

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**SERAMİK MATRİSLİ RADYASYON ZİRH MALZEMELERİNİN
HAZIRLANMASI VE ZIRHLAMA PERFORMANSLARININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan ASAL

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı
Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

HAZİRAN 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**SERAMİK MATRİSLİ RADYASYON ZİRH MALZEMELERİNİN
HAZIRLANMASI VE ZIRHLAMA PERFORMANSLARININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan ASAL

(302141016)

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı
Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sema ERENTÜRK

HAZİRAN 2017

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 302141016 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Sinan ASAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SERAMİK MATRİSLİ RADYASYON ZİRH MALZEMELERİNİN HAZIRLANMASI VE ZIRHLAMA PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr.Sema ERENTURK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr.Üner ÇOLAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr.Ayşe DURUSOY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi **: 05 Mayıs 2017**

Savunma Tarihi **: 05 Haziran 2017**





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu çalışmada, nükleer teknolojinin gelişmesine bağlı olarak bu teknolojinin bir çok alanında gereksinim duyulan, iyonize radyasyondan korunmada kullanılan mevcut malzemelere alternatif olabilecek doğal mineral matrisli seramik materyallerin gama radyasyonu karşısındaki davranışları incelenmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamda, öncelikle yüksek lisans başlangıcından itibaren tez süresince her türlü bilgi, birikim ve tecrübelerinden yararlanma imkânını bana sağlayan, ayrıca bilimsel düşünce, enerji dünyası ve nükleer teknoloji konuları başta olmak üzere diğer birçok konuda ufkumu açan çok değerli hocam Sn. Prof. Dr. Sema ERENTÜRK'e ve laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Sn.Doç. Dr. Sevilay HACIYAKUPOĞLU'na sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bunlardan ayrı olarak, bu çalışmayı destekleyen ve olanaklarından yararlandığım İTÜ Enerji Enstitüsü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, bu yüksek lisans süresince beni manevi yönden destekleyen değerli aileme, arkadaşlarım Neslihan YANIKÖMER'e ve Çağlar TANGÖR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2017

Sinan ASAL
(Enerji Sistemleri Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi.....	5
2.1.1 Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi.....	6
2.1.1.1 Alfa parçacıklarının madde ile etkileşimi.....	6
2.1.1.2 Beta parçacıklarının madde ile etkileşimi.....	7
2.1.2 Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimi.....	10
2.1.2.1 Fotoelektrik olay.....	11
2.1.2.2 Compton olayı.....	12
2.1.2.3 Çift oluşumu.....	12
2.2 Seramik ve Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler.....	13
2.3 Doğal Mineraller.....	17
2.3.1 Zeolitler.....	17
2.3.2 Bentonitler.....	19
2.3.3 Galen Minerali.....	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
3.1 Seramik Materyallerin Hazırlanması.....	25
3.2 Seramik ve Seramik Matrisli Kompozitlerin Hazırlanması.....	26
3.3 Gama Spektrometresi ile Ölçümler için Düzeneğin Hazırlanması.....	29
3.4 Seramik Matrisli Materyallerin Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi.....	30
3.5 Seramik Matrisli Materyallerin Partikül Boyutu Dağılımının İncelenmesi.....	31
4. DENEY SONUÇLARI	33
4.1 Zeolit Matrisli Seramiklerin Sonuçları.....	33
4.2 Bentonit Tabanlı Seramiklerin Sonuçları.....	36
4.3 Galen Matrisli Seramiklerin Sonuçları.....	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	49
EKLER	53
ÖZGEÇMİŞ	63



KISALTMALAR

HLW	:High Level Wastes
HVT	:Half-Value Thickness
ODK	:Onda bir Değer Kalınlığı
TVT	:Tenth-Value Thickness
YDK	:Yarı Değer Kalınlığı





SEMBOLLER

I	: x kalınlığında foton Şiddeti
I₀	: Gelen foton Şiddeti
μ	: Lineer zayıflatma katsayısı
μ_m	: Kütlesel zayıflatma katsayısı
ρ	: Yoğunluk
X	: Soğurucu kalınlığı





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Alfa aktif bazı radyoizotoplar.....	7
Çizelge 2.2: Beta aktif bazı radyoizotop kaynaklar.	8
Çizelge 2.3: Bazı gama aktif radyoizotoplar.....	10
Çizelge 2.4: Doğal zeolitin kimyasal bileşimi.	18
Çizelge 2.5: Doğal zeolitin özellikleri.	19
Çizelge 2.6: Bentonit gruplarının ortalama kimyasal bileşimleri.	21
Çizelge 2.7: Farklı tür bentonitlerin kimyasal analizi.	21
Çizelge 2.8: Galen mineralinin kimyasal ve fiziksel özellikleri.	23
Çizelge 2.9: Galen içeren malzemelerin zayıflatma katsayısı ve YDK değerleri.....	23
Çizelge 3.1: Malzemelerin Kodlanması	26
Çizelge 3.2: Seramik malzemelerin üretim koşulları ve fiziksel özellikleri.....	28
Çizelge 3.3: Gama kaynağı olarak kullanılan sertifikalı nokta kaynaklar.....	30
Çizelge 5.1: Elde edilen sonuçların farklı zırhlama malzemeleri ile karşılaştırılması.	46
Çizelge A.1: ²⁴¹ Am gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.	53
Çizelge A.2: ⁵⁷ Co gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.	54
Çizelge A.3: ¹³⁷ Cs gama nokta kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.	55
Çizelge A.4: ⁶⁰ Co (1117 keV) gama nokta kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.	56
Çizelge A.5: ⁶⁰ Co (1333 keV) gama nokta kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.	57
Çizelge A.6: ⁸⁸ Y gama nokta kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.	58



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: 5,5 MeV'lik bir alfa parçacığının havadaki menzili.....	6
Şekil 2.2: Elektronun madde içerisindeki enerji kaybı.....	9
Şekil 2.3: Alfa ve beta parçacıklarının menzilleri.....	9
Şekil 2.4: Fotonların madde ile etkileşmesi.....	11
Şekil 2.5: Fotoelektrik olayın şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.6: Compton saçılmasının şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.7: Çift oluşumunun şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.8: Uzun lifli Seramik Matris Kompozitler.	16
Şekil 2.9: Yapay zeolitlerde SiO ₄ ve AlO ₄ dörtyüzeylemlerinin bağlantıları.....	19
Şekil 2.10: Kil tanesi a) Silika tetrahedral birim, b) Alimüna silikat tabakası.....	20
Şekil 2.11: Galen minerali.....	23
Şekil 3.1: a) Bilyalı öğütücü b) 40 µm'lik elek.....	25
Şekil 3.2: Etüvde kurutma.....	25
Şekil 3.3: Hidrolik pres ve preslenen bazı örnekler.....	26
Şekil 3.4: Hazırlanan peletler ve yüksek sıcaklık fırını.....	27
Şekil 3.5: Gama zırhlama özelliklerinin test edilmesi için deney düzeneği.....	29
Şekil 4.1: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE1•0,25BA ve 0,5(0,75ZE1•0,25BA)•0,5GA seramiklerinin kütleli zayıflatma katsayıları.....	34
Şekil 4.2: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE1•0,25BA ve 0,5(0,75ZE1•0,25BA)•0,5GA seramiklerinin YDK değerleri.....	34
Şekil 4.3: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE1•0,25BA ve 0,5(0,75ZE1•0,25BA)•0,5GA seramiklerinin ODK değerleri.....	34
Şekil 4.4: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE2•0,25BA ve 0,5(0,75ZE2•0,25BA)•0,5GA seramiklerinin kütleli zayıflatma katsayıları.....	35
Şekil 4.5: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE2•0,25BA ve 0,5(0,75ZE2•0,25BA)•0,5GA seramiklerinin YDK değerleri.....	36
Şekil 4.6: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE2•0,25BA ve 0,5(0,75ZE2•0,25BA)•0,5GA seramiklerinin ODK değerleri.....	36
Şekil 4.7: Farklı kalınlıklardaki BN1 ve (0,5BN1•0,5GA) bileşimli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.....	37
Şekil 4.8: Farklı kalınlıklardaki BN1 ve (0,5BN1•0,5GA) seramiklerin YDK değerleri.....	37
Şekil 4.9: Farklı kalınlıklardaki BN1 ve (0,5BN1•0,5GA) bileşimli seramiklerin ODK değerleri.....	38
Şekil 4.10: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN2 ve (0,5BN2•0,5GA) bileşimli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.....	39
Şekil 4.11: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN2 ve (0,5BN2•0,5GA) bileşimli seramiklerin YDK değerleri.....	39
Şekil 4.12: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN2 ve (0,5BN2•0,5GA) bileşimli seramiklerin ODK değerleri.....	39

Şekil 4.13: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN3 ve (0,5BN3•0,5GA) bileşimli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.....	40
Şekil 4.14: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN3 ve (0,5BN3•0,5GA) bileşimli seramiklerin YDK değerleri.....	41
Şekil 4.15: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN3 ve (0,5BN3•0,5GA) bileşimli seramiklerin ODK değerleri.....	41
Şekil 4.16: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN4 ve (0,5BN4•0,5GA) bileşimli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.....	42
Şekil 4.17: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN4 ve (0,5BN4•0,5GA) bileşimli seramiklerin YDK değerleri.....	42
Şekil 4.18 : Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN4 ve (0,5BN4•0,5GA) bileşimli seramiklerin ODK değerleri.....	43
Şekil 4.19: Galen matrisli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.....	44
Şekil 4.20: Galen matrisli seramiklerin YDK değerleri.....	44
Şekil 4.21: Galen matrisli seramiklerin ODK değerleri.....	44
Şekil A.1: Ara bentonit partikül boyutu dağılımı.....	59
Şekil A.2: Reşadiye bentonit partikül boyutu dağılımı.....	59
Şekil A.3: Ankara bentonit partikül boyutu dağılımı.....	59
Şekil A.4: Sömaş bentonit partikül boyutu dağılımı.....	60
Şekil A.5: Bigadiç zeolit partikül boyutu dağılımı.....	60
Şekil A.6: Amasya zeolit partikül boyutu dağılımı.....	60
Şekil A.7: Galen partikül boyutu dağılımı.....	61

SERAMİK MATRİSLİ RADYASYON ZIRH MALZEMELERİNİN HAZIRLANMASI VE ZIRHLAMA PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Günümüzde, radyasyondan korunma, nükleer teknolojinin uygulama alanları olarak daha da önemli hale gelmiştir. Radyasyon zırhlaması, özellikle çevre ve çalışanlar için önemlidir. X-ışını, gama, beta ve alfa olarak bilinen iyonize radyasyon için gerekli radyasyon zırhlama önlemleri alınmadığı takdirde canlılar için önemli tehdit haline gelebilir. Bu ışınlar, biyolojik, kimyasal ve canlı organizmalarda fiziksel değişikliklere neden olabilir. Radyasyonun en önemli etkisi, canlılar üzerinde zararlı biyolojik etkilerin meydana gelişidir. Radyasyona karşı korunmada ana fikir, tolere edilebilen dozları bilmek ve radyasyon çalışanları ile çevre halkının bunun üstünde doz almasını önlemektir. Nükleer atıkların saklanması için fisyon ürünlerinin karakteristik enerjilerinde iyi zırhlama özelliklerine sahip malzemeler gerekmektedir.

Son yıllarda, kimyasal ve mekanik dayanıklılık ve iyi zırhlama özelliği gösteren seramik, cam-seramik, seramik matrisli kompozit malzemeler yüksek düzeyli radyoaktif atıkların immobilizasyonu ve radyasyondan korunma amacı ile kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, düşük ağırlıklı, düşük işlem maliyetli, yüksek zırhlama performanslı, nükleer teknolojinin her alanında kullanılmak üzere temel beklentileri sağlayabilen, kolay uygulanabilen seramik ve seramik matrisli kompozit malzemeler geliştirmektir.

Bu çerçevede, seramik ve seramik matrisli kompozit malzemelerin zırhlama özellikleri incelenmiştir. Seramik matrisli malzemeler, yüksek dirence ve zırhlama özelliğine sahip doğal analog mineraller kullanılarak hazırlanmıştır. Gama ışınlarını zırhlamak için kurşun içeren cevher olarak galen minerali kullanılmıştır. Hazırlanan zırhlama malzemelerinin özelliklerindeki değişimler, malzemenin karakterizasyonu ve radyasyon zırhlama uygulamalarıyla değerlendirilmiştir. Seramik matrisli malzemelerin gama radyasyonuna karşı zırhlama etkinliği farklı malzeme kalınlıklarında, ^{251}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{88}Y gibi farklı enerjili gama kaynakları kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar lineer zayıflatma katsayısı ve malzeme yoğunluğundan bağımsız olan kütleli zayıflatma katsayısı hesaplanarak çalışmada sunulmuştur.

Yarı-değer kalınlık değerinin (YDK), malzemelerin zırhlama özelliğini betimleyen önemli parametre olduğundan hareketle malzemelerin radyasyon zırhlama etkinliğinin değerlendirilmesi için esas itibarıyla YDK değerleri göz önüne alınmıştır. Ondabir-değer kalınlığı (ODK), genellikle radyasyon kaynağının zırhlanmış olarak kabul edilebilmesi için gerekli olan en düşük kalınlık olarak kabul edilebilmektedir. Bulunan zayıflatma katsayısı değerleri, YDK ve ODK değerleri literatürde çalışılmış benzer malzemeler ile karşılaştırılmıştır.



PREPERATION OF RADIATION SHIELDING MATERIALS WITH CERAMIC MATRIX AND INVESTIGATION OF THEIR SHIELDING PERFORMANCE

SUMMARY

Nuclear power plants provide 16% of the world's electricity production. Approximately 50000 tons of natural uranium were used and 10000 tons of nuclear spent fuel were produced. Despite political decisions on phase out nuclear energy development of nuclear energy continue growing.

As result of technological developments in nuclear technology, many artificial radiation applications have been succeeded. Hence, radioactive materials in many fields such as energy, weapons industry, medicine, nuclear reactors, nuclear researches are produced and consumed.

In addition to the beneficial use of radiation, ionizing radiations (neutron, alpha, beta, gamma and X-rays) are associated with significant damage to living organisms if precautions are not taken.

The main idea in radiation protection is to know the doses that can be tolerated to protect the people, radiation workers and environment. In this frame, the main theme of radiation protection is defined as to reduce the level of radiation exposed to living things as much as possible.

Nowadays, radiation protection become important as the application areas of nuclear technology. The importance of radiation-shielding is especially important for the environment and employees which are in close proximity.

Radiation shielding is a very important issue in scientific and medical facilities related to radioactivity, the safe operation of nuclear reactors, the nuclear storage facilities, nuclear fuel reprocessing facilities.

Radiation shielding requirements for X-, beta and gamma rays which are known as ionized radiation can become important threats for living organisms if necessary precautions are not taken. These radiations may cause biological, chemical and physical changes in living organisms.

Shielding materials can be also use to protect from radioactivity during long-term storage of nuclear materials or for operation of nuclear power plants. The availability of shielding materials will reduce the level of radiation that may be exposed, simplify the design of storage facilities and reduce the threat of nuclear installations.

According to new approaches, it is necessary to develop new shielding materials using ceramics and ceramic composites in order to prepare cheap, light, environmentally friendly and stable materials than existing shielding materials.

In the last years, ceramic, glass ceramic and ceramic composite materials which show chemical and mechanical durability and good radiation shielding properties are used in high level radioactive waste immobilization and radiation shielding processes.

The main goal of this study is to develop ceramic and ceramic composite materials with low weight, low process cost, high shielding performance, easy application which can provide fundamental expectations to be used in each area of nuclear technology.

In this frame, the shielding properties of prepared ceramic and ceramic composite materials were investigated. The ceramic materials were prepared using with natural analogue minerals having shielding properties against radiation in their matrices and at the same time having high durability.

The natural minerals such as zeolite, bentonite and galena were used as host lattice of the ceramic matrix for gamma shielding material that is important in nuclear applications.

Change in properties of prepared shielding materials was evaluated considering material properties and use of prepared material in radiation shielding applications.

Shielding efficiency of the ceramic materials against gamma radiation was evaluated by using gamma spectrometry with using different energetic gamma sources and material thicknesses.

Standard point gamma sources consisting of ^{251}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{88}Y were used to study gamma transmission properties of the prepared ceramic materials. The shielding performance of the ceramic materials was measured at 59,5; 122,1; 661,7; 1173,2; 1333, 1836,1 keV gamma energies.

The attenuation curves were built using the results obtained from the experiments with ^{251}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{88}Y gamma radioisotope sources and the prepared materials.

Although half-value thickness (HVT) and tenth value thickness (TVL) are the most important parameters describing the shielding properties of materials, HVT was considered as the basis for evaluating the effectiveness of shielding of the materials. Hence, the results of the studied ceramic materials were evaluated for HVT and TVL values.

Results showed that similar mineral groups show similar attenuation coefficients considering different energetic gamma sources show similar interactions with materials. The average energy level of the ^{60}Co gamma radioisotope source is 1,25 MeV while the energy of the ^{137}Cs gamma radioisotope source is 0,662 MeV. Considering these energies are at high region, the attenuation coefficients of the prepared materials are low and the HVLs are high at these high energy levels.

The addition of the galena into the ceramic structure increased the mass attenuation coefficients and lowered the HVL-TVL values.

As a result of the experiments with the ceramics containing the different bentonite types, the HVL values varied between 2-4 cm for ^{137}Cs and between 4-6 cm for ^{60}Co . In the results of the studies applied with the ceramics containing zeolites, HVL values changed between 1,2-1,6 cm for ^{137}Cs and between 1,15-1,74 cm for ^{60}Co .

In addition, the prepared ceramics containing natural minerals can be used also as barrier material in different areas such as waste management which requires advanced technology in nuclear industry.



1. GİRİŞ

Nükleer teknoloji, başlıca yoğun olarak enerji üreten güç santrallerde, ileri teknoloji içeren bilimsel araştırmalarda, sağlık, tarım, endüstri ve arkeometri gibi alanlarda kullanılmakta ve bu kullanıma bağlı olarak radyasyon zırhlaması giderek artan bir önem kazanmaktadır. Radyasyon zırhlaması, özellikle nükleer teknolojinin oluşturduğu iyonlaştırıcı radyasyonun canlı sağlığı açısından tehlike oluşturmaması açısından gerekmektedir.

Radyasyon, enerjinin parçacıklar ya da dalgalar olarak yayımlandığı bir süreçtir. Dünyadaki tüm varlıklar, dünyanın oluşumundan bu yana dünyada var olan radyasyona maruz kalmaktadır. Havada, suda ve toprakta hatta canlıların vücutlarında bulunan radyoaktif maddeler doğal radyasyonu oluşturmaktadırlar. Dünyada gelişen teknoloji ile pek çok insan üretimi yapay radyasyon elde etme uygulamaları geliştirilmiştir. Bu nedenle enerji, silah sanayi, tıp, nükleer reaktörler, nükleer araştırmalar gibi birçok alanda radyoaktif malzemeler üretilmekte ve tüketilmektedir (Eisenbud, 1987).

Radyasyonun yararlı kullanımının yanısıra, iyonizan radyasyon olarak bilinen nötron, alfa, beta, gama ve X-ışınlarının gereken önlemler alınmadığında canlılara belirgin zararları söz konusudur. Radyasyonun en önemli etkisi, canlılar üzerinde zararlı biyolojik etkilerin meydana gelişidir. Radyasyona maruz kalan hücre ölebilir veya zamanla doku tarafından onarılarak kurtulabilir. Eğer kurtulan hücre, kromozomlarındaki kırılmalar nedeniyle fiziksel ve kimyasal yapısı değişerek mutasyona uğrarsa, bunun sonucunda hücre normal işlevini yapamaz ve ileride kişinin kendisinde (somatik) veya gelecek nesillerde (genetik) zararlar meydana getirebilir. Kısa bir süre içinde ve bir defada yüksek dozlara maruz kalınmasından hemen sonra meydana gelecek hasarlara erken etkiler (akut ışınlanma etkileri), kanser, ömür kısalması ve genetik bozukluklar gibi sonradan çıkacak hasarlara da gecikmiş etkiler (kronik ışınlanma etkileri) denir (Özalpan, 1980).

Radyasyona karşı korunmada ana fikir, tolere edilebilen dozları bilmek ve radyasyon çalışanları ile çevre halkının bunun üstünde doz almasını önlemektir. Bu doğrultuda, radyasyon korunmasının ana ilkesi, canlıların maruz kalabileceği radyasyon düzeyini mümkün olduğunca azaltmak olarak belirlenmiştir. Uyulması gereken kurallar ya da alınması gereken önlemler Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından belirlenmekte ve üye ülkelere tavsiye edilmektedir. Ülkemizde de iyonlaştırıcı radyasyonlarla çalışmalar, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun Radyasyon Sağlığı Tüzük ve Yönetmelik hükümlerine göre yapılmaktadır. Radyasyona karşı korunmanın hedefi ise, doku hasarına sebep olan deterministik etkileri önlemek, stokastik etkilerin meydana gelme olasılıklarını kabul edilebilir düzeyde sınırlamaktır. Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından Müsaade Edilebilir Maksimum Doz (MEMD), bir insanda ömür boyunca hiçbir önemli vücut arazi ve bir genetik etki meydana getirmesi beklenmeyen iyonlaştırıcı radyasyon dozu olarak tarif edilir. ICRP'nin önerilerine göre; radyasyon çalışanları için müsaade edilen maksimum doz sınırı, birbirini takip eden beş yılın ortalaması 20 mSv'ı geçemezken (yılda en fazla 50 mSv), toplum üyesi diğer kişiler (halk) için aynı şartlardaki bu sınır 1 mSv'ın altında tutulmaktadır.

Radyoaktivite ile ilgili bilimsel ve tıbbi tesislerde, nükleer reaktörlerin güvenli çalışmasında, nükleer depolama tesislerinde, nükleer yakıt yeniden işleme tesislerinde radyasyon zırhlaması çok önemli bir etkidir. Nükleer enerjinin sürdürülebilir gelişmesindeki en önemli bakış açısı, nükleer güç tesisindeki tüm kısım ve bileşenlerin güvenli ve tehlikesiz işleyebilmesidir.

Nükleer malzemelerden gelen radyasyondan korunmada, nükleer malzemeleri uzun süreli depolamada ya da nükleer güç tesislerinin işletilmelerinde çelik ve çeşitli alaşımları hızlandırılmış korozyondan ve kazaen oluşan yangınlardan korunması için kullanılacak zırhlayıcı malzemelerin mevcut olması, maruz kalınabilecek radyasyon düzeyini düşürecek, depolama tesislerinin tasarımını basitleştirecek ve nükleer tesislerin de tehdidini azaltacaktır.

Kimyasal bağlı fosfat seramikleri, nükleer artıkların immobilizasyonu ve nükleer radyasyon zırhlaması için geliştirilmiş malzeme türlerindedir (Wagh et.al., 2015). Kimyasal bağlı fosfat seramiklerine demir oksit ilavesiyle, atomik kütlesi 55.8 olan demirin iyi bir zırhlayıcı katkısı olduğu belirlenmiştir (Gorbotenko and Yuferev, 2002). Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen %4 bor karbür içeren

benzeri özellikteki seramikler (Neal et.al., 2002), nükleer yakıtların nötron zırhlanmasında kullanılan ticari bir üründür. Nükleer atıkların immobilizasyonu ve radyasyon zırhlaması için kullanılan diğer uygun zırhlama malzemeleri olarak, çimento ve bazalt fiber karışımları, nano yapıli cam seramikler sayılabilir (Ipbüker et.al., 2015; Singh and Singh, 2015).

Radyoaktif malzemelerin ve depolandığı tesislerinin korozyondan korunması, kaplamanın radyasyon ortamında dayanıklı olmasını ve immobilize olmasını gerektirir. Bilinen polimer tabanlı kaplamalar, bu gerekliliği karşılayamaz. Kullanılmış yakıtlarda ilk 300 yıl için β^- ve γ -ışını aktivitesinin baskın olacağı dikkate alındığında, bu özellikler aynı zamanda radyoaktif atık sıvıların idaresi için de gereklidir.

Modern güç tesislerinin yüksek yanma oranına adapte edilmesi, kullanılmış yakıtlardaki β^- ve γ -ışını aktivitesinin artacağını göstermektedir. Bu nedenle, bu tür yakıtların saklanması için fisyon ürünlerinin karakteristik enerjilerinde iyi zırhlama özelliklerine sahip malzemeler gerekmektedir.

Genellikle β^- ve γ -ışınlarının soğurma özellikleri, kullanılan zırhın yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle, zırhlamada kurşun ve çelik kullanılır. Fakat bunlar da çevresel aşınmaya duyarlıdır. Çelik ve çeşitli alaşımların radyasyon karşısındaki davranışları incelendiğinde, en etkin radyasyonunun, çeliğin durağanlığını bozarak kırılma hızına neden olan nötron olduğu görülmüştür (Cattant et.al., 2008; Odette and Lucas, 2001).

Doğal minerallerin zırhlama materyalleri içine katılması ile malzemenin zırhlama performanslarında değişiklik olabilmektedir. Portland çimentosu, zeolit, yüksek fırın cürufu karışımlarından oluşan zırhlama malzemesinin, 1 keV ve 2 meV arasındaki enerjilerde kütleli zayıflatma katsayıları incelendiğinde malzemelerde en fazla silisyum ve kalsiyum içeren malzemelerin en yüksek zayıflatma katsayısına sahip olduğu zeolit eklenmesiyle zayıflatma katsayısının düştüğü belirlenmiştir (Türkmen ve diğ., 2008).

Farklı bir çalışmada ise, zeolit içeren betonun lineer zayıflatma katsayısının, zeolit oranının artması ile azaldığı gözlenmiştir. Yoğunluk artışının lineer zayıflatma katsayısını artırdığı bulunmuştur (Akkurt ve diğ., 2010).

Kolemanit ve galen katkıli ağır betonun (CoGa) ^{60}Co için yarı-değer kalınlığı 2,49 cm olarak ölçülmüş ve standart betona (6 cm) göre daha iyi zırhlama özelliğine sahip

olduğunu rapor edilmiştir. Ayrıca, CoGa betonun standart betona göre %10 daha iyi nötron zırh performansına sahip olduğunu belirlenmiştir (Mortazavi ve diğ., 2010).

Galen mineralli eklenmiş beton örneklerinin de dayanımları 628 kg m^{-3} - 685 kg m^{-3} arasında bulunmuştur. Bu rneklerin, ^{137}Cs gama kaynağı ile belirlenen YDK değerleri 1,45-4,24 cm arasında olduğu kaydedilmiştir. ^{60}Co gama kaynağı kullanıldığında bu değer 2,42 cm olmaktadır. Kobalt kaynağı kullanılarak yapılan çalışmalarda, normal betona göre galen katkılı betonun YDK değerinin %69-75 arasında, sezyum kaynağı kullanıldığında ise YDK değerinin %70-79 arasında, ODK değerinin ise %67-74 arasında azaldığı gözlenmiştir (Hadad ve diğ., 2015).

Bu tez çalışmasında, nükleer endüstride mevcut kullanılan zırhlama malzemelerine alternatif olabilecek, farklı doğal mineraller kullanılarak hazırlanmış seramik matrisli malzemelerin radyasyon karşısındaki zırhlama özellikleri ve performanslarının irdelenmesi amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Radyasyon; parçacık akımı veya dalga tabiatına uygun olarak bir maddeye veya bir ortama enerji transfer edilişi olarak tanımlanmaktadır (Knoll, 2002). Radyasyonun iyonlaştırma etkisi radyasyonun tipine bağlıdır. Rutherford en kısa mesafeye sahip radyasyonu alfa radyasyonu, orta seviye mesafeli olanı beta radyasyonu ve en yüksek mesafeli radyasyonu ise gama radyasyonu olarak ifade etmiştir.

Madde ile etkileşen radyasyon, enerjisinin bir kısmını veya tamamını kaybedebilmektedir. Enerjideki bu azalma, radyasyona maruz kalan malzemenin radyasyon zırh özelliği olarak adlandırılır.

Radyasyonun maddeyle etkileşimi, elektron yörüngeleriyle, nükleer alan ve çekirdekle etkileşimleriyle ilgilidir. Parçacıklar kısmen veya tamamen enerjisini maddeye aktarabilirler, soğurulabilirler veya çekirdek reaksiyonları meydana gelebilir.

Radyasyonun madde ile etkileşimleri;

- Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimleri
- Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimleri olarak ikiye ayrılabilir.

Radyasyonun madde ile etkileşimi;

- Enerji değişimi
- Saçılma,
- Soğurma
- Elektron uyarılması
- Çekirdek uyarılması
- Çekirdek reaksiyonları olarak da sınıflandırılabilirler.

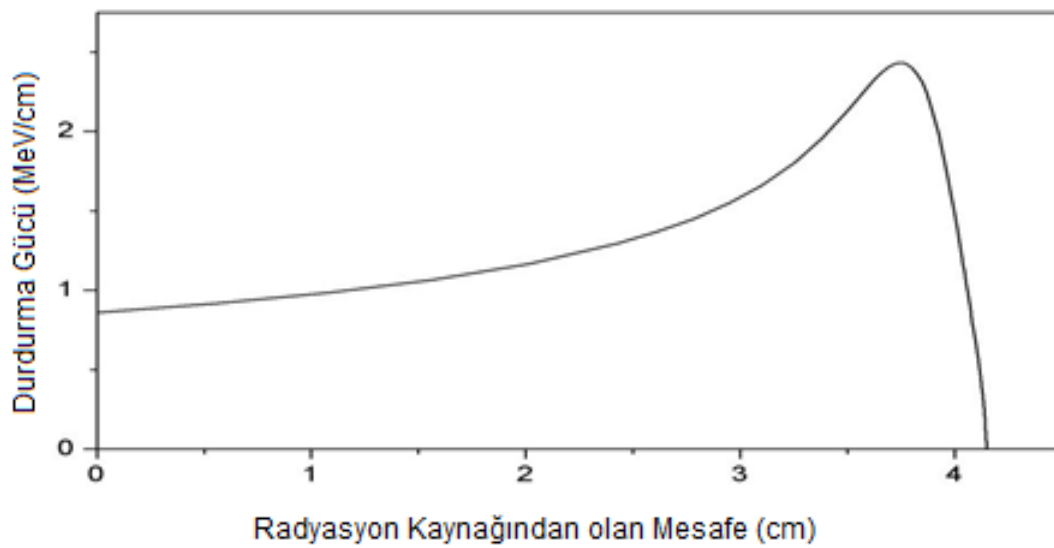
2.1.1 Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi

Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi, Coulomb kuvveti nedeniyle maddenin elektronlarıyla elastik olmayan çarpışma şeklinde gerçekleşir ve çarpışmalar madde boyunca tekrar edebilir. Yüklü parçacıklar madde içerisinde yol alırken, enerji kaybı ve yönlerinin değişmesi gibi iki özelliikle karakterize edilir.

2.1.1.1 Alfa parçacıklarının madde ile etkileşimi

En önemli ağır parçacıklardan biri alfa parçacığdır. Rutherford tarafından ispatlandığı üzere, alfa parçacığı helyum atomunun çekirdeğidir. Alfa parçacıkları, yörünge elektronları ile etkileşime geçebilirler bu da parçacıkların nükleer alanda saçılmasına veya çekirdekle ilgili reaksiyonlara neden olan iyonizasyona veya diğer kimyasal değişikliklere neden olur. Etkileşimler, gelen parçacığın kinetik enerjisine bağlıdır. Eğer kinetik enerji yeterince büyükse, enerji parçacığın geliş doğrultusundaki atomlara aktarılır ve atomları iyonize eder.

Alfa gibi ağır yüklü parçacıklar, durmalarına yakın daha çok enerji kaybederler ve iyonizasyon da artar. Menzile bağlı bu enerji kaybı Bragg eğrisi olarak ifade edilir (Jevromovic, 2009). Şekil 2.1’de alfa parçacığının havadaki özgül enerji kaybı gösterilmektedir (L’Annuziata, 2003). Çizelge 2.1’de ise alfa aktif bazı radyoizotoplar görülmektedir (Knoll, 2002).



Şekil 2.1: 5,5 MeV’lik bir alfa parçacığının havadaki menzili.

Çizelge 2.1: Alfa aktif bazı radyoizotoplar.

Radyoizotop	Yarı Ömür	Kinetik Enerji (MeV)	Yayınlanma Olasılığı (%)
¹⁴⁸ Gd	93 y	3,19	100
²³² Th	1,4x10 ¹⁰ y	4,01	77
²³⁸ U	4,5x10 ⁹ y	4,19	77
²³⁵ U	7,1x10 ⁸ y	4,59	56
²³⁶ U	2,4x10 ⁷ y	4,49	74
²³⁰ Th	7,7x10 ⁴ y	4,69	76,3
²³⁴ U	2,5x10 ⁵ y	4,78	72
²⁴³ Am	7,4x10 ³ y	5,28	87,4

2.1.1.2 Beta parçacıklarının madde ile etkileşimi

Çekirdek dönüşümü ve elektron yörünge değişiklikleri elektron yayınımına neden olur. Negatif veya pozitif parçacıklar, negatif veya pozitif beta radyasyonu olarak adlandırılırlar ve sürekli spektruma sahiptirler. Aynı radyasyon enerjisinde, beta parçacıklarının hızları, alfa parçacıklarından çok daha fazladır. Beta radyasyonu maddeyle etkileştiğinde, maddedeki elektronlar uyarılabilir veya iyonlaşabilirler ve beta parçacıklarının yönü elastik ve elastik olmayan çarpışmalar sonucunda değişebilir. Beta parçacıkları, nükleer alan ile etkileşime geçtiğinde sürekli spektruma sahip olan Bremsstrahlung yayılır. Bremsstrahlung, sürekli X-ışınlarıdır (Jevromovic, 2009).

Beta parçacıkları enerjilerini, Moller saçılması olarak bilinen elektronun ortamda bulunan atomun elektronlarıyla yaptığı esnek olmayan saçılmayla ve Bhabha saçılması olarak bilinen pozitronların ortamdaki elektronlarla yaptığı esnek olmayan çarpışmasıyla kaybederler (Halzen ve Martin, 1984). Beta parçacıkları enerjilerinin büyük bir kısmını, ortamın yörünge elektronları ile yaptıkları çarpışmayla kaybetmektedirler. Çizelge 2.2’de, bazı beta aktif radyoizotoplar gösterilmektedir (Knoll, 2002).

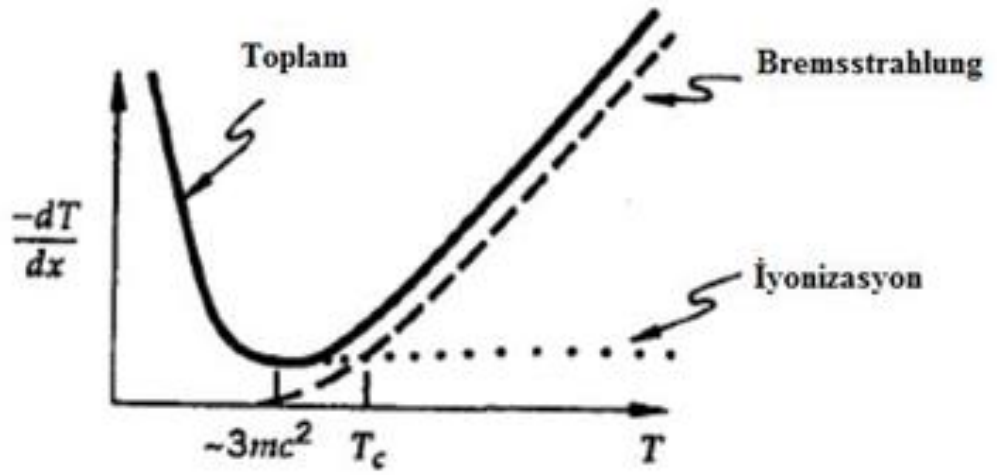
Çizelge 2.2: Beta aktif bazı radyoizotop kaynaklar.

Kaynak	Yarı Ömür	Kinetik Enerji (MeV)
³ H	12,26 y	0,019
¹⁴ C	5730 y	0,16
³² P	14,28 g	1,71
³³ P	24,4 g	0,25
³⁵ S	87,9 g	0,17
³⁶ Cl	3,08x10 ⁵ y	0,71
⁴⁵ Ca	165 g	0,25
⁶³ Ni	92 y	0,07
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	27,7y/64 s	0,55/2,27
⁹⁹ Tc	2,12x10 ⁵ y	0,29
¹⁴⁷ Pm	2,62 y	0,22
²⁰⁴ Tl	3,81 y	0,77

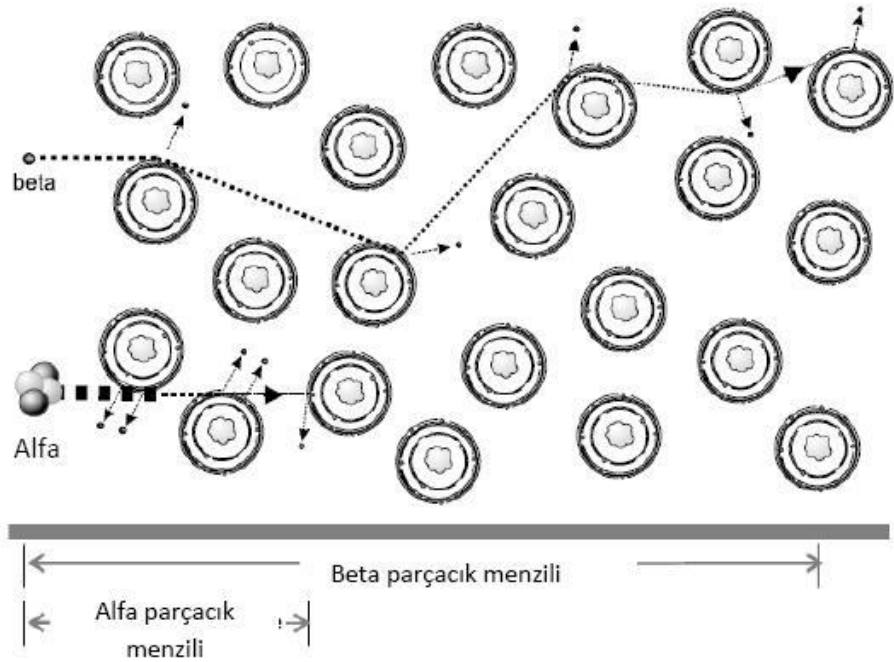
Cherenkov radyasyonu, beta parçacıklarının ışık hızından daha hızlı olarak bir dielektrik ortamdan geçmesiyle yayımlanan elektromanyetik radyasyondur (Cherenkov, 1934). Bir negatron veya negatif beta parçacığı, nötron/proton oranı dengesiz yani nötron fazlalığı olan radyonüklidin çekirdeğinden yayımlanan elektrondur. Bu dengesizliğin sonucunda, bir nötron protona çevrilir ve anlık olarak bir elektron (negatron) oluşur. Bunun sonucunda, yüksüz bir parçacık olan nötrino meydana gelir. Anti nötrino, negatif beta parçacığı (negatron) ile ilişkili ve nötrino, pozitif beta parçacığı (pozitron) ile ilgilidir. Nötrino ve anti nötrino aynı özelliklere sahiptir. Sadece spinleri farklıdır bu yüzden genel olarak nötrino denilmektedir (Jevromovic, 2009).

Beta parçacıklarının menzili, aynı enerjide ki alfa parçacıklarından daha büyüktür. Bunu nedeni, daha düşük kütle ve daha düşük yüke sahip olmalarından ve aynı enerjide daha hızlı olmalarından dolayıdır. Bütün beta parçacıkları madde tarafından

soğurulduğu için, zırh olarak seçilen malzemeler önem taşımaktadır. Bremsstrahlung, beta parçacığının kütlesiyle ters orantılı, maddenin atom numarası ile doğru orantılı olarak artar. Zararlı bremsstrahlung radyasyonu, yüksek enerjili beta parçacıklarının yüksek atom numarasına sahip zırhla etkileşimi ile meydana gelmektedir. Beta parçacıklarının izlediği yol zikzaklıdır ve alfa parçacığına göre menzili, kütlesi daha az olduğundan dolayı uzundur (Jevromovic, 2009). Şekil 2.2’de elektronun madde içerisindeki enerji kaybı gösterilmektedir (Das ve Ferbel, 2003). Şekil 2.3’de ise alfa ve beta parçacıklarının menzilleri gösterilmektedir (Powsner ve Powsner, 2006).



Şekil 2.2: Elektronun madde içerisindeki enerji kaybı.



Şekil 2.3: Alfa ve beta parçacıklarının menzilleri.

2.1.2 Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşimi

Girici elektromanyetik radyasyon olarak bilinen gama ve X ışınları, orijinleri bakımından birbirinden farklıdır. Gama ışınları atom çekirdeğinden, X-ışınları ise yörüngeden yayınlanmaktadır.

Gama radyasyonu ve X-ışınları, aynı enerjideki alfa ve betaların aksine daha yüksek giricilik gücüne ve uzun menzile sahiptirler.

Gama radyasyonu, alfa ve betadan farklıdır. En önemlisi yüksüzdür ve kütlesi yoktur. Çekirdekteki nükleonların değişiminden meydana gelir ve enerjiye göre farklı saçılma olayları gözlemlenir (Jevromovic, 2009). Çizelge 2.3’de bazı gama aktif radyoizotoplar gösterilmektedir (Knoll, 2002).

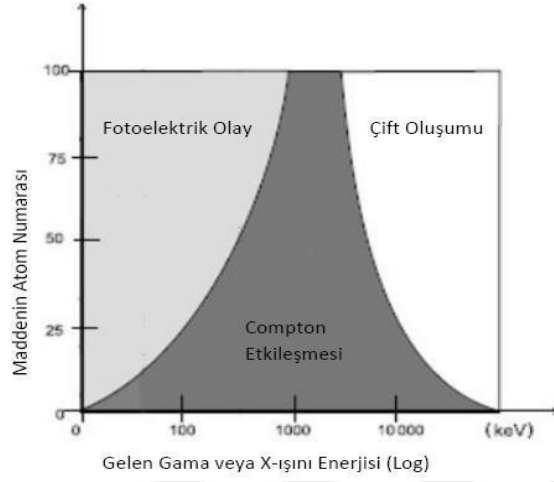
Çizelge 2.3: Bazı gama aktif radyoizotoplar.

Radyoizotop	Yarı Ömür	Kinetik Enerji (MeV)
⁶⁰ Co	5,26 y	1,17-1,33
¹³⁷ Cs	30 y	0,66
¹⁹² Ir	74 g	0,3-0,6
¹²⁴ Sb	60 g	0,6-2,1
²² Na	2,6 y	1274,5
²⁴ Na	15,0 s	1368,5-2754
⁴⁶ Sc	83,7 g	889,2-1120,5

X- ve gama ışınları madde içerisinden geçerken çoğunlukla Şekil 2.4’deki gibi etkileşme gerçekleştirirler. Bu etkileşimler;

- Fotoelektrik olay
- Compton saçılması
- Çift oluşumu

olarak ifade edilebilmektedir (Powsner ve Powsner, 2006). Şekil 2.4’te atom numarası ve gama enerjisine bağlı olarak baskın olan etkileşmeler görülmektedir (Powsner ve Powsner, 2006)

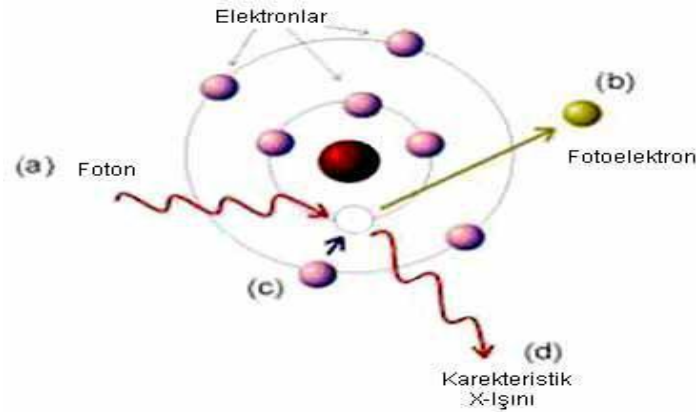


Şekil 2.4: Fotonların madde ile etkileşmesi.

Fotonların (X ve gama ışınları), elektriksel yükleri olmadığından coulomb kuvvetine maruz kalmazlar. Yukarıdaki etkileşimler, fotonların 2 özelliğini açıklar; birincisi fotonlar madde içerisinde daha uzun mesafelerde etkileşim yapar, ikinci özelliği ise belli bir kalınlıktan sonra fotonların şiddetinde azalma meydana gelmektedir.

2.1.2.1 Fotoelektrik olay

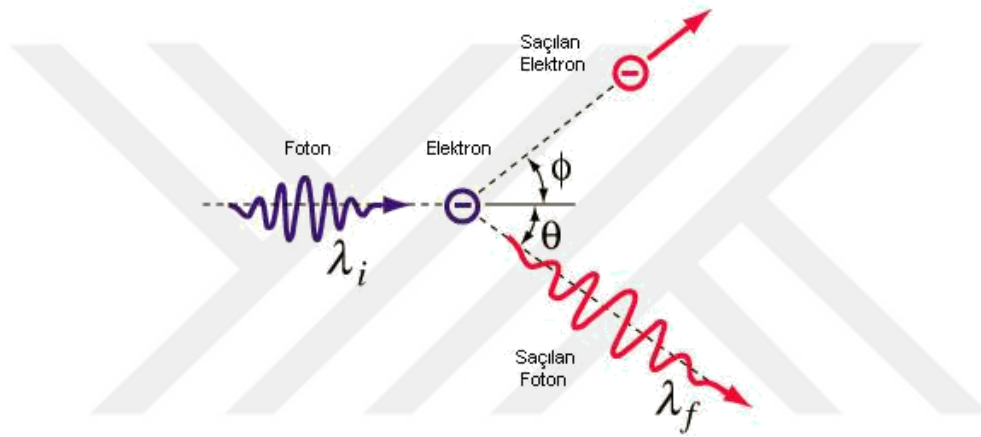
Fotonun enerjisinin, tamamen atom tarafından soğurulmasıdır. Fotonun bütün enerjisini alan elektron, yörüngesinden koparak iyonlaşır. Foton yok olmuş, yerine bir serbest elektron doğmuştur. Şekil 2.5’de fotoelektrik olayın şematik gösterimi yer almaktadır (Choppin ve diğ., 2013).



Şekil 2.5: Fotoelektrik olayın şematik gösterimi.

2.1.2.2 Compton olayı

Bu mekanizmada, foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır ve enerjisini kaybederek farklı bir açı ile yön değiştirerek yoluna devam eder. Yönü değişerek yoluna devam eden foton, enerjisini kaybedene kadar elektronlarla aynı mekanizma ile madde de yol almaya devam eder. Fırlatılan elektron aynı beta parçacıkları gibi ikincil iyonizasyonlar ile enerjisini kaybeder. Compton saçılmasına uğrayan foton, gelen fotonun elektron ile çarpışmasından dolayı her zaman daha uzun dalga boyuna (daha az enerjiye) sahiptir. Şekil 2.6'da Compton saçılması şematik olarak gösterilmektedir (Choppin ve diğ., 2013).



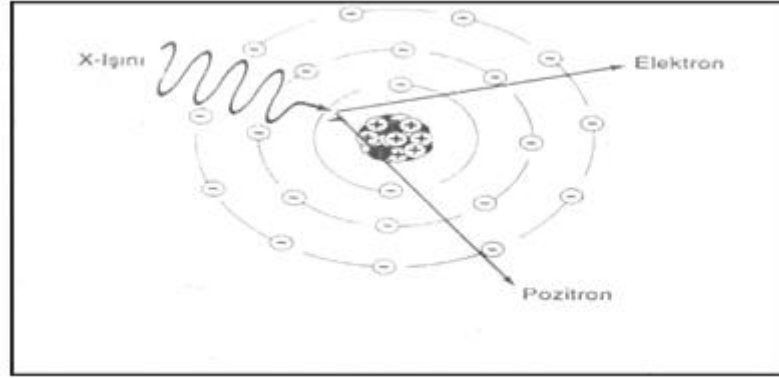
Şekil 2.6: Compton saçılmasının şematik gösterimi.

2.1.2.3 Çift oluşumu

Gama fotonunun enerjisi, hareketsiz iki elektronun enerjisinden büyük ise gama fotonu bir elektron ve bir pozitrona dönüşür. Buna, çift oluşumu denir. Annihilasyon işleminin tersidir. Bir elektronun (negatron) oluşumu için minimum 0,511 MeV gerekmektedir. Fakat, 0,511 MeV'lik gama ışını, tek başına negatron oluşturamaz. Anti parçacığı aynı kütlede ve zıt yükte pozitronun anlık olarak oluşması gerekmektedir. Bu etkileşim için gereken minimum enerji 1,022 MeV'dir.

Bir maddeden geçen elektromanyetik radyasyonun şiddeti, soğuran maddenin kalınlığı ve ilk gelen radyasyonun şiddeti ile orantılıdır. Soğurucu malzemenin kalınlığının artması, gelen fotonun madde ile fotoelektrik olay, compton olayı ve çift oluşumu mekanizmalarından etkilenerek zayıflatılmasına neden olur. Çift oluşumunun gerçekleşme olasılığı, gama fotonun enerjisiyle doğru orantılı olarak

artarken, fotonun enerjisinin azalması Compton ve fotoelektrik olay olasılığını arttırmaktadır (Choppin ve diğ., 2013). Şekil 2.7’de çift oluşumunun şematik gösterimi verilmektedir (L’Annunziata, 2003).



Şekil 2.7: Çift oluşumunun şematik gösterimi.

2.2 Seramik ve Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik malzemeler, metalik (Al, Mg, Na, Ti, W), yarı metalik (Si, B) veya metalik olmayan (O, N, C) elementlerden oluşan inorganik bileşiklerdir. Elementlerin atomları, seramik bir yapıda aşağıdaki bağlanma mekanizmalarından biri ile bir arada tutulur:

- İyonik bağlanma,
- Kovalent bağlanma,
- İyonik-kovalent karışık bağlanma.

Seramik malzemelerin çoğunun, iyonik ve kovalent bileşenler arasında çeşitli oranlarda bulunan karışık bir bağlanma yapısı vardır. Bu oran, yapıdaki bileşenlerin elektronegatiflik farklarına bağlıdır ve bağlanma mekanizmalarından hangisinin iyonik veya kovalent olduğuna karar verir. Metalik bağlanmanın aksine, ne iyonik ne de kovalent bağlanma serbest elektronlar oluşturmaz. Bu nedenle, seramik malzemeler, çok düşük elektrik ve termal iletkenliğe sahiptirler. Bazıları amorf, bazıları da kristal yapıdadırlar. Genelde, çok sert ve gevreklerdir (Pampuch, 2013). Hem iyonik hem de kovalent bağlar, metalik bağdan daha güçlü olduğu için seramik malzemeler metallere göre daha serttir. İyonik ve kovalent bağların mukavemeti, aynı zamanda yüksek erime noktasını, elastikiyet modülünü, seramik malzemelerin sıcaklık ve kimyasal kararlılığını belirler (Pampuch, 2013).

Seramik, aşağıdaki bazı mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerin benzersiz bir kombinasyonuna sahiptir (Pampuch, 2013):

- Sertlik,
- Düşük yoğunluk,
- Yüksek esneklik modülü,
- İyi tribolojik özellikler (Farklı aşınma tiplerine karşı mükemmel dayanıklılık),
- Çok düşük elektrik iletkenliği,
- Çok düşük termal iletkenlik,
- Yüksek refrakterlik ve termal kararlılık,
- İyi korozyon direnci.

Kil, kaolen ve feldispat gibi minerallerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilen geleneksel seramiklerin bileşimlerinde, değişik türde silikatlar, alimünatlar ve bunların yanında bir miktar metal oksitler bulunur. Çoğu durumda, bu malzemeler silikatlar yani silisyum elementinin, oksit formunda olan bileşikleridir (SiO_2). Çok miktarda ürün bulunduğu için geleneksel seramikler, doğal olarak oluşan hammaddelerden üretilme eğilimindedir. İleri teknoloji seramikleri; oksitler, karbürler ve nitrürlerden oluşmaktadır. Mikroyapısal tasarım ve işleme kontrolü konusuna dikkat edildiğinden gelişmiş seramikler genellikle katma değeri yüksek ürünlerdir (Pampuch, 2013).

Seramikler, yüksek mukavemet, sertlik, aşınmaya kimyasal etkilere ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık, boyutlarda kararlılık gibi üstün özellikleri sebebiyle uçak ve uzay endüstrisinde önemli ölçüde kullanılmaktadırlar (Pampuch, 2013).

Alüminyum oksit, en yaygın kullanılan ve uygun maliyetli oksit seramik malzemesidir. Teknik alümina seramikleri en az %80 alüminyum oksit (Al_2O_3) içermektedir. Alümina seramiklerine az miktarda silisyum (SiO_2), magnezyum (MgO) ve zirkonyum (ZrO_2) eklenebilir. Zirkonyumun alümina seramiğine eklenmesi, malzeme kırılma tokluğunun önemli ölçüde artmasına neden olur (Bourmans, 2004).

Alüminyum, aşağıdaki malzeme özelliklerini belirleyen güçlü iyonik bağlara sahiptir (Bourmans, 2004):

- Yüksek mekanik mukavemet (eğilme mukavemetive sertlik),
- Yüksek aşınma direnci,

- Yüksek sıcaklıklarda bile kuvvetli asitlerin ve alkali kimyasallara karşı yüksek direnç,
- Yüksek sertlik özelliği,
- Mükemmel izolasyon özellikleri,
- Düşük termal genleşme katsayısı,
- İyi kırılma tokluğu,
- İyi termal iletkenlik.

Alüminyum seramikler, elektronik ve elektrik mühendisliği, metalurjik işlemler, kimyasal teknolojiler, tıbbi teknolojiler, makine mühendisliği, askeri teçhizatlar da yaygın olarak kullanılmaktadır (Bourmans, 2004).

Silikatlar, genellikle silisyum ve oksijenden oluşan malzemelerdir. Teknik açıdan porselen genellikle silisyum (SiO_2) ve alüminyum (Al_2O_3) içerir. Bu bileşenlerin doğal içerikleri kuvars, feldspat ve kil (kaolin)'dir. Malzeme bileşiminde silis ve alüminyum oranına bağlı olarak iki tür porselen hazırlanabilir: kuvarz porselen veya alümina porselen. Alümina porselenler, daha yüksek miktarda alüminyum içerir ve silika porselenden daha yüksek mekanik mukavemete sahiptirler (Bourmans, 2004).

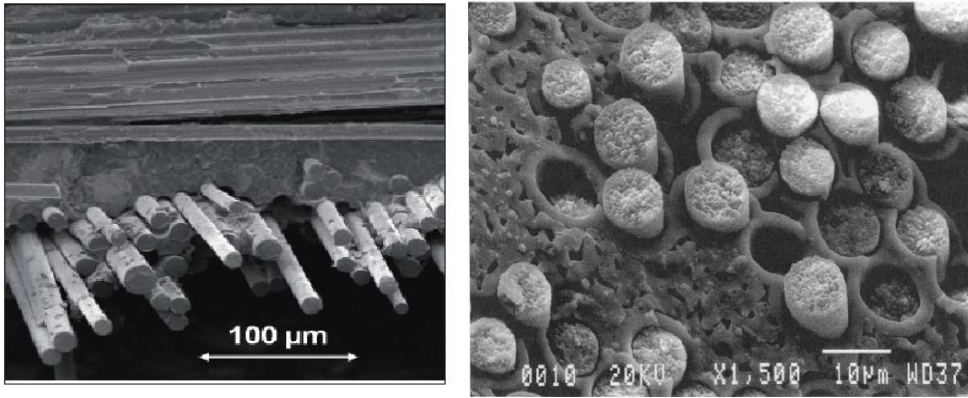
Teknik porselen için aşağıdaki özellikler tipiktir:

- Yüksek mekanik mukavemet,
- Mükemmel dielektrik özellikler,
- Yüksek kimyasal direnç,
- Elektrik mühendisliğinde iyi bir izolatör olma özelliği.

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla farklı fazdan (matris fazı ve dağınmık faz) oluşan ve herhangi bir bileşeninden önemli ölçüde farklı özelliklere sahip bir malzemedir (Bourmans, 2004).

Sürekli bir karaktere sahip olan birincil faza matris denilmektedir. Matris, genellikle daha sünek ve daha az sertliğe sahip olan fazdır. Dağıtılmış fazı tutar ve onunla yük paylaşır. İkincil faz veya fazlar, matriste süreksiz bir biçimde gömülüdür. Bu ikincil faz, dağılmış faz olarak adlandırılır. Dağılmış faz, genellikle matristen daha güçlüdür. Bu nedenle, bu faza bazen takviye fazı da denir. Seramik matris kompozitleri, seramik bir matristen ve diğer seramik malzemelerin gömülü liflerinden (dağınmık faz) oluşur (Bourmans, 2004).

Seramik Matrisli Kompozitler (CMC), oksit ya da karbürlerden oluşan bir matrisin, dağılmış faz ile kombine edilmesiyle hazırlanan bir malzemedir. Seramik matrisli kompozitlerin ana dezavantajı, gevrek olan geleneksel seramiklerin tokluğunu arttırmak üzere tasarlanmış olmasıdır. Seramik matris kompozitleri, sürekli (uzun) elyaflar veya süreksiz (kısa) elyaflarla takviye edilmiştir. Kısa elyaflı (süreksiz) kompozitler, silikon karbür (SiC), titanyum borür (TiB₂), alüminyum nitrit (AlN) ile takviye edilmiş oksitli (alüminyum) veya oksitsiz (silisyum karbür) seramik matrisinden geleneksel seramik işlemleri ile üretilir. CMC'nin çoğu, yüksek mukavemeti ve sertliği (elastikiyet modülü) nedeniyle silikon karbür liflerle takviye edilmiştir. Şekil 2.8'de lifli seramik matris kompozitlerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülerine örnekler gösterilmektedir (Narottam, 2005).



Şekil 2.8: Uzun lifli Seramik Matris Kompozitler.

Uzun lifli seramik matris kompozitlerin tipik özellikleri:

- Yüksek sıcaklıklarda bile yüksek mekanik mukavemet,
 - Yüksek termal şok direnci,
 - Yüksek sertlik,
 - Yüksek termal kararlılık,
 - Düşük yoğunluk,
 - Yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek korozyon direnci
- olarak sıralanabilir.

Silisyum karbür matrisli kompozitler, gaz türbinli motorların yanma gömlekleri, sıcak gaz dolaşımli fanlar, ısı değıştirciler, roket tahrik bileşenleri, sıcak sıvılar için filtreler, gazla çalışan brülör parçaları, fırın borusu askıları, daldırılmalı brülör borularının imalinde kullanılır. Karbon-karbon kompozitleri, yüksek performanslı

fren sistemleri, refrakter bileşenler, sıcak preslenmiş kalıplar, ısıtma elemanları, turbojet motor parçaları üretmek için kullanılır.

Nükleer endüstride, seramikler büyük önem taşımaktadır. Nükleer enerji üretiminin başlangıcından bu yana metal bazlı oksit seramikler, su soğutmalı ve sıvı metal soğutmalı reaktörler için uranyum ve plütonyumu son derece güvenilir yakıt peletleri haline getirmede kullanılmaktadırlar. Seramik malzemeler, nihai depolamada nükleer atıkları immobilize etmek için de kullanılabilir. Atık bertarafı için vitrifikasyon (cam oluşumu) tercih edilen bir yaklaşım olsa da, atıklar doğal kayaç formatında sentetik kayaç bileşimleri içeren seramikler haline getirilebilir.

Nükleer enerji üretiminin başlangıcından bu yana, oksit seramiklerden su soğutmalı ve sıvı metal soğutmalı reaktörler için son derece güvenilir yakıt peletleri yapılmaktadır. Nükleer reaktörlerde seramikler yakıt ve moderatör malzemeler olarak kullanılmaktadır.

2.3 Doğal Mineraller

2.3.1 Zeolitler

Zeolit, yapısında boşluklar bulunan, kafes yapısına sahip üç boyutlu sulu alüminyum silikat mineralidir. Bu boşluklar, boyutları kadar molekülleri absorplamayı tercih ederler ve yapıda molekül düzeyinde yaprak gibi görünürler. Bu yüzden, zeolit molekül yaprakların alt kümesidir. İsveç'li mineralog Fredrick Cronstedt tarafından 1756 yılında bulunmuştur. Mineral olarak volkanik kayaçların boşluk ve çatlaklarında bulunmasından ve suyun köpürmesine neden olduğundan Yunanca kaynayan taş anlamına gelen zeolit adını almıştır. Zeolitler, silikat (SiO_2) kristali şeklinde oluşurlar. Bazı yapılarda Al^{3+} , Si^{4+} 'ün yerine bulunmaktadır ve yapı negatif yük taşımaktadır. Üç boyutlu iskelet yapısındaki molekül yaprakları, çamaşır deterjanında, gazları ayırmada, tarımda ve ziraatta kullanılmaktadır. Katalizör, iyon değiştirme ajanı ve molekül filtresi olarak petrol arıtılması ve nükleer yakıtların tekrar işlemesi de zeolitin başlıca kullanım alanlarındandır (Gottardi ve Galli, 1985). Nükleer santral atıklarından kaynaklanan ve çevre sağlığını olumsuz etkileyen ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co gibi izotoplar, asitlere dayanıklılıkları sebebiyle klinoptilolit ve mordenit kullanılarak ortamdaki uzaklaştırılabilmektedirler (Ames, 1961).

Zeolit iskeleti, eşit sayıda Al ve Si atomu içerdiğinde her bir oksijen atomu bir alüminyum ve bir silisyum atomuna bağlanır, boşluklar maksimum yoğunlukta değişebilen katyon içerir. Bu tip zeolitler, iyon değiştirici veya adsorban olarak kullanılırlar (Bekkum ve diğ., 2001).

Katalizör uygulamalarında, zeolit silisyumlu iskelet yapısının yüksek olması nedeniyle tercih edilir. Bu yapı, zeoliti yüksek sıcaklığa dirençli hale getirir. Zeolitlerin yapısı içindeki kanallarda da, su moleküllerinin bulunmaktadır (Breck, 1975).

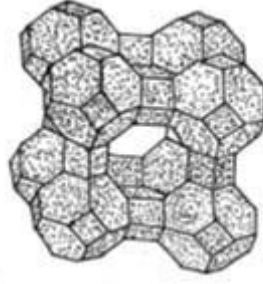
Tipik bir doğal zeolitin kimyasal bileşimi Çizelge 2.4’de verilmiştir (Bekkum ve diğ., 2001).

Çizelge 2.4: Doğal zeolitin kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşenler	Miktar (%)
SiO ₂	62,17
Al ₂ O ₃	9,76
Fe ₂ O ₃	2,02
CaO	1,43
MgO	0,75
SO ₃	0,07
Na ₂ O	0,46
K ₂ O	3,72

Saf silika (SiO₂) nötraldir. Fakat, alüminosilikat oluşturmak için tetravalent Si, trivalent Al ile değiştirildiğinde iskelet yapısı negatif yüklenir. İskelet kompozisyonu, malzemenin kararlılığını da etkiler. Örneğin, yüksek silika içeren zeolitin ısı kararlığı alüminyum silikata göre daha fazladır.

Zeolitlerin ana özelliğini, kafes yapısının dizilimi, kanal sisteminin boyutu ve boşlukların ortalama boyutu belirler (Bekkum ve diğ., 2001). Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da zeolitlerin yapısı gösterilmektedir (Scott ve diğ., 2003).



Şekil 2.9: Yapay zeolitlerde SiO_4 ve AlO_4 dörtyüzeylilerinin bağlantıları.

Zeolitlerin kritik özellikleri; yapısı, silisyum/alüminyum oranı, tane büyüklüğü ve iskelet yapısı olarak sıralanabilir. Tane büyüklüğü zeolitte iki boyutlu bir pencere anlamına gelir ve ortak bağlanan dörtyüzlülerin sayısını belirler. Bu yapı, daha sonra dört yüzlülerin bağlanmasıyla 3 boyutlu dizi oluşturur ve daha fazla sayıda hacimsel iç boşluk meydana getirir (Thomas, 2004). Çizelge 2.5’de, doğal zeolitin bazı özellikleri gösterilmektedir (Yeritsyan ve diğ., 2013).

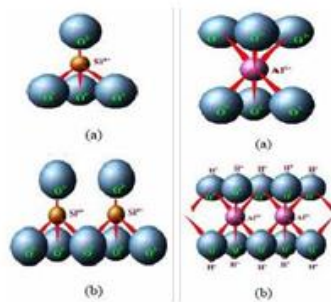
Çizelge 2.5: Doğal zeolitin özellikleri.

Özellik	Aralık
Kanal boyutu	2,2-8 Å
Boşluk boyutu	6,6-11,8 Å
Isıl denge	500-100°C
İyon değiştirme kapasitesi	700 meq/100 g kadar
Yüzey alanı	900 m ² g ⁻¹ kadar
Su kapasitesi	1-25 %wt
Su eğilimi	Hidrofilik-hidrofobik

2.3.2 Bentonitler

Bentonit, kilin yapısında bulunan camısı parçacıkların değişiminden meydana gelen volkanik küldür. Adını, ilk bulunduğu yer olan Fort Benton Montana’dan alır. Kristal yapıda bulunan demir ve magnezyum veya sodyum ve kalsiyum içeren sulu alüminyum silikatlardan oluşan smektit grubuna ait kil minerallerinden meydana gelir. Bentonit, volkanik camların kile dönüşmesiyle meydana gelir.

Bentonitlerin özellikleri, smektit kil minarelleri olmasındandır. Smektit minarellerin en çok bilinen yapısı, montmorillonit türüdür. Smektit mineralleri, silika ve alüminyum içerecek şekilde meydana gelmiş olup, bir kitabın sayfaları gibi dizilmişlerdir. Bu dizilişin gevşek olması nedeniyle, su bu aralıklara girebilmektedir. Bu durumda, smektit kil minarallerinin, suda kolaylıkla dağılabilmesine neden olmaktadır. Su molekülleri, yüzeye dışarı doğru azalmaktadır. Smektit kompozisyonu, her zaman dengesiz olarak net negatif yük dağılımında bulunmaktadır ve Na veya Ca gibi bir katyon ile dengelenmektedir. Silika ve alümina tabakaları kuvvetli iyonik bağ ile bağlanmış iken birim tabakalar zayıf Van der Waals kuvvetleri ile bağlanmıştır. Bu da, tabakaların kolaylıkla ayrılmasına neden olmaktadır. Aralarında su molekülü ve yapılarında pozitif yük noksanlığını karşılayan değişebilen katyonlar bulunur. Su ve organik maddeler, bu birim tabakalar arasına girerek yapının genişlemesine neden olurlar. Birim tabakalar arasındaki bağların zayıf olması nedeni ile tabaka aralarına değişik iyonlar, organik moleküller ve su girerek bentonitlere adsorpsiyon özelliği kazandırır. Oluşan negatif yükler, tabakalar arasındaki bölgeye veya kil yüzeyine giren pozitif iyonlar sayesinde dengelenmektedir. Doğal killerde yük dengeleyici katyonlar, genellikle Na^+ , K^+ , Ca^{+2} dur. Bu katyonlar, tabaka arasında su molekülleri ile ilişki kurmaya meyillidirler. Adsorplanan su moleküllerinin birinci tabakası hegzagonal yapıdaki oksijen atomlarına hidrojen bağları ile bağlanır (Bergaya ve Lagaly, 2013).



Şekil 2.10: Kil tanesini a) Silika tetrahedral birim, b) Alimüna silikat tabakası.

Bentonitler, şişen bentonit (Na-bentoniti), şişmeyen bentonit (Ca-bentoniti) ve karışık (ara) bentonit (hem Na hem Ca-bentonit) olarak üçe ayrılmaktadır. Na bentonitler, yüksek seviyede su absorplayabilir iken orijinal hacimlerini katlayarak şişme özellikleri gösterirler. Ca bentonitler, şişme özelliği göstermeyen, ince granüllü agralar olarak bölünebilen genellikle absorplayan kil olarak anılırlar ki diğer

bir adı da Fullers Earth olarak bilinir. Çizelge 2.6’da bentonit gruplarının ortalama kimyasal bileşimleri görülmektedir (Bergaya ve Lagaly, 2013 ve Pusch, 2002).

Çizelge 2.6: Bentonit gruplarının ortalama kimyasal bileşimleri.

Bileşen (%)	Na-Bentonit	Ca-Bentonit	Aratip
SiO ₂	64	59	62
Al ₂ O ₃	21	19,7	15,9
Fe ₂ O ₃	3,5	5,9	3,0
MgO	2,3	5,5	2,6
CaO	0,5	1,7	4,5
Na ₂ O	2,6	0,2	2,0

Çizelge 2.7’de ise Türkiye’de çıkarılan Reşadiye bentonitle, uluslararası pazarda en çok kullanılan Wyoming bentonitin kimyasal analizi görülmektedir (Tabak ve diğ., 2007).

Çizelge 2.7: Farklı tür bentonitlerin kimyasal analizi.

Bileşen (%)	Reşadiye-Bentoniti	Wyoming-Bentoniti
SiO ₂	60,22	48,35
Al ₂ O ₃	17,81	12,15
Fe ₂ O ₃	2,52	8,26
Na ₂ O	3,14	3,65
K ₂ O	1,12	2,39
CaO	3,39	6,68
MgO	2,22	5,47

Bentonit, su ile temasında kolloidal özellik göstermesi, su ve bazı organik ortamlarda şişme, yüksek plastisite ve yüksek bağlayıcılık gibi özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Birçok ticari ürünün bileşeni olarak kullanılırlar. Döküm kalıp kumlarının hazırlanmasında, demir cevherlerinin peletlenmesinde bağlayıcılar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Bentonit, seramik hamurunun plastisitesini, ekstrüzyon kabiliyetini ve kuru mukavemeti arttırması, seramik hamurunun homojen karışmasını ve piştikten sonra kırılabilirliğinin azalmasını sağlaması nedeniyle seramik sektöründe kullanım yeri bulmaktadır (Pusch, 2015).

Bentonit; kozmetik sanayinde, kedi kumlarında, yapışkanlarda, deterjan imalatında, hayvan yemi bağlayıcısı, bariyer kili, katalizör, çimento katkısı, gübre katkısı, soğurucu madde olarak da kullanım alanı bulmaktadır (Grim ve Guven, 1978).

Bentonitleri çok katmanlı derin jeolojik depolarda bariyer malzemesi olarak kullanılmasının sebepleri;

- Düşük geçirgenlik,
- Uranyum, fisyon ve aktivasyon ürünlerini (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{147}Pm , ^{155}Eu , ^{239}I , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am) adsorplama yeteneği,
- Plastisitesi,
- Isıl iletkenlikleri,
- Bentonit bariyerlerin uzun süre korunmasını sağlayan reolojik özellikleridir (Seliman ve diğ., 2014).

2.3.3 Galen Minerali

Galen, pratik olarak sodyum klorür (NaCl) ile aynı kristal yapıya sahiptir. Genellikle, oktahedral formları gösteren kübik kristal sisteminde kristalleşir. Galen minerali, kurşun elde edilmesinde önemli bir hammaddedir. Hidrotermal damarlarda, metamorfik yataklarda, pegmatitlerde ve nadiren kireçtaşı ve kalkerlerde, farklı sıcaklıklar altında oluşabilmektedir. Genellikle kübik kristal yapıdadır.

Dilinimi mükemmel, kırılma yapıda ve kaba ya da ince granüller halinde bulunmaktadır. Yoğunluğu $7,4 \text{ g cm}^{-3}$ olup sertliği 2,5-2,75 mohs'tur. Kimyasal bileşiminde, %86,5-86,6 oranında kurşun ve %13,3-13,4 oranında kükürt bulunmaktadır (Anthony ve diğ., 2003).

Çizelge 2.8 galen içerisindeki bileşiklerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini göstermektedir. Şekil 2.11'de galen cevheri görülmektedir (Mortazavi ve diğ., 2010).



Şekil 2.11: Galen minerali.

Çizelge 2.8: Galen mineralinin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellik	Galen
Kimyasal kompozisyon	Kurşun Sülfür (PbS)
Moleküler Ağırlık	239,26 g
Kurşun Miktarı	% 86,59 Pb, % 13,40 S
B ₂ O ₃ Miktarı	-----
Yoğunluk (g cm ⁻³)	7,0 – 7,5
Renk	Gri

Gwaily'nin (2002) çalışmasında, polimer malzemelerin içerisine farklı oranlarda galen ekleyerek, ¹³⁷Cs nokta kaynağı kullanılarak malzemenin zırhlama özellikleri incelenmiştir. Çizelge 2.9'da, farklı oranlarda galen içeren örneklerin lineer zayıflatma ve YDK değerleri gösterilmektedir (Gwaily, 2002).

Çizelge 2.9: Galen içeren malzemelerin zayıflatma katsayısı ve YDK değerleri.

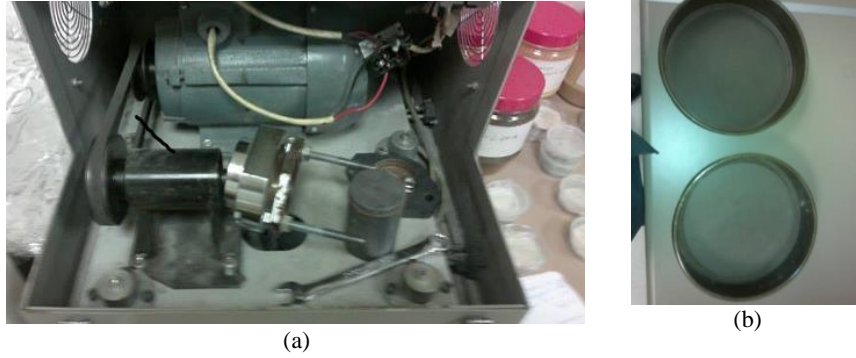
Galen Oranı (phr)	Lineer zayıflatma katsayısı	YDK (m)
0	7,43	0,093
100	11	0,063
250	20,8	0,033
400	26,7	0,026
500	29,5	0,023
Kurşun	142	0,005
Beton	12-19	0,058-0,037
Su	9	0,077



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Seramik Materyallerin Hazırlanması

Türkiye'nin farklı bölgelerden çıkartılmış, farklı kimyasal bileşimlerdeki bentonit ve zeolit doğal mineralleri ile borat ve galenin farklı bileşimlerinden hazırlanan seramik ve seramik matrisli kompozit malzemelerin radyasyon karşısındaki davranışları incelenmiş ve farklı gama radyasyonu enerjilerine karşı etkin olan seramik matrisli materyaller belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan bentonit mineralleri; Reşadiye sodyum bentoniti, Ankara Karagedik kalsiyumlu bentoniti, Soma kalsiyum bentoniti ve Çankırı arabentonitidir. Zeolit mineralleri ise Amasya ve Bigadiç zeolitleridir. Doğal mineraller, Fusion Frequency Marka FFBM-3A Model tungsten karbür hazneli ve bilyalı öğütücüde 74 mikronun altında kalacak şekilde öğütüldükten sonra, 40 mikronluk elekten elenmiştir (Şekil 3.1a ve b). Elenen mineraller, nemlerinin uzaklaştırılması için Heraeus Marka D-6450 Model etüvde 110°C'de 3 saat bekletilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.1: a) Bilyalı öğütücü b) 40 µm'lik elek.



Şekil 3.2: Etüvde kurutma.

Deneysel çalışmaların bundan sonraki bölümlerinde, seramiklerin hazırlanmasında kullanılan doğal minerallerin, Çizelge 3.1’de verilen kısaltmaları kullanılmıştır.

Çizelge 3.1: Malzemelerin kodlanması.

Malzeme	Kod	Malzeme	Kod
Amasya Zeolit	ZE ₁	Ankara Bentonit	BN ₁
Bigadiç Zeolit	ZE ₂	Arabentonit	BN ₂
Galen	GA	Sömaş Bentonit	BN ₃
Borik Asit	BA	Reşadiye Bentonit	BN ₄

3.2 Seramik ve Seramik Matrisli Kompozitlerin Hazırlanması

Zırhlama özelliklerinde malzeme kalınlığının etkisini de inceleyebilmek amacıyla, doğal minerallerin herbiri toplam ağırlıkları 7,5, 10, 15, 20 g olacak şekilde Shimadzu Marka AUW220D Model terazide tartıldıktan sonra agat havanda homojen bir şekilde karıştırılıp 40 mm’lik kalıpta Fusion Frequency Marka hidrolik preste 40 MPa’lık bir basınç altında preslenmiştir (Şekil 3.3). Zeolit mineralinin pelet olarak basılmasında karşılaşılan sorunlar nedeniyle, toplam ağırlığın ¼’ü oranında borik asit (B₂O₃) eklenerek peletler basılmıştır.



Şekil 3.3: Hidrolik pres ve preslenen bazı örnekler.

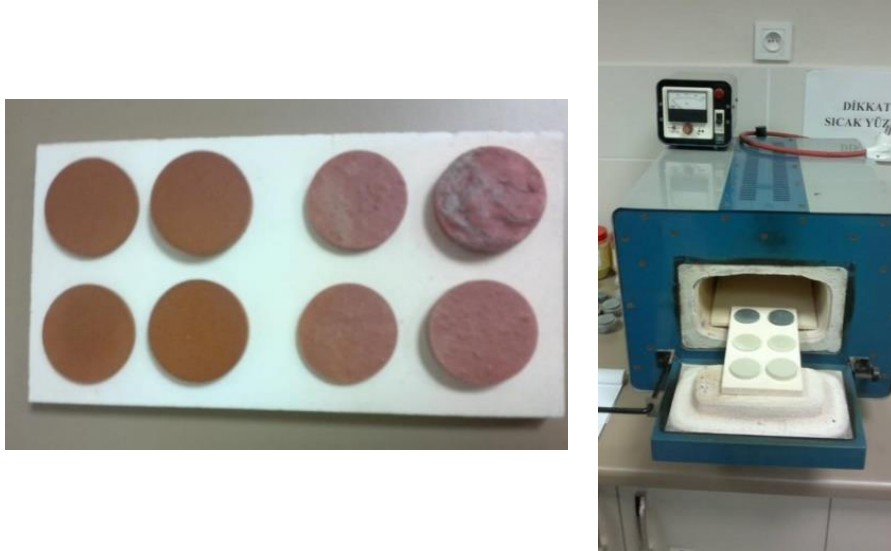
Hazırlanan seramik matrislerin zırhlama özelliklerini arttırmak amacı ile herbir karışıma 1:1 oranında kurşun sülfürden oluşan doğal bir mineral olan galen eklenmiştir. Hazırlanan karışımlar agat havanda homojen hale getirildikten sonra 40 mm'lik kalıplarda peletler basılmıştır.

Pelet basmada karşılaşılan güçlükler nedeniyle, (0,5ZE₁.0,5GA), (0,5ZE₂.0,5GA) ve (0,5BN₃.0,5GA) karışımlarına, karışım oranı aynı kalacak şekilde bağlayıcı olarak ¼ oranında B₂O₃ eklenerek toplam ağırlık 10 g ve 20 g olacak şekilde iki farklı kalınlıkta pelet basılmıştır.

(0,5BN₁.0,5GA), (0,5BN₂.0,5GA) ve (0,5BN₄.0,5GA) karışımlarında pelet basma işlemi sırasında bir sorun yaşanmadığından borik asit ilave edilmeden toplam ağırlıkları 10 g ve 20 g olacak şekilde iki farklı kalınlıkta hazırlanmıştır.

Peletler hazırlandıktan sonra, herbir karışım Nüve Marka yüksek sıcaklık fırınında sinterleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.4).

Bu işlem, ani sıcaklık artışı nedeni ile malzemede çatlama olmaması için kademeli sıcaklık arttırımı ile bileşime bağlı olarak 300 ila 600°C arasında değişen sıcaklıklarda 24 saat beklenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4: Hazırlanan peletler ve yüksek sıcaklık fırını.

Çizelge 3.2'de hazırlanan herbir seramik malzemenin üretim koşulları ve fiziksel özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.2: Seramik malzemelerin üretim koşulları ve fiziksel özellikleri.

Seramik Matrisler	Kütle g	T _{Sint} °C	Kalınlık mm	r mm	Hacim cm ³	Kütle kayı %	ρ g cm ⁻³	Etkin porozite %
0,75ZE ₁ •0,25BA-1	7,5	600	4,90	20	6,16	13,20	1,04	0,19
0,75ZE ₁ •0,25BA-2	10	600	5,38	20	6,76	13,50	1,28	0,22
0,75ZE ₁ •0,25BA-3	15	600	7,57	20	9,51	14,40	1,36	0,27
0,75ZE ₁ •0,25BA-4	20	600	9,89	20	12,43	13,65	1,40	0,32
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-1	10	600	4,57	20	5,74	14,50	1,48	0,56
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-2	20	600	7,35	20	9,24	15,90	1,84	0,65
0,75ZE ₂ •0,25BA-1	7,5	900	4,93	18	5,02	19,60	1,20	0,17
0,75ZE ₂ •0,25BA-2	10	900	5,94	18	6,05	20,00	1,22	0,21
0,75ZE ₂ •0,25BA-3	15	900	7,47	18	7,60	19,33	1,56	0,25
0,75ZE ₂ •0,25BA-4	20	900	10,03	18	10,21	43,25	1,12	0,30
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-1	10	600	5,15	20	6,47	13,40	1,32	0,49
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-2	20	600	7,60	20	9,55	10,20	1,88	0,55
BN ₁ -1	7,5	900	3,32	18	3,38	20,13	1,96	0,75
BN ₁ -2	10	900	4,11	18	4,18	20,40	1,92	0,82
BN ₁ -3	15	900	5,76	18	5,86	20,13	2,04	0,95
BN ₁ -4	20	900	8,08	18	8,23	20,25	1,92	1,01
0,5BN ₁ •0,5GA-1	10	900	2,60	20	3,27	16,00	2,56	1,25
0,5BN ₁ •0,5GA-2	20	900	6,27	20	7,88	19,35	2,04	1,41
BN ₂ -1	7,5	900	3,24	19	3,68	12,13	1,80	0,64
BN ₂ -2	10	900	4,70	19	5,33	12,20	1,68	0,71
BN ₂ -3	15	900	6,18	19	7,01	12,00	1,88	0,85
BN ₂ -4	20	900	7,72	19	8,76	12,10	2,00	1,03
0,5BN ₂ •0,5GA-1	10	600	2,71	20	3,41	2,50	2,88	1,16
0,5BN ₂ •0,5GA-2	20	600	6,43	20	8,08	6,10	2,36	1,22
BN ₃ -1	7,5	900	3,20	19	3,63	14,13	1,96	0,71
BN ₃ -2	10	900	4,63	19	5,25	13,70	1,64	0,79
BN ₃ -3	15	900	6,08	19	6,90	13,53	1,88	0,96
BN ₃ -4	20	900	7,6	19	8,62	13,80	2,00	0,99
0,5BN ₃ •0,5GA-2	20	300	7,17	20	9,01	11,50	1,96	1,01
BN ₄ -1	7,5	900	3,67	19	4,16	12,53	1,56	0,54
BN ₄ -2	10	900	4,45	19	5,05	12,80	1,72	0,62
BN ₄ -3	15	900	5,65	19	6,41	12,73	2,04	0,75
BN ₄ -4	20	900	7,13	19	8,09	12,95	2,16	0,99
0,5BN ₄ •0,5GA-1	10	600	2,99	20	3,76	0,60	1,32	1,14
0,5BN ₄ •0,5GA-2	20	600	5,26	20	6,61	2,65	1,48	1,20
0,75GA•0,25BA-1	15	600	4,25	20,5	5,61	17,87	2,20	0,16
0,75GA•0,25BA-2	20	600	5,62	20,5	7,42	17,90	2,20	0,18

Porozite, bir malzemenin mekanik ve termal özelliklerini ve ortam içinde bulunan malzemelerden dolayı korozyon ve mekanik aşınma davranışlarını etkiler. Prensipite, bir numunedeki porların hacmi, onları doldurmak için gerekli sıvının ağırlığından hesaplanır. Her ne kadar porların çoğu kullanılan sıvı tarafından doldurulabilir ise de (açık porlar), bazı porlar kapalıdır ve sıvı onları dolduramadığı için bu porlar hesaplanan değer içinde yer almazlar. Bu yüzden hesaplanan porozite ve katı yoğunluk değerleri etkin porozite ve görünür katı yoğunluğu olarak adlandırılır.

yerleştirilmesi için bir düzenek kullanılmıştır. Spektrum analizi GAMMA VISION-32 spektrum analiz programı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.3:Gama kaynağı olarak kullanılan sertifikalı nokta kaynaklar.

Gama Kaynağı	Enerji (keV)
²⁴¹ Am	59,5
⁵⁷ Co	122,1
¹³⁷ Cs	661,7
⁶⁰ Co	1173,2; 1333
⁸⁸ Y	1836,1

3.4 Seramik Matrisli Materyallerin Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi

Sinterlenen seramik zırh malzemelerinin zırhlama özellikleri, farklı nokta gama kaynakları kullanılarak 3 dk ve 30 dk olmak üzere farklı sayım sürelerinde dedektörde ölçümü gerçekleştirilerek test edilmiştir. ²⁴¹Am (59 keV), ⁵⁷Co (122 keV), ¹³⁷Cs (666 keV), ⁶⁰Co (1176 keV ve 1335 keV) nokta gama kaynakları için sayım süresi 3'er dakika, ⁸⁸Y (1830 keV) nokta gama kaynağı için 30'ar dakika süre ile sayım alınmıştır.

Fotonların soğurucu zırhlama maddesi içinden geçişi, kalınlığın fonksiyonu olarak eksponansiyel olarak azaldığı dikkate alınmıştır:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

burada, I_0 : gelen foton şiddeti, x : soğurucu kalınlığı ve μ : lineer zayıflatma katsayısı olup içerisinden geçtiği maddeye ve radyasyon enerjisine bağlıdır.

Lineer zayıflatma katsayısının malzeme yoğunluğuna (ρ) oranı olarak ifade edilen kütle zayıflatma katsayısı ile hazırlanan seramik malzemeler birbiri ile karşılaştırılmıştır.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.2)$$

YDK, gelen radyasyonu yarı değerine düşürebilen malzeme kalınlığı olarak ifade edilmektedir. Bu bağlamda, her bir malzemenin YDK değeri malzemenin içeriğine, üretim şekline ve özelliklerine bağlı olarak farklı olabilmektedir. YDK ile birlikte

çalışılan malzemelerin onda-bir değer kalınlıkları (ODK) da ayrıca hesaplanmıştır. ODK değerleri, genellikle radyasyon kaynağının zırhlanmış olarak kabul edilebilmesi için gerekli olan en düşük kalınlık olarak kabul edilebilmektedir.

Çalışılan kompozit malzemelerin YDK ve ODK değerleri malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarına bağlı olarak;

$$YDK = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3.3)$$

ve

$$ODK = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (3.4)$$

ifadelerinden elde edilebilmektedir.

3.5 Seramik Matrisli Materyallerin Partikül Boyutu Dağılımının İncelenmesi

Seramik matrisli materyalleri hazırlamada kullanılan hammaddelerin partikül boyutu dağılımı, Bettersize Marka BT-9300H Model lazer partikül boyutu analizörü kullanılarak saptanmıştır. Cihazın %1 doğruluk sınırı ile saptayabildiği partikül boyutu aralığı 0.1-340 µm'dır. Hammaddelerin partikül dağılımları, Mie teorisi ve veri işleme modu kullanarak saptanmıştır. Herbir materyalin partikül dağılımları Ekler Bölümü'nde Şekil A.1-Şekil A.7 olarak verilmiştir.



4. DENEY SONUÇLARI

Zeolit, bentonit ve galen minerallerinin farklı oranlarını içeren seramik ve seramik matrisli kompozit zırh malzemelerinin, ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{88}Y nokta gama kaynakları kullanılarak gama radyasyonu karşısındaki davranışları incelenerek elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

4.1 Zeolit Matrisli Seramiklerin Sonuçları

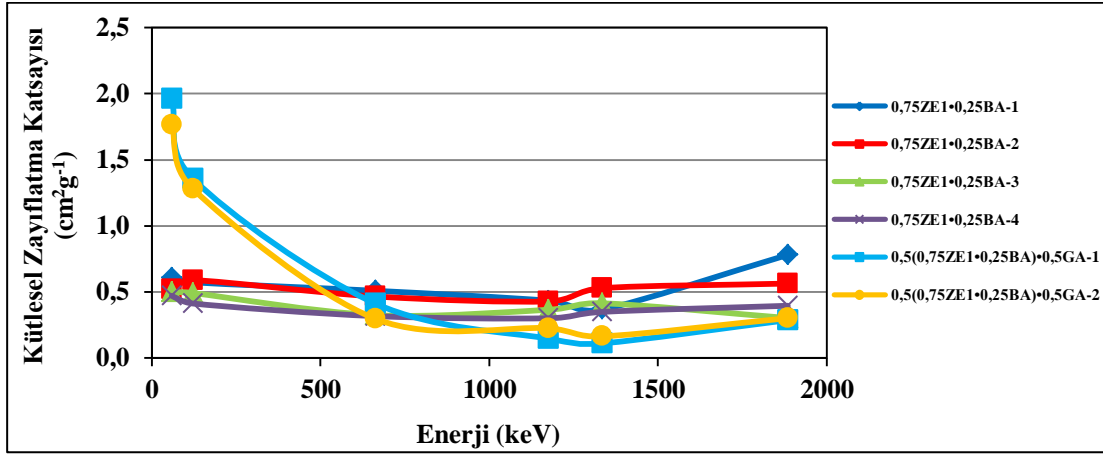
0,75ZE₁-0,25BA oranında olacak şekilde dört farklı kalınlıkta hazırlanan seramikler ile 0,5(0,75ZE₁-0,25BA)-0,5GA oranında olacak şekilde iki farklı kalınlıkta hazırlanan seramiklerin farklı enerjilerde gama kaynaklarının kullanarak hesaplanan lineer ve kütleli zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri Şekil 4.1-4.3’de ve Çizelge A.1-A.6’de verilmiştir.

Farklı kalınlıklarda hazırlanan 0,75ZE₁-0,25BA bileşimli zeolit matrisli seramiklerde, malzeme kalınlığının artması ile kütleli zayıflatma katsayısının düşük enerjili gamalar için düştüğü görülmüştür (Şekil 4.1).

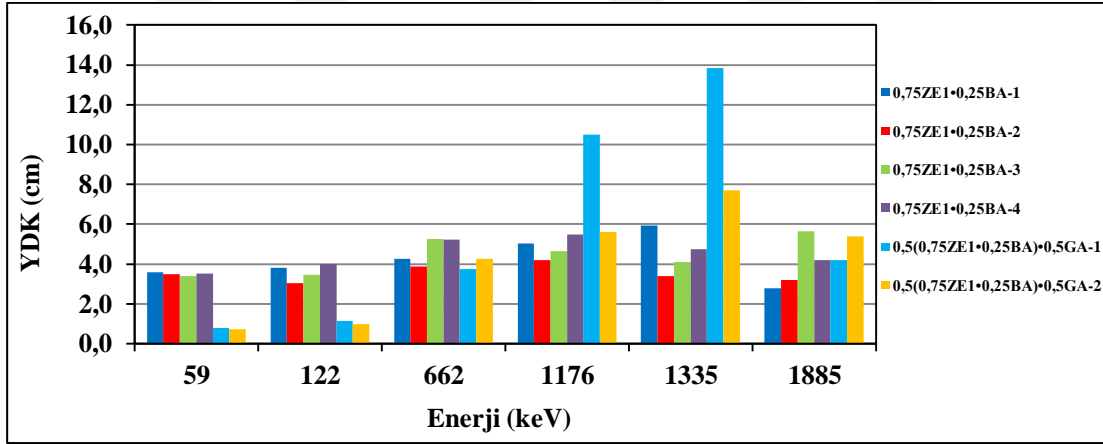
1333 keV ve üzerinde ise, malzeme kalınlığının artması ile kütleli zayıflatma katsayısı arasında bir bağıntı görülmemektedir. Gamaların zırhlama malzemesi içinden geçerken şiddetleri gama enerjisinin artması ile %48’den %24’e kadar azalmaktadır. Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları, gama enerjisinin artması ile artmaktadır (Şekil 4.2-4.3).

0,5(0,75ZE₁-0,25BA)-0,5GA bileşiminde olacak şekilde iki farklı kalınlıkta hazırlanan seramiklerin, düşük enerjili gamaların zırhlama malzemesi içinden geçerken şiddetlerindeki azalma %86-91 arasında olurken, 662 keV’den sonra gamaların şiddetlerinde %9-30 dolaylarında bir azalma olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.1).

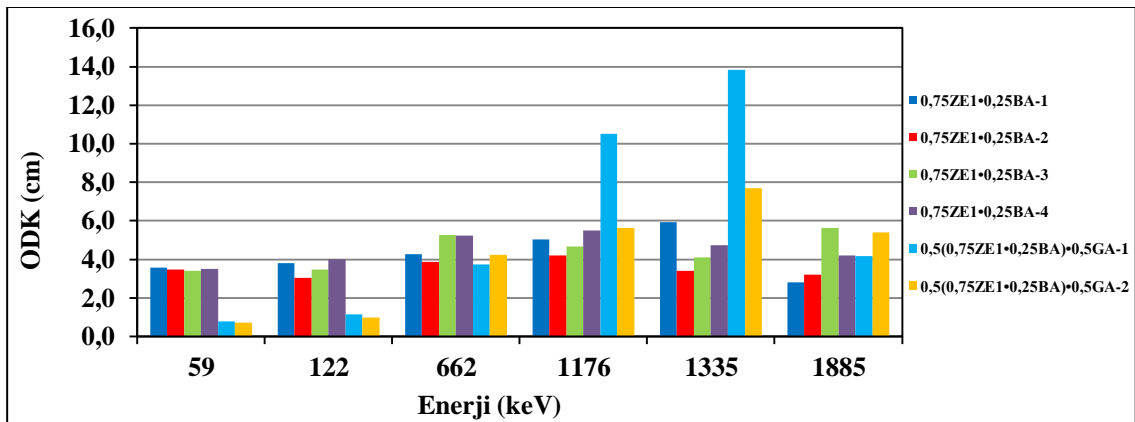
Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları ise, gama enerjisinin artması ile azalmaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1: Farklı kalınlıklardaki $0,75ZE_1 \cdot 0,25BA$ ve $0,5(0,75ZE_1 \cdot 0,25BA) \cdot 0,5GA$ seramiklerinin kütleli zayıflama katsayıları.



Şekil 4.2: Farklı kalınlıklardaki $0,75ZE_1 \cdot 0,25BA$ ve $0,5(0,75ZE_1 \cdot 0,25BA) \cdot 0,5GA$ seramiklerinin YDK değerleri.



Şekil 4.3: Farklı kalınlıklardaki $0,75ZE_1 \cdot 0,25BA$ ve $0,5(0,75ZE_1 \cdot 0,25BA) \cdot 0,5GA$ seramiklerinin ODK değerleri.

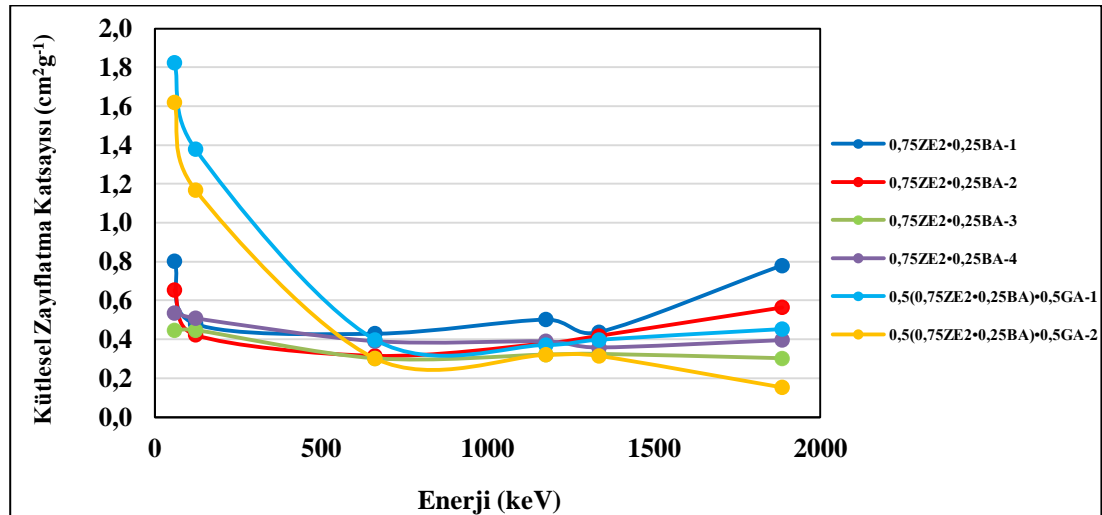
0,75ZE₂·0,25BA oranında olacak şekilde dört farklı kalınlıkta hazırlanan seramikler ile 0,5(0,75ZE₂·0,25BA)·0,5GA oranında olacak şekilde iki farklı kalınlıkta hazırlanan seramiklerin farklı enerjilerde gama kaynaklarının kullanılmasıyla hesaplanan lineer ve kütesel zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri Şekil 4.4-4.6'da ve Çizelge A.1-A.6'de verilmiştir.

Farklı kalınlıklarda hazırlanan 0,75ZE₂·0,25BA bileşimli zeolit matrisli seramiklerde, malzeme kalınlığının artması ile kütesel zayıflatma katsayısının düşük enerjili gamalar için düştüğü görülmüştür (Şekil 4.4). 1335 keV ve üzerinde ise, malzeme kalınlığının artması ile kütle zayıflatma katsayısında bir bağıntı bulunamamıştır.

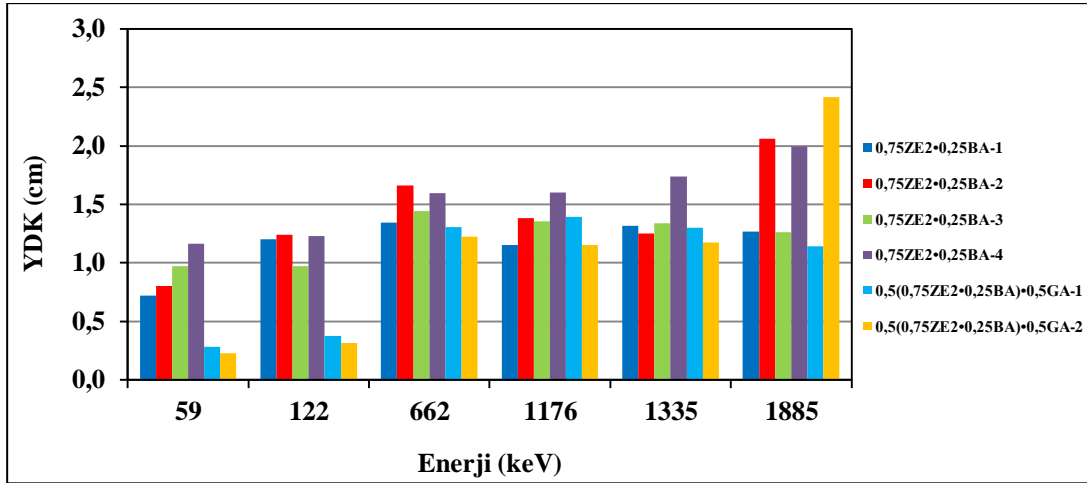
Düşük enerjili gamaların zırhlama malzemesi içinden geçerken şiddetlerindeki azalma %33-45 arasında olurken, yüksek enerjili gamaların şiddetlerinde %29-33 dolaylarında bir azalma olduğu gözlenmiştir. Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları, gama enerjisinin artması ile artmaktadır (Şekil 4.5-4.6) .

0,5(0,75ZE₂·0,25BA)·0,5GA bileşiminde olacak şekilde iki farklı kalınlıkta hazırlanan seramiklerin, düşük enerjili gamaların zırhlama malzemesi içinden geçerken şiddetlerindeki azalma %80-90 arasında olurken, 662 keV'den sonra gamaların şiddetlerinde %17-35 dolaylarında bir azalma olduğu gözlenmiştir.

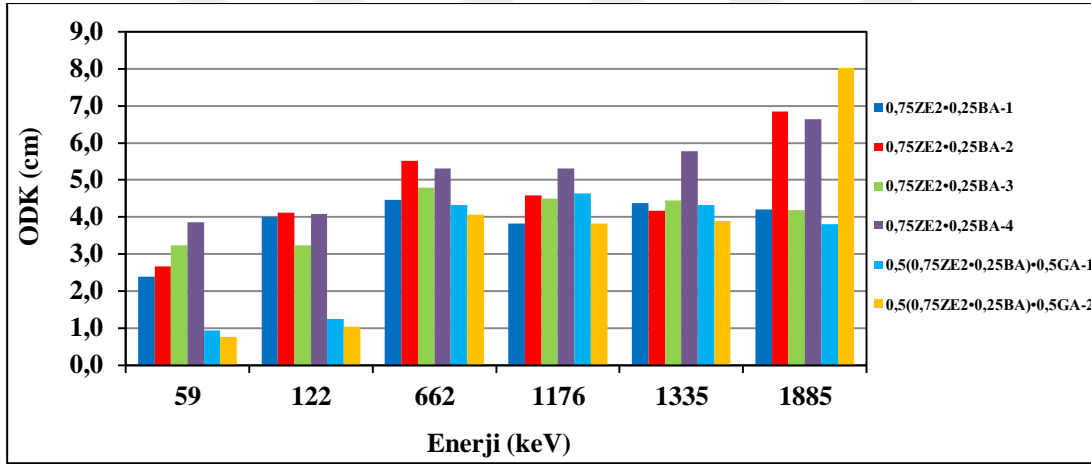
Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları, gama enerjisinin artması ile artmaktadır.



Şekil 4.4: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE₂·0,25BA ve 0,5(0,75ZE₂·0,25BA)·0,5GA seramiklerinin kütesel zayıflatma katsayıları.



Şekil 4.5: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE₂*0,25BA ve 0,5(0,75ZE₂*0,25BA)*0,5GA seramiklerinin YDK değerleri.



Şekil 4.6: Farklı kalınlıklardaki 0,75ZE₂*0,25BA ve 0,5(0,75ZE₂*0,25BA)*0,5GA seramiklerinin ODK değerleri.

4.2 Bentonit Tabanlı Seramiklerin Sonuçları

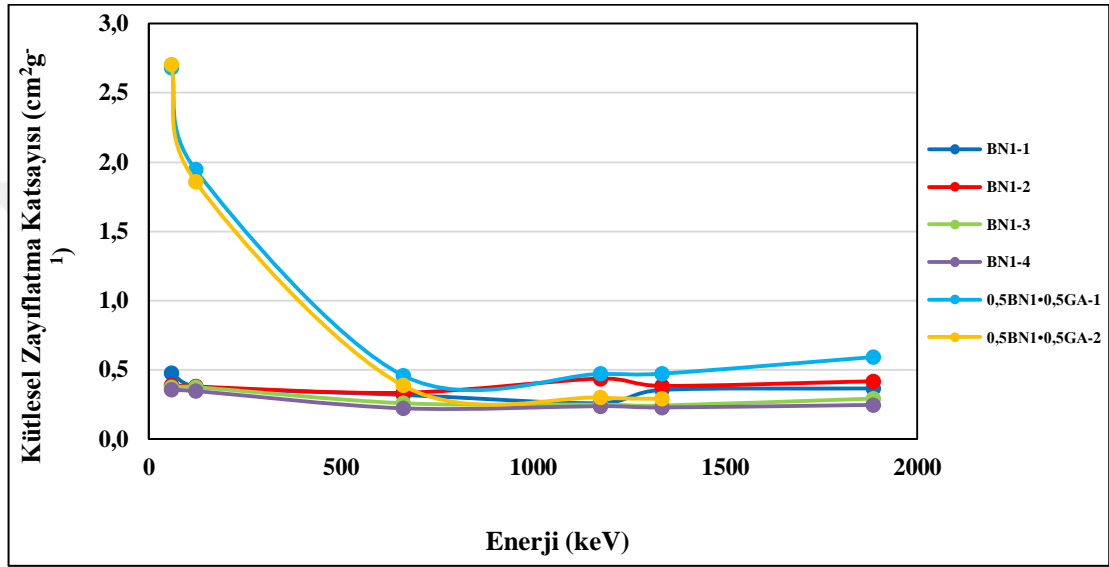
Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN₁ matrisli seramiklerin ve bunların galen minerali ile olan farklı 2 kalınlıktaki (0,5BN₁*0,5GA) bileşimli kompozit matrisli seramiklerinin farklı enerjilerde gama kaynaklarının kullanarak hesaplanan lineer ve kütleli zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri Şekil 4.7-4.9'de ve Çizelge A.1-A.6'de verilmiştir.

BN₁ matrisli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları, zırh malzemesinin kalınlığının artması ile azalmaktadır (Şekil 4.7).

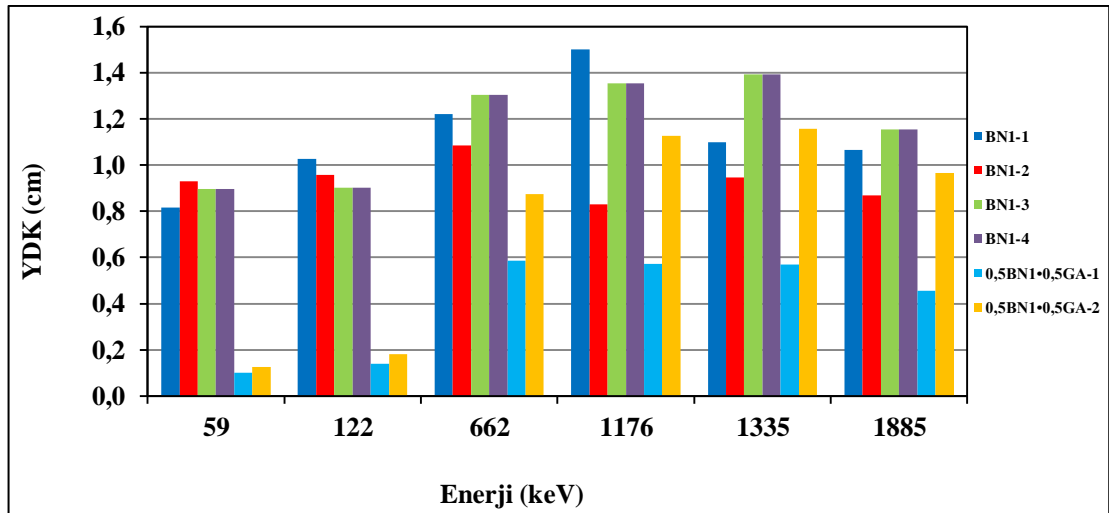
Gamaların enerjilerindeki artış ile gamaların zırlama malzemesi içinden geçen şiddetlerindeki azalma %40'dan %12'ye kadar düşmektedir. Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları, gama enerjisinin artması ile bir miktar artmaktadır (Şekil 4.8-4.9).

(0,5BN₁-0,5GA) bileşimli kompozit matrisli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları, gama fotonunun enerjisinin artmasıyla önemli düzeyde azalmaktadır.

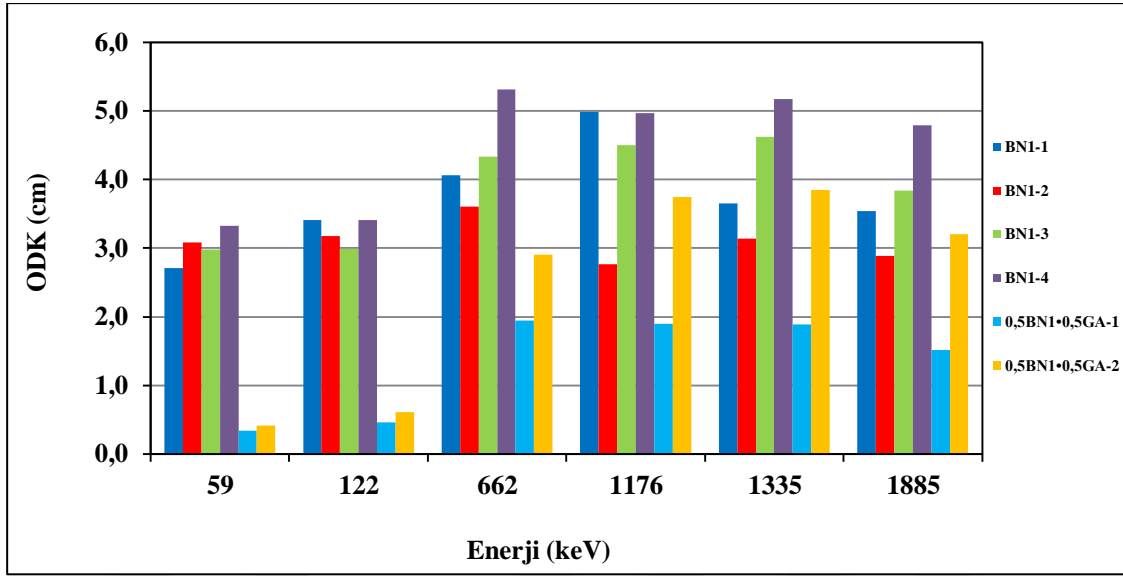
Gamaların enerjilerindeki artış ile gamaların bu zırlama malzemesi içinden geçen şiddetlerindeki azalma %97'den %14'e kadar düşmektedir.



Şekil 4.7: Farklı kalınlıklardaki BN₁ ve (0,5BN₁-0,5GA) bileşimli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.



Şekil 4.8: Farklı kalınlıklardaki BN₁ ve (0,5BN₁-0,5GA) seramiklerin YDK değerleri.



Şekil 4.9: Farklı kalınlıklardaki BN₁ ve (0,5BN₁-0,5GA) bileşimli seramiklerin ODK değerleri.

Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN₂ matrisli seramiklerin ve bunların galen minerali ile olan (0,5BN₂-0,5GA) bileşimli kompozit matrisli seramiklerinin hesaplanan lineer ve kütleli zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri Şekil 4.10-4.12’de ve Çizelge A.1-A.6’de verilmiştir.

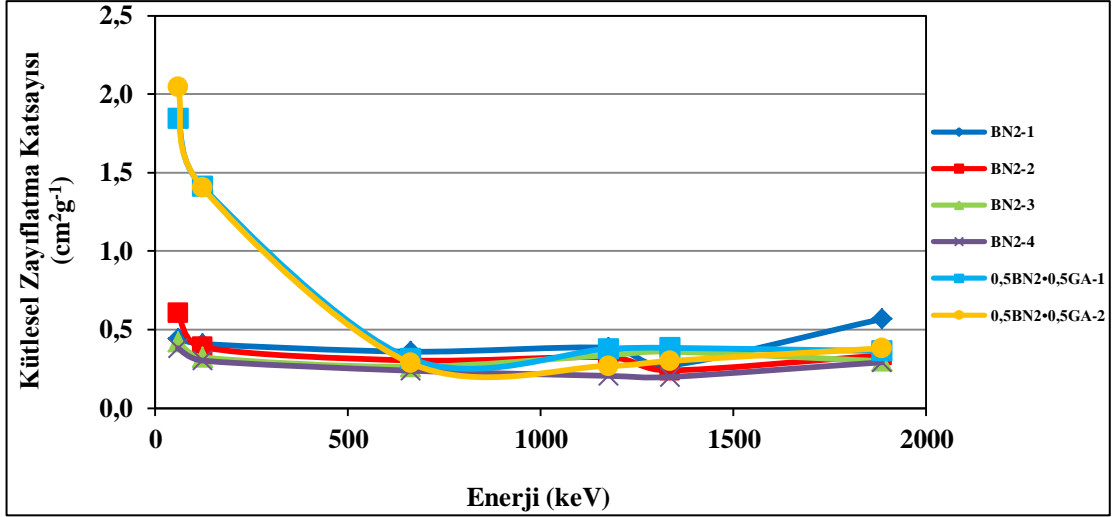
BN₂ matrisli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları, genel olarak zırh malzemesinin kalınlığının artması ile azalmaktadır (Şekil 4.10).

Gamaların enerjilerinin artışı ile gamaların zırhlama malzemesi içinden geçerken şiddetlerindeki azalma %45’den %11’e kadar düşmektedir. Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları, gama enerjisinin artması ile bir miktar artmaktadır (Şekil 4.11-4.12).

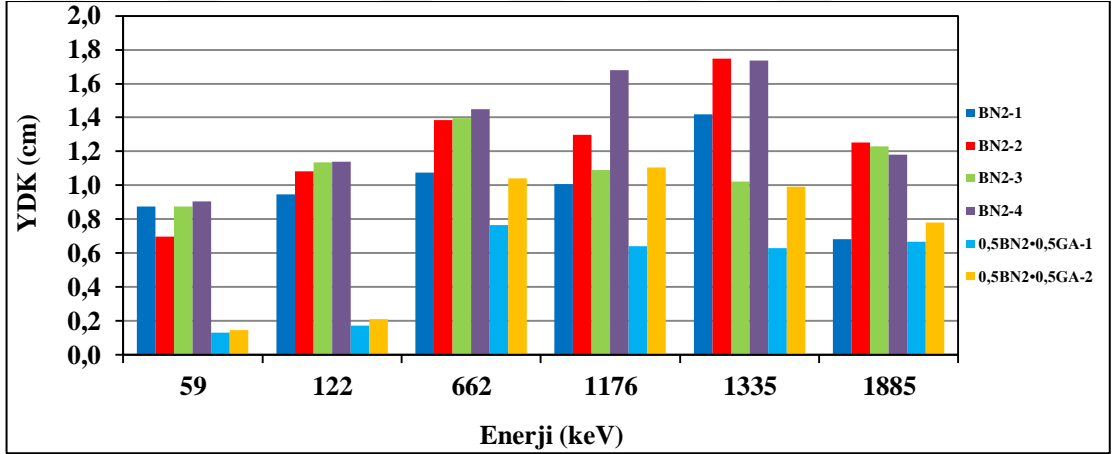
BN₂ matrisli seramikler, düşük gama enerjilerinde en yüksek performansı göstermektedirler.

(0,5BN₂-0,5GA) bileşimli kompozit matrisli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları, gama fotonunun enerjisinin artmasıyla önemli düzeyde azalmaktadır.

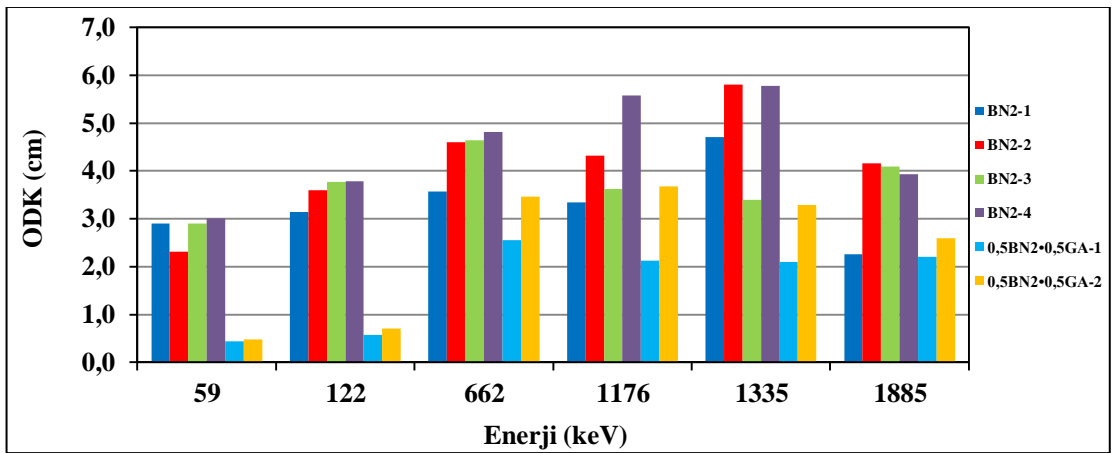
Gamaların enerjilerindeki artış ile gamaların bu zırhlama malzemesi içinden geçerken şiddetlerindeki azalma %95’den %11’e kadar düşmektedir.



Şekil 4.10: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN₂ ve (0,5BN₂•0,5GA) bileşimli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.



Şekil 4.11: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN₂ ve (0,5BN₂•0,5GA) bileşimli seramiklerin YDK değerleri.



Şekil 4.12: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN₂ ve (0,5BN₂•0,5GA) bileşimli seramiklerin ODK değerleri.

Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN_3 matrisli seramiklerin ve bunların galen minerali ile olan ($0,5\text{BN}_3 \cdot 0,5\text{GA}$) bileşimli kompozit matrisli seramiklerinin hesaplanan lineer ve kütleli zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri Şekil 4.13-4.15’de ve Çizelge A.1-A.6’de verilmiştir.

Kütleli zayıflatma katsayıları incelendiğinde, BN_3 matrisli seramiklerin zırh malzemesinin kalınlığının artması ile azalmaktadır (Şekil 4.13).

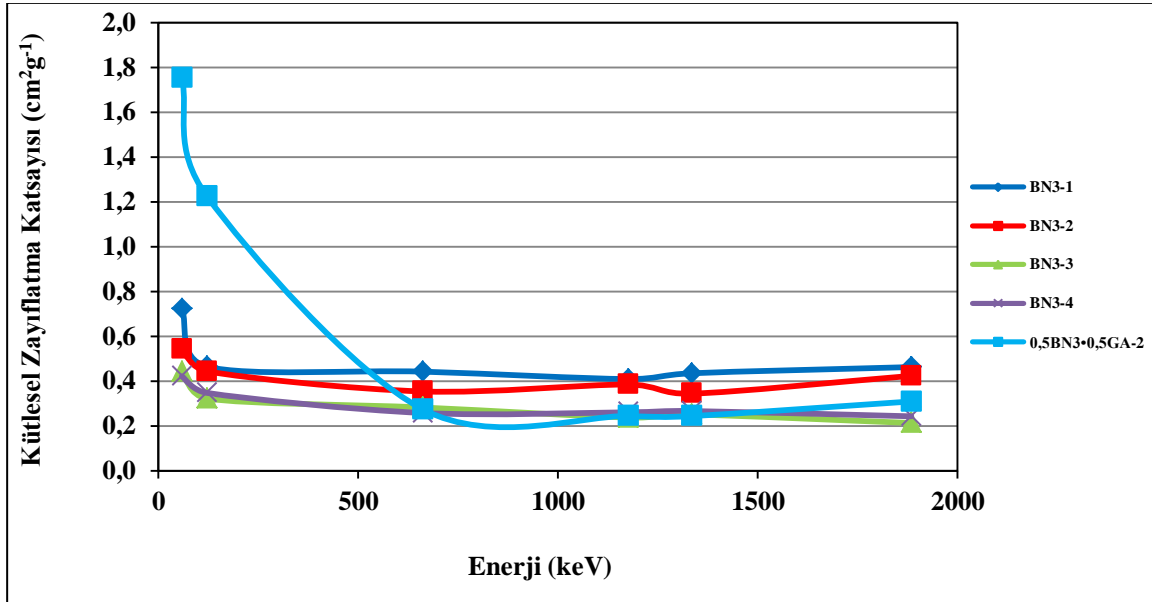
Malzemedan geçen gamaların enerjisinin artışı ile şiddetlerindeki azalma %47’den %12’ye kadar düşmektedir.

Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları, gama enerjisinin artması ile bir miktar artmaktadır (Şekil 4.14-4.15).

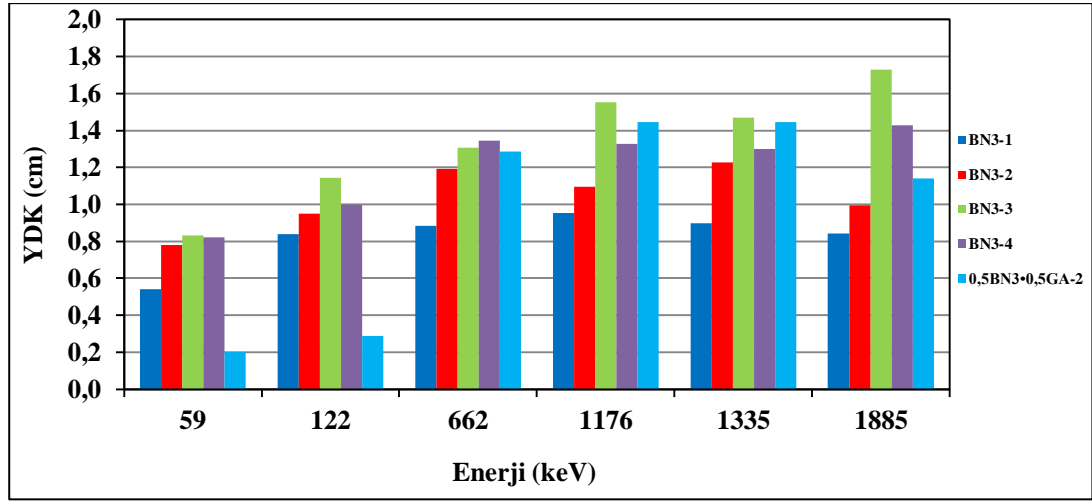
Galen içereklili numunelerde galende bulunan yüksek miktardaki Kurşun atom numarası ve yoğunluk yüksekliğinden zayıflatma performansını artırmakta en önemli etkidir.

($0,5\text{BN}_3 \cdot 0,5\text{GA}$) bileşimli kompozit matrisli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları, gama fotonunun enerjisinin artmasıyla önemli düzeyde azalmaktadır.

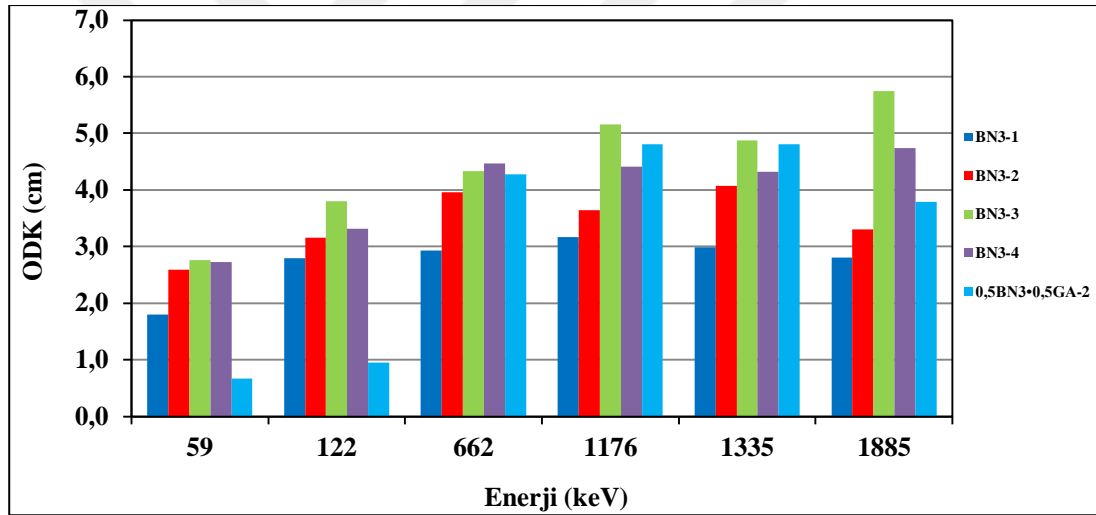
Gamaların enerjilerindeki artış ile gamaların bu zırhlama malzemesi içinden geçerken şiddetlerindeki azalma %92’den %2’ye kadar düşmektedir.



Şekil 4.13: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN_3 ve ($0,5\text{BN}_3 \cdot 0,5\text{GA}$) bileşimli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.



Şekil 4.14: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN_3 ve $(0,5BN_3 \cdot 0,5GA)$ bileşimli seramiklerin YDK değerleri.



Şekil 4.15: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN_3 ve $(0,5BN_3 \cdot 0,5GA)$ bileşimli seramiklerin ODK değerleri.

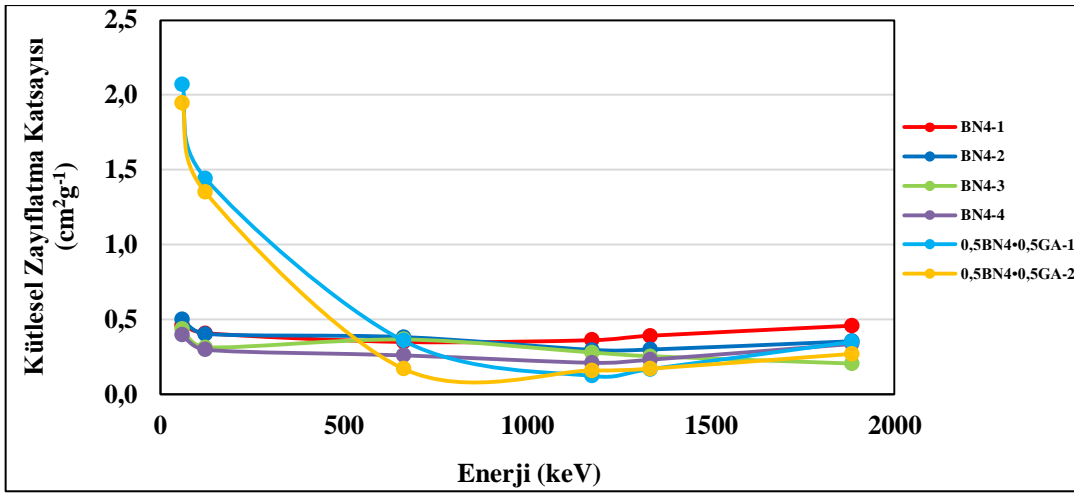
Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN_4 matrisli seramiklerin ve bunların galen minerali ile olan $(0,5BN_4 \cdot 0,5GA)$ bileşimli kompozit matrisli seramiklerinin hesaplanan lineer ve kütleli zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri Şekil 4.16-4.18'de ve Çizelge A.1-A.6'de verilmiştir.

Kütleli zayıflatma katsayıları incelendiğinde, BN_4 matrisli seramiklerin zırh malzemesinin kalınlığının artması ile genelde azalmaktadır (Şekil 4.16). Bazı gama enerjilerinde kütleli zayıflatma katsayılarında gözlenen dalgalanmalar malzemenin yapısının homojen olmadığını ve malzeme içinde boşluklar kalmış olabileceğini

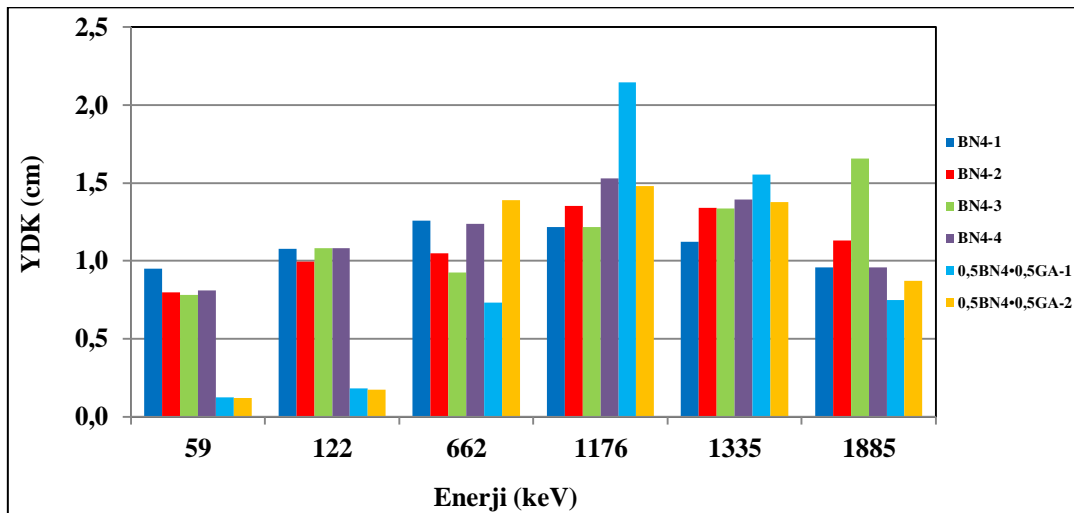
düşündürmektedir. Malzemeden geçen gamaların enerjisinin artışı ile şiddetlerindeki azalma %46'dan %10'a kadar düşmektedir. Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları, gama enerjisinin artması ile bir miktar artmaktadır (Şekil 4.17-4.18).

(0,5BN₄-0,5GA) bileşimli kompozit matrisli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları, gama fotonunun enerjisinin artmasıyla azalma eğilimindedir. Ancak, kütleli zayıflatma katsayılarında, malzeme yapısına bağlı olduğunu düşündürdiren dalgalanmalar görülmektedir.

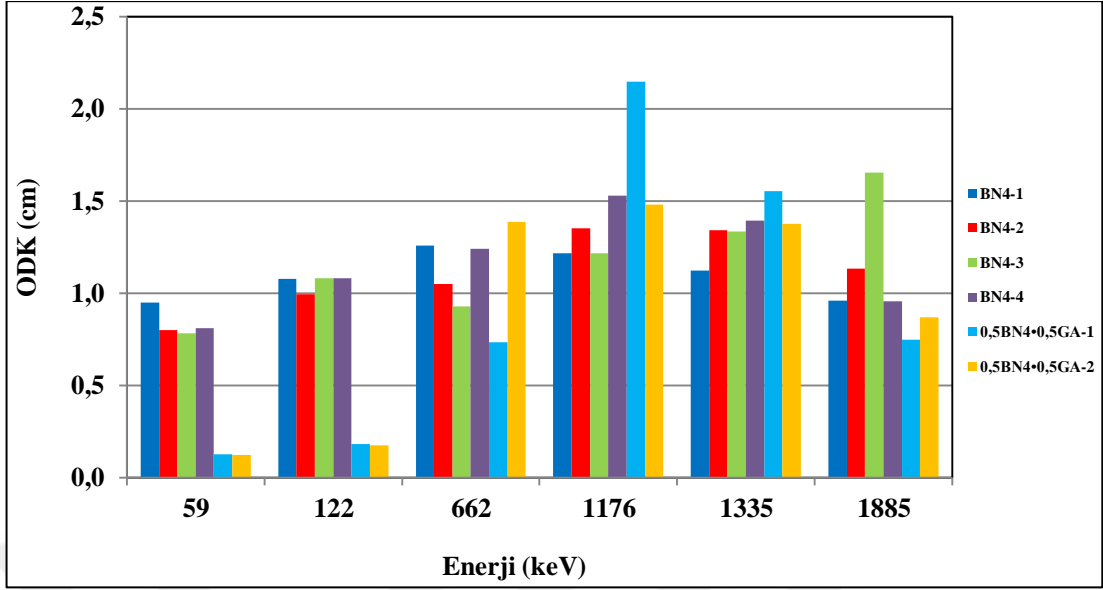
Gamaların enerjilerindeki artış ile gamaların bu zırhlama malzemesi içinden geçerken şiddetlerindeki azalma %95'den %2'ye kadar düşmektedir.



Şekil 4.16: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN₄ ve (0,5BN₄-0,5GA) bileşimli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları.



Şekil 4.17: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN₄ ve (0,5BN₄-0,5GA) bileşimli seramiklerin YDK değerleri.



Şekil 4.18: Farklı kalınlıklarda hazırlanmış BN_4 ve $(0,5BN_4+0,5GA)$ bileşimli seramiklerin ODK değerleri.

4.3 Galen Matrisli Seramiklerin Sonuçları

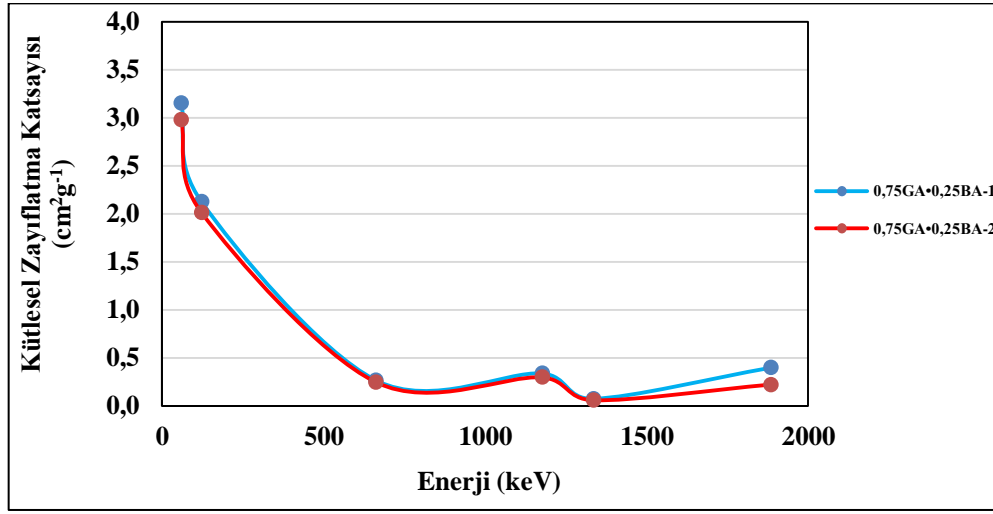
Galen minerali kullanılarak hazırlanmış farklı iki kalınlıktaki $0,75GA \cdot 0,25BA$ seramiklerinin hesaplanan lineer ve kütleli zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri Şekil 4.19-4.21’de ve Çizelge A.1-A.6’de gösterilmiştir.

Galen matrisli seramiklerin kütleli zayıflatma katsayıları incelendiğinde, zırh malzemesinin kalınlığının artması ile genelde azalma eğilimindedir (Şekil 4.19).

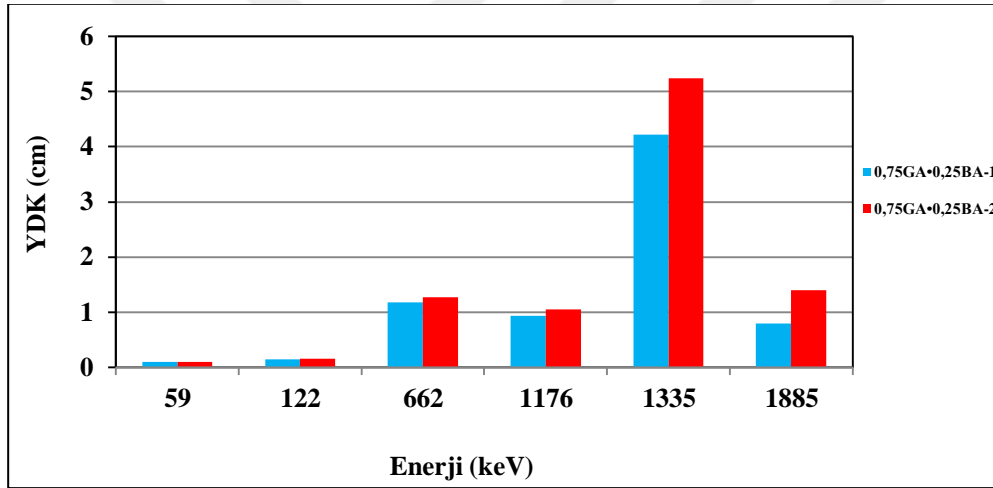
Bazı gama enerjilerinde kütleli zayıflatma katsayılarında gözlenen dalgalanmalar malzemenin yapısının homojen olmadığını ve malzeme içinde boşluklar kalmış olabileceğini düşündürmektedir. Malzemedeki geçen gamaların enerjisinin artışı ile şiddetlerindeki azalma %98’den %8’e kadar düşmektedir.

Galen içeren numunelerde galende bulunan yüksek miktardaki Kurşun atom numarası ve yoğunluk yüksekliğinden zayıflatma performansını artırmakta en önemli etkidir.

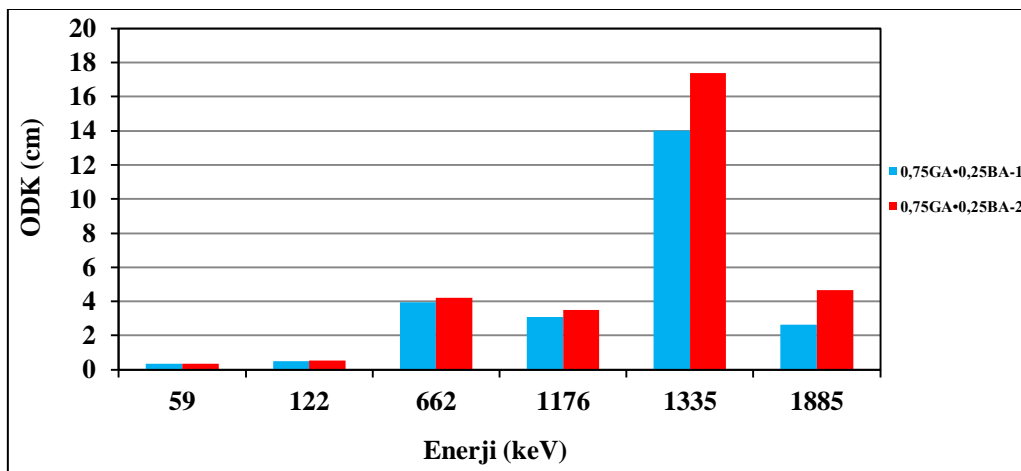
Yarı değer ve onda bir değer kalınlıkları, gama enerjisinin artması ile bir miktar artmaktadır (Şekil 4.20-4.21).



Şekil 4.19: Galen matrisli seramiklerin kütleli zayıflama katsayıları.



Şekil 4.20: Galen matrisli seramiklerin YDK değerleri.



Şekil 4.21: Galen matrisli seramiklerin ODK değerleri.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, farklı matrislerdeki seramik malzemelerin gama radyasyonu karşısında davranışları transmisyon tekniği kullanılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Zırhlama materyali olarak, farklı bileşimlerde zeolit, bentonit ve galen minerallerini içeren seramik matrisli malzemeler kullanılmış ve gama radyasyonunu soğurma özellikleri incelenmiştir. Gama radyasyonu olarak gama farklı enerjilerine sahip ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{88}Y nokta kaynakları kullanılmıştır.

Hazırlanan seramik matrislerinin herbirinin etkin porozite değerlerinin %1'den düşük olduğu saptanmıştır. Etkin porozite değerinin seramik matrisli zırhlama materyallerinin zırhlama özellikleri üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, farklı enerjiye sahip gama nokta kaynakları kullanılmış olsa da, madde ile etkileşimleri benzer olduğundan aynı mineral grupları için zayıflatma katsayılarının genel değişimleri benzerlik göstermektedir.

Yarı-değer kalınlığının (YDK), malzemelerin zırhlama özelliğini betimleyen önemli bir parametre olduğundan, malzemelerin radyasyon zırhlama etkinliğinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması için deneylerde göz önüne alınmıştır. Hazırlanan tüm seramik materyaller için YDK değeri, 59 keV'lik düşük enerjili gamalar için 0,1-1,2 cm aralığındadır. 662 keV ve üzerinde bu değer, galen minerali matrisli seramikler dışında 1-2 cm aralığındadır.

Elde edilen sonuçlar, farklı çalışmalarda geliştirilen zırhlama malzemeleri ile karşılaştırılarak Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Gama ışınları karşısındaki zırhlama davranışları incelenen zeolit, bentonit ve galen minerali matrisli seramik malzemeler için deneysel olarak elde edilen sonuçlar, XCOM bilgisayar programı ile elde edilen teorik sonuçlarla da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1:Elde edilen sonuçların farklı zırhlama malzemeleri ile karşılaştırılması.

Zırh Malzemesi	$\mu_{m(662 \text{ keV})}$ $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$	$\mu_{m(1173 \text{ keV})}$ $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$	$\mu_{m(1333 \text{ keV})}$ $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$	YDK _(662 keV) cm	YDK _(1176 keV) cm	YDK _(1332 keV) cm	Referans
Beton	0,08	-	0,06	-	-	-	Sharifi 2013
Beton	0,10	-	-	0,067	-	-	Akkurt 2010
45Beton:45Kurşun	0,08	-	0,06	3,40	-	4,40	Rezaei Ochbelagh 2012
Barit	0,08	-	0,05	-	-	-	Sharifi 2013
Barit-beton	0,09	-	0,05	-	-	-	Akkurt 2010
Barit-beton	0,08	0,65	0,05	2,54	3,50	3,75	Kaur 2015
Serpentin	0,08	-	0,06	-	-	-	Sharifi 2013
Steel magnatitle	0,08	-	0,05	-	-	-	Sharifi 2013
40BaO·20Uçucu kül·B ₂ O ₃	0,08	0,06	0,05	-	-	-	Singh 2008
BaO:SiO ₂	0,08	-	-	2,75	-	-	Kindsiri 2011
BaO:B ₂ O ₃	0,08	-	-	2,25	-	-	Kaewkhao 2010
Bi ₂ O ₃ :SiO ₂	0,09	-	-	1,45	-	-	Kindsiri 2011
Bi ₂ O ₃ :B ₂ O ₃	0,09	-	-	1,50	-	-	Kaewkhao 2010
PbO:SiO ₂	0,09	-	-	1,55	-	-	Kindsiri 2011
55PbO·5BaO·40P ₂ O ₅	0,09	0,06	0,06	1,51	2,37	2,69	Kaur 2015
45PbO·(40,5)B ₂ O ₃ ·0,10Al ₂ O ₃	0,14	-	0,07	0,045	2,00	-	Kaur2014
PbO:B ₂ O ₃	0,09	-	-	2,50	-	-	Kaewkhao 2010
(Pb _{0,9} ·Ba _{0,1})·ZnO ₃	0,08	0,08	0,06	-	-	-	Vejdani-Noghreiyen 2016
(Pb _{0,9} ·Ba _{0,1})·FeO ₃	0,08	0,06	0,05	-	-	-	Vejdani-Noghreiyen 2016
(Pb _{0,9} ·Ba _{0,1})·MgO ₃	0,07	0,05	0,05	-	-	-	Vejdani-Noghreiyen 2016
(Pb _{0,9} ·Ba _{0,1})·CuO ₃	0,09	0,06	0,048	-	-	-	Vejdani-Noghreiyen 2016
(Pb _{0,9} ·Ba _{0,1})·MnO ₃	0,08	0,05	0,047	-	-	-	Vejdani-Noghreiyen 2016
Pür Kurşun	0,1	-	0,056	-	-	-	Belgin-Ayçık, 2017
Polimer (PES)-ilmenit	0,21	0,17	0,12	-	-	-	Belgin-Ayçık, 2017
ZE ₁ ·0,25BA	0,41	0,30	0,35	1,57	1,66	1,43	Bu çalışma
(ZE ₁ ·GA)·0,25BA	0,42	0,23	0,17	1,13	1,69	2,31	Bu çalışma
ZE ₂ ·BA	0,39	0,39	0,36	1,60	1,60	1,74	Bu çalışma
(ZE ₂ ·GA)·0,25BA	0,40	0,32	0,32	1,22	1,15	1,17	Bu çalışma
BN ₁	0,22	0,24	0,23	1,60	1,50	1,56	Bu çalışma
BN ₁ ·GA	0,39	0,30	0,29	0,87	1,13	1,16	Bu çalışma
BN ₂	0,24	0,21	0,20	1,45	1,68	1,74	Bu çalışma
BN ₂ ·GA	0,29	0,27	0,30	1,04	1,11	0,99	Bu çalışma
BN ₃	0,26	0,26	0,27	1,34	1,33	1,30	Bu çalışma
(BN ₃ ·GA)·0,25BA	0,28	0,25	0,25	1,29	1,45	1,45	Bu çalışma
BN ₄	0,26	0,16	0,17	1,24	1,48	1,38	Bu çalışma
(BN ₄ ·GA)·0,25BA	0,17	0,16	0,17	1,38	1,48	1,38	Bu çalışma
GA·BA	0,25	0,30	0,06	1,27	1,05	5,24	Bu çalışma

Ancak, doğal minerallerin kimyasal bileşimindeki safsızlıkların çok fazla olması ve molekül yapılarının çok büyük olması, XCOM programı kullanılarak yapılan teorik hesaplamalar ile deneysel olarak elde edilen zayıflatma katsayıları arasında büyük farklar oluşturmaktadır. Bu çalışmada, deneysel olarak bulunan sonuçlar ile XCOM programı kullanılarak bulunan sonuçlar arasında yaklaşık 2,5 kat gibi bir fark bulunduğundan sonuçlar verilmemiştir.

Gama kaynağının enerjisindeki artış farklı etkileşim mekanizmalarından dolayı zırhlama malzemesinin atom numarasına bağımlılığını azaltır. Bu fenomen yüzünden düşük enerjilerde zayıflatma performansları enerji artışıyla azalmaktadır. Orta düzey gama enerjilerinde, zayıflatma performansı enerji artışıyla azalmaktadır. Yüksek enerjilerde enerji artışıyla zayıflatma performanslarındaki artış önemsizdir bu da çift oluşumunun artışının yanında birden fazla gerçekleşen Compton saçılmasıyla ilgilidir.

Seramik matrisli zırhlama malzemelerinin yoğunluğunun artışı, düşük enerjilerde zayıflatma performansını artırmıştır, ama enerji arttıkça yoğunluk etkisi zayıflatma performansını etkilememiştir.

Galen içereken numunelerde galende bulunan yüksek miktardaki Kurşun atom numarası ve yoğunluk yüksekliğinden zayıflatma performansını artırmakta en önemli etkidir.

Gözlemlenen kütleli zayıflatma katsayıları literatürde yapılan çalışmalardan yeterince yüksek olduğu saptanmıştır. Ayrıca, çalışılan seramik malzemeler kurşun zırhlama malzemesi ile karşılaştırıldığında; toksik olmaması, kolay şekil verilebilmesi, hammaddelerinin kolay temin edilebildiği, üstün zayıflatma katsayısına sahip malzemeler olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada zeolit, bentonit ve galen matrisli seramik malzemelerin farklı enerjilerdeki iyonize radyasyon karşısındaki zırhlama özellikleri ve performansları incelemek için kütleli zayıflatma katsayıları, YDK ve ODK değerleri tayin edilmiş ve herbir seramik grubu birbiri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Bu minerallerin herbirinin kendi aralarında farklı oranlardaki karışımları da ileride yapılacak çalışmalarda incelenebilir ve zırhlama performansları açısından farklı malzemeler geliştirilebilir.

Ayrıca, hazırlanan bu seramik malzemeler, nükleer endüstride ileri teknolojiler gerektiren atık yönetimi yönetimi gibi farklı alanlarında da hazırlanan bu doğal içerikli seramikler bariyer malzemesi olarak kullanım alanı bulabilirler.



KAYNAKLAR

- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavic, B., Kilincarslan, S., Basyigit, C.** (2010). Radiation shielding of concrete containing zeolite, *Radiation measurement* 45, 827-830.
- Ames, L.L.Jr.** (1961). Cation sieve properties of the open zeolites chabazite, mordenite, erionite and clinoptilolite, *American Mineral* 46, 1120-1131,
- Anthony, J.W., Bideaux, R.A., Bladh, K.W., Nichols, M.C.** (2003). *Handbook of Mineralogy*, Mineralogical Society of America, Chantilly, VA 20151-1110, USA.
- Bekkum, H. Van, Flanigen E.M., Jacobs P.A., Jansen J.C.** (2001). *Introduction to Zeolite Science and Practice*, Elsevier Science.
- Belgin.,E., Ayçık.,A.,** 2017. Effect of particle size of mineral fillers on polymer-matrix composite shielding materials against ionizing electromagnetic radiation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 311, 1953.
- Bergaya, F., Lagaly, G.** (2013). *Handbook of clay minerals (Edition 2)*, Elsevier.
- Bourmans, P.** (2004). *Ceramics are more than clay alone*. Cambridge International Science Publishing.
- Breck, D.W.** (1975). *Synthetic zeolites: Properties and applications, industrial minerals and rocks*, A.I.M.E., 1243–1257, New York.
- Cattant F., Crussett D., Feron D.,** (2008) Corrosion issues in nuclear industry today, *Mater. Today*, 11(10), 32–37.
- Cherenkov, P.A.** (1934). Visible emission of clean liquids by action of γ radiation, *Doklady Akademii Nauk SSSR* 2: 451. Reprinted in *Selected Papers of Soviet Physicists*, *Usp. Fiz. Nauk* 93 (1967) 385. V sbornike: Pavel Alekseyevich Čerenkov: Chelovek i Otkrytie pod redaktsiej A. N. Gorbunova i E. P. Čerenkovej, M., "Nauka, 1999, s. 149-153.
- Choppin, G., Liljenzin, J., Rydberg, J., Ekbart C.,** (2013). *Radiochemistry and nuclear chemistry*. Elsevier. Radiation effects on matter. 219-237.
- Das, A., Ferbel, T.** (2003). *Introduction to Nuclear and Particle Physics*. World Scientific Publishing, 2nd Ed, ISBN 981-238-744-7, Singapore.
- Eisenbud M.,** (1987) *Environmental Radioactivity: From Natural, Industrial, and Military Sources*, San Diego: Academic Press.
- El-Kamash, A.M., El-Naggar, M.R., El-Dessouky, M.I.** (2006). Immobilization of cesium and strontium radionuclides in zeolite-cement blends, *Journal of Hazardous Materials*, B136, 310–316.

- Galambos, M., Paucova, V., Kufcakova, J., Roskopfova, O., Rajec, P., Adamcova, R.** (2010). Cesium Sorption on bentonites and Montmorillonite K10, *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 284, 55–64.
- Galambos, M., Dano, M., Roskopfova, O., Sersen, F., Kufcakova, J., Adamcova, R., Rajec, P.,** (2012). Effect of gamma-irradiation on adsorption properties of Slovak bentonites, 292, 481–492.
- Grim, R.E., Guven, N.** (1978). *Bentonites, Volume 24: Geology, mineralogy, properties and uses (Developments in Sedimentology)*. Elsevier.
- Gorbotenko M., Yuferev Y.,** (2002) Ceramicrete as a means for radioactive waste containment and nuclear shielding, Report by All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Russian Federation, Sarov, Argonne National Laboratory.
- Gottardi, G., Galli, E.** (1985). *Natural zeolites*, Springer, Berlin.
- Gwaily, S.E.** (2002). Galena/(NR+SBR) rubber composites as gamma radiation shields. *Polymer testing*. 21, 883-887.
- Hadad, K., Majidi, H., Sarshough, S.** (2015). Enhanced Radiation Shielding with Galena Concrete. *Nuclear Technology & Radiation Protection*. 30, 1, 70-74.
- Halzen, F., Martin, A.** (1984). *Quarks & Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*. John Wiley & Sons. ISBN 0-471-88741-2.
- Ipbüker C., Nulk H., Gulik V., Biland A., Tkaczyk A.H.,** (2015) Radiation shielding properties of a novel cement–basalt mixture for nuclear energy applications, *Nuclear Engineering and Design*, 284, 27–37.
- Jevromovic, T.** (2009). *Nuclear Principles in Engineering*. Springer.
- Kaewkhao, J., Pokaipisit, A., Limsuwan, P.,** (2010). Study on Borate Glass System Containing with Bi₂O₃ and BaO for Gamma-rays Shielding Materials: Comparison with PbO. *Journal of Nuclear Materials* 399, 38-40.
- Kaur, K., Singh, K.J., Anand, V.,** (2015). Correlation of Gamma Ray Shielding and Structural Properties of PbO-BaO-P₂O₅ Glass System. *Nuclear Engineering and Design* 285, 31-38.
- Kaur, S., Singh, K.J.,** (2014). Investigation of Lead Borate Glasses Doped with Aluminum Oxide as Gamma Ray Shielding Materials. *Annals of Nuclear Energy* 63, 350-354.
- Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., Chanthima, N., Limsuwan, P.,** (2011). Comparative Study of Silicates Glasses Containing Bi₂O₃, PbO and BaO: Radiation Shielding and Optical Properties. *Annals of Nuclear Energy* 38, 1438-1441.
- Knoll, G.F.** (2002). *Radiation Detection and Measurement*. University of Michigan.
- Lagaly, G.** (1986). Colloids, In *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, A7, 341–367, Germany.

- L'Annunziata, M.F.** (2003). Handbook of Radioactivity Analysis. Elsevier Science, 2nd Ed, ABD.
- Lima, E., Ibarra, I.A., Lara, V., Bosch, P., Bulbulian, S.** (2008). Cesium leaching from irradiated CsA and CsX zeolites, Journal of Hazardous Materials. 160, 614–620.
- Mortazavi, S.M.J., Mosleh-Shirazi, M.A., Baradaran-Ghahfarokhi, M.** (2010). Production of a datolite-based heavy concrete for shielding nuclear reactors and megavoltage radiotherapy rooms. Iran. Journal Radiaion. Res., 5 (37).
- Narottam, P.B.** (2005). Handbook of Ceramic Composites. Kluwer academic publisher. E-book (2, 7-19). London.
- Odette G.R., Lucas G.E.,** (2001) Embrittlement of nuclear reactor pressure vessels, JOM 53 (7), 18–22.
- Özalpan A.,** (1980) Radyobiyoloji, İstanbul Üniversitesi yayımları, No: 152, Fen Fakültesi Basımevi.
- Pampuch, R.** (2013). An introduction to ceramics. Springer
- Pusch, R.** (2002). The Buffer and Backfill Handbook, Part 1, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management AB, Technical Report, Stockholm, Sweden.
- Pusch, R.** (2015). Bentonite Clay: Environmental Properties and Applications. CRC Press (Vol.3, pp.16-47)
- Powsner, R.A., Powsner, E.R.** (2006). Essential Nuclear Medicine Physics. Blackwell Publishing, 2nd Ed, ISBN 1-4051-0484-8, Massachusetts.
- Rezaei-Ochbelagh, D., Azimkhani, S.,** (2012). Investigation of Gama-ray Shielding Properties of Concrete Containing Different Percentages of Lead. Applied Radiation and Isotopes 70, 2282-2286.
- Seliman, A.F., Lasheen, Y.F., Youssief, M.A.E., Abo-Aly, M.M., Shehata, F.A.** (2014). Removal of some radionuclides from contaminated solution using natural clay: Bentonite. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 300(3), 969–979.
- Scott, M.A., Kathleen, A.C., Prabir, K.D.** (2003). Handbook of Zeolite Science and Technology. CRC Press (Vol.5, pp.22-36).
- Sharifi, S., Bagheri, R., Shirmardi, S.P.,** (2013). Comparison of Shielding Properties for Ordinary, Barite, Serpentine, and Steel-magnetite concretes Using MNCP-4C Code and Available Experimental Results. Annals of Nuclear Energy 53, 529-534.
- Singh, S., Kumar, A., Singh, D., Thind, K.S., Mudahar, G.S.,** (2008). Barium-Borate-Flyash Glasses: As Radiation Shielding Materials. Nuclear Instruments and Method in Physics Research B 266, 140-146.
- Singh S., Singh K.,** (2015) Nanocrystalline glass ceramics: Structural, physical and optical properties, Journal of Molecular Structure, 1081 211–216.
- Tabak, A., Afsin, B., Çağlar, B., Koksal, E.** (2007). Characterization and pillaring of a Turkish Bentonite (Reşadiye). Journal of Colloid and Interface Science. Issue 313, pp 5-11.

- Thomas, J.K.** (2004). Physical Aspects of Radiation-Induced Processes on SiO₂, γ -Al₂O₃, Zeolites and Clays. Department of Chemistry and Biochemistry, Nieuwland Science Hall, University of Notre Dame, Notre Dame.
- Türkmen, I., Özdemir, Y., Kurudirek, M., Demir, F., Simsek, Ö.** (2015). Calculation of radiation attenuation coefficients in Portland cements mixed with silica fume, blast furnace slag and natural zeolite, *Annals Nuclear energy*. 85, 1937-1943.
- Wagh A.S., Sayenko S.Y., Dovbnya A.N., Shkuropatenko V.A., Tarasov R.V., Rybka A.V., Zakharchenko A.A.**, (2015) Durability and shielding performance of borated Ceramicrete coatings in beta and gamma radiation fields, *Journal of Nuclear Materials*, 462, 165–172.
- Vejdani-Noghreiyani, A., Aliakbari, E., Ebrahimi-Khankook, A., Ghasemifard, M.**, (2016). Theoretical and experimental determination of mass attenuation coefficients of lead-based ceramics and their comparison with simulation. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 31(2), 142-149.
- Yeritsyan, H., Sahakyan, A., Harutyunyan, V., Nikoghosyan, S., Hakhverdyan, E., Grigoryan, N., Hovhannisyan, A., Keheyani, Y., Atoyani, V., Rhodes, C.** (2013). Radiation-modified natural zeolites for cleaning liquid nuclear waste (Irradiation against radioactivity). *Scientific Reports* 3, Article number: 2900.

EKLER

Çizelge A.1: ^{241}Am gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.

Seramikler	Net Alan	Belirsizlik (%)	μ cm^{-1}	μ_m cm^2g^{-1}	YDK cm	ODK cm
^{241}Am	82892	0,47				
0,75ZE ₁ •0,25BA-1	60516	0,41	0,64	0,61	1,08	3,59
0,75ZE ₁ •0,25BA-2	58046	0,45	0,66	0,52	1,05	3,48
0,75ZE ₁ •0,25BA-3	49712	0,66	0,68	0,50	1,03	3,41
0,75ZE ₁ •0,25BA-4	43377	0,50	0,65	0,47	1,06	3,52
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-1	21808	0,51	2,92	1,96	0,24	0,79
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-2	7823	1,13	3,21	1,76	0,22	0,72
0,75ZE ₂ •0,25BA-1	51538	0,48	0,96	0,80	0,72	2,39
0,75ZE ₂ •0,25BA-2	49630	0,56	0,86	0,65	0,80	2,67
0,75ZE ₂ •0,25BA-3	48710	0,47	0,71	0,45	0,97	3,24
0,75ZE ₂ •0,25BA-4	45593	0,48	0,60	0,54	1,16	3,86
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-1	23569	0,88	2,44	1,82	0,28	0,94
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-2	8197	1,10	3,04	1,62	0,23	0,76
BN ₁ -1	62527	0,40	0,85	0,48	0,82	2,71
BN ₁ -2	61006	0,41	0,75	0,39	0,93	3,09
BN ₁ -3	53127	0,62	0,77	0,38	0,90	2,98
BN ₁ -4	47392	0,46	0,69	0,36	1,00	3,33
0,5BN ₁ •0,5GA-1	13790	1,03	6,90	2,68	0,10	0,33
0,5BN ₁ •0,5GA-2	2575	1,97	5,54	2,70	0,13	0,42
BN ₂ -1	64124	0,52	0,79	0,44	0,87	2,91
BN ₂ -2	51906	0,48	1,00	0,60	0,70	2,31
BN ₂ -3	50801	0,45	0,79	0,42	0,87	2,91
BN ₂ -4	45917	0,47	0,77	0,38	0,91	3,01
0,5BN ₂ •0,5GA-1	19790	0,72	5,29	1,85	0,13	0,44
0,5BN ₂ •0,5GA-2	3905	1,60	4,75	2,04	0,15	0,48
BN ₃ -1	55038	0,44	1,28	0,72	0,54	1,80
BN ₃ -2	54917	0,43	0,89	0,54	0,78	2,59
BN ₃ -3	49945	0,58	0,83	0,44	0,83	2,76
BN ₃ -4	43683	0,62	0,84	0,42	0,82	2,73
0,5BN ₃ •0,5GA-2	7015	1,44	3,44	1,75	0,20	0,67
BN ₄ -1	63439	0,54	0,73	0,46	0,95	3,16
BN ₄ -2	56355	0,56	0,87	0,50	0,80	2,66
BN ₄ -3	50219	0,46	0,89	0,43	0,78	2,60
BN ₄ -4	45008	0,48	0,86	0,40	0,81	2,69
0,5BN ₄ •0,5GA-1	16132	0,86	5,47	2,07	0,13	0,42
0,5BN ₄ •0,5GA-2	4057	1,86	5,74	1,95	0,12	0,40
0,75GA•0,25BA-1	4372	1,90	6,92	3,15	0,10	0,33
0,75GA•0,25BA-2	2041	2,21	6,59	2,98	0,11	0,35

μ : Lineer zayıflatma katsayısı,

μ_m : Kütlesel zayıflatma katsayısı

Çizelge A.2: ^{57}Co gama radyoizotop kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.

Seramikler	Net Alan	Belirsizlik (%)	μ , cm^{-1}	μ_m , cm^2g^{-1}	YDK, cm	ODK, cm
^{57}Co	11770	1,04				
0,75ZE ₁ •0,25BA-1	8747	1,11	0,61	0,57	1,14	3,80
0,75ZE ₁ •0,25BA-2	7843	1,38	0,75	0,59	0,92	3,05
0,75ZE ₁ •0,25BA-3	7120	1,86	0,66	0,49	1,04	3,47
0,75ZE ₁ •0,25BA-4	6676	1,29	0,57	0,41	1,21	4,02
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-1	2125	1,19	2,33	1,36	0,30	0,99
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-2	4677	1,51	2,02	1,28	0,34	1,14
0,75ZE ₂ •0,25BA-1	8862	1,38	0,58	0,48	1,20	4,00
0,75ZE ₂ •0,25BA-2	8448	1,38	0,56	0,42	1,24	4,12
0,75ZE ₂ •0,25BA-3	6914	1,26	0,71	0,45	0,97	3,23
0,75ZE ₂ •0,25BA-4	6680	1,50	0,56	0,51	1,23	4,08
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-1	4555	1,80	1,84	1,38	0,38	1,25
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-2	2218	2,23	2,20	1,17	0,32	1,05
BN ₁ -1	9408	1,38	0,67	0,38	1,03	3,41
BN ₁ -2	8740	1,33	0,72	0,38	0,96	3,18
BN ₁ -3	7558	1,60	0,77	0,38	0,90	2,99
BN ₁ -4	6822	1,76	0,68	0,35	1,03	3,41
0,5BN ₁ •0,5GA-1	3207	1,85	5,00	1,95	0,14	0,46
0,5BN ₁ •0,5GA-2	1082	3,57	3,81	1,86	0,18	0,60
BN ₂ -1	9281	1,31	0,73	0,41	0,95	3,14
BN ₂ -2	8709	1,13	0,64	0,39	1,08	3,59
BN ₂ -3	8073	1,16	0,61	0,32	1,14	3,77
BN ₂ -4	7357	1,88	0,61	0,30	1,14	3,78
0,5BN ₂ •0,5GA-1	3935	1,65	4,04	1,41	0,17	0,57
0,5BN ₂ •0,5GA-2	1438	2,90	3,27	1,41	0,21	0,70
BN ₃ -1	9039	1,08	0,83	0,46	0,84	2,79
BN ₃ -2	8398	1,61	0,73	0,44	0,95	3,16
BN ₃ -3	8141	1,82	0,61	0,32	1,14	3,80
BN ₃ -4	6942	1,75	0,69	0,35	1,00	3,31
0,5BN ₃ •0,5GA-2	2099	1,64	2,40	1,22	0,29	0,96
BN ₄ -1	9296	1,29	0,64	0,41	1,08	3,58
BN ₄ -2	8630	1,38	0,70	0,40	0,99	3,30
BN ₄ -3	8194	1,71	0,64	0,31	1,08	3,59
BN ₄ -4	7454	1,20	0,64	0,30	1,08	3,59
0,5BN ₄ •0,5GA-1	3758	1,12	3,82	1,44	0,18	0,60
0,5BN ₄ •0,5GA-2	1454	1,58	3,98	1,35	0,17	0,58
0,75GA•0,25BA-1	1621	2,80	4,66	2,12	0,15	0,49
0,75GA•0,25BA-2	964	1,56	4,45	2,01	0,16	0,52

μ : Lineer zayıflatma katsayısı,

μ_m : Kütlesel zayıflatma katsayısı

Çizelge A.3: ^{137}Cs gama nokta kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.

Seramikler	Net Alan	Belirsizlik (%)	μ cm^{-1}	μ_m cm^2g^{-1}	YDK cm	ODK cm
^{137}Cs	20075	0,75				
0,75ZE ₁ •0,25BA-1	15419	0,86	0,54	0,51	1,29	4,28
0,75ZE ₁ •0,25BA-2	14566	0,87	0,60	0,47	1,16	3,86
0,75ZE ₁ •0,25BA-3	14410	0,87	0,44	0,32	1,58	5,26
0,75ZE ₁ •0,25BA-4	12976	0,94	0,44	0,32	1,57	5,22
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-1	13476	0,90	0,54	0,41	1,28	4,25
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-2	15155	1,00	0,62	0,30	1,13	3,74
0,75ZE ₂ •0,25BA-1	15572	0,80	0,52	0,43	1,35	4,47
0,75ZE ₂ •0,25BA-2	15672	0,85	0,42	0,32	1,66	5,52
0,75ZE ₂ •0,25BA-3	14012	0,90	0,48	0,30	1,44	4,78
0,75ZE ₂ •0,25BA-4	12988	0,93	0,43	0,39	1,60	5,30
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-1	15266	0,86	0,53	0,40	1,30	4,33
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-2	13058	0,92	0,57	0,30	1,22	4,07
BN ₁ -1	16631	0,82	0,57	0,32	1,22	4,06
BN ₁ -2	14972	1,07	0,64	0,34	1,09	3,61
BN ₁ -3	14787	0,87	0,53	0,26	1,31	4,34
BN ₁ -4	14148	0,88	0,43	0,22	1,60	5,32
0,5BN ₁ •0,5GA-1	14756	0,87	1,18	0,46	0,59	1,94
0,5BN ₁ •0,5GA-2	11310	1,12	0,79	0,39	0,87	2,90
BN ₂ -1	16289	0,85	0,65	0,36	1,07	3,57
BN ₂ -2	15865	0,87	0,50	0,30	1,38	4,60
BN ₂ -3	14774	0,87	0,50	0,26	1,40	4,64
BN ₂ -4	13874	0,91	0,48	0,24	1,45	4,81
0,5BN ₂ •0,5GA-1	14558	0,92	0,90	0,32	0,77	2,55
0,5BN ₂ •0,5GA-2	13091	0,93	0,66	0,29	1,04	3,46
BN ₃ -1	15618	0,85	0,78	0,44	0,88	2,93
BN ₃ -2	15336	0,84	0,58	0,35	1,19	3,96
BN ₃ -3	14538	0,90	0,53	0,28	1,31	4,34
BN ₃ -4	13567	0,98	0,52	0,26	1,34	4,47
0,5BN ₃ •0,5GA-2	1377	0,91	0,54	0,27	1,29	4,27
BN ₄ -1	12890	1,09	0,55	0,35	1,26	4,19
BN ₄ -2	14964	0,87	0,66	0,38	1,05	3,49
BN ₄ -3	13160	1,14	0,75	0,37	0,93	3,08
BN ₄ -4	13475	0,99	0,56	0,26	1,24	4,12
0,5BN ₄ •0,5GA-1	14024	0,96	0,94	0,36	0,73	2,44
0,5BN ₄ •0,5GA-2	4897	2,10	0,50	0,17	1,39	4,61
0,75GA•0,25BA-1	15655	0,84	0,59	0,27	1,18	3,94
0,75GA•0,25BA-2	14765	0,88	0,55	0,25	1,27	4,21

μ : Lineer zayıflatma katsayısı,
 μ_m : Kütleli zayıflatma katsayısı

Çizelge A.4: ^{60}Co (1117 keV) gama nokta kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.

Seramikler	Net Alan	Belirsizlik %	μ cm^{-1}	μ_m cm^2g^{-1}	YDK cm	ODK cm
^{60}Co	5489	2,52				
0,75ZE ₁ •0,25BA-1	4384	2,03	0,46	0,43	1,51	5,02
0,75ZE ₁ •0,25BA-2	4085	2,15	0,55	0,43	1,26	4,19
0,75ZE ₁ •0,25BA-3	3777	2,54	0,49	0,37	1,40	4,66
0,75ZE ₁ •0,25BA-4	3628	2,78	0,42	0,30	1,66	5,50
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-1	4966	2,14	0,22	0,15	3,16	10,51
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-2	4061	2,41	0,41	0,26	1,69	5,62
0,75ZE ₂ •0,25BA-1	4079	1,42	0,60	0,50	1,15	3,82
0,75ZE ₂ •0,25BA-2	4073	1,28	0,50	0,38	1,38	4,58
0,75ZE ₂ •0,25BA-3	3744	1,33	0,51	0,32	1,35	4,50
0,75ZE ₂ •0,25BA-4	3555	1,20	0,43	0,39	1,60	5,32
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-1	4250	1,41	0,50	0,37	1,40	4,64
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-2	3474	1,38	0,60	0,32	1,15	3,83
BN ₁ -1	4709	1,19	0,46	0,26	1,50	4,99
BN ₁ -2	3897	1,47	0,83	0,44	0,83	2,76
BN ₁ -3	4089	1,38	0,51	0,25	1,36	4,50
BN ₁ -4	3775	1,40	0,46	0,24	1,50	4,97
0,5BN ₁ •0,5GA-1	4006	1,42	1,21	0,47	0,57	1,90
0,5BN ₁ •0,5GA-2	3732	1,26	0,62	0,30	1,13	3,74
BN ₂ -1	4391	2,06	0,69	0,38	1,01	3,34
BN ₂ -2	4272	2,08	0,53	0,32	1,30	4,32
BN ₂ -3	3704	2,45	0,64	0,34	1,09	3,62
BN ₂ -4	3991	2,26	0,41	0,21	1,68	5,58
0,5BN ₂ •0,5GA-1	4093	1,27	1,08	0,38	0,64	2,13
0,5BN ₂ •0,5GA-2	3670	1,24	0,63	0,27	1,11	3,68
BN ₃ -1	4351	1,35	0,73	0,41	0,95	3,17
BN ₃ -2	4096	1,40	0,63	0,38	1,10	3,64
BN ₃ -3	4184	1,36	0,45	0,24	1,55	5,16
BN ₃ -4	3692	1,35	0,52	0,26	1,33	4,41
0,5BN ₃ •0,5GA-2	3893	1,15	0,48	0,24	1,45	4,81
BN ₄ -1	4454	1,37	0,57	0,36	1,22	4,04
BN ₄ -2	4370	2,42	0,51	0,30	1,35	4,49
BN ₄ -3	3980	1,41	0,57	0,28	1,22	4,05
BN ₄ -4	3975	1,24	0,45	0,21	1,53	5,09
0,5BN ₄ •0,5GA-1	4984	1,43	0,32	0,12	2,15	7,13
0,5BN ₄ •0,5GA-2	4291	1,35	0,47	0,16	1,48	4,92
0,75GA•0,25BA-1	4004	1,97	0,74	0,34	0,93	3,10
0,75GA•0,25BA-2	3793	2,06	0,66	0,30	1,05	3,50

μ : Lineer zayıflatma katsayısı,

μ_m : Kütleli zayıflatma katsayısı

Çizelge A.5: ^{60}Co (1333 keV) gama nokta kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.

Seramikler	Net Alan	Belirsizlik. (%)	μ cm^{-1}	μ_m cm^2g^{-1}	YDK cm	ODK cm
^{60}Co	4506	1,85				
0,75ZE ₁ •0,25BA-1	3724	1,83	0,39	0,37	1,78	5,92
0,75ZE ₁ •0,25BA-2	3131	1,47	0,68	0,53	1,02	3,40
0,75ZE ₁ •0,25BA-3	2950	1,17	0,56	0,41	1,24	4,11
0,75ZE ₁ •0,25BA-4	2787	1,17	0,49	0,35	1,43	4,74
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-1	4176	1,71	0,17	0,11	4,16	13,84
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-2	3616	1,76	0,30	0,16	2,31	7,69
0,75ZE ₂ •0,25BA-1	3477	1,76	0,53	0,44	1,32	4,38
0,75ZE ₂ •0,25BA-2	3244	1,74	0,55	0,42	1,25	4,16
0,75ZE ₂ •0,25BA-3	3061	1,71	0,52	0,33	1,34	4,45
0,75ZE ₂ •0,25BA-4	3022	1,66	0,40	0,36	1,74	5,78
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-1	3425	1,77	0,53	0,40	1,30	4,32
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-2	2876	1,71	0,59	0,31	1,17	3,90
BN ₁ -1	3655	1,76	0,63	0,36	1,10	3,65
BN ₁ -2	3334	1,74	0,73	0,39	0,95	3,14
BN ₁ -3	3383	1,72	0,50	0,24	1,39	4,63
BN ₁ -4	3146	1,73	0,44	0,23	1,56	5,18
0,5BN ₁ •0,5GA-1	3284	1,73	1,22	0,47	0,57	1,89
0,5BN ₁ •0,5GA-2	3096	1,68	0,60	0,29	1,16	3,85
BN ₂ -1	3846	1,73	0,49	0,27	1,42	4,71
BN ₂ -2	3740	1,78	0,40	0,24	1,75	5,81
BN ₂ -3	2964	1,78	0,68	0,36	1,02	3,40
BN ₂ -4	3312	1,94	0,40	0,20	1,74	5,77
0,5BN ₂ •0,5GA-1	3345	1,76	1,10	0,38	0,63	2,09
0,5BN ₂ •0,5GA-2	2875	1,70	0,70	0,30	0,99	3,29
BN ₃ -1	3520	1,75	0,77	0,43	0,90	2,98
BN ₃ -2	3468	1,73	0,57	0,34	1,23	4,07
BN ₃ -3	3382	1,73	0,47	0,25	1,47	4,88
BN ₃ -4	3005	1,73	0,53	0,27	1,30	4,32
0,5BN ₃ •0,5GA-2	3196	1,68	0,48	0,24	1,45	4,81
BN ₄ -1	3594	1,79	0,62	0,39	1,12	3,74
BN ₄ -2	3581	1,79	0,52	0,30	1,34	4,46
BN ₄ -3	3361	1,74	0,52	0,25	1,34	4,44
BN ₄ -4	3162	1,73	0,50	0,23	1,39	4,64
0,5BN ₄ •0,5GA-1	3944	1,77	0,45	0,17	1,56	5,17
0,5BN ₄ •0,5GA-2	3458	1,77	0,50	0,17	1,38	4,58
0,75GA•0,25BA-1	4202	1,64	0,16	0,07	4,22	14,01
0,75GA•0,25BA-2	4183	1,67	0,13	0,06	5,24	17,40

μ : Lineer zayıflatma katsayısı,

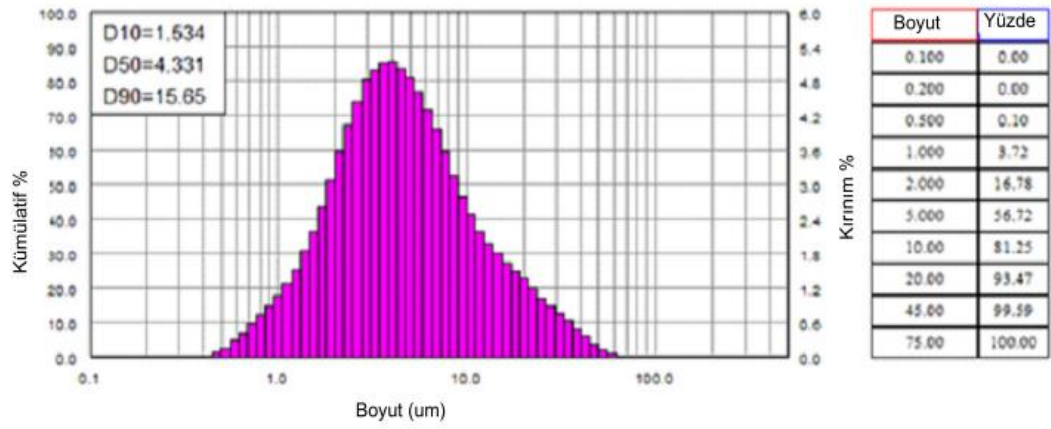
μ_m : Kütleli zayıflatma katsayısı

Çizelge A.6: ^{88}Y gama nokta kaynağı ile yapılan deneylerin sonuçları.

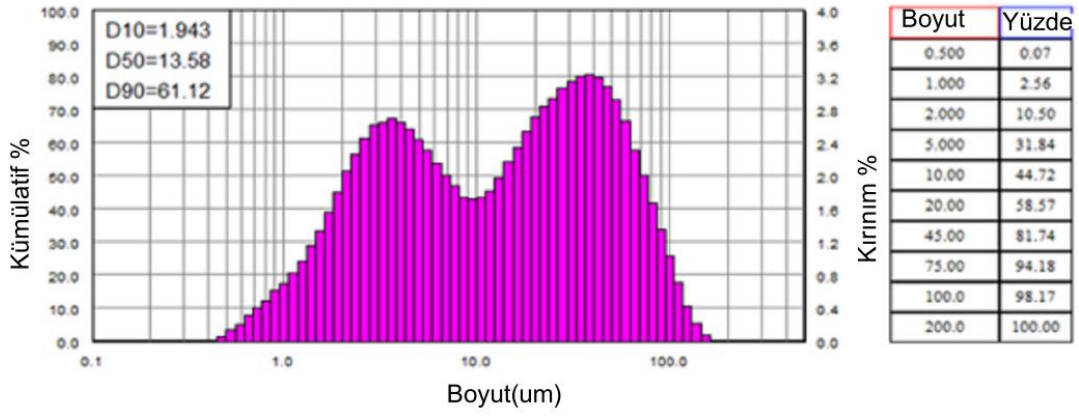
Seramikler	Net Alan	Belirsizlik %	μ cm^{-1}	μ_m cm^2g^{-1}	YDK cm	ODK cm
^{88}Y	541	2,29				
0,75ZE ₁ •0,25BA-1	361	2,22	0,83	0,78	0,84	2,79
0,75ZE ₁ •0,25BA-2	367	2,26	0,72	0,56	0,96	3,19
0,75ZE ₁ •0,25BA-3	397	2,19	0,41	0,30	1,70	5,63
0,75ZE ₁ •0,25BA-4	314	2,33	0,55	0,40	1,26	4,19
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-1	445	2,30	0,43	0,29	1,62	5,39
0,5(0,75ZE ₁ •0,25BA)•0,5GA-2	361	2,22	0,55	0,30	1,26	4,18
0,75ZE ₂ •0,25BA-1	413	2,27	0,55	0,78	1,27	4,20
0,75ZE ₂ •0,25BA-2	443	2,24	0,34	0,56	2,06	6,84
0,75ZE ₂ •0,25BA-3	359	2,18	0,55	0,30	1,26	4,19
0,75ZE ₂ •0,25BA-4	382	2,19	0,35	0,40	2,00	6,64
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-1	396	2,24	0,61	0,45	1,14	3,80
0,5(0,75ZE ₂ •0,25BA)•0,5GA-2	435	2,24	0,29	0,15	2,42	8,02
BN ₁ -1	436	2,30	0,65	0,37	1,07	3,54
BN ₁ -2	390	2,32	0,80	0,42	0,87	2,89
BN ₁ -3	383	2,26	0,60	0,29	1,16	3,84
BN ₁ -4	367	2,29	0,48	0,25	1,44	4,79
0,5BN ₁ •0,5GA-1	364	2,19	1,52	0,59	0,45	1,51
0,5BN ₁ •0,5GA-2	345	2,22	0,72	0,35	0,97	3,21
BN ₂ -1	389	2,26	1,02	0,57	0,68	2,26
BN ₂ -2	417	2,24	0,55	0,34	1,25	4,16
BN ₂ -3	382	2,29	0,56	0,30	1,23	4,09
BN ₂ -4	344	2,25	0,59	0,29	1,18	3,93
0,5BN ₂ •0,5GA-1	408	2,23	1,04	0,36	0,67	2,21
0,5BN ₂ •0,5GA-2	306	2,28	0,89	0,38	0,78	2,60
BN ₃ -1	416	2,24	0,82	0,46	0,84	2,80
BN ₃ -2	392	2,19	0,70	0,42	1,00	3,31
BN ₃ -3	424	2,20	0,40	0,22	1,73	5,75
BN ₃ -4	374	2,19	0,49	0,24	1,43	4,74
0,5BN ₃ •0,5GA-2	350	2,28	0,61	0,31	1,14	3,79
BN ₄ -1	366	2,24	0,72	0,46	0,96	3,19
BN ₄ -2	412	2,20	0,61	0,35	1,13	3,76
BN ₄ -3	427	2,20	0,42	0,21	1,65	5,50
BN ₄ -4	323	2,31	0,72	0,34	0,96	3,18
0,5BN ₄ •0,5GA-1	410	2,27	0,93	0,35	0,75	2,48
0,5BN ₄ •0,5GA-2	356	2,18	0,80	0,27	0,87	2,89
0,75GA•0,25BA-1	373	2,26	0,87	0,40	0,79	2,63
0,75GA•0,25BA-2	410	2,23	0,49	0,22	1,40	4,67

μ : Lineer zayıflatma katsayısı,

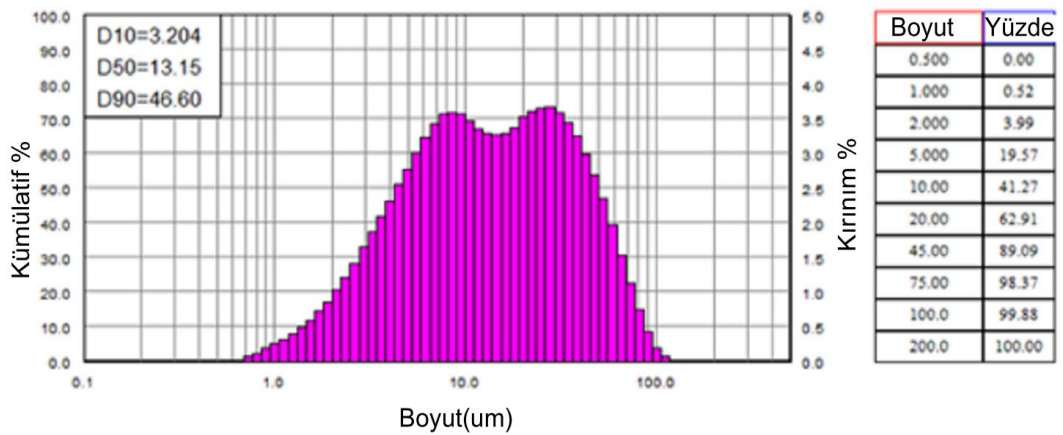
μ_m : Kütleli zayıflatma katsayısı



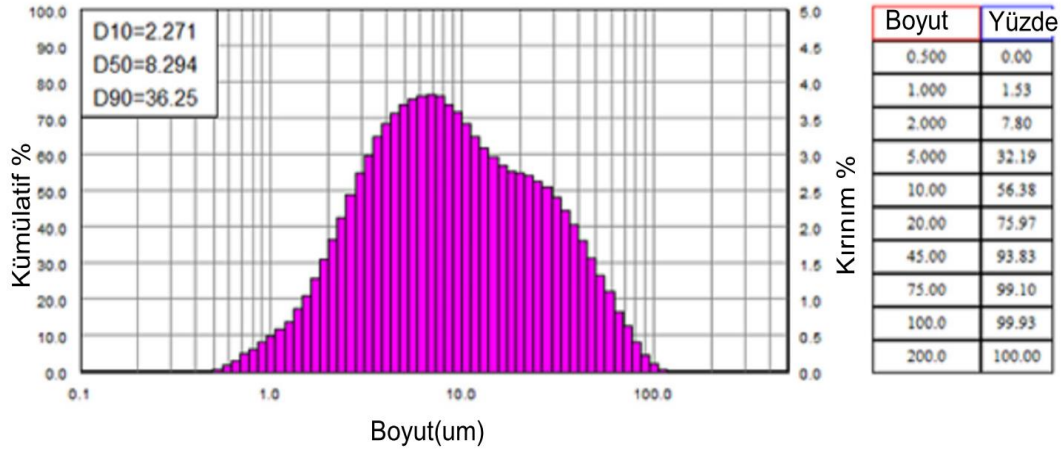
Şekil A.1: Ara bentonitin partikül boyutu dağılımı.



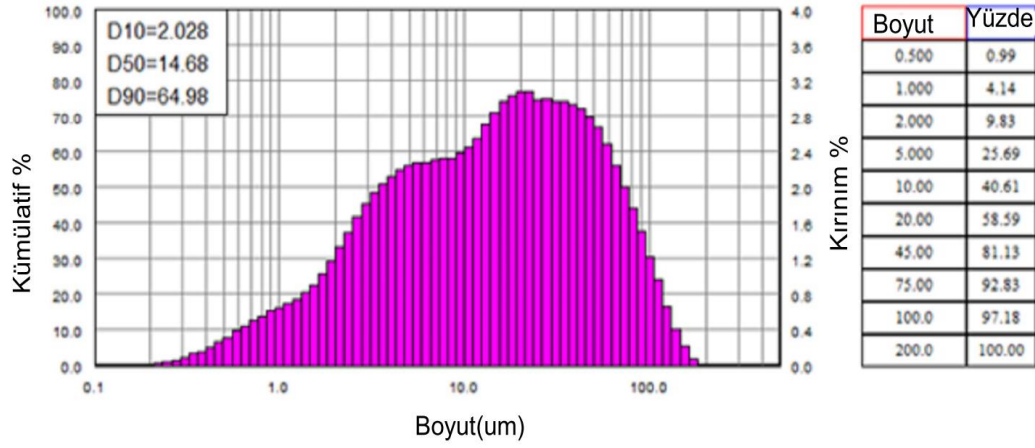
Şekil A.2: Reşadiye bentonitinin partikül boyutu dağılımı.



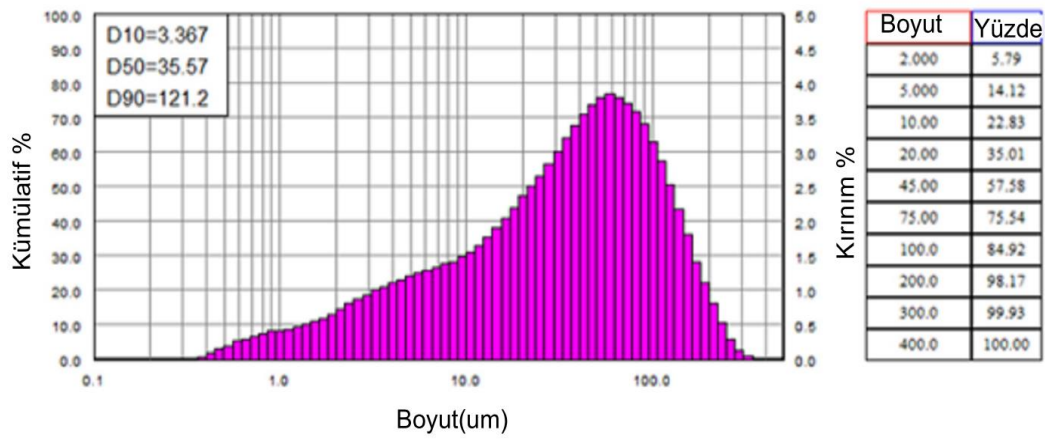
Şekil A.3: Ankara bentonitinin partikül boyutu dağılımı.



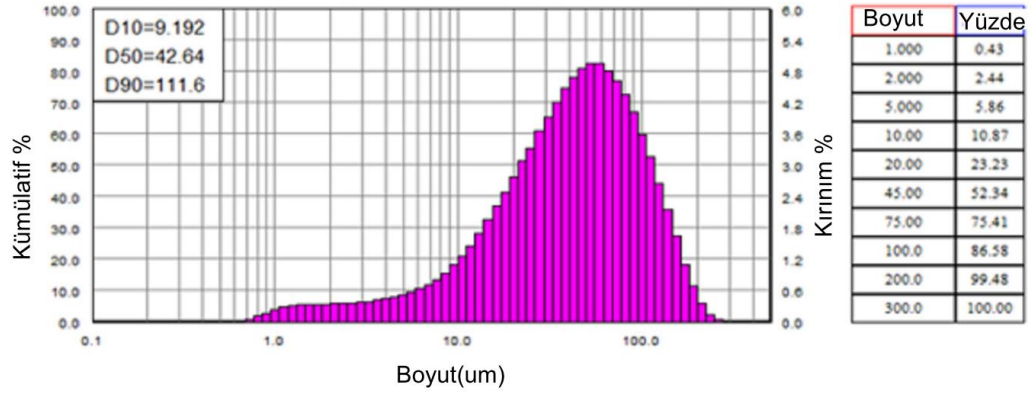
Şekil A.4: Sömaş bentonitinin partikül boyutu dağılımı.



Şekil A.5: Bigadiç zeolitinin partikül boyutu dağılımı.



Şekil A.6: Amasya zeolitinin partikül boyutu dağılımı.



Şekil A.7: Galen mineralnin partikül boyutu dağılımı.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sinan Asal
Doğum Tarihi ve Yeri : 1990/İstanbul
E-posta : sinan.asal@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı, Radyasyon Bilim ve Teknolojisi Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016- : İsystems’de Petrol ve Doğalgaz Proje Mühendisi olarak çalışmaktadır.

YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- S. Asal, N. Yanıkömer, S. Hacıyakupoğlu, S. Erentürk, “Çok Fonksiyonlu Radyasyon Zırh Malzemelerinin Hazırlanması ve Zırhlama Performanslarının Araştırılması”, XI. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, 12-14 Ekim 2016, Kuşadası, 206.
- N. Yanıkömer, S. Asal, S. Hacıyakupoğlu, S. Erentürk, “Yüksek Düzey Radyoaktif Atıklar için Seramik Matrislerin Geliştirilmesi”, XI. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, 12-14 Ekim 2016, Kuşadası, Bildiri Özetleri, 205.
- N. Yanıkömer, S. Asal, S. Hacıyakupoglu, S. Akyil Erenturk, New solidification materials in nuclear waste management. International Journal of Engineering Technologies, 2/2, 76-82, 20.