



**ALUMİNA VE ZİRKONYA ESASLI
SERAMİKLERİN NÜKLEER ZIRHLAMA
KABİLİYETLERİNİN MCNP-X KODU İLE
ARAŞTIRILMASI**

İlyas ARAL

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Prof. Dr. İbrahim HAN
Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALIM**

AĞRI-2019
(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.

AĞRI İBRAHİM ÇEÇEN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

İlyas ARAL

**ALUMİNA VE ZİRKONYA ESASLI SERAMİKLERİN NÜKLEER
ZIRHLAMA KABİLİYETLERİNİN MCNP-X KODU İLE ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Prof. Dr. İbrahim HAN

Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALIM

AĞRI-2019

TEZ ONAY FORMU

ALUMİNA VE ZİRKONYA ESASLI SERAMİKLERİN NÜKLEER ZIRHLAMA
KABİLİYETLERİNİN MCNP-X KODU İLE ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. İbrahim HAN ve Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALİM danışmanlığında, İlyas ARAL tarafından hazırlanan bu çalışma, 06/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (5./5.)** ile kabul edilmiştir.

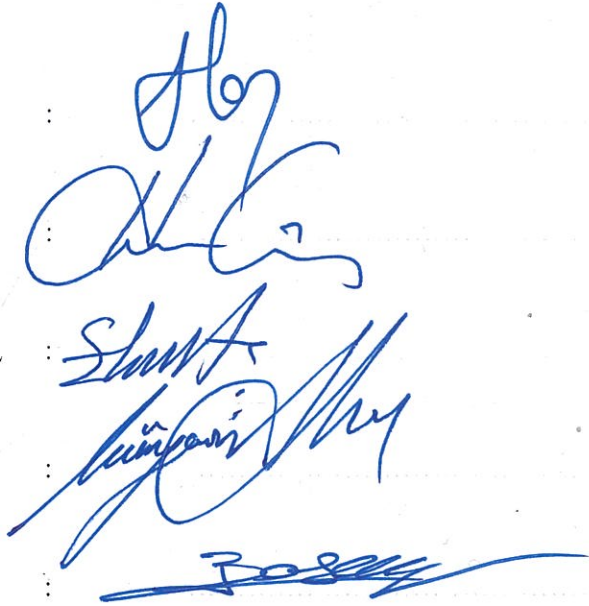
Prof. Dr. İbrahim HAN

Doç. Dr. Harun GÜNEY

Dr. Öğr. Üyesi Ebru SENEMTAŞI ÜNAL

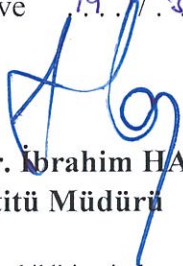
Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALİM

Dr. Öğr. Üyesi Ali BALTAKESMEZ



Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu **15.11./2019** tarih ve **19./1.39-1...** nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. İbrahim HAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Y. Lisans Tezi

ALUMİNA VE ZİRKONYA ESASLI SERAMİKLERİN NÜKLEER ZIRHLAMA KABİLİYETLERİNİN MCNP-X KODU İLE ARAŞTIRILMASI

İlyas ARAL

Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İbrahim HAN
Ortak Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALIM

Bu çalışmada, Alumina (Al_2O_3) ve Zirkonya (ZrO_2) seramikleri, Zirkonya ile sertleştirilmiş Alumina (ZTA) seramikleri (ZTA-10, ZTA-20, ZTA-30, ZTA-40, ZTA-50, ZTA-60, ZTA-70, ZTA-80 ve ZTA-90) ve Alumina ve Zirkonya içeren dört farklı seramik (S1, S2, S3 ve S4) malzemelerinin radyasyon zırhlama kabiliyetlerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda incelenen seramiklerin radyasyon zırhlama parametreleri arasında olan lineer azaltma katsayıları, kütle azaltma katsayıları, ortalama serbest yolları ve yarı-değer kalınlıkları dört farklı radyoaktif kaynaktan (Co-60, Cs-137, Ba-133 ve Na-22) yayımlanan ve iyi bilinen sekiz farklı foton enerjisi (1,332 MeV; 1,275 MeV; 1,173 MeV; 0,662 MeV; 0,511 MeV; 0,356 MeV; 0,303 MeV ve 0,276 MeV) için hem MCNP-X kodu ile hem de WinXCOM yazılımı ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. İncelenen seramiklerin foton zırhlama performansları hakkında kayda değer bir değerlendirme yapabilmek için tüm hesaplamalar hem kurşun (Pb) metali hem de birçok nükleer uygulamada zırhlama malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan sıradan beton için de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar hem foton enerjisine hem de incelenen seramiklerin kimyasal birleşimine bağlı olarak her iki bilgisayar program sonuçları ile birlikte karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan hareketle incelenen seramiklerin nükleer uygulamalar için alternatif zırh malzemesi olabirlikleri değerlendirilmiştir.

2019, 99 sayfa

Anahtar Kelimeler: MCNP-X, WinXCOM, ZTA seramikleri, Kütle soğurma katsayıları.

ABSTRACT

MS Thesis

INVESTIGATION of NUCLEAR SHIELDING CAPABILITIES of ALUMINA and ZIRCONIA BASED CERAMICS with MCNP-X CODE

İlyas ARAL

Ağrı İbrahim Çeçen University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim HAN

Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Bünyamin ALIM

In this study, it is aimed to investigate the radiation shielding capabilities of Alumina (Al_2O_3) and Zirconia (ZrO_2) ceramics, Zirconia Toughened Alumina (ZTA) ceramics (ZTA-10, ZTA-20, ZTA-30, ZTA-40, ZTA-50, ZTA-60, ZTA-70, ZTA-80 and ZTA-90), four different ceramics (S1, S2, S3 and S4) including Alumina and Zirconia materials. In accordance with this purpose, the linear attenuation coefficients, mass attenuation coefficients, mean free paths and half-value layers from radiation shielding parameters of the ceramics examined were calculated separately by using MCNP-X code and WinXCOM software for the well-known eight photon energies (1.332 MeV; 1.275 MeV; 1.173 MeV; 0.662 MeV; 0.511 MeV; 0.356 MeV; 0.303 MeV and 0.276 MeV) emitted from four different radioactive sources (Co-60, Cs-137, Ba-133 and Na-22). In order to make a satisfying assessment about radiation shielding performances of the ceramics examined, all calculations were also made for both lead (Pb) metal and ordinary concrete that is most commonly used as shielding material in many nuclear applications. The results obtained were evaluated comparatively with both computer program results depending on both photon energy and chemical combination of the ceramics examined. Based on the results obtained, the possibility of alternative shielding material of the present ceramics for the nuclear applications was evaluated.

2019, 99 Pages

Keywords: MCNP-X, WinXCOM, ZTA ceramics, Mass atenuation coefficients.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Fen- Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde yapılmıştır. Bu çalışmanın planlanması ve yürütülmesinde tecrübelerini ve kıymetli bilgilerini esirgemeyen çok değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. İbrahim HAN ve Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALIM'a en içten şükranlarımı arz ederim.

Çalışmalarım sırasında yapmış oldukları katkılardan dolayı Sayın Prof. Dr. Asghar MESBAHİ'ye teşekkür ederim.

Teşvik ve desteklerinden dolayı kardeşlerim Gül ARAL ve Ömer Faruk ARAL'a teşekkürlerimi sunarım.

İlyas ARAL

Eylül 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	18
2.1. Radyasyon	18
2.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon	19
2.1.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	21
2.2. Radyasyondan Korunma	22
2.3. Radyasyon-Madde Etkileşmesi	22
2.3.1. Fotoelektrik Olay	23
2.3.2. Compton Olayı	24
2.3.3. Çift Oluşumu	25
2.4. Elektromanyetik Radyasyonun Soğurulması	26
2.4.1. Foton Soğurma Parametrelerinin Teorisi	26
2.4.1.a. Lineer soğurma katsayısı (μ).....	26
2.4.1.b. Kütle soğurma katsayısı (μ_m)	27
2.4.1.c. Ortalama serbest yol (MFP).....	28
2.4.1.d. Yarı-değer kalınlığı (HVL)	29
2.5. Seramikler	29
2.5.1. Alumina (Al_2O_3)	32

2.5.2.	Zirkonya (ZrO_2)	33
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1.	Monte Carlo ve Radyasyon Transportu ile MCNP Programının İçeriği	35
3.1.1.	Geometri ve Materyal Tanıtımı.....	37
3.1.2.	Kaynak Tanıtımı	40
3.1.3.	Dedektör (Tally) Tanıtım Kartı.....	41
3.1.4.	Diğer Veri Kartları	41
3.2.	XCOM Programı.....	47
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI.....	50
4.1.	Lineer soğurma katsayılarının incelenmesi.....	50
4.2.	Ortalama serbest yol değerlerinin incelenmesi	59
4.3.	Yarı-değer kalınlıklarının incelenmesi.....	66
4.4.	Kütle soğurma katsayılarının incelenmesi	71
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	82
	KAYNAKLAR.....	88
	ÖZGEÇMİŞ	99

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: Lineer soğurma katsayısı
μ/ρ	: Kütle soğurma katsayısı
α	: Alfa parçacığı
β	: Beta parçacığı
γ	: Gama ışıması
τ	: Fotoelektrik katsayısı
σ	: Compton katsayısı
κ	: Çift üretim katsayısı
I	: Işık şiddeti
h	: Planck sabiti (6.62×10^{-34} J.s)
ρ	: Yoğunluk
E	: Enerji
ν	: Frekans
HVL	: Yarı-değer kalınlığı
MFP	: Ortalama serbest yol

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Çekirdeğin kararlı hale geçişi	18
Şekil 2. 2. Radyasyon tiplerinin şematik gösterimi.	19
Şekil 2. 3. Gama ışıması.....	21
Şekil 2. 4. Fotoelektrik Olay.....	23
Şekil 2. 5. Compton Saçılması.....	24
Şekil 2. 6. Çift Oluşumu.....	25
Şekil 3. 1. İdeal bir zırhlama geometrisi	40
Şekil 3. 2. MCNP programı ile farklı kalınlıklarda elde edilmiş I/I_0 değerlerinin kalınlığın bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi. (Çizelge 3.9’da verilen datalar kullanılarak çizilmiştir).	45
Şekil 3. 3. Malzeme kalınlığının bir fonksiyonu olarak MCNP programı ile elde edilmiş lineer soğurma katsayısının değişim eğrisi (Çizelge 3.9’da verilen datalar kullanılarak çizilmiştir).	47
Şekil 4. 1. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi.	51
Şekil 4. 2. ZTA seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi ((a) ZTA-10 için, (b) ZTA-20 için, (c) ZTA-30 için, (d) ZTA-40 için, (e) ZTA-50 için, (f) ZTA-60 için, (g) ZTA-70 için, (h) ZTA-80 için ve (i) ZTA-90 için).	54
Şekil 4. 3. Alumina, Zirkonya ve ZTA seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak karşılaştırmalı olarak gösterimi.	56
Şekil 4. 4. Yapısında Alumina ve Zirkonya seramiklerini bulunduran S1(a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) seramikleri, karşılaştırma betonu (e) ve kurşun (f) için lineer soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi.	57
Şekil 4. 5. S1, S2, S3, S4 seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının beton ve Pb ile karşılaştırılma eğrisi.	58
Şekil 4. 6. İncelenen tüm numunelerin lineer soğurma katsayılarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.	58

Şekil 4. 7. İncelenen ZTA seramiklerinin ortalama serbest yollarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.	61
Şekil 4. 8. İncelenen S1, S2, S3, S4 seramikleri ile beton ve Pb'nin ortalama serbest yollarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.	63
Şekil 4. 9. İncelenen tüm numunelerin ortalama serbest yollarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.	65
Şekil 4. 10. İncelenen ZTA seramiklerinin yarı-değer kalınlıklarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.	67
Şekil 4. 11. İncelenen S1, S2, S3, S4 seramikleri ile beton ve Pb'nin yarı-değer kalınlıklarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.....	69
Şekil 4. 12. İncelenen tüm numunelerin yarı-değer kalınlıklarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.	69
Şekil 4. 13. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi.	73
Şekil 4.14. Alumina, Zirkonya ve ZTA seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak karşılaştırmalı olarak gösterimi.	74
Şekil 4. 15. ZTA seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi ((a) ZTA-10 için, (b) ZTA-20 için, (c) ZTA-30 için, (d) ZTA-40 için, (e) ZTA-50 için, (f) ZTA-60 için, (g) ZTA-70 için, (h) ZTA-80 için ve (i) ZTA-90 için).	76
Şekil 4. 16. Yapısında Alumina ve Zirkonya seramiklerini bulunduran S1(a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) seramikleri, karşılaştırma betonu (e) ve kurşun (f) için kütle soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi.	79
Şekil 4. 17. S1, S2, S3, S4 seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının beton ve Pb ile karşılaştırılma eğrisi.	80
Şekil 4. 18. İncelenen tüm numunelerin kütle soğurma katsayılarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1. Alümina seramiklerin bazı fiziksel özellikleri.	33
Çizelge 2. 2. Zirkonya seramiklerinin bazı fiziksel özellikleri.	34
Çizelge 3. 1. Kaynak, dedektör ve örneğin bulunduğu hücreleri oluşturan yüzeyleri gösteren bir örnek.	38
Çizelge 3. 2. Geometrideki hücreleri gösteren bir örnek.	39
Çizelge 3. 3. İnputtaki iki farklı malzemenin tanıtılması.	39
Çizelge 3. 4. İnputta SDEF kartının tanıtıldığı bir örnek.	40
Çizelge 3. 5. İnputta hücredeki ortalama akıyı hesaplayan dedektörün tanıtıldığı örnek.	41
Çizelge 3. 6. Hangi parçacığın izleneceğini tanımlayan mode kartına bir örnek.	41
Çizelge 3. 7. Bütün kartların tanımlandığı bir input örneği.	42
Çizelge 3. 8. Hücredeki akıyı ve yüzde hatayı veren output örneği.	43
Çizelge 3. 9. MCNP ile elde edilen I ve I/I_0 değerleri ve bu değerler ile elde edilen kalınlığa bağlı lineer soğurma katsayıları.	45
Çizelge 3. 10. Bu tez çalışmasında incelenen seramiklerin kimyasal bileşim oranları, yoğunlukları ve ortalama ağırlık değerleri.	48
Çizelge 3. 11. Programda kullanılan radyoaktif kaynaklar ve enerji değerleri.	49
Çizelge 4. 1. Alümina ve Zirkonya seramiklerinin lineer soğurma katsayıları.	51
Çizelge 4. 2. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin farklı bileşimlerinden oluşan ZTA seramiklerinin lineer soğurma katsayıları.	53
Çizelge 4. 3. Alumina ve Zirkonya seramiklerini yapısında bulunduran bazı önemli seramiklerin (S1, S2, S3 ve S4), karşılaştırma betonu ve Pb'nin lineer soğurma katsayıları.	55
Çizelge 4. 4. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin ortalama serbest yol değerleri. ...	60
Çizelge 4. 5. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin farklı bileşimlerinden oluşan ZTA seramiklerinin ortalama serbest yol değerleri.	62

Çizelge 4. 6. Alumina ve Zirkonya seramiklerini yapısında bulunduran bazı önemli seramiklerin (S1, S2, S3 ve S4), karşılaştırma betonu ve Pb'nin ortalama serbest yol değerleri.	64
Çizelge 4. 7. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin yarı-değer kalınlıkları.	67
Çizelge 4. 8. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin farklı bileşimlerinden oluşan ZTA seramiklerinin yarı-değer kalınlıkları.	68
Çizelge 4. 9. Alumina ve Zirkonya seramiklerini yapısında bulunduran bazı önemli seramiklerin (S1, S2, S3 ve S4), karşılaştırma betonu ve Pb'nin yarı-değer kalınlıkları.	70
Çizelge 4. 10. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin kütle soğurma katsayıları.	72
Çizelge 4. 11. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin farklı bileşimlerinden oluşan ZTA seramiklerinin kütle soğurma katsayıları.	75
Çizelge 4. 12. Alumina ve Zirkonya seramiklerini yapısında bulunduran bazı önemli seramiklerin (S1, S2, S3 ve S4), karşılaştırma betonu ve Pb'nin kütle soğurma katsayıları.	78

1. GİRİŞ

Gün geçtikçe artan sanayileşme ve kaydedilen teknolojik ilerlemeye de bağlı olarak başta nükleer enerji ve sağlık olmak üzere birçok alanda radyasyondan ve radyoaktif kaynaklardan daha fazla faydalanmak için çalışmalar hızla devam etmektedir. Sağlık alanında hastalıkların teşhis ve tedavisinde, enerji alanında nükleer santrallerde, endüstri alanında endüstriyel ürünlerin (borular, buhar kazanları, makine aksamaları vs.) herhangi bir hata içerip içermediklerinin tespitinde, tarım alanında tohum ıslahında, askeri alanda silah olarak ve tüketici ürünlerinde (televizyon, dedektör, paratoner vs.) olduğu gibi hemen hemen her alanda karşımıza çıkmaktadır. Radyasyonun kullanımının getirdiği çok sayıda faydaya karşın doğasında var olan yok edici ölümcül olabilme ihtimali insanoğlunu her zaman tedirgin etmiştir. Bu sebeple tüm nükleer uygulamalar için radyasyon güvenliği başka bir ifade ile radyasyondan korunma en öncelikli husus olmaktadır. Radyasyona gösterilen yoğun arz nükleer uygulamalar için optimum özelliklere sahip nükleer zırh malzemelerinin keşfi, tasarımı ve üretimini de önem arz eder hale getirmiş ve bilim insanlarının konuya ilişkin çalışmalara yoğunlaşmalarına sebep olmuştur. Farklı tür ve enerjili radyasyonlar için çok çeşitli materyallerin zırh malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacakları, kullanılabilir olanlar arasında en iyi özelliklere sahip olanın hangisi veya hangileri olduğu konuları üzerine yoğun bir araştırma sürecine girilmiştir.

Bu çalışmalar nükleer zırh veya yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilecek olan materyaller için kabiliyetleri hakkında bilgi verebilecek çeşitli parametrelerin deneysel olarak ölçülmesi veya WinXCom, MCNP-X, GEANT-4 gibi bilgisayar yazılımları kullanılarak hesaplanması üzerine yoğunlaşmışlardır. Aşağıda bu amaçla gerçekleştirilen ve literatüre kazandırılan çalışmaların bir kısmı tartışılmıştır.

Aygün vd. (2019), hazırlamış oldukları üç farklı yüksek alaşımlı paslanmaz çelik numunelerinin toplam hızlı nötron makroskobik tesir kesitlerini ve gama ışını kütle soğurma katsayılarını deneysel olarak ve GEANT4 Monte Carlo simülasyon

programını kullanarak elde etmişlerdir. Hem gama hem de nötronlar için elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Issa et al. (2019), radyasyon zırh malzemesi olarak $5\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}29\text{Na}_2\text{O}\text{-(}66\text{-}x\text{)B}_2\text{O}_3\text{-}x\text{Bi}_2\text{O}_3$ cam numunesini eriyik söndürme tekniği ile hazırlamışlardır. Numunenin radyasyon ile etkileşimini değerlendirmek için temel parametrelerden olan kütle soğurma katsayılarını MCNP-X simülasyon programında hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçların XCom ve XMuDat programlarından elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduklarını belirtmişlerdir.

Kaewjaeng et al. (2019), $(80\text{-}x)\text{B}_2\text{O}_3\text{:}10\text{SiO}_2\text{:}x\text{La}_2\text{O}_3$ camını eriyik söndürme tekniği ile hazırlamışlar ve bu camın X-ışını soğurma özelliklerini araştırmışlardır. Tüm sonuçlardan yola çıkarak hazırlanan kurşun (Pb) içermeyen gözlüklerin, tanısallık röntgen koruyucu malzeme için yüksek görünürlük potansiyeli olduğunu rapor etmişlerdir.

Aktaş et al. (2019), eriyik söndürme tekniği ile hazırladıkları krom oksit (Cr_2O_3) katkılı borosilikat (BS) camların 22.10-59.54 keV enerji aralığındaki radyasyon zırhlama özelliklerini araştırmışlardır.

Dong et al. (2019), Çin'deki bor içeren kaynakların kütle soğurma katsayılarını XCom ve Geant4 programları ile 0.001-20 MeV enerji aralığında araştırmışlardır. Ayrıca numuneler için yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu parametrelerini hesaplamışlardır. Demir içeren boronların maksimum kütle soğurma katsayılarına ve minimum etkin atom sayılarına sahip olduklarını rapor etmişlerdir.

Obaid et al. (2018), yedi tip kaya numunesi için kütle soğurma katsayılarını deneysel ve teorik olarak elde etmişlerdir. XCom ve MCNP5 simülasyon kodlarını kullanarak hesapladıkları değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

Verdipoor et al. (2018), silikon reçinesi, WO_3 , PbO , Bi_2O_3 mikro ve nano partiküllerine dayalı yeni koruyucu malzemeler tasarlayıp foton için kütle soğurma katsayılarını Monte Carlo yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. MCNP-X koduyla

kafes kartlar kullanarak 100 nm ve 1 µm büyüklüğünde mikro ve nano partikülleri bir silikon reçine matrisinin içinde tasarlamışlardır. Co-60, Cs-137 ve Ba-133 kaynakları için numunelerin kütle soğurma katsayılarını hesaplamışlardır.

Manjunatha et al. (2018), Alüminyum esaslı camı alaşımların X- ve gama ışınları için kütle soğurma katsayılarını, ortalama serbest yollarını, yarı-değer kalınlıklarını, ondabir-değer kalınlıklarını, etkin atom numaralarını, elektron yoğunluklarını belirlemişlerdir. X- ve gama ışınları için $Al_{60}Y_{33}Ni_5Co_1Fe_{0.5}Pd_{0.5}$ numunesinin nötronlar için ise $Al_{86}Y_7Ni_5Co_1Fe_{0.5}Pd_{0.5}$ numunesinin en iyi koruyucu özelliklere sahip olduklarını vurgulamışlardır.

Liu et al. (2018), düşük toksiteye sahip aynı zamanda iyi koruyucu özelliği olan malzemeleri elde etmeye çalışmışlardır. Bizmut tungstat (Bi_2WO_6) nano yapıların çeşitli sıcaklıklarda çok yönlü bir hidrotermal yöntem ile kontrol edilebileceğini rapor etmişlerdir. Daha az toksite nedeniyle Bi_2WO_6 nano tabakalarının düşük enerjili radyasyonlardan korunmak için kişisel koruyucu ürünlerin üretiminde kurşun esaslı malzemelerden daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Mahmoud et al. (2018), toz haline getirilmiş kurşun oksit nano parçacıkları ve dökme kurşun oksit ile doldurulmuş yüksek yoğunluklu polietilen polimer kompozitleri hazırlamışlardır. Radyoaktif nokta kaynaklardan yayımlanan gama ışınlarına karşı bu kompozitlerin radyasyon koruma özelliklerini araştırmışlardır. Polimerin koruyucu malzemenin ağırlığını azalttığını rapor etmişlerdir. Metal oksitli malzemelerin polimer kompozitinde ana radyasyon soğurucu olarak görev yaptıklarını ve esnekliği arttırdıklarını belirtmişlerdir.

Singh et al. (2018), gama ve nötron radyasyonları için ısıtıl işlem görmüş geleneksel ve yüksek yoğunluklu betonların zırhlama verimliliklerini araştırmışlardır. Çalışmada zırhlama parametreleri olan kütle soğurma katsayılarını, hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitlerini ve foton kuvvetlendirme faktörlerini (BF) hesaplamışlardır. XCom programı kullanarak hesaplanan kütle soğurma katsayıları MCNP-X sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarının yüksek sıcaklık

uygulamalarında kullanılan zırh betonlarının seçiminde faydalı olacağını vurgulamışlardır.

Ersundu et al. (2018), eriyik söndürme tekniği kullanılarak geliştirilen yeni bir ağır metal oksit $10\text{WO}_3\text{-xMoO}_3\text{-(90-x)TeO}_2\text{(HMO)}$ cam serisinin radyasyon zırh uygulamalarındaki potansiyellerini araştırmışlardır. Kütle soğurma katsayısı ve yarı-değer kalınlığı gibi gama zayıflama parametrelerini iyi bir iletim geometrisinde ölçmüşlerdir. Bu yeni cam numunesinin, diğer camlar, beton ve kurşun bazlı camlar ile karşılaştırıldığında mükemmel koruma özellikleri gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Kurudirek et al. (2018), Bi_2O_3 'ün gama ışını korumasına etkisini ve yüksek basınçlı sodyum lambalı camdan geri dönüştürülen borosilikat camların yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Cam numunelerinin kütle soğurma katsayıları, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu gibi parametrelerini farklı foton enerjileri için incelemişlerdir. Kütle soğurma katsayısı ve diğer parametrelerin Bi_2O_3 konsantrasyonuna bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Sayyed et al. (2018), bazı betonların, sepiyolit ve B_4C konsantrasyonuna karşı radyasyon zırhlama performanslarını 0.08-1.333 MeV'lik geniş bir enerji bölgesinde deneysel verileri, MCNP ve XCom sonuçlarını kullanarak rapor etmişlerdir. MCNPX ile elde edilen benzetilmiş verileri XCom sonuçları ve deneysel sonuçlarla da karşılaştırarak tartışmışlardır.

Akman et al. (2018), gümüş, bakır, kurşun, krom elementlerinden elde edilen $\text{Ag}_{92.5}\text{Cu}_{7.5}$, $\text{Ag}_{72}\text{Cu}_{28}$, $\text{Pb}_{94}\text{Cr}_6$, $\text{Pb}_{60}\text{Cu}_{40}$ alaşımlarının 81-1333 keV enerji aralığında kütle soğurma katsayılarını hesaplamışlardır. Deneysel sonuçların WinXCom ve MCNP-X simülasyon kodu sonuçları ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Issa et al. (2018), farklı oranlarda $\text{PbO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ karıştırılarak elde edilen cam numunelerin 0.015-15 MeV enerji aralığında kütle soğurma katsayıları, yarı-değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numaraları (Z_{eff}), etkin elektron yoğunlukları (N_{eff}) ve foton kuvvetlendirme faktörleri (BF) gibi farklı zırhlama parametrelerini WinXCom programını kullanarak elde etmişlerdir.

El-Khayatt. (2017), gama ışını kerma katsayısı k 'nın belirlenmesi için yarı deneysel bir formül geliştirmiştir. Bu formülü geliştirirken deneysel toplam kütle soğurma katsayısını ve teorik kısmi foton etkileşimi olasılıklarını temel almıştır. Bu yarı ampirik tekniği üç element için k 'nın yarı ampirik değerlerini ve farklı foton enerji değerlerinde 20 bileşik ve malzemeyi belirlemek için uygulamıştır. Ayrıca bu katsayının teorik değerlerini 1 keV ile 10 MeV enerji aralığında hesaplamıştır. Sonuçların tüm kerma katsayısı eğrilerinin malzeme türünden bağımsız olarak aynı eğilimi takip ettiğini rapor etmişlerdir.

Dong et al. (2017), $80\text{TeO}_2\text{-}5\text{TiO}_2\text{-(15-x) W0}_3\text{-xA}_n\text{O}_m$ camlarının gama ışını soğurma özelliklerini araştırmışlardır. Kütle soğurma katsayılarını, yarı-değer kalınlığını ve hızlı nötronlar için makroskobik etkili uzaklaştırma tesir kesitlerini WinXCom programını ve MCNP5 Monte Carlo kodunu kullanarak hesaplamışlardır.

Davis (2017), alüminyum, paslanmaz çelik ve polietilen plakalardaki heterojenliğin foton ve nötron geçişi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu malzemelerin heterojen kombinasyonlarının geliştirilmiş foton koruma veya nötron koruma sağlayıp sağlamadığını araştırmıştır. Sonuçların nötron koruyucuları olarak homojen malzemeye göre heterojen levhaların performansının kaynak enerjisine bağlı olduğunu göstermiştir.

Singh et al. (2017), çelik cüruf ve iki tip (yumuşak ve sert) demir cürufu kullanılarak hazırlanmış numuneler için gama radyasyon etkileşimi parametrelerini teorik olarak hesaplamışlar ve farklı enerjilerde deneysel olarak ölçmüşlerdir. Elde edilen sonuçlara dayanarak inşaat uygulamalarında olduğu gibi radyasyon zırhlamada da cürufun uçucu küllerden daha iyi agrega olduğunu göstermişlerdir.

Wu et al. (2017), düşük sıcaklıkta solvotermal yolla sentezlenen $\text{Pb}_3\text{B}_{10}\text{O}_{16}(\text{OH})_4$ formüllü kurşun borat bileşiklerinin, nötron ve gama radyasyonlarından korunmada oldukça etkili olduğunu göstermişlerdir.

Saeed et al. (2017), Baryum borat yoğunluklu cam sistemlerin nötron koruma özelliklerini deneysel olarak karakterize etmişlerdir. Sonuçlardan yola çıkarak

baryum borat camların radyasyon zırlama alanında pratik kullanımlar için uygun olduğunu göstermişlerdir.

Hatipoğlu (2017), Kırklareli mermeri, kalker tozu ve alüminyum numunelerinin gama soğurma katsayılarını Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynakların farklı enerjileri için karşılaştırmıştır. Kırklareli mermerinin ve basınç uygulanmış kalker tozunun lineer ve kütle soğurma katsayıları, yarı-değer kalınlığı (HVL) ve ondabir-değer kalınlığı (TVL) değerlerinin radyasyon zırhlayıcı malzeme özelliklerine bağlı olduklarını belirtmiştir.

Mostafa et al. (2017), hazırladıkları WO_3 bazlı $(100-x)(0.1B_2O_3-0.4P_2O_5PbO)-xWO_3$ bileşimindeki cam sisteminin gama ışını zırlama özelliklerini incelemişlerdir. Cam numunelerini kaynaktan yayımlanan gama ışınlarına maruz bırakmışlar ve geçen gama ışınlarını 3x3 inç NaI (TI) sintilasyon dedektörü ile saymışlardır. Elde edilen sonuçlardan hareketle cam numunelerinin kütle soğurma katsayıları, etkin atom numaraları ve etkin elektron yoğunluğu değerlerinin WO_3 'ün artmasıyla arttığını belirtmişlerdir.

Kurudirek (2017), ağır metal oksit borat (HMOB) camlarının gama, hızlı nötron ve yüklü parçacık etkileşimi için kütle soğurma katsayılarının, etkin atom numaralarının, foton kuvvetlendirme faktörlerinin ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitlerinin 662 keV enerjideki deneysel değerlerini MCNP simülasyon kodunu kullanarak doğrulamıştır. HMOB cam sistemlerin, sıradan ve hematit-serpantin betonlarından daha iyi koruma özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir.

Mann (2017), altı adet cam numunenin radyasyon zırlama davranışlarını 15 keV ve 15 MeV enerji aralığında araştırmış ve optik kalınlıkta bazı opak malzemelerle karşılaştırmıştır. Çalışmayı kütle soğurma katsayısı, eşdeğer atom numarası (Z_{eq}) ve foton kuvvetlendirme faktörü gibi çeşitli radyasyon zırlama parametrelerini hesaplayarak gerçekleştirmiştir.

Tellili et al. (2017), gama ışınlarına karşı zırlama malzemesi elde etmek için altı tip Cerrobend alaşımın gama ışını koruma parametrelerini incelemişlerdir. Cerrobend alaşımların gama ışını etkileşimlerini kütle soğurma katsayısı, yarı-değer

kalınlığı, ondabir-değer kalınlığı, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu açısından tartışmışlardır. Bu parametreleri Par Shield programını kullanarak 0.1 MeV ve 100 GeV enerji aralığında teorik yaklaşımla hesaplamışlardır.

Kaewkhao et al. (2017), $(90-x)\text{B}_2\text{O}_3-10\text{ZnO}-x\text{Bi}_2\text{O}_3$ sistemlerinin nötron koruma kabiliyetlerini Monte Carlo tekniklerini kullanarak (FLUKA ve GEANT4) ve deneysel olarak incelemişlerdir. Üretilen ince cam numunelerin nötron koruma kapasitesine sahip olduklarını göstermişlerdir.

Lakshminarayana et al. (2017), $(60-x)\text{B}_2\text{O}_3-10\text{Bi}_2\text{O}_3-10\text{Al}_2\text{O}_3-10\text{ZnO}-10\text{Li}_2\text{O}-(x)\text{Dy}_2\text{O}_3$ veya Tb_4O_7 ve $(60-x-y)\text{B}_2\text{O}_3-10\text{Bi}_2\text{O}_3-10\text{Al}_2\text{O}_3-10\text{ZnO}-10\text{Li}_2\text{O}-(x)\text{Dy}_2\text{O}_3-(y)\text{Tb}_4\text{O}_7$ kimyasal bileşimli çok bileşenli borat camları geleneksel eriyik söndürme tekniği ile elde etmişlerdir. Bu camların 0.015 MeV–15MeV enerji aralığında kütle soğurma katsayısı, yarı-değer kalınlığı, ortalama serbest yol gibi çeşitli parametrelerini elde etmişlerdir. Hazırlanan camların radyasyon koruyucu materyal olarak kullanılma potansiyellerinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Büyükyıldız et al. (2017), 304L paslanmaz çelik numuneleri için foton etkileşim parametreleri olan lineer soğurma katsayısı, kütle soğurma katsayısı, yarı-değer kalınlığı, ondabir-değer kalınlığı, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu, enerji emilimi ve foton kuvvetlendirme faktörlerini teorik ve deneysel olarak hesaplamışlardır. Teorik ve deneysel olarak elde edilen değerlerin uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Bakırhan (2017), kurşun maden atığı katkılı ağır betonların radyasyon soğurma katsayılarını 662-1460 keV enerji aralığında incelemiştir. Manyetit, Barit, Limonit ve Pasa agregalarını elde edilen sonuçlara göre kıyaslayarak manyetitin en yüksek radyasyon soğurma değerine sahip olduğunu belirtmiştir.

Can (2016), radyasyon zırhlamada yüksek yoğunluğu, toksit özelliği, işlenme zorluğu, esnek olmaması gibi dezavantajları olan kurşun elementinin yerine daha hafif, esnek, zararlı olmayan, kurşunun dezavantajlarını giderecek yeni bir radyasyon zırhlama malzemesi geliştirmek amacı ile polimer matrisi içine yüksek atom numaralı volfram metali ve volfram tuzları katarak kompozit malzeme üretmiştir.

Çalışmalar sonucunda geliştirilen kompozit malzemenin radyasyon zayıflatma özelliğinin kurşununkinin %60-%100' üne ulaştığını rapor etmiştir.

Ni et al. (2016), hızlı sertleşen materyalleri iki bileşenli bir poliüretan matris ve PbO'nun bir dolgu maddesi ile tek aşamalı olarak laboratuvar ölçekli bir yöntemle hazırlamışlardır. Dolgu içeriğindeki artış ile gama ışını koruma özelliklerinin arttığını ve gama ışınlarının enerjilerinin arttırıldığında materyalin koruyucu performansının artması için kalınlığın arttırılabileceğini vurgulamışlardır.

Vahabi et al. (2016), kütle soğurma katsayılarını, dozimetride potansiyel uygulamaları olan bazı polimerler için farklı gama ışını enerjilerinde Monte Carlo simülasyon kodunu kullanarak hesaplamışlardır. Kütle soğurma katsayısı değerleri için elde edilen simülasyon sonuçlarını mevcut deneysel veriler ve XCom programı sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Bagheri et al. (2016), 662 keV, 1.173 keV ve 1.332 keV enerjileri için lineer ve kütle soğurma katsayılarını, etkin atom numarasını, etkin elektron yoğunluğunu, ortalama serbest yollarını ve yarı-değer kalınlıklarını Baryum-Bizmut-Borosilikat camlarının onuncu değer kalınlığı için elde etmişlerdir. MCNP-4C' de elde edilen sonuçları XCom programı ve deneysel sonuçlar ile kıyaslayarak değerlendirmişlerdir.

Oto vd. (2016), kütle soğurma katsayısı, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve foton kuvvetlendirme faktörleri gibi bazı gama zırhlama parametrelerini, manyetit agregası olan ve olmayan betonlar için incelemişlerdir. Ölçümler 1,25 MeV gama fotonları kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakarak manyetit betonunun hızlı nötronlar ve gama ışınları için normal betondan daha verimli olduğunu göstermişlerdir.

Şişman (2015), tanısal incelemelerde radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılan bizmut ve kurşuna alternatif kompozit ürünler önermiş ve Monte Carlo simülasyon programı ile bu kompozitlerin kütle soğurma katsayılarını değerlendirmiştir. Simüle edilen 20 örnek ile Bizmut ve Kurşunun enerji-kütle soğurma katsayısı grafiklerini karşılaştırmıştır. Örneklerin büyük kısmında 50-90

keV enerji aralıklarında Bizmuta göre daha yüksek kütle zayıflatma değerlerini ve örneklerin 50-80 keV enerji aralıklarında Kurşuna göre de daha yüksek kütle zayıflatma değerlerini elde etmiştir.

Ruengsri et al. (2015), $x\text{BaO} \cdot (80-x) \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{RHA}$ ($x=30, 35, 40$) bileşimlerinde pirinç kabuğu külünü kullanarak ürettikleri boryum borosilikat camları eriyik söndürme tekniği ile hazırlamışlar ve bunların radyasyon zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. BaO konsantrasyonunun artması ve gama ışınlarının enerjilerinin azalması ile birlikte kütle soğurma katsayıları, etkin atom numaraları ve etkin elektron yoğunluklarının arttığını tespit etmişlerdir.

Oto et al. (2015), ^{133}Ba kaynaktan yayımlanan 81, 276, 302, 356 ve 383 keV enerjili ve ^{152}Eu kaynaktan yayımlanan 121, 244, 344, 444 ve 778 keV enerjili fotonlar için barit, manyetit, limonit, hematit ve serpantin cevherleri kullanılarak üretilen bazı pelet numunelerinin kütle soğurma katsayılarını HpGe dedektörünü kullanarak belirlemişlerdir. Cevherler arasında baritin kütle soğurma katsayısının en yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

Akçaalan (2015), standart, bor karbür katkılı ve sodyum pentaboratlı betonların kütle soğurma katsayılarını 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV foton enerjilerinde FLUKA Monte Carlo kodunu kullanarak hesaplamıştır. FLUKA Monte Carlo kodu kullanarak santimetre başına hesaplanan gama soğurma katsayılarını üç farklı malzeme için bulmuştur. Hesaplanan gama soğurma katsayılarının literatür ile uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Medhat et al. (2015), reaktif nükleer uygulamalar için oksit dispersiyonlu (ODS) çeliklerin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. 1 keV-100 GeV enerji aralığındaki fotonlar için ODS bileşimlerinin kütle soğurma katsayılarının hesaplanmasını WinXCom programıyla yapmışlardır.

Mostafa et al. (2015), mısır pirinci kabuğu silisinden eriyik söndürme tekniği ile elde edilen camların kütle soğurma katsayıları, yarı-değer kalınlığı vb. parametrelerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu camların gama ışını

radasyonuna ve nötronlara karşı iyi zırlama özellikleri gösterdiklerini rapor etmişlerdir.

Gülbiçim (2015), volkanik aktivite sonucu oluşan düşük yoğunluklu saf vermikülit yeni bir gama radyasyonu zırh malzemesi olarak incelemiştir. Vermikülitin gama radyasyonu zırlama özelliklerini, farklı oranlarda karıştırılmış bor katkılı vermikülit malzeme üzerinden ölçerek zırlama kapasitesindeki değişimi incelemiştir. Bunun için toplam lineer ve kütle soğurma katsayılarını Co-60, Eu-152, ve Ra-226 radyoaktif kaynaklardan yayımlanan çeşitli enerji değerlerindeki gama ışınlarını kullanarak deneysel olarak belirlemiştir. Aynı zamanda bunu XCom adlı bilgisayar programında da teorik olarak hesaplayarak karşılaştırmasını yapmıştır. Elde edilen sonuçlar ile vermikülitin gama radyasyonuna karşı yeni bir zırh malzemesi olarak tercih edilebileceğini göstermiştir.

Kurudirek (2014), içerisinde kurşun olan ve olmayan camlar ile betonların elektron ve fotonlarla etkileşimini 10 keV- 1 GeV enerji aralığında incelemiştir. Cam sistemlerinin yüksek enerji değerlerinde elektron etkileşimi bakımından betonların çoğundan daha üstün özelliklere sahip olduğunu rapor etmiştir.

Ertaş (2014), madeni atıklar ile hazırlanan beton örneklerin radyasyon soğurmada kullanılabilirliğini araştırmıştır. Barit, kireç taşı ve maden atığı agregaları ve bu agregaların değişik oranlarda karıştırılması ile üretilen beton plakaları üzerinde radyasyon soğurma deneyi gerçekleştirmiştir. Barit agregası, kireç taşı ve maden atığı agregalarının karışımından hazırlanan beton örneklerde barit miktarının azalmasına bağlı olarak radyasyon soğurma katsayılarının da azaldığını göstermiştir.

Singh et al. (2014), bizmut borosilikat (SO_x) $\text{SiO}_2:15\text{B}_2\text{O}_3:2\text{Al}_2\text{O}_3:10\text{CaO}:23\text{Na}_2\text{O}:x\text{Bi}_2\text{O}_3$ camlarının gama ve nötron zırlama özelliklerini araştırmışlardır. % 20 mol B_2O_3 içeren camların üstün bir zırlama özelliği gösterdiğini vurgulamışlardır.

Esfandiari et al. (2014), çeşitli safsızlıklara sahip altın, bronz ve su matrisleri ile ağır konsantrasyonları için element analizini ve kütle soğurma katsayılarını değerlendirmişlerdir. Bu parametreleri MCNP simülasyon kodunu kullanarak

hesaplamışlardır. MCNP kodu verilerini Medhat programı tarafından elde edilen deneysel verilerle ve WinXCom programı verileriyle karşılaştırmışlardır. Sonuçların uyum içerisinde olduğunu vurgulamışlardır.

Singh et al. (2014), C, Al, Si, P, S, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Mo elementlerinden belirli oranlarda alarak oluşturdukları karışımların kütle soğurma katsayılarını GEANT4, MCNP programlarında hesaplayarak WinXCOM programıyla karşılaştırmışlardır. GEANT4 ve MCNP programlarında hesaplanan değerlerin WinXCom değerleriyle iyi bir uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir.

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

Kaewjang et al. (2014), Gd_2O_3 bazlı $(80-x)B_2O_3-10SiO_2-10CaO-xGd_2O_3$ camlarını radyasyon zırhlama, fiziksel ve optik özellikleri bakımından incelemişlerdir. Kütle soğurma katsayılarının, etkin atom numaralarının ve etkili elektron yoğunluklarının deneysel değerlerinin Gd_2O_3 konsantrasyonunun artmasıyla ve ayrıca foton enerjisinin 662 keV' den 223 keV'e düşmesiyle arttığını gözlemlemişlerdir.

Daştan (2013), 1-aril-3 dibenzilamino-propan-1-on hidroklorür tipi Mannich bazlarını sentezlemiş ve sentezlenen bu bileşiklerin kütle soğurma katsayılarını hesaplamıştır. Sentezlenen bileşiklerin kütle soğurma katsayılarını 5,9 keV'de 182 eV enerji rezolüsyonuna sahip bir HPGe dedöktörü ile deneysel ve WinXCom bilgisayar programını kullanarak teorik olarak elde etmiştir. Deneysel ve teorik sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Özen (2013), demir cevheri, tufal, iki tür barit ve çelikhane cürufu ağır agregaları kullanarak ürettiği ağır betonların radyasyona karşı zırhlama özelliklerini değerlendirmiştir. Karışımların her birinden alınan ve çapı 15 cm kalınlıkları ise 6,15, 21 ve 30 cm olan numuneleri radyasyon soğurma katsayılarını belirlemek üzere

deneye tabi tutmuştur. Soğurma katsayılarının $0,265 \text{ cm}^{-1}$ ile $0,224 \text{ cm}^{-1}$ arasında kaldığını hesaplamış ve bu katsayıların belirlenmesinde belirleyici faktörün betonun birim ağırlığı olduğu sonucuna varmıştır.

Vega-Carrilla et al. (2013), 0.185 TBq PuBe-239 izotopik nötron kaynağı için bir kalkan tasarımı amacıyla MCNP5 kodunu kullanarak çeşitli Monte Carlo hesaplamaları yapmışlardır. İlk önce nokta benzeri bir kaynağı vakumda modellemişlerdir. Nötron spektrumu ve ortam dozu eşdeğerini, 5 cm ile 150 cm arasında değişen birkaç mesafede hesaplamışlardır.

Sharifi et al. (2012), 511, 662 ve 1332 keV gama ışını enerjilerindeki sıradan barit, serpantin ve çelik-manyetit betonlarının koruyucu özelliklerini MCNP-4C kodunu kullanarak bulmuşlar ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bütün betonlar için teorik ve deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir. Çelik-manyetit betonlarının diğer betonlara göre daha yüksek lineer ve kütle soğurma katsayılarına sahip olduklarını rapor etmişlerdir.

Çeçen (2012), pomzanın radyasyon zırhlama özelliklerini farklı enerjilerde kütle soğurma katsayılarını ölçmek sureti ile araştırmıştır. Am-241 ve Ba-133 radyoaktif kaynaklardan yayımlanan 59,5 keV, 80,9 keV, 295,5 keV ve 361,3 keV enerjili fotonlar için ölçülen deneysel sonuçlar ile Monte Carlo simülasyon kodu ve WinXCom programı kullanılarak hesaplanan teorik değerleri karşılaştırmıştır. Deneysel ve teorik değerler arasında bir uyum olduğu vurgulamıştır.

Müjde (2012), Türkiye'de kullanımda olan bazı tekstil ürünlerinin kütle soğurma katsayılarını farklı enerjili fotonlar için araştırmıştır. İncelenen tekstil ürünlerinin radyasyon soğurma özelliklerinin karşılaştırılması için sonuçları grafiksel olarak çizmiştir. Bu grafiklerde tekstil ürünlerinin radyasyon zırhlama özelliklerinde örneklerin tipine ve içeriğine bağlı olarak önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Polyesterin radyasyon soğurma özelliği bakımından akrilik ve pamuğa göre daha iyi olduğunu tespit etmiştir.

Yılmaz (2011), mineral katkılı ve mineral katkısız beton türlerinin 59,5 keV ve 661 keV enerjilerde kütle soğurma parametrelerini ve nötron soğurma tesir

kesitlerini hesaplamıştır. Laboratuvar ortamında lineer ve kütle soğurma katsayılarının ölçümünü yapmıştır. Deneysel gama ışını soğurma katsayılarını tabloştırmış ve WinXCom sonuçlarına dayalı hesaplanmış değerler ile karşılaştırmıştır. Deneysel ve hesaplanmış değerler arasında uyum olduğunu gözlemlemiştir.

Akkurt vd. (2011), çeliğin radyasyon zırlama özelliklerinin borlama işlemi ile nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Ayrıca AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin miknatıslanması üzerindeki borlama etkisini de araştırmışlardır. Bu amaçla çeliğin lineer soğurma katsayıları 662 keV, 1170 keV ve 1332 keV foton enerjilerinde ölçülmüş ve sonuçlar 1 keV-108 keV foton enerjilerindeki hesaplama ile karşılaştırılmıştır. Çeliğin hem miknatıslanma hem de radyasyon zırlama özelliklerinin borlama işlemiyle arttığını rapor etmişlerdir.

Akkurt vd. (2010), barit ve baritten üretilen betonlar için 662, 1173 ve 1332 keV’de kütle soğurma katsayılarını bir NaI(Tl) detektörü kullanarak ölçmüşlerdir. Elde edilen sonuçları standart koruyucu malzeme olan kurşun için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve Barit ($BaSO_4$)’in inşaatlarda kullanılan betona alternatif malzeme olarak doğrudan kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Erdem vd. (2010), metalurjik bir katı maddeden üretilen yeni bir koruyucu malzeme atık içeren kurşunu, gama radyasyonu için koruyucu malzeme olarak analiz etmişlerdir. Foton için toplam kütle soğurma katsayılarını hesaplamışlardır. Toplam kütle soğurma katsayılarının teorik ve deneysel değerlerini karşılaştırmışlar ve bu yeni malzemenin radyasyon zırlama da kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Kaundal et al. (2010), $PbO-SrO-B_2O_3$ camlarını eriyik söndürme tekniği ile hazırlamışlar. Cam numunelerin gama ışını zırlama özelliklerini değerlendirmek için XCom bilgisayar programını kullanarak kütle soğurma katsayılarını hesaplamışlardır.

Xu et al. (2010), Açık hücreli metal köpüklerin uygulanmasına dayanan yeni bir ultra hafif yapıyı gama ışınları ve termal nötronların zayıflatma kabiliyetini belirlemek için araştırmışlardır. Kaynatılmış suyla doldurulmuş köpüklerin

radasyon zayıflatma kabiliyetlerini dökme alüminyumun zayıflatma kabiliyetleri ile karşılaştırmışlardır.

Kaewkhao et al. (2010), Bi_2O_3 ve BaO içeren borat cam matrislerinin kütle soğurma katsayılarını ve ekranlama parametrelerini 662 keV enerjide incelemişler ve aynı cam yapısında PbO ile karşılaştırmışlardır. Bi_2O_3 , BaO ve PbO konsantrasyonunun artması ile tüm cam numunelerinin fotoelektrik emilimlerinin arttığını bundan dolayı da kütle soğurma katsayılarının arttığını rapor etmişlerdir.

Korkut (2010), Ülkemizde bulunan çeşitli bor yataklarından alınan üç farklı borlu cevher ile bor içeren beş farklı bileşiğin nötron radyasyonu zırhlama parametrelerini hesaplamıştır. Ölçüm ve hesaplamaların yapılmasında deneysel işlemlerin yanında Fluka Monte Carlo radyasyon transfer kodunu kullanmıştır. Bor ve Hidrojen konsantrasyonunun malzemenin nötron zırhlama özelliğini arttırdığını rapor etmiştir.

El-Khayatt. (2010), farklı kireç/silis oranlarını içeren betonların gama ışınları ve hızlı nötronlar için zayıflatma parametrelerini incelemiştir. Altı farklı beton numunesi için hesaplamalar yapmıştır. Elde ettiği sonuçlar ile betonun kireç/silika oranının radyasyon zırhlamada etkisi olduğunu göstermiştir.

Akkurt vd. (2010), farklı konsantrasyonlarda agrega halinde zeolit içeren betonlar için lineer zayıflatma katsayılarını ölçmüşler ve sonuçları teorik hesaplamalar ile karşılaştırmışlardır. Dört beton blok ile ölçülen lineer soğurma katsayılarının artan zeolit konsantrasyonu ile azaldıklarını rapor etmişlerdir.

Kirdsiri et al. (2009), kütle soğurma katsayılarını, toplam etkileşimli kesitleri ve $x\text{PbO}$ 'nun etkin atom numaralarını: $(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ cam sistemi karışım kuralı temelinde incelemişlerdir. Sonuçların WinXCom tarafından hesaplanan teorik değerlerle iyi bir uyum sağladıklarını göstermişlerdir. Kütle soğurma katsayılarının PbO muhtevasının artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir.

Han (2009), çeşitli foton enerjileri için 3d geçiş metallerini ve onların farklı kompozisyonlarındaki alaşımlarının toplam kütle soğurma katsayılarını ölçmüş ve

teorik k t le soğurma katsayılarını karışım kurallı dikkate alarak hesaplamıştır. Ayrıca toplam atomik ve elektronik tesir kesitlerini, etkin atom numaralarını ve etkin elektron yoğunluklarını bu k t le soğurma katsayılarını kullanarak deneysel ve teorik olarak belirlemiştir. Alaşımlar için deneysel olarak belirlenen k t le soğurma katsayısı değerlerinin WinXcom programında karışım kuralı temel alınarak hesaplanan teorik değerlerle uyumlu olduğunu rapor etmiştir. İncelenen alaşımlar için k t le soğurma katsayısı değerlerinin foton enerjisine ve alaşım içerisindeki 3d geçiş metallerinin konsantrasyonlarına bağlı olarak değiştiiğini göstermiştir.

Eakins (2009), yeni sağlık koruma ajansı termolim nesansın (TLD) göreceli tepkisini Monte Carlo kodu MCNP5'i kullanarak Cs-137 foton kaynakları için Narraw serisi X-ışını dağılımını ölçmüş ve MCNP-4C  l  mleri ile karşılaştırmıştır. Her iki programda ara enerjilerde uyumluluğun olduğunu fakat düşük enerjilerde farklılıkların olduğunu rapor etmişlerdir.

Krstic et al. (2009), topraktaki doğal radyoaktiviteden yayılan foton tarafından verilen etkili dozu hesaplamışlardır. Toprakta bulunan U-238, Yh-232 Serisi ve K-40'daki en yaygın doğal radyonüklidler için hesaplamalar yapmışlardır. Tüm organlarda biriken enerjiyi hesaplamak için bir ORNL insan fantomlarını ve Monte Carlo taşıma kodu MCNP-4B'yi kullanmışlardır.

Singh et al. (2008), Baryum-borat uçucu camların soğurma katsayılarını dar ışın iletim geometrisini kullanarak 356 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV'lik gama ışını foton enerjilerinde ölçmüşlerdir. Barium-borat uçucu camların koruyucu bakış açısına göre, standart radyasyon koruyucu betonlara ve normal baryum-borathl camlara kıyasla daha iyi kalkanlar olduğunu tespit etmişlerdir.

Turhan (2008), Borlanmış ve borlanmamış paslanmaz  eliklerin, Geiger-M ller sayacını kullanarak Co-60 ve Cs-137 gama kaynakları ile 652 keV ve 1250 keV enerjilerde 3 adet ölçüm alarak radyasyon soğurma katsayılarını ölçmüştür. Borlamanın radyasyon soğurma katsayısını olumlu yönde etkilediğini ve borla kaplanmış paslanmaz çeliklerin radyasyon zırhlamada daha etkili sonuçlar vereceğini belirlemiştir.

Han et al. (2008), demir, nikel ve krom ikili ve üçlü alaşımlarının 22,1 keV, 25 keV, 59,5 keV ve 88 keV enerjilerindeki kütle soğurma katsayılarını deneysel olarak hesaplayarak WinXCOM programındaki değerlerle karşılaştırmışlardır. Sonuçların uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir.

Kaçar (2006), yapılarda radyasyon kalkanı olarak kullanılan barit agregalı ağır beton elemanların zırh kalınlık hesaplarının belirlenmesini sağlamıştır. Ayrıca yoğunlukları sırası ile 11.35 gr/cm³, 3,2 gr/cm³ ve 2.35 gr/cm³ olan kurşun, baritli ağır beton ve normal betonun zırh malzemesi kalınlığının yoğunluk ile ters orantılı olarak azaldığını tespit etmiştir.

Haddad et al. (2005), uranil nitrat numunelerinin gama-spektrometrik analizinde kendi kendine zayıflatma düzeltmesi ve spektral çizgi yoğunluğu oranları arasındaki muhtemel korelasyonu deneysel olarak incelemişler ve MCNP kodunu kullanarak simüle etmişlerdir. Deneysel sonuçların ve MCNP simülasyon kodu sonuçlarının uyumluluk gösterdiklerini rapor etmişlerdir.

De Marco et al. (2002), sudaki mutlak doz oranını 10 keV ile 1 MeV enerjileri arasında monoenerjik nokta kaynakları için hava-kerma oranını simüle ederek MCNP Monte Carlo simülasyon kodu için düşük enerjili bir kriter oluşturmayı amaçlamışlardır. Analizde dört kesit veri setinin yanısıra çarpışma kermaversus absorbe edilmiş dozu için tally yöntemini karşılaştırmışlardır.

Zaidi (2000), Pozitron emisyon tomografisi için geliştirilen Monte Carlo simülasyon paketlerinde uygulanan farklı foton kesit kitaplıkları ve parametrelendirmeler ile Lawrence Livermore ulusal laboratuvarı Livermore tarafından geliştirilen ve en son değerlendirilen foton veri kütüphanesi (EPDL97) arasında karşılaştırma yapmışlardır.

Yukarıda sıralanan çalışmalar farklı radyasyon türleri için optimum özelliklere sahip zırh materyallerinin üretimi veya tespiti için bilim insanlarının yoğun bir uğraş içinde olduklarını açıkça ortaya koymaktadır.

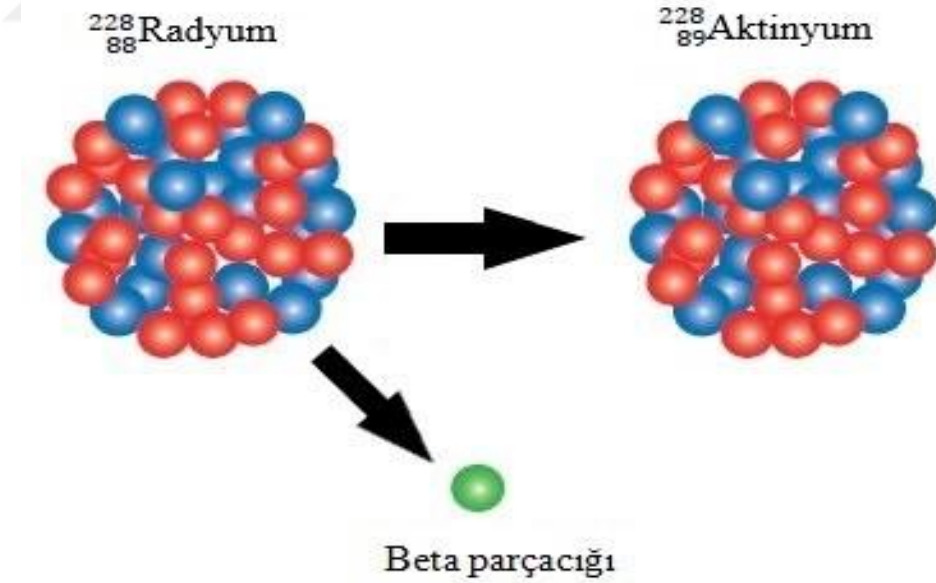
Radyasyon uygulamalarında geline aşama göz önüne alındığında zırhlama kabiliyeti yüksek kurşun (Pb) gibi malzemelere alternatif olabilecek yeni zırh malzemeleri tasarlamak, üretmek veya önermek önem arz etmektedir. Bu düşünceden hareketle bu çalışmada Zirkonya, Alumina ve bunların çeşitli kombinasyonları ile onlara yapılan çeşitli katkılar ile elde edilmiş seramiklerin nükleer zırh materyali olabilirlikleri MCNP-X kodu kullanılarak araştırılmıştır. Seramikler sahip oldukları yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılıkları, sertlikleri, hafiflikleri ve aşınmaya karşı dayanıklılıkları gibi özellikleri sayesinde yapı, elektrik-elektronik, mekanik ve uzay araçları gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte yukarıda da verilen literatür bilgisinden de anlaşıldığı üzere bu çalışmada incelenen seramiklerin radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında hesaplamalar Ba-133, Na-22, Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynakların bilinen ve çok kullanılan (276 keV, 303keV, 356 keV, 511 keV, 662 keV, 1173 keV, 1275 keV, 1332 keV) sekiz enerjisi için yapılmış ve sonuçlar WinXCom programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre incelenen seramikler arasından en iyi zırh malzemesini seçebilmek amacıyla ve araştırılan seramiklerin zırhlama kabiliyetleri hakkında kayda değer bir değerlendirme yapabilmek amacıyla hesaplanan tüm parametreler nükleer uygulamalarda yaygın bir şekilde zırh malzemesi olarak kullanılan bazı betonlar içinde hesaplanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Radyasyon

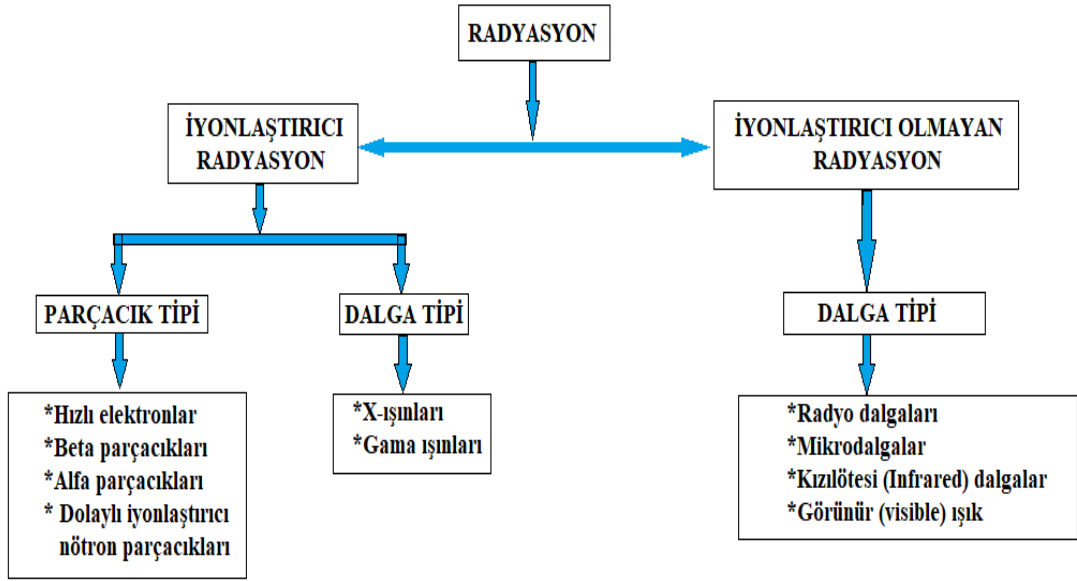
Doğada kendiliğinden ışın yayan maddelerin varlığı ilk kez 1896 yılında fransız fizikçi H.Becquerel tarafından uranyum tuzları üzerinde saptanmıştır. 1898 yılında da Pierre Curie ve Marie Curie tarafından Radiumun keşfini takiben, radyasyon kaynakları tıpta, sanayide, tarım ve bilimsel araştırmalarda artan bir hızla kullanılmaya başlanmıştır.

Radyasyon, radyoaktif çekirdeklerin (doğal ya da yapay) kararlı hale gelebilmek için dışarıya saldıkları elektromanyetik dalga veya parçacık biçimindeki fazla enerjidir. Atom çekirdeğinin kararlı hale geçebilmek için saldırdığı enerji foton olabileceği gibi kütlesi olan alfa ve beta parçacıkları da olabilir. Şekil 2.1 kararsız bir Radium çekirdeğinin bozunmaya uğrayarak kararlı Aktinyum çekirdeğine dönüşümünü göstermektedir.



Şekil 2. 1. Çekirdeğin kararlı hale geçişi

Radyasyon, temel olarak Şekil 2.2’de gösterildiği gibi iyonlaştırıcı olan ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılabilir.



Şekil 2. 2. Radyasyon tiplerinin şematik gösterimi.

2.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyonların enerjileri çok büyük olduğundan madde içerisine girerek atomların elektronlarını koparabilirler. İyonlaştırıcı radyasyon da kendi içerisinde parçacık ve dalga tipi olmak üzere ikiye ayrılabilir. Bunlar kütlesi olan alfa, beta, proton ve nötron gibi parçacık türü iyonlaştırıcı radyasyonlar ve yüksek enerjiye sahip mor ötesi ışınları, X-ışınları ve gama ışınları gibi iyonlaştırıcı özelliğe sahip fotonlardan oluşan elektromanyetik dalgalardır. Bütün canlılar doğal kaynaklardan yayımlanan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalabilirler.

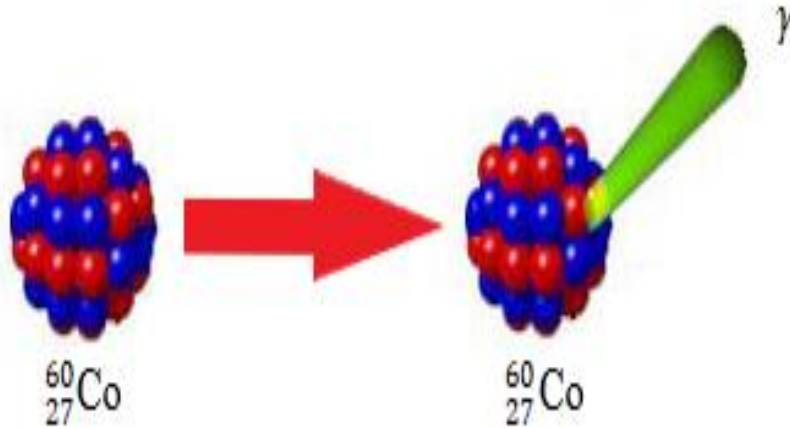
İki kez iyonlaşmış helyum (He^{++}) çekirdeğinden ibaret olan alfa parçacıkları büyük atom numaralı çekirdeklerden yayınlanırlar. Alfa parçacıkları bir ortamda hareket ederken atomlarla çarpışarak çok miktarda iyon oluştururlar. Bu iyonlaştırma sırasında enerji ve hızları azalır sonunda daha fazla iyonlaşmaya sebep olamadıkları hızlara ulaştıkları anda elektron yakalayarak nötr atomlar haline gelirler. Alfa parçacıklarının giricikleri oldukça azdır. Alfa bozunması Coulomb etkisinin sonucudur. Kütle numarası büyük çekirdeklerde, itici Coulomb kuvveti çekirdeğin bağlanma kuvvetinden daha hızlı artar. Kararlı hale ulaşmaya çalışan çekirdekteki pozitif yük miktarı azalmalıdır ve bu azalma için çekirdek alfa parçacığı yayınlamayı

tercih eder. Çünkü alfa yayınlaması için çekirdek dışarıdan enerji almaya gerek duymaz, bozunma kendiliğinden gerçekleşir. Alfa parçacığı çok kararlı ve sıkı bağlı yapısı nedeniyle kendisini meydana getiren bileşenlerin kütlelerine kıyasla nispeten küçük bir kütleye sahiptir. Alfa parçacığı yayımlandığı anda sistemin kütlesindeki azalmadan kaynaklanan enerji serbest kalır. Alfa parçacığının kendiliğinden yayınlaması olarak adlandırılan olay incelenirken, serbest kalan bu enerji bilinen kütleler kullanılarak hesaplanabilir (Ünlü et al., 2014).

Üç çeşit beta bozunması vardır. Bunlar elektron yayınlaması, pozitron yayınlaması ve elektron yakalanması işlemleridir. Pozitronlar yük miktarı ve büyüklükleri bakımından elektronlarla aynı olan ancak pozitif yük taşıyan antiparçacıklardır. Bir radyoaktif çekirdek beta bozunumu yaptığında, ürün çekirdek, ana çekirdekle aynı sayıda nükleon içerir. Bu nedenle bu üç parçalanma izobarik geçişler olarak adlandırılır. Bozunma sırasında nükleon sayısı değişmezken, yük miktarları bir birim değişecektir. Alfa parçacıklarının çekirdeğin içinde önceden bulundukları düşünülürken, beta bozunmasında ortaya çıkan elektron ve pozitronun bozunma anında üretildiğinin düşünülmesi önemli bir kabuldür. Çekirdekten çıkan alfa parçacık grupları tek enerjili iken, yapılan deneyler beta parçacıklarının çeşitli enerji değerlerinde yayımlandıklarını göstermiştir. Bu sonuç bozunan çekirdeğin her seferinde farklı enerjide elektron yayınladığını akla getirmektedir. Bununla birlikte elektronların kinetik enerjilerinin sistemdeki kütle azalması ile dengelenmesi, dolayısı ile reaksiyonun Q bozunma enerjisi değeri ile uyum içinde olması gerekmektedir. Bozunan tüm çekirdeklerin ilk kütleleri aynı olduğundan her bozunmanın Q değerinin aynı olması gereği ortadayken elektronların farklı kinetik enerjilere sahip oluşları bilinen teorilerle açıklanamaz. Dahası bu parçalanmalarda momentumun korunumu prensibi de ihlal ediliyor gibi görünmektedir. Deneysel ve kuramsal olarak devam eden çalışmalar sonunda, bu bozunmalar sırasında çekirdekten nötrino adı verilen ve oldukça girici olduğu için taşıdığı enerjinin tespit edilmesine imkân vermeyen bir parçacığın yayımlandığı ileri sürülmüştür. Nötrinoların elektrik yükleri yoktur ve nötrinolar elektronla karşılaştırıldıklarında dahi ihmal edilebilecek kadar küçük bir kütleye sahiplerdir. Oldukça girici olan bu parçacıkların madde ile etkileşimlerinin zayıf olması gözlenmelerini oldukça

güçleştirmiştir. Bu nedenle varlıkları 1930 da önerilen parçacıkların deneysel olarak gözlemlenmesi ancak 1956 yılında mümkün olmuştur. Artık nötrinoların söz konusu eksik enerjiyi taşıdıkları bilinmektedir (Ünlü et al., 2014).

Gama ışınları kısa dalga boylu elektromanyetik dalgalarlardır. Gama ışınları elektromanyetik dalga oldukları için yayılmaları için bir ortama ihtiyaç duymazlar ve boşlukta ışık hızı ile yayılırlar. Gama ışınları herhangi bir cisim ile etkileşime girmedikleri müddetçe enerjilerini kaybetmezler. Bir çekirdek radyoaktif bozunma gerçekleştirerek alfa veya beta gibi parçacıklar yayımlayarak başka bir çekirdeğe dönüşür. Bu ortaya çıkan çekirdek kararsızdır yani fazla enerjiye sahiptir. Çekirdek bu fazla enerjiyi atıp kararlı hale geçmek için gama ışınımı yapar. Yani gama ışınları alfa ve beta bozunumlarından dolayı kararsız olan çekirdeğin kararlı hale gelmesi için yapılan ışımalardır. Bir gama ışını yayınlanma süreci Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2. 3. Gama ışıması.

2.1.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonların enerjileri çok küçük olduğundan madde içerisine girmeleri ve maddede kalıcı hasar bırakmaları zordur. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlara görünür ışık, radyo dalgaları ve mikro dalgalar örnek olarak verilebilir.

2.2. Radyasyondan Korunma

Radyasyonun tüm canlılar hatta cansız maddi materyaller üzerindeki olumsuz ve tahrip edici etkileri radyasyondan korunma için tedbirler alınmasını gerekli kılar. Radyasyondan korunmanın kurallarını zaman, mesafe ve zırhlama olarak sıralayabiliriz.

Zaman Kuralı: Özellikle hastahanelerdeki görüntüleme cihazlarının bulunduğu ortamlarda çalışanlar ve nükleer santral gibi radyasyonun fazla olduğu ortamlarda çalışanlar yani radyasyon kaynaklarının yakınında çalışmak zorunda olanların bu alanlarda geçirdikleri süre ile maruz kalacakları radyasyon dozu artmaktadır. Çünkü bir radyasyon kaynağından alınan doz, doz hızı ile orada geçirilen zamanın çarpımına eşittir. Bu yüzden radyasyon kaynağı ile geçirilen süre ne kadar az olursa maruz kalınacak doz miktarı da o kadar az olur.

Mesafe Kuralı: Bir radyasyon kaynağına ne kadar yaklaşıldığında maruz kalınacak doz mesafenin karesiyle ters orantılı bir şekilde artar. Bu yüzden radyasyonun yoğun olduğu ortamlardan uzaklaşmak ve radyasyon kaynağına olan mesafeyi arttırmak radyasyondan korunmada önemlidir.

Zırhlama Kuralı: Radyasyon kaynağı ile radyasyondan etkilenme durumu olan kişiler arasına radyasyon tutucu malzemeler konulmasına zırhlama denir. Aynı şekilde radyasyon yayan kaynakların çevresini de radyasyon tutucu malzemeler ile çevreleme olayına da zırhlama diyebiliriz. Radyasyonun şiddetini azaltan malzemeler kullanarak radyasyondan korunulabilir. Zırh malzemesi olarak adlandırılan bu tür materyallerin zırhlama özelliği yoğunluklarıyla doğru orantılıdır. Yani malzeme ne kadar yoğun ise zırhlama özelliği de o oranda artmaktadır. Ayrıca malzemenin kalınlığı da aynı şekilde radyasyonun tutulmasında önem teşkil etmektedir (Yaramış, B., 1985).

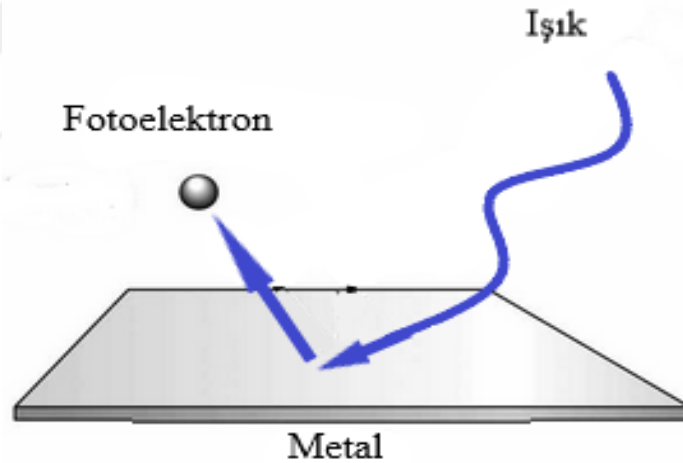
2.3. Radyasyon-Madde Etkileşmesi

Radyasyonun madde ile etkileşimi madde atomlarının elektronları veya çekirdek alanı ile gerçekleşir. Bu etkileşim elastik, inelastik saçılma ya da fotonun tamamıyla absorpsiyonu şeklinde olabilir. Radyasyonun madde ile etkileşiminde

gözlenen en temel olaylar: fotoelektrik soğurma, compton saçılması ve çift oluşumdur.

2.3.1. Fotoelektrik Olay

Fotoelektrik olay yeter frekanslı bir radyasyonun bütün enerjisini kaybederek atomdan elektron koparması olayıdır. Böylece bir iyon çifti meydana gelir. Meydana gelen elektronlara fotoelektron denir. Şekil 2.4’de ışığın metalden elektron koparması olayı ve metalden kopan elektron gösterilmiştir. Fotoelektrik absorpsiyon radyasyonun enerjisinin (0,5 MeV’den daha az) ve içinden geçtikleri maddenin atom numarasının büyüklüğü ile orantılı şekilde hızla artar. Fotoelektrik absorpsiyon olasılığı yaklaşık $Z^5/E\gamma^{7/2}$ ’dir. Foton enerjisi yardımı ile metalden elektron koparılması işlemi olan fotoelektrik olayda yeterli enerjiye (frekans, dalga boyuna) sahip fotonun bütün enerjisi soğurulur ve atomdan fotoelektron adı verilen bir elektron atılır (Yaramış, B., 1985).



Şekil 2. 4. Fotoelektrik Olay

Gelen gama radyasyonunun enerjisi $h\nu$ ise fotoelektrik absorpsiyonda Einstein bağıntısı:

$$h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

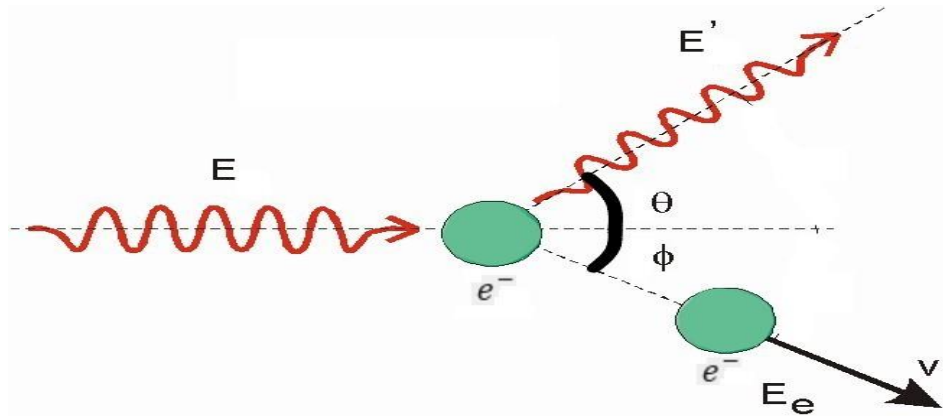
Burada $h\nu$ metal üzerine gelen fotonun enerjisi W , elektronun çekirdeğin elektrik alanından koparılması için gereken enerjidir ve iş fonksiyonu olarak da adlandırılır. $\frac{1}{2} mv^2$ ise koparılan elektronun kinetik enerjisidir. h planck sabiti olup değeri $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s' dir. Eğer $h\nu = W$ ise, fotoelektronların hızı sıfırdır. O halde minimum bir ν_0 frekansı vardır ki, bundan daha küçük frekanslı bir radyasyon için fotoelektrik olay meydana gelmez. Buna göre yukarıdaki denklem

$$h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2} mv^2 \text{ veya } \frac{1}{2} mv^2 = h(\nu - \nu_0) \quad (2.2)$$

olur ve ν_0 'a eşik frekansı denir ve metalin cinsine bağlıdır.

2.3.2. Compton Olayı

Compton olayında belirli bir E enerjisine sahip foton madde üzerine gönderildiğinde başlangıçta durgun kabul edilen atomik elektron ile çarpışır ve bu çarpışma sonucunda foton daha küçük bir E' enerjisine sahip olarak geliş doğrultusundan farklı bir yönde saçılır. Foton enerjisinde meydana gelen azalma elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. Compton saçılmasının şematik gösterimi Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2. 5. Compton Saçılması

Şekil 2.5 dikkate alınarak enerji ve momentum korunumundan hareketle saçılan fotonun enerjisi;

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.3)$$

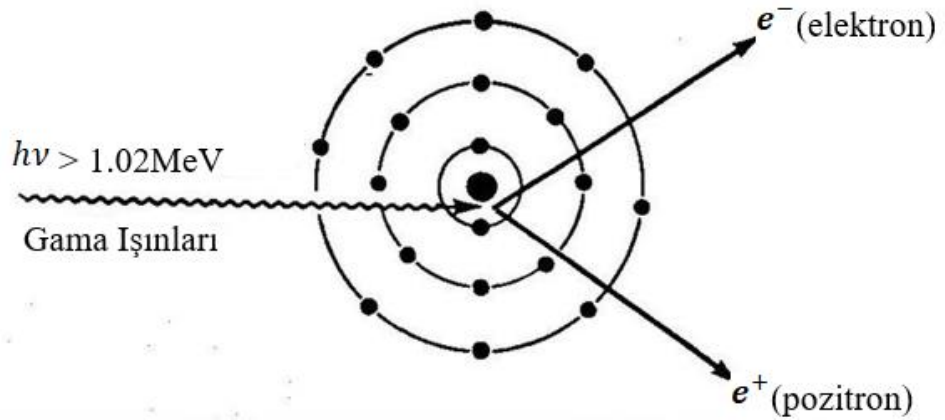
şeklinde yazılır. Bu ifade de E' , saçılan fotonun enerjisi θ , saçılma açısı ve $m_0 c^2$ ise elektronun durgun kütle enerjisidir ve dalga boyu farkı için;

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c (1 - \cos \theta)} \quad (2.4)$$

ifadesi elde edilebilir. Compton olayında gelen fotonun dalga boyunda meydana gelen değişim $\Delta\lambda$, sadece saçılma açısına bağlıdır, gelen fotonun dalga boyundan veya enerjisinden bağımsızdır (Yaramış, B., 1985).

2.3.3. Çift Oluşumu

Çift oluşumu atom üzerine gelen γ -ışınının enerjisi $2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$ MeV'den daha büyük ise gerçekleşir. Bu enerji bir elektron-pozitron çiftinin meydana gelmesi için gerekli minimum enerjidir. Bu değerden büyük enerjili bir γ -ışını güçlü bir alandan (örneğin çekirdek alanından) geçerken bir elektron-pozitron çifti oluşur. Eğer gelen γ -ışınının enerjisi $1,022 \text{ MeV}$ 'den daha büyük ise kalan enerji parçacıklara kinetik enerji olarak aktarılır. $1,022 \text{ MeV}$ 'den daha büyük enerjili bir gama ışını için çift oluşum olayının şematik gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2. 6. Çift Oluşumu

2.4. Elektromanyetik Radyasyonun Soğurulması

Hangi tip radyasyon olursa olsun, radyasyon yayıldığı ortama enerji aktararak çeşitli etkileşimlere neden olur. Fotonların maddede azalmasına ve malzemenin enerji depolanmasına neden olan baskın etkileşimler Fotoelektrik etki, Compton saçılması ve Çift üretim olaylarıdır. Bu etkileşimlere ek olarak fotonlar, madde ile etkileşime girdiklerinde Thomson saçılması, Rayleigh saçılması, Delbruck saçılması, Nükleer rezonans saçılması, Nükleer foto parçalanması ve Meson üretimi de gerçekleştirir. Saçılma etkileşimlerine, bu etkileşimlerdeki fotonların azalması ve malzemenin enerji depolanmasının ihmal edilecek kadar küçük olması nedeniyle zayıf etkileşimler denir. Bununla birlikte, kalkan tasarımlarında ve radyasyondan korunma uygulamalarında yüksek enerjili nükleer foto parçalanma ve meson üretimi de dikkate alınmalıdır (Alım et al., 2020).

2.4.1. Foton Soğurma Parametrelerinin Teorisi

Fotonların madde ile etkileşimleri, yüklü parçacıkların etkileşimlerinden oldukça farklıdır. Fotonlar materyale girdiğinde, bazıları emilir, bazıları etkileşimi olmadan iletilir ve bazıları düşük enerjili fotonlarda olduğu gibi birincil fotondan farklı yönler dağılır. Bu işlemlerin meydana gelme olasılığı büyük ölçüde olayın foton enerjisine, koruyucu malzemeye ve deneysel koşullara bağlıdır (Alım et al., 2020).

2.4.1.a. Lineer soğurma katsayısı (μ)

Herhangi bir dar-ışın iletim geometrisinde veya MCNP simülasyon ortamında oluşturulan deney sisteminde monoenerjik (tek frekanslı) fotonların yoğunluğundaki değişim, malzeme kalınlığının azalan bir fonksiyonu olarak aşağıdaki denklem ile verilebilir:

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I \quad (2.5)$$

Bu eşitlikte μ ilgilenilen herhangi bir foton enerjisi için malzemenin toplam lineer azaltma katsayısıdır. Fotonların tamamı aynı enerjiye sahiplerse (monoenerjik bir demet) ve fotonlar ideal geometri koşulları altında azalıyor (demet dar ve saçılan fotonları içermiyorsa) x kalınlığındaki bir soğurucuyu geçen (yani malzeme ile herhangi bir etkileşime yapmayan) fotonların yoğunluğu ($I(x)$) aşağıdaki eşitlik ile verilebilir:

$$I(x) = I_0(e^{-\tau x})(e^{-\sigma x})(e^{-\kappa x}) = I_0 e^{-(\tau + \sigma + \kappa)x} = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte $I(x)$ malzemeden soğurulmadan geçen monoenerjik fotonların yoğunluğu, I_0 malzemeye gelen monoenerjik birincil fotonların yoğunluğu, τ fotoelektrik olayın meydana gelme ihtimaliyet katsayısı, σ Compton saçılmasının meydana gelme ihtimaliyet katsayısı, κ çift oluşum meydana gelme ihtimaliyet katsayısı ve μ (cm^{-1}) malzemenin toplam lineer soğurma katsayısıdır. Lineer soğurma katsayısı, herhangi bir foton enerjisinde malzemenin gelen monoenerjik fotonlar ile birim kalınlık (uzunluk) başına toplam etkileşim olasılığı olarak tarif edilir ve birim zamanda radyoaktif atomların dönüşüm olasılığı olarak tanımlanan radyoaktif bozunma sabiti (λ) ile eş anlamlıdır (Alım et al., 2020).

2.4.1.b. Kütle soğurma katsayısı (μ_m)

Kütle soğurma katsayısı, bir zırh malzemesinin monoenerjik bir foton ile birim hacim başına toplam etkileşim olasılığı olarak tarif edilir ve lineer soğurma katsayısının malzemenin yoğunluğuna oranı ile elde edilir. Kütle soğurma katsayısı (μ_m ; cm^2/g), malzemelerin foton zırlama performanslarını değerlendirmek için en yararlı foton-madde etkileşim parametresidir. Kütle azaltma katsayıları saçılma etkileşimleri de dahil olmak üzere tüm etkileşim süreçlerini yapısında içerdiği için hem gelen foton enerjisine hem de soğurucu malzemenin yapısına bağlıdır. Malzemelerin kütle soğurma katsayıları aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) = \frac{\ln(I_0/I)}{\rho x} = \frac{\ln(I_0/I)}{t_m} \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte I malzemeden soğurulmadan geçen fotonların yoğunluğunu, I_0 malzemeye gelen birincil monoenerjik fotonların yoğunluğu, ρ (g/cm³) malzemenin yoğunluğu, x (cm) malzemenin kalınlığı, $t_m=m/A$ (g/cm²) malzemenin birim alan başına kütle miktarı veya malzemenin kütle kalınlığı, m (g) malzemenin kütlesi ve A (cm²) foton etkileşim yüzey alanı. İki veya daha fazla element içeren herhangi bir kompozit malzeme için kütle soğurma katsayısı karışım kuralı ile aşağıdaki eşitlikteki gibi verilebilir (Jackson ve Hawkes, 1981).

$$\mu_m = (\mu/\rho) = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (2.8)$$

Bu eşitlikte w_i ve $(\mu/\rho)_i$ sırasıyla malzemedeki i . elementin ağırlıkça birleşim kesri (ağ. %) ve ilgilenilen monoenerjik foton enerjisi için kütle soğurma katsayısıdır. w_i aşağıdaki eşitlik ile verilebilir:

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_i a_i A_i} \quad (2.9)$$

Bu eşitlikte a_i ve A_i sırasıyla malzemedeki i . elementin mol kesri (mol %) ve atomik kütlesidir.

2.4.1.c. Ortalama serbest yol (MFP)

Birimi cm olan ortalama serbest yol parametresi, foton-madde etkileşimi esnasında madde içinde ilerleyen fotonların ard arda meydana gelen iki etkileşim arasındaki ortalama mesafe olarak tarif edilir. Ayrıca relaksasyon uzunluğu (λ) olarak da adlandırılabilir ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (Alım et al., 2020):

$$MFP = \lambda = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (2.10)$$

2.4.1.d. Yarı-değer kalınlığı (HVL)

Yarı-değer kalınlığı, herhangi bir malzeme ile etkileşen monoenerjik fotonların malzemeye girmeden sahip oldukları başlangıç yoğunluklarını (I_0) yarıya indirmek ($I = I_0/2$) için gerekli zırh malzemesi kalınlığına denir. Bir malzemeye gelen fotonların yarı kalınlıkta üstel olarak azalmasını gösteren kullanışlı bir parametre olduğundan dolayı birçok radyasyon uygulama alanlarında tercih edilen bir parametredir. Herhangi bir malzemenin monoenerjik bir foton için yarı-değer kalınlığını veren ifade aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılabilir:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu X_{1/2}} \quad (2.11)$$

Bu verilen eşitlik çözüldüğünde yarı-değer kalınlığı aşağıdaki eşitlikteki gibi verilir:

$$X_{1/2} = HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (2.12)$$

Bu eşitlikte verilen μ (cm^{-1}) malzemenin incelenen monoenerjik foton için lineer soğurma katsayısıdır (Alım et al., 2020).

2.5. Seramikler

Tarihi ilk uygarlıklara kadar uzanan seramik, çok yüksek sıcaklıklarda pişirilmiş toprak olarak bilinir. İlk üretim şekliyle ilgili bir rivayet; su ihtiyacını karşılamaya çalışan insanoğlunun yağmuru uzun süre üzerinde tutabilen bir toprağı keşfi ile başlamaktadır. Suyu uzun süre muhafaza edebilen ve çok az geçiren sonradan kil olarak adlandırılacak bu toprak ile su kapları yapılmıştır. Bu kaplardan biri kazara yanan bir ateşe düşürülmüş ve ateş söndüğünde kabın çok güzel bir seramik çanağa dönüştüğü keşfedilmiştir.

Seramiğin Anadolu'da M.Ö. 6000 yıllarında üretildiği bilinmektedir. Çatalhöyük'te yapılan kazı çalışmaları sırasında elde edilen seramik parçaları, üzerinden 8000 yıl geçmesine rağmen bozulmadan günümüze kadar ulaşmıştır. Bu seramik kalıntıları insanlık tarihi ile ilgili önemli bilgiler veren en değerli

kaynaklardan olmuşlardır. Üzerinden asırlar geçmesine rağmen bozulmadan günümüze ulaşan bu seramik kalıntıları üzerindeki resim, yazı ve semboller sayesinde önceki uygarlıkların yaşam şekilleri ve kültürel farklılıkları ile ilgili bilgi edinilmiştir. İlk sırlı seramiğin Mısır'da M.Ö 4000 yıllarında yapıldığı ve ilk çanak çömlek tipi seramiklerin M.Ö. 6000 yıllarında Anadolu'da bulunduğu tespit edilmiştir. Anadolu ve Mısır'dan sonra seramik sanatı Girit adasına yayılmıştır.

Sümerler tarafından Mezopotamya'da M.Ö. 3500 yıllarında pişmiş tuğla ile yapılmış saraylar ve yollar olduğu, yine M.Ö 1200 yıllarında pişmiş tuğla kullanılarak yapılan Babil kulelerinin ve Babil saraylarının olduğu bilinmektedir. Mısır piramitlerinin iç kısımları tuğla ile örülmüştür. Roma uygarlığı döneminde tuğla çok büyük gelişme göstermiştir. Lidya, Hitit, Urartu, Frigya ve Roma uygarlıklarının şifreleri, çoğunlukla seramikler sayesinde çözülmektedir.

İtalya'nın Faenza şehrinde M.S. 12. yüzyılda, Mayorka adalarında daha ileri teknikler ve teknoloji ile üretimler başlamış, çini üretiminde ise 17. yüzyılda gelişmeler yaşanmıştır. Hollanda'da, Fransa'da ve Almanya'da bazı fabrikalar büyük boyutlarda seramik ürünler üretmeye başlamıştır.

Almanya'nın Meissen şehrinde seramiğin ilk fabrikasyon üretimi başlamış, porselen fabrikaları ise ilk olarak Fransa'nın Sevr şehrinde, sonra da Petersburg'da, Kopenhag'da 1770 yılında ve İngiltere'de 1794 yılında kurulmuştur. Seramik bugün ise binaların iç ve dış yüzeylerinde ve zemin kaplamalarında sıkça kullanılan bir dekorasyon malzemesidir.

Seramik doğadan elde edilen kil, kaolin, kuvars ve feldspat maddelerinin belirli oranda karıştırılması ile elde edilir. Bu maddeler hamur haline getirildikten sonra preslenir ve 1100 derecenin üzerinde yüksek sıcaklıkta fırınlanır. Seramiklerin ön yüzü sır dediğimiz koruyucu bir tabaka ile kaplanır. Seramik, doğadan, doğal yollar ile elde edilen maddelerden üretildiği için sağlıklı ve ekolojik (çevreye zarar vermeyen) bir üründür (Çalışkan, F., 2010).

Seramiklerin bazı önemli özellikleri aşağıda sıralanmıştır

- Seramikler yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır.
- Seramikler çok sert olabilirler.
- Metallere göre daha hafiftirler.
- Hammadde kaynağı bol ve metallere göre ucuzdur.
- Erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklıdır.
- Oksitlenmeye karşı dirençlidirler.

Seramiklerin bazı kullanım alanları

- Yapı Seramikleri (Tuğla, Kiremit, duvar ve Yer Kaplama Plakaları, Su ve Kanalizasyon Boruları, Sağlık Gereçleri)
- Ev Eşyası Seramikleri (Saksı, Çanak-çömlek, Süs Eşyaları, Sofra Seramiği)
- Elektrik (Şalter ve Sigorta Parçaları, Alçak-Yüksek Gerilim İzolatörleri)
- Elektronik Seramikler (Manyetik, Dielektrik, Piezo Elektrik Seramikler)
- Refrakter Seramikler (Ateş, Silika, Bazık, Karbon Tuğla, Grafit, Ateş Çimentosu)
- Aşındırıcı Seramikler (Zımpara Taşları ve Tozları, Sentetik Elmas)
- Bio Seramikler (Seramik Kemikler, Protezler, Dişler)
- Mekanik Seramikler (Piston, Motor Gövdesi)
- Ser-met' ler (Seramik Metal Karışımı Parçaları)
- Uzay Araçları Seramikleri (Isı ve Sürtünmeye Dayanıklı Kılıflar, Uçuş Pist Platformları)

- Süper İletken Seramikler (Enerji İletimi Sistemleri)
- Nükleer Seramikler (Nükleer Yakıt Sistem Seramikleri, Radyasyona Karşı Ağır Betonlar)

şeklindedir. Bu çalışmada Alümina ve Zirkonya tabanlı seramikler incelenmiş olup Alümina ve Zirkonya ile ilgili bazı bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.5.1. Alumina (Al_2O_3)

Alümina ticari olarak ilk kez 1907’de yüksek alümina seramik üretimi ile kullanıma başlanmış ancak geniş çapta ticari kullanımı ve üretimi 1930’lu yılların başlarında gerçekleştirilmiştir.

Saf Alümina’nın düşük sıcaklıklarda farklı formları mevcuttur. Fakat bütün formlar kristal boyutu, zaman ve atmosfere bağlı olarak 750-1200°C sıcaklıkları arasında $\alpha-Al_2O_3$ ’e dönüşür. 1600°C’nin üzerinde gerçekleştirilen ısıtma işlemi bu dönüşümü hızlandırır. Alüminanın α fazına dönüşümü tersinir değildir (Çalışkan, F., 2010).

Alümina, iyi bir sertliğe, yüksek refrakterliğe ve kimyasal kararlılığa sahiptir. Bununla beraber, mukavemeti ve kırılma tokluğu oldukça düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet bariz bir şekilde düşer (Çalışkan, F., 2010). Termal şok dayanımı düşüktür. Son 10 yılda yüksek sıcaklıklarda kullanım amaçlı toklaştırılmış Alüminalar geliştirilmiştir. Alümina tiraci olarak buji ve laboratuvar malzemelerinde kullanılmıştır. Günümüzde alümina bilhassa yüksek sıcaklık fırınlarında geniş çapta kullanılmaktadır. Bunun dışında yatak malzemesi, kesici takım, tıpta implant ve protezlerde, tekstil endüstrisinde iplik kılavuzu olarak, karmaşık elektrik devreleri için substrat olarak ve zırh yapımında kullanılmaktadır. Alümina seramiklerin genel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Alumina seramiklerin bazı fiziksel özellikleri.

Alumina Seramiğinin Fiziksel Özellikleri		
Özellikler	Birim	Değer
Yoğunluk	g /cm ³	3,9 ± 0,3
Enine Kırılma Dayanımı	MPa	300
Isıl Genleşme	10-6 K ⁻¹ (20-1000°C)	8,2
Isıl İletkenlik	Wm ⁻¹ K ⁻¹	13,5
Ergime Noktası	°C	2000
Kimyasal Bileşimi	Al ₂ O ₃	---

2.5.2. Zirkonya (ZrO₂)

Üç kararlı faza sahip olan zirkonya 2370°C sıcaklığın üzerinde kübik, 2370-1170°C arasında tetragonal ve 1170°C'nin altında monoklinik formu kararlı haldedir. Tetragonal kübik yapıdan monoklinik kübik yapıya geçiş %6,5 oranında bir hacim genişmesi ile sonuçlandığından teknolojiye sorun oluşturmakta ve bu faz dönüşümü neticesinde seramik malzemede genellikle hasar oluşmaktadır. Bu durumun önüne geçmek ve yapıyı düşük sıcaklıklarda ve kübik yapıda kararlı kılmak nedeniyle zirkonyaya MgO, CeO₂, CaO ve Y₂O₃ gibi çeşitli stabilizatör oksitler eklenir. Bu tür malzemeler kübik stabilize zirkonya olarak bilinirler. Kübik yapıyı kararlı hale getirmek amacıyla kullanılan bu oksit ilaveler faz dönüşüm sıcaklıklarını düşürürler ve bu şekilde kübik ve monoklinik fazların karışımından meydana gelen malzemeler üretilebilir.

Uygun stabilizatörlerin ilavesiyle iki tip zirkonya türü elde edilir. Bunlardan biri CaO ve MgO ilaveleriyle elde edilen kısmen stabilize zirkonya, diğeri CeO₂ ve Y₂O₃ ilaveleri ile elde edilen tetragonal zirkonya polikristaldir. Tetragonal zirkonya polikristaller ince taneli ve tek fazlı malzemelerdir. Tane boyutu, Y₂O₃ içeriğine ve malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak 0,1-1 mikron arasında değişir. Sinterleme işlemi tetragonal alanda yani 1300-1500°C sıcaklıkları arasında yapılır. Y₂O₃ ile tamamen stabilize edilmiş zirkonya (FZS) seramikler, maksimum tokluğa sahip ve mukavemetli zirkonya seramiklerdir. Bu seramiklerde oluşan sorun ise nemli ortamlarda, orta sıcaklıklarda (200-400°C) t-m dönüşümüdür. Bu dönüşüm yüksek miktarda mukavemet azalmasına neden olmaktadır (Çalışkan, F., 2010). Zirkonya seramiklerin genel özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Zirkonya seramiklerinin bazı fiziksel özellikleri.

Zirkonya Seramik Fiziksel Özellikleri		
Özellikler	Birim	Değer
Yoğunluk	g /cm ³	5,68-6,09
Enine Kırılma Dayanımı	MPa	1000
Isıl Genleşme	10-6 K ⁻¹ (20-1000 °C)	11
Isıl İletkenlik	Wm ⁻¹ K ⁻¹	2,5-3
Ergime Sıcaklığı	°C	2680
Kimyasal Bileşimi	ZrO ₂	---

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Monte Carlo ve Radyasyon Transportu ile MCNP Programının İçeriği

Monte Carlo 1940'lı yıllarda Los Alamos ulusal laboratuvarında henüz bilgisayar yokken nükleer silahlar geliştirmeye uğraşan bilim adamlarının kullandıkları bir matematiksel yönteme verdikleri isimdir. Monte Carlo da her olay bir şans oyunu gibi ele alınır. Olayın sonucu ya da değişkenlerin davranışı istatistiksel biçimde incelenir. Radyasyon transportu ya da taşıma stokastik bir süreçtir yani olasılıksal ya da rastgeledir. Örneğin her X-ışını fotonu doğar, yaşar ve ölür. Yani bir kaynaktan oluşur, maddesel ortamda ilerlerken etkileşimlere uğrar yani enerji kaybeder ve sonunda enerjisi tükenir. Bu anlamda Monte Carlo yöntemi ve radyasyon arasındaki ilişkiyi söyleyecek olursak bir kaynağın yaydığı fotonların hayatlarına kaynağın neresinde başlayacakları, hangi doğrultuda uçacakları, ilk etkileşimleri ve sonrakileri nerelerde geçirecekleri, bu etkileşimlerde ne kadar enerji kaybedecekleri, nasıl ve ne zaman öyküsünün son bulacağı olarak sıralayabiliriz. Monte Carlo yönteminde tek bir fotonun davranışını incelemek yerine birden çok fotonun ortak davranışlarından genel sonuçlar çıkarmak daha pratiktir. Monte Carlo algoritması ile basit bir örnek vermek gerekirse önce kaynak değişkeni belirleyerek fotonun atomla etkileşene kadar takip edilmesi ve fotonun saçılıp saçılmadığını belirleyip saçılana kadar takip etmeyi, eğer saçılmamışsa öyküyü sonlandırmayı daha sonra tüm öykülerin cevaplarının aritmetik ortalamasının alınmasını verebiliriz. Monte Carlo N-Particles (MCNP) Los Alamos laboratuvarında geliştirildiğinde önceleri nötron ve fotonların transportunun analizi için amaçlandı. Daha sonraları elektron da dâhil edildi. MCNP genel amaçlı bir kod olup radyasyon taşıma ve nükleer kritiklik analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Monte Carlo herhangi bir üç boyutlu malzeme konfigürasyonunu birinci ve geometrik yüzeyler yardımıyla sınırlayarak tanımlar. MCNP tüm bu süreçlerde tesir kütüphanelerini kullanır. Nötronlar için tüm reaksiyonların göz önüne alındığı ENDF/B-VI gibi verileri esas alır. Fotonlar için tüm etkileşim kanallarını (koherent saçılma, floresans üretimi, fotoelektrik soğurulma, çift üretiminde soğurulma, bremsstrahlung gibi) göz önünde bulundurur. MCNP elektronlar için de sürekli yavaşlama yaklaşımını benimser (Yorulmaz, N., 2006).

MCNP nin genel özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Genel kaynak, kritik kaynak, yüzey kaynağı vs. tanımlanabilir.
- Problemin geometrisi görüntülenebilir.
- Dedektör sonuçları grafiğe dökülebilir.
- Varyans azaltma seçenekleri fazladır.
- Esnek bir tally (dedektör) yapısı vardır.
- Tesir kesiti kütüphanesi zengin ve günceldir.
- Windows, Linux, MAC, Unix ve diğer işletim sistemleri altında çalışabilir.

MCNP'nin kullanım alanları:

- Radyasyon korunma ve dozimetri
- Radyasyon zırhlama
- Radyografi
- Medikal fizik
- Nükleer kritik güvenlik
- Dedektör tasarımı ve analizi
- Nükleer kuyu değerlendirme
- Hızlandırıcı hedef tasarımı
- Fisyon ve Füzyon reaktör tasarımı
- Zararlı maddelerden arındırma

Monte Carlo N-Particles (MCNP) programının içeriği aşağıdaki gibi özetlenebilir.

MCNP bir radyasyon taşıma programıdır. Radyasyonun türü, enerjisi, uçuş bilgileri, kaynak yapısı, içinden geçeceği-etkileşeceği ortamların geometrik yapısı ve materyal özellikleri, etkileşimler sonrasında kayıt altına alınacak parametreler gibi bilgilerin MCNP nin anlayacağı şekilde tanıtılması gerekir. Bu bilgilerin tümü input dosya şekline getirilir. Input dosya temelde bir metin dosyasıdır. Herhangi bir metin editör kullanılarak hazırlanabilir.

İnput dosyasının ilk satırı program ile ilgili açıklayıcı bilgilerin yer aldığı başlık kısmıdır. İnput dosyasının üç ana bölümü vardır.

- Hücre kartları bloğu
- Yüzey kartaları bloğu
- Veri kartları bloğu

MCNP input dosyasında her bir satır bir kart olarak adlandırılır. Bölümler arasında bir boş satır bırakılır. Bir satır seksen karakterden fazla bilgi içeremez. İnput dosyasında herhangi bir yere açıklama ya da yorum yazabilirsiniz. Yorum satırı c ile başlar ve MCNP o satırı dikkate almaz. Bir komut satırının sonuna da yorum yazılabilir. Bunun için \$ işareti kullanılır. Bir komut dizisi bir satıra sığmıyorsa bir sonraki satırda devam edilebilir. Bunun için yeni satırın ilk beş karakterini boş bırakmak yeterli olur. İnput dosyasında deyimlerin yazımında büyük veya küçük harf farkı yoktur. Deyimlerin arasında fazladan boşluk bırakılabilir. İnput dosyasının ismi yedi karakterden oluşur (Yorulmaz, N., 2006).

MCNP programının kullandığı birimleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Uzunluk: cm
- Enerji: MeV
- Zaman: shake (s^{-1})
- Atom yoğunluğu: $b^{-1}cm^{-1}$
- Kütleli yoğunluk: $g\ cm^{-1}$
- Tesir Kesiti: barn

3.1.1. Geometri ve Materyal Tanıtımı

MCNP programında ele alınan problemin geometrisi yüzeylerin sarmaladığı bölge ve hacimler yardımıyla ele alınır. Hücreler uzaysal bölgelerin kesişimi, birleşimi ve tümlmelerle tanımlanır. Hücreler ise kendimizin tanımladığı malzemeleri içerir. MCNP, üç boyutlu kartezyen koordinat sistemini kullanır. Problem uzayının tamamı hacim ve hücrelerden oluşur. Problemdeki her bir hücre bir veya birden fazla yüzeyle ya da sonsuzla çevrilidir. Her hücrenin ve yüzeyin

bizim tarafımızdan verilen bir numarası olmalıdır. Problem geometrisini oluştururken tanımlanmamış boşluklar bırakamayız.

Çizelge 3. 1. Kaynak, dedektör ve örneğin bulunduğu hücreleri oluşturan yüzeyleri gösteren bir örnek.

1 so 80
2 cy 20
3 py -0.005
4 py 0.005
c collimator for source
6 cy 10
7 cy 0.5
8 py -25
9 py -30
10 py -35
c collimator for detector
11 cy 10
12 cy 0.5
13 py 30
14 py 35
15 py 40

Her yüzeyin bir negatif bir de pozitif yüzü vardır. Negatif yüzey hücrenin iç kısmını tanımlarken pozitif yüzey hücrenin dış kısmını tanımlamak için kullanılır. Bir problemin geometrisinde yer alan hücreleri kesişim ve birleşim işlemleri kullanarak oluştururuz.

Çizelge 3. 2. Geometrideki hücreleri gösteren bir örnek.

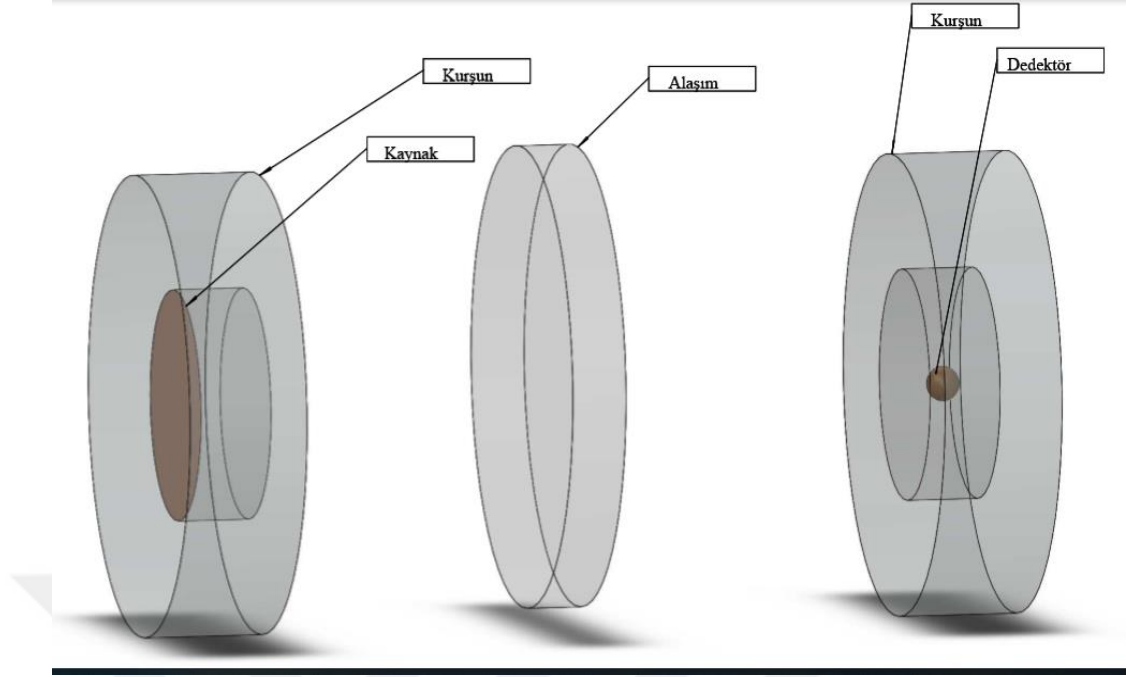
```
1 0 1 imp:p 0
2 0 -1 (2:-3:4) #4 #3 #5 #6 #8 imp:p 1
3 1 -10.052 -2 3 -4 imp:p 1
4 0 -12 13 -14 imp:p 1
c cell for collimator source
5 0 -7 -8 9 imp:p 1
6 2 -11.3 10 -8 -6 #5 imp:p 0.1
c cell for detector
7 2 -11.3 -11 13 -15 #4 imp:p 0.1
```

MCNP simülasyon programında input içinde malzeme tanımlanırken öncelikle malzemeye özgün bir numara verilir. Yani her malzemenin bir numarası olur. Daha sonra hangi oranda ne kadar hangi maddeden aldığımız tanımlanır.

Çizelge 3. 3. Inputtaki iki farklı malzemenin tanıtılması

```
m1 47000 -0.72 29000 -0.28
m2 82000 1
```

Inputtaki m1 malzeme numarasını gösterir. 47000 ve 29000 ile gösterilen 47 ve 29 elementlerin atom numaraları iken 000 ise genellikle nötron transferlerinde gerekli olan elementlerin spesifik izotoplarının kimlik tanımlamalarında gerekli olabilecek atomik kütle numaralarının yer tutucularıdır. Malzeme tanıtımında yer alan -0.72 ve -0.28 deki eksiler kütlece alındıklarını ifade ederken 0.72 ve 0.28 ise kütlece hangi oranda alındıklarını ifade eder. Şekil 3.1’de çalışmamızdaki inputta koordinatlarını yazdığımız şeklimiz görülmektedir.



Şekil 3. 1. İdeal bir zırhlama geometrisi

3.1.2. Kaynak Tanıtımı

MCNP probleminde radyasyon parçacıklarının türü ve kaynağı inputta SDEF kartı ile tanımlanır. Problem durumunda mevcut tüm kaynakların bütün karakteristiklerini tanımlamada kullanılmak üzere bu kartın birçok parametresi vardır. Bu kart karmaşık özellikleri olan bir kart olduğu için modelleme de dikkat edilmesi şarttır. Aynı zamanda oldukça kullanışlıdır. Tek bir kartta birçok farklı kaynak özelliği tanımlanabilir.

Çizelge 3. 4. Inputta SDEF kartının tanımlandığı bir örnek.

sdef pos 0 -30 0 ERG 0.5 par 2

Yukarıdaki kaynak tanıtım örneğinde kaynağın konumu pos değişkeni ile kaynağın enerjisi ERG değişkeni ile ve parçacığın tipi (nötron, foton) par değişkeni ile gösterilmiştir. Kaynak nokta kaynak olabileceği gibi yüzey ve hücre kaynağa olabilir.

3.1.3. Dedektör (Tally) Tanıtım Kartı

MCNP de kullanılan dedektör kartı F harfi ile ifade edilir. Dedektörün türüne göre önüne numara gelir. Örneğin F1 kartı yüzeydeki akıyı, F2 kartı ortalama yüzey akıyı, F5 kartı bir noktadaki ya da halkadaki akıyı, F4 kartı hücredeki ortalama akıyı ifade eder. Inputta birden çok dedektör tanımlanabilir. Her dedektörün kendine özgü bir numarası vardır. Biz bu çalışmamızda F4 dedektörünü kullanarak içinde malzememizin bulunduğu hücrenin ortalama akısını hesaplayacağız.

Çizelge 3. 5. Inputta hücredeki ortalama akıyı hesaplayan dedektörün tanıtıldığı örnek.

F4:p 4

Yukarıdaki örnekte F4'deki 4 dedektörün hücre dedektörü olduğunu p harfi ise fotonları ifade eder.

3.1.4. Diğer Veri Kartları

Inputta bulunan bir diğer kart da mode kartıdır. Bu kart problemin türünü tanımlar, yani problemde hangi tür parçacıkların izleneceğini söyler. Bütün MCNP input dosyalarında bu kart bulunmalıdır.

Çizelge 3. 6. Hangi parçacığın izleneceğini tanımlayan mode kartına bir örnek.

mode p

Yukarıdaki mode p'deki p harfi fotonların izleneceğini ifade eder. Bir problemde MCNP'nin ne kadar süreyle çalışacağını da belirtmemiz gerekir. Bunu ctme kartı ile belirleyebildiğimiz gibi nps kartı ile de belirleyebiliriz. Inputtaki ctme simülasyonun kaç dakika süreceğini ifade ederken nps ise öykü sayısını ifade eder. MCNP simülasyon programının sağlıklı bir sonuç vermesi için öykü sayısını arttırabileceğimiz gibi zamanı da arttırabiliriz.

Çizelge 3. 7. Bütün kartların tanımlandığı bir input örneği.

Sample

1 0 1 imp:p 0

2 0 -1 (2:-3:4) #4 #3 #5 #6 #8 imp:p 1

3 1 -10.052 -2 3 -4 imp:p 1

4 0 -12 13 -14 imp:p 1

c cell for collimator source

5 0 -7 -8 9 imp:p 1

6 2 -11.3 10 -8 -6 #5 imp:p 0.1

c cell for detector

8 2 -11.3 -11 13 -15 #4 imp:p 0.1

1 so 80

2 cy 20

3 py -0.005

4 py 0.005

c collimator for source

6 cy 10

7 cy 0.5

8 py -25

9 py -30

10 py -35

c collimator for detector

11 cy 10

12 cy 0.5

13 py 30

14 py 35

15 py 40

```

mode p

sdef pos 0 -30 0 ERG 0.5 par 2 axs 0 1 0 ext 0 rad=d1

si1 0 0.5

sp1 0 1

m1 47000 -0.72 29000 -0.28

m2 82000 1

F4:p 4

ctme 10

```

Yukarıdaki input dosyasını çalıştırmak için MCNPX programında m n=dosya adı.txt yazdığımız zaman bize süre dolduktan sonra aşağıda örneği olan bir output dosyası verilecektir. Bu output dosyasında dedektöre gelen akı miktarı bulunmaktadır. Ayrıca programın yüzde kaç hata ile sonuçlandığını da output dosyası bizlere göstermektedir.

Çizelge 3. 8. Hücredeki akıyı ve yüzde hatayı veren output örneği.

tally 4						
nps	mean	error	vov	slope	fom	
8192000	2.1781E-05	0.0912	0.0226	0.0	134	
16384000	2.1494E-05	0.0621	0.0084	0.0	145	
24576000	2.0902E-05	0.0506	0.0049	0.0	145	
32768000	2.1145E-05	0.0468	0.0262	2.4	128	
40960000	2.0937E-05	0.0413	0.0186	2.2	131	
49152000	2.0951E-05	0.0373	0.0136	1.8	134	
57344000	2.1008E-05	0.0343	0.0104	1.7	136	
65536000	2.1384E-05	0.0316	0.0080	1.6	140	
73728000	2.1569E-05	0.0305	0.0104	4.6	134	
81920000	2.1387E-05	0.0289	0.0088	5.2	135	

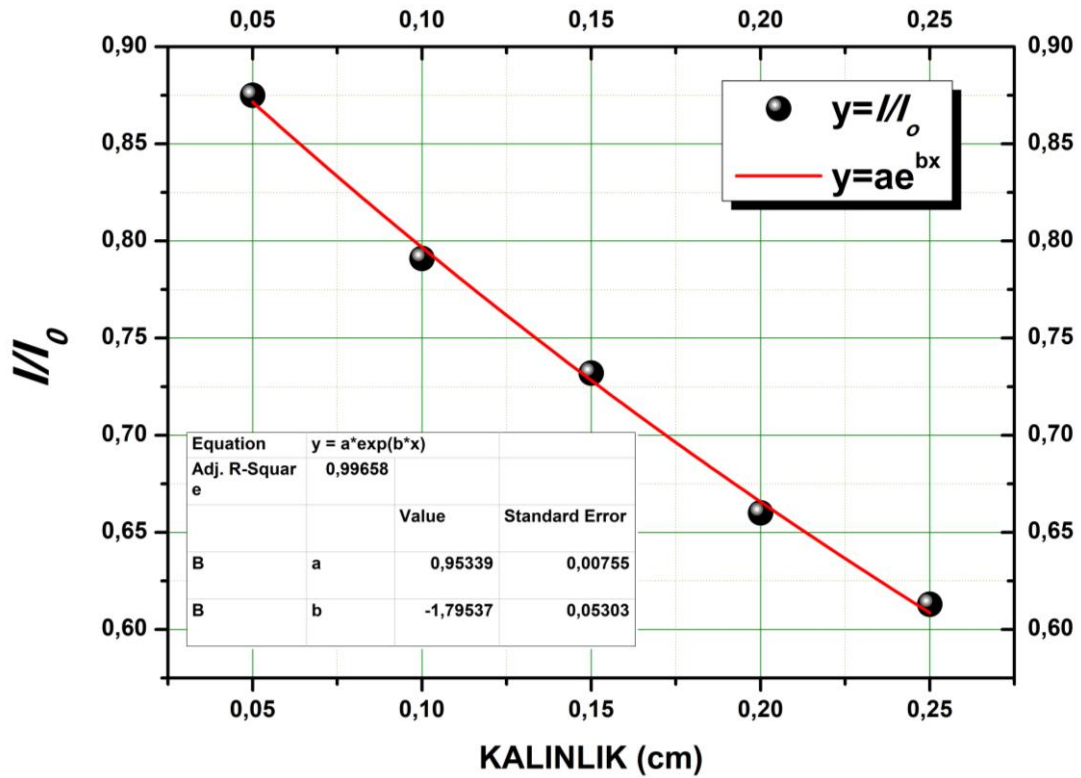
```
90112000 2.1421E-05 0.0273 0.0075 5.1 137
92264214 2.1518E-05 0.0270 0.0071 6.2 137
*****
dump no. 2 on file kla.txtr nps = 92264214 coll = 195542285 ctm =
10.00 nrn = 2322182077
```

Yukarıdaki output örneğini incelediğimizde hücredeki akının 2.1518E-05 değerinde olduğunu ve yüzde 2.7'lik de bir hatanın olduğunu görüyoruz. Hatanın yüzde ikinin altında gelmesi sonucun değeri açısından önemlidir. Yukarıdaki örnekte hatayı azaltmak adına süre daha uzun tutulabilir.

MCNP'de inputu yazarken malzeme hücresi önce boş bırakılarak dedektörün I_0 akı değerini hesaplaması sağlanır. Daha sonra malzeme hücresine istediğimiz malzemeyi tanımlayıp ve hücrenin kalınlığını her seferinde değiştirip dedektörün I akı değerini hesaplaması sağlanır. Elde edilen outputlarda I ve I_0 akı değerleri hesaplanarak lineer soğurma katsayısı, kütle soğurma katsayısı, yarı-değer kalınlığı ve ortalama serbest yol gibi parametrelerin bulunması sağlanır. Örnek olması açısından, belirli bir foton enerjisinde MCNP ile elde edilen I ve I_0 akı değerleri ve bu değerler kullanılarak Şekil 3.2'de lineer soğurma katsayısının hesaplandığı bir grafik verilmiştir.

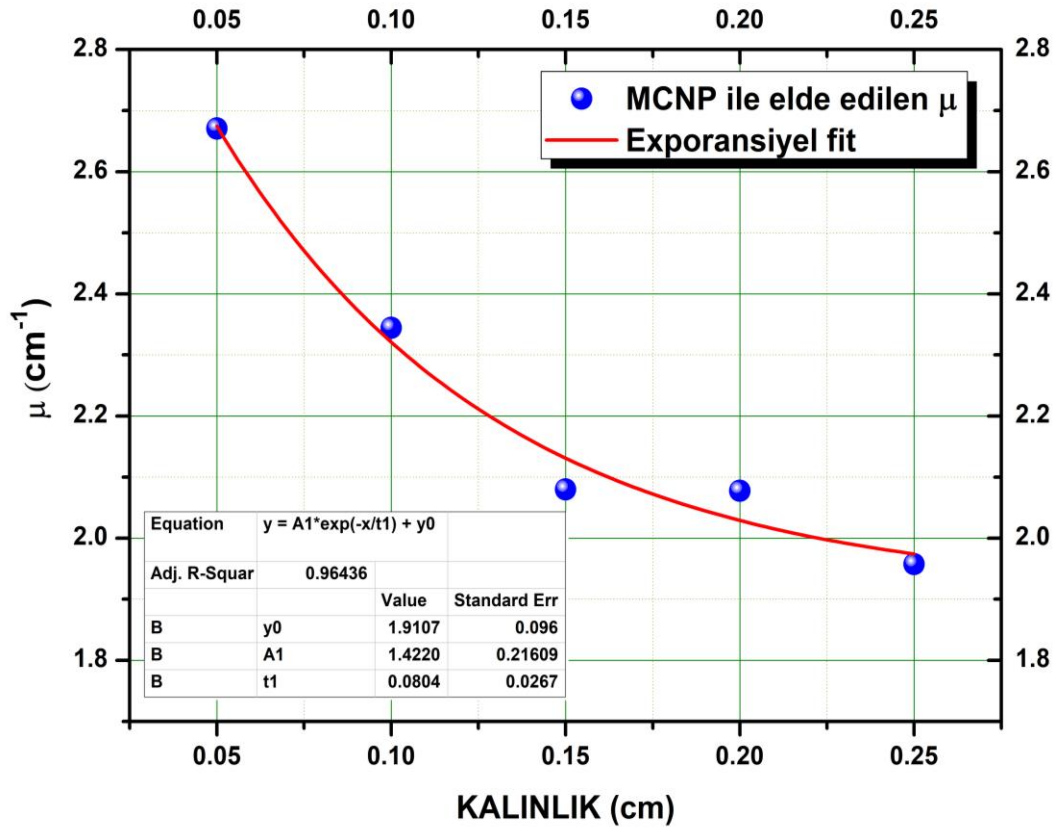
Çizelge 3. 9. MCNP ile elde edilen I ve I/I_0 değerleri ve bu değerler ile elde edilen kalınlığa bağlı lineer soğurma katsayıları.

Kalınlık (cm)	I (sayım)	I/I_0	μ (cm ⁻¹)
0	2,24E-05	1,00E+00	---
0,05	1,96E-05	8,75E-01	2,67E+00
0,1	1,77E-05	7,91E-01	2,34E+00
0,15	1,64E-05	7,32E-01	2,08E+00
0,2	1,48E-05	6,60E-01	2,08E+00
0,25	1,37E-05	6,13E-01	1,96E+00



Şekil 3. 2. MCNP programı ile farklı kalınlıklarda elde edilmiş I/I_0 değerlerinin kalınlığın bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi. (Çizelge 3.9’da verilen datalar kullanılarak çizilmiştir).

Bütün enerjiler için MCNP programında incelenen numunelerin farklı kalınlıkları için I ve I_0 değerleri Şekil 3.1’de verilen bir deney geometrisi için sayılır. Her bir foton enerjisi için bu işlem tek tek yapılır. İncelenen bir foton enerjisi için kalınlığın bir üstel fonksiyonu olarak Şekil 3.2’de verildiği gibi I/I_0 değişim eğrisi çizilir. Hangi programda fit çizilecek ise Lambert-Beer kanunu uyumluluğu için bu eğrinin fit denklemi $y=ae^{bx}$ şeklinde olmalıdır. Bu denklemde $y=I/I_0$, “a” değeri 1’e yakın olan ve denklemi sağlayan bir katsayı, “-b” katsayısı MCNP sonuçlarından elde edilen ilgili foton enerjisindeki malzemenin lineer soğurma katsayısıdır ve “x” ise MCNP programında tanımlanan malzeme kalınlığıdır. Bu sebeple Çizelge 3.2’de verilen MCNP sonuçlarının Şekil 3.2’deki çizimi ile ilgilenilen foton enerjisinde değerleri alınan malzemenin lineer soğurma katsayısı “**-b= $\mu=1,79535\pm0,05303$ ”** değerine sahiptir. Herbir malzeme için bulunan bu değer malzemenin yoğunluğuna bölünürse o malzemenin ilgili foton enerjisindeki kütle soğurma katsayısı MCNP programı ile bulunmuş olur. Ayrıca kalınlığın bir fonksiyonu olarak lineer soğurma katsayısının MCNP değerlerinin değişim eğrisi Şekil 3.3’de verilmiştir. Bu eğri artan malzeme kalınlığının ilgili foton enerjisinde lineer soğurma katsayısı ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Bu sebeple MCNP sonuçlarının doğruluk derecesini artırmak için malzemelerin farklı kalınlıklarda düşünülerek analiz edilmesi ve herbir malzeme için Çizelge 3.9’da verildiği gibi bir data sütunu elde edilmeli ve bu datalar Şekil 3.2’deki gibi çizilerek lineer soğurma katsayısı yukarıda anlatılan cümlelerdeki gibi elde edilmelidir.



Şekil 3. 3. Malzeme kalınlığının bir fonksiyonu olarak MCNP programı ile elde edilmiş lineer soğurma katsayısının değişim eğrisi (Çizelge 3.9’da verilen dataolar kullanılarak çizilmiştir).

3.2. XCOM Programı

1987 yılında Berger ve Hubbel tarafından geliştirilen XCom, 1keV ve 100 GeV enerji aralığında çalışan bir bilgisayar kodudur. Bu bilgisayar kodu hem elementlerin hem bileşiklerin hem de karışımların fotoelektrik etki, Rayleigh ve Compton saçılmaları, elektron çift oluşumu ve çekirdek çift oluşumunun soğurma katsayılarını ve kütle soğurma katsayılarını hesaplayabilmektedir (Gerward et al., 2001, 2004). XCom programı kütle soğurma katsayısını hesaplamaktadır fakat lineer soğurma katsayısını hesaplayamamaktadır. Kütle soğurma katsayısı ile malzemenin yoğunluğunu çarparak lineer soğurma katsayısını bulabiliriz. Çünkü lineer soğurma katsayısının malzemenin yoğunluğuna oranı kütle soğurma katsayısının vermektedir.

Bu çalışmada kullanılan seramik malzemelerin yoğunlukları, onu oluşturan bileşiklerin moleküler ağırlığı, bileşiklerin mol kesri gibi çeşitli özellikleri Çizelge 3.10’da ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. ZTA seramikleri Al_2O_3 ve ZrO_2 bileşiklerinin kütlece farklı oranlarda alınması ile elde edilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi ZTA-10’ dan ZTA-90’a doğru gidildikçe seramiklerdeki ZrO_2 kütlece karışım oranı artmakta ve buna bağlı olarakta seramiklerin yoğunluğu artmaktadır.

Çizelge 3. 10. Bu tez çalışmasında incelenen seramiklerin kimyasal bileşim oranları, yoğunlukları ve ortalama ağırlık değerleri.

Seramik	Seramiklerde Bulunan Oksitler ve Ağırlık Kesirleri (ağ. %)								Yoğunluk	Ortalama Moleküler Ağırlık
	Al_2O_3	ZrO_2	SiC	SiO_2	MgO	CaO	BaO	Y_2O_3		
Al_2O_3	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,90	101,961
ZrO_2	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,68	123,218
ZTA-10	0,90	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,03	103,662
ZTA-20	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,16	105,576
ZTA-30	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,30	107,489
ZTA-40	0,60	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,46	109,615
ZTA-50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,62	111,529
ZTA-60	0,40	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,80	113,655
ZTA-70	0,30	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	115,994
ZTA-80	0,20	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,20	118,333
ZTA-90	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,43	120,671
S1	0,015	0,00	0,90	0,07	0,015	0,00	0,00	0,00	0,55	42,119
S2	0,00	0,95	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	5,74	111,614
S3	0,36	0,00	0,00	0,57	0,02	0,03	0,02	0,00	2,65	70,732
S4	0,00	0,9464	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0536	6,02	126,300

MCNP-X programında kullanılan Ba-133, Na-22, Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynakların yarı ömürleri ve enerjileri Çizelge 3.11’de gösterilmiştir. Bu çalışmada Ba-133’ün üç, Na-22’nin iki, Cs-137’nin bir ve Co-60’ın iki farklı foton enerji değeri kullanılarak seramiklerin radyasyon zırh parametreleri toplam sekiz farklı foton enerji değerinde MCNP-X kodu ve WinXCOM yazılımı ile hesaplanmıştır.

Çizelge 3. 11. Programda kullanılan radyoaktif kaynaklar ve enerji değerleri.

Radyoaktif Kaynak	Aktivite	Fiziksel Yarı Ömür	Enerji (keV)
Ba-133	10 µCi (370 kBq)	10,74 yıl	276,397
			302,9
			356
Na-22	10 µCi (370 kBq)	2,602 yıl	511
			1274,537
Cs-137	10 µCi (370 kBq)	30,1 yıl	661,661
Co-60	10 µCi (370 kBq)	5,27 yıl	1173,228
			1332,492

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tez çalışmasında Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) seramik yapıdaki bileşiklerinin ve bu bileşiklerin ağırlıkça farklı kombinasyonlarından oluşan Zirkonia ile sertleştirilmiş Alumina (ZTA) seramiklerinin Çizelge 3.10’da verilen dokuz farklı formunun lineer soğurma katsayıları, kütle soğurma katsayıları, ortalama serbest yolları ve yarı-değer kalınlıkları Çizelge 3.11’de verilen dört farklı radyoaktif kaynaktan (^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs ve ^{60}Co) yayımlanan sekiz farklı yüksek enerjili foton (276,397 keV; 302,9 keV; 356 keV; 511 keV; 661,661 keV; 1173, 228 keV; 1274,537 keV ve 1332, 492 keV) için hem WinXCOM programı hem de MCNP-X kodlu simülasyon programı ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. ZTA seramiklerinin yanı sıra yapısında farklı konsantrasyonlarda Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) bulunduran ve kimyasal içeriği ve yoğunlukları Çizelge 3.10’da verilen dört farklı seramik (S1, S2, S3 ve S4) içinde araştırılan tüm foton etkileşim parametreleri hesaplanmıştır. Bütün incelenen seramiklerin yüksek enerjili radyasyon zırhlama performansları hakkında kayda değer bir değerlendirme yapabilmek için tüm hesaplama adımları iyi bir radyasyon zırhlayıcı olan kurşun (Pb) ve nükleer enerji uygulamalarında yaygın olarak kullanılan sıradan beton (ordinary concrete) (Bashter, I.I., 1997) için de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler şeklinde rapor edilmiştir. İncelenen radyasyon zırhlama parametreleri maddeler halinde aşağıdaki gibi ayrı ayrı incelenerek sunulmuştur.

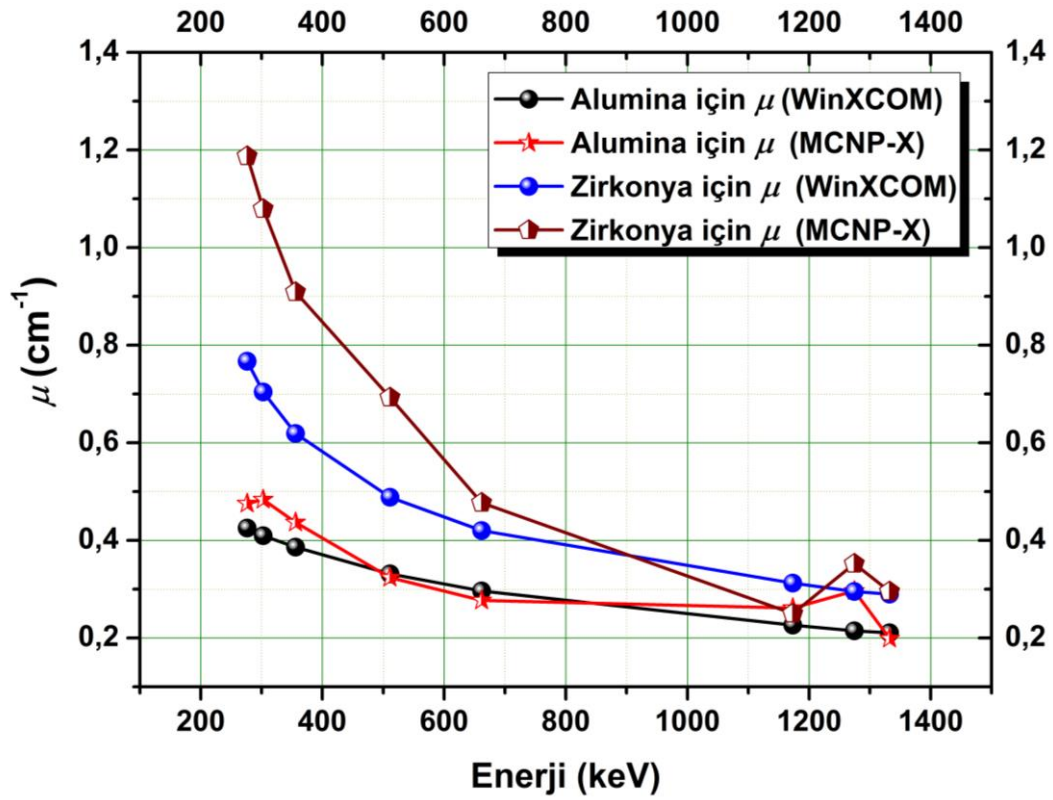
4.1. Lineer soğurma katsayılarının incelenmesi

Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) için hem WinXCOM hem de MCNP-X programları kullanılarak ilgilenilen foton enerjilerinde elde edilmiş lineer azaltma katsayıları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen datalar enerjinin bir fonksiyonu olarak grafiksel olarak Şekil 4.1’de sunulmuştur. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1 birlikte değerlendirildiğinde Zirkonya ve Alumina seramiklerinin WinXCOM ve MCNP programları ile elde edilen lineer soğurma katsayıları arasında küçük farklar olmakla birlikte genelde uyumludur. Literatürde MCNP sonuçları ile WinXCOM sonuçları arasında ki bu ölçüdeki farkın kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir. Ayrıca her iki programla elde edilen lineer soğurma katsayıları hem Zirkonya hem de

Alumina seramikleri için artan foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak azaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 4. 1. Alümina ve Zirkonya seramiklerinin lineer soğurma katsayıları.

Enerji (keV)	μ (cm ⁻¹)			
	Alumina		Zirkonya	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	0,425	0,476	0,767	1,187
302,900	0,410	0,484	0,704	1,079
356,000	0,386	0,437	0,619	0,909
511,000	0,332	0,324	0,488	0,693
661,661	0,296	0,277	0,420	0,477
1173,228	0,226	0,261	0,312	0,250
1274,537	0,215	0,296	0,295	0,352
1332,492	0,211	0,199	0,290	0,295



Şekil 4. 1. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi.

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’den de görülebileceği gibi, Zirkonya için elde edilen lineer soğurma katsayısının tüm ilgilenilen foton enerjilerinde Alumina için elde edilen lineer soğurma katsayılarından büyük olduğu saptanmıştır. Bu durum Zirkonyum elementinin atom numarasının Alüminyum elementinin atom numarasından büyük olmasından kaynaklanmaktadır.

Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) seramiklerinin ağırlıkça bileşim konsantrasyonları farklı olacak şekilde oluşturulmuş Zirkonya ile stabilize edilmiş tetragonal Alumina (ZTA) seramikleri için hem WinXCOM hem de MCNP-X programları kullanılarak ilgilenilen foton enerjilerinde elde edilmiş lineer azaltma katsayıları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu çizelgede verilen datalar enerjinin bir fonksiyonu olarak çizilmiş ve Şekil 4.2’de ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 4.2’de her bir grafik ayrı ayrı incelendiğinde artan foton enerjisi ile seramiklerin lineer soğurma katsayılarının exporansiyel olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca hem Çizelge 4.2 hem de Şekil 4.2 birlikte değerlendirildiğinde WinXCOM sonuçları ile MCNP-X program sonuçları arasında çok az farklılık olmasına rağmen genel olarak uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Her iki programdan elde edilen sonuçların foton enerjisine bağlı değişimlerinin aynı olduğu gözlemlenmiştir.

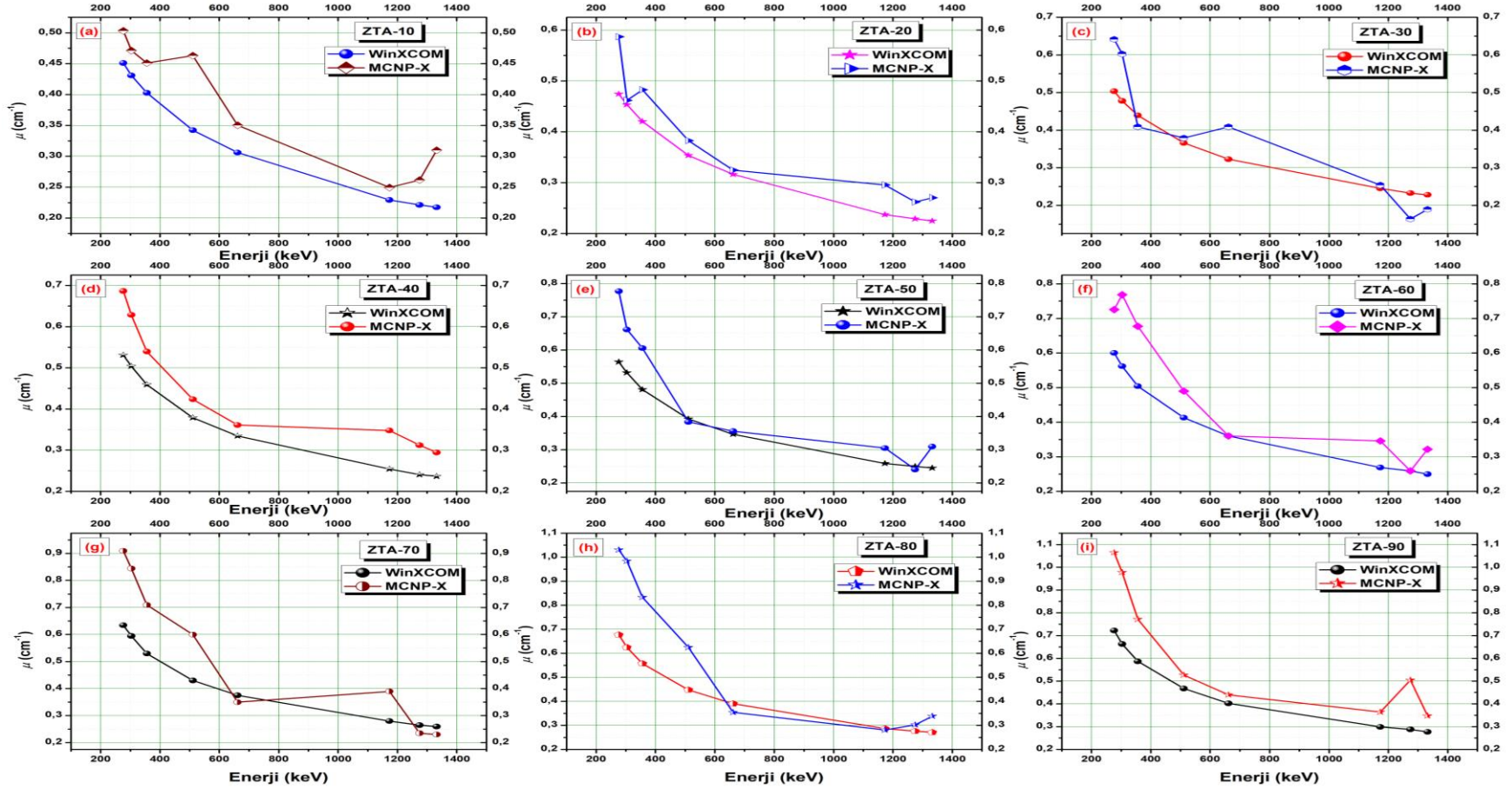
Ayrıca Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2 detaylı bir şekilde incelendiğinde ZTA seramiklerinin yapısında bulunan Zirkonya’nın ağırlıkça bileşim kesri arttıkça seramiklerin incelenen tüm foton enerjileri için lineer soğurma katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum karşılaştırmalı olarak enerjinin bir fonksiyonu olarak grafiksel olarak daha detaylı değerlendirme için Şekil 4.3’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde her bir seramik için lineer azaltma katsayısının enerjinin bir fonksiyonu olarak artan foton enerjisi ile üstel olarak azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. ZTA seramiklerinin yapısındaki Zirkonya miktarının artması Zr elementinin atom numarasının büyük olması sebebiyle lineer soğurma katsayılarını artırdığı belirgin bir şekilde gözlemlenmiş ve seramiklerin yapısındaki Zirkonya miktarının artmasının o seramiğin zırhlama kapasitesinin artmasına sebep olacağı açık bir şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 4. 2. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin farklı bileşimlerinden oluşan ZTA seramiklerinin lineer soğurma katsayıları.

Enerji (keV)	μ (cm ⁻¹)					
	ZTA-10		ZTA-20		ZTA-30	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	0,451	0,503	0,474	0,587	0,504	0,641
302,900	0,431	0,471	0,454	0,462	0,478	0,603
356,000	0,403	0,451	0,420	0,483	0,439	0,409
511,000	0,342	0,463	0,354	0,383	0,366	0,379
661,661	0,306	0,350	0,316	0,325	0,323	0,409
1173,228	0,229	0,250	0,237	0,295	0,245	0,254
1274,537	0,221	0,262	0,229	0,262	0,232	0,164
1332,492	0,217	0,310	0,225	0,270	0,228	0,189

Enerji (keV)	μ (cm ⁻¹)					
	ZTA-40		ZTA-50		ZTA-60	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	0,531	0,687	0,564	0,777	0,600	0,725
302,900	0,504	0,629	0,532	0,661	0,562	0,768
356,000	0,459	0,540	0,481	0,606	0,504	0,677
511,000	0,379	0,424	0,393	0,384	0,413	0,490
661,661	0,334	0,361	0,347	0,356	0,360	0,360
1173,228	0,254	0,348	0,259	0,305	0,269	0,346
1274,537	0,241	0,312	0,250	0,240	0,259	0,259
1332,492	0,236	0,294	0,245	0,310	0,250	0,322

Enerji (keV)	μ (cm ⁻¹)					
	ZTA-70		ZTA-80		ZTA-90	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	0,634	0,909	0,677	1,031	0,722	1,065
302,900	0,595	0,844	0,625	0,984	0,663	0,978
356,000	0,530	0,709	0,557	0,833	0,587	0,771
511,000	0,430	0,600	0,448	0,625	0,467	0,527
661,661	0,375	0,350	0,390	0,354	0,402	0,440
1173,228	0,280	0,390	0,286	0,281	0,299	0,364
1274,537	0,265	0,235	0,276	0,302	0,288	0,505
1332,492	0,260	0,230	0,271	0,338	0,277	0,348



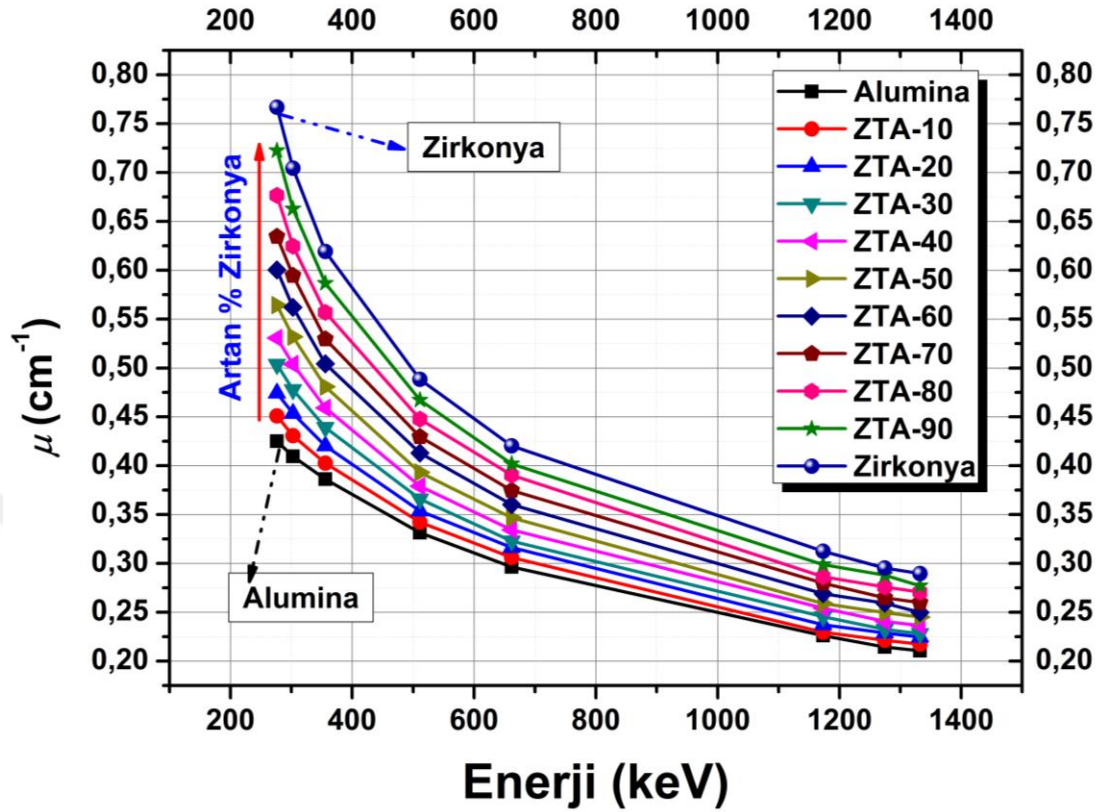
Şekil 4. 2. ZTA seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi ((a) ZTA-10 için, (b) ZTA-20 için, (c) ZTA-30 için, (d) ZTA-40 için, (e) ZTA-50 için, (f) ZTA-60 için, (g) ZTA-70 için, (h) ZTA-80 için ve (i) ZTA-90 için).

Çizelge 4. 3. Alumina ve Zirkonya seramiklerini yapısında bulunduran bazı önemli seramiklerin (S1, S2, S3 ve S4), karşılaştırma betonu ve Pb'nin lineer soğurma katsayıları.

Enerji (keV)	μ (cm ⁻¹)			
	S1		S2	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	0,061	0,073	0,769	1,171
302,900	0,059	0,060	0,706	1,056
356,000	0,056	0,052	0,626	0,936
511,000	0,048	0,051	0,494	0,631
661,661	0,042	0,037	0,425	0,476
1173,228	0,032	0,044	0,316	0,235
1274,537	0,031	0,046	0,304	0,258
1332,492	0,030	0,063	0,293	0,304

Enerji (keV)	μ (cm ⁻¹)			
	S3		S4	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	0,297	0,371	0,813	1,210
302,900	0,286	0,376	0,746	1,192
356,000	0,268	0,329	0,656	0,951
511,000	0,228	0,257	0,518	0,680
661,661	0,204	0,236	0,445	0,512
1173,228	0,154	0,191	0,331	0,355
1274,537	0,148	0,159	0,313	0,385
1332,492	0,146	0,201	0,307	0,373

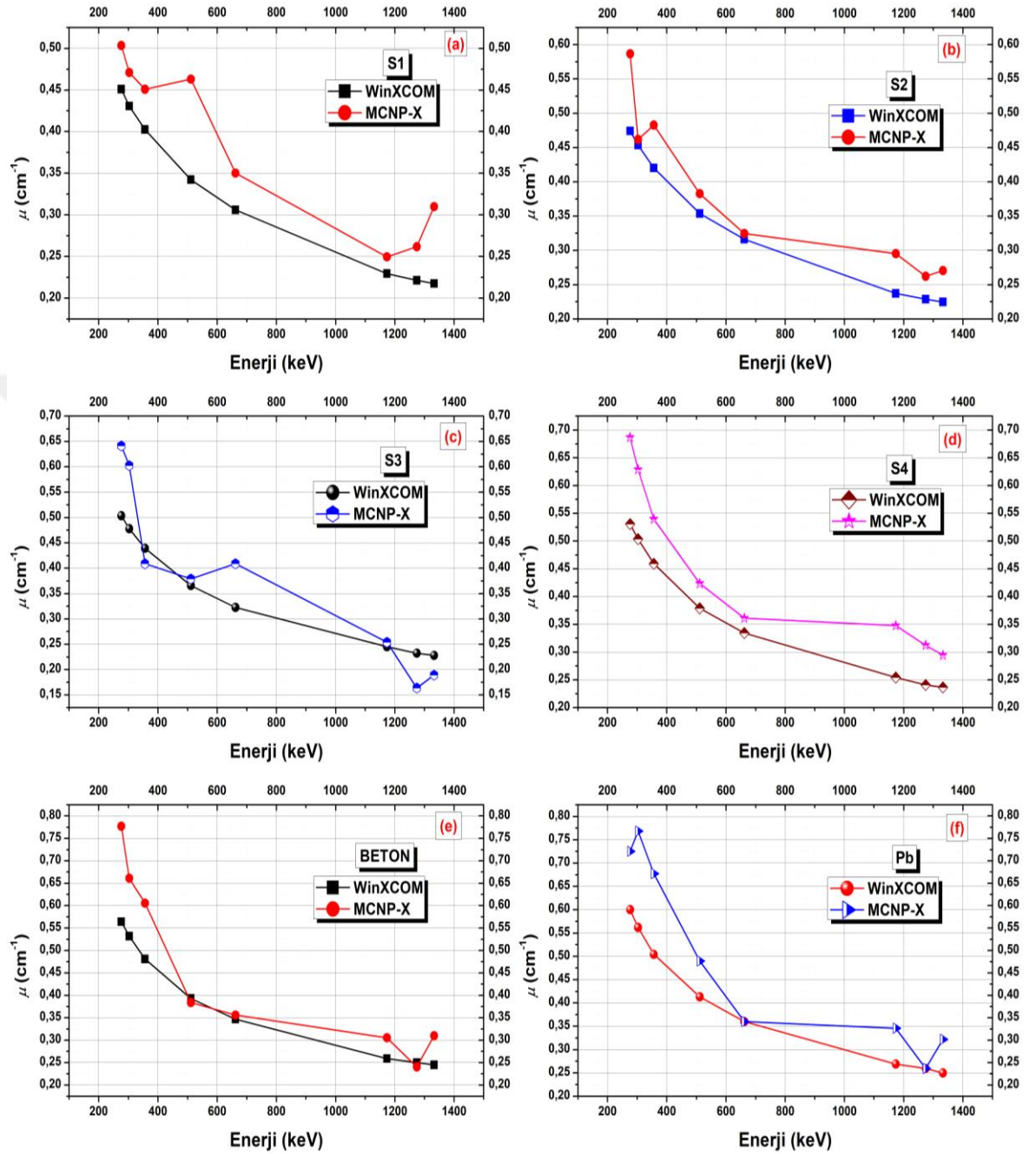
Enerji (keV)	μ (cm ⁻¹)			
	Karşılaştırma Betonu		Kurşun (Pb)	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	0,258	0,331	5,432	6,282
302,900	0,248	0,297	4,479	5,318
356,000	0,232	0,283	3,255	3,946
511,000	0,200	0,209	1,769	2,291
661,661	0,177	0,184	1,247	1,576
1173,228	0,136	0,145	0,692	0,828
1274,537	0,129	0,127	0,646	0,771
1332,492	0,127	0,140	0,635	0,760



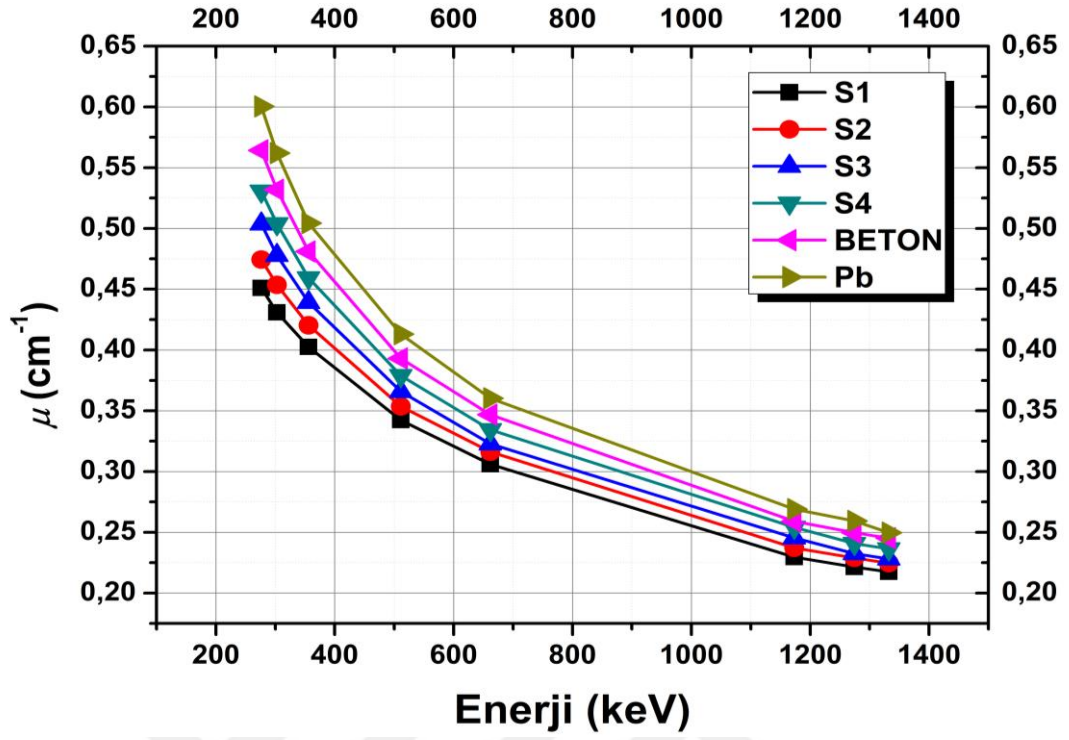
Şekil 4. 3. Alumina, Zirkonya ve ZTA seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak karşılaştırmalı olarak gösterimi.

Yapısında farklı oranlarda Alumina ve Zirkonya bulunduran ve içerikleri Çizelge 3.10’da verilen dört önemli seramiğin, karşılaştırma betonunun ve kurşunun hem WinXCOM hem de MCNP-X programları ile elde edilmiş lineer soğurma katsayıları Çizelge 4.3’de verilmiştir. Bu çizelgede verilen datalar enerjinin bir fonksiyonu olarak Şekil 4.4’de verilmiştir. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.4 birlikte değerlendirildiğinde, hem S1, S2, S3, S4 seramiklerinin hem de karşılaştırma betonu ve kurşunun lineer soğurma katsayıları artan foton enerjisi ile birlikte azalmakta olduğu ve WinXCOM ile MCNP-X sonuçları arasında çok az farklılıklar ile birlikte genel olarak uyum olduğu açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca S1, S2, S3 ve S4 seramikleri, beton ve Pb arasında kıyaslama için Şekil 4.5’de verilen grafik çizilmiştir. Bu grafiğe göre en düşük lineer soğurma katsayısına sahip seramik S1 iken en yüksek lineer soğurma katsayısı değerine sahip seramik ise S4 dür. Bütün

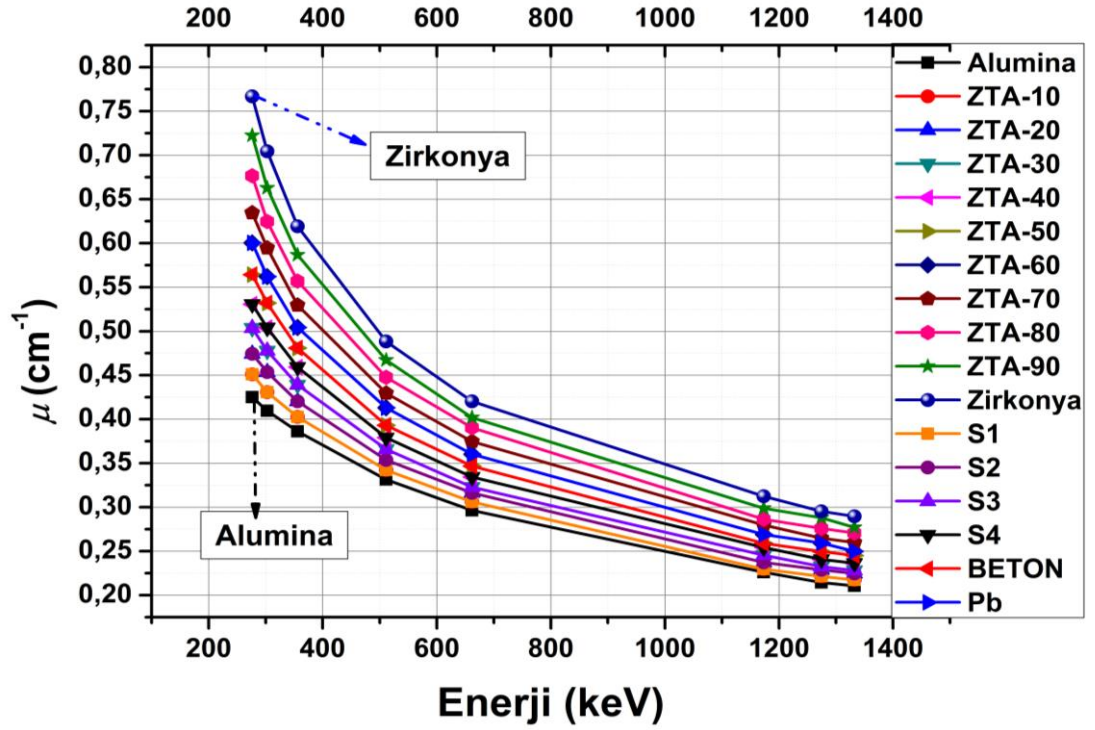
seramiklerin lineer soğurma katsayılarının Pb ve betondan düşük olduğu Şekil 4.5’den açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4. 4. Yapısında Alumina ve Zirkonya seramiklerini bulunduran S1(a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) seramikleri, karşılaştırma betonu (e) ve kurşun (f) için lineer soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi.



Şekil 4. 5. S1, S2, S3, S4 seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının beton ve Pb ile karşılaştırılma eğrisi.



Şekil 4. 6. İncelenen tüm numunelerin lineer soğurma katsayılarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.

Bütün incelenen numunelerin lineer soğurma katsayılarının uyarıcı foton enerjisine ve malzemenin kimyasal bileşimine bağlı olduğu bu tez çalışmasında incelenen numuneler için açık bir şekilde gözlemlenmiştir. İncelenen numunelerin lineer soğurma katsayıları arasında genel bir sıralama yapabilmek için Şekil 4.6’de verilen grafik çizilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde incelenen numuneler arasında karşılaştırma betonu ve kurşun da dahil olmak üzere tüm foton enerjilerinde en yüksek lineer soğurma katsayısına Zirkonya sahip iken en düşük lineer soğurma katsayısına Alumina seramiğinin sahip olduğu belirlenmiştir. Kurşunun lineer soğurma katsayısının ZTA-60 seramiği ile hemen hemen aynı olduğu, Betonun lineer soğurma katsayısının ZTA-50 seramiği ile hemen hemen aynı olduğu, S4 seramiğinin lineer soğurma katsayısının ZTA-40 seramiği ile hemen hemen aynı olduğu, S3 seramiğinin lineer soğurma katsayısının ZTA-30 seramiği ile hemen hemen aynı olduğu, S2 seramiğinin lineer soğurma katsayısının ZTA-20 seramiği ile hemen hemen aynı olduğu ve S1 seramiğinin lineer soğurma katsayısının ZTA-10 seramiği ile hemen hemen aynı olduğu Şekil 4.6’dan açık bir şekilde tespit edilmiştir. Ayrıca, daha öncede belirtildiği gibi ZTA seramiklerinin yapısındaki Zirkonya oranı arttıkça seramiğin lineer soğurma katsayısının arttığı bu şekilden de açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu sebeple yapısında Alumina ve Zirkonya bulunduran ve bu tez çalışmasında incelenen seramikler arasında tüm ilgili foton enerjilerinde en yüksek lineer soğurma katsayısına sahip olan seramiğin ZTA-90 olduğu belirlenmiştir.

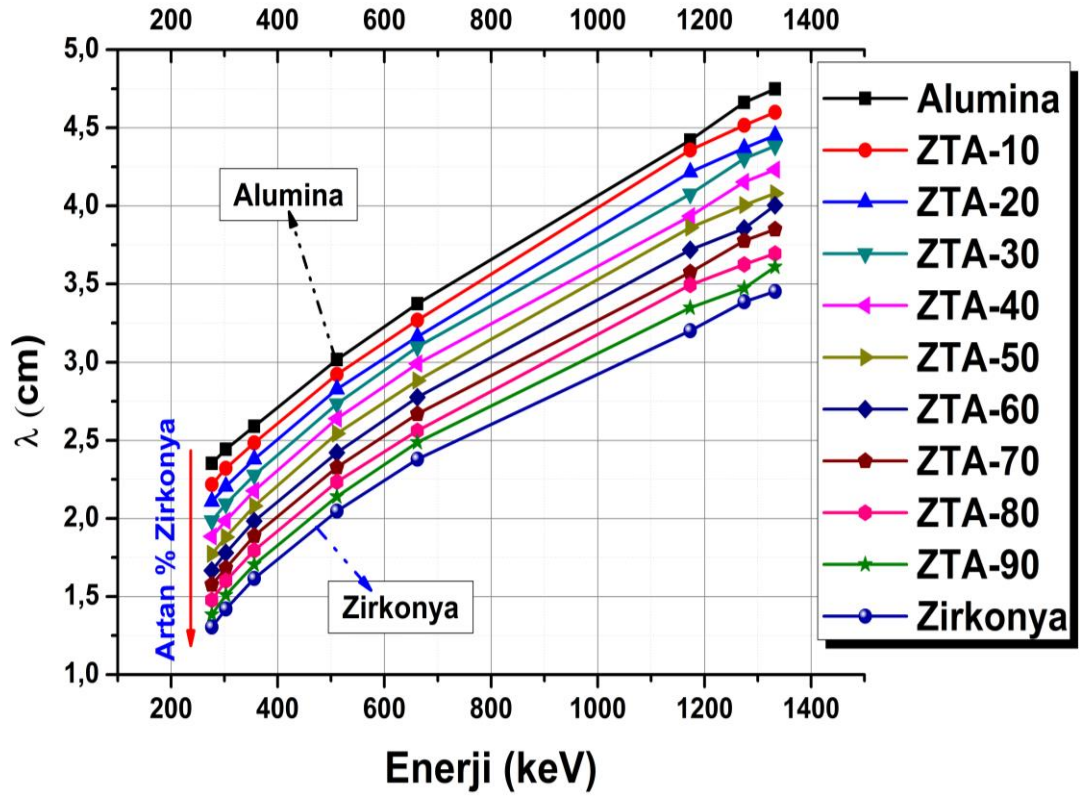
4.2. Ortalama serbest yol değerlerinin incelenmesi

Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) için hem WinXCOM hem de MCNP-X programları kullanılarak ilgilenilen foton enerjilerinde elde edilmiş ortalama serbest yol değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) seramiklerinin ağırlıkça bileşim konsantrasyonları farklı olacak şekilde oluşturulmuş Zirkonya ile stabilize edilmiş tetragonal Alumina (ZTA) seramikleri için hem WinXCOM hem de MCNP-X programları kullanılarak ilgilenilen foton enerjilerinde elde edilmiş lineer azaltma katsayıları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4. 4. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin ortalama serbest yol değerleri.

Enerji (keV)	Ortalama Serbest Yol (λ ; cm)			
	Alumina		Zirkonya	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	2,352	2,102	1,304	0,842
302,900	2,442	2,068	1,420	0,927
356,000	2,590	2,289	1,615	1,100
511,000	3,017	3,089	2,047	1,443
661,661	3,374	3,611	2,379	2,096
1173,228	4,421	3,827	3,201	4,001
1274,537	4,662	3,374	3,386	2,840
1332,492	4,748	5,028	3,452	3,386

Ayrıca, yapısında farklı oranlarda Alumina ve Zirkonya bulunduran ve içerikleri Çizelge 3.10’da verilen dört önemli seramiğin, karşılaştırma betonunun ve kurşunun hem WinXCOM hem de MCNP-X programları ile elde edilmiş lineer soğurma katsayıları Çizelge 4.6’de verilmiştir. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.6’da verilen datalar, ZTA seramiklerinin ortalama serbest yollarının enerjiye bağımlılığını ve ortalama serbest yolları hakkında karşılaştırma yapabilmek için grafiksel olarak Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4. 7. İncelenen ZTA seramiklerinin ortalama serbest yollarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.

Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de birlikte değerlendirildiğinde Zirkonya ve Alumina seramiklerinin WinXCOM ve MCNP programları ile elde edilen ortalama serbest yolları arasında küçük farklar olmakla birlikte genelde uyumludur. Literatürde MCNP sonuçları ile WinXCOM sonuçları arasında ki bu ölçüdeki farkın kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir. Ayrıca her iki programla elde edilen ortalama serbest yol değerlerinin hem Zirkonya ve Alumina hem de ZTA seramikleri için artan foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak arttığı belirlenmiştir. Ek olarak, Şekil 4.7 incelendiğinde ZTA seramiklerinin yapısında bulunan Zirkonya oranı arttıkça seramiklerin ilgilenilen tüm foton enerjilerinde ortalama serbest yol değerlerinin düştüğü açık bir şekilde görülmektedir.

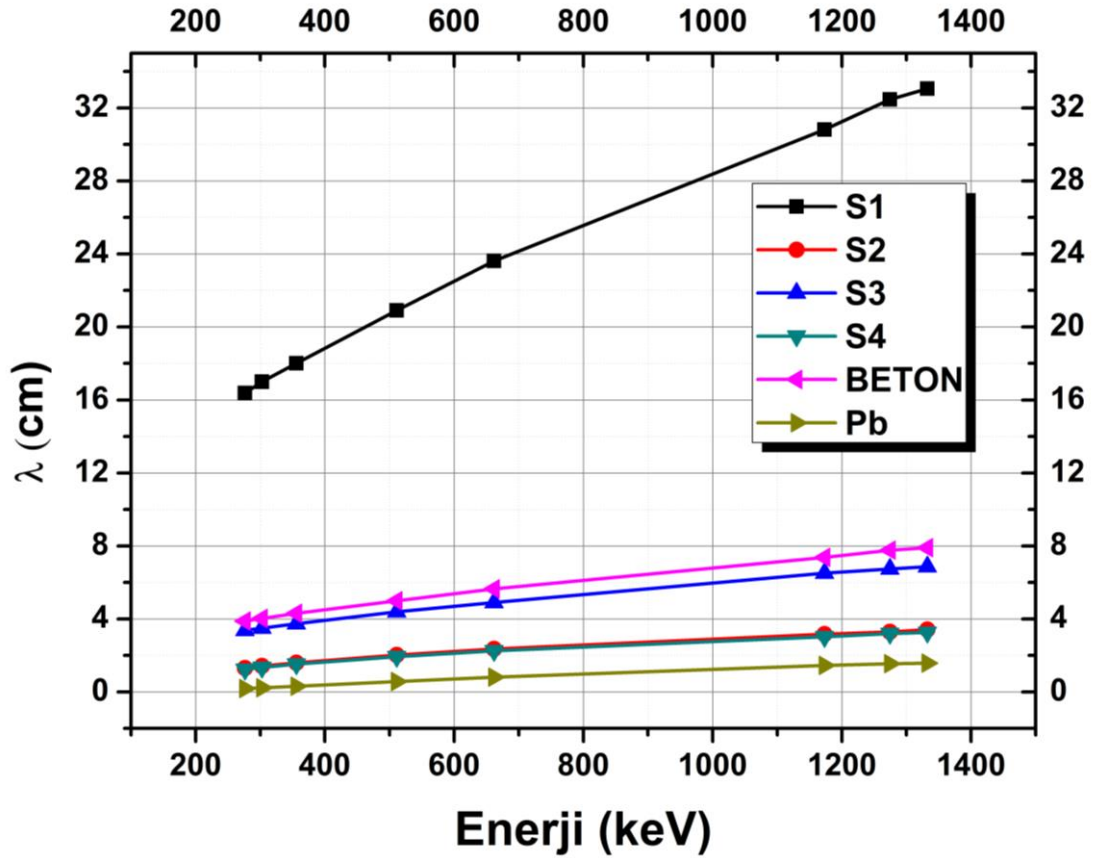
Çizelge 4. 5. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin farklı bileşimlerinden oluşan ZTA seramiklerinin ortalama serbest yol değerleri.

Ortalama Serbest Yol (λ ; cm)						
Enerji (keV)	ZTA-10		ZTA-20		ZTA-30	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	2,218	1,987	2,108	1,705	1,986	1,559
302,900	2,321	2,123	2,205	2,165	2,093	1,659
356,000	2,484	2,218	2,380	2,072	2,277	2,445
511,000	2,922	2,160	2,828	2,612	2,733	2,640
661,661	3,268	2,855	3,162	3,081	3,097	2,445
1173,228	4,357	4,006	4,216	3,385	4,076	3,937
1274,537	4,516	3,821	4,370	3,815	4,302	6,113
1332,492	4,600	3,226	4,451	3,698	4,383	5,280

Ortalama Serbest Yol (λ ; cm)						
Enerji (keV)	ZTA-40		ZTA-50		ZTA-60	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	1,885	1,456	1,772	1,287	1,666	1,379
302,900	1,985	1,591	1,880	1,512	1,779	1,301
356,000	2,177	1,853	2,079	1,651	1,983	1,477
511,000	2,638	2,361	2,544	2,605	2,421	2,041
661,661	2,990	2,769	2,883	2,808	2,776	2,776
1173,228	3,935	2,875	3,861	3,276	3,718	2,892
1274,537	4,153	3,204	4,004	4,158	3,856	3,856
1332,492	4,231	3,398	4,080	3,227	4,004	3,107

Ortalama Serbest Yol (λ ; cm)						
Enerji (keV)	ZTA-70		ZTA-80		ZTA-90	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	1,576	1,100	1,478	0,970	1,384	0,939
302,900	1,682	1,184	1,601	1,017	1,509	1,023
356,000	1,888	1,410	1,796	1,201	1,705	1,296
511,000	2,327	1,668	2,234	1,601	2,141	1,898
661,661	2,669	2,859	2,562	2,825	2,488	2,273
1173,228	3,574	2,566	3,493	3,558	3,347	2,748
1274,537	3,777	4,259	3,625	3,313	3,473	1,979
1332,492	3,849	4,351	3,695	2,956	3,610	2,876

Çizelge 4.6’da verilen S1, S2, S3, S4 seramikleri ile birlikte kurşun ve karşılaştırma betonu için elde edilen ortalama serbest yol değerleri karşılaştırmalı bir şekilde enerjinin bir fonksiyonu olarak çizilmiş ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4. 8. İncelenen S1, S2, S3, S4 seramikleri ile beton ve Pb’nin ortalama serbest yollarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.

Şekil 4.8 incelendiğinde en düşük ortalama serbest yol değerinin kurşunda olduğu ve en yüksek ortalama serbest yol değerinin ise S1 seramiğinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum lineer soğurma katsayısında açıklanan durum ile tam terstir. Bunun böyle olması zaten beklenmektedir. Zira bir malzemenin lineer soğurma kabiliyeti ne kadar fazla ise o malzemenin birim kalınlıktaki foton durdurma gücü yani fotonun ardışık iki etkileşme arasında alabileceği yol da o kadar azdır. Bu durum radyasyon zırhlama uygulamalarında zırh kalınlığı belirlemede oldukça etkilidir. Bu sebeple bu tez çalışmasında ilgilenilen seramiklerin ortalama serbest yolları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

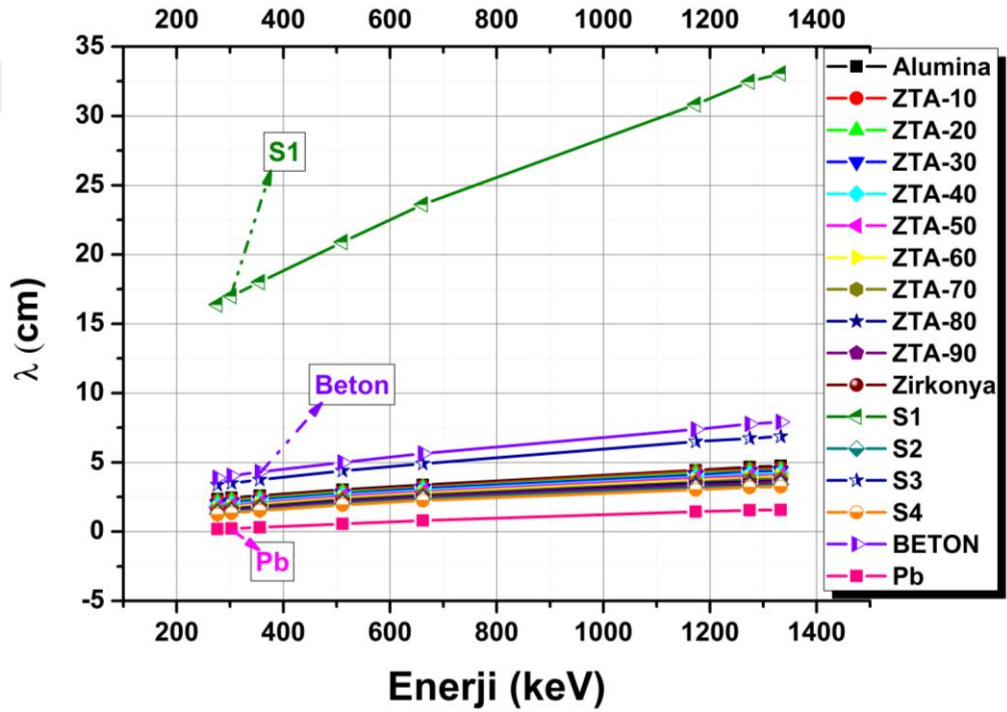
Çizelge 4. 6. Alumina ve Zirkonya seramiklerini yapısında bulunduran bazı önemli seramiklerin (S1, S2, S3 ve S4), karşılaştırma betonu ve Pb'nin ortalama serbest yol değerleri.

Enerji (keV)	Ortalama Serbest Yol (λ ; cm)			
	S1		S2	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	16,380	13,774	1,300	0,854
302,900	16,992	16,681	1,416	0,947
356,000	18,002	19,342	1,598	1,069
511,000	20,899	19,763	2,026	1,584
661,661	23,613	27,137	2,354	2,099
1173,228	30,817	22,727	3,168	4,249
1274,537	32,468	21,906	3,287	3,871
1332,492	33,058	15,949	3,416	3,287

Enerji (keV)	Ortalama Serbest Yol (λ ; cm)			
	S3		S4	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	3,369	2,695	1,230	0,826
302,900	3,494	2,657	1,340	0,839
356,000	3,736	3,043	1,524	1,051
511,000	4,388	3,890	1,932	1,470
661,661	4,901	4,240	2,245	1,954
1173,228	6,506	5,241	3,020	2,815
1274,537	6,739	6,289	3,194	2,596
1332,492	6,861	4,965	3,257	2,679

Enerji (keV)	Ortalama Serbest Yol (λ ; cm)			
	Karşılaştırma Betonu		Kurşun (Pb)	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	3,882	3,019	0,184	0,159
302,900	4,026	3,370	0,223	0,188
356,000	4,305	3,535	0,307	0,253
511,000	4,998	4,778	0,565	0,437
661,661	5,647	5,435	0,802	0,634
1173,228	7,369	6,901	1,446	1,208
1274,537	7,764	7,905	1,547	1,297
1332,492	7,905	7,128	1,575	1,316

Bütün incelenen numunelerin ortalama serbest yollarının uyarıcı foton enerjisine ve malzemenin kimyasal bileşimine bağlı olduğu bu tez çalışmasında incelenen numuneler için açık bir şekilde gözlemlenmiştir. İncelenen numunelerin ortalama serbest yolları arasında genel bir sıralama yapabilmek için Şekil 4.9'da verilen grafik çizilmiştir. Bu grafikten de görüleceği üzere incelenen tüm malzemelerin ortalama serbest yolları arasındaki sıralama lineer soğurma katsayıları arasındaki sıralamanın tam tersidir. Bu sebeple lineer soğurma katsayısının incelenmesi bölümünde yapılan yorumların tam ters durumu buradaki sonuçlar için düşünülebilir.



Şekil 4. 9. İncelenen tüm numunelerin ortalama serbest yollarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.

Bu başlık altında elde edilen sonuçların lineer soğurma katsayıları sonuçları ile tam ters olması münasebetiyle buradaki yorumlar lineer azaltma katsayılarının incelenmesi başlığı altında yaptığımız yorumlara benzer olup tekrarlanmamaktadır. Yani incelenen numuneler arasında lineer soğurma katsayısı yüksek olan seramik en düşük ortalama serbest yol değerine sahip iken lineer soğurma katsayısı düşük olan seramik ise en yüksek ortalama serbest yol değerine sahiptir.

4.3. Yarı-değer kalınlıklarının incelenmesi

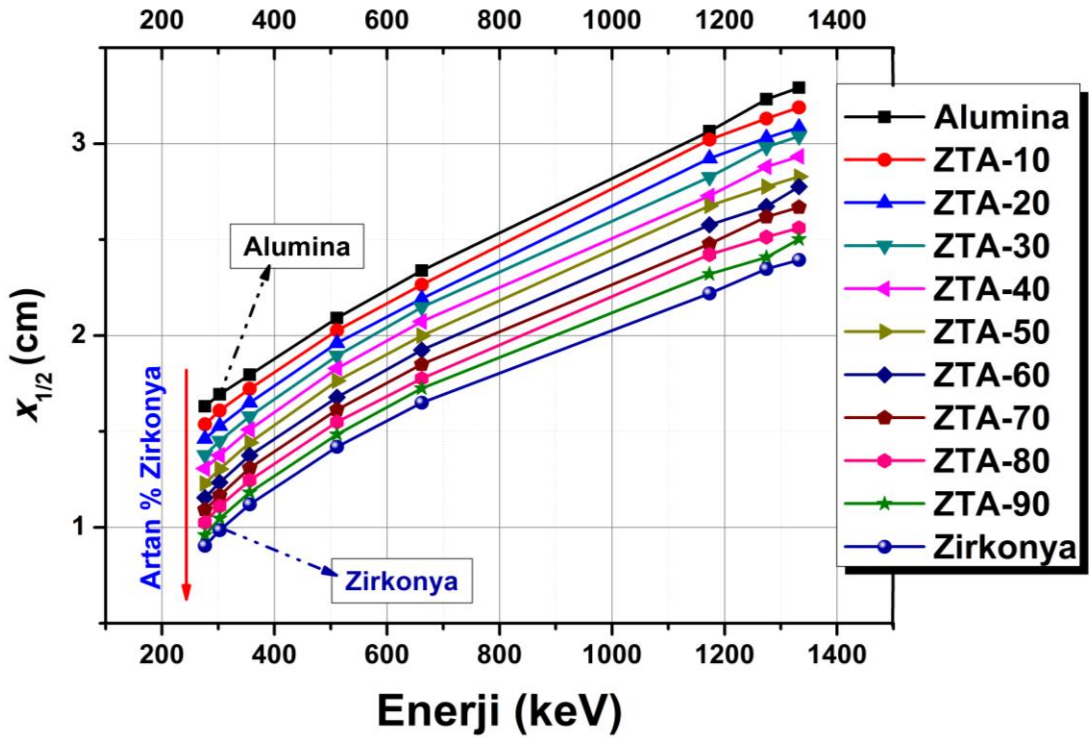
Yarı-değer kalınlığı bir malzemenin etkileşime girdiği fotonun başlangıç şiddetini yarıya indirmek için gerekli kalınlık olup, birçok radyasyon uygulamasında tercih edilen önemli bir parametredir. Bu parametre genellikle, zırh malzemelerinin herhangi bir foton enerjisi için yeterli kalınlığını belirlemede kullanıldığından dolayı malzemelerin zırhlama için maliyetini karşılaştırma işlemlerinde tercih edilen bir parametredir. Ayrıca, bu parametre özellikle kanser hastalığı başta olmak üzere birçok medikal uygulamada hastalıkların teşhis ve tedavisi için oldukça çok yaygın bir şekilde başvurulmuş bir parametredir. Bu sebeple bu tez çalışmasında incelenen numunelerin yarı-değer kalınlıkları literatüre data sağlamak için tablo şeklinde detaylı olarak sunulmuştur. Bu parametre, enerjiye bağımlılık ve malzemenin kimyasal yapısına bağımlılık açısından ortalama serbest yol değerine benzer olduğundan dolayı bu başlık altında detaylı grafiksel sunum yerine sadece karşılaştırmalı grafiksel sunum verilmiştir. Ancak literatüre data sağlamak açısından çizelgeler detaylı bir şekilde oluşturulmuştur. Çünkü herhangi bir malzemenin ortalama serbest yol değeri şayet küçük ise o malzemenin yarı-değer kalınlığıda küçüktür. Yani yarı-değer kalınlıkları için ortaya çıkacak sıralama ortalama serbest yol değerlerindeki sıralama ile aynı lineer soğurma katsayı sıralaması ile ters orantılıdır. Bu sebeple bu başlık altındaki malzeme sıralaması lineer soğurma başlığı altında yapılan seramik sıralaması ile tam ters olacak şekildedir.

Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) için hem WinXCOM hem de MCNP-X programları kullanılarak ilgilenilen foton enerjilerinde elde edilmiş yarı-değer kalınlıkları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) seramiklerinin ağırlıkça bileşim konsantrasyonları farklı olacak şekilde oluşturulmuş Zirkonya ile stabilize edilmiş tetragonal Alumina (ZTA) seramikleri için hem WinXCOM hem de MCNP-X programları kullanılarak ilgilenilen foton enerjilerinde elde edilmiş yarı-değer kalınlıkları ise Çizelge 4.8’de verilmiştir. Ayrıca, yapısında farklı oranlarda Alumina ve Zirkonya bulunduran ve içerikleri Çizelge 3.10’da verilen dört önemli seramiğin, karşılaştırma betonunun ve kurşunun hem WinXCOM hem de MCNP-X programları ile elde edilmiş yarı-değer kalınlıkları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4. 7. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin yarı-değer kalınlıkları.

Enerji (keV)	Yarı-değer kalınlıkları ($X_{1/2}$; cm)			
	Alumina		Zirkonya	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	1,631	1,457	0,904	0,584
302,900	1,693	1,433	0,984	0,642
356,000	1,795	1,587	1,120	0,763
511,000	2,091	2,141	1,419	1,000
661,661	2,339	2,503	1,649	1,453
1173,228	3,064	2,653	2,219	2,773
1274,537	3,231	2,339	2,347	1,968
1332,492	3,291	3,485	2,393	2,347

Bu çizelgelerde verilen yarı-değer kalınlıkları karşılaştırmalı bir şekilde enerjinin bir fonksiyonu olarak sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de ayrı ayrı sunulmuştur.



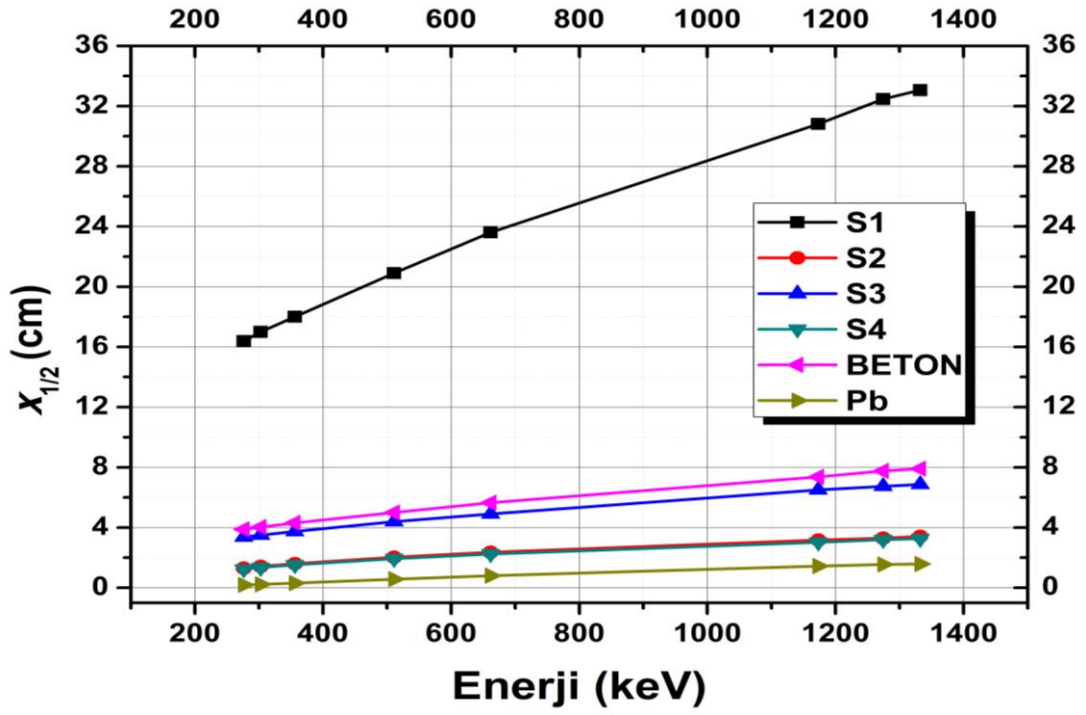
Şekil 4. 10. İncelenen ZTA seramiklerinin yarı-değer kalınlıklarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.

Çizelge 4. 8. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin farklı bileşimlerinden oluşan ZTA seramiklerinin yarı-değer kalınlıkları.

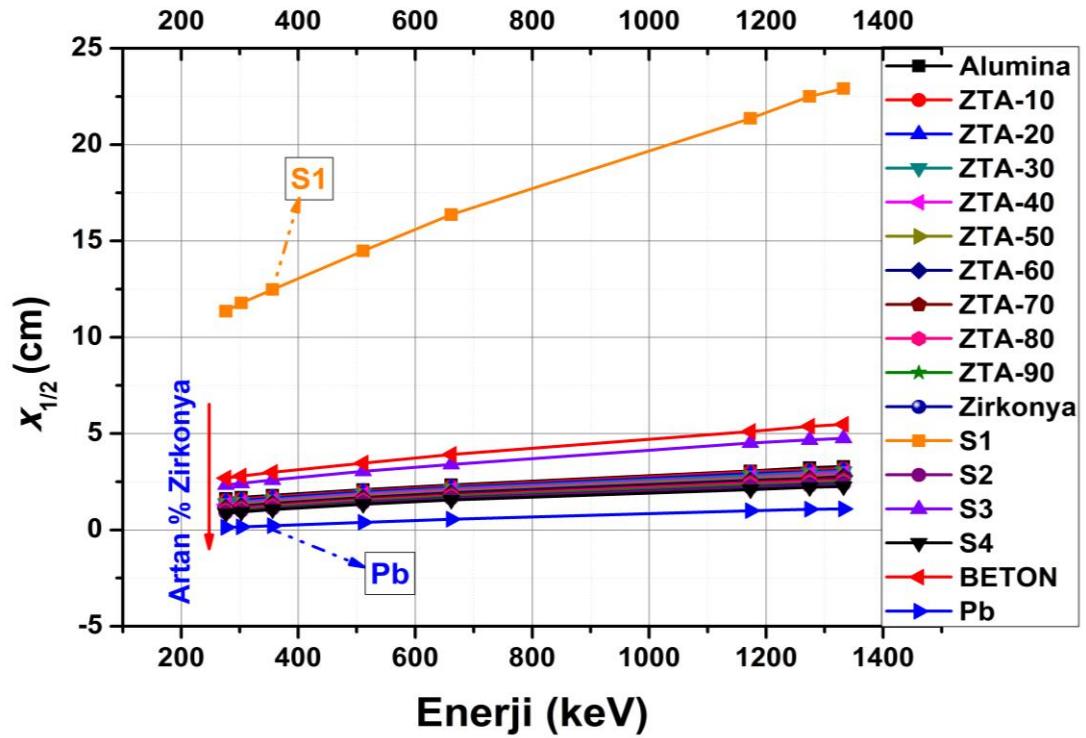
Enerji (keV)	Yarı-değer kalınlıkları ($X_{1/2}$; cm)					
	ZTA-10		ZTA-20		ZTA-30	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	1,537	1,377	1,461	1,181	1,376	1,081
302,900	1,609	1,471	1,528	1,501	1,451	1,150
356,000	1,722	1,537	1,649	1,436	1,579	1,695
511,000	2,025	1,497	1,960	1,811	1,894	1,830
661,661	2,265	1,979	2,192	2,136	2,147	1,695
1173,228	3,020	2,777	2,923	2,346	2,825	2,729
1274,537	3,130	2,649	3,029	2,644	2,982	4,237
1332,492	3,188	2,236	3,085	2,563	3,038	3,660

Enerji (keV)	Yarı-değer kalınlıkları ($X_{1/2}$; cm)					
	ZTA-40		ZTA-50		ZTA-60	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	1,306	1,009	1,229	0,892	1,154	0,956
302,900	1,376	1,102	1,303	1,048	1,233	0,902
356,000	1,509	1,285	1,441	1,144	1,374	1,023
511,000	1,829	1,636	1,763	1,806	1,678	1,415
661,661	2,073	1,919	1,998	1,947	1,924	1,924
1173,228	2,727	1,993	2,676	2,271	2,577	2,004
1274,537	2,879	2,221	2,776	2,882	2,672	2,672
1332,492	2,933	2,355	2,828	2,237	2,775	2,154

Enerji (keV)	Yarı-değer kalınlıkları ($X_{1/2}$; cm)					
	ZTA-70		ZTA-80		ZTA-90	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	1,092	0,762	1,024	0,673	0,959	0,651
302,900	1,166	0,821	1,110	0,705	1,046	0,709
356,000	1,309	0,977	1,245	0,832	1,182	0,899
511,000	1,613	1,156	1,549	1,110	1,484	1,315
661,661	1,850	1,982	1,776	1,958	1,724	1,575
1173,228	2,478	1,779	2,421	2,466	2,320	1,905
1274,537	2,618	2,952	2,513	2,296	2,408	1,372
1332,492	2,668	3,016	2,561	2,049	2,502	1,994



Şekil 4. 11. İncelenen S1, S2, S3, S4 seramikleri ile beton ve Pb'nin yarı-değer kalınlıklarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.



Şekil 4. 12. İncelenen tüm numunelerin yarı-değer kalınlıklarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.

Çizelge 4. 9. Alumina ve Zirkonya seramiklerini yapısında bulunduran bazı önemli seramiklerin (S1, S2, S3 ve S4), karşılaştırma betonu ve Pb'nin yarı-değer kalınlıkları.

Enerji (keV)	Yarı-değer kalınlıkları ($X_{1/2}$; cm)			
	S1		S2	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	11,354	9,547	0,901	0,592
302,900	11,778	11,562	0,982	0,656
356,000	12,478	13,407	1,108	0,741
511,000	14,486	13,699	1,404	1,098
661,661	16,367	18,810	1,632	1,455
1173,228	21,360	15,753	2,196	2,945
1274,537	22,505	15,184	2,278	2,683
1332,492	22,914	11,055	2,368	2,278

Enerji (keV)	Yarı-değer kalınlıkları ($X_{1/2}$; cm)			
	S3		S4	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	2,335	1,868	0,853	0,573
302,900	2,422	1,842	0,929	0,582
356,000	2,590	2,109	1,056	0,729
511,000	3,041	2,697	1,339	1,019
661,661	3,397	2,939	1,556	1,355
1173,228	4,510	3,633	2,093	1,952
1274,537	4,671	4,359	2,214	1,799
1332,492	4,756	3,442	2,258	1,857

Enerji (keV)	Yarı-değer kalınlıkları ($X_{1/2}$; cm)			
	Karşılaştırma Betonu		Kurşun (Pb)	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	2,691	2,093	0,128	0,110
302,900	2,790	2,336	0,155	0,130
356,000	2,984	2,450	0,213	0,176
511,000	3,464	3,312	0,392	0,303
661,661	3,914	3,767	0,556	0,440
1173,228	5,108	4,784	1,002	0,837
1274,537	5,382	5,479	1,072	0,899
1332,492	5,479	4,940	1,092	0,912

Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9 ile birlikte Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 birlikte değerlendirildiğinde artan foton enerjisi ile incelenen tüm numunelerin yarı-değer kalınlıklarının arttığı, incelenen numuneler arasında tüm ilgilenilen foton enerjilerinde en düşük yarı-değer kalınlığına Pb sahip iken en yüksek yarı-değer kalınlığına S1 seramiğinin sahip olduğu, incelenen ZTA seramiklerinin yarı-değer kalınlıklarının tüm foton enerjilerinde seramik yapısındaki Zirkonya yüzdesinin artışı ile azaldığı sonuçları açık bir şekilde belirlenmiştir.

4.4. Kütle soğurma katsayılarının incelenmesi

Kütle soğurma katsayısı matematiksel olarak malzemenin lineer soğurma katsayısı ile yoğunluğunun çarpımına eşittir. Fiziksel olarak ise bir malzemenin gelen foton ile yapabileceği bütün foton-madde etkileşim olaylarının ihtimaliyetler toplamıdır. Bu sebeple bir malzemenin foton zırhlamada etkin bir şekilde kullanılıp kullanılmayacağını gösteren en önemli radyasyon zırhlama parametresidir. Lineer azaltma katsayısı malzeme kalınlığı arttıkça azalırken kütle soğurma katsayısı malzeme kalınlığından bağımsız bir şekilde malzemenin karakteristik olarak foton zırhlama kabiliyetini net olarak ortaya koyar. Bu sebeple radyasyon güvenlik uygulamalarında zırh malzemesi seçilirken bakılması gereken en önemli parametre kütle soğurma katsayısıdır.

Bu tez çalışmasında, Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) tabanlı ZTA seramikleri ile bazı önemli seramiklerin radyasyon zırhlama kapasitelerinin tam doğru bir şekilde belirlenerek kıyaslanabilmesi için kütle soğurma katsayıları hem WinXCOM hem de MCNP-X programları kullanılarak ilgilenilen foton enerjilerinde ayrı ayrı hesaplanmıştır. Al_2O_3 (Alumina) ve ZrO_2 (Zirkonya) için elde edilmiş kütle soğurma katsayıları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Çizelge 4.10'da verilen datalar enerjinin bir fonksiyonu olarak grafiksel olarak Şekil 4.13'de sunulmuştur. Çizelge 4.10 ve Şekil 4.13 birlikte değerlendirildiğinde Zirkonya ve Alumina seramiklerinin WinXCOM ve MCNP-X programları ile elde edilen kütle soğurma katsayıları arasında küçük farklar olmakla birlikte genelde uyumludur. MCNP-X sonuçları ile WinXCOM sonuçları arasında bu ölçüdeki farklar kabul edilebilir düzeydedir.

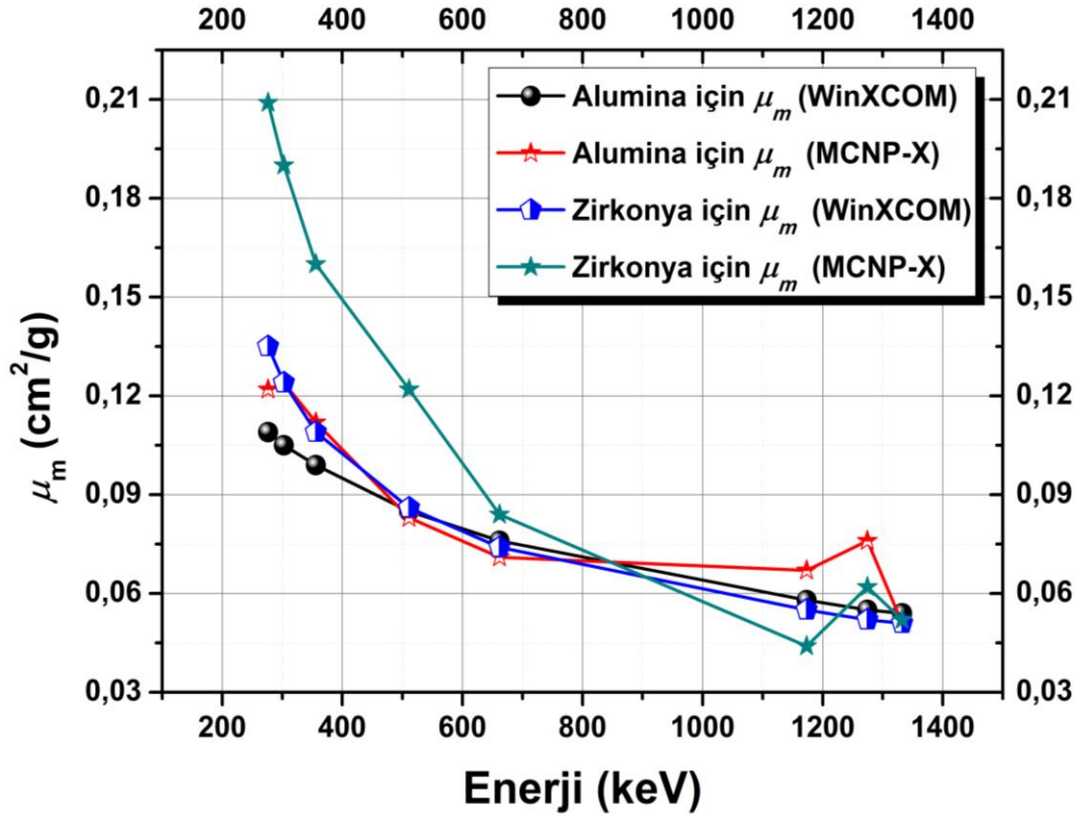
Her iki programla elde edilen kütle soğurma katsayıları hem Zirkonya hem de Alumina seramikleri için incelendiğinde, artan foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak kütle soğurma katsayılarının azaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 4. 10. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin kütle soğurma katsayıları.

Enerji (keV)	μ_m (cm ² /g)			
	Alumina		Zirkonya	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	0,109	0,122	0,135	0,209
302,900	0,105	0,124	0,124	0,190
356,000	0,099	0,112	0,109	0,160
511,000	0,085	0,083	0,086	0,122
661,661	0,076	0,071	0,074	0,084
1173,228	0,058	0,067	0,055	0,044
1274,537	0,055	0,076	0,052	0,062
1332,492	0,054	0,051	0,051	0,052

Al₂O₃ (Alumina) ve ZrO₂ (Zirkonya) seramiklerinin ağırlıkça bileşim konsantrasyonları farklı olacak şekilde oluşturulmuş Zirkonya ile stabilize edilmiş tetragonal Alumina (ZTA) seramikleri için hem WinXCOM hem de MCNP-X programları kullanılarak ilgilenilen foton enerjilerinde elde edilmiş kütle azaltma katsayıları Çizelge 4.11’de verilmiştir. ZTA seramiklerinin kütle soğurma katsayıları arasında detaylı bir karşılaştırma yapabilmek için Alumina ve Zirkonya seramikleri ile birlikte karşılaştırmalı bir şekilde uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak Şekil 4. 14’de verilmiştir. Ayrıca her bir ZTA seramiği için ayrı ayrı WinXCOM ve MCNP-X sonuçları birlikte enerjinin bir fonksiyonu olarak çizilmiş Şekil 4.15’de ayrı ayrı verilmiştir. Çizelge 4.10 ve Şekil 4.13’den de görülebileceği gibi, Zirkonya için elde edilen kütle soğurma katsayısının Alumina için elde edilen kütle soğurma katsayılarından yaklaşık 570 keV enerji değerine kadar büyük olduğu bu enerji değerinden daha büyük foton enerjilerinde ise çok az bir farkla küçük olduğu saptanmıştır. Bu durum, Zirkonya seramiğinin yaklaşık 570 keV enerji değerine kadar ki düşük foton enerjilerinde foton zırlama kabiliyetinin Alumina

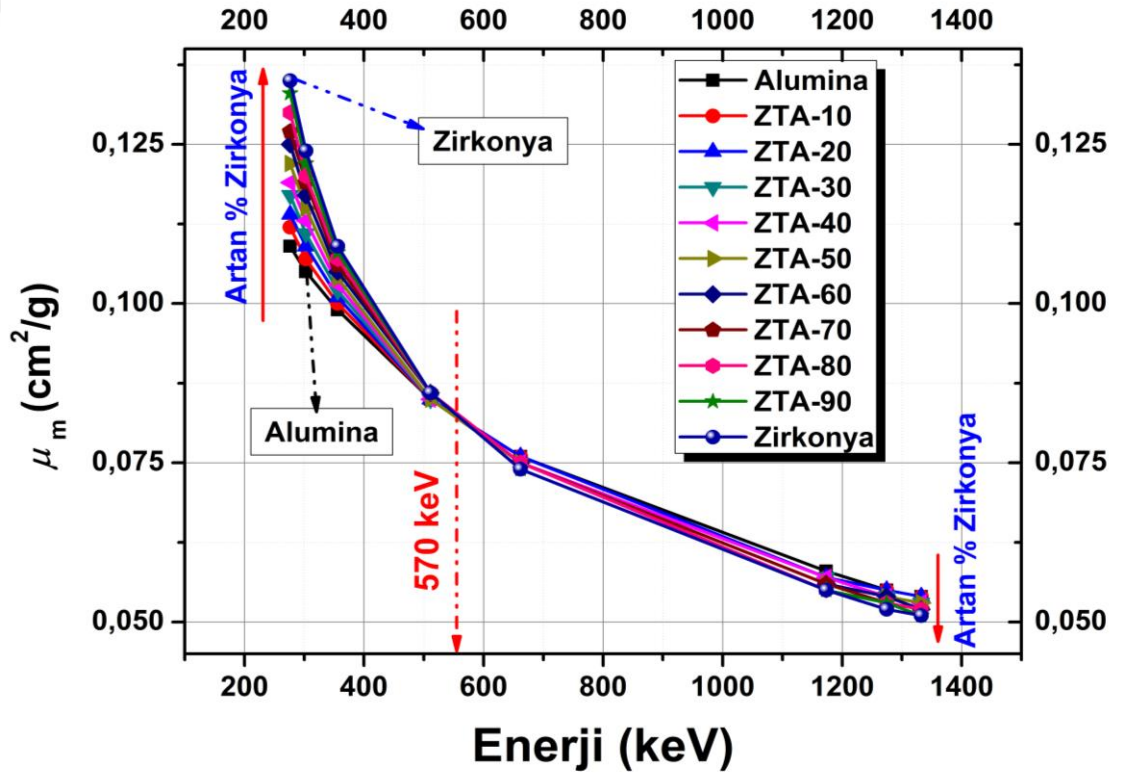
seramiğinden iyi olduğunun fakat bu enerji değerinden daha yüksek enerji bölgesinde ise daha kötü olduğunun göstergesidir.



Şekil 4. 13. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi.

Ayrıca Çizelge 4.11 ve Şekil 4.14 detaylı bir şekilde incelendiğinde ZTA seramiklerinin yapısında bulunan Zirkonya'nın ağırlıkça bileşim kesri arttıkça seramiklerin kütle soğurma katsayılarının yaklaşık 570 keV den düşük foton enerjilerinde arttığı, yüksek foton enerjilerinde ise çok düşük ölçekte azaldığı gözlemlenmiştir. Bu grafik incelendiğinde her bir seramik için kütle azaltma katsayısının enerjinin bir fonksiyonu olarak artan foton enerjisi ile üstel olarak azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. ZTA seramiklerinin yapısındaki Zirkonya miktarının artması Zr elementinin atom numarasının büyük olması sebebiyle kütle soğurma katsayılarını düşük foton enerji bölgesinde (fotoelektrik etkinin baskın olduğu enerji bölgesi) artırdığı, yüksek enerji bölgesinde ise (compton saçılmasının baskın olduğu enerji bölgesi) azalttığı belirgin bir şekilde gözlemlenmiş ve seramiklerin yapısındaki Zirkonya miktarının artmasının o seramiğin zırhlama

kapasitesinin özellikle düşük enerji bölgesinde artmasına sebep olacağı, yüksek enerji bölgesinde ise azalmasına sebep olacağı kütle soğurma katsayıları sonuçlarından açık bir şekilde belirlenmiştir. Ek olarak, Şekil 4.15’de her bir grafik ayrı ayrı incelendiğinde artan foton enerjisi ile seramiklerin kütle soğurma katsayılarının exporansiyel olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca hem Çizelge 4.11 hem de Şekil 4.15 birlikte değerlendirildiğinde WinXCOM sonuçları ile MCNP-X program sonuçları arasında çok az farklılık olmasına rağmen genel olarak uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Her iki programdan elde edilen sonuçların foton enerjisine bağlı değişimlerinin aynı olduğu gözlemlenmiştir.



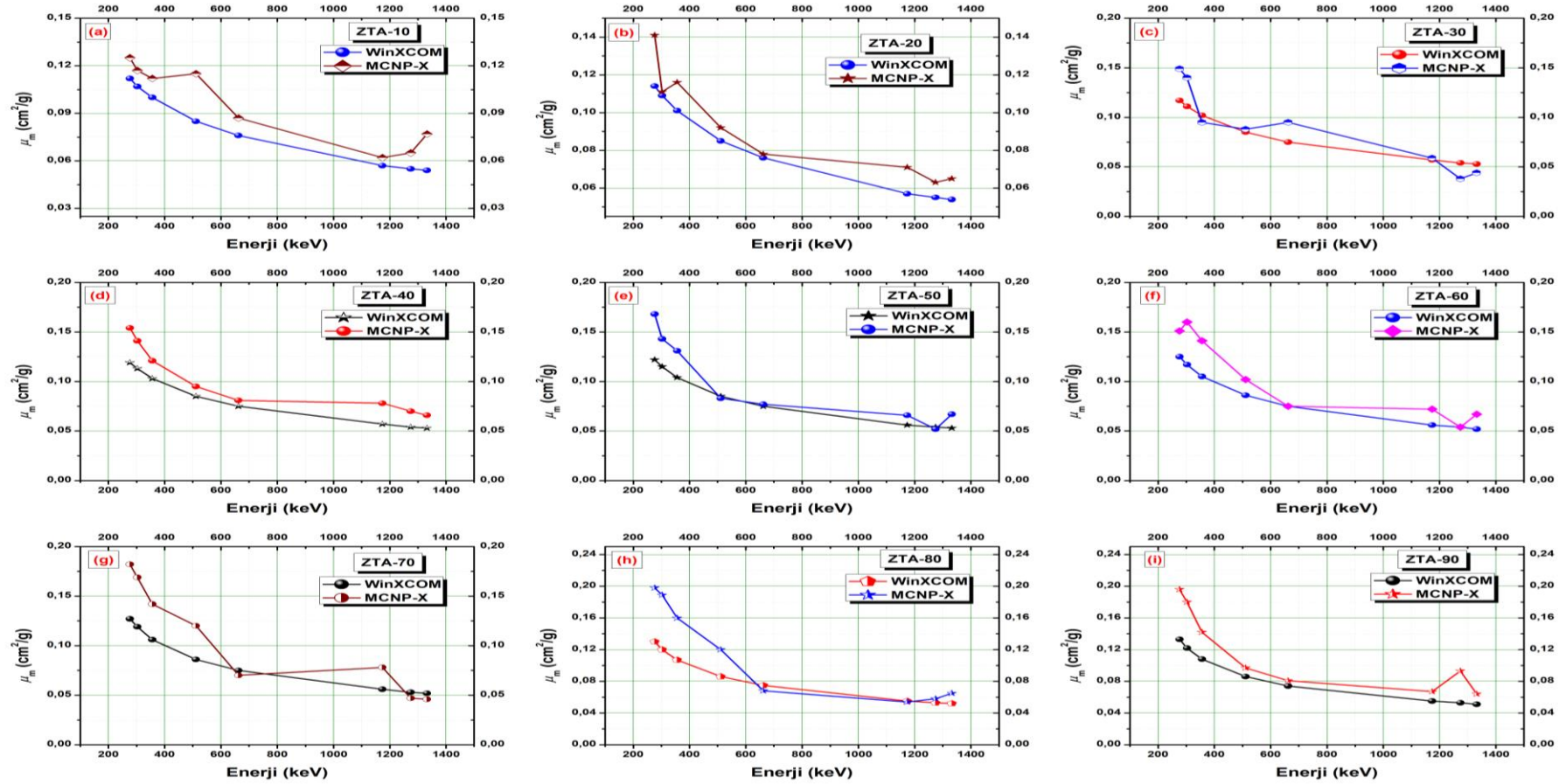
Şekil 4.14. Alumina, Zirkonya ve ZTA seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak karşılaştırmalı olarak gösterimi.

Çizelge 4. 11. Alumina ve Zirkonya seramiklerinin farklı bileşimlerinden oluşan ZTA seramiklerinin kütle soğurma katsayıları.

Enerji (keV)	μ_m (cm ² /g)					
	ZTA-10		ZTA-20		ZTA-30	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	0,112	0,125	0,114	0,141	0,117	0,149
302,900	0,107	0,117	0,109	0,111	0,111	0,140
356,000	0,100	0,112	0,101	0,116	0,102	0,095
511,000	0,085	0,115	0,085	0,092	0,085	0,088
661,661	0,076	0,087	0,076	0,078	0,075	0,095
1173,228	0,057	0,062	0,057	0,071	0,057	0,059
1274,537	0,055	0,065	0,055	0,063	0,054	0,038
1332,492	0,054	0,077	0,054	0,065	0,053	0,044

Enerji (keV)	μ_m (cm ² /g)					
	ZTA-40		ZTA-50		ZTA-60	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	0,119	0,154	0,122	0,168	0,125	0,151
302,900	0,113	0,141	0,115	0,143	0,117	0,160
356,000	0,103	0,121	0,104	0,131	0,105	0,141
511,000	0,085	0,095	0,085	0,083	0,086	0,102
661,661	0,075	0,081	0,075	0,077	0,075	0,075
1173,228	0,057	0,078	0,056	0,066	0,056	0,072
1274,537	0,054	0,070	0,054	0,052	0,054	0,054
1332,492	0,053	0,066	0,053	0,067	0,052	0,067

Enerji (keV)	μ_m (cm ² /g)					
	ZTA-70		ZTA-80		ZTA-90	
	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X	Win- XCOM	MCNP -X
276,397	0,127	0,182	0,130	0,198	0,133	0,196
302,900	0,119	0,169	0,120	0,189	0,122	0,180
356,000	0,106	0,142	0,107	0,160	0,108	0,142
511,000	0,086	0,120	0,086	0,120	0,086	0,097
661,661	0,075	0,070	0,075	0,068	0,074	0,081
1173,228	0,056	0,078	0,055	0,054	0,055	0,067
1274,537	0,053	0,047	0,053	0,058	0,053	0,093
1332,492	0,052	0,046	0,052	0,065	0,051	0,064



Şekil 4. 15. ZTA seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi ((a) ZTA-10 için, (b) ZTA-20 için, (c) ZTA-30 için, (d) ZTA-40 için, (e) ZTA-50 için, (f) ZTA-60 için, (g) ZTA-70 için, (h) ZTA-80 için ve (i) ZTA-90 için).

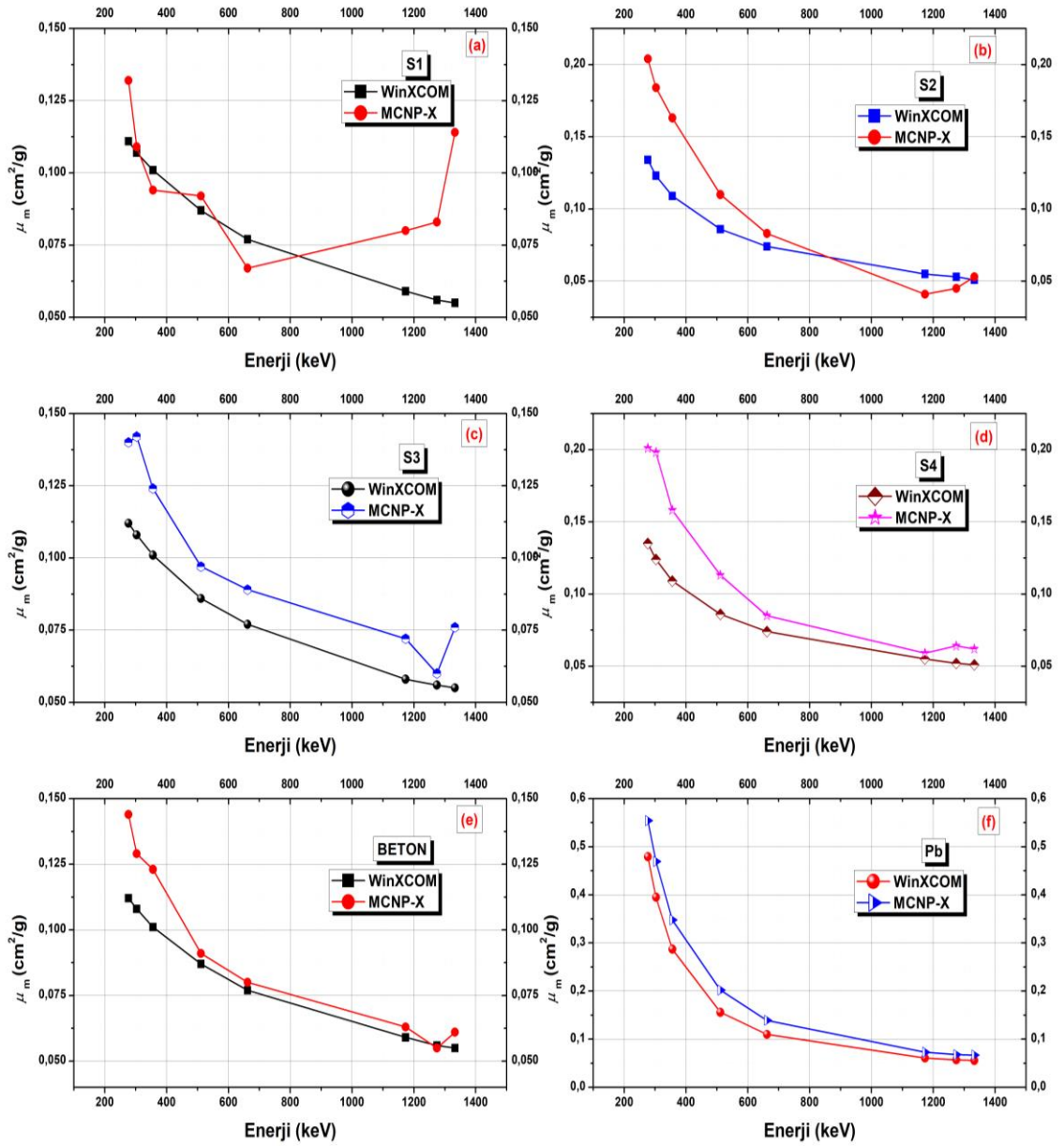
Yapısında farklı oranlarda Alumina ve Zirkonya bulunduran ve içerikleri Çizelge 3.10'da verilen dört önemli seramiğin, karşılaştırma betonunun ve kurşunun hem WinXCOM hem de MCNP-X programları ile elde edilmiş kütle soğurma katsayıları Çizelge 4.12'de verilmiştir. Bu çizelgede verilen datalar enerjinin bir fonksiyonu olarak her bir seramik için ayrı ayrı olmak üzere grafiksel olarak Şekil 4.16'da verilmiştir. Çizelge 4.12 ve Şekil 4.16 birlikte değerlendirildiğinde, hem S1, S2, S3, S4 seramiklerinin hem de karşılaştırma betonu ve kurşunun kütle soğurma katsayıları artan foton enerjisi ile birlikte azalmakta olduğu ve WinXCOM ile MCNP-X sonuçları arasında çok az farklılıklar ile birlikte genel olarak uyum olduğu açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca S1, S2, S3 ve S4 seramikleri, beton ve Pb arasında radyasyon zırhlama kapasitesi açısından detaylı bir kıyaslama yapabilmek için kütle soğurma katsayıları karşılaştırmalı bir şekilde uyarıcı foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak çizilmiş ve grafik Şekil 4.17'de verilmiştir. Bu grafiğe göre en düşük kütle soğurma katsayısına sahip seramik S1 iken en yüksek kütle soğurma katsayısı değerine sahip seramik ise S4 dür. İncelenen S1, S2, S3 ve S4 seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının Pb'nin kütle soğurma katsayılarından düşük, betonun kütle soğurma katsayılarına ise hemen hemen eşit olduğu Şekil 4.17'den açık bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 4. 12. Alumina ve Zirkonya seramiklerini yapısında bulunduran bazı önemli seramiklerin (S1, S2, S3 ve S4), karşılaştırma betonu ve Pb'nin kütle soğurma katsayıları.

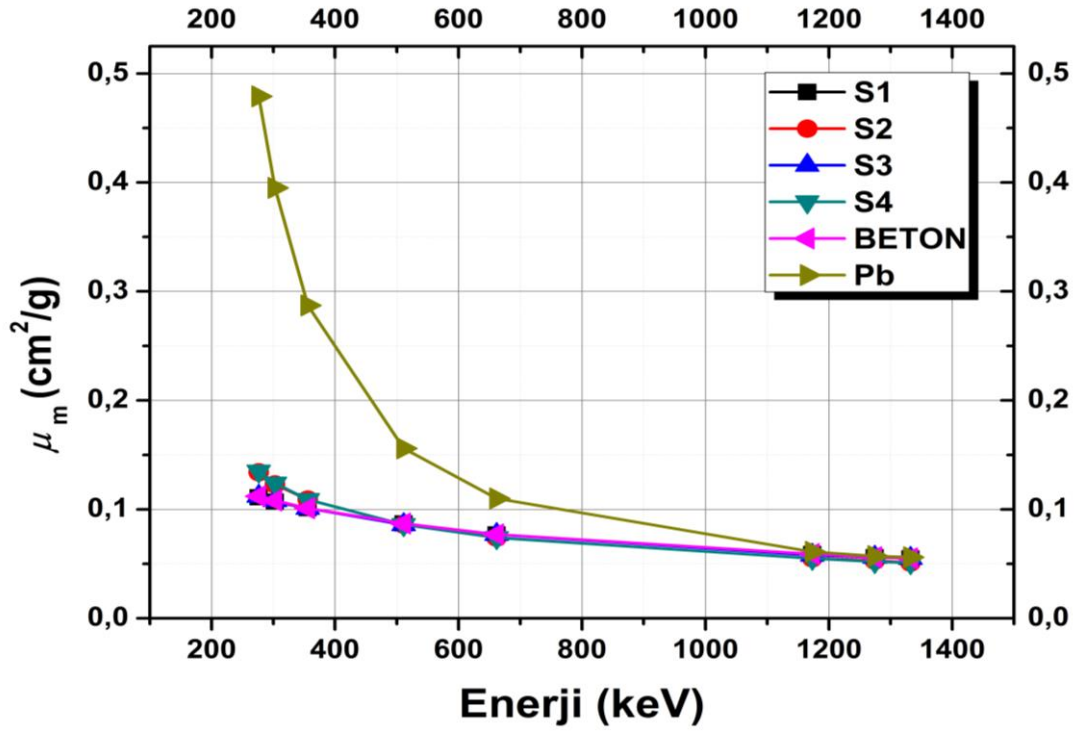
Enerji (keV)	μ_m (cm ² /g)			
	S1		S2	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	0,111	0,132	0,134	0,204
302,900	0,107	0,109	0,123	0,184
356,000	0,101	0,094	0,109	0,163
511,000	0,087	0,092	0,086	0,110
661,661	0,077	0,067	0,074	0,083
1173,228	0,059	0,080	0,055	0,041
1274,537	0,056	0,083	0,053	0,045
1332,492	0,055	0,114	0,051	0,053

Enerji (keV)	μ_m (cm ² /g)			
	S3		S4	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	0,112	0,140	0,135	0,201
302,900	0,108	0,142	0,124	0,198
356,000	0,101	0,124	0,109	0,158
511,000	0,086	0,097	0,086	0,113
661,661	0,077	0,089	0,074	0,085
1173,228	0,058	0,072	0,055	0,059
1274,537	0,056	0,060	0,052	0,064
1332,492	0,055	0,076	0,051	0,062

Enerji (keV)	μ_m (cm ² /g)			
	Karşılaştırma Betonu		Kurşun (Pb)	
	WinXCOM	MCNP-X	WinXCOM	MCNP-X
276,397	0,112	0,144	0,479	0,554
302,900	0,108	0,129	0,395	0,469
356,000	0,101	0,123	0,287	0,348
511,000	0,087	0,091	0,156	0,202
661,661	0,077	0,080	0,110	0,139
1173,228	0,059	0,063	0,061	0,073
1274,537	0,056	0,055	0,057	0,068
1332,492	0,055	0,061	0,056	0,067

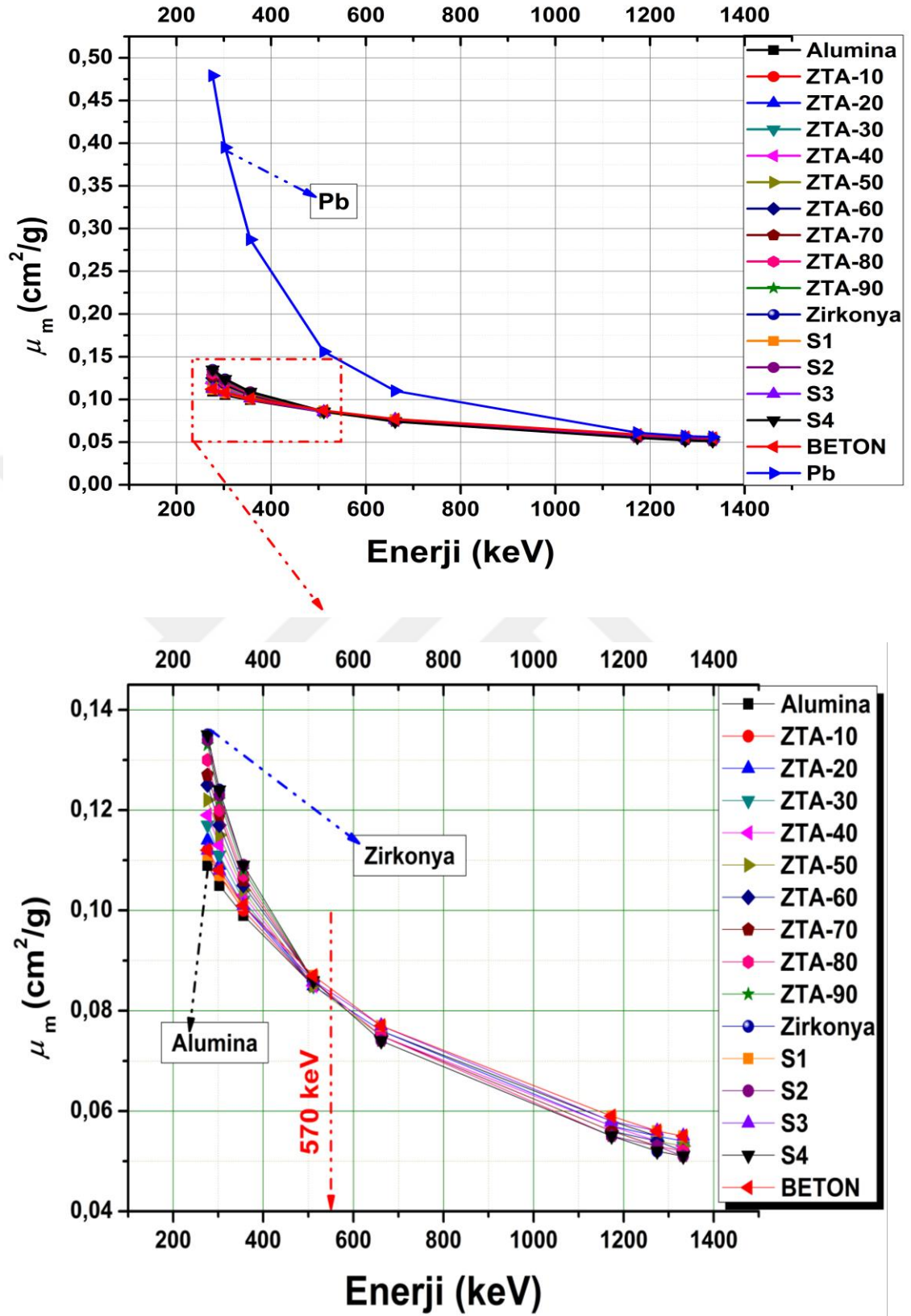


Şekil 4. 16. Yapısında Alumina ve Zirkonya seramiklerini bulunduran S1(a), S2 (b), S3 (c), S4 (d) seramikleri, karşılaştırma betonu (e) ve kurşun (f) için kütle soğurma katsayılarının enerjinin bir fonksiyonu olarak değişim eğrisi.



Şekil 4. 17. S1, S2, S3, S4 seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının beton ve Pb ile karşılaştırılma eğrisi.

Bütün incelenen numunelerin kütle soğurma katsayılarının uyarıcı foton enerjisine ve malzemenin kimyasal bileşimine bağlı olduğu bu tez çalışmasında incelenen numuneler için açık bir şekilde gözlemlenmiştir. İncelenen numunelerin kütle soğurma katsayıları arasında genel bir sıralama yapabilmek için Şekil 4.18’de verilen grafik çizilmiştir. Şekil 4.18 incelendiğinde, Zirkonya esaslı ZTA seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının kurşundan küçük betondan ise büyük olduğu gözlenmektedir. İncelenen seramikler arasında ZTA’ların yapısındaki Zirkonya oranı artışının enerjiye bağlı olarak kütle soğurma katsayısına bölgesel etki ettiği gözlemlenmektedir. Fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde Zirkonya oranı ile kütle soğurma katsayısının doğru orantılı olduğu, Compton saçılmasının baskın olduğu yüksek enerji bölgesinde ise Zirkonya oranı ile kütle soğurma katsayısının ters orantılı olduğu saptanmıştır. Bu değişimin olduğu sınır foton enerjisinin ise yaklaşık 570 keV olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 18. İncelenen tüm numunelerin kütle soğurma katsayılarının foton enerjisine bağlı olarak karşılaştırma grafiği.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Özellikle radyasyondan korunma ve dozimetri alanlarında, günden güne ilerleyen teknolojik uygulamalar için zırhlama malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin X ve gama ışını etkileşim parametrelerinin bilinmesi radyasyondan korunma açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, X ve gama ışınlarının radyasyon fiziği, nükleer enerji santralleri, tarım alanı, gıda teknolojisi, radyasyon dozimetri, tıpta kanser teşhis ve tedavisinde geniş uygulamalara sahip olması nedeniyle, radyasyondan korunma için güvenlik talebi gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır. Radyasyondan korunma için en iyi soğurucu malzemenin Kurşun (Pb) olduğu bilinmektedir. Ancak, Pb düşük erime noktası (327 °C), zayıf mukavemeti ve toksin etkileri nedeniyle nükleer uygulamalarda ve radyasyondan korunma alanlarında kullanımı oldukça sınırlıdır. Çünkü radyasyon zırh malzemelerinin yüksek erime noktası, yüksek mukavemet, kolay erişilebilirlik, ucuzluk, iyi korozyon direnci gibi üstün karakteristik özelliklere sahip olması gerekir. Bu nedenle, belirtilen üstün özelliklere sahip olan ve radyasyon uygulamalarında zırh malzemesi olarak kullanılabilecek yeni malzemelerin keşfi ve tasarımı araştırmacıların son zamanlarda ilgi odağı haline gelmiştir. Literatürde alaşımlar, camlar, seramikler, bileşikler ve betonlar gibi malzemelerin radyasyon zırhlama özellikleri üzerine giriş bölümünde de detaylı bir şekilde izah edildiği gibi birçok çalışma bulunmaktadır. Belirtilen bu çalışmalarda incelenen malzemelerin radyasyon zırhlama kapasitelerini belirlemek amacıyla numunelerin farklı foton enerjilerinde kütle zayıflatma katsayıları, lineer zayıflatma katsayıları, ortalama serbest yolları, yarı-değer kalınlıkları, ondabir-değer kalınlıkları, atomik ve elektronik tesir kesitleri gibi parametrelerin hesaplama sonuçları rapor edilmiş ve malzemelerin radyasyon zırhlama performansları bu değerlere göre değerlendirilmiştir.

Yukarıda belirtilen bilgiler ışığında radyasyonun günlük hayatta insan sağlığını tehdit eder hale geldiği, nükleer santrallerin kurulması ve radyasyonun günlük hayatta evlerimize kadar girdiği bu önemli dönemde radyasyona karşı korunma dahada önemli hal almaya başlamıştır. Bu sebeple, bir malzemenin hem radyasyona

karşı zırh malzemesi olabilecek üstün tribolojik özelliklere sahip olması hemde maliyet açısından uygun olması ve o malzemenin zırhlama açısından optimum bir malzeme olduğunun gösterilmesi günümüz koşullarında son derece önemli hale gelmiştir. Bu sebeple bu tez çalışmasında, yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı mükemmel direnç gösteren, üstün mekanik özelliklere sahip olan ve küçük cihazlardan büyük endüstriyel fırınlara kadar birçok farklı uygulamada kullanılan Alumina seramiklerinin, Zirkonya seramiklerinin, ZTA seramiklerinin ve yapısında Alumina ve Zirkonya bulunduran bazı önemli seramiklerin uygulama alanlarını genişletmek için bu seramiklerin radyasyon zırhlama performanslarını belirleyerek nükleer zırh malzemesi olarak kullanılabilirliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, bu seramiklerin kütle soğurma katsayıları, lineer soğurma katsayıları, ortalama serbest yolları ve yarı-değer kalınlıkları gibi radyasyon zırhlama parametreleri hem WinXCOM yazılımı ile hem de MCNP-X yazılımı ile dört farklı radyoaktif kaynaktan (^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs ve ^{60}Co) yayımlanan sekiz farklı yüksek enerjili foton (276,397 keV; 302,9 keV; 356 keV; 511 keV; 661,661 keV; 1173, 228 keV; 1274,537 keV ve 1332, 492 keV) için teorik olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, incelenen alaşımların radyasyon zırhlama kapasiteleri hakkında kayda değer bir değerlendirme yapabilmek için tüm parametreler birçok nükleer uygulamada zırh malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan geleneksel (sıradan) beton ve Kurşun (Pb) için de hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar hem foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak hem de alaşımların kimyasal bileşim oranlarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1. İncelenen tüm numunelerin WinXCOM sonuçları ile MCNP-X sonuçları arasında çok az farklılıklar olması ile birlikte genelde uyum olduğu belirlenmiştir.
2. İncelenen tüm numunelerin hesaplanan tüm foton zırhlama parametrelerinin hem malzemelerin kimyasal içeriğine, hem yapısındaki elementlerin konsantrasyonuna hem de uyarıcı foton enerjisine kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu belirlenmiştir.

3. İncelenen tüm numunelerin lineer soğurma katsayılarının ve kütle soğurma katsayılarının artan uyarıcı foton enerjisi ile exporansiyel olarak azaldığı, ortalama serbest yol değerlerinin ve yarı-değer kalınlıklarının ise artan foton enerjisi ile birlikte arttığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatür ve teori ile uyum içerisinde dir.
4. İncelenen tüm seramiklerin içeriğindeki Zirkonya oranı arttıkça tüm foton enerjilerinde lineer soğurma katsayılarının arttığı belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında yapısında en çok Zirkonya bulunan ZTA-90 seramiği tüm foton enerjilerinde en yüksek lineer soğurma katsayısı değerlerine sahipken yapısında Zirkonya bulunmayan S1 seramiğinin ise en düşük lineer soğurma katsayısı değerine sahip olduğu belirlenmiştir.
5. İncelenen ZTA-90, ZTA-80, ZTA-70 seramiklerinin lineer soğurma katsayılarının Pb ve karşılaştırma betonundan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Pb'nin lineer soğurma katsayılarının tüm foton enerjilerinde ZTA-60 seramiğinin lineer soğurma katsayılarına hemen hemen eşit olduğu saptanmıştır. Ek olarak, Betonun μ değerleri ZTA-50'nin μ değerlerine, S4 seramiğinin μ değerlerinin ZTA-40 seramiğinin μ değerlerine, S3 seramiğinin μ değerlerinin ZTA-30 seramiğinin μ değerlerine ve S1 seramiğinin μ değerlerinin ise ZTA-10 seramiğinin μ değerlerine çok yakın olduğu hatta hemen hemen eşit olduğu belirlenmiştir.
6. S1, S2, S3 ve S4 seramiklerinin μ değerlerinin Pb ve betonun μ değerlerinden daha az olduğu açık bir şekilde gözlenmiş olup bu durum bu seramiklerin içeriğinde Zirkonya'nın ya hiç olmaması ya da çok az bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı bu seramiklerin nükleer ve radyasyon zırh uygulamalarında en son tercih edilebilecek seramikler arasında olabileceği belirlenmiştir.
7. S1, S2, S3 ve S4 seramiklerinin μ değerleri kıyaslandığında ise içeriğinde ağırlıkça en çok Zirkonya bulunduran S4 seramiğinin en yüksek μ değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

8. İncelenen numunelerin ortalama serbest yol değerleri tüm numuneler için artan foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak artmakta olduğu, incelenen seramiklerin kimyasal yapısında yer alan Zirkonya bileşim oranı arttıkça ortalama serbest yol değerlerin azaldığı bu çalışma ile belirlenmiştir.
9. İncelenen numuneler arasında Zirkonya içeriğine sahip olmayan S1 seramiği tüm foton enerjileri için en yüksek ortalama serbest yol değerine sahip iken, en düşük ortalama serbest yol değerine sahip olan seramiğin ise yapısında ağırlıkça %90 Zirkonya bulunan ZTA-90 seramiği olduğu belirlenmiştir.
10. İncelenen tüm numuneler arasından tüm foton enerji değerlerinde en düşük ortalama serbest yol değerine sahip olan malzeme Pb olarak bulunmuştur. Ancak, radyasyon zırhlama uygulamalarında kurşunun bazı dezavantajlarının var olması sebebiyle kurşun yerine ZTA seramiklerinin hem sahip oldukları üstün tribolojik özellikler hem de düşük ortalama serbest yol değerleri sebebiyle alternatif zırh malzemesi olabileceği belirlenmiştir.
11. İncelenen ZTA seramiklerinin ortalama serbest yol değerleri Pb ve nükleer uygulamalarda zırh malzemesi olarak kullanılan geleneksel beton ile kıyaslandığında, ZTA seramiklerinin araştırılan foton enerjilerinde λ değerlerinin betondan daha düşük Pb'den ise çok az yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum da ZTA seramiklerinin (özellikle ZTA-90) nükleer uygulamalarda zırh malzemesi olarak kullanılabileceklerinin göstergelerinden biridir.
12. İncelenen seramiklerin yarı-değer kalınlıkları incelendiğinde, artan foton enerjisi ile tüm sunulan malzemelerin yarı-değer kalınlıklarının arttığı, araştırılan seramiklerin yapısında var olan Zirkonya bileşim yüzdesi artışı ile yarı-değer kalınlıklarının arttığı, tüm incelenen foton enerjilerinde en düşük yarı-değer kalınlığına sahip olan malzemenin kurşun olduğu ve ardından ZTA-90 geldiği ve en yüksek yarı-değer kalınlığına sahip olan seramiğin ise yapısında Zirkonya olmayan S1 seramiğinin olduğu belirlenmiştir.

13. İncelenen ZTA seramiklerinin tüm incelenen uyarıcı foton enerjilerinde yarı-değer kalınlıklarının sunulan karşılaştırma betonundan düşük, kurşundan ise yüksek olduğu belirlenmiştir.
14. Yarı-değer kalınlıkları ile ilgili elde edilen datalar ile S1 seramiğinin nükleer ve radyasyon uygulamalarında tercih edilemeyeceği, ancak ZTA-90 seramiğinin alternatif bir radyasyon zırh malzemesi olabileceği açık bir şekilde kanıtlanmıştır.
15. İncelenen Zirkonya ve Alumina seramiklerinin kütle soğurma katsayılarının artan enerjinin bir fonksiyonu olarak üstel bir şekilde azaldığı, Zirkonya seramiğinin μ_m değerlerinin tüm foton enerjilerinde Aluminanın μ_m değerlerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum Zr elementinin atom numarasının Al elementinin atom numarasından daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır.
16. İncelenen tüm foton enerjilerinde en yüksek μ_m değerlerine sahip malzemenin Pb olduğu gözölmüş olup bu beklenen bir sonuçtur. Ancak Pb'nin sahip olduğu dezavantajlı özellikler sebebi ile kurşun yerine fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde sahip olduğu μ_m değerlerinin yüksek olması ve iyi tribolojik özellikleri dolayısıyla ZTA seramiklerinin (özellikle ZTA-90) kullanılabileceği belirlenmiştir.
17. Bu tez çalışmasının en ilginç ve en önemli sonuçlarından biri ise şudur: Fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde (yaklaşık 570 keV foton enerjisine kadar) seramiklerin yapısındaki Zirkonya ağırlık kesri arttıkça kütle soğurma katsayılarının arttığı, Compton saçılmasının baskın olduğu yüksek enerji bölgesinde (yaklaşık 570 keV foton enerjisinden daha büyük enerji değerlerinde) seramiklerin yapısındaki Zirkonya ağırlık kesri arttıkça kütle soğurma katsayılarının azaldığı net bir şekilde belirlenmiştir. Bu durum seramiklerin 570 keV foton enerji değerlerinden sonra foton absorplama durumunun yerini saçılma durumuna bırakmasına atfedilebilir.

Bütün bu çıkarımlar birlikte değerlendirildiğinde incelenen numuneler arasından ağırlıkça %90 Zirkonya içeriğine sahip ZTA-90 numunesinin radyasyon zırhlama uygulamalarında diğer incelenen seramiklere göre daha tercih edilebilir bir seramik olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca bu tez çalışmasında radyasyon zırhlama uygulamalarında kullanılabilecek ZTA seramiklerinin içeriğindeki Zirkonya ağırlık kesri arttıkça seramiklerin foton zırhlama performanslarının arttığı sonucu açık bir şekilde çıkarılabilir. Sonuç olarak bu tez çalışması ile ZTA seramiklerinin (özellikle ZTA-90 seramiği) radyasyon zırhlama uygulamalarında, nükleer santrallerde ve foton-madde etkileşim laboratuvar araştırma ve inceleme çalışmaları başta olmak üzere birçok foton zırhlama uygulamalarında alternatif bir zırh malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu sebeple bu tez çalışmasının ileride yapılacak zırhlama çalışmaları için teşvik edici olacağı umut edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akçaalan, U., 2015. Farklı maddelerle katkılanmış beton malzemenin gama soğurma katsayılarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Akkurt, I., Calik, A. and Akyıldırım, H. 2011. The boronizing effect on the radiation shielding and magnetization properties of AISI 316L austenitic stainless steel. Nuclear Engineering and Design, 241(2011)55-58.
- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S. and Basyigit, C. 2010. Radiation shielding of concrete containing zeolite. Radiation Measurements, 45(2010)827-830.
- Aktaş, B., Yalcin, S., Dogru, K., Uzunoglu, Z. and Yilmaz, D. 2019. Structural and radiation shielding properties of chromium oxide doped borosilicate glass. Radiation Physics and Chemistry, 156(2019)144-149.
- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S. and Basyigit, C. 2010. Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies. Progress in Nuclear Energy, 52(2010)620-623.
- Akman, F., Sayyed, M. I., Kaçal, M. R. and Tekin, H. O. 2018. Investigation of photon shielding performances of some selected alloys by experimental data, theoretical and MCNPX code in the energy range of 81 keV – 1333 keV. Journal of Alloys and Compounds, 772, 516-524.
- Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M.I., Demir, L., 2020. Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I, Radiat. Phys. Chem., 166, 108455.
- Aygün, B., Şakar, E., Korkut, T., Sayyed, M.I., Karabulut, A. and Zaid, M.H.M. 2019. Fabrication of Ni, Cr, W reinforced new high alloyed stainless steels for radiation shielding applications. Results in Physics, 12(2019)1-6.

- Bakırhan, E., 2017. Kurşun maden atığı katkılı ağır betonların radyasyon soğurma katsayılarının 662-1460 Kev enerji aralığında incelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- Bagheri, R., Maghaddam, A.K. and Yousefnia, H. 2016. Gamma ray shielding study of Barium-Bismuth-Borosilicate glasses as transparent shielding materials using MCNP-4C code, XCom program and available experimental data. Nuclear Engineering and Technology, 49(2017) 216-223.
- Bashter, I.I., 1997. Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes. Ann Nucl Energy 24, 1389-1401.
- Büyükildiz, M., Kurudirek, M., Ekici, M., Icelli, O. and Karabul, Y. 2017. Determination of radiation shielding parameters of 304L stainless steel specimens from welding area for photons of various gamma ray sources. Progress in Nuclear Energy, 100(2017)245-254.
- Can, Ö., 2016. İyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyonun tutulması için polimer esaslı tungsten (volfram) tuzları katkılı yeni kompozit madde sentezi, karakterizasyonu ve deneme çalışmaları. Yüksek lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- Çalışkan, F., 2010. MgF_2 içeren Si_3N_4 esaslı seramik malzemelerin geliştirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Çeçen, R., 2012. Pomza taşının radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması. Yüksek lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı.
- Daştan, A. N., 2013. 1-Aril-3- Dibenzilamino-Propan-1-On Hidroklorür tipi Mannich bazları üzerinde çalışmalar. Yüksek lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Davis, A. 2017. Radiation-shielding properties of foam surrogate heterogeneous slabs of stainless steel, Aluminum and Polyethylene. Nuclear Technology, 200(2017)66-79.
- Dong, M.G., Xue, X.X., Elmahroug, Y., Sayyed, M.I. and Zaid, M.H.M. 2019. Investigation of shielding parameters of some boron containing resources for gamma ray and fast neutron. Results in Physics, 13(2019)102165
- Dong, H.O. 2017. Shielding properties of $80\text{TeO}_2\text{-}5\text{TiO}_2\text{-(}15\text{-x)WO}_3\text{-xAnO}_m$ glasses using WinXCom and MCNP5 code. Radiation Physics and Chemistry, 141(2017) 172-178.
- De Marco, J.J., Wallace, R.E. and Boedeker, K. 2002. An analysis of MCNP cross-sections and tally methods for low- energy photon emitters. Physics in Medicine and Biology, 47(2002) 1321-1332.
- Esfandiari, M., Shirmandi, S.P. and Medhat, M.E. 2014. Element analysis and calculation of the attenuation coefficients for gold, bronze and water matrixes using MCNP, WinXCom and experimental data. Radiation Physics and Chemistry, 99(2014) 30-36.
- Ersundu, A.E., Büyükyıldız, M., Ersundu, M.Ç., Şakar, E. and Kurudirek, M. 2018. The heavy metal oxide glasses with in the $\text{WO}_3\text{-MoO}_3\text{-TeO}_2$ system to investigate the shielding properties of radition applications. Progress in Nuclear Energy, 104(2018)280-287.
- Erdem, M., Baykara, O., Doğru, M. and Kuluöztürk, F. 2010. A Novel shielding material prepared from solid waste containing lead for gamma-ray. Radition Physics and Chemistry, 79(2010)917-922.
- El- Khayatt, A.M. 2010. Radiation shielding of concretes containing different lime/silica ratios. Annals of Nuclear Energy, 37(2010)991-995.

- El-Khayatt, A.M.2017. Semi-empirical determination of gamma-ray kerma coefficients for materials of shielding and dosimetry from mass attenuation coefficients. Progress in Nuclear Energy, 98(2017)277-284.
- Eakins, J. 2009. On the effect of updated MCNP photon cross section data on the simulated response of the HPA TLD. Radiation Protection Dosimetry, 134(2009) 66-71.
- Ertas, H., 2014. Kurşun madeni atıklarının radyasyon zırhlama etkilerinin araştırılması. Yüksek lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- Gülbiçim, H., 2015. Saf ve Bor katkılı Vermikülit'in Gama radyasyon geçirgenliğinin belirlenmesi. Yüksek lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Leving, H., 2001. X-ray absorption in matter reengineering XCOM. Radiat. Phys. Chem. 60, 23–24.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., Leving, H., 2004. WinXCom - a program for calculating X-ray attenuation coefficients. Radiat. Phys. Chem. 71, 653–654.
- Han, İ. and Demir, L. 2008. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for Cr, Fe and Ni alloys at different energies. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 267, 3-8.
- Haddad, Kh. and Suman, H. 2005. Determination of the gamma self-attenuation correction factors using intensity ratios. Journal of Radionalytical and Nuclear Chemistry, 268(2006) 109-112.
- Han, İ., 2009. Geçiş metallerinin valens elektron yapılarının X-Işını şiddet oranları vasıtasıyla belirlenmesi, X-Işını şiddet oranlarının tavlama sıcaklığına bağlı davranışlarının incelenmesi, alaşımlar için etkin atom numaraları ve elektron

yoğunluklarının tayini. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

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

Issa, S.A.M., Saddeek, Y.B., Sayyed, M.I., Tekin, H.O. and Kilicoglu, O. 2019. Radiation shielding features using MCNPX code and mechanical properties of the PbO-Na₂O-B₂O₃-CaO-Al₂O₃-SiO₂ glass systems. Composites Part B, 167(2019)231-240.

Issa, S.A.M., Tekin, H.O., Elsaman, R., Kilicoglu, O., Saddeek, Y.B. and Sayyed, M.I. 2019. Radiation shielding and mechanical properties of Al₂O₃-Na₂O-B₂O₃-B₂O₃ glasses using MCNPX Monte Carlo Code. Materials Chemistry and Physics, 223(2019)209-219.

Issa, S.A.A., Saddeek, Y.B., Tekin, H.O., Sayyed, M.I. and Shaaban, K.S. 2018. Investigations of radiation shielding using Monte Carlo method and elastic properties of PbO-SiO₂-B₂O₃-Na₂O glasses. Current Applied Physics, 18(2018)717-727.

Jackson, D.F., Hawkes, D.J., 1981. X-Ray Attenuation Coefficients of Elements and Mixtures. Phys Rep 70, 169-233.

Kaewjang, S., Maghanemi, U., Kothan, S., Limkitjaroenporn, P. and Kaewkhao, J. 2014. New gadolinium based glasses for gamma-rays shielding materials. Nuclear Engineering and Design, 280(2014)21-26.

Kaçar, A., 2006. Borlamanın paslanmaz çeliğin radyasyon zırhlama özelliğine etkisinin araştırılması. Yüksek lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- Kaewkhao, J., Pokaipisit, A. and Limsuwan, P. 2010. Study on borate glass system containing with Bi_2O_3 and BaO for gamma-rays shielding materials: Comparison with PbO . *Journal of Nuclear Materials*, 399(2010)38-40.
- Kaewjaeng, S., Kothan, S., Chaiphaksa, W., Chanthima, N., Rajaramakrishna, R., Kim, H.J. and Kaewkhao, J. 2019. High transparency $\text{La}_2\text{O}_3\text{-CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass for diagnosis x-rays shielding material application. *Radiation Physics and Chemistry*, 160(2019)41-47.
- Kaewkhao, J., Korkut, T., Korkut, H., Aygün, B., Yasaka, P., Tuscharoen, S., Insiripong, S. and Karabulut, A. 2017. Monte Carlo design and experiments on the neutron shielding performances of $\text{B}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Bi}_2\text{O}_3$ system. *Glass Physics and Chemistry*, 43(2017)560-563.
- Kaundal, R.S., Kaur, S., Singh, N. and Singh, K.J. 2010. Investigation of structural properties of lead strontium borate glasses for gamma-ray shielding applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71(2010)1191-1195.
- Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., Pokaipisit, A., Chewpraditkul, W. and Limsuwan, P. 2009. Gamma-rays shielding properties of $x\text{PbO}:(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ glasses system at 662 KeV. *Annals of Nuclear Energy*, 36(2009)1360-1365.
- Kurudirek, M. 2017. Heavy metal borate glasses. Potential use for radiation shielding. *Journal of Alloys and Compounds*, 727(2017)1227-1236.
- Korkut, T., 2010. Deneysel ve Cern Fluka Monte Carlo simülasyon kodu yöntemleri kullanılarak 4,5 Mev enerjili hızlı nötronların borlu bileşik ve cevherler tarafından yavaşlatılmasına ilişkin parametrelerin belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kurudirek, M. 2014. Radiation shielding and effective atomic number studies in different types of shielding concretes, lead base and non-lead base glass systems for total electron interaction: A comparative study. *Nuclear Engineering and Design*, 280(2014)440-448.

- Kurudirek, M., Chutithanapanon, N., Laopaiboon, R., Yenchai, C. and Bootjomchai, C. 2018. Effect of Bi₂O₃ on gamma ray shielding and structural properties of borosilicate glasses recycled from high pressure sodium lamp glass. *Journal of Alloys and Compounds*, 745(2018)355-364.
- Krstic, D. and Nikezic, D. 2009. Calculation of the effective dose from natural radioactivity in soil using MCNP code. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(2010) 946-947.
- Lakshminarayana, G., Baki, S.O., Kaky, K.M., Sayyed, M.I., Tekin, H.O., Lira, A., Kityk, I.V. and Mahdi, M.A. 2017. Investigation of structural, thermal properties and shielding parameters for multicomponent borate glasses for gamma and neutron radiation shielding applications. *Journal of Non-Crystalline solids*, 471(2017)222-237.
- Liu, J.H., Zhang, Q.P., Sun, N., Zhao, Y., Shi, R. and Zhao, Y.L. 2018. Elevated gamma-rays shielding property in lead-free bismuth tungstate by nanofabricating structures. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 112(2018)185-189.
- Mahmoud, M.E., El-Khatib, A.M., Badawi, M.S., Rashad, A.R., El-Sharkawy, R.M. and Thabet, A.A. 2018. Fabrication, characterization and gamma rays shielding properties of nano and micro lead oxide-dispersed-high density polyethylene composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 145(2018)160-173.
- Mostafa, A.G., Saudi, H.A., Hassaan, M.Y., Salem, S.M. and Mohammad, S.S. 2015. Studies on the shielding properties of transparent glasses prepared from rice silica. *American Journal of Modern Physics*, 4(2015)149-157.
- Medhat, M. E. and Wang, Y. 2015. Investigation on radiation shielding parameters of oxide dispersion strengthened steels used in high temperature nuclear reactor applications. *Annals of Nuclear Energy*, 80(2015)365-370.
- Manjunatha, H.C., Seenappa, I., Chandrika, B.M., Sridhar, K.N. and Hanumantharayappa, C. 2018. Gamma x-ray and neutron shielding parameters

- for the Al-based glassy alloys. *Applied Radiation and Isotopes*, 139(2018)187-194.
- Mann, K.S.2017. Gamma-ray shielding behaviors of some nuclear engineering materials. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(2017)792-800.
- Mostafa, A.M.A., Issa, S.A.M. and Sayyed, M.I. 2017. Gamma ray shielding properties of PbO-B₂O₃-P₂O₅ doped with WO₃. *Journal of Alloys and Compounds*, 708(2017)294-300.
- Müjde, A.S., 2012. Türkiye'de kullanımdaki bazı tekstil ürünlerinin radyasyon azaltma özelliklerinin araştırılması. Yüksek lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı.
- Ni, M., Tang, X., Chai, H., Zhang, Y., Chen, T. and Chen, D. 2016. Preparation and properties of the Fast-Curing gamma-ray-shielding Materials Based on Polyurethane. *Nuclear Engineering and Technology*, 48(2016)1396-1403.
- Obaid, S.S., Sayyed, M.I., Gaikwad, D.K. and Pawar, P.P. 2018. Attenuation coefficients and exposure buildup factor of some rocks for gamma ray shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 148(2018)86-94.
- Oto, B., Yıldız, N., Akdemir, F. and Kavaz, E. 2015. Investigation of gamma radiation shielding properties of various ores. *Progress in Nuclear Energy*,85(2015)391-403.
- Oto, B., Gür, A., Kavaz, E., Çakır, T. and Yaltay, N. 2016. Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes. *Progress in Nuclear Energy*, 92(2016)71-80.
- Özen, S., 2013. Denge ağırlığı ve radyasyonlu ortamlarda zırh işlemi amacına yönelik ağır beton tasarımı. Yüksek lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

- Ruengsri, S., Insiripong, S., Songwaranatee, N. and Kaewkhao. 2015. Development of barium borosilicate glasses for radiation shielding materials using rice husk ash as a silica source. *Progress in Nuclear Energy*, 83(2015)99-104.
- Saeed, A.A., El-Shazly, R.M., El-Okr, M.M., El-Azm, A.M.A., Elbashar, Y.H., Comsan, M.N.H., Kansouh, W.A. and El-Sersy, A.R. 2017. Neutron shielding properties of a borated high-density glass. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 32(2017)120-126.
- Sayyed, M. I., Tekin, H.O., Kılıcoglu, O., Agar, O. and Zaid, M.H.M. 2018. Shielding features of concrete types containing sepiolite mineral: Comprehensive study on experimental, XCOM and MCNPX results. *Results in Physics*, 11(2018) 40-45.
- Singh, V.P., Tekin, H.O. Badiger, N.M., Manici, T. and Altunsoy, E.E. 2018. Effect of heat treatment on radition shielding properties of concretes. *Journal of Radition Protection and Researc*, 43(2018)20-28.
- Singh, R., Singh, S., Singh, G. and Thind, K.S. 2017. Gamma radition shielding properties of steel and iron slags. *New Journal of Glass and Ceramics*, 7(2017)1-11.
- Singh, S., Kumar, A., Singh, D., Thind, K.S. and Mudahar, G.S. 2008. Barium-borate-flyash glasses:As radition shielding materials.*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(2008)140-146.
- Singh, V.P., Badiger, N.M., Chanthima, N. and Kaewkhao, J. 2014. Evaluation of gamma-ray exposure buildup factors and neutron shielding for bismuth borosilicate glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 98(2014)14-21.
- Singh, V.P., Badiger, N.M. and Kucuk, N. 2014. Gamma-ray and neutron shielding properties of some soil samples. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 52(2014)579-587.

- Sharifi, Sh., Bagheri, R. and Shirmardi, S.P. 2012. Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results. *Annals of Nuclear Energy*, 53(2013) 529-534.
- Singh, V. P., Medhat, M. E. and Shirmardi, S. P. 2014. Comparative studies on shielding properties of some steel alloys using Geant4, MCNP, WinXCOM and experimental results. *Radiation Physics and Chemistry*, 106, 255-260.
- Şişman, G., 2015. Monte Carlo simülasyonu ile radyasyondan koruyucu malzemelerde kullanılabilen Bizmut, Kurşun ve alternatif kompozit malzemelerin atenuasyon etkilerinin değerlendirilmesi. Yüksek lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Tellili, B., Elmahroug, Y. and Souga, C. 2017. Investigation on radiation shielding parameters of cerrobend alloys. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(2017)1758-1771.
- Ünlü, P., İngeç, Ş.K., Budak, M.G., Avcı, D.E., 2014. Modern Fizik. Anı yayıncılık, 182, Ankara.
- Vahabi, S.M., Bahreinipour, M. and Zafarghandi, M.S. 2016. Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code: A comparison study. *Vacuum*, 136(2017) 73-76.
- Vega-Carrillo, H.R., Villagrana-Munoz, L.E., Rivera-Perez, E., de Leon-Martinez, H.A., Soto-Bernal, T.G. and Hernandez-Davila, V.M. 2013. Concrete enclosure for shielding a neutron source. *Applied Radiation and Isotopes*, 79(2013) 37-41.
- Verdipour, K., Alemi, A. and Mesbahi, A. 2018. Photon mass attenuation coefficients of a silicon resin loaded with WO₃, PbO and Bi₂O₃ Micro and Nano-Particles for radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 147(2018) 85-90.

- Wu, Y., Zhang, Q.P., Zhou, D., Zhou, Y.L. and Zheng, J. 2017. Controlled synthesis of anisotropic lead borate crystals and its co-shielding of neutron and gamma raditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 727(2017)1027-1035.
- Xu, S., Bourham, M. and Rabiei, A. 2010. A novel ultra-light structure for radiation shielding. *Materials and Design*, 31(2010)2140-2146.
- Yaramış, B., 1985. Nükleer Fizik. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, 258, İstanbul.
- Yılmaz, E., 2011. Bazı inşaat malzemelerinde Gama ışını soğurma katsayısı ve Nötron soğurma tesir kesitinin belirlenmesi. Yüksek lisans Tezi, Rize Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize.
- Yorulmaz, N., 2006. Özgül soğurma oranlarının görüntüsel bir vücut modeli yardımıyla monte carlo yöntemi kullanılarak belirlenmesi. Yüksek lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Zaidi, H. 2000. Comparative evaluation of photon cross-section libraries for materials of interest in PET Monte Carlo simulations. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 47(2000) 2722-2735.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Ağrı’da doğan İlyas ARAL orta ve lise öğrenimini Ağrı Anadolu Lisesinde tamamladı. 2004 yılında girdiği Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Fizik Anabilim Dalı’nda tezsiz yüksek lisans yaptı. Şu an Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesinde Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Nükleer Fizik Bilim Dalı’nda tezli yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.