir. Burada N maddenin ortalama atomik kütlesi, N_A Avagadro sayısıdır (Han vd 2009). Toplam elektronik tesir kesiti ise;

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum \frac{f_i N_i}{Z_i} (\mu_m)_i = \frac{\sigma_t}{Z_{eff}} \quad (2.17)$$

ilişkisiyle verilir. Burada f_i i'inci elementin kısmi bolluğu, N_i i'inci elementin atomik kütlesi ve $f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_i = 1$ 'dir. Z_i ise i'inci elementin atom numarasıdır (Un ve Şahin 2011).

Radyasyon madde etkileşmesinde diğer önemli bir parametre ortalama serbest yol (MFP) ifadesidir. MFP radyasyonun madde içerisinde aldığı ortalama serbest yolu belirtir ve lineer soğurma katsayısının tersine (μ^{-1}) eşittir. Ayrıca yarı kalınlık değeri (HVL), ve onda bir kalınlık değeri (TVL) verileri de fizik, mühendislik ve teknoloji gibi alanlarda kullanılan önemli parametrelerdir. Bu parametreler denklem 2.12 kullanılarak;

$$HVL = \frac{0,693}{\mu} \quad (2.18)$$

$$TVL = \frac{2,3026}{\mu} \quad (2.19)$$

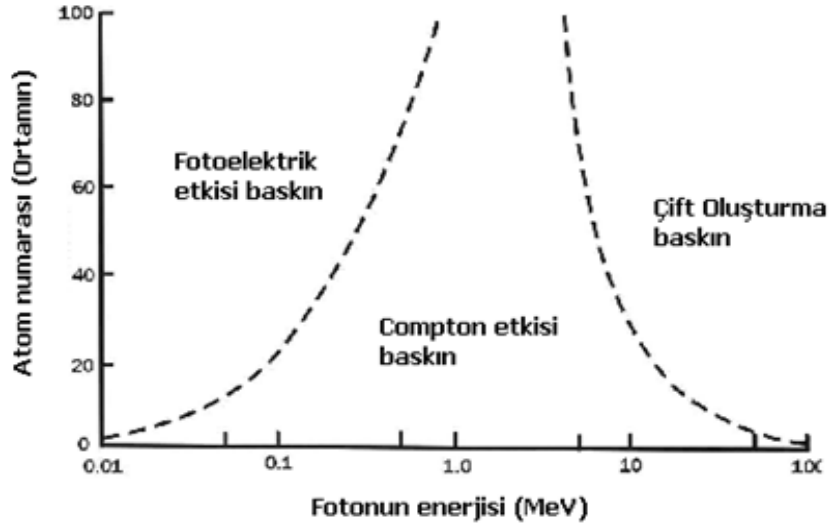
şeklinde hesaplanır.

Elektromanyetik radyasyonların bir ortamdaki giriciliği ve yayınlanma özelliklerinin anlaşılması bakımından soğurma katsayıları önemli bir nicelik olup soğurucu ortamın cinsine ve radyasyonun enerjisine bağlıdır (Evans 1955). Bu bağlamda elde edilen veriler ışığında radyasyon madde etkileşmesindeki muhtemel olayların soğurucu maddenin atom numarasına ve radyasyonun enerjisine bağımlılığı Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 Radyasyon ile madde etkileşmesindeki muhtemel olayların atom numarasına ve radyasyonun enerjisine bağımlılığı.

Olay	Z-bağımlılığı	Enerji bağımlılığı
Foto elektrik olay	$\sim Z^4 - Z^5$	$h\nu^{-3,5} - h\nu^{-3}$
Compton olayı	$\sim Z$	$h\nu^{-1}$
Çift oluşumu	$\sim Z^2$	$\ln h\nu$

Çizelge 2.1'den anlaşıldığı gibi radyasyonun madde ile etkileşimi esnasında gerçekleşebilecek olaylardan fotoelektrik olayın gerçekleşme olasılığı atom numarasının artmasıyla hızlı bir şekilde artmaktadır. Enerji bağımlılığına bakarak fotoelektrik olayın düşük enerji değerlerinde gerçekleşmesinin daha muhtemel olduğunu görülmektedir. Enerji değeri arttıkça Compton ve Çift Oluşumu olaylarının meydana gelme olasılığı artmakta ve atom numarasına bağıllık azalmaktadır. Bu durum elektromanyetik radyasyonun enerjisinin artmasıyla madde içerisine girebilme kabiliyetinin artması anlamına gelir. Burada elde edilen sonuçlar çerçevesinde radyasyon zırhlamada bize ışık tutan bazı faydalı grafikler elde edilmektedir. Bunlardan en önemlisi, hangi enerjideki radyasyon ile birlikte kullanılacak olan malzemenin seçimi konusunda bize ön bilgi veren ve etkileşimlerdeki baskın üç olay Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Radyasyon madde etkileşimindeki baskın üç olay.

Şekil 11'e göre düşük enerji değerlerinde fotoelektrik etkinin, orta enerjilerde Compton saçılmasının ve yüksek enerjilerde de çift oluşumu etkisinin daha baskın olduğu görülmektedir.

2.5 Radyasyon Dozimetrisi

İyonlaştırıcı radyasyonla yapılan çalışmalarda verimli bir şekilde sonuca ulaşabilmek, zararlı biyolojik etkileri belirleyebilmek ve öncelikli olarak korunabilmek için radyasyon dozunun bilinmesi gerekmektedir. Radyasyon dozu hedef ortam tarafından, belli bir sürede, soğurulan enerji miktarıdır. Radyasyon dozunun hedef ortamda meydana getireceği etki, radyasyonun çeşidine ve doza

maruz kalış süresine bağlıdır. Bunun için de öncelikle radyasyon ölçüm birimlerini ve nicelikleri bilmek gereklidir. Bu nicelikler ve birimler Çizelge 2.2'de verilmektedir. Örneğin radyoaktif bir çekirdeğin birim zamandaki bozunum sayısı o çekirdeğin aktivitesini ifade eder. Pierre ve Marie Curie radyum elementinin bir molünden saniyede 3.7×10^{10} parçacık yayımlandığını keşfetmişlerdir. Bu olaya atfen aktivite eski birimi olarak ‘‘Curie’’ kullanılmaktadır. Yeni birimi ise saniyedeki bir bozunmayı temsil eden Becquerel’dir.

Çizelge 2.2 Radyasyon dozu birimleri.

TERİM	<u>BİRİMİ</u>		DÖNÜŞÜM
	ESKİ	YENİ	
AKTİVİTE	Curie (Ci) ; Saniyede 3.7×10^{10} parçalanma gösteren radyoaktif madde miktarının aktivitesidir.	Becquerel (Bq) ; Saniyede 1 parçalanma gösteren bir maddenin aktivitesidir.	$1\text{Ci}=3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ $1\text{Ci}=37\text{GBq}$
İŞINLANMA	Röntgen (R) ; Normal hava şartlarında (0°C ve 760 mm Hg basıncı) havanın 1kg’ında 2.58×10^{-4} Coulomb’luk elektrik yükü değerinde (+) ve (-) iyonlar oluşturan X veya γ radyasyonu miktarıdır.	Coulomb/ kilogram (C/kg) ; Normal hava şartlarında havanın 1 kg’ında Coulomb’luk elektrik yükü değerinde (+) ve (-) iyonlar oluşturan X veya γ radyasyonu miktarıdır.	$1\text{C/kg}=3876\text{R}$ $1\text{R}=2.58 \times 10^{-4}\text{C/kg}$
SOĞURULMUŞ DOZ	Radiation absorbed doz (rad) ; Işınlanan maddenin 1 kg’ına 10^{-2} Joule’lük enerji veren radyasyon miktarıdır.	Gray(Gy) ; Işınlanan maddenin 1 kg’ına 1 Joule’lük enerji veren radyasyon miktarıdır.	$1\text{Gy}=100\text{rad}$ $1\text{rad}=0.01\text{Gy}$
DOZ EŞDEĞERİ	Röntgen equivalent man (rem) ; 1 Röntgenlik X veya γ ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarıdır. $\text{Rem} = (\text{rad}) \times (\text{QF})^*$	Sievert(Sv) ; 1 Gy’lik X ve γ ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren herhangi bir radyasyon miktarıdır. $\text{Sv} = (\text{Gy}) \times (\text{QF})^*$	$1\text{Sv}=100\text{rem}$ $1\text{rem}=0.01\text{Sv}$

Elektromanyetik dalga türünden olan radyasyonlarda ışınlama birimi kullanılmaktadır. Işınlama, havanın bir kilogramında meydana gelen iyonlaşmayı belirtir. X ışınlarıyla yapılan çalışmalarda havanın bir kilogramında 2.58×10^{-4} Coulomb'luk yük meydana getiren radyasyon birimi olarak "Röntgen" kullanılır.

Soğurulmuş doz madde tarafından soğurulan radyasyon miktarını tespit etmek için kullanılır. Yani maddenin birim kütlesi başına depolanan enerji anlamına gelir. Eski birimi "rad" yeni birimi ise "Gray" dir.

Aynı doz değerinde fakat farklı enerjilerde farklı maddelerdeki radyasyon hasarı aynı olmamaktadır. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için soğurulmuş doz değerleri ve kalite faktörü çarpımıyla yeni bir birim olan doz eşdeğerleri tanımlanmıştır. ICRP tarafından belirlenen kalite faktörleri Çizelge 2.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 2.3 Radyasyon kalite faktörleri.

Radyasyon Türü ve Enerjisi	Radyasyon Kalite Faktörü, QF
Fotonlar, bütün enerjilerde	1
Elektronlar ve müonlar, bütün enerjilerde	1
Nötronlar, enerjisi; 10 keV den büyük ise	5
10 keV ile 100 keV arasında	10
100 keV ile 2 MeV arasında	20
2 MeV ile 20 MeV arasında	10
20 MeV den büyük ise	5
Protonlar, 2 MeV den büyük enerjilerde ise	5
Alfa parçacıkları gibi ağır çekirdekler	20

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu çalışmada radyasyon tutuculuk özelliği incelenecek olan saf ve değişik oranlarda katkılандırılmış yaklaşık 2,5 gr/cm³ yoğunluklu vermikülit kullanıldı. Vermikülit katkılандırılmış malzeme olarak ülkemizde bol miktarda bulunan bor türevlerinden Borax (Na₂B₄O₇·10H₂O) minerali ilave edildi. Vermikülitin radyasyon geçirgenlik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesinde radyoaktif ⁶⁰Co (Kobalt), ¹⁵²Eu (Europium) ve ²²⁶Ra (Radyum) radyasyon kaynakları kullanıldı. Deneyler Ondokuzmayıs Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Nükleer Fizik laboratuvarında bulunan sintilasyon NaI(Tl) dedektörlü gama spektrometre sisteminde gerçekleştirildi.

Vermikülit, volkanik bir aktivite sonucu oluşan doğal mineraldir. Fiziksel olarak mika grubu mineralleriyle benzer şekilde, elastik olmayan, ince esnek, levhalara ayrılabilen tipik bir klivaj yapısına sahiptir. Değişik oranlarda demir, magnezyum ve alüminyum içeren hidratlaşmış bir tabaka silikatıdır. Yoğunluğu 2,5 g/cm³'tür. Vermikülitin birim hücresinde su tabakasının bulunması, vermikülitte ticari değer kazandıran özelliğidir. 850°C üzerinde ani bir ısı uygulandığında suyun buhara dönüşmesiyle klivaj düzlemlerine dik yönde ani bir genleşme meydana gelir. Teorik olarak, saf vermikülit orijinal hacminin 30 katına kadar genleşebilir (Toksoy 1997).

Vermikülit; son derece hafif, çevreye zararı olmayan doğal bir maddedir. Bu madde, dünyanın çeşitli yerlerinde özellikle Güney Afrika, Çin, Brezilya, Zimbabve ve Amerika Birleşik Devletlerinde, ve ayrıca Türkiye'de de (Sivas, Malatya) yeni bulunup işlenmeye başlanan bir maddedir (Ancak 2012 yılı ortalarında Türkiye'deki çıkarımı durmuştur). Bugünkü en büyük maden yatağı Güney Afrika'nın Kuzey Doğusundaki Palabora bölgesinde yer almaktadır.

Basit olarak anlatılacak olursa Vermikülit, ısıtıldığında orijinal hacminin kat kat fazlasına genleşebilen yani ekfolasyon adı verilen bir özelliğe sahiptir. Jeolojik açıdan bakılırsa günümüzdeki hemen hemen bütün ticari vermikülit madenlerinin, Prekambrien ve Arkeen (Yani 1,5-3,0 milyar yıl önce) dönemlerden kalma oldukları

bilinmektedir. Ancak Montana'daki vermikülit madenlerinin, Triasik (225 milyon yıl) dönemden kaldığı gözlenmektedir. Şekil 3.1'de vermikülitin genleşmemiş hali (Şekil 3.1.a), genleşmiş hali (Şekil 3.1.b) ve Parça hali (Şekil 3.1.c) görülmektedir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 3.1 (a) Vermikülitin genleşmemiş hali, (b) Genleşmiş hali, (c) Parça hali.

Vermikülitin kimyasal bileşimi; $(Al,Si)_4 (Mg,Al,Fe^{++})_4 O_{10} (OH)_2 4H_2O$ şeklinde olup, tipik fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmektedir (URL - 2).

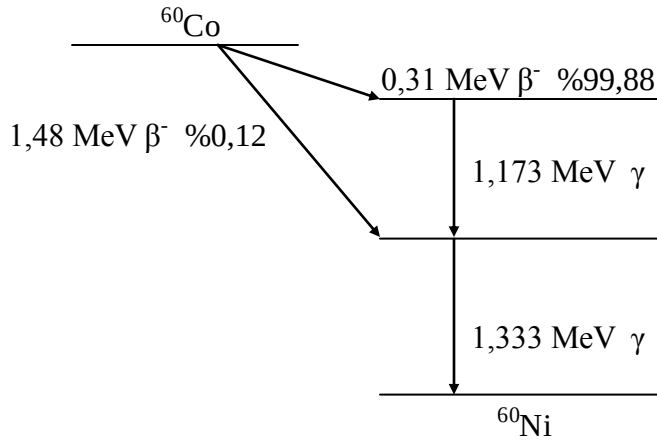
Çizelge 3.1 Vermikülitin tipik fiziksel özellikleri.

Renk:	Açık ve Kapalı kahverengi
Şekil:	Değişken (Granul Tarzında)
Bulk Yoğunluğu (a):	64-160 kg/cu m 4-10 lb/cu ft
Nem Kaybı (110 °C (230 °F) için)	4-10%
pH Değeri (suda):	6-9
Tutuşma Özelliği:	Yok
Toplaşma Sıcaklığı:	1150-1250 °C 2100-2280 °F
Füzyon Noktası:	1200-1320 °C 2200-2400 °F
Kasyon Değiş-Tokuş Kapasitesi (b):	50-150 me/100g
Öz ısı:	0.84-1.08 kJ/kgK 0.20-0.26 kcal/kgK 0.20-0.26 Btu/lb F
Su tutma Kapsitesi (a):	220-325% (ağırlık olarak) 20-50% (hacim olarak)

Deneyde kullanılan radyoaktif kaynaklardan biri ^{60}Co (kobalt) radyoizotopudur. Bu izotopun varlığı California Berkeley üniversitesinden Gleen T. Seaborg ve John Livingood tarafından 1930'da bulunmuştur (Pruitt vd 1981). ^{60}Co ticari amaçlar için ya lineer hızlandırıcılarda ya da nükleer reaktörlerde üretilir.

Doğal kobalt, 27 proton, 32 nötron ve 27 elektrondan oluşmuş doğada kararlı halde (radyoaktif değil) bulunan sert, kırılğan hafif mavimsi renge sahip gri renkli bir metaldir. Özellikleri demir ve nikel benzer. Magnetik özellikleri yönünden ise daha çok demire benzer. Radyoaktif olmayan kobalt doğada çeşitli mineraller içinde bulunur ve binlerce yıl boyunca cam ve seramiğe mavi renk verebilmek için kullanılmıştır.

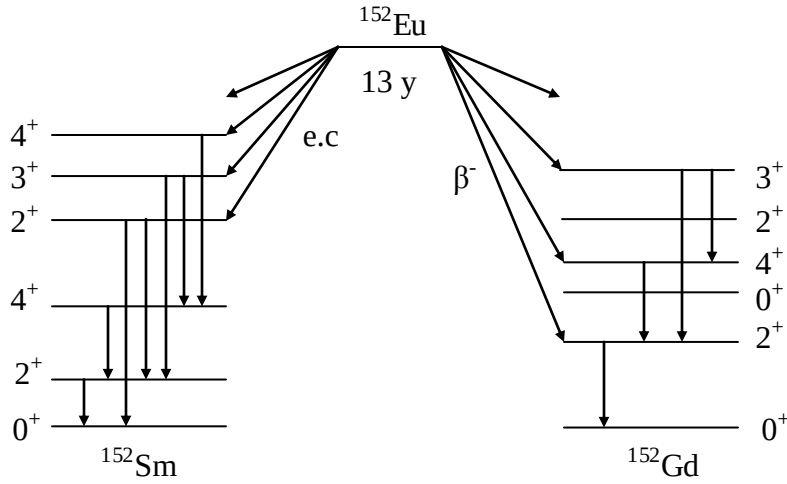
^{60}Co 'ın bozunum türü β^- bozunumudur. Bu bozunma enerjisi 2,824 MeV'dir ve %100'e yakın sıklıktaki bir frekansla da 1,17321 MeV'lik, 1,33247 MeV'lik iki gama ışınması gözlenir (Pruitt vd 1981). Maksimum elektronun enerjisi 318 keV, ortalama elektron enerjisi 96 keV'dir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 ^{60}Co 'nin bozunum şeması.

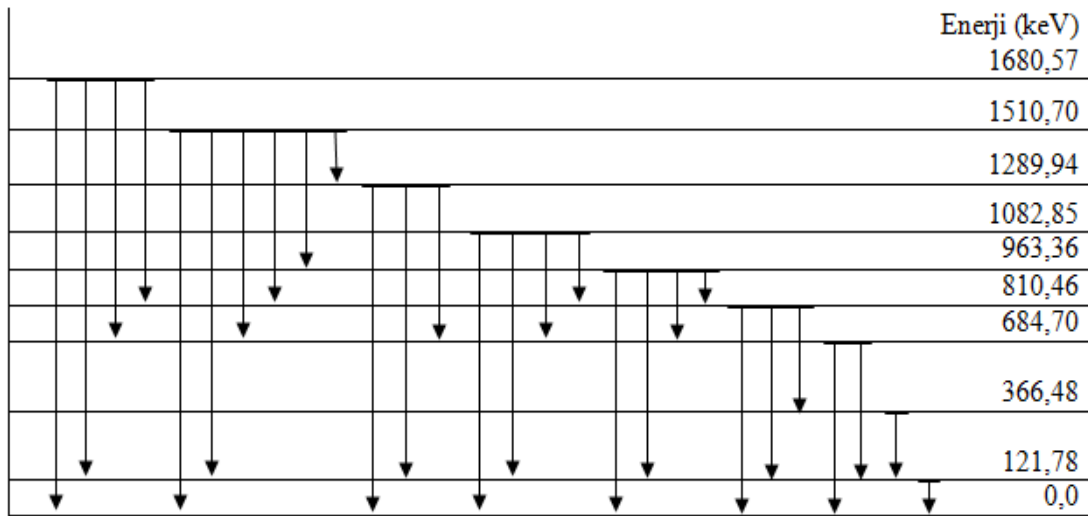
^{60}Co nükleer reaktörlerde oluşan atık bir ürün değildir, nükleer silah üreticilerince de kullanılmaz. Ayrıca nükleer fisyon ve füzyon gibi zincirleme reaksiyonlara da uğramazlar. ^{60}Co 'ın yarı ömrü, yani radyoaktif çekirdek sayısının yarıya inmesi için geçmesi gereken zaman 5271 yıldır. Genellikle pratik amaçlar için radyoaktif elementin 10 $t_{1/2}$ süre geçtikten sonra tükendiği ve zararsız hale geldiği kabul edilir (Pruitt vd 1981). Bu nedenle ^{60}Co 'ın yaklaşık 53 yıl boyunca güvenli bir ortamda saklanması gerekir. Bu işlev Türkiye'de Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından gerçekleştirilir.

Deneyde kullanılan bir diğer kaynak olan Europium gümüşü beyaz bir metaldir. Lantanit serisi üyelerinden europium en az yoğunluklu ve en uçucu olanıdır. Havada 150-180 °C sıcaklıkta tutuşucu özelliğe sahiptir. Europium ^{151}Eu (%52) ve ^{153}Eu (%48) şeklinde yaklaşık olarak eşit oranda iki kararlı izotop halinde oluşur. Doğada Bastnasit, Monazit ve Ksenotim gibi çeşitli cevherler halinde bulunur (Peterson J. vd 2007).



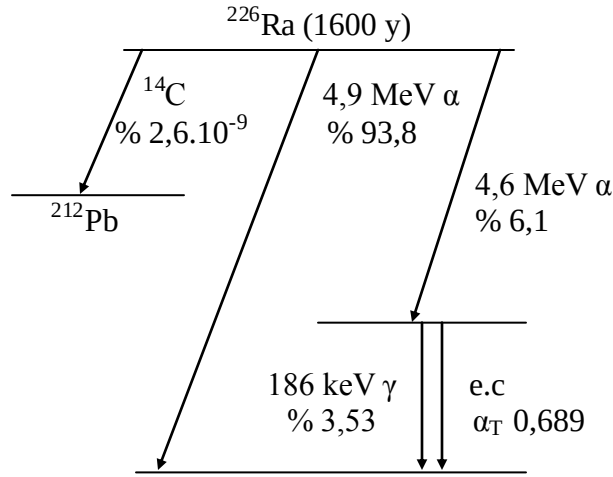
Şekil 3.3 ^{152}Eu 'un bozunum şeması.

^{152}Eu , ^{154}Eu ve ^{155}Eu öncelikle fisyon ürünleri olarak üretilirken, ^{152}Eu ayrıca nükleer reaktör kontrol çubuklarının nötron aktivasyonu ile de üretilebilmektedir. ^{152}Eu radyoaktif çekirdeğinin bozunum şeması ve üretilen gama ışını enerjileri aşağıdaki şekilde verilmiştir. Ondört önemli radyoaktif izotopa sahip olan europium elementinin sadece dört tanesinin yarı ömrü oldukça uzundur. Bizim kullanmış olduğumuz ^{152}Eu radyoaktif çekirdeğinin yarı ömrü 13,516 yıldır.



Şekil 3.4 ^{152}Eu ve ürünlerinden yayınlanan gama ışını enerjileri.

Kullanılan diğ er bir radyoaktif kaynak ^{226}Ra (radyum) radyoizotopudur. Radyum Pierre ve Marie Curie tarafından keş fedilen ilk radyoaktif element olma  ozelliğine sahiptir ve arzın yüzey tabakasında çok düşük konsantrasyonlarda doğal olarak oluşan radyoaktif bir elementtir. Saf haldeki radyum havayla temasında derhal oksidasyona uğrayan gümüşü beyaz ağır bir metaldir (Peterson J. vd 2007). Kurşunun yarısı kadar yoğunluğa sahip olan radyumun çeşitli kararsız izotopları mevcuttur. Yarı omr  1600 yıl olan ^{226}Ra  ekirdeğinin alfa ve beta yayınımlı sonucunda oluşan farklı izotoplarının ürün çekirdeklerinden gama radyasyonu yayınımlı gerçekleşmektedir. ^{226}Ra  ekirdeğinin bozunum şeması aşağıdaki şekilde verilmektedir.



şekil 3.5 ^{226}Ra 'un bozunum şeması.

Yaklaşık 1 MeV civarındaki gama radyasyonunun havadaki menzili 100 metre civarındadır. Gazlı sayaçların verimi düşük olduğu için bu tür radyasyonları tespit etmede uygun boyutlarda, uygun soğurma olasılıkları veren katı dedektörler seçilmelidir. Gama türü radyasyonlar doğrudan değil malzemedeki iyonlaşmalardan elde edilen akımlardan  l  ld ğu için uygun bir dedektör şu iki şartı sağlamalıdır.

1. Elektron ve iyonların yeteri kadar birikip elektronik pulsların oluşabilmesi için yüksek elektrik alana dayanabilecek dedektör materyaline ihtiyaç vardır. Radyasyon olmadığında az veya hiç akım geçmemelidir. böylece tabansayım gürültüleri k  k olacaktır.

2. Elektronlar, gönderilen radyasyon ile atomdan kolayca ve çok sayıda koparılabilmelidir, elektronlar ve ilk iyonlaşan atomlar materyal boyunca kolayca hareket edebilmelidir.

Burada birinci şart yalıtkan malzeme seçimi gerektirirken ikinci şart iletken olmasını önermektedir. Bu iki şartın ancak yarıiletken bir malzeme ile sağlanacağı açıktır (Krane 1988). Buda sintilasyon dedektörüyle sağlanabilmektedir.

Sintilasyon dedektörünün önemli bir özelliği şudur; İyonlaşma sonucu oluşan elektronlar, elektronik pulslarla oluşan elektronlarla aynı değildir. İyonlaşma elektronlarıyla puls elektronları arasındaki dengeyi sağlayan bir aracı vardır, o da ışıktır. Foton yayınlanma olasılığını artırmak ve ışığın kendisini soğurulmasını azaltmak için kristale aktivatör denen küçük miktarda sağısızlıklar ilave edilir. En çok kullanılan aktivatörlerden biri talyumdur. Gama ışınları için yüksek verim gerektiğinde NaI(Tl) iyi bir seçimdir. Şekil 3.6'da deneyde kullanılan NaI(Tl) dedektörünün genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.6 Deney düzeneğinin görüntüsü.

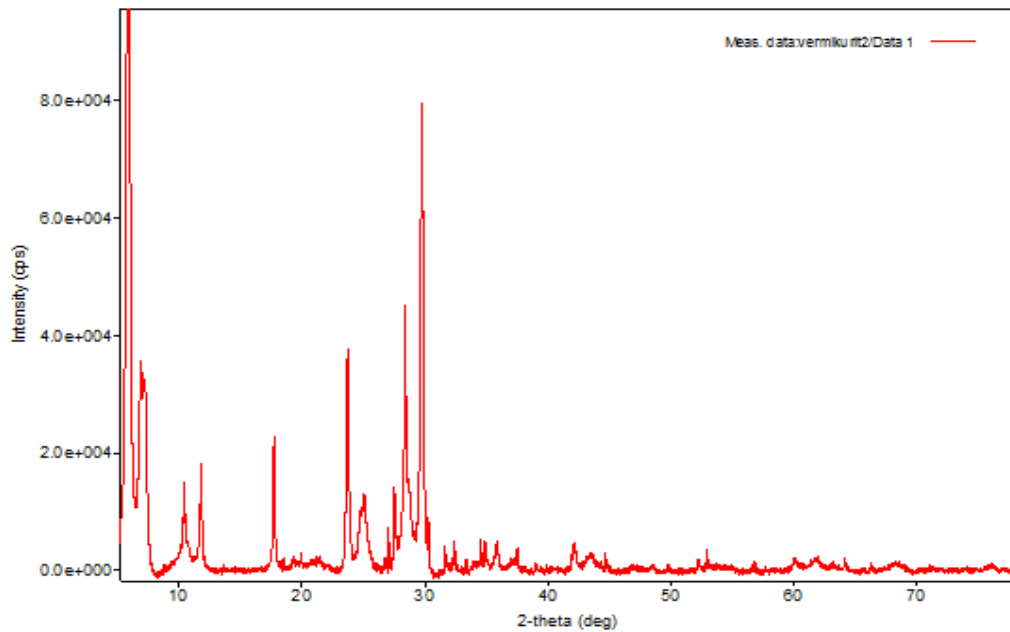
3.2 Örneklerin Temini ve Hazırlanışı

Bu çalışmada zırh materyali hazırlamak için makroskobik vermikülit kullanıldı. Vermikülit Sivas ili Yıldızeli ilçesi Gönenbaba madencilik şirketinden temin edildi. Elde edilen makroskobik taneli vermikülit kimyasal bileşimini tespit etmek için toz haline getirildi. Toz haldeki örnekler Karadeniz İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (KİTAM) Laboratuvarında X ışını toz kırınımı deneyi ile analiz edildi. Daha sonra toz haldeki vermikülitin gama ışını geçirgenliğini tespit etmek için pellet haline getirilmesi gerekiyordu. Bunun için sanayide pres makinası imalatı yapılan atölyede 30 mm çapında değişik kalınlıklarda pelletler oluşturabileceğimiz

elik silindir yaptırıldı. Bu silindirle toz numuneler Specac marka bir hidrolik pres yardımıyla 15 tonluk basınç altında sıkıştırılarak pelletler haline getirildi. Radyasyon geçirgenlik özellikleri incelenecek olan 8 mm'den 20 mm'ye kadar 30 mm çapında beş farklı örnek oluşturuldu. Son olarak elde edilen silindirik biçimdeki örneklerin hassas terazi yardımıyla kütelleri incelenerek klasik yöntemle yoğunlukları tespit edildi ve radyasyon geçirgenlik özelliklerinin incelenmesi için hazır hale getirildi.

3.3 Yöntem

Öncelikle toz haldeki örnekler, kimyasal bileşiminin tespit edilmesi amacıyla, Karadeniz İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (KİTAM) Laboratuvarındaki Rigaku marka X ışını toz difraktometresinde 5°-76° açı aralığında 45 dakika süreyle analiz edildi. Analiz XRD Evaluation programında yüklü olan Powder Diffraction File (PDF) dosyasındaki numunelerin kırınım desenleriyle içeriği bilinmeyen örneğimizin kırınım desenleri eşleştirilerek vermikülitin içerdiği madde ya da maddeler tespit edildi. İncelenen rnek ile bilinen örneğin en şiddetli  ışımaya ait olan d değerleri karşılaştırıldı. rnek tek fazlı ise d1, d2, d3 çizgileri çakıştı. Bilinmeyen rnek çok fazlı olduğunda en şiddetli piklere ait d1, d2, d3 değerlerinden her defasında biri çıkarılarak bilinen örnek desenleriyle karşılaştırıldı. Doğru eşleştirme rneği bulunduktan sonra boşta kalan pikler için işleme tekrar başlandı. Bu tekrar açıkta hiç pik kalmayıncaya kadar yapıldı. XRD analiz grafiği şekil 3.7'de gösterilmektedir.



şekil 3.7 Vermikülitin XRD grafiği.

Yapılan X ışını toz kırınımı deneyinde Şekil 3.7'de elde edilen sonuçlar XRD analizi için veritabanında bulunan eşleştirme metodu kullanılarak tespit edildi. Yapılan eşleştirmede incelediğimiz örnek ile bilinen örneğin en şiddetli üç ışımaaya ait olan d değerleri karşılaştırıldı. Örnek tek fazlı ise d1, d2, d3 çizgileri çakıştı. İncelediğimiz örnek çok fazlı olduğunda en şiddetli piklere ait d1, d2, d3 değerlerinden her defasında biri çıkarılarak bilinen örnek desenleriyle karşılaştırıldı. Buradaki şiddetli piklere karşılık gelen sonuçlar Çizelge 3.2'de verilmektedir.

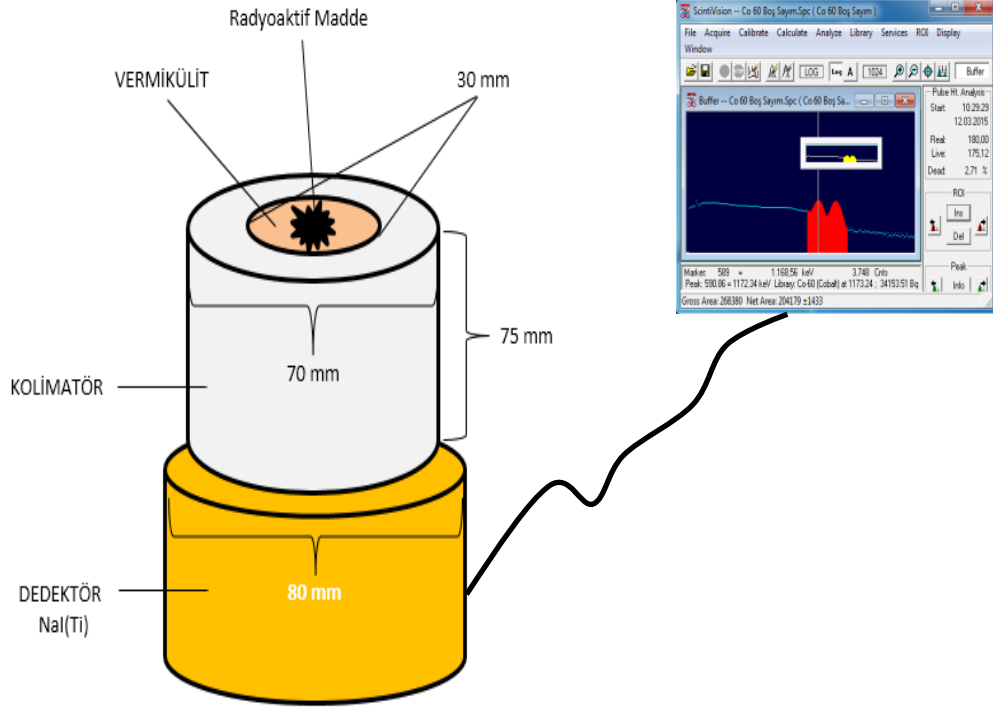
Çizelge 3.2 Toz kırınımı deneyi analiz sonuçları.

2-theta	d (Å)	Faz Adı	Kimyasal Formül
5.8721(19)	15.038(5)	vermiculite(0,0,1)	$\text{Na}_{0.930} \text{Mg}_{2.810} \text{Fe}_{0.065} \text{Al}_{1.185} \text{Si}_{2.895} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_3$
7.150(12)	12.35(2)	Zeolite A (Rb)(1,0,0)	$\text{Rb}_{12.6} \text{Al}_{12} \text{Si}_{12} \text{O}_{48}$
10.401(16)	8.498(13)	Zeolite A (Rb)(1,1,0)	$\text{Rb}_{12.6} \text{Al}_{12} \text{Si}_{12} \text{O}_{48}$
11.775(4)	7.509(2)	vermiculite(0,0,2)	$\text{Na}_{0.930} \text{Mg}_{2.810} \text{Fe}_{0.065} \text{Al}_{1.185} \text{Si}_{2.895} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_3$
17.700(4)	5.0067(10)	vermiculite(0,0,3) ,Zeolite A (Rb)(2,1,1)	$\text{Na}_{0.930} \text{Mg}_{2.810} \text{Fe}_{0.065} \text{Al}_{1.185} \text{Si}_{2.895} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_3 , \text{Rb}_{12.6} \text{Al}_{12} \text{Si}_{12} \text{O}_{48}$
24.992(5)	3.5601(8)	vermiculite(1,1,- 3),Zeolite A (Rb)(2,2,2)	$\text{Na}_{0.930} \text{Mg}_{2.810} \text{Fe}_{0.065} \text{Al}_{1.185} \text{Si}_{2.895} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_3 , \text{Rb}_{12.6} \text{Al}_{12} \text{Si}_{12} \text{O}_{48}$
27.462(3)	3.2452(4)	vermiculite(1,1,3)	$\text{Na}_{0.930} \text{Mg}_{2.810} \text{Fe}_{0.065} \text{Al}_{1.185} \text{Si}_{2.895} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_3$
29.700(2)	3.0056(2)	vermiculite(0,0,5) ,Zeolite A (Rb)(4,1,0)	$\text{Na}_{0.930} \text{Mg}_{2.810} \text{Fe}_{0.065} \text{Al}_{1.185} \text{Si}_{2.895} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_3 , \text{Rb}_{12.6} \text{Al}_{12} \text{Si}_{12} \text{O}_{48}$
31.647(6)	2.8250(5)	Zeolite A (Rb)(3,3,1)	$\text{Rb}_{12.6} \text{Al}_{12} \text{Si}_{12} \text{O}_{48}$

Burada "2-theta" X ışınının toplam kırılma açısını "d" ise malzemeyi oluşturan atomların tabakaları arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Toz haldeki saf vermikülitin kimyasal bileşiminin yapılan XRD analizi sonucunda $\text{Na}_{0.930} \text{Mg}_{2.810} \text{Fe}_{0.065} \text{Al}_{1.185} \text{Si}_{2.895} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 3(\text{H}_2\text{O})$ şeklinde olduğu görüldü. Ayrıca içeriğinde Zeolit yapısının ($\text{Rb}_{12.6} \text{Al}_{12} \text{Si}_{12} \text{O}_{48}$) olduğu tespit edildi.

X ışını toz kırınımı analizi ile vermikülitin kimyasal içeriği belirlendikten sonra toz vermikülit 15 tonluk basınç uygulanarak pellet haline getirildi. Pellet oluşturma işleminin ardından elde edilen değişik kalınlıklardaki örneklerin gama radyasyonu soğurma özellikleri Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde kurulu olan NaI(Tl) dedektörlü gama spektrometre sisteminde belirlendi.

Örneklerin kütle azaltma ve lineer azaltma katsayıları farklı radyoaktif kaynaklardan yayınlanan gama ışınları kullanılarak tayin edildi. Ölçüm sonuçlarının standart sapmalarını en aza indirmek ve ışınları belli bir doğrultuda toplamak için 20 mm kalınlıkta duvarlara sahip 70 mm çapında, 75 mm yükseklikte ve 30 mm çapında içi oyulmuş 8.31 gr/cm³ yoğunluklu silindirik yapıda bir çelik kolimatör kullanıldı. Ayrıca tabansayım gürültülerinin (background radyasyonu) olmaması için dedektör çevresi 5 cm kalınlıklı kurşun zırhla kaplıdır. Deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Kolimatörün varlığında radyoaktif ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu ve ²²⁶Ra kaynakları için dedektörle kaynak arası boş iken I₀ gama radyasyon şiddetleri ölçüldü. Daha sonra dedektör ile kaynak arasına soğurma katsayıları hesaplanacak olan değişik kalınlıklardaki örnekler yerleştirilerek dedektöre ulaşan gama radyasyon şiddeti I ölçüldü. Elde edilen veriler yardımıyla denklem 2.3'deki temel zırlama teorisi (Beer-Lambert yasası) kullanılarak soğurma katsayıları her bir numune için ayrı ayrı hesaplandı. Ölçüm sonuçları 4. bölümde verilmektedir. Hazırlanan örneklerden elde edilen sonuçlar gama spektrometre sistemindeki program vasıtasıyla Net Alan, Net Sayım hızı ve Maksimum Pikteki kanal sayımları kullanılarak üç ayrı yöntemle hesaplandı. Bunun yanında malzemelerin gama ışını geçirgenliklerinin teorik olarak

hesaplanabildiği XCOM adlı program kullanılarak vermikülit için teorik veriler elde edildi (URL-3). Her bir enerji değerindeki teorik sonuçlar deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmalı olarak 4. bölümde verilmektedir.

Bu çalışmada saf ve bor katkılı vermikülit için elde edilen verilerin ne derece iyi bir sonuç ortaya çıkardığını belirlemek amacıyla kurşun, demir, borsilikat, granit ve beton malzemeler için XCOM programıyla bazı teorik hesaplamalar yapıldı. Bu malzemelerin soğurma katsayıları XCOM formatına uygun şekilde programda yazılarak elde edildi. Elde edilen verilerin veritabanlarında kaydedilen değerlerle karşılaştırılması yapıldı ve sonuçların doğruluğu test edildi (Hubbell 1969). Ayrıca bu malzemelerin Z_{eff} , N_{eff} , σ_t , σ_e , HVL, TVL ve MFP parametreleri programdan elde edilen kütle azaltma katsayıları kullanılarak belirlendi. Sonuçlar 4. bölümde verilmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada saf ve bor katkılı olarak beş adet pellet örnek oluşturuldu ve bu örnekler N1, N2, N3, N4 ve N5 olarak adlandırıldı. Bunlardan ilk üç tanesi sırasıyla 20 mm, 8 mm ve 13 mm kalınlıkta olan saf haldeki vermikülittir. N4 ve N5 örnekleri ise sırasıyla %25 ve %50 oranlarında bor minerali ile homojen olarak karıştırılarak oluşturulan örneklerdir. Bu örneklerin gama radyasyonu zırhlama özellikleri ^{60}Co , ^{152}Eu ve ^{226}Ra radyoaktif kaynaklarından yayınlanan 0.186, 0.244, 0.262, 0.342, 0.600, 0.778, 1.173, 1.332, 1.408 ve 1.728 MeV enerjili gama ışınları kullanılarak incelendi. Önce paralel ışın demeti oluşturan kolimatör dedektör üzerinde sabitlendi ve sonra radyoaktif kaynak ile dedektör arası boş iken I_0 gama radyasyon şiddeti ölçüldü. Daha sonra kaynak ile dedektör arasına aynı mesafeyi koruyacak biçimde çeşitli kalınlıklarda oluşturduğumuz örnekler yerleştirilerek bu örneklerden geçip dedektöre ulaşan gama radyasyon şiddeti I ölçüldü. Ölçüm sonucu elde edilen verilerden sonra saf ve bor katkılı vermikülit için kütle azaltma katsayısı μ_m ve lineer azaltma katsayısı μ verileri bu enerji değerlerinde denklem 2.11 kullanılarak belirlendi. Örneklerin kütle azaltma katsayıları bu denklemde hesaplanan lineer azaltma katsayılarının oluşturulan örneklerin yoğunluklarına bölünmesiyle elde edildi. Çizelge 4.1-4.3'de saf vermikülit için elde edilen sonuçlar verilmektedir.

Çizelge 4.1 N1 örneği için elde edilen ölçüm verileri.

Enerji (MeV)	I_0 (cps)	I (cps)	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)
1,728	596	427	0,1667	0,0695
1,408	1431,52	1080,89	0,1404	0,0586
1,333	501,38	371,98	0,1492	0,0622
1,173	550,19	401,55	0,1574	0,0656
0,778	950,27	659,21	0,1828	0,0762
0,600	571,11	360,19	0,2304	0,0961
0,342	339,17	189,94	0,2898	0,1209
0,262	6434	3322	0,3305	0,1378
0,244	653,86	324,72	0,3499	0,1460
0,186	13493	5768	0,4249	0,1772

Çizelge 4.2 N2 örneği için elde edilen ölçüm verileri.

Enerji (MeV)	I ₀ (cps)	I (cps)	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)
1,728	14958	11851	0,1862	0,0726
1,408	1431,52	1188,11	0,1488	0,0580
1,333	501,38	406,89	0,1670	0,0651
1,173	550,19	445,93	0,1680	0,0655
0,778	950,27	759,21	0,1795	0,0700
0,600	571,11	417,16	0,2512	0,0979
0,342	58615	38834	0,3293	0,1284
0,262	6434	3988	0,3826	0,1491
0,244	92861	58587	0,3684	0,1436
0,186	78,08	48,08	0,3878	0,1512

Çizelge 4.3 N3 örneği için elde edilen ölçüm verileri.

Enerji (MeV)	I ₀ (cps)	I (cps)	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)
1,728	107,18	86,89	0,2098	0,0864
1,408	1431,52	1282,36	0,1375	0,0566
1,333	87802	73278	0,2260	0,0930
1,173	96350	83427	0,1800	0,0741
0,778	134957	113444	0,2170	0,0893
0,600	98700	79688	0,2674	0,1101
0,342	469,31	374,23	0,2829	0,1165
0,262	43242	32658	0,3509	0,1444
0,244	653,86	512,61	0,3042	0,1252
0,186	11363	8565	0,3533	0,1454

Çizelge 4.1-4.3'teki örneklerden kütle azaltma katsayısı için elde edilen sonuçlar yaklaşık olarak aynı değerlere sahiptir. Ancak lineer azaltma katsayısı biraz farklılık göstermektedir. Bu farklılık yoğunluktan kaynaklanmaktadır. Çünkü lineer azaltma katsayısı aynı malzemenin farklı yoğunluklarında değişmektedir. Fakat kütle azaltma katsayısı yoğunluktan dolayı değişmemektedir. Aynı işlemler bor katkılı vermikülit için gerçekleştirildi ve sonuçlar Çizelge 4.4 ve 4.5'de verilmektedir.

Çizelge 4.4 N4 örneği için elde edilen ölçüm verileri.

Enerji (MeV)	I ₀ (cps)	I (cps)	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)
1,728	107,18	88,14	0,1700	0,0775
1,408	1431,52	1236,07	0,1276	0,0582
1,333	501,38	451,73	0,0906	0,0413
1,173	550,19	435,65	0,2029	0,0925
0,778	950,27	775,97	0,1762	0,0803
0,600	571,11	446,25	0,2145	0,0978
0,342	483,37	353,45	0,2722	0,1241
0,262	250,21	187,37	0,2514	0,1147
0,244	653,86	500,37	0,2326	0,1061
0,186	68,18	49,27	0,2824	0,1288

Çizelge 4.5 N5 örneği için elde edilen ölçüm verileri.

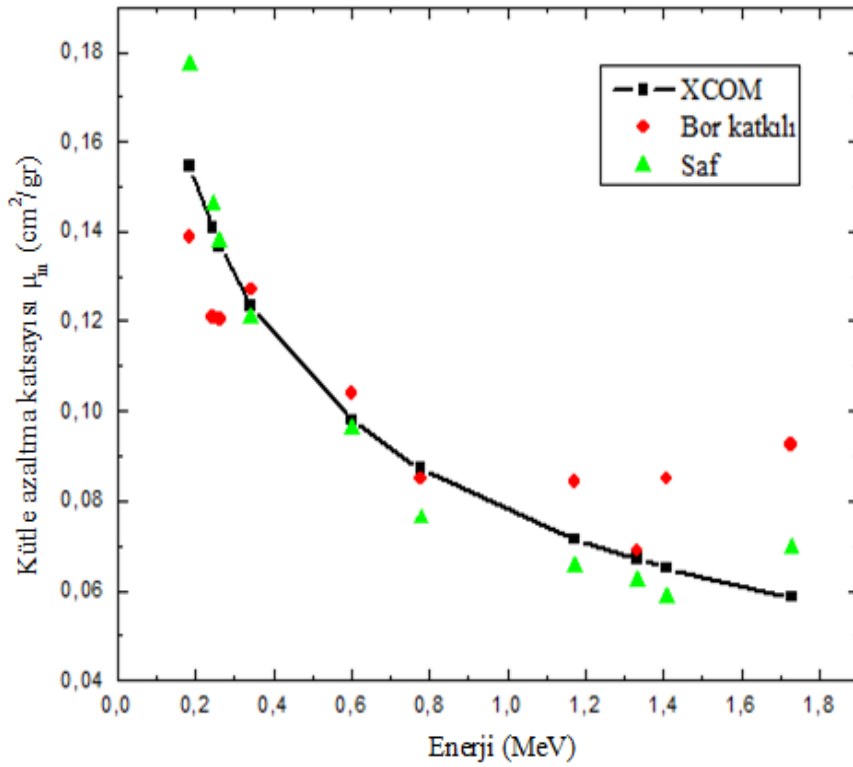
Enerji (MeV)	I ₀ (cps)	I (cps)	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)
1,728	107,18	87,07	0,1889	0,0925
1,408	1431,52	1240,28	0,2036	0,0849
1,333	577,40	494,30	0,1412	0,0691
1,173	550,19	455,11	0,1724	0,0844
0,778	950,27	821,67	0,2036	0,0849
0,600	571,11	451,96	0,2127	0,1041
0,342	483,37	363,23	0,2597	0,1272
0,262	250,21	190,87	0,2460	0,1205
0,244	653,86	519,74	0,2898	0,1209
0,186	68,18	49,90	0,2837	0,1389

Dörtte biri bor olan N4 örneği için elde edilen sonuçlar ilk üç örnekteki sonuçlarla çok farklılık göstermemektedir. Ancak yarısı oranda bor ilave edilen N5 örneğinden elde edilen sonuçlar diğerlerine göre bir miktar artış göstermektedir. Saf ve yarısı oranında bor katkılı vermikülit için elde edilen deneysel sonuçlarla XCOM'dan elde edilen teorik sonuçların karşılaştırması ise Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6 Saf ve bor katkılı vermikülitin lineer ve kütle azaltma katsayılarının deneysel verileriyle XCOM'dan elde edilen verilerin karşılaştırılması.

ENERJİ (MeV)	<u>Saf Vermikülit</u>		<u>XCOM</u>		<u>Bor + Vermikülit</u>	
	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)
1,728	0,1667	0,0695	0,1465	0,0586	0,1889	0,0925
1,408	0,1404	0,0586	0,1627	0,0651	0,2036	0,0849
1,333	0,1492	0,0622	0,1675	0,0670	0,1412	0,0691
1,173	0,1574	0,0656	0,1787	0,0715	0,1724	0,0844
0,778	0,1828	0,0762	0,2180	0,0872	0,2036	0,0849
0,600	0,2304	0,0961	0,2450	0,0980	0,2127	0,1041
0,342	0,2898	0,1209	0,3082	0,1233	0,2597	0,1272
0,262	0,3305	0,1378	0,3415	0,1366	0,2460	0,1205
0,244	0,3499	0,1460	0,3520	0,1408	0,2898	0,1209
0,186	0,4249	0,1772	0,3865	0,1546	0,2837	0,1389

Çizelge 4.6'daki verilere göre son üç satırdaki düşük enerjili gama ışınları için elde edilen veriler hariç saf vermikülitin soğurma katsayıları XCOM'daki verilerle uyushmaktadır. Bununla birlikte bor katkılı vermikülit için elde edilen veriler özellikle yüksek enerji değerlerinde artış göstermektedir. Bu çizelgedeki sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Saf ve bor katkılı vermikülit için elde edilen kütle azaltma katsayılarının XCOM'daki sonuçlarla karşılaştırılması.

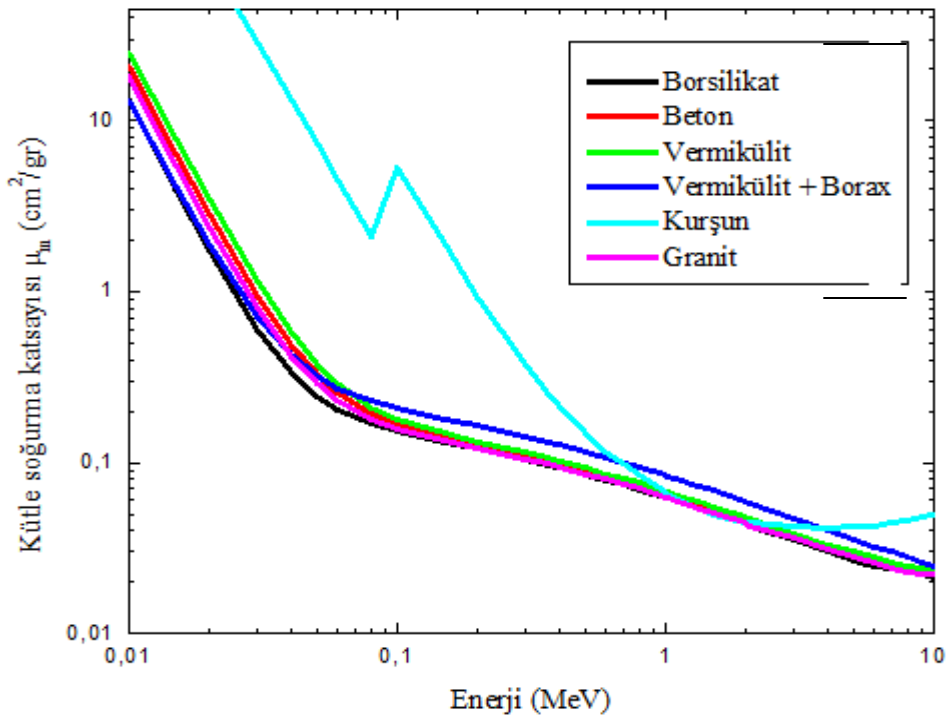
Şekil 4.1'de yeşil renkle gösterilenler saf haldeki vermikülitin deneysel sonuçlarını, kırmızı renkle gösterilenler ise yarısı oranda bor ilave edilen vermikülitin deneysel sonuçlarını göstermektedir. Siyah renkle belirtilenler ise vermikülit için XCom'dan elde edilen teorik sonuçları göstermektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi soğurma katsayıları artan enerji ile üstel olarak azalmaktadır. Burada saf vermikülit için elde edilen deneysel sonuçlarla teorik sonuçlar iyi bir uyum içindedir. Ancak kırmızı renkli noktalarla belirtilen %50 oranındaki vermikülit borax karışımının kütle azaltma katsayısı değerlerinin deneysel olarak arttığı göze çarpmaktadır. Elde edilen sonuçlar bize vermikülitin gama radyasyonu zırhlamasında geliştirilebileceğini ve kullanılabilirliğinin artacağını düşündürmektedir. Bunun için gama radyasyonu zırhlamasında incelenen malzemelerle karşılaştırılması gerekmektedir.

Literatürde incelenmiş bazı yapı malzemeleriyle birlikte vermikülitin ve vermikülit borax karışımının XCOM'dan elde edilen kütle azaltma katsayılarının karşılaştırılması Çizelge 4.7'de verilmektedir. Sonuçlar kurşun, beton, borsilikat ve granit için literatürde elde edilen verilerle karşılaştırılarak kontrol edilmiştir (Hubbell 1969, Mavi 2012, Akkurt vd. 2010, 2011, Bootjomchai vd. 2012).

Çizelge 4.7 Kurşun, vermikülit, bor katkılı vermikülit, borsilikat, beton ve granitin XCOM'dan elde edilen kütle azaltma katsayısı verileri.

Enerji (MeV)	Kütle azaltma katsayısı μ_m (cm ² /gr)					
	<u>Borsilikat</u>	<u>Beton</u>	<u>Vermikülit</u>	<u>Vermikülit+Borax</u>	<u>Kurşun</u>	<u>Granit</u>
0,010	13,25	20,65	24,95	12,98	125,7	18,25
0,015	3,990	6,436	7,920	4,160	108,3	5,561
0,020	1,737	2,826	3,504	1,904	84,04	2,413
0,030	0,603	0,945	1,164	0,719	28,94	0,804
0,040	0,337	0,489	0,586	0,427	13,44	0,421
0,050	0,245	0,327	0,379	0,321	7,387	0,287
0,060	0,204	0,255	0,287	0,272	4,530	0,228
0,080	0,168	0,195	0,210	0,228	2,112	0,179
0,100	0,152	0,171	0,180	0,207	5,336	0,158
0,150	0,132	0,144	0,148	0,180	1,910	0,135
0,200	0,120	0,130	0,133	0,163	0,936	0,122
0,300	0,104	0,112	0,114	0,142	0,373	0,105
0,364	0,097	0,104	0,106	0,132	0,254	0,098
0,400	0,093	0,100	0,102	0,127	0,214	0,094
0,500	0,085	0,091	0,093	0,116	0,149	0,086
0,600	0,079	0,084	0,086	0,107	0,116	0,080
0,662	0,076	0,081	0,082	0,102	0,103	0,076
0,800	0,069	0,074	0,076	0,094	0,084	0,070
1,000	0,062	0,067	0,068	0,084	0,068	0,063
1,022	0,062	0,066	0,067	0,083	0,066	0,062
1,173	0,057	0,061	0,063	0,078	0,059	0,058
1,250	0,056	0,059	0,061	0,075	0,056	0,056
1,333	0,054	0,058	0,059	0,073	0,054	0,054
1,500	0,051	0,054	0,055	0,069	0,050	0,051
2,000	0,044	0,047	0,048	0,059	0,045	0,044
2,044	0,043	0,046	0,047	0,058	0,045	0,043
3,000	0,035	0,038	0,038	0,047	0,042	0,036
4,000	0,030	0,032	0,033	0,040	0,041	0,031
5,000	0,027	0,029	0,030	0,035	0,042	0,028
6,000	0,025	0,027	0,028	0,032	0,043	0,026
7,000	0,024	0,025	0,026	0,030	0,045	0,024
8,000	0,023	0,024	0,025	0,028	0,046	0,023
9,000	0,022	0,023	0,024	0,026	0,048	0,022
10,00	0,021	0,022	0,023	0,025	0,049	0,022

Çizelge 4.7'de verilen değerlere göre vermikülit günümüzde en fazla kullanılan gama ışını enerjilerinde diğer malzemelere kıyasla daha yüksek kütle soğurma katsayılarına sahiptir. Özellikle vermikülit borax karışımı için kütle soğurma katsayısı değerlerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Çizelge 4.7'de kurşun, beton, vermikülit, borsilikat ve granit için elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Kurşun, beton, vermikülit, bor katkılı vermikülit granit ve borsilikatın kütle soğurma katsayılarının karşılaştırılması.

Şekil 4.2'de kıyaslanan malzemeler için soğurma katsayılarının fotonun enerjisine bağlı olarak bütün malzemelerde de aynı şekilde artan enerjiyle birlikte üstel olarak azaldığı görülmektedir. Ancak kurşunun sahip olduğu kütle soğurma katsayısı değerleri diğerlerine göre oldukça fazladır. Bunun nedeni kurşunun yüksek yoğunluğa ve yüksek atom numarasına sahip olmasıdır. Ancak vermikülitin, özellikle de bor katkılı vermikülitin günümüzde bir çok alanda teknolojik olarak en fazla kullanılan 1–3 MeV arası enerjilerdeki elektromanyetik radyasyonu soğurma katsayısının diğer malzemelere ve hatta kurşuna göre daha üstün olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi bu enerji değerlerinde kurşunla kıyaslanabilir nitelikte olması kendisinin zırh malzemesi olarak kullanılabileceğinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir.

Bu çalışmada ayrıca kurşun, demir, vermikülit, borsilikat ve beton için gelen foton enerjisine bağlı olarak etkin atom sayısı Z_{eff} , etkin elektron yoğunluğu N_{eff} , atomik tesir kesiti σ_t , elektronik tesir kesiti σ_e , değerleri hesaplandı ve sonuçlar Çizelge 4.8-4.12'de verildi. Bu malzemeler için atomik tesir kesiti σ_t ve elektronik tesir kesiti σ_e değerlerinin Şekil 4.1'de gösterilen kütle soğurma katsayısıyla benzer şekilde artan enerjiyle azalan değerlere sahip olduğu Şekil 4.3 (a) ve (b)'de sırasıyla gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 4.4 (a) ve (b) 'de bu malzemeler için etkin atom sayısı Z_{eff} ve etkin elektron yoğunluğu N_{eff} değerlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.

Çizelge 4.8 Vermikülit için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.

Enerji (MeV)	σ_t (barn/atom)	σ_e (barn/atom)	Z_{eff}	$N_{eff} (\times 10^{23})$ elektron/cm ³	$\mu_{m,vermikülit}$ (cm ² /gr)
1,728	1,93	0,16	12,19	3,69	0,0586
1,408	2,15	0,18	12,19	3,69	0,0651
1,333	2,21	0,17	13,39	4,06	0,0670
1,173	2,36	0,19	12,20	3,70	0,0715
1,085	2,44	0,20	12,12	3,67	0,0739
0,964	2,60	0,21	12,20	3,69	0,0788
0,778	2,88	0,24	12,19	3,69	0,0872
0,600	3,23	0,26	12,20	3,69	0,0980
0,342	4,07	0,33	12,15	3,69	0,1233
0,262	4,51	0,38	12,16	3,61	0,1366
0,244	4,64	0,38	12,24	3,71	0,1408

Çizelge 4.9 Kurşun için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.

Enerji (MeV)	σ_t (barn/atom)	σ_e (barn/atom)	Z_{eff}	$N_{eff} (\times 10^{23})$ elektron/cm ³	$\mu_{m,kurşun}$ (cm ² /g)
1,728	6,48	0,20	32,40	2,38	0,0476
1,408	7,16	0,22	32,39	2,38	0,0526
1,333	7,40	0,23	32,31	2,37	0,0544
1,173	8,10	0,25	32,40	2,38	0,0595
1,085	8,63	0,27	32,32	2,37	0,0634
0,964	9,56	0,29	32,40	2,38	0,0702
0,778	11,78	0,36	32,36	2,37	0,0865
0,600	15,89	0,49	32,36	2,37	0,1167
0,342	39,06	1,21	32,33	2,37	0,2868
0,262	68,05	2,10	32,40	2,38	0,4996
0,244	79,86	2,47	32,33	2,37	0,5863

Çizelge 4.10 Demir için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.

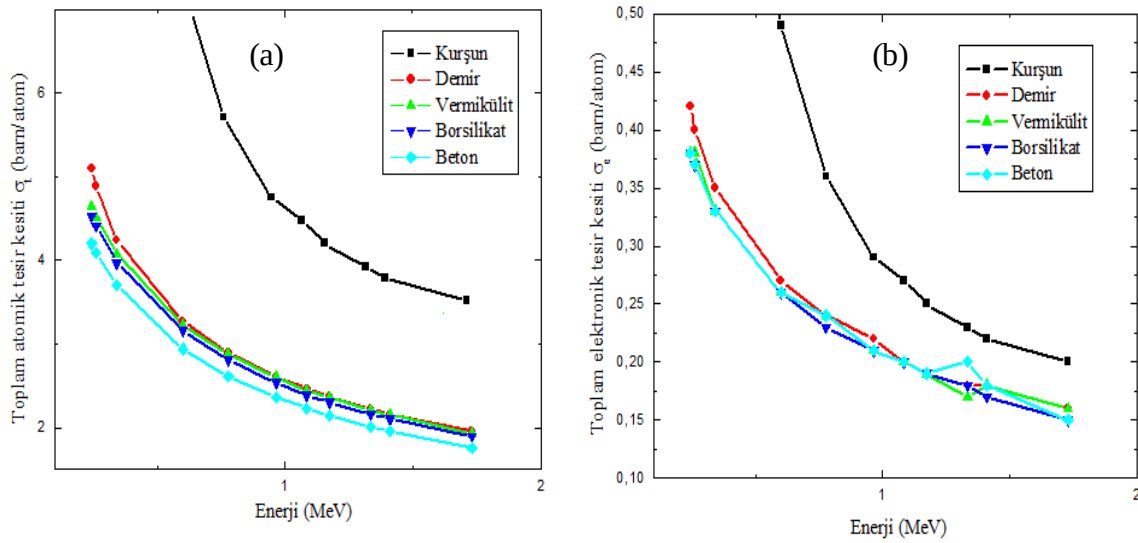
Enerji (MeV)	σ_t (barn/atom)	σ_e (barn/atom)	Z_{eff}	$N_{eff} (\times 10^{23})$ elektron/cm ³	$\mu_{m, demir}$ (cm ² /gr)
1,728	1,96	0,16	12,09	2,80	0,0454
1,408	2,16	0,18	12,06	2,79	0,0501
1,333	2,22	0,18	12,06	2,79	0,0515
1,173	2,37	0,19	12,09	2,79	0,0549
1,085	2,46	0,20	12,05	2,80	0,0571
0,964	2,61	0,22	12,08	2,80	0,0606
0,778	2,89	0,24	12,04	2,79	0,0671
0,600	3,27	0,27	12,06	2,79	0,0758
0,342	4,24	0,35	12,04	2,79	0,0984
0,262	4,89	0,40	12,07	2,79	0,1133
0,244	5,10	0,42	12,08	2,80	0,1182

Çizelge 4.11 Borsilikat için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.

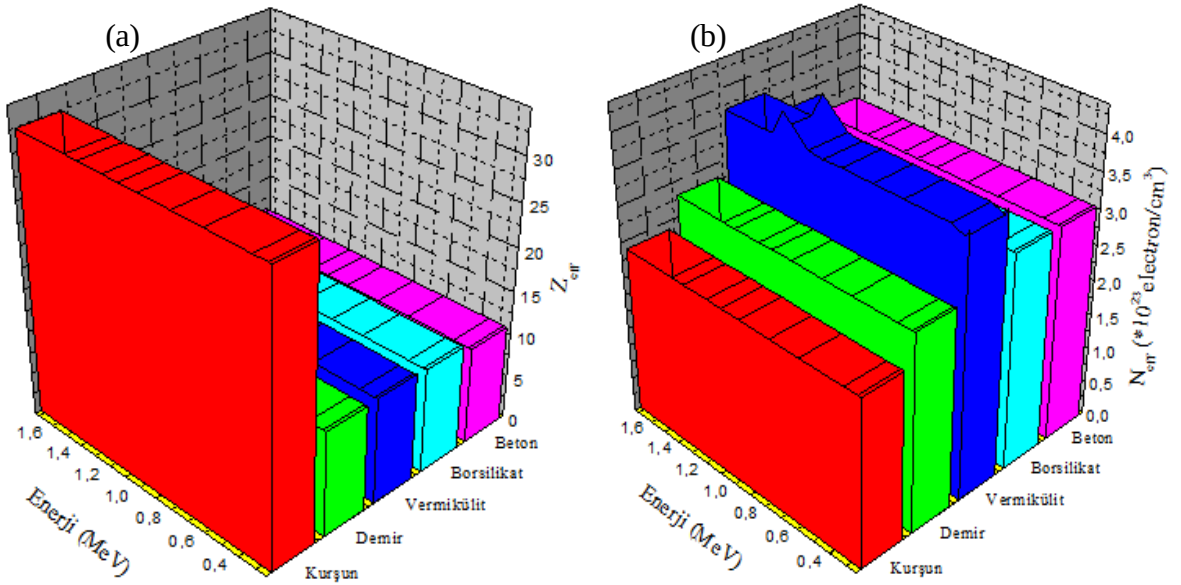
Enerji (MeV)	σ_t (barn/atom)	σ_e (barn/atom)	Z_{eff}	$N_{eff} (\times 10^{23})$ elektron/cm ³	$\mu_{m,borsilikat}$ (cm ² /gr)
1,728	1,89	0,15	12,07	3,07	0,0482
1,408	2,10	0,17	12,07	3,07	0,0536
1,333	2,16	0,18	12,07	3,07	0,0551
1,173	2,30	0,19	12,07	3,07	0,0588
1,085	2,39	0,20	12,07	3,07	0,0611
0,964	2,54	0,21	12,07	3,07	0,0648
0,778	2,81	0,23	12,07	3,07	0,0717
0,600	3,16	0,26	12,07	3,07	0,0806
0,342	3,97	0,33	12,07	3,07	0,1014
0,262	4,41	0,37	12,07	3,07	0,1125
0,244	4,53	0,38	12,07	3,07	0,1156

Çizelge 4.12 Beton için hesaplanan σ_t , σ_e , Z_{eff} , N_{eff} ve μ_m değerleri.

Enerji (MeV)	σ_t (barn/atom)	σ_e (barn/atom)	Z_{eff}	$N_{eff} (\times 10^{23})$ elektron/cm ³	$\mu_{m,beton}$ (cm ² /gr)
1,728	1,76	0,15	11,16	3,07	0,0485
1,408	1,95	0,18	11,16	3,07	0,0539
1,333	2,01	0,20	11,16	3,07	0,0554
1,173	2,14	0,19	11,16	3,07	0,0591
1,085	2,23	0,20	11,16	3,07	0,0615
0,964	2,36	0,21	11,16	3,07	0,0652
0,778	2,61	0,24	11,16	3,07	0,0721
0,600	2,94	0,26	11,16	3,07	0,0810
0,342	3,70	0,33	11,16	3,07	0,1021
0,262	4,09	0,37	11,16	3,07	0,1128
0,244	4,20	0,38	11,16	3,07	0,1157



Şekil 4.3 Vermikülit, demir, borsilikat ve beton için foton enerjisine göre (a) toplam atomik tesir kesiti değişimi, (b) toplam elektronik tesir kesiti değişimi.



Şekil 4.4 Kurşun, demir, vermikülit, borsilikat ve beton malzemelere göre (a) etkin atom sayısı Z_{eff} , (b) etkin elektron yoğunluğu N_{eff} gösterimi.

Yukarıdaki verilerde kurşun için etkin atom sayısı, toplam elektronik tesir kesiti ve toplam atomik tesir kesiti değerleri diğerlerine nazaran oldukça yüksek çıkmıştır. Diğer malzemelerde ise hemen hemen yaklaşık değerler elde edilmesine rağmen vermikülit ikinci sırada gelmektedir. Demirin yoğunluğu vermikülitin yaklaşık üç katı olmasına rağmen bu sonuç oldukça ilginçtir. Bununla birlikte etkin elektronik yoğunluğu değerleri bakımından vermikülit ilk sırada kurşun ise son sırada gelmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki atomik tesir kesiti, elektronik tesir kesiti, etkin atom sayısı ve etkin elektron yoğunluğu gibi parametreler radyasyon ile madde etkileşmesinde olabilecek muhtemel olaylar hakkında detaylı bilgi vermesine rağmen, bu parametreler radyasyon zırh malzemesi seçiminde tek başına yeterli olamamaktadırlar. Bu yüzden bilinmesi gereken bazı önemli parametreler gerekmektedir. Bunlar fizik, mühendislik ve teknoloji alanında çok kullanışlı olan yarı değer kalınlığı HVL, onda bir kalınlık TVL ve ortalama serbest yol MFP parametreleridir. Burada HVL radyasyon şiddetini yarı değerine indiren malzeme kalınlığı, TVL radyasyon şiddetini onda bir değerine indiren malzeme kalınlığı ve MFP ise radyasyonun malzeme içinde aldığı ortalama serbest yolu belirtmektedir.

Vermikülit için HVL, TVL ve MFP değerleri hem deneysel hem de teorik olarak 0.186, 0.244, 0.262, 0.342, 0.600, 0.778, 1.173, 1.332, 1.408 ve 1.728 MeV enerji değerlerinde 2. bölümde verilen denklem 2.18 ve 2.19 kullanılarak belirlendi. Aynı enerji değerlerindeki teorik veriler XCOM programıyla elde edildi. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.13'de verilmektedir.

Çizelge 4.13 Vermikülitin için HVL, TVL ve MFP değerlerinin deneysel ve teorik olarak karşılaştırılması. (Burada HVL, TVL ve MFP cm boyutundadır).

Enerji (MeV)	HVL		TVL		MFP	
	<u>Deney</u>	<u>XCOM</u>	<u>Deney</u>	<u>XCOM</u>	<u>Deney</u>	<u>XCOM</u>
1,728	4,812	4,730	15,990	15,717	6,944	6,825
1,408	4,935	4,259	16,400	14,152	7,122	6,146
1,333	4,644	4,137	15,432	13,746	6,702	5,970
1,173	4,402	3,878	14,628	12,885	6,353	5,595
0,778	3,791	3,178	12,596	10,562	5,470	4,587
0,600	3,007	2,828	9,993	9,398	4,340	4,081
0,342	2,391	2,248	7,945	7,471	3,450	3,244
0,262	1,967	2,029	6,535	6,742	2,838	2,928
0,244	1,980	1,968	6,580	6,541	2,857	2,840
0,186	1,630	1,793	5,419	5,957	2,353	2,587

Vermikülit ile birlikte literatürde gama radyasyonu geçirgenlik özellikleri incelenen kurşun, demir, beton, granit ve borsilikatın HVL, TVL ve MFP değerleri sırasıyla Çizelge 4.14-4.16'da verilmektedir. Ayrıca bu değerler Şekil 4.5 (a), (b) ve (c) 'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 4.14 Kurşun, demir, vermikülit, beton, granit ve borsilikat'ın farklı enerjilerdeki HVL (Half Value Layer) değerlerinin karşılaştırılması.

Foton Enerjisi (keV)	HVL					
	Kurşun (11,35 g/cm ³)	Demir (7,86 g/cm ³)	Vermikülit (2,5 g/cm ³)	Beton (2,4 g/cm ³)	Granit (2,69 g/cm ³)	Borsilikat (2,23 g/cm ³)
500	0,4	1,0	2,6	3,3	2,9	3,6
1000	0,9	1,5	3,5	4,5	4,1	4,9
1500	1,2	1,8	4,4	5,6	5,1	6,1
2000	1,3	2,1	5,1	6,4	5,8	7,1
3000	1,5	2,4	6,3	7,9	7,2	8,7

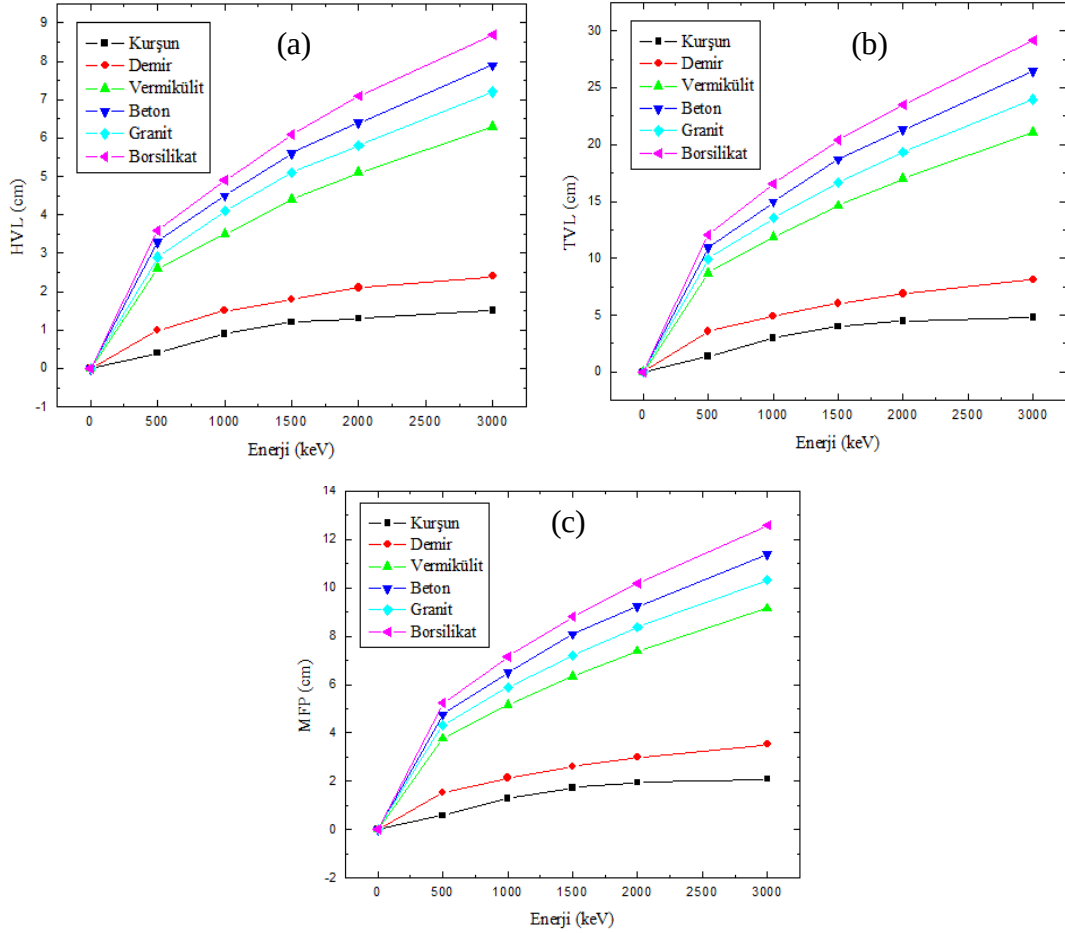
Çizelge 4.15 Kurşun, demir, vermikülit, beton, granit ve borsilikat'ın farklı enerjilerdeki TVL (Tenth Value Layer) değerlerinin karşılaştırılması.

Foton Enerjisi (keV)	TVL					
	Kurşun (11,35 g/cm ³)	Demir (7,86 g/cm ³)	Vermikülit (2,5 g/cm ³)	Beton (2,4 g/cm ³)	Granit (2,69 g/cm ³)	Borsilikat (2,23 g/cm ³)
500	1,35	3,55	8,68	10,96	9,92	12,05
1000	2,98	4,92	11,89	14,95	13,54	16,56
1500	3,99	6,02	14,61	18,72	16,68	20,37
2000	4,48	6,89	16,99	21,32	19,34	23,49
3000	4,83	8,11	21,08	26,46	23,98	29,14

Çizelge 4.16 Kurşun, demir, vermikülit, beton, granit ve borsilikat'ın farklı enerjilerdeki MFP (Mean Free Path) değerlerinin karşılaştırılması.

Foton Enerjisi (keV)	MFP					
	Kurşun (11,35 g/cm ³)	Demir (7,86 g/cm ³)	Vermikülit (2,5 g/cm ³)	Beton (2,4 g/cm ³)	Granit (2,69 g/cm ³)	Borsilikat (2,23 g/cm ³)
500	0,58	1,54	3,77	4,76	4,31	5,23
1000	1,29	2,13	5,16	6,49	5,88	7,15
1500	1,73	2,61	6,34	8,08	7,21	8,79
2000	1,94	2,99	7,38	9,23	8,37	10,19
3000	2,09	3,52	9,15	11,39	10,32	12,59

Çizelge 4.14 ve 4.15'deki verilerden anlaşıldığı üzere radyasyon zırhlama hususunda standart hale gelmiş olan kurşunun soğurduğu radyasyon miktarına eşdeğer bir radyasyonu soğurmak için kurşun kalınlığının yaklaşık 1,5-2 katı kalınlığında demir, yaklaşık 3,5-4 katı kadar vermikülit ve 6-7 katı kalınlıkta da beton malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemelerin görsel olarak karşılaştırması aşağıdaki Şekil 4.5'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Kurşun, demir, vermikülit, beton, granit ve borsilikat için (a) HVL, (b) TVL, (c) MFP değerlerinin enerjiye göre değişimi.

Şekil 4.5'de gösterilen parametrelerin artan enerji ile aynı oranda arttığı görülmektedir. Yoğunluğu yüksek olan malzemelerin kalınlıkları ve radyasyonun malzeme içinde aldığı yol daha az olmasına karşın düşük yoğunluktaki malzemeler için bu değerler artmaktadır. Ancak Şekil 4.5'deki gösterimde literatürde bu alanda incelenen bazı malzemelere göre saf haldeki vermikülit için elde edilen teorik sonuçların daha iyi olduğu ortadadır.

Bu çalışmada deneysel olarak incelediğimiz saf ve bor katkılı vermikülitin avantajlarının belirlenmesi için bilinen en iyi zırh malzemesi olan kurşunla karşılaştırılması yapıldı. Bu karşılaştırmada kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısı ve TVL parametreleri kullanıldı. ^{60}Co radyoaktif kaynağından yayınlanan 1,33 MeV enerjili gama ışınları kullanılarak elde edilen veriler Çizelge 4.17'de verilmektedir.

Çizelge 4.17 Bilinen en iyi zırh malzemesi olan kurşun ile saf ve bor katkılı vermikülitin karşılaştırılması.

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	μ (cm ⁻¹)	μ_m (cm ² /gr)	TVL (cm)
Kurşun	11,34	0,6168	0,0544	3,73
Saf Vermikülit	2,39	0,1492	0,0622	15,43
Borax + Vermikülit	2,04	0,1412	0,0691	16,30

Çizelge 4.17'deki verilere göre kütle soğurma katsayısı en fazla olan bor katkılı vermikülit iken en düşük olan kurşundur. Lineer soğurma katsayısı için ise bunun tam tersi olduğu görülmektedir. Öyleyse soğurganlık özelliği bakımından yoğunluk parametresini hesaba katmak zorunda olduğumuz lineer soğurma katsayısı çok önemlidir. Ancak malzemelerin karşılaştırılması ve birbirlerine göre avantajlarının belirlenmesi konusunda kütle soğurma katsayısı daha önemli parametre olmaktadır. Çünkü lineer soğurma katsayısı aynı maddenin farklı yoğunluklarında farklı değerlere sahip iken, kütle soğurma katsayısı aynı madde için farklı yoğunluklarda bile aynı değerlere sahiptir.

Zırhlamada kullanılacak olan malzeme için sağlığa etkisi, kolay işlenebilirliği, kapladığı alan, maliyeti ve hafifliği de göz önünde bulundurulması gereken parametrelerden bazılarıdır. Örneğin aktivitesi 1 Ci'lik bir ^{60}Co kaynağından yayınlanan gama radyasyon şiddetini %90 oranında azaltan malzeme kalınlığı yapılan hesaplamalara göre saf kurşun için 3,73 cm, saf vermikülit için 15,43 cm, bor

katkılı vermikülit için ise 16,30 cm 'dir. Bu kalınlıklar malzemenin onda bir kalınlık değerini veren TVL parametresiyle hesaplanmaktadır. Ağırlık açısından düşündüğümüzde ise 100×200 cm ebatlarında 3,73 cm kalınlıktaki bir kurşun levhanın ağırlığı 842 kg, 15,43 cm kalınlıktaki vermikülit levhanın ağırlığı 739 kg ve 16,30 cm kalınlıktaki %50 oranında bor katkılandırılmış levhanın ağırlığı da 666 kg gelmektedir. Yani kurşun levhaya göre saf vermikülit %13,9 oranında, bor katkılı vermikülit ise %26,4 oranında kurşundan daha hafiftir. Aynı zamanda bu malzemeler maliyet ve sağlığa etkisi konusunda da kurşundan oldukça avantajlıdır. Maden Teknik Arama Enstitüsünün (MTA) 2014 yılı ocak ayındaki maden fiyat listesinde kurşunun bir tonu 2148\$ iken vermikülitin bir tonu 400-850\$, bor minerallerinden deneyde kullandığımız borax'ın tonu ise 950\$ olarak belirtilmektedir. Bu da ortalama olarak kurşuna göre saf vermikülit için en fazla %437 en az %152, bor katkılı vermikülit için ise en fazla %218 en az %138 daha ucuz olduğu anlamına gelmektedir. Kurşun ağır, hantal ve pahalı olmasının yanında sağlık yönünden de zehirli bir özelliğe sahiptir. Gama radyasyonu geçirgenlik özelliklerini incelediğimiz vermikülit ise hafif ve ucuz olmasının yanında yapısında asbest bulunmadığı ve sağlığa zararlı hiç bir etkisinin olmadığı belirlenmiş bir malzemedir (Toksoy 1997).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Radyasyonun zararlı etkileri günümüzde herkes tarafından bilinen bir olgu haline gelmiştir. İyonlaştırıcı özelliğe sahip olan gama ve X ışınları canlılar için oldukça zararlıdır. Bu tür iyonlaştırıcı radyasyonların zararlı etkilerinden kurtulmak için iyi bir şekilde zırhlaması gerekir. Zırhlama, radyasyon dozunu kabul edilebilir seviyelere indirmek amacıyla radyasyon kaynağı ile birey arasına koyulan koruyucu engellere denir.

Zırhlama işlemi çeşitli parametrelerin bir araya gelmesi ile hesaplanan değerler sonucunda gerçekleştirilir. Bunlar radyasyon kaynağı, zırh malzemelerinin özellikleri ve zırh tipi özellikleri şeklinde sıralanabilir. Kaynağın yayınladığı ışın türü ve enerjisi radyasyon kaynağının özelliklerini, kaynağın bulunduğu yer ve komşu mekanlar ile olan ilişkisi, komşu mekanların işlevleri, bu mekanlarda insanların bulunma sıklıkları ve bu kişilerin radyasyon ile olan ilişki dereceleri, zırh malzemelerinin özelliklerini, kaynağın ışın doğrultusu ve yönüyle ilgili özellikler ise yapılacak zırh tipi özelliklerini belirler. Bu parametrelerden birinin değişmesi yada yanlış tespit edilmesi, radyasyondan korunmada yapılan zırhlamanın yetersiz kalmasına sebep olur.

Zırh malzemesi seçiminde, radyasyon kaynağının enerji seviyesi, malzemenin yüksek yoğunluklu olması, ekonomiklik, sağlığa zararlı etkisi olmayan, yapımı ve işlenebilirliği kolay olan malzemelerden oluşması gibi etkenler dikkate alınmalıdır. Yeterli ölçüde radyasyon miktarını soğurduğu taktirde düşük yoğunluklu malzemelerin de avantajları göz önünde bulundurulmalıdır.

Gama radyasyonu zırhlamasında ilk kez incelenen vermikülit hafiflik, ekonomiklik ve sağlığa etkisi bakımından oldukça avantajlı görünmektedir. Ayrıca bu tez çalışmasında gama radyasyonu soğurganlık özellikleri incelenen vermikülitte elde edilen sonuçlara bakarak gama radyasyonu zırh malzemesi olarak kullanılabilecek potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında vermikülitin değişik malzemelerle katkılandırılmasıyla (örneğin bor) zırhlama kapasitesinin de arttığı bu tez çalışmasıyla ortaya konulmaktadır.

Bu çalışmada radyasyon zırhlamada önemli bir parametre olan kütleSEL radyasyon soğurma katsayıları saf ve bor katkılı vermikülit için 0.244, 0.262, 0.342, 0.600, 0.778, 1.173, 1.332, 1.408 ve 1.728 MeV enerjilerinde deneysel olarak tayin edildi. Çalışmalar NaI(Tl) dedektörlü gama spektrometre sisteminde gerçekleştirildi. Ayrıca sonuçların geçerliliğini doğrulamak amacıyla teorik olarak NistXCom adlı bilgisayar programı yardımıyla hesaplamalar yapıldı ve deneysel sonuçlarla iyi bir uyum olduğu gözlemlendi. Buna ilaveten kütle soğurma katsayısıyla ilişkili fizik, teknoloji ve mühendislik alanında oldukça faydalı parametreler olan ve fotonun enerjisi yada malzemenin kimyasal içeriğiyle değişen Z_{eff} , N_{eff} , σ_t , σ_e , HVL, TVL ve MFP değerleri hesaplandı. Bu hesaplamalar vermikülit, kurşun, demir, borsilikat ve beton için de gerçekleştirilip sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldı. İncelenen parametrelere göre elde edilen verilerden şu sonuç çıkarıldı; Z_{eff} , N_{eff} , σ_t ve σ_e değerleri radyasyonun madde ile etkileşimindeki muhtemel olayların atomik ölçekteki bilgilerini verirken tek başına malzemelerin radyasyon zırhlama verimliliklerini tam olarak ölçebilecek parametreler değildirler. Bu verimliliğin yeterli ölçüde HVL, TVL ve MFP parametreleriyle anlaşıldığı görüldü.

Bu tez çalışmasında elde edilen deneysel ve teorik verilerden hareketle vermikülitin, yukarıda bu konu üzerinde yapılan tüm literatür çalışmalarında incelenen malzemelerin (standart radyasyon zırh malzemeleri olan kurşun, tungsten, uranyum metali vb. hariç) belli enerji değerlerinde hepsinden bir miktar da olsa daha iyi bir sonuç ortaya koyduğu görüldü. Radyasyon zırhlama konusunda incelenen vermikülitin, özellikleri ve kullanım alanları ile radyasyonun zararlı etkilerini kabul edilebilir seviyelere indirgeyecek zırh kalınlıkları ve bileşim olarak kullanılan Borax'ın en verimli oranlarının soğurma katsayıları incelendiğinde; Vermikülitin bu alanda önemli bir yere sahip olabilmesinin yanında yurdumuzda bol miktarda bulunması ve kullanılabilirliğinin artması neticesinde milli ekonomiye katkı sağlayacağı oldukça muhtemeldir. Örneğin gama ve X ışını radyasyonlarının bulunduğu veya kullanıldığı yerlerde yapının iç yüzeyleri kurşun levhalarla kaplanmaktadır. Buda ağır ve ekstra maliyetli olan ikinci bir iştir. Bunun yerine bu gibi yerlerde yeterli dayanıklılık testlerinden geçirilerek üretilen vermikülit veya vermikülit bileşimli, ayrıca patenti de alınabilecek tuğla ya da kalıp levha benzeri bir üretim düşünülebilir. Ayrıca üzerinde düşünüldüğü taktirde daha farklı örnekler de çıkartılabilir.

KAYNAKLAR

- Akkurt İ., Akyıldırım H., Mavi B., Kılınçaslan Ş., Başığit C., 2010. Radiation shielding of concrete containing zeolite, *Radiation Measurements*, Vol. 45.
- Akkurt İ., Akyıldırım H., Mavi B., Kılınçaslan Ş., Başığit C., 2010. Gamma ray shielding properties of concrete including barite at different energies, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 52.
- Akkurt İ., Altındağ R., Onargan T., Başığit C., Kılınçaslan Ş., Kun M., Mavi B., Güney A., 2007. The properties of various igneous rocks for gamma ray shielding, *Construction and Building Materials*, Vol. 11, 2078-2082.
- Akkurt İ., El-Khayatt A.M., 2013. The effect of barite proportion on neutron and gamma ray shielding, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 51, 5-9.
- Arda C., 2006. Nükleer Silahlar ve Radyasyon, *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, Cilt 63, Sayı:1,2,3. Ankara.
- Baştuğ A., Icelli, O. Gurol, A. Şahin, Y. 2011. Photon energy absorption parameters for composite mixtures with boron compounds, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, 2283–2290
- Başığit C., Kaçar A., Bazı yapı malzemelerinin radyasyon tutuculuk özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Vol. 10.
- Bootjomchai C., Laopaiboon, J. Yenchai, C., Laopaiboon, R., 2012. Gamma-ray shielding and structural properties of barium–bismuth–borosilicate glasses, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 81.
- Bueche F.J., Jerde D.A., 1994. *Principles of Physics*, Çeviri Editörü: Kemal Çolakoğlu (2000), Palme Yayıncılık, Ankara.
- Chen S., Bourham M., Rabiei A., 2014. Novel lightweight materials for shielding gamma ray, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 96, 27-37.
- Çalık A., Akkurt İ., Akyıldırım H., 2009. Borun Radyasyon Zırh Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye.
- Demir F., 2010. Determination of mass attenuation coefficients of some boron ores at 59.54 keV by using scintillation detector, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 68.
- Demir F., Budak G., Şahin R., Karabulut A., Oltulu M., Un A., 2011. Radiation transmission of heavy-weight and normal-weight concretes containing colemanite for 6 MV and 18 MV X-rays using linear accelerator, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 37, 339-344.
- Erdem M., Baykara O., Doğru M., Kuluöztürk F., 2010. A novel shielding material prepared from solid waste containing lead for gamma ray, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 79, 917-922.

- Evans D.R., 1955. *The Atomic Nucleus*, McGraw-Hill, New York.
- Gündüz E., 1989. *Modern Fiziğe Giriş*, ISBN 975_483_162_9, Ege Üniversitesi Basımevi, Bornova, İzmir.
- Gürler O., Tarım U.A., 2012. An investigation on determination of attenuation coefficients for gamma rays by monte carlo method, *J. Radioanal Nuclear Chemistry*, DOI:10.1007/s10967-012-1749-3.
- Han I., Demir L., Şahin M., 2009. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for some natural minerals, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 78, 1274-1278.
- Hubbell, J.H, 1969. Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients From 10 keV to 100 GeV, Center for Radiation Research National Bureau of Standards, Washington, D.C, 20234.
- İçelli O., Mann, K.S., Yalçın, Z., Orak, S., Karakaya, V., 2013. Investigation of shielding properties of some boron compounds, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 55, 341-350.
- İçelli O., Yalçın, Z., Okutan, M., Boncukcuoğlu, R., Şen, A., 2011. The determination of the total mass attenuation coefficients and the effective atomic numbers for concentrated colemanite and Emet colemanite clay, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, 2079-2085.
- İçelli O., Yalçın Z., Okutan M., Boncukcuoğlu R., 2012. Determination of photon energy absorption parameters for pellet waste, trommel sieve waste and original tinalconite, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 47, 38-45.
- Kaçar A., 2006. Yapılarda radyasyon kalkını olarak kullanılan barit agregalı ağır beton elemanlarının zırh kalınlık hesaplarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kahya S., 1985. Yüksek aktiviteli bir nokta gama kaynağının zırhlama problemleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kharita M.H., Jabra, R. Yousef, S. Samaan, T. 2012. Shielding properties of lead and barium phosphate glasses, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 81.
- Knoll G.F., 1979. *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Korkut T., Korkut, H. Karabulut, A. Budak, G. 2011. A new radiation shielding material: Amethyst ore, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, 56-59.
- Korkut T., Köksal F., Gencel O., 2012. Neutron shieldin properties of some vermiculite loaded new samples, *Nuclear Reactors*, Editör: Amir Zacarias Mesquita, ISBN: 978-953-51-0018-8, InTech.
- Krane K.S., 1988. *Nükleer Fizik (1. Cilt)*, Çeviri Editörü: Başar Şarer (2001), İkinci Baskı, ISBN 9757477884, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Limkitjaroenporn J., Kaewkhao J., Asavavisithchai S., 2013. Determination of mass attenuation coefficients and effective atomic numbers for Inconel 738 alloy for different energies obtained from Compton scattering, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 53, 64-68.

- 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*, Vol. 72, 245-251.
- Mavi B., 2012. Experimental investigation of gamma ray attenuation coefficients for granites, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 44, 22-25.
- Mann, K.S., Kaur, B., Sidhu, G.S., Kumar, A., 2013. Investigations of some building materials for gamma rays shielding effectiveness, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 87, 16–25.
- Medhat M.E., 2009. Gamma ray attenuation coefficients of some building materials available in Egypt, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 36, 849-852.
- Meriç N., 2005. An approach for obtaining the intensity of the radiation transmitted through a scatterer, *Volume 55, Issue 8*, pp 1025-1038.
- Normand C., 2008. *Nuclide Charts and the Nuclide Explorer*, European Commission Institute for Transuranium Elements, Germany.
- Öz H., 2000. Çeşitli ortamlar için tüm enerji absorpsiyon ve tam gama absorpsiyon tesir kesitlerinin hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Peterson J., MacDonell M., Haroun L., Monette F., 2007. *Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas*, Argonne National Laboratory, in collaborate with US Department of Energy, Richland Operations Office and Chicago Operations Office.
- Pruitt J.S., Domen S.R., Loevinger R., National Bureau of Standards, DC 20234, Washington.
- Singh K., Singh S., Dhaliwal A.S., Singh G., 2015. Gamma radiation shielding analysis of lead-flyash concretes, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 95, 174-179.
- Singh K., Singh H., Sharma V., Nathuram R., Khanna A., Kumar R., Bhatti S.S., Sahota H.S., 2002. Gamma ray attenuation coefficients in bismuth borate glasses, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 194.
- Tarakçıoğlu M.T., 2005. K tabakasından L tabakasına boşluk geçiş ihtimallerinin ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Togay Y.E., 2002. *Radyasyon ve Biz*, TAEK, Ankara.
- Toksoy F., 1997. Vermikülit: Mineraloji, Jeolijik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye'deki Durumu, 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Toprak Ö., 2001. Gama radyasyonunun toprak ile zırhlanmasının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Türkan M.N., Gülbiçim H., Tufan M.Ç., Böyükata M., Karaçavuş S., 2013. Determination of mass attenuation coefficients for vermiculite for different gamma energies, *BSW 2013 Fourth Bozok Science Workshop; Studies on structure and dynamics from nuclei to clusters*, Yozgat.

- Un A., Şahin Y., 2011. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic number and electron numbers, mean free paths and kermas for PbO, barite and some boron ores, *Nuclear Instruments and Methods in Physics B*, 1506-1511.
- Un A., Şahin Y., 2011. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers, mean free paths and kermas for PbO, barite and some boron ores, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 269, 1506-1511.:
- URL-1: <https://www.google.com.tr/#q=mehmet+ali+k%C3%B6rp%C4%B1nar+rad+yasyon+biyofizi%C4%9Fi+pdf> (Ziyaret tarihi: 2 Mayıs 2015).
- URL-2: <http://webmineral.com/data/Vermiculite.shtml#.VZQfKfntmko> (Ziyaret tarihi: 28 Mayıs 2015).
- URL-3: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (Ziyaret tarihi: 07 Mayıs 2015).
- Wong S.S.M., 1998. *Introductory Nuclear Physics*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Yasaka P., Pattanaboonmee N., Kim H.J., Limkitjaroenporn P., Kaewkhao J., 2014. Gamma radiation shielding and optical properties measurements of zinc bismuth borate glasses, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 68, 4-9.

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Hasan Gülbiçim
Doğum Yeri ve Tarihi: BAFRA/01.06.1989
Adres: Emirefendi Mah. Çakıllı 2. Sok. No:14/2
BAFRA/SAMSUN
E-Posta: hasanglbcm@hotmail.com
Lisans: Bozok Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik
Bölümü (2008-2012).

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Gülbiçim H., Türkan N., Büyükata M., Karaçavuş S., Gama Işını ile Vermikülit'in Etkileşimi, *BSW 2012 Third Bozok Science Workshop: Computational Studies on Structure and Dynamics from Nuclei to Molecules*, May 17-19, 2012 Yozgat, Turkey.
- Türkan N., Gülbiçim H., Tufan Ç., Büyükata M., Karaçavuş S., Determination Of Mass Attenuation Coefficients For Vermiculite For Different Gamma Energies. *BSW 2013 Fourth Bozok Science Workshop: Studies on Structure and Dynamics from Nuclei to Clusters*, May 16-18, 2012 Yozgat, Turkey.
- Gülbiçim H., X ve Gama Radyasyonu İçin Zırhlama, Yüksek Lisans Semineri, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 16 Haziran 2014, Samsun, Türkiye.

KATILDIĞI PROJELER

- *Gama Radyasyonu Zırhlamasında Alternatif Bir Madde Olarak Vermikülitin İncelenmesi*, Bozok Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: 2012FEF/A13, *Araştırmacı*, 2012.