



**KATKILI VE KATKISIZ Cu-Al-Mn ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN
RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Muhammet Emre KOÇ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. İbrahim HAN

AĞRI-2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
AĞRI İBRAHİM ÇEÇEN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Muhammet Emre KOÇ

**KATKILI VE KATKISIZ Cu-Al-Mn ŞEKİL
HAFIZALI ALAŞIMLARIN RADYASYON
ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ YÖNETİCİSİ

Prof. Dr. İbrahim HAN

JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Murat AYGÜN

Dr. Öğr. Üyesi Abdulhadi KOŞATEPE

AĞRI- 2025

BEYANNAME

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına atıf yapıldığını bildiririm.



İmza

Muhammet Emre KOÇ

Tarih

KABUL ONAY

	LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	Doküman No	FR-211
		İlk Yayın Tarihi	26.02.2024
		Revizyon Tarihi	
		Revizyon No	00
		Sayfa No	1/1

KATKILI ve KATKISIZ CU-AL-MN ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. İbrahim HAN danışmanlığında, Muhammet Emre KOÇ tarafından hazırlanan bu çalışma, 31/07/2025 tarihinde aşağıda isimleri belirtilen jüri tarafından değerlendirilmiş olup Fizik Anabilim Dalı Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Murat AYGÜN

İmza :

Üye : Prof. Dr. İbrahim HAN

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdulhadi KOŞATEPE

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu .../.../... tarih ve / numaralı kararı ile onaylanmıştır.

.....
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.

HAZIRLAYAN	KONTROL EDEN	ONAYLAYAN

BENZERLİK

Benzerlik Oranlarına Dair Beyannamedir		
Öğrenci Adı Soyadı	Muhammet Emre KOÇ	
Numarası	226052242	
Ana Bilim Dalı	Fizik	
Bilim Dalı	Atom ve Moleküler Fiziği	
Programı	Yüksek Lisans	
Danışman Unvanı Adı Soyadı	Prof. Dr. İbrahim HAN	
Tez Başlığı	Katkılı ve Katkısız Cu-Al-Mn Şekil Hafızalı Alaşımların Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması	
Bölümler	Turnitin Sonucu	En Yüksek Değer
Giriş	%0	% 25
Kuramsal Temeller/Kavramsal Çerçeve	%14	% 30
Materyal ve Yöntem	%2	% 30
Araştırma Bulguları	%17	% 20
Sonuç/Tartışma/Öneri	%0	% 20
TEZ (GENEL)	%10	% 25

31/07/2025

Yukarıda bilgileri yazılı tez çalışmasının benzerlik oranları Turnitin raporundan alındığı haliyle yazılmış olup tüm bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

İmza

Muhammet Emre KOÇ

İmza

Prof. Dr. İbrahim HAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATKILI VE KATKISIZ Cu-Al-Mn ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammet Emre KOÇ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim HAN

Bu çalışmanın amacı radyasyon zırhlamada kullanılabilirlik açısından farklı oranlarda katkılı ve katkısız Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımların Phy-X/PSD yazılımı yardımı ile teorik hesaplamaları yapılmış ve radyasyon zırh malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Her bir alaşım için; MAC, LAC, HVL, MFP, Z_{eff} , N_{eff} ve C_{eff} parametreleri incelenmiştir. Bu parametrelerden CALM7 kodlu alaşım için etkin elektron sayısı (N_{eff}) değeri haricindekiler radyasyon zırhlama konusunda olumlu sonuçlar vermiştir. Ayrıca yaygın kullanılan beton çeşitleri ve kurşun içinde bu parametreler hesaplanmış ve Cu-Al-Mn alaşımları ile radyasyon zırhlama ve malzeme özellikleri bakımından genel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında şekil hafızalı Cu-Al-Mn alaşımlarının beton türlerine göre daha iyi soğurucu özellik gösterdiği; kurşun ile malzeme özellikleri, kullanışlılık ve toksiklik bakımından kıyaslanabilir olduğu değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak tez amacı kapsamında incelenen Cu-Al-Mn alaşımlarından CALM7 kodu ile ifade edilen alaşımın yoğunluğunun diğer alaşımlardan ve beton türlerinden büyük olduğu, radyasyon soğurmada daha iyi teorik sonuçlar verdiği ve nükleer yapıda radyasyon zırhlama malzemesi olarak değerlendirilebileceği ve taşıdığı şekil hafızalı alaşım etiketi ile bu konuda farklı fiziksel veya kimyasal avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Alaşım, Radyasyon, Soğurma, Zırhlama, Cu-Al-Mn, CALM, MAC, LAC, HVL, MFP, Z_{eff} , N_{eff} , C_{eff} .

ABSTRACT
MASTER'S THESIS
INVESTIGATION OF THE RADIATION SHIELDING PROPERTIES OF
DOPED AND UNDOPED Cu-Al-Mn SHAPE MEMORY ALLOYS

Muhammet Emre KOÇ

Thesis Supervisor: Prof. Dr. İbrahim HAN

The aim of this study is to theoretically evaluate, with the aid of the Phy-X/PSD software, the radiation shielding capabilities of doped and undoped Cu-Al-Mn shape memory alloys (SMAs) with varying compositions, in terms of their applicability as radiation shielding materials. For each alloy, the following parameters were analyzed: MAC, LAC, HVL, MFP, Z_{eff} , N_{eff} , C_{eff} . All parameters yielded favorable results for radiation shielding, except for the effective electron density (N_{eff}) in the alloy coded CALM7. Additionally, these parameters were calculated for commonly used types of concrete and lead, and a general comparison was made with the Cu-Al-Mn alloys in terms of radiation shielding and material properties. Within the scope of the study, Cu-Al-Mn shape memory alloys demonstrated superior absorption properties compared to concrete types, and were found to be comparable to lead in terms of material properties, usability, and toxicity.

As a result, among the Cu-Al-Mn alloys examined for the purposes of this thesis, the alloy designated as CALM7 was found to have a higher density than other alloys and concrete types, and to yield better theoretical outcomes in radiation absorption. It is therefore considered that this alloy may be suitable for use as a radiation shielding material in nuclear structures. Moreover, its classification as a shape memory alloy may provide additional physical or chemical advantages in this context.

Keywords: Alloy, Radiation, Absorption, Shielding, Cu-Al-Mn, CALM, MAC, LAC, HVL, MFP, Z_{eff} , N_{eff} , C_{eff} .

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında ve yürütülmesinde değerli bilgi ve deneyimleriyle beni aydınlatan, içerik ve kaynak bakımından her türlü desteği sağlayan saygı değer danışman hocam Prof. Dr. İbrahim HAN' a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca eğitim hayatımın her anında beni destekleyen, yanımda olan, haklarını asla ödeyemeyeceğim kıymetli aileme, tez çalışmamı hazırlarken desteğini esirgemeyen ve bana her aşamada yardımcı olan sevgili eşime, canım kızıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Temmuz 2025

Muhammet Emre KOÇ

İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	i
KABUL ONAY.....	ii
BENZERLİK.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL TEMELLER.....	12
2.1. Radyasyon Tanımı ve Sınıflandırılması.....	12
2.2. İyonlaştırıcı Radyasyon.....	13
2.2.1. Alfa (α) parçacığı	14
2.2.2. Beta (β) parçacığı	15
2.2.3. Nötronlar	16
2.2.4. X- ışınları.....	18
2.2.5. Gama (γ) ışınları.....	20
2.3. X ve Gama Işınlarının Madde ile Etkileşimi.....	21
2.3.1. Fotoelektrik olay	22
2.3.2. Compton saçılması	23
2.3.3. Çift oluşumu.....	24
2.4. Radyasyon Kaynakları	25
2.5 Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Etkileri	26
2.5.1. Radyasyonun hücreye etkisi.....	27
2.5.2. Radyasyonun doku ve organlara etkisi.....	28
2.6. Radyasyonun Doz Birimleri.....	28
2.7. Radyasyondan Korunma	30
2.8. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	33

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
3.1. Radyasyon Zırhlama	34
3.2. Phy-X/PSD Programı	35
3.3. Cu-Al-Mn Şekil Hafızalı Alaşımların (ŞHA) Özellikleri	46
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	49
4.1. Araştırılan Cu-Al-Mn Alaşımları	49
4.1. Kütle Soğurma Katsayılarının İncelenmesi.....	51
4.2. Lineer Soğurma Katsayılarının İncelenmesi	54
4.3. Yarı Değer Kalınlığı.....	57
4.4. Ortalama Serbest Yol	60
4.5. Etkin Atom Numarası, Etkin Elektron Sayısı ve Etkin İletkenlik.....	63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKLAR.....	74

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1. Organların Radyasyona Karşı Duyarlılıkları	28
Tablo 2. Radyasyona Ait Eski/Yeni Birimler ve Birbirlerine Dönüşüm Değerleri ..	29
Tablo 3. Cu-Al-Mn alaşımında kullanılan elementlerin ağırlık oranları (ağ.%) ve yoğunlukları (g/cm^3)	50
Tablo 4. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Kütle Soğurma Katsayıları (MAC), (cm^2/g)	53
Tablo 5. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Lineer Soğurma Katsayıları (LAC), ...	56
Tablo 6. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Yarı Değer Kalınlığı Katsayıları (HVL)	59
Tablo 7. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Ortalama Serbest Yol Katsayıları (MFP)	62
Tablo 8. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Etkin Atom Numaraları (Z_{eff})	65
Tablo 9. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Etkin Elektron Sayıları (N_{eff}).....	68
Tablo 10. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Etkin İletkenlik Değerleri (C_{eff})	71

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Radyasyon Çeşitlerinin Sınıflandırılması	12
Şekil 2. Elektromanyetik Spektrum	13
Şekil 3. Alfa (α) Bozunumu	14
Şekil 4. Beta (β) Bozunumu	15
Şekil 5. Nötronun Yaptığı Elastik Saçılma	17
Şekil 6. Nötronun yaptığı inelastik saçılma	18
Şekil 7. Karakteristik X Işınının oluşumu (Brouwer 2003)	19
Şekil 8. Sürekli X ışını oluşum mekanizması	20
Şekil 9. Gama (γ) Bozunumu	20
Şekil 11. Elektromanyetik Dalgaların Madde ile Etkileşiminde Baskın Olduğu Bölgeler	21
Şekil 12. Fotoelektrik Olay	22
Şekil 13. Compton Saçılması	23
Şekil 14. Çift Oluşumu	24
Şekil 15. Ülkemizdeki Radyasyon Uygulamaları Dağılımı (NDK)	26
Şekil 16. DNA Zincirinin Kırılması	27
Şekil 17. Radyasyon Kaynağına Uzaklık Faktörü	31
Şekil 18. Radyasyon Kaynağı İle Geçirilen Zaman	31
Şekil 19. Radyasyon Çeşitlerinin Zırhlandırılması	32
Şekil 20. Zırhlayıcı (Koruyucu) Engel	33

Şekil 21. İncelenen alaşımlara ait kütle soğurma katsayı (MAC) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi.....	51
Şekil 22. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin kütle soğurma katsayı (MAC) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi	52
Şekil 23. İncelenen alaşımlara ait lineer soğurma katsayı (LAC) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi.....	54
Şekil 24. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin lineer soğurma katsayı (LAC) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi	55
Şekil 25. İncelenen alaşımlara ait yarı değer kalınlığı katsayılarının (HVL)15keV-15MeV enerji aralığında değişimi.....	57
Şekil 26. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin yarı değer kalınlığı katsayı (HVL) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi	58
Şekil 27. İncelenen alaşımlara ait ortalama serbest yol katsayılarının (MFP) 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi.....	60
Şekil 28. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin ortalama serbest yol katsayı (MFP) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi.....	61
Şekil 29. İncelenen alaşımlara ait etkin atom numaralarının (Z_{eff}) 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi.....	63
Şekil 30. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin etkin atom numaralarının (Z_{eff}) 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi.....	64
Şekil 31. İncelenen alaşımlara ait etkin elektron sayısı (N_{eff}) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi.....	66
Şekil 32. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin etkin elektron sayısı (N_{eff}) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi	66

Şekil 33. İncelenen alaşımlara ait etkin iletkenlik (C_{eff}) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi 69

Şekil 34. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin etkin iletkenlik (C_{eff}) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi 69



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$\text{\AA}$	Angström ($10^{-10} m$)
α	Alfa parçacığı
$B^+ - B^-$	Beta Parçacığı
Bq	Becquerel, radyoaktivite birimi
c	ışık hızı
e	Elektron
eV	Elektron volt
γ	Gama Parçacığı
Gy	Gray, absorblanmış doz birimi
h	Planck sabiti
keV	Kilo elektron volt
μ	Lineer soğurma katsayısı
m_0	Elektronun durgun kütlesi
MeV	Mega elektron volt
n	Nötron
p	Proton

ρ	Malzeme yoğunluğu
ν	Frekans
v	Nötronun hızı
Z	Atom numarası
θ	Fotonun saçılma açısı
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar

C_{eff}	Etkin iletkenlik
HVL	Yarı değer kalınlığı
LAC	Lineer soğurma katsayısı
MAC	Kütle soğurma katsayısı
MFP	Ortalama serbest yol
N_{eff}	Etkin elektron sayısı
ŞHA	Şekil hafızalı alaşım
Z_{eff}	Etkin atom numarası

1.GİRİŞ

İnsanlığın geçmişten günümüze kadar gerek merak duygusu ile yaptığı araştırmalar gerek rastlantılar sonucu karşılaştığı durumlar bilimin gelişmesine ve ilerlemesine önemli katkılar sağlamıştır. Bununla birlikte bilimsel çalışmalar birçok farklı alanlara ayrılmış ve çoğunlukla insanlığın ve diğer canlıların yararına çok önemli ve olumlu anlamda katkılar sağlamıştır. Ancak araştırmaların ve gelişmelerin sonucunda ortaya çıkan teknolojik çeşitlilikler olumsuz durumları da beraberinde getirmiştir. Bu nedenle bilimsel çalışma aşamalarında çalışmalardan elde edilecek sonuç veya ürünlerin olumsuz yanları da araştırılıp bunları en aza indirecek önlemlerin alınması önem arz etmektedir.

Gelişmelerin hızlandığı, teknolojinin geçen her gün yeniliklere kapı araladığı 21. yy. da insan sağlığı ile diğer canlıların yaşam faaliyetleri için gerekli ortam ve ihtiyaçlar teknolojik tehditlerin hedef unsuru hâline gelmiştir. Burada önlemler alınarak titizlikle yapılan her çalışma olası tehditleri ortadan tamamen kaldırabilir veya önemli ölçüde tolere edebilir. Risk veya tehlikelerin makro boyutta olması söz konusu olduğu gibi mikro boyutlarda yani atomik ölçeklerde de olması muhtemeldir. Maddenin temel taşı olarak nitelendirilen atomun yapısı tarihsel süreçte insanların ve bilim insanlarının merakı ile farklı şekillerde yorumlanmış ve günümüze kadar kademe kademe ilerlemeler sağlanmıştır. Dolayısıyla birçok farklı element ve sahip oldukları atomik özellik keşfedilmiş ve bu elementlerin kendi başlarına gösterdiği davranışlar veya farklı şekillerde bir araya gelmeleriyle elde edilen alaşım veya bileşiklerin gösterdiği davranışlar incelenmiştir. Özellikle bazı alanlarda kullanılan radyoaktif elementlerin veya teknolojik araçların yaydığı radyasyonun oluşturabileceği tehlikeleri kontrol altına almak için en ideal ve en etkili önlemlerin alınması şarttır.

Radyasyon genel olarak yüksek hızda hareket eden parçacıkların ve elektromanyetik spektrumda dalgaların sahip oldukları enerjilere göre

sınıflandırılabilen dalga ve tanecik biçiminde yayılması şeklinde gerçekleşen olgu olarak tanımlanır (Coşkun, 2011; Erdoğan vd., 2017).

Yüksek enerjili radyasyonun karşılaştığı atomu etkileyip o atomun çekirdeği veya yörüngeleri ile tepkime veren radyasyon iyonizan radyasyon olarak adlandırılır. İyonizan radyasyon elektromanyetik dalga formunda veya parçacık formunda olabilir. Alfa, beta ve nötron iyonizan radyasyon türüne yani parçacık formunda olan radyasyon türlerine örnektir. Parçacık radyasyon formu belli bir enerji ve kütleyle sahip olup ayrıca yüksek hızlarda hareket eden iyonizan radyasyon türüdür. X-ışınları ve gama (γ) ışınları ise elektromanyetik dalga formunda olup kütsüz radyasyon çeşitleridir. (Atakır vd., 2022).

J. J. Thomson 1887 yılında keşfettiği elektrondan sonraki süreçte 1895 yılında W. K. Roentgen X-ışınları keşfini gerçekleştirmiştir. Atom çekirdeği hakkında çalışmaların ilki ise Rutherford tarafından 1911 yılında yapılmıştır. Nükleer reaksiyonlar için ilk olarak laboratuvarında çalışmalarını radyoaktif kaynaktaki α parçacıklarını kullanarak gerçekleştirmiştir. Bir hedefe yerleştirilen numuneden elastik biçimde geriye saçılan α parçacıkları (Rutherford saçılması) atomun yapısında bir çekirdeğin varlığına dair ilk delillerden birisidir (Krane, 2002). Atom çekirdeğinin varlığı gerçekleştirilmiş Rutherford saçılma deneyleri ile tespit edilmiş fakat atom çekirdeği için en önemli bulgu 1896 yılında H. Becquerel' in Uranyum tuz kristallerinin fotoğraf plağı üzerinde bıraktığı lekelerin daha önemli bir kanıt olduğu kabul edilmiştir (Özdoğan vd., 2005).

Radyasyon, günümüze kadar farklı çalışma ve araştırmaların getirdiği ve katkı sağladığı bir olgu olup tıp alanında kanser teşhisi ve tedavisinde, tıbbi malzemelerin sterilize edilmesinde, arkeolojik kalıntıların veya farklı ürünlerin yaş tayininde, yapı analizlerindeki çatlak tespitinde, okyanusların akıntı takibinde, paket gıdaların raf ömürlerinin uzatılmasında, tohum ıslahında, deneysel çalışmalardaki kimyasal ve kristal yapı araştırmalarında, nükleer santrallerde, nükleer silahlarda vb. birçok alanda büyük önem taşımaktadır. Radyasyonun bu denli katkılarına karşılık canlı sağlığı için oluşturacağı zararlarda göz ardı edilmemekle birlikte etki alanını gerekli olan kısımda tutabilmek ve zarar vereceği kısımlardan alıkoymak gerekir. Genel ve anlaşılır olması

açısından bir kalkan ya da bir zırh oluşturmak için deneysel veya teorik çalışmalar her geçen önem arz etmektedir.

Zırhlamanın genel tanımı, radyasyonun kaynaktan nasıl ortaya çıktığı, nasıl yayıldığı, madde ile hangi biçimlerde etkileştiği, geçtiği ortamlarda mikro boyutlarda ne tür değişimlere neden olduğu ve bu değişimlerin ortama etkisinin neler olduğunu inceleyen çalışma alanlarından biri olarak açıklanabilir (Shapiro, 1972). Radyasyon kaynağı ile insan arasına konulacak zırhlama malzemesi radyasyona maruz kalma dozunu azaltır. Zırhlama malzemesi ne kadar yoğun bir yapıda ise X- ışınları ve γ ışınlarına karşı zırhlama özelliği de o oranda artış gösterecektir (Ertaş 2014). Radyasyona gösterilen yoğun ilgi ve talep nükleer çalışmalar için optimum düzeyde özellik sergileyen nükleer zırh malzemelerinin keşfini, araştırılmasını ve üretimini daha gerekli hale getirmiş ve konuya ilişkin çalışmaların arttırılmasına sebep olmuştur. Farklı tür ve enerjilere sahip radyasyonlar için, çeşitli zırhlama materyallerinin kullanılabilirliği ve bunlar arasında en iyi zırhlama kabiliyeti gösterenin hangisi ya da hangileri olduğu üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yoğunluk kazanmıştır (Aral, 2019). Radyasyon zırhlama ile ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalar hem bilgisayar yazılımları üzerinden parametrik hesaplamalar ile hem de deneysel olarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki kısımda literatüre kazandırılan bu önemli çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Alhakami et al. (2025), optik ve radyasyon kalkanlama özelliklerini geliştirmek amacı ile bizmut oksit (Bi_2O_3) ile katkılanmış baryum borat camları için yeni bir çalışma sunmuştur. Eritme söndürme tekniği ile $(65-x)\text{B}_2\text{O}_3+5\text{WO}_3+20\text{BaO}+10\text{Na}_2\text{O}+x \text{Bi}_2\text{O}_3$ ($x=0,5, 10, 15, \text{ ve } 20 \text{ mol}\%$) bileşenlerinden oluşan cam üretimi yapılmıştır. Bunun sonucunda Bi_2O_3 'ün özellikle düşük enerjili foton etkileşimleri için önemli ölçüde kütle soğurma katsayısını ve lineer zayıflama katsayısını arttırdığı, X-ışını ve gama (γ) ışını için radyasyon koruması adına kullanılacak uygulamalar açısından uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Rezvani, M., & Ghezelgechi, H. J. (2025), radyasyonun canlı organizmalar açısından önemli bir tehdit olması ve etkili koruma malzemelerinin geliştirilmesi gerektiğini ifade edilmiştir. Bu çalışmada temel bileşen olarak $45\text{SiO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3-$

$23\text{Na}20\text{-}9\text{CaO-}3\text{Al}_2\text{O}_3$ (mol%) seçilip, farklı oranlarda SiO_2 ve B_2O_3 içeren cam malzemelerin özelliklerini Monte Carlo N- (MCNP) bilgisayar simülasyon programı ile camların foton soğurma özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada GSB2 ile adlandırılan cama %15 kadar Bi_2O_3 eklenmesi gama ışınına karşı koruma özelliklerini önemli ölçüde arttırdığını saptamışlardır.

Dridi et al. (2024), manganez fosfat (MnO) cam sistemi formunun $(50\%-x/2)\text{P}_2\text{O}_5\text{-(}50\%-x/2\text{)Na}_2\text{O-xMnO}$ için ($x=0\text{-}33$ mol%) radyasyon zırhlama yeteneğini ve fiziksel özelliklerini araştırmayı amaçlamıştır. Yapılan araştırma için gama ışını spektroskopisi sistemi kullanılarak hem deneysel gözlem yapılmış hem de FLUKA ve Phy-X/PSD bilgisayar programları ile elde edilen teorik veriler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak cam sistemine katılan MnO , gama ışınları, elektron ve ağır yüklü parçacıklar için zırhlama performansını arttırdığı fakat nötron parçacıkları için zayıf kaldığını ifade etmişlerdir.

Sayyed et al. (2024), bizmut borosilikat camlarının radyasyon zırhlama özelliklerini Phy-X/PSD programı aracılığı ile 0,015-15 MeV foton enerjisi aralığında kütle soğurma katsayıları (μ_m) belirlenmiştir. İncelenen numunelerin radyasyon zırhlama verimliliğini anlamak için ek parametreler olarak HVL, MFP, ACS, ECS ve Z_{eff} hesaplanmıştır. Bulgularda Bi_2O_3 miktarı arttıkça μ_m ve Z_{eff} değerlerinde artışa rastlanmıştır.

Aygun et al. (2024), nükleer endüstride yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi adına iki kobalt ve iki tungsten esaslı alaşım üretmiştir. Daha sonrasında Phy-X/PSD programı kullanılarak zırhlama kabiliyeti için gerekli parametreler ile yapısal özellikleri için SEM, EDS, XRD ve EPR sonuçlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklarda çalıştırılan nükleer reaktörlerde tungsten esaslı alaşımların kobalt esaslı alaşımlara göre daha yüksek verimlilik gösterdiğini ve reaktörlerde ekranlama için bu alaşımların özel bir öneme sahip olabileceğini söylemişlerdir.

Karthika et al. (2024), vanadyumla katkılanmış lityum telluro-borat (LTB) camları, $(20\text{-}x)\text{Li}_2\text{O-}20\text{TeO}_2\text{-}60\text{B}_2\text{O}_3\text{-(}x\text{)V}_2\text{O}_5$ ($x=0, 0,5, 1, 1,5$ ve 2 mol %) ile verilen kompozisyondan yararlanarak eriyik söndürme tekniği ile hazırlamışlardır. Hazırlanan

camlar için yapısal, fiziksel, elektriksel, optik ve radyasyon zırhlama parametrelerini inceleyerek vanadyum katkısının etkisini araştırmışlardır. Radyasyon zırhlama parametreleri için kullanılan Phy-X/PSD programı ile LTB camlarına V_2O_5 katkısının radyasyon zırhlaması konusunda gelişmiş sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Narmanlı Han (2024), toz metalurjisi-basamak sinterleme tekniği ile kobalt esaslı $Co_2Mn_xNi_{1-x}Al$ ve $Co_2Cr_xNi_{1-x}Al$ ($0,1 \leq x \leq 0,9$) Heusler alaşımlarını elde etmiştir. Üretilen alaşımları XRD, EDS, SEM ile analiz edip alaşımların karakteristik özelliklerini analiz etmiştir. Analizlerde alaşımların çok fazla polikristal yapıya sahip olduğu, ağırlıklı olarak kübik, tetragonal ve hekzagonal kristal görünümünün oluştuğunu gözlemlemiştir. Ayrıca Phy-X/PSD bilgisayar yazılımı ile teorik olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayıları, doğrusal zayıflatma katsayıları ve etkin atom numaraları parametrelerinin foton enerjisinin artması ile azaldığını, yarı kalınlık ve ortalama serbest yol parametrelerinin ise foton enerjisinin artmasıyla arttığını belirtmiştir. Bununla birlikte yapılan çalışmada elde edilen Heusler alaşımlarının düşük enerji bölgesinde radyasyon zırhlama materyali veya nükleer tıp materyali olarak kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Perişanoğlu (2024), yüksek entropili alaşımlar (HEA) için çalışılan bazı alaşımların gama radyasyonuna karşı kalkanlama parametrelerini EpiXS programı ile 0,015-15 MeV enerji aralığında hesaplamış ve WinXCOM yazılımı ile doğrulamıştır. İncelediği yüksek entropili alaşımlar; $FeCoNiCrMn$, $TaNbHfZrTi$, $NbMoTaW$, $AlMoNbV$ ve $NbTaTiV$ olup bunlar arasında, $NbMoTaW$ ve $TaNbHfZrTi$ alaşımlarının gama radyasyonuna karşı en iyi kalkanlama performansı gösterdiğini vurgulamıştır.

İlik (2023), çinko fosfat tellürit camları eritme-tavlama yöntemini kullanarak In_2O_3 ile katkılamış ve camların saydam olduğunu gözlemlemiştir. Sentezlenen camların yoğunlukları In_2O_3 'ün katkılama oranına bağlı olarak önemli değişiklikler gösterdiğini ifade etmiştir. Radyasyon koruma etkilerinin en iyi verimlilik gösterdiği

malzemenin ise %6 mol In_2O_3 ile katkılanmış cam olduğunu ve bunların geliştirilebileceğini belirtmiştir.

Akman (2023), yaptığı çalışmada, $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$, $\text{Fe}_{79}\text{B}_{16}\text{Si}_5$, $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ ve $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{B}_{18}\text{Mo}_4$ içeriklerine sahip ve FeBSiC , FeBSi1 , FeBSi2 ve FeNiBMo ile kodlanmış metal yapılı camların gama radyasyonuna karşı koruma özelliklerini incelemiştir. WinXCOM bilgisayar programı ve FLUKA ile GEANT4 simülasyon kodlarından faydalanarak 0.06-2.614 MeV foton enerjileri aralığında metal yapılı camların kütle soğurma katsayılarını araştırmıştır. Düşük enerjili fotonlar bölgesinde metal yapılı camların gama radyasyonuna karşı daha iyi koruma sağladığını ve FeNiBMo olarak kodlanan metal yapılı camın çalışmada kullanılan diğer metal yapılı camlara nazaran daha iyi gama radyasyonu koruma kapasitesine sahip olduğunu saptamıştır.

Al-Ghamdi et al. (2022), İyonlaştırıcı radyasyonu zırlamak için yaptığı çalışmada değişken konsantrasyonlarda tungsten oksit içeren ağır beton numunelerini hazırlamış ve elde edilen numunelerin mekanik ve radyasyon zırlama kabiliyetlerini deneysel ve teorik teknikler ile incelemişlerdir. Deneysel ve teorik verilerin iyi bir uyum gösterdiğini, mevcut betonlarda WO_3 kullanmanın numunelerin yoğunluğunu ve radyasyona karşı iyi bir zırlama etkisi geliştirdiğini ifade etmişlerdir.

Tuna vd. (2022), nötron parçacıklarının atom çekirdeği ile direk etkileşime girmesi dolaylı yoldan iyonizasyon etkisi oluşturması nedeniyle diğer radyasyon çeşitlerinden farklı etkiler oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada ise kalsit (CaCO_3) barındıran ve barındırmayan beton numunelerinin nötron kalkanlama kabiliyetlerini birbirleri ile kıyaslamışlardır. Kalsit (CaCO_3) barındıran beton ile saf betonu deneysel ortamda izotropik Am-Be nötron kaynağından çıkan radyasyona karşı test etmişlerdir. Deney sonucuna göre, saf betonun zırlama açısından daha baskın olduğunu belirtmişlerdir.

Kavun (2021), çimento üretiminde glikoz içerikli kompozit çeşitlerinin yaygın olarak kullanıldığını, glikoz içeren hafif malzemelere ulaşmanın kolay, ekonomik vb. avantajlı özelliklerinin olmasından ötürü çeşitli tip çimentoların üretiminde yer aldığını ifade etmiş ve yaptığı çalışmada, (%5, 10, %20) Pb katkılı $\text{C}_8\text{H}_{13}\text{O}_5\text{N}$ (kitin)

karışımı için, Phy-X/PSD bilgisayar yazılımını kullanarak MAC, LAC, HVL, TVL, MFP, Z_{eff} ve N_{eff} gibi önemli parametreleri 1keV- 40MeV enerji aralığında teorik olarak incelemiş ve gama ışınına karşı korumada uyumlu olduğunu vurgulamıştır.

Mokhtari et al. (2021), nükleer reaktörlerde, parçacık hızlandırıcılarda, laboratuvar ortamlarında ve farklı radyasyon kaynaklarının bulunduğu yerlerde yaygın olarak kullanılan malzemenin beton olduğunu ve betonun önemli bir radyasyon zırhlama malzemesi olarak kabul edildiğini belirtmişlerdir. Kimyasal sentez tekniği ile üretilen kurşun oksit (PbO) mikro/nano parçacıklarını betona katkılایarak zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. Daha sonraki aşamada katkılanan beton numunelerinin ortalama boyutları, morfolojik özellikleri, fonksiyonel grupları ve termal yapıları dahil olmak üzere XRD, FESEM-EDS, FTIR ve TGA analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca beton numunelerin gama ışını kütle soğurma katsayısını, Monte Carlo simülasyonu ve deneysel çalışmalar ile ölçmüşlerdir. Deneysel ve simülasyon çalışmaları arasında yeterli ölçüde bir uyumun elde edildiğini ve nano PbO (kurşun oksit) parçacıklarının, 1MeV'e kadar olan gama ışınlarında verimli olduğunu saptamışlardır.

Naito et al. (2020), Geant4 Monte Carlo simülasyonundan yararlanarak, durdurma gücü ile nükleer parçalanma kesiti olan iki fiziksel parametrenin bir fonksiyonu olarak birkaç malzemenin uzaydaki radyasyona karşı zırhlama davranışını değerlendirmişlerdir. Galactic Cosmic Ray (GCR) gibi yüksek radyasyona karşı uzay araçlarında zırhlama etkinliği fazla olan malzemelerin yapılabilmesi veya geliştirilmesi için gerekli parametreleri araştırmışlardır.

AbuAlRoos et al. (2020) yaptıkları çalışmada tungsten karbürün nükleer tıpta kurşunsuz radyasyon koruma malzemesi olarak kullanılabileceğini ve kurşunun yerini alabileceğini göstermişlerdir. Tungsten karbürün gama radyasyonunu durdurmak için kullanılabileceğini ve kurşunsuz radyasyon koruma yöntemi sayesinde hem çevre hem sağlık açısından toksik etkileri aza indireceğini ifade etmişlerdir.

Issa et al. (2019), yaptıkları bir çalışmada Bi_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2 - Na_2O - Fe_2O_3 , cam yapısını eriyik söndürme yöntemi ile üretmişlerdir. XCOM, MCNPX kodu ve XMuDat programlarını kullanarak μ_m değerini tespit etmişlerdir. Ayrıca HVL, Z_{eff} ,

EBF, EABF ve Σ_R parametrelerini de hesaplamışlardır. Bi_2O_3 ilavesinin cam numunesi üzerinde daha fazla radyasyonu engelleme yeteneğine katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

Kavun (2019), radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkilerinin; yanık, hastalık, insan ömrünün kısalması, kanser ve kalıtsal bozukluklar gibi etkenler içerdiğini ifade etmiştir. Bu çalışmada duvar kağıtlarının kurşun(II) nitrat ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) ile kaplayarak radyasyon soğurma özelliklerini araştırmıştır. Farklı kalınlıklarda ve $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ile kaplanmış duvar kağıtlarına 4MeV enerjili elektron uyguladı ve PTW marka elektron dedektörü ile ölçümler yapmış ayrıca WinXcom programı ile teorik verileri hesaplamıştır. Sonuç olarak bu duvar kağıtlarının radyasyon zırlama kabiliyetinin kalınlığa bağlı olarak arttığını belirtmiştir.

Aygün & Karabulut (2018), yaptıkları çalışmada dört yeni ağır beton tasarlayıp üretmişlerdir. 4.5 MeV nötron radyasyon enerjisi kalkanı için Monte Carlo simülasyon programının Geant4 kodunu kullanarak gerekli hesaplamaları yapmışlardır. Deneysel çalışmayı ise 4.5 MeV enerjili hızlı nötronlara karşı gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte elde edilen yeni ağır betonların sık kullanılan beton tipleri ve parafin gibi nötron radyasyon kalkanlarına kıyasla daha fazla nötron radyasyonu soğurduğunu bulmuşlardır. Ayrıca gama radyasyon zırlama parametreleri olan kütle soğurma ve lineer soğurma katsayılarını teorik olarak hesaplayıp geleneksel betonları ve yeni betonları kıyaslamış, yeni betonların radyasyon soğurma gücünün çok daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

Bakırhan (2017), kurşun atıkları madeni ile katkılanan ağır betonların radyasyon zırlama parametrelerini 662-1460 keV enerji aralığında incelemiştir. Manyetit, Barit, Limonit ve Pasa agregalarını eldeki verilere göre karşılaştırmış ve manyetit agregasının en yüksek radyasyon zırlama değerine sahip olduğunu ardından ise sırasıyla barit, pasa ve limonitin geldiğini saptamıştır.

Kurudirek (2017), ağır metal oksit borat (HMOB) camı için; gama ışınları, hızlı nötron parçacıkları ve yüklü parçacıklara karşı kütle zayıflatma katsayılarının, etkin atom numaralarının, foton kuvvetlendirme etkilerinin ve hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitlerinin 662 keV enerjideki deneysel çalışma değerlerini MCNP simülasyon kodu

ile doğrulamıştır. Sıradan ve hematit-serpantin betonlarına göre, HMOB cam sistemlerinin gama ve parçacık radyasyonlarına karşı zırhlama açısından daha verimli olduğunu belirtmiştir.

Yukarıda literatür kapsamında yer alan ve kronolojik olarak sıralanan bazı çalışmalardan da anlaşılabacağı gibi radyasyon zırhlama alanında birçok farklı deneysel yöntem ve farklı teorik hesaplamalar yapan bilgisayar program/simülasyon yazılımları ile araştırmalar yapılmıştır. Her birinde elde edilen bulgu ve sonuçlar bir başka çalışmaya ilham kaynağı veya yeni bir basamak oluşturmuştur. En nihayetinde ortak amaç daha önceki kısımlarda tanımlanan radyasyon olgusunun canlı organizmalar üzerinde oluşturacağı olumsuzlukları önlemek için en doğru, en ekonomik, en kullanışlı ve çevresel faktörlere en uyumlu zırhlama materyallerini geliştirmek ve kullanmaktır.

Bu tez çalışmasında katkılı ve katkısız Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımların radyasyon zırhlama kabiliyetleri teorik olarak araştırılmıştır. Araştırmada diğer çalışmalardaki Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımlara ait deneysel ya da teorik olarak çalışılmış element oranları baz alınmıştır. Bu oranlarla elde edilmiş alaşım çeşitlerinin radyasyon zırhlamada nükleer yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği teorik olarak Phy-X/PSD çevrimiçi programı yardımı ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme radyasyon zırhlamada yapı malzemesi olarak yaygın kullanılan beton tipleri ve kurşun ile kıyaslanarak yapılmıştır. Aşağıda Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımlarla ilgili araştırılan çalışmalar verilmiştir.

Akamine et al. (2025), Cu-Al-Mn alaşım tipinde gerilim etkisi ile oluşan yapısal değişimleri inceleyip bu alaşımların esnek ve dayanıklı yapıları elektron mikroskobu ve X ışını kırınımı yöntemi kullanılarak araştırmışlardır.

Praveen et al. (2024), Cu-Al-Mn alaşımlarının tel erozyon yöntemi ile işlenebilirlik kapasitelerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan deneyde malzeme kaldırma hızı (MKH) ve yüzey pürüzlülüğü (YP) olmak üzere iki farklı işleme kabiliyetini incelemişlerdir.

Liu et al. (2025), manganez (Mn), Al bazlı alaşımlarda boyutları iri Fe açısından zengin fazların morfolojisini iyileştirerek ince Mn açısından zengin dispersoidlerin oluşumunu sağladığını ve bu özellik genellikle alaşımın mikroyapı kontrolü açısından faydalı olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak bu çalışmada, Cd ile mikroalaşımlanmış Al-Cu-Mn esaslı bir alaşımda, Mn açısından zengin dispersoidlerin yapay yaşlandırma sürecinde ara yüzeyde Cu açısından zengin çökeltilerin oluşumunu arttırdığını tespit edip bu durumun Cu elementinin erken tüketimine neden olarak nano düzeyde çökelti oluşumunu olumsuz yönde etkilediğini saptamışlardır.

Li et al. (2024), yaptığı çalışma lazer toz yatağı ergitme yöntemi ile Cu-Al-Mn alaşımını ve bu alaşıma silisyum (Si) elementi katkılıyıp Mn_5Si_3 fazına sahip Cu-Al-Mn-Si alaşımını elde etmişlerdir. Bununla birlikte bu alaşımların mikro yapılarındaki değişimi ve çekme özelliklerine ait mekanizmaları araştırmışlardır. Bu çalışma ile birlikte Cu-Al-Mn alaşımının plastikiyet özelliğini artırma konusunda yeni bir yöntem sunmuşlardır.

Xu et al. (2023), tel ark eritme tabanlı katkı üretim teknolojisi ile elde ettikleri Cu-Al-Mn ve Cu-Al-Mn-Ni alaşımlarının şekil hafıza özelliklerini karşılaştırmışlardır. Nikel katkılı olan alaşımın şekil hafıza davranışının belirgin biçimde daha iyi olduğunu saptamışlardır.

Wang et al. (2025), yaptıkları çalışmada Cu-Al-Mn-Ni alaşımlarının çevresel sıcaklığın artışına bağlı olarak sönümlenme kapasitesinin nasıl azaldığını ve martensit sınırlarında oluşan boşlukların bu süreci nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Sıcaklığın 313 K üzerine çıkması durumunda sönümlenme kapasitesinde bariz bir düşüş olduğunu ifade etmişlerdir.

Xi et al. (2022), seçici lazer ergitme ile ürettikleri düşük maliyetli ve yüksek fonksiyonel tepkiye sahip Cu-Al-Mn-Nb alaşımının mikro, mekanik ve şekil hafıza özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmaların yüksek performansa sahip şekil hafızalı malzemelerin üretimine önemli bir katkı sunacağını vurgulamışlardır.

Alves et al. (2023), Cu-Al-Mn alaşımına vanadyum (V) ilavesi ile mikroyapı, dönüşüm sıcaklıkları ve korozyon davranışı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Vanadyum oranının artması ile alaşımın korozyon direncinin arttığını ifade etmişlerdir.

Andrade et al. (2022), yaptıkları çalışmada Cu-Al-Mn-Ti-B şekil hafızalı alaşım tipinin farklı gerinim hızlarında gerilimle uyarılan martensit dönüşümü, kopma gerinimi, maksimum dayanımı ve kalıcı değişimi inceleyerek belirledikleri alaşımın gerinim hızının bu faktörlere etkisi araştırılmış ve gerinim hızı aralıklarının belirlenmesine katkı sağladığııı vurgulamışlardır.

Yang et al. (2021), Cu-Al-Mn-Ti alaşımına tantalyum (Ta) ilavesi ile mikroyapı, mekanik ve sönümlleme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Tantalyum ilavesi ile oluşan malzemenin mekanik özellikleri ve sönümlleme kapasitesi açısından mükemmel performans gösterdiğini doğrulamışlardır.

de Souza et al. (2022), yaptıkları çalışmada Cu-Al-Mn bazlı alaşıma gadolinyum (Gd) ve kalay (Sn) elementlerinin ark ergitme yöntemi ile eklenmesini sağlayıp sodyum klorür çözeltisi içindeki korozyon davranışı ve yüzey kimyası üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan alışma sonucunda elde edilen alaşımların deniz suyu veya tuzlu ortamlarda kullanılan malzemeler için korozyona karşı dayanımı arttıran bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

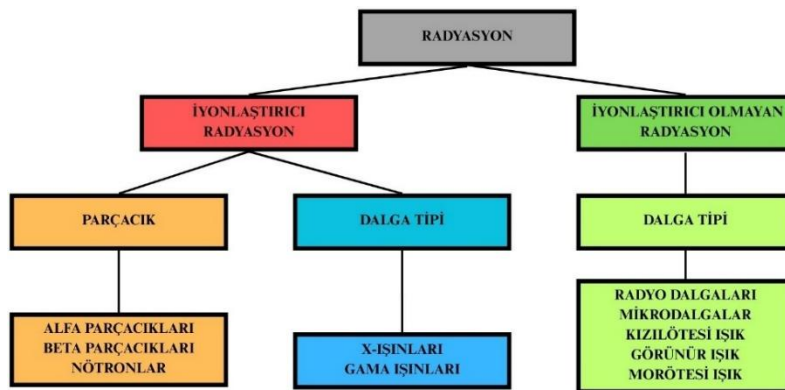
2.KURAMSAL TEMELLER

2.1. Radyasyon Tanımı ve Sınıflandırılması

Radyasyon bir kaynaktan parçacık ya da farklı değerlerde dalga boylarına sahip dalga biçiminde yayılan enerji olarak tanımlanabilir.

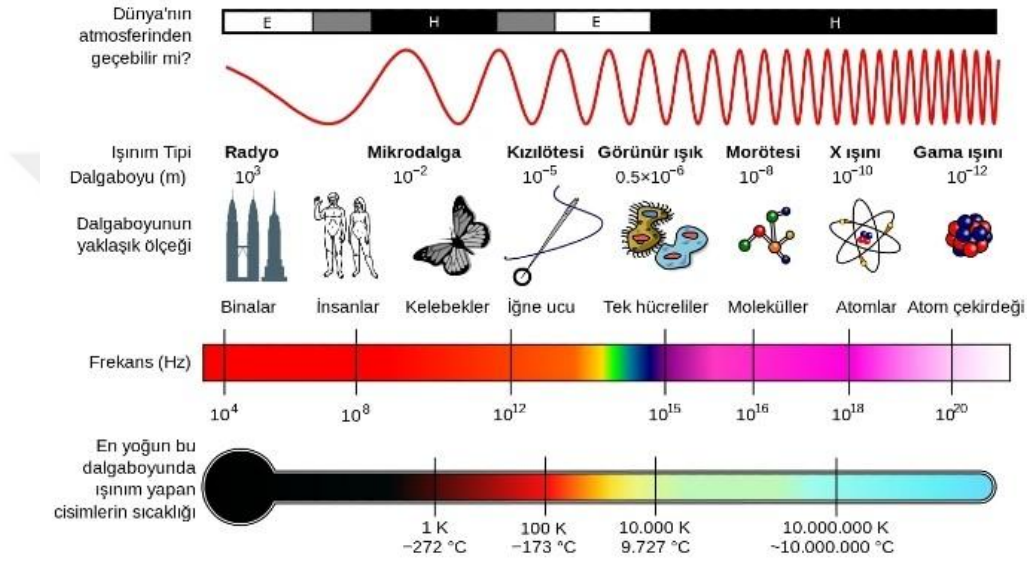
Doğada yer alan elementler atomik olarak kararlı ve kararsız çekirdek yapısına sahip olabilir. Atom çekirdeklerinin kararsız olması ağır çekirdeklerin sahip olduğu fazla enerjiden kaynaklanmaktadır. Ağır çekirdekler radyoizotop veya radyoaktif olarak adlandırılır. Radyoaktif çekirdeklerin fazla enerjilerinden kurtularak kararlı yapıya bürünmesi radyoaktif parçalanma veya radyoaktivite olarak adlandırılır (Özavcı, 2017).

Radyasyon çeşitleri iyonlaştırma durumuna göre genel olarak iki sınıfa ayrılabilir. Bunlar iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlardır. İyonlaştırıcı radyasyonlar partikül formunda veya elektromanyetik dalga formunda olabilir. Partikül formunda ve kütleye sahip olan radyasyon türleri alfa (α), beta (β) ve nötron iken elektromanyetik dalga formuna sahip ve kütesiz radyasyon türleri X ve γ -ışınlarıdır. İyonlaştırıcı etkisi olmayan radyasyon çeşitleri ise radyo dalgaları, kızıl ötesi dalgalar, mikrodalgalar mor ötesi ışık olarak sıralanabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Radyasyon çeşitlerinin sınıflandırılması

Radyasyon çeşitleri kısmında yer dalga tipi radyasyonlar elektromanyetik dalgalar olup foton denilen enerji paketlerinden oluşan, boşlukta ışık hızı ile yayılabilen ve yayılabilmesi için maddesel ortamın varlığı zorunlu olmayan dalgalardır. Enine dalga şeklinde olup doğrusal yolla yayılan, yüksüz oldukları için elektrik ya da manyetik alanda sapmayan, çarptıkları yüzeyler tarafından soğrulabilen ve ısınmaya neden olabilen dalgalardır. Türkiye Uzay Ajansı (TUA) resmi sitesinde yayınlanmış elektromanyetik spektrum görseli Şekil 2’de verilmiştir.



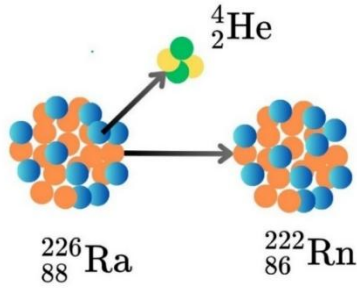
Şekil 2. Elektromanyetik Spektrum

2.2. İyonlaştırıcı Radyasyon

Alfa, beta, nötron parçacıkları, X ve gama ışınları en bilinen iyonlaştırıcı radyasyon türleridir. Günlük yaşamda sağlık alanında kullanılan bilgisayarlı tomografi (BT), pozitron emisyon tomografisi (PET), mamografi ve tek foton emisyon bilgisayar tomografisi (SPECT) gibi cihazlar iyonize radyasyon kullanılarak görüntüleme yapmaktadır (Gedikoğlu 1988). İyonlaştırıcı radyasyonların bir materyale ya da canlı organizmalara etki etmesindeki temel sebep enerjilerinin yüksek olup dalga boylarının kısa olmasıdır.

2.2.1. Alfa (α) parçacığı

Alfa parçacıkları atom çekirdeğinde oluşan reaksiyonlar sonucu oluşur. Atom numarası 83'ten büyük olan elementlerde doğal olarak ortaya çıkan ve elektrona göre 7300 kat daha ağır olan bu parçacıklar düşük hıza ve çift yüke sahip olmalarından ötürü kısa mesafede enerjilerini kaybeder. Yüksek enerjiye sahip bir alfa parçacığının hava ortamında alabileceği mesafe 10 cm olup bir kağıt tarafından bile durdurulabilecek kadar zayıf girici etki gösterir. Bu nedenle canlı dokulara doğrudan tehlike oluşturabilecek bir etkileri yoktur. Ancak solunum yolu ile vücuda girdiğinde küçük dokularda önemli hasarlara neden olabilirler (Işık Karadoğan, 2019). Ayrıca alfa bozunması meydana geldiğinde başlangıçtaki element başka bir elemente dönüşür. Bozunma esnasında rölativistik enerji ve momentum korunur. Şekil 3'te Alfa bozunumuna ait bir görsel verilmiştir.



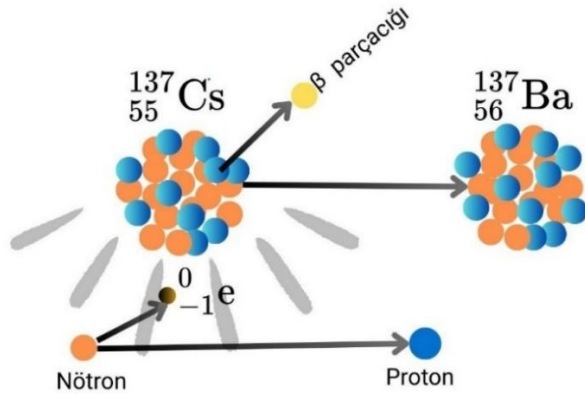
Şekil 3. Alfa (α) Bozunumu

Alfa parçacığı, iki nötron ve iki protondan oluşan helyum çekirdeğidir. Bir çekirdekten alfa parçacığı yayınlanırsa o çekirdek iki nötron ve iki proton yitirir. Bu bozunma durumuna ait eşitlik (2.1) aşağıdaki gibidir.

$$^A_Z\text{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + ^4_2\text{He} \quad (2.1)$$

2.2.2. Beta (β) parçacığı

Beta bozunması üç çeşit olup elektron yakalaması, elektron yayınlaması ve pozitron yayınlaması şeklinde gerçekleşir. Şekil 4'te beta bozunumuna ait temsili bir görsel verilmiştir. Pozitron elektronla aynı yük miktarına ve büyüklüğe sahip olan ancak elektrondan farklı olarak pozitif yüklü özellik gösteren anti parçacıktır. Radyoaktif çekirdeklerde beta bozunumu gerçekleştiğinde nükleon sayısı değişmezken yük miktarlarında bir birimlik değişimler olacaktır. Çekirdekten çıkan alfa parçacıkları tek enerji değerine sahip olmasına karşın yapılan deneylerde beta parçacıkları farklı değerlerde enerjiyle yayınlanmıştır. Yayınlanan elektronların kinetik enerjilerinin sistemdeki kütle azalması dengelemesi ve dolaylı olarak Q bozunma enerji değeri ile uyumlu olması gereklidir. Bozunmaya uğrayan tüm radyoaktif çekirdeklerin ilk kütle değerlerinin aynı olduğu mecburen Q bozunma enerjisinin de aynı olmasının gerekliliği bilinmesine rağmen elektronların farklı kinetik enerjilerle yayınlanması var olan teorilerle açıklanamamaktadır. Gerek teorik gerek deneysel çalışmalar çekirdekte gerçekleşen beta bozunması sonucunda giricilik etkisi yüksek olan, taşıdığı enerjinin belirlenebilmesine olanak tanımayan ve nötrino adı verilen bir parçacığın yayınlandığı ileri sürülmüştür. Nötrinoların madde ile etkileşiminin zayıf olması deneysel keşfini zorlaştırmış ancak 1956 yılında bahsedilen eksik enerjinin bu parçacık tarafından taşındığı ispatlanmıştır. (Ünlü et al., 2014).



Şekil 4. Beta (β) Bozunumu

Radyoaktif çekirdek beta bozunumuna uğradığında proton sayılarındaki bir artış veya bir azalış durumuna göre sınıflandırılır. Bu artış veya azalışta protonun nötrona ya da nötronun protona dönüşmesi söz konusudur. β^- bozunumunda atom çekirdeğindeki bir nötron kendiliğinden proton, elektron (e^-) ve anti nötrinoya $\bar{\nu}_e$ dönüşür. Proton atom çekirdeğinde kalır. Bu durumda kütle numarası değişmezken atom numarası bir artar. Oluşan elektron ve anti nötrino parçacıkları bozunan ana çekirdeğin durgun enerjisinden meydana gelmiş dolayısıyla atom çekirdeğinin ilk duruma göre enerjisi azalmıştır. Reaksiyondaki toplam enerji ise korunmuştur. β^- bozunumuna ait eşitlik aşağıda gösterilmiştir (2.2).



Bir diğer bozunum türü de β^+ bozunumudur. Bu bozunumda ise bir proton kendiliğinden bir nötrona dönüşür. Bu dönüşüm sonucunda bir nötrino (ν_e) ile bir pozitron (${}^0_{+1}e$) yayımlanır. Nötron ise çekirdekte kalır. β^- bozunumuna ait eşitlik aşağıda gösterilmiştir (2.3).



Elektron yakalama: Radyoaktif çekirdekteki kararsızlık proton fazlalığından kaynaklı ise ana çekirdeğin orbitallerinde bulunan elektronlardan birisi yakalanır. Elektron genellikle K kabuğundan yakalanır. Protonla bir elektron birleşmesinde nötron ve nötrino oluşur. Bu durumu izah eden eşitlik aşağıda gösterilmiştir (2.4).



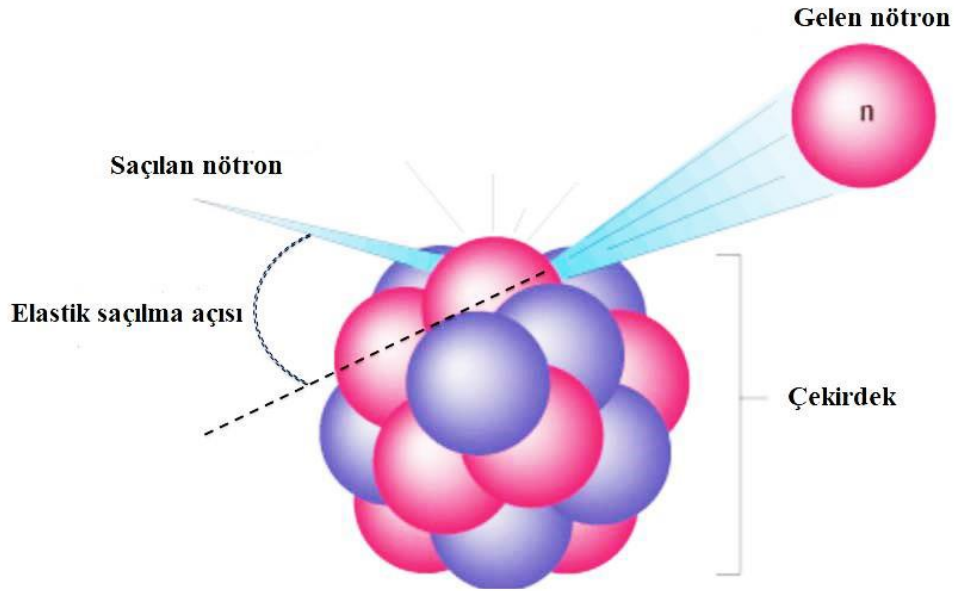
Beta ışınlarından korunmak için düşük atom numaralı malzemelerin kullanılması daha sağlıklıdır. Çünkü beta ışınları vücut içi ve vücut dışı etkileşimlerde özellikle cilt ile göz etkileşiminde ciddi tehlike arz etmektedir (Işık Karadoğan, 2019).

2.2.3. Nötronlar

Nötronlar 1932 yılında J. Chadwick tarafından keşfedilmiştir. Hafif elementlerin alfa ışınları ile bombardıman edilmesi ile meydana gelen reaksiyon

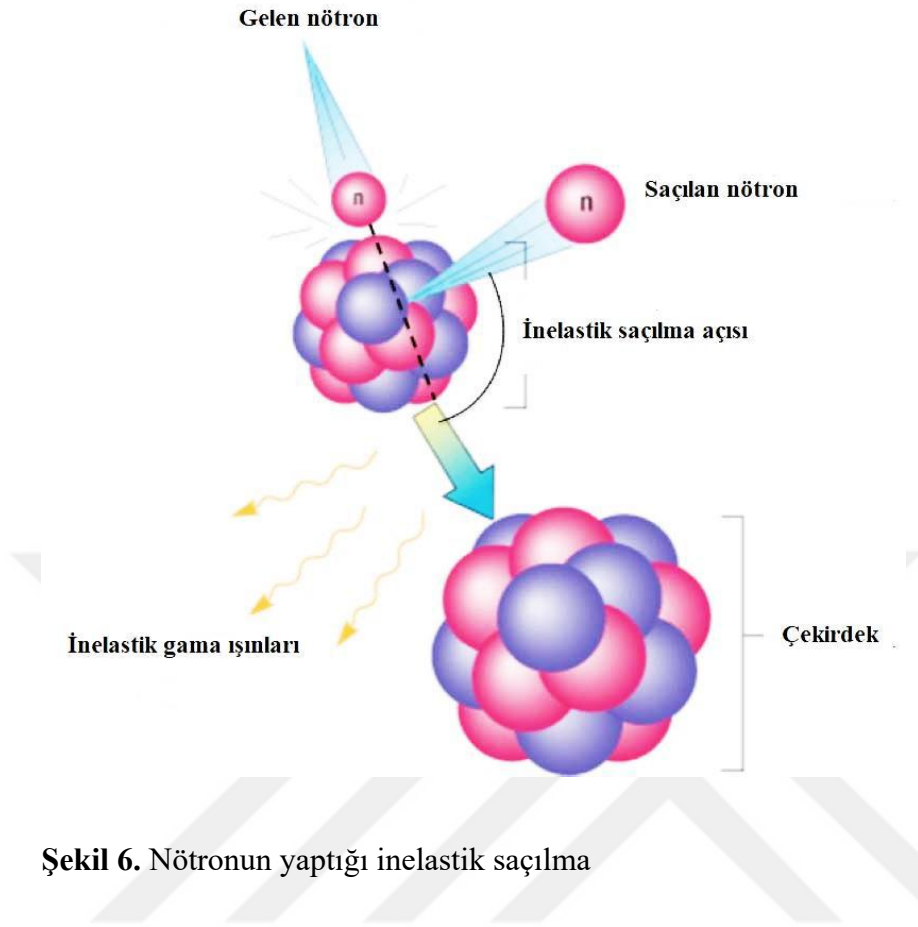
sonucu oluştuğu gözlemlenmiştir. Protona göre nötronun kütlesi biraz daha fazladır. Nötronların yüksüz olmaları nedeni ile madde ile etkileşimi esnasında atomlarla ya da çekirdeklerle Coulomb etkileşiminde bulunmazlar. Sahip oldukları enerji sayesinde atom çekirdeği ile elastik ya da inelastik saılma veya soğrulma olacak şekilde farklı şekillerde etkileşebilirler (Araz, 2020).

Nötron, bir çekirdek ile çarpıştığı anda elastik saılma olursa, nötron kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe nakleder ve geldiği doğru üzerinden sapmaya uğrar. Bu saılma çeşidinde momentum ve enerji korunur. Çekirdekte herhangi bir değişiklik olmaz. şekil 5' te bu durumu anlatan bir görsel verilmiştir (Araz, 2020).



şekil 5. Nötronun yaptığı elastik saılma

Çekirdeğin eşik enerjisinden yüksek enerjiye yani 1 MeV ya da daha fazla enerjiye sahip nötron, enerjisinin bir kısmını çekirdeğe çarpışma anında nakleder. Nötron, geldiği doğrultudan saparak kalan enerjisi oranında çekirdekten uzaklaşır. Uyarılmış durumda kalan çekirdek farklı forma sahip bir ışıma yayınlayarak temel hale döner. Bununla birlikte çekirdek yapısal olarak değişime uğrar. şekil 6' da bu durumu anlatan bir görsel verilmiştir (Yerlikan, 2013).



Şekil 6. Nötronun yaptığı inelastik saçılma

Nötronların soğurulmasında ise hızı v olan bir nötronun çekirdeğe yakalanma ihtimaliyetinin tesir kesiti $1/v$ ile orantılıdır. Nötronun yavaş olması yakalanma ihtimalini kolaylaştırır. Yakalanma işlemi sonucunda nötron kaybolur ve çekirdek yeni bir izotopunu oluşturur. Bunun sonucunda çekirdek fazla enerjisini gama ışını olarak yayınlar (Yerlikan, 2013).

Nötronlar yüksüz olduklarından giricilik etkileri oldukça fazla ve canlı için tehlikelidir. Nötronları durdurmak için kalın beton, parafin veya su kütleleri kullanılabilir.

2.2.4. X- ışınları

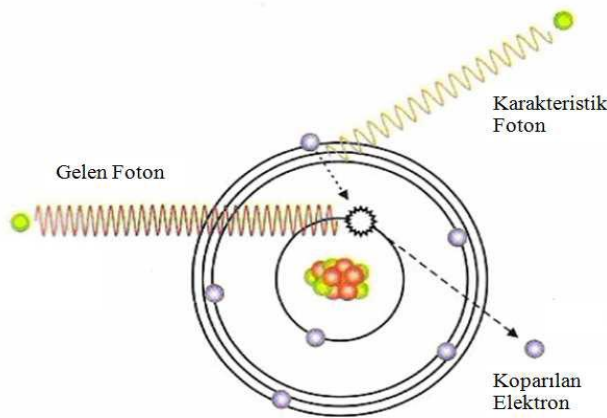
X ışınları, elektromanyetik spektrumda gama ışınlarından sonraki yüksek frekansa, yüksek enerjiye ve iyonlaştırıcı etkilere sahip olan kütesiz ve boşlukta ışık hızı ile yayılan bir çeşit elektromanyetik dalga türüdür. X ışınlarının oluşumu yüksek enerjili elektronların durdurulması veya atomik iç yörüngelerde meydana gelen

elektron geçişleri ile gerçekleşir. Dalga boyları 0.1-100Å arasında değişiklik gösteren X ışınları küçük dalga boylarında yüksek enerjilere sahiptir. Dolayısıyla yüksek enerjili X ışınlarının giricilik dereceleri de fazla olacaktır. X ışınlarının dalga boyları atomik çap boyutlarına yakın olduğu için canlılara zarar verir. Bununla birlikte X ışınları tıpta teşhis koyma veya tedavi yöntemlerine önemli katkılarda sunmaktadır. Ayrıca X ışınları doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılır:

Doğal X ışınları: Atom ekirdeğindeki K enerji kabuğunda meydana gelen alfa bozunması, iç dönüşüm, beta bozunması ve elektron yakalaması gibi olaylar sonucunda oluşur. Genel olarak atom içerisinde ilk katmanlardaki elektron koparılnca oluşan boşluğa daha yüksek seviyelerden elektronlar geçiş yapar ve bu esnada açığa çıkan fazla enerji X ışınması olarak yayımlanır.

Yapay X ışınları: Maddenin hızlandırılmış yüklü taneciklerle etkileşimi sonucu veya X ışını tüpü yardımıyla elde edilebilir. Ayrıca fotonlarla maddenin etkileşimi sonucu karakteristik X ışınları elde edilir. Eğer madde yüklü taneciklerle etkileşime giriyorsa hem karakteristik hem sürekli X ışınları elde edilebilir.

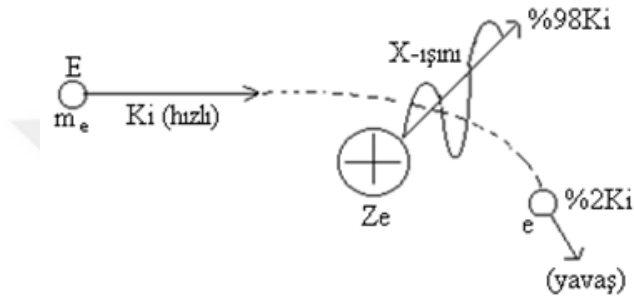
Karakteristik X ışınlarında i yörüngede meydana getirilen elektron boşluğu üst yörüngeler tarafından 10^{-8} ile 10^{-9} saniye aralığında doldurulur. Şekil 7’de karakteristik X ışınlarının oluşumu şematize edilmiştir. Bu i geçişler esnasında yayınlanan fotonlara karakteristik fotonlar veya karakteristik X ışınları adı verilirken bu olay floresans olarak ifade edilir.



Şekil 7. Karakteristik X ışınının oluşumu (Brouwer 2003)

Hedef atom çekirdeğine gönderilen bir elektron demeti çekirdekteki pozitif yükün oluşturduğu elektrik alandan etkilenip ivmeli hareket yapmaya zorlanır. İvmeli hareket yapan yüklü tanecikler elektromanyetik bir dalga oluşturur. Oluşan bu dalga sürekli enerji spektrumuna sahip X ışınlarıdır. İç dönüşüm elektronları, Compton geri tepme elektronları, Auger elektronları ve beta ışınları sürekli X ışını verir.

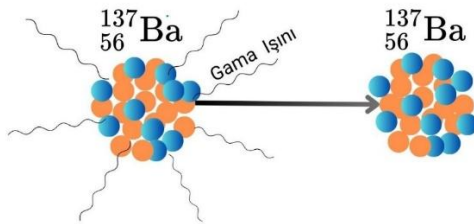
Sürekli X ışınlarının üretilmesinde X ışını tüpleri temel kaynaktır. Sürekli X ışını oluşumu Şekil 8’de şematize edilmiştir.



Şekil 8. Sürekli X ışını oluşum mekanizması

2.2.5. Gama (γ) ışınları

Gama ışınları yüksek frekansı dolayısıyla yüksek enerjiye sahip aynı zamanda düşük dalga boylu ve boşlukta ışık hızı ile yayılabilen bir elektromanyetik dalga türüdür. Radyoaktif çekirdeklerin geçirdiği alfa ve beta ışımaları sonucu oluşan yeni kararsız çekirdek gama ışıması yaparak kararlı hale geçmek ister. Bu esnada açığa çıkan gama ışınlarının yüksek enerjili olması giricilik etkilerinin yüksek dozda olduğunu ifade eder. Dolayısıyla gama ışınlarını durdurmak diğer ifadeyle zırhlamak için betondan veya kurşundan yapılmış bloklar gereklidir. Şekil 9’da gama bozunumuna ait temsili görsel verilmiştir.



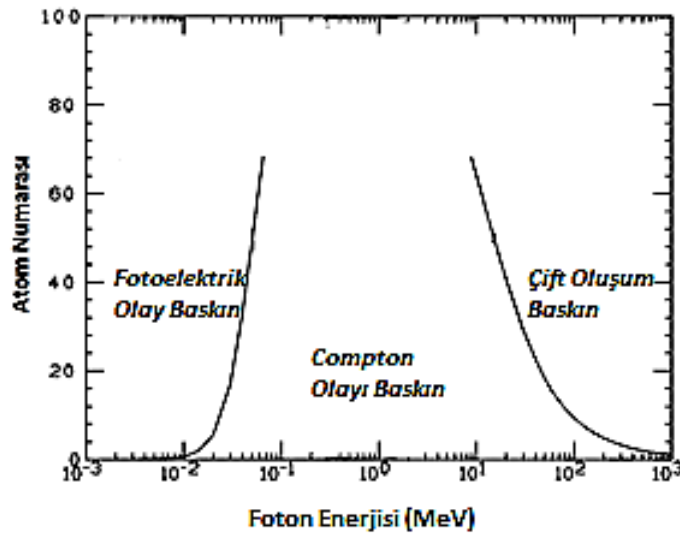
Şekil 9. Gama (γ) bozunumu

2.3. X ve Gama Işınlarnın Madde ile Etkileşimi

X ve gama ışınları elektromanyetik dalga türü olup ikisinde madde ile etkileşimleri aynıdır. Elektromanyetik spektrumda belirtilen diğer dalgalardan farklı olarak yüksek frekans ve yüksek enerjiye sahip olup çok kısa dalga boylarında yayılmasıdır. Elektromanyetik dalgaların radyasyon etkileri parçacıklarla benzerlik gösterir. Dalga tipi radyasyonu oluşturan parçacıklar foton olarak adlandırılır ve enerji paketçikleri olarak ifade edilebilir. Fotonlar yüksüz tanecikler olduğundan madde ile etkileşimleri esnasında Coulomb kuvvetinden etkilenmezler ancak karşılaştıkları parçacıklarla çarpışabilirler (Özavcı, 2017).

Fotonlar maddeler ile etkileştiğinde fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu olayları gerçekleşir.

Gama ışınları ile X ışınlarının madde ile etkileşmesi sonucu fotoelektrik olay, Compton olayı ve çift oluşum olaylarının farklı enerji aralıklarındaki baskınlık durumları Şekil 11’de gösterilmiştir. Fotoelektrik olay 0,0001 MeV ile 0,5 MeV aralıklarında, Compton saçılması 0,1 MeV ile 0,5 MeV aralıklarında, çift oluşum olayı ise 1,02 MeV’den itibaren başlar ve fotonun enerjisinin artması ile birlikte artış gösterir. (Gümüş, 2011)



Şekil 11. Fotonların madde ile etkileşiminde baskın olduğu bölgeler

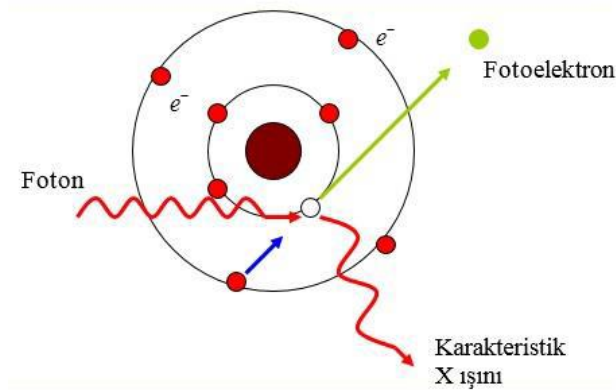
2.3.1. Fotoelektrik olay

Enerjisi $h\nu$ olan bir foton, atoma bağı elektronlardan birisi ile çarpıştığında elektron tarafından soğrulur. Fotonu soğuran elektron serbest hale gelir ve bu durum fotoelektrik olay olarak tanımlanır. Serbest hale gelen elektron ise fotoelektron olarak adlandırılır. Serbest hale gelen elektronun kazandığı kinetik enerjisi veren denklem aşağıda gösterilmiştir (2.5).

$$K_e = h\nu - E_b \quad (2.5)$$

Verilen denklemde K_e elektronun kazandığı kinetik enerji, $h\nu$ soğrulan fotonun enerjisi ve E_b ise elektronun bağlanma enerjisidir. Serbest halde bulunan bir elektronun momentum ve enerjisi korunamayacağından böyle bir elektronun foton soğurması söz konusu değildir. Fakat çekirdeğe bağlı elektronlardan durum farklı olup atomun geri tepmesi sonucu momentum korunur. Atomun kütlesi çok büyük olduğundan atomda oluşabilecek geri tepme enerjisi ihmal edilecek düzeydedir. Bununla birlikte atomun kinetik enerjisi de ihmal edilir (Şahin, 1999).

Fotoelektrik olay atoma ait yörüngelerin tümünde gerçekleşebilir. Fotonun enerjisi yüksekse iç yörüngelerde olma olasılığı artar. Fotonun enerjisi düşükse dış yörüngelerde meydana gelir. Fotonun enerjisi yörüngelerden birisinin bağ enerjisine eşitse fotoelektrik olayın o yörüngede gerçekleşmesi daha muhtemeldir (Gümüş, 2011). Şekil 12’de fotoelektrik olayı anlatan bir görsel verilmiştir.



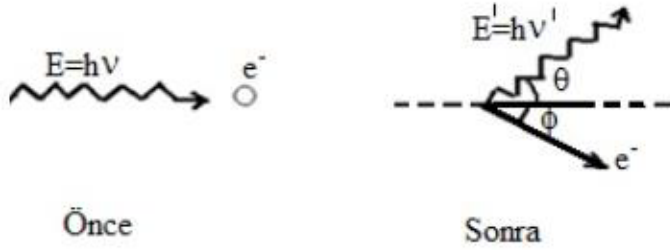
Şekil 12. Fotoelektrik olay

2.3.2. Compton saçılması

Gelen fotonun enerjisi 0,5 MeV'in üzerinde ise etkileşime girdiği maddenin atomuna serbest halde ya da zayıf olarak bağlanmış dış yörüngedeki elektron ile etkileşmesi olayıdır. Bu etkileşimde foton ile elektron çarpışır ve gelen foton geliş doğrultusundan sapmaya uğrar. Etkileşime giren elektron yörüngesinden koparak saçılmaya uğrar. Burada gelen parçacık bir X ışını veya gama ışınına ait foton olabilir. Compton saçılmasında gelen foton etkileşim sonrasında enerji kaybeder dolayısıyla dalga boyu artar. Ancak gelen foton etkileşim öncesi ve etkileşim sonrası aynı büyüklükteki hızlarla yayılır.

Compton saçılmasına ait bir görsel Şekil 13'te verilmiştir. Compton saçılmasında meydana gelen dalga boyu değişim denklemi (2.6)'da verilmiş olup; λ gelen fotonun dalga boyunu, λ' saçılan fotonun dalga boyunu, m_0 elektronun durgun kütleini, c ışık hızını, h planck sabitini ve θ fotonun saçılma açısını ifade etmektedir.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta) \quad (2.6)$$



Şekil 13. Compton saçılması

Gelen fotonun enerjisi $h\nu$ ise Compton saçılmasında Einstein bağıntısı kullanılabilir. Bununla ilgili bağıntı (2.7) aşağıda verilmiştir.

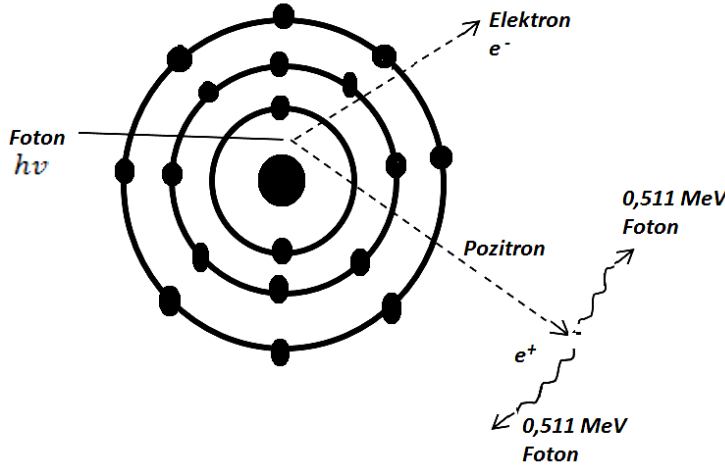
$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.7)$$

Bu ifadede de E_γ gelen gama ışınının enerjisini, E'_γ saçılan fotonun enerjisini ifade ederken $m_e c^2$ elektron için durgun kütle enerjisi olup 0,511 MeV'e eşittir. Gama ışınının saçılma açısı $\cos\theta$ olarak ifade edilmiştir (Knoll 1999).

2.3.3. Çift oluşumu

Çift oluşumunun meydana gelme ihtimali fotoelektrik olay ve Compton saçılmasına göre daha düşüktür. Çift oluşumu gerçekleştiğinde elektromanyetik dalgayı oluşturan fotonlar elektron ve pozitrona dönüşür (Şekil 14). Bu durumun gerçekleşmesi için madde ile etkileşecek olan gama fotonunun enerjisi, elektronun durgun kütle enerjisinin yani 1,02 MeV enerji değerinin üzerinde olması gerekir. Fotonun enerjisi 1,02 MeV'in üzerindeyse fazla enerji elektron ve pozitron çiftine kinetik enerji olarak aktarılır. (Knoll, 1999). Denklem (2.8)'de elektronun durgun kütle enerjisinin ifadesi gösterilmiştir. Ayrıca çift oluşumu esnasında toplam enerji, çizgisel momentum ve yük korunur.

$$h\nu \approx 2m_e c^2 = 2 \times 0,511 = 1,022 \text{ MeV} \quad (2.8)$$



Şekil 14. Çift oluşumu

2.4. Radyasyon Kaynakları

Günlük yaşamda doğada var olan doğal radyasyon ve çalışmalar sonucu farklı alanlarda oluşan yapay radyasyon kaynakları mevcuttur. Canlıların maruz kaldığı doğal radyasyonun seviyesini yaşanılan yerin toprak yapısı, barınmak için kullanılan binalar, malzemeler, mevsimler, kutuplara olan uzaklık ve iklimsel şartlar gibi etkenler belirleyici olabilmektedir. Ayrıca alçak veya yüksek basınç, rüzgar yönü, yağmur ve kar gibi etkenlerde radyasyon miktarını belirleyici olmaktadır (Gençay 1994).

Doğal radyasyonlar; içsel radyasyon, karasal radyasyon ve kozmik radyasyon olmak üzere üç başlık altında incelenebilir.

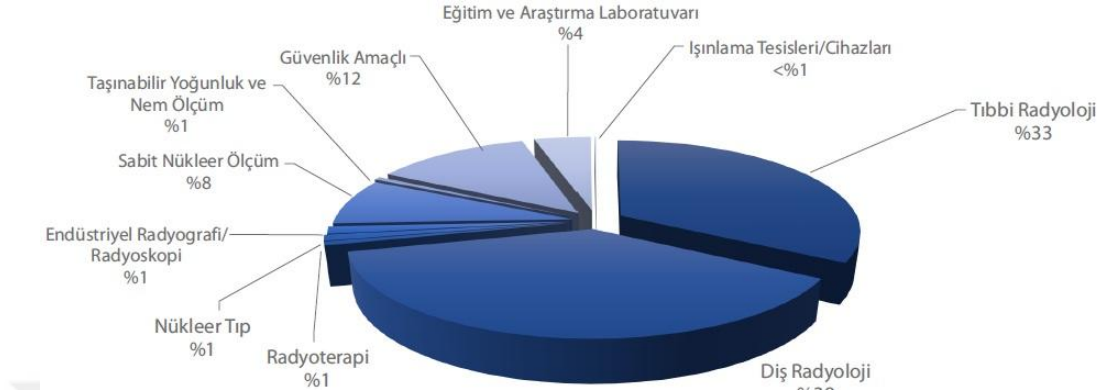
İçsel radyasyon; İnsan vücudunda bulunan Karbon-14, Potasyum-40 ve Radyum-226 gibi radyoaktif izotopların yaydığı radyasyondur. Bütün canlıların etkisinde olduğu bu radyasyon içsel radyasyon (background radyasyon) olarak ifade edilmekte ve yaşam koşullarına göre değişiklik gösterebilmektedir (Coşkun 2011).

Karasal radyasyon; Dünya yüzeyinde bulunan ve varlığını sürdüren çeşitli radyoaktif elementlerin bozunmaları sonucu ortaya çıkan radyasyon tipidir. Karasal radyasyonu oluşturan radyoaktif izotoplar besinler ve solunum yolu ile canlılara etki eder.

Kozmik radyasyon; Güneş sisteminden veya güneş sistemi haricindeki diğer yıldız veya galaksilerden gelen ilk iyonlaştırıcı partiküller (çoğunlukla proton) ve bunların atmosfer ile etkileşerek oluşturabileceği ikinci partiküllerden kaynaklı radyasyon tipidir.

Yapay radyasyonlar; insanlığın ürettiği teknolojik yenilikler ile çok çeşitlilik göstermiş ve beraberinde radyasyon etkilerini ortaya çıkartmıştır. Bunlar arasında nükleer tesisler, nükleer silahlar, teknolojik çalışmalarda kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, televizyon vb. cihazlardan yayılan iyonlaştırıcı ışıklar ve yangın dedektörlerinde kullanılan radyoaktif kaynaklar yer almaktadır (Atakan 2006).

Nükleer Düzenleme Kurumu'nun (NDK) 2022 yılında yayınladığı ülkemizdeki radyasyon dağılımı verileri Şekil 15'te gösterilmiştir (Nükleer Düzenleme Kurumu 2023).



Şekil 15. Ülkemizdeki radyasyon uygulamaları dağılımı (NDK)

2.5 Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Etkileri

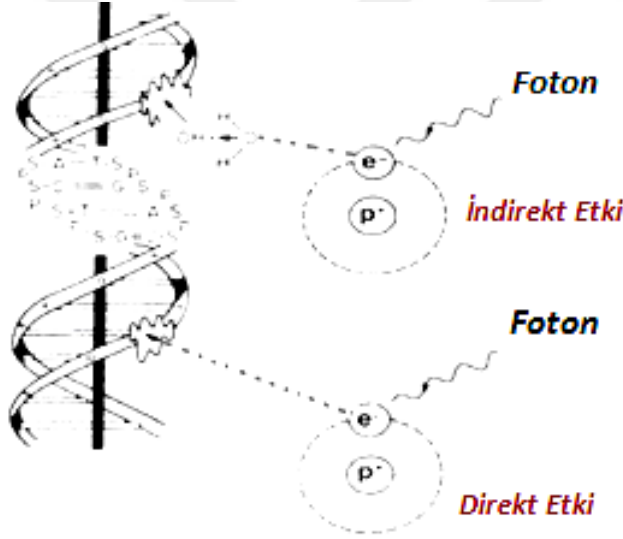
Radyasyon olgusunun fark edilmesi, bilimin her geçen gün gelişmesi, teknolojinin sanayileşme ile birlikte birçok alanda yaygınlaşması ve karmaşık süreçlerin iç içe birlikte ilerlemesi canlı yaşamına ilişkin olumlu ya da olumsuz anlamda etki etmiştir. En yaygın kullanım yerleri arasında kanser teşhis ve tedavisi, sanayi sektörü, tarım sektörü ve bilimsel çalışmalar yer almaktadır (Cardis et al., 2005). Normal şartlarda canlıların iyonlaştırıcı etkisi olan doğal radyasyon kaynaklarına da maruz kalması söz konusudur. Bir diğer husus ise radyoaktivitenin çevreye yayılımı ve etkisi ile radyasyonun şiddetine, etkileşim süresine ve türüne bağlı olarak değiştiğidir (Zeytinoğlu & Şahin, 1993).

X ışınlarının keşfi sonrası yapay radyasyon kaynaklarının insanlar üzerinde zararlı biyolojik etkiler bıraktığı, bu radyasyonun sadece ciltte değil organlara da zarar verdiği 1985 yılında Roentgen tarafından fark edilmiştir. X ışınlarından kaynaklı ilk kanser vakasına 1902 yılında rastlanmıştır. 1920 yılının son dönemlerinde Prof. Herman Muller'in böcekler üzerinde yaptığı araştırma sonucunda ilk defa X ışınlarının olumsuz etkisine rastlanmış ve mutajen bir etkisi olduğunu fark etmiştir (Coşkun, 2011).

Radyasyonun hücre ile organ ve dokulara etkisi iki başlık altında incelenecektir.

2.5.1. Radyasyonun hücreye etkisi

Radyasyonun birincil etkisi yani direkt etkisi ile meydana gelen etkileşim olup canlı moleküllerinde iyonizasyon etkisiyle Deoksiribo Nükleik Asit (DNA) zincirinin kırılmasıdır. Radyasyonun dolaylı yani indirekt etkisi ise ortaya çıkan radyasyon ürünlerinin ve diğer serbest haldeki radikallerin kimyasal reaksiyona girmesiyle meydana gelen olaylardır. Burada hidroksil radikalleri DNA şekerine yönelen DNA ipliğinin kırılmasına neden olur. Bu durum indirekt etkinin bir örneğidir. Bu iki farklı etki türüne ilişkin görsel Şekil 16’da verilmiştir (Özavcı 2017).



Şekil 16. DNA zincirinin kırılması

Kırılan DNA zincirinde hasarlı bölge için onarım başlar. Eğer DNA zinciri ciddi bir hasar almamışsa onarım başarı ile sonuçlanabilir. Ancak onarım esnasında hatalar ve yanlış kod barındıran kromozomlar oluşabilir. Sağlıklı olan bir hücreye nazaran radyasyona maruz kalan bir hücre doğru zamanda bölünememe, aşırı büyüme vb. olumsuz davranışlar gösterebilir (Özavcı, 2017).

2.5.2. Radyasyonun doku ve organlara etkisi

Radyasyonun dokularda ya da organlarda bıraktığı etki vücutta ışınlanan kısmın işlevlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Organların bu duyarlılıklarına ait sınıflandırma Tablo 1’de verilmiştir (Güngör, 1991; Gençay, 1994; Algüneş, 2002).

Tablo 1. Organların Radyasyona Karşı Duyarlılıkları

Duyarlı	Daha Duyarlılar	Çok Duyarlılar
Beyin	Cilt	Kemik İliği
Lenf Dokusu	Safra Kesesi	Tiroit Bezi
Karaciğer	Dalak	Akciğer
Pankreas	Böbrek	Göğüs
İnce Bağırsak	Kemik	Mide
Yumurtalık		Kalın Bağırsak

Radyasyonun biyolojik etkilerine insanların kendi vücutlarında rastlaması mümkün olduğu gibi kendinden sonra gelecek nesillerinde de rastlanması muhtemeldir. Bu durum kalıtsal hasarlara yol açabilmektedir. Eğer yüksek oranlarda radyasyona maruz kalınmış ise vücuttaki hasarlara erken rastlanabilir. Bu durum akut ışınlama olarak adlandırılmaktadır. Düşük orandaki radyasyona belirli aralıklarla ve uzun süre maruz kalınması sonucunda yıllar sonra ortaya çıkan hasarlar görülür. Bu durum kronik ışınlama olarak adlandırılır. Radyasyonun genetik etkileri arasında vücutta üreme hücrelerinin ışınlaması sonucunda sonraki nesillere aktarılan ve onlarda görülen etkilerdir. Üreme hücrelerinin düşük oranlı radyasyonla etkileşmesinde bile genetik değişimler gözlemlenebilir. Bu durum mutasyon olarak adlandırılır nitekim mutasyon kalıcıdır (Özavcı, 2017).

2.6. Radyasyonun Doz Birimleri

Radyasyon keşfinden sonra etkisinin belirlenebilmesi için radyasyon ölçümleri ve bunlar için birimler oluşturulması gerekli olmuştur. Bu birimlerin ilki Roentgen tarafından belirlenen R birimi 1928 yılında tanımlanmıştır. 1986 yılından sonra Uluslararası Birim Sistemi (SI) kullanımına başlanmış ve günümüzde artık yeni birimler kullanımı uygun görülmüştür. Tablo 2’de eski ve yeni birimler verilmiştir.

Tablo 2. Radyasyona Ait Eski/Yeni Birimler ve Birbirlerine Dönüşüm Değerleri

Fiziki Büyüklük		Eski Birimi/Sembolü	Yeni Birimi/Sembolü	Dönüşüm Değerleri
Radyoaktivite Şiddet Birimi Işınlama Birimi		Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1 Ci = 3.7×10^{10} Bq 1 Bq = 2.7×10^{-11} Ci
		Röntgen (R)	Coloumb/kilogram (C/kg)	R = 2.58×10^{-4} C/kg 1 C/kg = 3876 R
Soğurulan Birimi	Doz	Rad (rad)	Gray (Gy)	1 Rad = 0.01 Gy 1 Gy = 100 Rad 1 Gy = 100 cGy
Biyolojik Birimi	Doz	Rem (rem)	Sievert (Sv)	1 Rem = 0.01 Sv 1 Sv = 100 Rem 1 Sv = 1000 mSv
Radyasyon Şiddeti Birimi		Röntgen / Saat (R/s)	Gray / Saniye (Gy/sn)	1 R/s = 2.425 Gy/sn 1 μ Gy/sn = 0.4124 R/s

Aktivite: Radyoaktif parçacıklardan etrafa yayılan fazlalık enerji radyoaktivite olarak tanımlanır. Birim zamandaki parçalanma sayısı ile ifade edilir. Uluslararası Standartlar ve Radyoaktivite Birimleri Komisyonu tüm radyonüklidler için parçalanma gerçekleştiren radyoaktif madde miktarının aktivitesini bir saniyede 3.7×10^{10} Bq yani 1 Curie (Ci) olduğunu ifade etmiştir. Bu tanımlardan Curie'nin yalnızca radyoaktif maddede bozunma sayısına ait olduğu anlaşılmaktadır. Buradan çıkarılan sonuç Curie tanımının radyoaktif özellik gösteren numunelerden yayınlanan radyasyonların sayısını göstermediğidir. (Hayrat, 2007).

Işınlama dozu birimi: Hava ortamında bulunan atomların elektronların X veya gama ışınları ile koparılması olasılığı ile tanımlanır. Bu olay için kullanılan birim uluslararası birim sisteminde C/kg'dir. Özel olarak kullanılan birimi ise Roentgen (R)'dir. Roentgen normal koşullarda 1 atmosferlik açık hava basıncı ve 0°C sıcaklıkta 1 kg havada $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb yük değerinde negatif ve pozitif iyonlar oluşturan X ya da gama ışınlarının miktarıdır (Hayrat, 2007; Çetin, 2011).

Soğrulan doz birimi: Bir maddenin 1 kg kütlesine 1 J değerindeki enerjinin yüklenebilmesi için maddenin alması gereken radyasyon miktarı olarak tanımlanır. Birim ifadesi Gray (Gy) olarak gösterilir. Soğrulan doza ait kullanılan özel birim ise

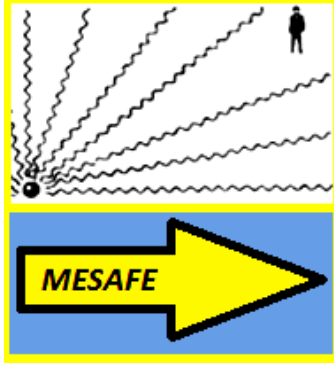
rad (radiation absorbed dose) ile ifade edilir ve rad ışınlanan maddenin 1 kg kütlesi için 10^{-2} J enerji veren radyasyonun ölçüsüdür. Bu durumda 1 rad = 0,01 Gy olarak gösterilir (Hayrat, 2007; Çetin, 2011).

Eşdeğer doz birimi: Bu birim kg başına düşen enerji miktarını ifade eder. Yani J/kg olarak gösterilir ve Sievert (Sv) olarak ifade edilir. Dolayısıyla X ve gama ışınlarının vücutla etkileşiminden dolayı 1 Gy’lik biyolojik etki oluşturmaları için 1 Sv radyasyon gerekir. Eşdeğer doz için kullanılan bir diğer birim çeşidi ise rem (Roentgen equivalent man) ile ifade edilir. Bununla birlikte 1 rem = 0,01 Sv olup rem ile rad arasındaki bağıntı $rem = rad \times W_R$ şeklindedir. Burada W_R , radyasyon ağırlıklandırma faktörünü ifade eden çarpandır. Radyasyonun dokuya etkisini belirleyen etken W_R olup bu değer her doku için farklılık gösterebilmektedir (Hayrat, 2007; Çetin, 2011).

2.7. Radyasyondan Korunma

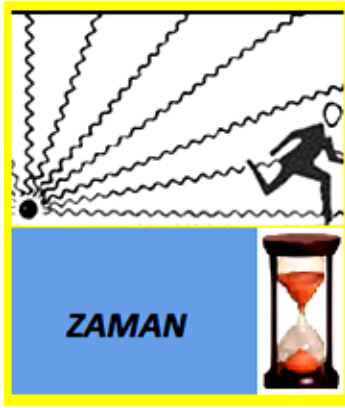
Radyasyonun oluşturduğu etkilerden korunmak için alınabilecek önlemler büyük önem arz etmektedir. Radyasyonla ilgili çalışmalarda en düşük dozda çalışmak ya da radyasyonun tesirini farklı yöntemler kullanarak makul seviyeye indirmek gereklidir. Bu durum ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensibi olarak ifade edilmektedir. Bu açıdan radyasyon tehlikelerinden korunabilmek için alınması gereken üç temel faktör; radyasyon kaynağına uzaklık, ışınlama süresi ve zırhlamadır. (Durmaz, 2002).

Radyasyon Kaynağına Uzaklık: Radyasyon kaynağına uzaklık arttıkça radyasyonun tesiri azalacaktır. Bu durum ters kare kanunu olarak bilinir. Radyasyon tesiri uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak azalır. Bu durumda, radyasyon kaynağından 10 cm uzaklıkta oluşan radyasyon şiddeti, 1 cm’deki radyasyon şiddetinden 100 defa daha az olur. Bu ilkeye göre radyasyonla çalışma süreçlerinde kaynaktan olabildiğince uzak bir noktada çalışmak gerekir (Şekil 17), (Onur, 2002).



Şekil 17. Radyasyon kaynağına uzaklık faktörü

Işınlanma Süresi: Radyasyon ortamında iş yapılırken gereksiz doz almamak için çalışma süresi olabildiğince kısa tutulmalıdır (Şekil 18). Bunun için çalışma sürelerinin iyi planlanması ve bu plana düzenli uyulması gerekir (Onur, 2002).



Şekil 18. Radyasyon kaynağı ile geçirilen zaman

Radyasyon kaynağı ile çalışmalarda müsaade edilecek süre aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir (2.9).

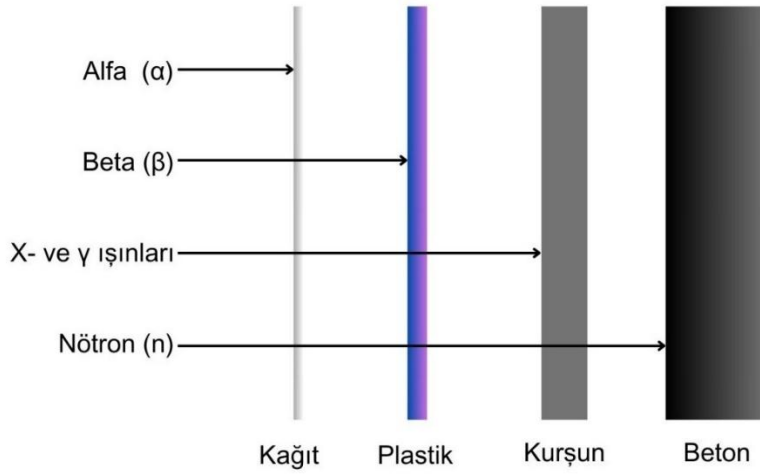
$$t_{\text{ç}} = \frac{d_{\text{mmd}}}{d_{\text{m}}} \quad (2.9)$$

$t_{\text{ç}}$: Ölçülen doz

d_{mmd} : Maksimum müsaade edilebilecek doz

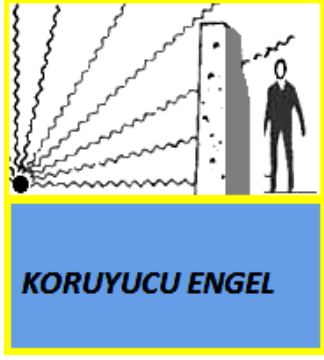
d_{m} : Ölçülen doz

Radyasyon Kaynağının Zırhlanması: Radyasyon kaynağı ile mesafe faktörü ve çalışma süresi faktörü yeterli gelmiyorsa zırhlama yapılması gerekir (Durmaz, 2002). Bir radyasyon demetinin oluşturduğu şiddetin ölçülmesi o ortamdaki 1 cm²lik alandan geçen parçacık ya da enerji paketçisi olan foton sayılarının belirlenmesi yöntemi ile yapılır (Turhan, 2008). Radyasyonun çeşitli maddelerden geçişi esnasında şiddetindeki azalmalar radyasyonun şiddetini zayıflatır. Radyasyon tesiri yüksek kaynaklar için (X ve gama ışınları ve nötron parçacıkları) yoğunluğu fazla olan maddeler kullanılmalıdır. Bu durum Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 19. Radyasyon çeşitlerinin zırhlandırılması

Zırhlamadaki temel amaç radyasyon kaynağı ile çalışılan ortamlarda radyasyonu tamamen absorbe edecek veya tesirini büyük oranda azaltacak bir engel oluşturulmasıdır. Bu en etkili yöntemdir. Kaynaktan çıkan zararlı radyasyon ışınları zırh malzemesi ile etkileşir enerjisini önemli bir oranda yitirir (Şekil 20). Zırhlama yakın ve uzak zırhlama olmak üzere iki türlü olarak yapılabilir. Yakın zırhlamada radyasyon kaynağı içeren madde ya da kap zırhlanabilir. Bu zırhlama tipi alfa ve beta gibi giricilik etkileri az olan radyasyon tiplerine uygulanır. Uzak zırhlamada ise radyoaktif maddenin çevresi zırh ile çevrilir. Bu yöntem ise yüksek giricilik etkisi gösteren radyasyon türlerinde kullanılır (Durmaz, 2002).



Şekil 20. Zırhlayıcı (koruyucu) engel

2.8. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Madde ile etkileşim durumunda iyon oluşturmeyen diğer bir ifadeyle atom ve molekülden elektron koparacak düzeyde enerjiye sahip olmayan radyasyon çeşididir. Optik ve elektromanyetik radyasyon olarak incelenebilir. Optik radyasyonların asıl kaynağı güneş ışınlarıdır. Ultraviyole ışın olarak bilinen Güneş ışınları tam doğarken yoğun biçimde yayılır. Ultraviyole ışınlar ise açık renkli kıyafetler giyilerek engellenebilir. Kar veya kumdan yansıyan ultraviyole ışınlar güneş körlüğü yapabilir. Ultraviyole ışınlar X ve gama ışınlarına nazaran daha düşük enerjili olmasından ötürü maddeye çok fazla nüfuz edemez fakat deri ve göz gibi canlı dokuları etkiler ve %80 ciltte kansere sebebiyet verir gözlerde ise katarakt hastalığına sebep olur. Elektromanyetik radyasyonlara ise radyo dalgaları, mikrodalgalar, bilgisayarlar ve akım taşıyan teller örnek verilebilir (Topal 2019).

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1. Radyasyon Zırhlama

Radyasyon zırhlama yöntemlerinin geliştirilmesi için deneysel olarak birçok farklı teknik ve çalışmaların yanı sıra MCNP (Monte Carlo N-Particle Code), PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System), FLUKA, GEANT4, MicroShield, SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation), QAD-CGGP, VARSKIN, SRIM, PENTRAN, Rad Pro Calculator (Rad Pro Calculator Suite), SHAMAN (Shielding Analysis and Modeling Application), MCAM (CAD-based Modeling Software for MCNP/PHITS) ve Phy-X/PSD gibi bazı yaygın yazılım programları ile teorik çalışma ve araştırmalarda yapılabilmektedir. Bu programlar genel olarak akademik araştırmalarda, hassas analizlerde, nükleer mühendislik alanlarında, medikal fizikte, uzay radyasyon uygulamalarında, nükleer santral güvenliği vb. alanlarda kullanılmaktadır.

Yaygın kullanımı olan programların genel amaçları deneysel çalışmalar haricinde teorik olarak da çeşitli numunelerle elde edilecek zırhlama yapı malzemelerinin kabiliyetleri belirlenebilir. Bazı çalışmalarda hem deneysel veriler hem de teorik hesaplamalar karşılaştırılıp teyit edilerek elde edilen zırhlama materyalinin ne kadar verimli olduğu ve hata paylarının ne oranda olduğu tespit edilebilmektedir. Bu programlardan bazıları radyasyon zırhlama için önem arz eden parametreler üzerinde hızlı ve pratik hesaplamalar yaparken bazıları simülasyon tekniği ile yani elde edilen sonuçları grafik, histogram ve üç boyutlu modeller sunarak daha iyi anlaşılmasına olanak tanır.

Bu tez çalışmasında ihtiyaç duyulan parametreler tercihen Phy-X/PSD çevrimiçi programla belirlenecektir. Elde edilen verilere göre araştırılan alaşımların radyasyon zırhlama için uygun yapı malzemesi olup olmadığı değerlendirilecektir.

3.2. Phy-X/PSD Programı

Phy-X/PSD çevrimiçi yazılım olup Ubuntu 14.04.0-3 LTS işletim sistemi yüklü ve uzak bir sunucuda çalışan ayrıca işlemci olarak Intel Core i7-2600 ve buna ek olarak 1 GB RAM kullanan bir programdır. Buradaki kod, NodeJS v8.4.0 formunda geliştirilip, NginX 1.15.8 ile hizmet vermektedir. Bu yazılımı kullanabilmek için <https://phy-x.net/PSD> adresi üzerinden erişim sağlanabilmektedir. Yazılıma kayıt işlemi yalnızca akademik e posta adresleri ile doğrulama yapıp kullanılabilir. Programın çalıştırılabilmesi için öncelikli olarak kullanılacak malzeme isimleri ve mol kesri ile ağırlık kesirlerinden hangisinin tercih edildiği eksiksiz olarak tanımlanmalıdır. Ağırlık veya mol kesrinin toplamı 100 ya da 1'e eşit olacak şekilde hesaplanmalı ve veriler girilmelidir (Şakar et al., 2020).

Programın tanıdığı bir diğer kolaylıkta incelenecek kompozisyonları kısaltılmış isimlerle kolay ifadesi için numune kodu kısmından tanımlama yapmamızı sağlar. Bunun için sınırlama getirmeyen Phy-X/PSD yazılımı bir yuvarlak içinde bulunan artı (+) sembol sekmesi ile ekstra kompozisyonlar eklememize olanak tanır. Ayrıca programda hesaplanmak istenen kompozisyonlar içinde yoğunluk verisi girilmelidir. Bu aşamalardan sonra programda hesaplanmak istenen parametreler seçilir ve hesaplama butonuna basılır. Daha sonrasında programın grafik ve sayısal veri biçiminde sonuçları karşılaştırması, bir dosya biçiminde indirebilmemize imkan tanıması, ayrıca ücretsiz ve çevrimiçi bir uygulama olması yaygın kullanımının sebeplerindendir (Şakar et al., 2020). Phy-X/PSD programı ile hesaplanabilen parametreler aşağıda verilmiştir:

1. (AMW) Ortalama molekül ağırlığı
2. (LAC) Lineer soğurma katsayısı
3. (MAC) Kütle soğurma katsayısı
4. (HVL) Yarı değer kalınlığı
5. (TVL) Onda değer kalınlığı
6. (MFP) Ortalama serbest yol
7. (ACS) Atomik tesir kesiti
8. (ECS) Elektronik tesir kesiti

9. (Z_{eff}) Etkin atom numarası
10. (N_{eff}) Etkin elektron sayısı
11. (C_{eff}) Etkin iletkenlik
12. (R) Penetrasyon mesafesi
13. (Z_{eq}) Eşdeğer atom numarası
14. (GPEBF) Foton etkileşim katsayıları
15. (GPEABF) Radyasyon yığılma faktörleri
16. (EBF) Işınlanma yığılma faktörü
17. (EABF) Enerji soğurma yığılma faktörü
18. (FNRCs) Hızlı Nötron Uzaklaştırma Kesiti

Teorik olarak çalışılacak numunelerin X ışını ve gama ışını ile etkileşimlerini incelemek üzere numunelere ait gerekli veriler Phy-X/PSD programına girilerek yukarıda belirtilen parametreler için yani soğurma katsayıları, zırlama kalınlığı hesapları, foton etkileşim analizleri, doz tahminleri ve yığılma faktörleri gibi çalışma içeriğine gerekli olan değerler hesaplanabilir.

1. Ortalama molekül ağırlığı (AMW)

Genel olarak bir molekülü oluşturan atomların toplam kütesidir. Tepkime denklemlerinde, mol hesaplamalarında, ilaç formülleri ve doz hesaplarında, foton zayıflatma hesaplamasında, Z_{eff} ile N_{eff} hesaplamalarında ve bileşiklerin fiziksel özelliklerini belirlemede kullanılır. Aşağıdaki eşitliklerde (3.1), (3.2) sırasıyla mol kesri ve kütle kesri gösterilmiştir. Eşitliklerde verilen x_i bileşenin mol kesrini, A_i elementin atomik kütesini (birimi g/mol), w_i bileşenin kütle kesrini, M_i bileşenin moleküler ağırlığını ifade eder.

$$AMW = \sum x_i \cdot A_i \quad (3.1)$$

$$AMW = \left(\sum \frac{w_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

2. Lineer Soğurma Katsayısı (LAC)

Foton demetinin bir malzeme içerisinde geçerken, birim uzunluk başına ne kadar zayıfladığını yani malzeme tarafından ne kadar fotonun tutulduğunu (soğrulma) belirtir. Bu parametre radyasyon zırhlamada, doz hesaplamalarında, X-ray düzeneklerinde medikal fizik alanında ve radyoterapi gibi alanlarda kullanılır.

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3) bir foton ışının bir malzemeden geçerken yoğunluğundaki değişimin malzeme kalınlığının azalan bir fonksiyonu olarak değiştiğini ifade etmektedir. Buradaki μ (cm^{-1}) birim uzunluk başına fotonun ortalama kaybını yani LAC değerini ifade eder. I , x konumundaki foton şiddetini, dI ise x konumundan $x+dx$ konumuna azalan foton miktarını ifade eder. Bu diferansiyel denklemi kısa bir çözümü yapılırsa (3.4) eşitliğine ulaşılır.

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I \quad (3.3)$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx$$

$$\int \frac{dI}{I} = -\mu \int dx$$

$$\ln I = -\mu x + C$$

$$I = e^{-\mu x + C} = e^C \cdot e^{-\mu x}$$

$$x = 0 \Rightarrow I = I_0$$

$$I_0 = e^C \Rightarrow e^C = I_0$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (3.4)$$

Ulaşılan denklemde I_0 başlangıçtaki foton şiddeti, I malzemedan sonra kalan fotonların oluşturduğu şiddeti, μ lineer soğurma katsayısı, x malzemenin kalınlığını ifade etmektedir.

Fotonların hepsi aynı enerjili ise (mono-enerjik demet) ve fotonlar ideal geometrik koşullara göre azalma gösteriyorsa x kalınlığındaki bir soğurucudan geçen fotonların yoğunluğu ($I(x)$) aşağıda (3.5) ile verilen eşitlik yardımıyla gösterilebilir (Alım et al., 2020).

$$I(x) = I_0(e^{-\tau x})(e^{-\sigma x})(e^{-\kappa x}) = I_0 e^{-(\tau+\sigma+\kappa)x} = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.5)$$

- τ fotoelektrik olayın meydana gelme ihtimaliyeti katsayısı
- σ Compton saçılmasının meydana gelme ihtimaliyeti katsayısı
- κ çift oluşumu meydana gelme ihtimaliyet katsayısı

3. Kütle Soğurma Katsayısı (MAC)

Zırhlama malzemesinin mono-enerjik bir fotonla hacim başına etkileşme ihtimalini tarif eder ve lineer zayıflatma katsayısının malzeme yoğunluğuna oranlanması ile bulunur. Kütle zayıflatma katsayısı seçilen radyasyon zırhlama malzemeleri için en önemli foton-madde etkileşim parametresidir. Kütle zayıflatma katsayıları saçılma etkileşimleri dahil tüm etkileşim süreçlerini içerik olarak barındırdığından hem gelen foton ışınlarının enerjisine hem de zayıflatıcı diğer bir ifade ile soğurucu malzemenin yapısına bağlıdır (Aral, 2019). Özetle MAC parametresi malzemenin ne kadar fotonu tutabildiği, bir dokuya gelen dozun hangi miktarda olduğunu, fotonların malzeme içinden ne şekilde geçtiği vb. gibi sorulara açıklık getirir. Eşitlik (3.6) ile kütle zayıflatma katsayısının hesaplanması gösterilmiştir.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.6)$$

Eşitlikte verilen μ_m kütle zayıflatma katsayısı (cm^2/g) olup ρ malzemenin yoğunluğunu (g/cm^3) belirtir.

$$I = I_0 \cdot e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)m} = I = I_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot m} \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.7)'de verilen m (g/cm^2) kütle kalınlığı veya birim alana düşen kütle miktarı olarak ifade edilir. Ayrıca $m = \rho \cdot x$ şeklinde gösterilir.

İki ya da daha fazla elementten oluşan herhangi bir kompozit malzeme için kütle soğurma katsayısı aşağıdaki eşitlikle (3.8) verilebilir. (Jackson & Hawkes, 1981).

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (3.8)$$

Eşitlikte verilen w_i ile $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ sırasıyla malzemede i . elementin ağırlıkça birleşim kesrini (ağ. %) ve mono-enerjik foton demetinin kütle soğurma katsayısını ifade eder.

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_i a_i A_i} \quad (3.9)$$

Eşitlik (3.9)'da verilen a_i , i . elementin mol kesri (mol %); A_i i . elementin atomik kütlelerini ifade etmektedir.

4. Yarı Değer Kalınlığı (HVL)

Malzeme ile etkileşime giren mono-enerjik fotonların malzeme ile etkileşmeden önceki yoğunlukları I_0 'ı yarıya indirmek yani $I = I_0/2$ olması için gereken zırrh malzemesinin kalınlığı yarı değer kalınlığı (HVL) olarak ifade edilir. Malzeme ile etkileşen fotonların yarı kalınlıkta üstel biçimde azalışını gösteren eşitlik (3.10)'da verilmiştir.

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_1 \frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu x_1 \frac{1}{2}}$$

İfadesinde eşitliğin iki tarafının doğal logaritmasını alırsak,

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\mu \cdot x_{\frac{1}{2}}$$

$$-\ln(2) = -\mu \cdot x_{\frac{1}{2}}$$

Buradan $x_{1/2}$ ifadesi (yarı değer kalınlığı (HVL)) yalnız bırakılırsa,

$$x_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} \Rightarrow x_{\frac{1}{2}} \approx \frac{0.693}{\mu} \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11) elde edilmiş olur. Buradaki μ incelenen malzemenin lineer zayıflatma katsayısını ifade eder (Alım et al., 2020).

Lineer zayıflatma katsayısı (μ) arttıkça malzeme daha çok ışın soğuruyorsa yarı değer kalınlığı ($x_{1/2}$) daha az olur. Yüksek enerjili fotonlar için yani X ve gama ışınları için yarı değer kalınlığı (HVL) daha büyüktür. Ayrıca HVL birimi cm'dir.

5. Onda Değer Kalınlığı (TVL)

Malzeme ile etkileşen foton enerjilerinin şiddetinin etkileşimden sonra onda birine (1/10) düşmesini sağlayan zırh maddesinin kalınlığını ifade eder. Bu parametre yarı değer kalınlığı (HVL) parametresi ile yakından ilgili olup eşitlik (3.12)'deki gibi gösterilir. Birimi cm'dir.

$$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \approx \frac{2.303}{\mu} \quad (3.12)$$

Ayrıca TVL ve HVL arasındaki ilişki için (3.13) eşitliği yazılabilir.

$$TVL \approx 3.32 \times HVL \quad (3.13)$$

6. Ortalama Serbest Yol (MFP)

Malzeme içinde radyasyon fotonunun ilerlerken etkileşime (saçılma, soğrulma vb.) girmeden önce ortalama olarak ne kadar yol aldığını ifade eder.

$$P(x) = \mu e^{-\mu x}$$

Bu ifade ilk etkileşimin x mesafesinde olma ihtimalini göstermektedir. Bu kısımdan sonra ifadenin her iki tarafı x ile çarpılıp integrali alınarak çözümü yapılırsa,

$$\lambda = \int_0^{\infty} x P(x) dx = \int_0^{\infty} x \mu e^{-\mu x} dx$$

$$\lambda = \mu \int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx$$

$$\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx = \frac{1}{\mu^2}$$

$$\lambda = \mu \cdot \frac{1}{\mu^2} = \frac{1}{\mu} \quad (3.14)$$

elde edilen (3.14) eşitliği ile ortalama serbest yol (λ) ifadesi elde edilmiş olur. Birimi cm 'dir.

HVL, TVL ve MFP arasındaki matematiksel geçiş işlemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$HVL = 0.693 \times MFP$$

$$TVL = 2.303 \times MFP$$

7. Atomik Tesir Kesiti (ACS)

Foton, elektron, nötron vb. radyasyon parçacığının bir tek atomla etkileşime girme ihtimaliyetini gösteren ifadedir. Sembol olarak σ ile gösterilir ve birimi $cm^2/atom$ olarak ifade edilir. Eşitlik (3.15) ile hesaplanabilir.

$$\mu = N \cdot \sigma \quad (3.15)$$

Bu eşitlikte verilen N , atom yoğunluğunu ($atom/cm^3$) ifade etmektedir ve aşağıdaki (3.16) eşitliği ile hesaplanır.

$$N = N_A \cdot \frac{\rho}{A} \quad (3.16)$$

- A : Atomik kütle
- N_A : Avogadro sayısı (6.022×10^{23})
- ρ : Malzeme yoğunluğu

Toplam atomik tesir kesiti için kısmi olarak fotonların etkileşim tesir kesitlerinin toplamı alınarak eşitlik (3.17) ile gösterilebilir (Hubbel, 1999).

$$\rho_{toplam} = \rho_{foto} + \rho_{koh} + \rho_{inkoh} + \rho_{çift} + \rho_{üçlü} + \rho_{fotonük} \quad (3.17)$$

- ρ_{foto} : atomik fotoelektrik tesir kesiti
- ρ_{koh} : Rayleigh tesir kesiti
- ρ_{inkoh} : Compton tesir kesiti
- $\rho_{çift}$: Çekirdek alanındaki e^- ve e^+ çift oluşumu
- $\rho_{üçlü}$: Atomik elektronların oluşturduğu alandaki e^- ve e^+ çift oluşumu ve geri tepen elektronun oluşturduğu üçlü yapı
- $\rho_{fotonük}$: Nükleer fotoelektrik olayı tesir kesiti

8. Elektronik Tesir Kesiti (ECS)

Fotonun elektronla etkileşme girme olasılığına karşılık gelen etkili alan miktarıdır. Foton soğurma-saçılma hesaplarında, Röntgen ve gama ışını dedektör kalibrasyonunda ve XRF ile XPS tekniklerinde kullanılan bir parametredir. Eşitlik (3.18) ile hesaplanır.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_t}{Z} \quad (3.18)$$

Bu denklemde σ_e , elektronik tesir kesitini (birimi barn/ e^-); Z , atom numarasını; σ_t , toplam atom tesir kesitini (birimi barn/atom) ifade eder.

9. Etkin Atom Numarası (Z_{eff})

X veya gama ışınlarının etkileştiği madde içerisinden geçebilme yeteneğini (penetrasyon) belirleyebilmek için etkin atom numarası (Z_{eff}) niceliğine ihtiyaç duyulur. Birimsiz bir niceliktir çünkü genellikle bir oran veya gölgeleme faktörü

olarak ifade edilir. Penetrasyon lineer soğurma katsayısı ile ters orantılıdır ($penetrasyon \propto 1/\mu$). X veya gama ışınlarının soğrulma ve saçılması elementin atom numarası ve yoğunluğu ile ilişkilidir (Gowda, 2016).

Ayrıca eşitlik (3.19) ve (3.20) yardımı ile Z_{eff} bulunabilir.

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_j f_j A_j Z_j \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_j} \quad (3.19)$$

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \quad (3.20)$$

Denklemden verilen f_i , i. Elementin atom sayısı bakımından bolluğunu; A_i , i. elementin atomik kütlesi; Z_j , j. elementin atom numarasını ve (μ/ρ) i. veya j. elementin kütle soğurma katsayısını ifade eder. σ_a , atom başına düşen etkin ortalama tesir kesitini; σ_e , elektron başına düşen etkin ortalama tesir kesitini tanımlar (Manohara et al., 2008).

10. Etkin Elektron Sayısı (N_{eff})

Birim kütle başına düşen elektron sayısı şeklinde tanımlanabilir. Dolayısıyla etkin atom numarası ile yakından ilgilidir. Birim olarak elektron/g kullanılabilir. Eşitlik (3.20) ve (3.21) de verilen ifadelerle N_{eff} parametresi bulunabilir (Işık Karadoğan, 2019).

$$N_{eff} = N_A \cdot \rho \cdot \sum_i \left(\frac{f_i Z_i}{A_i} \right) \quad (3.20)$$

$$N_{eff} = \frac{\mu/\rho}{\sigma_e} \quad (3.21)$$

Eşitlik (3.20) de yer alan $\sum_i \left(\frac{f_i Z_i}{A_i} \right)$ terimi birim kütle başına düşen elektron sayısını verir. Bu terim ρ ile çarpıldığında, birim hacim içindeki toplam elektron sayısı yani etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) hesaplanmış olur. Bu parametre malzeme seçiminde, nükleer reaktör tasarımlarında ve medikal görüntülemelerde önem arz eder.

11. Etkin iletkenlik (C_{eff})

Bir malzeme içerisindeki tüm elementlerin fotonlar ile etkileşim katkılarını dikkate alarak tanımlanan etkin atomik kesit alanı olarak tanımlanır. Birim olarak cm^2/atom kullanılabilir. Eşitlik (3.22) ile hesaplanabilir.

$$C_{eff} = \frac{\mu/\rho}{N_{eff}} \quad (3.22)$$

12. Penetrasyon mesafesi (R)

İyonlaştırıcı radyasyon türünün (α, β, X, γ) bir malzeme ile etkileştikten sonra absorpsiyon iyonizasyon ve saçılma gibi süreçlerde enerjisini tamamen yitirinceye kadar katettiği ortalama mesafe olarak tanımlanabilir. Uzunluk birimi olarak cm, kütle kalınlığı ile ilgili ise g/cm^2 kullanılır. Kütle kalınlığı ile ilgili birim farklı yoğunluktaki zırhlayıcı malzemelerin yoğunluk kıyası için daha kullanılabilir bir birim formudur.

13. Eşdeğer Atom Numarası (Z_{eq})

Malzemenin foton soğurma davranışını, tek bir element gibi ifade etmek için kullanılan ve birimi olmayan parametredir. Hesaplama metodu olarak malzemeyi oluşturan karışımın μ/ρ değeri element değerlerinin karşılaştırılması üzerine dayalıdır. Z_{eq} değeri yüksek olan malzemeler daha fazla X ve gama fotonu soğurur (Al-Buriahi et al., 2025).

14. Foton Etkileşim Katsayıları ($GPEBF$)

Fotonların özellikle gama ışınlarının bir malzeme ile etkileşimi esnasında sadece doğrudan geçen fotonların değil, aynı zamanda saçılan ve yön değiştiren ikincil fotonlarında (Compton saçılması ve çift üretimi sonucu oluşan fotonlar) hedefe ulaşma ihtimalini dikkate alan ve birimi olmayan bir parametredir. Bu katsayı foton enerjisine, malzeme kalınlığına ve malzeme cinsine bağlı olarak değişim gösterir. Hesaplama yönteminde ise genel olarak Z_{eq} ve geometrik ilerleme (GP) parametreleri hesaplanarak belirli bir foton enerjisi ve malzeme kalınlığı için GPEBF değeri bulunabilir.

15. Radyasyon Yığılım Faktörleri (GPEABF)

Gama fotonları bir maddeye çarptığında, sadece doğrudan geçenlerin değil, saçılarak yön değiştiren fotonların da taşıdığı enerjinin dikkate alınmasıyla oluşan toplam enerji soğrulmasını ifade eder. GPEBF parametresi foton akısındaki artışı belirlemeye yardımcı olurken GPEABF enerji dozundaki artışı belirlemeye yardımcı olan birimsiz bir niceliktir. Hesaplama yönteminde GP (Geometric Progression) yaklaşımı ile build-up faktörü için eşdeğer atom numarası (Z_{eq}), enerji ve kalınlığa bağlı olan katsayılar belirlenir.

Düşük enerjilerde (0.015- 0.1 MeV) fotoelektrik olay baskın olup çoğu foton soğrulur ve $GPEABF \approx 1$ olur. Orta düzey enerji aralıklarında (0.1 – 1 MeV) Compton saçılması baskındır ve GPEABF artar. Yüksek enerjilerde yani 1.022 MeV’ den büyük enerjilerde enerji taşıyan ikincil parçacıklar oluşur ve GPEABF daha da artış gösterebilir.

16. Işınlanma Yığılım Faktörü (EBF)

Gama fotonları bir malzeme içinden geçerken yalnızca doğrudan geçen fotonların değil, aynı zamanda saçılmaya uğrayıp yön değiştiren fotonlarında dedektöre ulaşma olasılığını dikkate alıp dedektörde ölçülen ışınlanmaya toplamda kalınan maruziyetin, yalnızca doğrudan gelen fotonların neden olduğu maruziyete oranını ifade eden bir katsayıdır (Hussein & Rammah, 2024).

17. Enerji Soğurma Yayılım Faktörü (EABF)

Gama fotonlarının bir malzeme içinden geçerken yalnızca doğrudan geçen fotonların değil, aynı zamanda saçılarak yön değiştiren fotonların dedektör tarafından ölçülen toplam soğrulmuş enerjiyi doğrudan gelen fotonların neden olduğu soğrulan enerjiye oranlanmasını ifade eden bir parametredir (Hussein & Rammah, 2024).

18. Hızlı Nötron Uzaklaştırma Kesiti (FNRCs)

Birim kalınlıktaki bir malzemenin, gelen hızlı nötronları (genellikle enerji değeri 0.1MeV ve üzeri olan nötronlar) sönümleme ya da uzaklaştırma kapasitesi olarak tanımlanan bir parametre olup birimi cm^{-1} ’dir. FNRCs enerjiye bağımlı değildir

Çünkü fotonların tüm yönlerden geldiği varsayılır ve bunun için ortalama değer alınır. Eşitlik (3.23) ile FNRCs değerı yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$\sum_R = \rho \cdot R_M \quad (3.23)$$

Eşitlikte verilen $\sum_R$, FNRCs parametresini, ρ malzeme yoğunluğunu ve R_M birim yoğunluk başına nötron giderme kesitini ifade etmektedir.

3.3. Cu-Al-Mn şekil Hafızalı Alaşımların (şHA) zellikleri

Bu alaşım tipi bakır alüminyum ve mangan ile eldesi sağlanan maliyet açısından uygun, işlenebilirlik özelliği iyi olan ve şekil hafızası bakımından üstün özellikler gösteren ayrıca elastikiyet kabiliyeti yüksek olan malzemelerdir. Dolayısıyla diğer şekil hafızalı alaşımlar ile kıyas açısından pratik ve uygulama potansiyeline sahip oluşu bu yelpazeyi geniş tutmakta ve önemli yapı malzemeleri için olanaklar sağlamaktadır (Kainuma et al., 1996; Araki et al., 2016).

Genel olarak Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımlar (şHA); titreşim ve darbe sönümleme sistemlerinde, hassas değişimleri algılayan sensör sistemlerinde, robotik uygulamaların hareket sağlayıcı bileşenlerinde, medikal uygulamalarda, otomotiv ve havacılıkta, akıllı yapı sistemleri ile inşaat sektöründe ve elektrik elektronik uygulamalarda işlevsel olarak farklı amaçlar için kullanılmaktadır.

Alaşımda kullanılan bakır (Cu) elementi yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olup kolay işlenebilir olması ayrıca korozyona karşı dirençli olması alaşımın temel yapısı için önemlidir. Alüminyum (Al) elementi ise yoğunluğu düşük olan, hafif bir metal türü olup şekillendirilme özelliği yüksek ve korozyona karşı dirençli oluşu alaşım yapısındaki hafifliğe ve dayanıklılığa tesiri ayrıca martensitik dönüşüm sıcaklıklarına etki etmesi ile ön plandadır. Mangan (Mn) elementi ise yüksek martensitik sıcaklıkları kontrol edebilen ve şekil hafıza özelliklerine katkı sunan ayrıca mekanik olarak aşınmaya karşı direnç oluşturabilen özellikleri bu teknolojik alaşıma önemli katkı sağlar.

Kadmiyum (Cd) elementi Cu-Al-Mn alaşımında çökelti fazlarının oluşumunu hızlandıran, alaşımın sertlik ve dayanımını arttıran ve yaşlandırmayı etkileyen bir rol oynar. Ayrıca zirkonyum (Zr) elementinin korozyon direnci, ısı ve elektriksel iletkenlik özellikleri yüksek oluşu bu alaşımlara önemli katkı sunar. (Liu et al. 2025). Zirkonyum (Zr) elementinin bir diğer özelliği ise nötron soğurma açısından düşük olması nükleer reaktörlerde kullanımını da ön plana çıkarır. Silisyum (Si) elementi ile katkılanan Cu-Al-Mn-Si alaşımını lazer toz yatağı ergitme yöntemi ile elde edilebilir. Elde edilen Si katkılı Cu-Al-Mn alaşımının plastikiyet özellikleri incelendiğinde Si katkısının sünekliği arttırdığı tespit edilmiştir (Li et al. 2024). Nikel (Ni) elementi birçok farklı amaç için kullanılabilmekte olup alaşımlarda ısıya dayanıklılık, sertlik, manyetik özellik, aşınma direnci, mukavemet vb. özellikleri arttırabilen bir etki gösterip ayrıca korozyona karşıda direnç kazandırır. Metalurji, paslanmaz çelikler, süper alaşımlar ve yüzey kaplamalarında kritik öneme sahiptir (Xu et al. 2023). Aynı şekilde Cu-Al-Mn-Ni şeklindeki bir alaşımda nikel elementinin katkısı sönümleme kapasitesini olumsuz etkileyecek olan sıcaklık faktörlerine karşı direnç etkisini arttırmıştır ve sönümleme kapasitesine pozitif etki yapmıştır (Wang et al. 2025). Niyobyum (Nb) elementi şekil hafızalı alaşımlara katkılanarak sönümleme kapasitesini ve geri kazanım oranını arttırabilen, asitlere ve ısıya karşı yüksek direnç gösterebilen aynı zamanda reaktörlerde de kullanılan bir elementtir. Bu özelliklere sahip Nb elementi ile katkılanan Cu-Al-Mn alaşımını yüksek performanslı şekil hafıza özellikleri gösterebilecektir (Xi et al. 2022). Vanadyum (V) elementi mekanik olarak sert, dayanımı yüksek ve korozyona karşı dirençli etkisi nedeni ile alaşımlarda tercih edilebilir ancak yüksek dozlarda kullanımı toksik olduğundan dikkatli kullanım gerektirir. Cu-Al-Mn alaşımına vanadyum (V) ilavesi alaşımın korozyona karşı direncini artırır ayrıca mukavemeti yüksek alaşım ihtiyacına önemli bir seçenek sunar (Alves et al. 2023). Bor (B) elementi dayanıklılığı arttırmada, ısı işlemlere daha dayanıklı yüzeylerin elde edilmesinde, tane yapısının inceltilip mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde ve nükleer reaktörlerde nötron tutucu özelliği ile önemli bir yere sahiptir. Bor elementi alaşımlara düşük oranlarda eklenerek bu tür özelliklere önemli katkı sağlamaktadır. Titanyum (Ti) elementi ise korozyon direnci yüksek, asit ve baz ortamlarında kararlı (inert), hafif ama yüksek mukavemet gösteren, şekillendirilebilen ve işlenebilen, ısı iletimi zayıf olan ve biyoyumlu olması bir çok alanda kullanımını

arttırmaktadır. Cu-Al-Mn-Ti-B alaşımı, mekanik ve süperelastik davranışları açısından optimize edilmiş olup, bazı pratik uygulamalarda gereken özelliklerini koruyabilmesi için maruz kaldığı deformasyonlara karşı maksimum dayanım ve kalıcı deformasyona karşı olumlu sonuçlar vermiştir (Andrade et al. 2022). Tantal (Ta) elementi yüksek erime noktasına, korozyon direncine ve mekanik dayanıklılığa sahip bir elementtir. Cu-Al-Mn-Ti alaşımına tantal (Ta) ilavesi mekanik özellik ve sönümleme kapasitesi bakımından önemli katkı sağlamıştır (Yang et al. 2021). Gadolinyum (Gd) elementi nadir toprak metali olup manyetik özelliklerin geliştirilmesinde, yüksek sıcaklık dayanımını arttırmada, mekanik performansları iyileştirmede ve nötron tutucu özelliği sayesinde nükleer uygulamalarda önemli rol oynar. Kalay (Sn) elementi ise alaşımlarda dayanıklılığı, sertliği, korozyon direncini ve işlenebilirliği arttıran yapıya sahiptir. Cu-Al-Mn alaşımına katkılanan gadolinyum ve kalay elementlerinden kalay katkılı olanın korozyona karşı direnci daha iyi iken gadolinyum katkılı olanın koroziif ortamlarda direnci daha azdır (de Souza et al. 2022).

Yukarıda belirtilen katkı elementlerinin genel olarak korozyon direnci, sıcaklık dayanımı ve mekanik mukavemet gibi özellikler açısından benzer etkiler gösterdiği görölmektedir.

Bu tez çalışmasında Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımların yukarıda belirtilen kullanım ve çalışma alanlarından farklı olarak radyasyon zırhlama özellikleri değerlendirilecektir. Literatürde Cu-Al-Mn alaşımlarının (ağ. %) hangi oranlarda kullanıldığı ve bu alaşımların ayrıca hangi tür elementlerle hangi oranlarda katkılanarak elde edildiği araştırılmıştır. Bu araştırmada elde edilen oranlara ait veriler kullanılıp belirlenen bazı radyasyon zırhlama parametreleri bilgisayar programı Phy-X/PSD ile araştırılacaktır. Ayrıca yaygın olarak kullanılan beton ve kurşun malzemelerin radyasyon zırhlama kabiliyeti ile Cu-Al-Mn alaşımlarının radyasyon zırhlama kabiliyeti karşılaştırılacaktır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Araştırılan Cu-Al-Mn Alaşımları

Bu çalışmada seçilen Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımların (ŞHA) öncelikle literatür taraması sonucu hangi oranlarda elde edildiği belirlenmiştir. Daha sonraki kısımda ise radyasyon zırhlama konusunda bu alaşımların ne kadar kabiliyetli olduğu ve diğer zırhlama malzemeleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Aşağıda literatürde yer alan ilgili çalışmalar kısaca belirtilmiştir.

Araştırılan alaşımlara ait; Kütle soğurma katsayıları (MAC), lineer soğurma katsayıları (LAC), yarı değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası (Z_{eff}), etkin elektron sayısı (N_{eff}) ve etkili iletkenlik (C_{eff}) verileri üçüncü bölümde anlatılan Phy-X/PSD çevrimiçi programı ile sırasıyla incelenmiş ayrıca yaygın olarak kullanılan sıradan beton (ordinary concrete-OC), çelik-hurda beton (steel-scrap concrete-SS), çelik-manyetit beton (steel-magnetite concrete-SM) türleri (Basther, 1997) ile kurşuna göre radyasyon zırhlama kabiliyeti açısından kıyaslanıp bu amaçla yapı malzemesi olarak kullanılıp kullanılamayacağı değerlendirilmiştir.

Radyasyon zırhlama kabiliyeti araştırılacak olan Cu-Al-Mn alaşımları ve farklı elementlerle katkılanmış Cu-Al-Mn alaşımlarının bileşimini oluşturan elementlerin ağırlıkça yüzdelikleri (ağ. %) ve yoğunlukları (g/cm^3) Tablo 3'te verilmiştir.

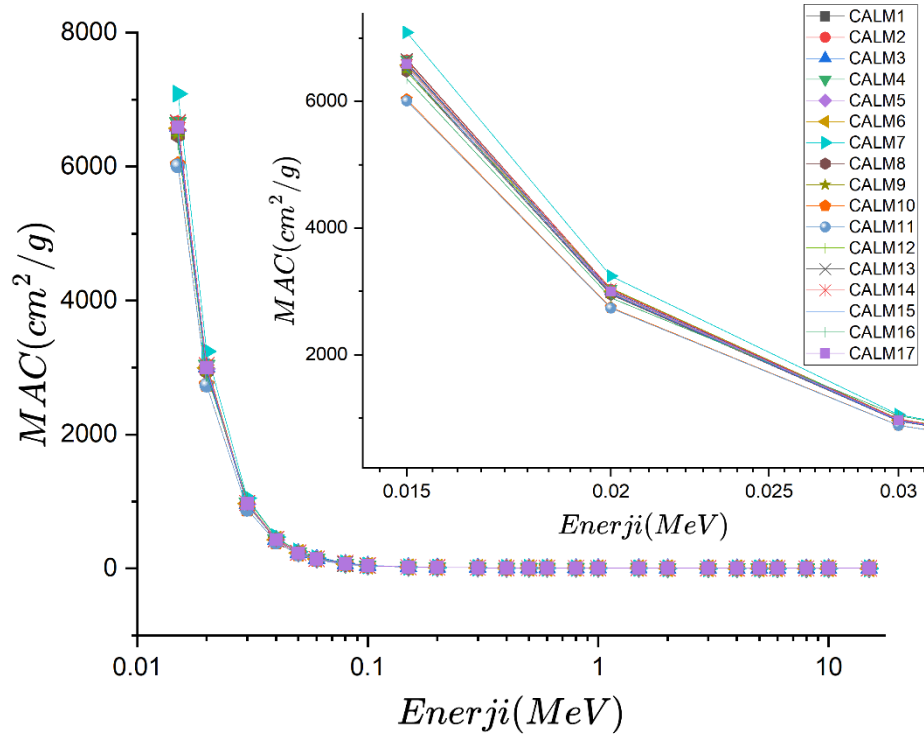
Tablo 3. Cu-Al-Mn alaşımda kullanılan elementlerin ağırlık oranları (ağ. %) ve yoğunlukları (g/cm³)

Alaşım Kodları	Cu	Al	Mn	B	Si	Ti	V	Ni	Zr	Nb	Cd	Sn	Gd	Ta	Yoğunluk (g/cm ³)
CALM1	81	8	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.27
CALM2	82.6	8	9.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.3
CALM3	80.7	8.2	11.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.26
CALM4	86.5	10	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.27
CALM5	82.5	10.5	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.18
CALM6	85.5	11.5	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.19
CALM7	94.66	4.5	0.36	-	-	0.22	0.13	-	-	-	0.18	-	-	-	8.67
CALM8	80.53	10.8	8.3	-	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.12
CALM9	83.5	12.5	3	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	8.12
CALM10	70.9	17.2	9.8	-	-	-	-	2.1	-	-	-	-	-	-	7.72
CALM11	71.1	18	8.4	-	-	-	-	2.5	-	-	-	-	-	-	7.7
CALM12	82.87	11.69	3.88	-	-	-	-	-	-	1.56	-	-	-	-	8.15
CALM13	82.1	7.4	10.4	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	8.32
CALM14	80.624	8.15	10.71	0.086	-	0.43	-	-	-	-	-	-	-	-	8.24
CALM15	81.3	11	5	-	-	0.7	-	-	-	-	-	-	-	2	8.3
CALM16	76	11	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	8.07
CALM17	76	11	10	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	8.05

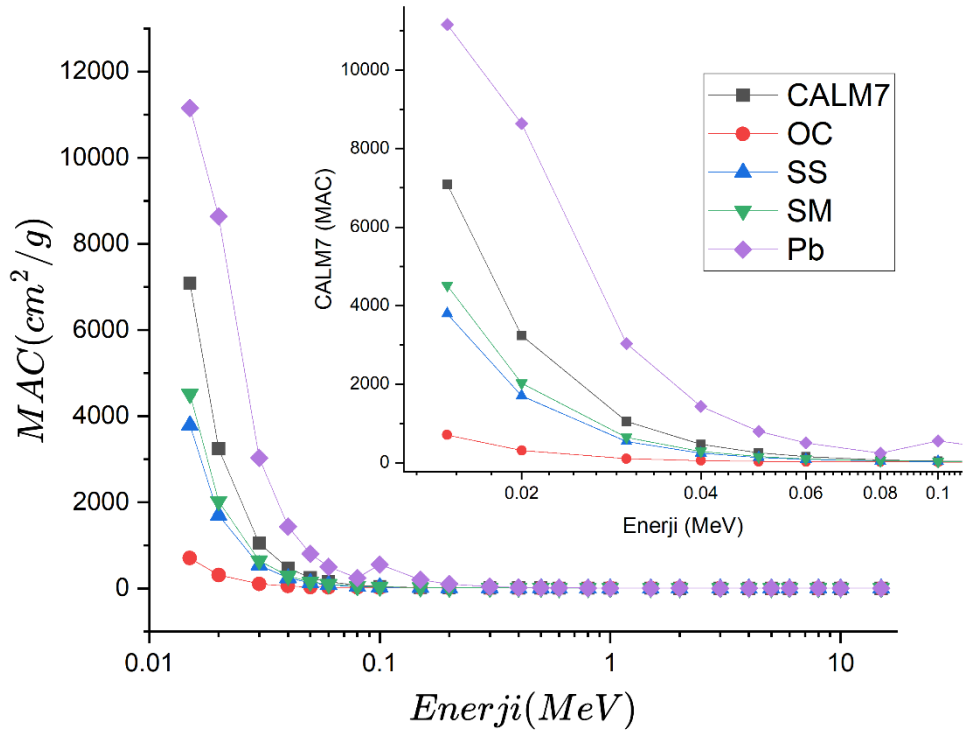
Not: CALM1, CALM2, CALM3 (Akamine et al. 2025); CALM5, CALM6, CALM7 (Praveen et al. 2024); CALM7 (Liu et al. 2025); CALM8 (Li et al. 2024); CALM9 (Xu et al. 2023); CALM10, CALM11 (Wang et al. 2025); CALM12 (Xi et al. 2022); CALM13 (Aves et al. 2023); CALM14 (Andrade et al. 2022); CALM15 (Yang et al. 2021); CALM16, CALM17 (de Souza et al. 2022). Cu-Al-Mn alaışımının kısıldılması için CALM kodu kullanılmıştır.

4.1. Kütle Soğurma Katsayılarının İncelenmesi

Araştırılan Cu-Al-Mn (CALM) alaşımlarına ait MAC değerlerinin 15 keV – 15 MeV enerji aralığındaki değişim eğrileri Şekil 21’de; alaşımlar arasında kütle soğurma katsayısı en fazla olan CALM7 ile kodlanmış alaşımın, belirlenen diğer yapı malzemeleri (beton türleri ve kurşun) ile 15 keV – 15 MeV enerji aralığındaki enerjiye bağlı değişim eğrileri ise Şekil 22’de verilmiştir. Ayrıca Cu-Al-Mn alaşımları ile beton türleri ve kurşun için elde edilen kütle soğurma katsayıları (MAC) Tablo 4’ te sunulmuştur.



Şekil 21. İncelenen alaşımlara ait kütle soğurma katsayı (MAC) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi



Şekil 22. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin kütle soğurma katsayı (MAC) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

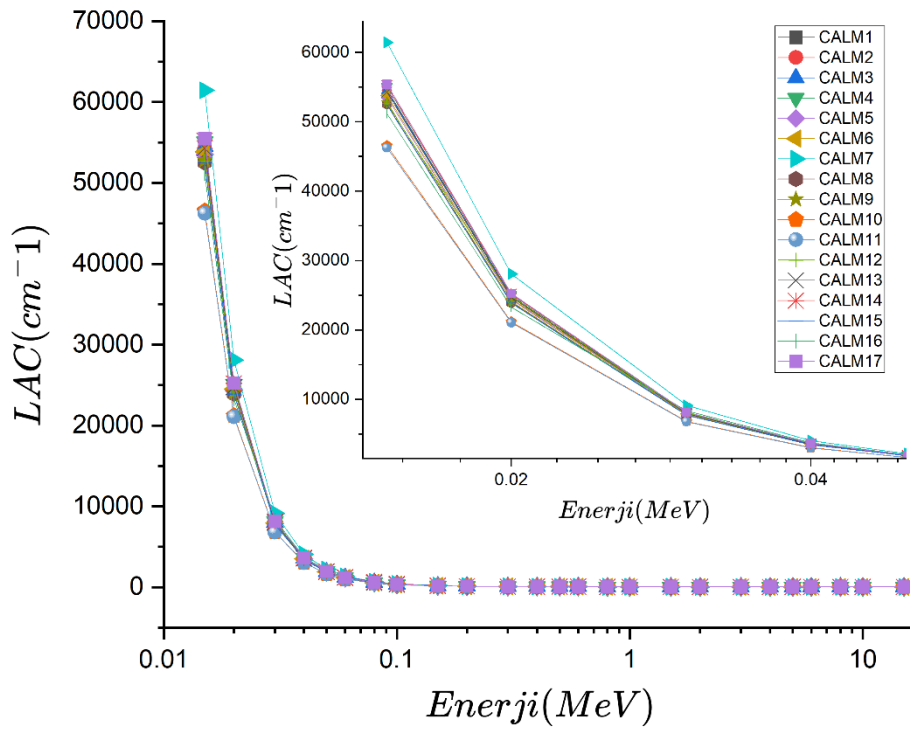
Araştırılan alaşım çeşitlerine ait Şekil 21’de verilen eğriler ile Tablo 4’teki veriler incelendiğinde verilen alaşım türlerinin hepsi fotoelektrik olayın etkin olduğu düşük enerji bölgesinde (<0.1 MeV) yüksek MAC değerine sahipken Compton saçılma bölgesinde (0.5 – 1.02 MeV) foton enerjilerinin artışı MAC değerinde ciddi düşüşe sebep olmuştur. Çünkü bu bölgede soğrulma olayı yerini saçılmaya bırakmıştır. Yüksek enerji bölgesinde yani çift oluşumu (>1,02 MeV) ihtimalinin arttığı yerde tekrardan soğrulmaların başlaması MAC değerlerinde çok fazla olmasa da küçük artışlar sağladığı Tablo 5’te görülmektedir. Araştırılan alaşımlar arasında en iyi kütle soğurma katsayısına sahip alaşımın CALM7 olduğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerine ait Şekil’ 22’de verilen değişim eğrileri incelendiğinde beton türlerine göre zırhlama kabiliyeti açısından daha iyi olduğu, kurşunla ise kıyaslanabilir özellikler barındırdığı ifade edilebilir.

Tablo 4. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Kütle Soğurma Katsayıları (MAC), (cm^2/g)

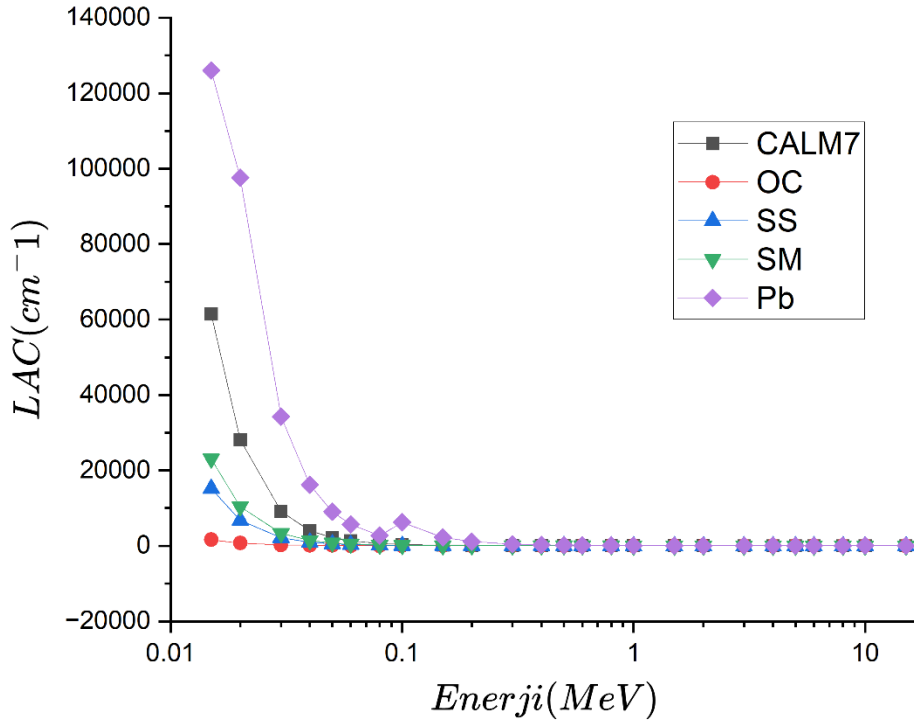
Energy (MeV)	CALM1	CALM2	CALM3	CALM4	CALM5	CALM6	CALM7	CALM8	CALM9	CALM10	CALM11	CALM12	CALM13	CALM14	CALM15	CALM16	CALM17	OC	SS	SM	Pb
1.50E-02	6014.936	6652.985	6599.339	6661.094	6544.814	6573.838	7087.549	6470.494	6504.497	6028.562	6007.679	6466.508	6665.440	6652.538	6498.318	6358.187	6589.174	7053.85	3792.128	4511.839	11157.336
2.00E-02	3013.062	3031.100	3005.863	3036.901	2982.264	2997.002	3241.695	2947.646	2965.047	2743.947	2734.806	3048.848	3056.429	3036.156	2962.706	2896.244	3001.180	3101.517	1703.319	2028.558	8637.386
3.00E-02	971.530	977.564	969.196	980.246	962.154	967.455	1052.491	950.809	957.101	884.841	882.065	986.831	979.129	982.566	957.726	1036.850	967.680	1047.763	544.486	647.324	3031.736
4.00E-02	433.208	435.916	432.180	437.314	429.244	431.720	469.396	424.217	427.166	395.191	394.021	440.918	436.561	439.415	428.195	465.712	431.513	54.147	244.617	289.189	1435.963
5.00E-02	233.440	234.878	232.901	235.692	231.424	232.774	252.611	228.777	230.391	213.576	212.984	227.945	235.199	237.330	231.345	251.862	232.552	35.849	134.488	157.574	804.156
6.00E-02	142.878	145.731	142.562	144.245	141.723	142.539	154.226	140.165	141.143	131.251	130.912	145.027	145.912	145.805	169.946	154.385	142.357	27.524	84.901	98.327	501.968
8.00E-02	69.251	69.623	69.116	69.872	68.778	69.146	74.187	68.107	68.552	64.299	64.162	70.534	69.695	82.360	82.231	74.597	69.028	20.431	44.582	50.226	241.943
1.00E-01	42.205	42.400	42.135	42.543	41.972	42.171	44.787	41.625	41.869	39.670	39.604	42.911	42.434	49.625	49.415	45.117	42.089	17.452	29.660	32.506	554.909
1.50E-01	21.083	21.143	21.062	21.199	21.025	21.092	21.881	20.922	21.007	20.355	20.340	21.325	21.150	23.637	23.504	22.031	21.048	14.276	17.630	18.403	201.454
2.00E-01	15.139	15.166	15.131	15.198	15.122	15.156	15.491	15.080	15.125	14.855	14.852	15.257	15.167	16.330	16.248	15.565	15.125	12.714	13.921	14.192	99.862
3.00E-01	11.069	11.079	11.067	11.097	11.073	11.088	11.185	11.062	11.084	11.012	11.016	11.119	11.077	11.481	11.439	11.208	11.065	10.862	10.975	10.991	40.321
4.00E-01	9.371	9.376	9.371	9.389	9.379	9.389	9.426	9.376	9.391	9.369	9.374	9.401	9.373	9.569	9.543	9.434	9.370	9.677	9.539	9.497	23.228
5.00E-01	8.350	8.353	8.350	8.365	8.359	8.367	8.382	8.359	8.371	8.367	8.371	8.373	8.351	8.465	8.446	8.385	8.350	8.816	8.598	8.539	16.135
6.00E-01	7.627	7.628	7.627	7.639	7.636	7.642	7.647	7.636	7.647	7.651	7.655	7.645	7.626	7.701	7.685	7.648	7.627	8.144	7.900	7.835	12.475
8.00E-01	6.617	6.618	6.617	6.627	6.625	6.631	6.628	6.627	6.636	6.645	6.649	6.631	6.616	6.655	6.644	6.626	6.617	7.145	6.894	6.829	8.870
1.00E+00	5.915	5.916	5.915	5.924	5.923	5.927	5.922	5.925	5.932	5.944	5.947	5.927	5.914	5.938	5.929	5.920	5.915	6.420	6.180	6.117	7.102
1.50E+00	4.815	4.816	4.816	4.822	4.822	4.825	4.820	4.824	4.830	4.839	4.842	4.824	4.814	4.827	4.821	4.817	4.816	5.228	5.033	4.982	5.222
2.00E+00	4.209	4.210	4.210	4.215	4.214	4.217	4.217	4.215	4.220	4.225	4.227	4.217	4.209	4.220	4.214	4.211	4.209	4.507	4.373	4.337	4.607
3.00E+00	3.586	3.587	3.586	3.590	3.587	3.590	3.602	3.587	3.591	3.585	3.586	3.590	3.587	3.597	3.593	3.588	3.585	3.667	3.651	3.642	4.234
4.00E+00	3.290	3.291	3.289	3.293	3.288	3.290	3.314	3.286	3.290	3.274	3.274	3.292	3.291	3.302	3.299	3.292	3.288	3.196	3.276	3.291	4.198
5.00E+00	3.135	3.137	3.134	3.138	3.132	3.134	3.167	3.128	3.131	3.108	3.107	3.136	3.138	3.149	3.146	3.137	3.133	2.895	3.057	3.091	4.272
6.00E+00	3.055	3.057	3.053	3.057	3.049	3.051	3.093	3.045	3.048	3.017	3.016	3.054	3.058	3.070	3.067	3.057	3.053	2.691	2.923	2.972	4.391
8.00E+00	3.001	3.004	3.000	3.003	2.993	2.995	3.051	2.987	2.989	2.947	2.945	2.999	3.006	3.019	3.016	3.004	2.999	2.436	2.783	2.859	4.675
1.00E+01	3.015	3.018	3.013	3.016	3.004	3.006	3.073	2.997	2.999	2.947	2.944	3.010	3.020	3.035	3.032	3.017	3.011	2.291	2.728	2.825	4.972
1.50E+01	3.130	3.135	3.128	3.131	3.116	3.117	3.205	3.105	3.107	3.038	3.035	3.123	3.138	3.155	3.153	3.134	3.126	2.122	2.722	2.855	5.658

4.2. Lineer Soğurma Katsayılarının İncelenmesi

Fotonların bir malzeme içerisinde geçerken, birim uzunluk başına ne kadar soğrulduğunu ifade eden bir parametredir. Lineer soğurma katsayı (LAC) değerleri malzeme yoğunluğuna ait daha az bilgi içeren ve malzeme yoğunluğuna bağlı olmayan bir parametredir. Araştırılan alaşımlara ilişkin LAC değerleri ile enerjiye göre değişim eğrilerini gösteren grafik Şekil 23'te; alaşımlardan lineer soğurma katsayısı en fazla olan CALM7 kodlu alaşımın diğer yapı malzemeleri ile enerjiye bağlı değişiminin kıyası için değişim eğrilerine ait grafik ise Şekil 24' te gösterilmiştir. Ayrıca Cu-Al-Mn alaşımları ile beton türleri ve kurşun için elde edilen LAC değerleri Tablo 5' te sunulmuştur.



Şekil 23. İncelenen alaşımlara ait lineer soğurma katsayı (LAC) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi



Şekil 24. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin lineer soğurma katsayı (LAC) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

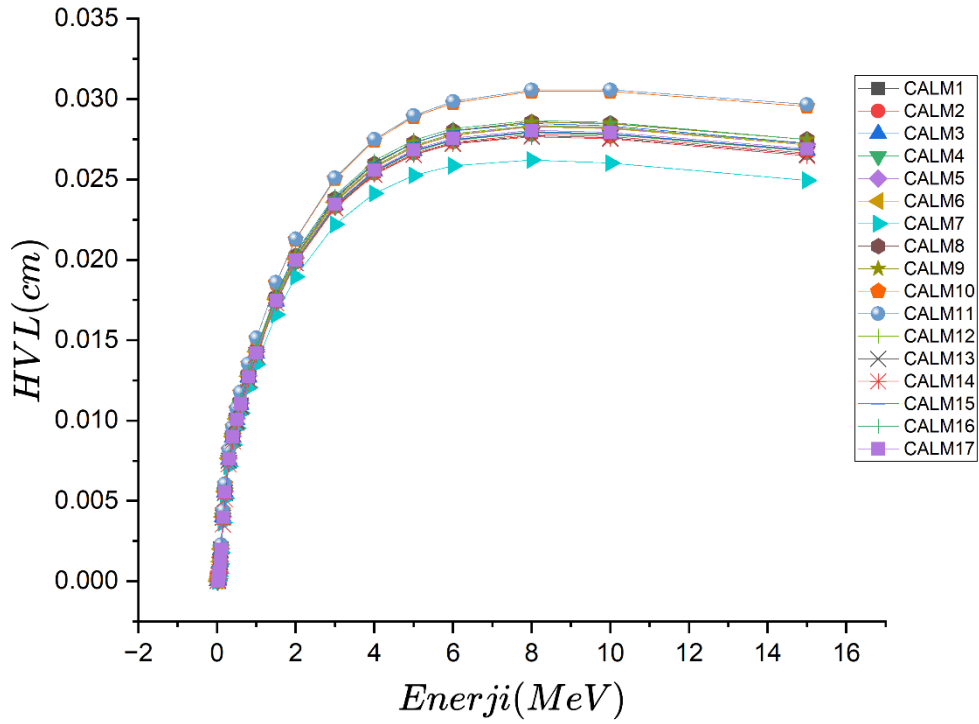
Lineer soğurma katsayıları (LAC) incelendiğinde MAC değerleri için yapılan yorumların benzeri yorumlar yapılabilir. İncelenen alaşımlar için Şekil 23 ve Tablo 5’te sunulan verilere dayanarak foton enerji değerinin artması ile LAC değerleri azalmaya başlamış ve Compton saçılmasının etkin olduğu enerji aralığında neredeyse stabil hale gelmiştir. Ayrıca CALM7 kodlu alaşım yine en iyi değerlere sahipken CALM11 kodu ile verilen alaşım lineer soğurma konusunda daha zayıf kalmıştır. Bu bakımdan beton türlerine göre araştırılan alaşım türlerinin daha üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca kurşun ile bu konuda kıyaslanabilir (Şekil 24).

Tablo 5. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Lineer Soğurma Katsayıları (LAC),

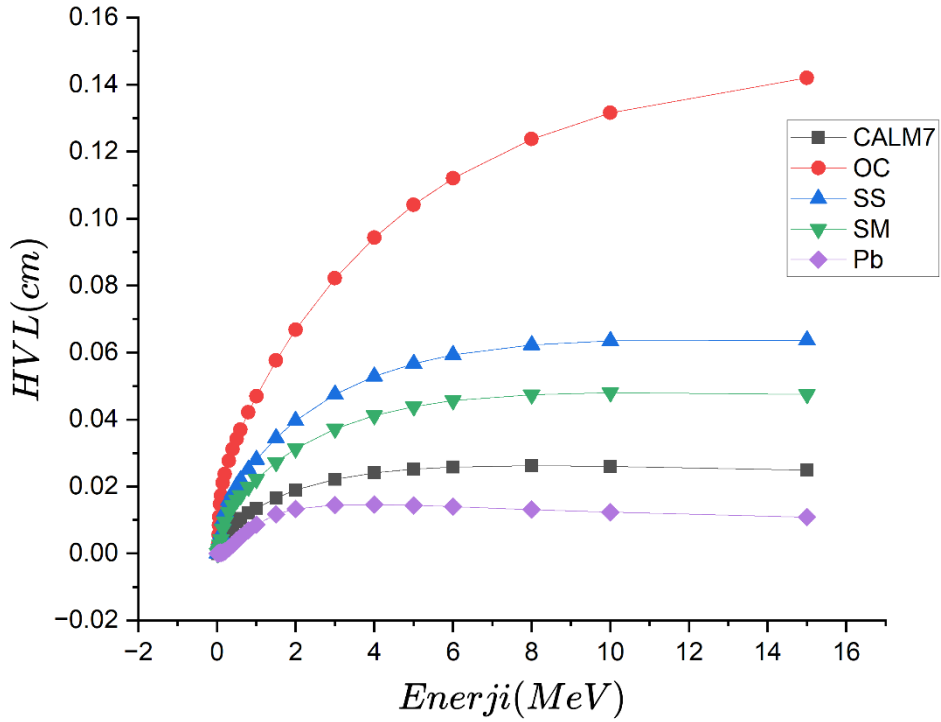
Enerji (MeV)	CALM1	CALM2	CALM3	CALM4	CALM5	CALM6	CALM7	CALM8	CALM9	CALM10	CALM11	CALM12	CALM13	CALM14	CALM15	CALM16	CALM17	OC	SS	SM	Pb
1.50E-02	54705.525	55219.778	54510.539	55087.251	53536.575	53839.730	61449.049	52540.412	52816.515	46540.497	46259.128	52702.043	55456.464	55216.065	52441.427	51183.409	54294.794	1622.385	15108.312	231055.500	126077.902
2.00E-02	24918.023	25158.132	24828.430	25115.171	24394.917	24545.443	28105.093	23934.887	24076.179	21183.272	21058.003	24848.115	25263.086	25200.092	23909.066	23314.764	24729.722	714.190	68132.76	10365.930	97602.464
3.00E-02	8034.555	8113.785	8005.560	8106.656	7870.420	7923.455	9125.094	7720.572	7771.658	6830.971	6791.902	8042.673	8146.353	8135.296	7728.851	8346.645	7973.687	240.956	2177.944	3307.828	34258.617
4.00E-02	3582.631	3618.102	3569.808	3616.588	3511.219	3555.790	4069.661	3444.641	3408.584	3050.878	3033.965	3593.483	3632.184	3647.140	3455.536	3748.981	3555.688	124.539	978.466	1477.755	16226.380
5.00E-02	1930.547	1949.488	1923.762	1949.173	1893.045	1906.422	2190.137	1857.670	1870.777	1648.810	1639.974	1938.436	1956.859	1969.837	1866.953	2027.493	1916.226	82.453	537.953	805.203	9086.960
6.00E-02	1181.603	1192.966	1177.563	1192.908	1159.293	1167.598	1337.139	1138.140	1146.083	1013.256	1008.026	1186.859	1197.348	1207.690	1371.466	1242.796	1173.020	63.305	339.605	502.452	5672.236
8.00E-02	572.707	577.870	570.895	577.838	562.601	566.306	643.197	553.032	556.645	496.588	494.050	574.855	579.660	683.588	663.603	600.507	568.787	46.992	178.329	256.656	2733.961
1.00E-01	349.033	351.918	348.035	351.827	343.331	345.383	388.300	337.998	339.974	306.253	304.954	349.725	353.048	411.889	398.780	363.192	346.816	40.140	118.640	166.107	6270.466
1.50E-01	174.354	175.489	173.974	175.316	171.981	172.745	189.706	169.884	170.580	157.139	156.621	173.796	175.971	196.185	189.677	177.332	173.438	32.834	70.519	94.037	2276.428
2.00E-01	125.201	125.879	124.980	125.688	123.701	124.128	134.305	122.449	122.812	114.679	114.363	124.347	126.190	135.539	131.121	125.301	124.629	29.242	55.684	72.519	1128.443
3.00E-01	91.544	91.932	91.416	91.771	90.577	90.812	96.977	89.822	90.001	85.016	84.821	90.618	92.157	95.294	92.314	90.222	91.179	24.982	43.902	56.167	455.627
4.00E-01	77.499	77.818	77.401	77.650	76.720	76.894	81.721	76.130	76.254	72.231	72.176	76.621	77.985	79.426	77.010	75.946	77.207	22.257	38.155	48.531	262.473
5.00E-01	69.058	69.331	68.974	69.177	68.379	68.525	72.672	67.873	67.973	64.594	64.460	68.239	69.477	70.261	68.155	67.499	68.804	20.276	34.393	43.634	182.323
6.00E-01	63.072	63.316	62.998	63.173	62.460	62.589	66.239	62.007	62.094	59.065	58.946	62.807	63.449	63.918	62.022	61.564	62.844	18.730	31.600	40.037	140.971
8.00E-01	54.721	54.929	54.658	54.803	54.196	54.304	57.461	53.812	53.882	51.302	51.200	54.042	55.043	55.239	53.617	53.342	54.526	16.433	27.578	34.896	100.229
1.00E+00	48.917	49.101	48.861	48.987	48.450	48.546	51.342	48.110	48.172	45.884	45.794	48.304	49.202	49.289	47.850	47.654	48.743	14.767	24.719	31.259	80.251
1.50E+00	39.824	39.973	39.779	39.879	39.443	39.520	41.791	39.167	39.216	37.358	37.284	39.319	40.056	40.065	38.902	38.777	39.683	12.024	20.132	25.459	59.012
2.00E+00	34.812	34.943	34.771	34.858	34.471	34.537	36.561	34.225	34.266	32.615	32.548	34.365	35.017	35.022	34.008	33.895	34.686	10.367	17.491	22.160	52.054
3.00E+00	29.656	29.773	29.618	29.692	29.345	29.401	31.232	29.123	29.157	27.673	27.610	29.262	29.840	29.857	28.995	28.880	29.544	8.435	14.402	18.611	47.845
4.00E+00	27.204	27.317	27.167	27.234	26.899	26.949	28.733	26.683	26.712	25.275	25.211	26.630	27.383	27.410	26.621	26.497	27.097	7.350	13.106	16.816	47.432
5.00E+00	25.926	26.038	25.888	25.952	25.618	25.664	27.457	25.401	25.426	23.990	23.925	25.557	26.105	26.140	25.389	25.255	25.819	6.658	12.230	15.794	48.274
6.00E+00	25.261	25.373	25.222	25.283	24.944	24.989	26.815	24.724	24.747	23.290	23.222	24.890	25.442	25.483	24.751	24.607	25.153	6.188	11.692	15.189	49.618
8.00E+00	24.821	24.937	24.778	24.839	24.485	24.528	26.450	24.254	24.274	22.750	22.676	24.439	25.010	25.060	24.342	24.179	24.708	5.603	11.133	14.609	52.824
1.00E+01	24.931	25.052	24.886	24.945	24.575	24.617	26.042	24.332	24.349	22.751	22.671	24.335	25.129	25.188	24.467	24.288	24.814	5.269	10.913	14.433	56.184
1.50E+01	25.887	26.020	25.836	25.897	25.487	25.529	27.790	25.216	25.231	23.437	23.366	25.455	26.107	26.187	25.441	25.226	25.357	4.880	10.888	14.491	63.932

4.3. Yarı Değer Kalınlığı

Lineer soğurma katsayı değerleri ile ters orantılı olan yarı değer kalınlığı (HVL); ilgili foton enerjisinde gelen demetteki akıyı yarıya düşüren ve malzeme kalınlığını ifade eden parametredir. Alaşımlara ait HVL değerlerinin enerjiye bağlı (15 keV – 15 MeV) değişim eğrileri grafiği Şekil 25'te; diğer yapı malzemeleri ile birlikteki değişimini gösteren eğri grafikleri Şekil 26'da verilmiştir. Ayrıca Tablo 6'da bütün HVL değerleri sunulmuştur.



Şekil 25. İncelenen alaşımlara ait yarı değer kalınlığı katsayılarının (HVL)15keV-15MeV enerji aralığında değişimi



Şekil 26. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin yarı değer kalınlığı katsayı (HVL) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

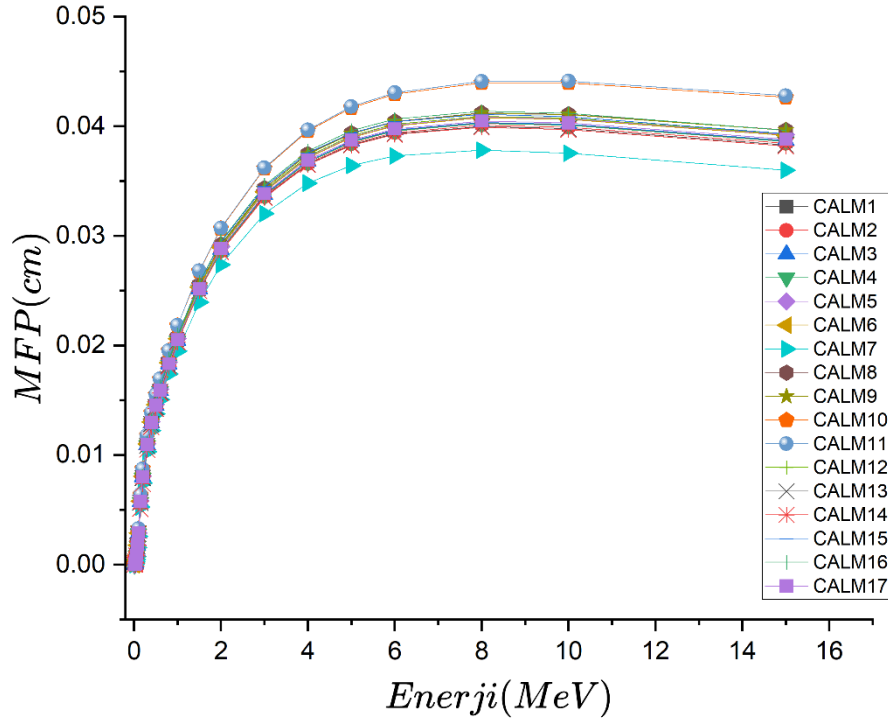
İncelenen alaşımlar arasında foton enerjisinin artışı ile HVL değerlerinin arttığı aralarında diğerlerine göre en az artışı gösterenin ise CALM7 kodlu alaşımın olduğu görülmektedir (Şekil 25). Bu alaşımın foton akısını yarıya düşürmek için daha küçük kalınlıklarda kullanılması yeterli ve etkili olduğunu göstermektedir. Çünkü bu alaşım içeriğinde yer alan Cu elementi ile Zr ve Cd elementlerinin atom numaralarının büyük olması ve bu alaşımın yoğunluğunun diğer alaşımlara göre yüksek oluşu ayrıca Cu elementinin ağırlıkça (ağ. %) fazla kullanılmış olması da bu duruma önemli bir etkindir. Bir diğer husus ise Şekil 26'da beton türleri ve kurşun ile kıyası gösterilen CALM7 kodlu alaşımın beton çeşitlerine göre daha düşük HVL değerlerine sahip olduğu ve bu anlamda daha etkili bir yapı malzemesi olabileceği görülmektedir. Kurşun ile karşılaştırılması ise daha mümkün görülmektedir.

Tablo 6. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Yarı Değer Kalınlığı Katsayıları (HVL)

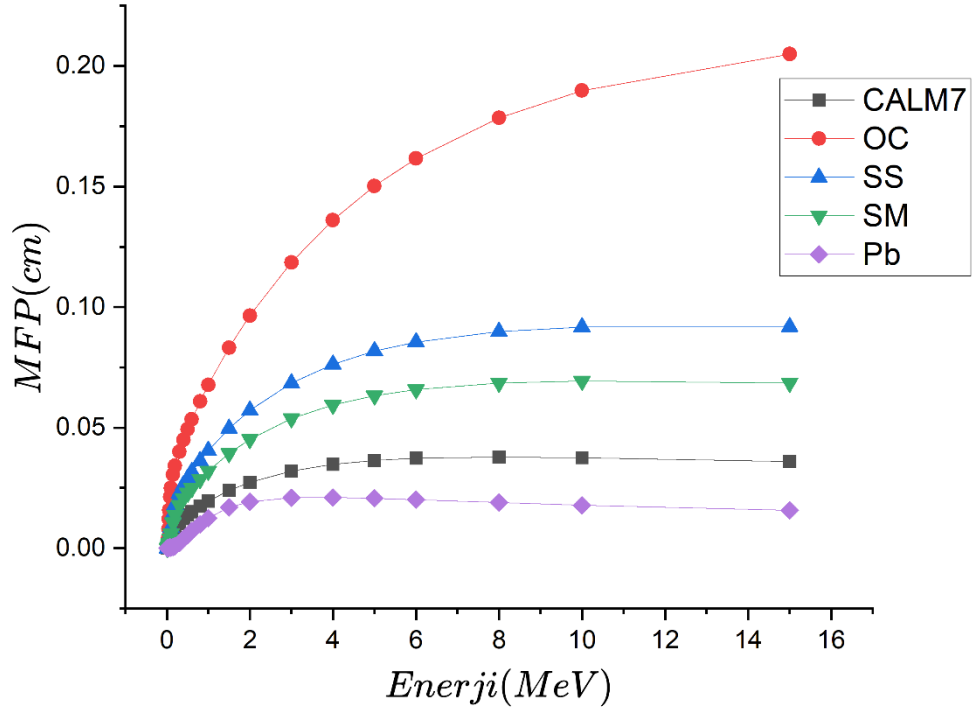
Enerji (MeV)	CALM1	CALM2	CALM3	CALM4	CALM5	CALM6	CALM7	CALM8	CALM9	CALM10	CALM11	CALM12	CALM13	CALM14	CALM15	CALM16	CALM17	OC	SS	SM	Pb
1.50E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.00E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
3.00E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
4.00E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.001	0.000	0.000
5.00E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.001	0.001	0.000
6.00E-02	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.011	0.002	0.001	0.000
8.00E-02	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.015	0.004	0.003	0.000
1.00E-01	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.017	0.006	0.004	0.000
1.50E-01	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.021	0.010	0.007	0.000
2.00E-01	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.024	0.012	0.010	0.001
3.00E-01	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008	0.028	0.016	0.012	0.002
4.00E-01	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.031	0.018	0.014	0.003
5.00E-01	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.034	0.020	0.016	0.004
6.00E-01	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.010	0.011	0.011	0.012	0.012	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.037	0.022	0.017	0.005
8.00E-01	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.042	0.025	0.020	0.007
1.00E+00	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.015	0.015	0.014	0.014	0.014	0.014	0.015	0.014	0.047	0.028	0.022	0.009
1.50E+00	0.017	0.017	0.017	0.017	0.018	0.018	0.017	0.018	0.018	0.019	0.019	0.018	0.017	0.017	0.018	0.018	0.018	0.058	0.034	0.027	0.012
2.00E+00	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.019	0.020	0.020	0.021	0.021	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.067	0.040	0.031	0.013
3.00E+00	0.023	0.023	0.023	0.023	0.024	0.024	0.022	0.024	0.024	0.025	0.025	0.024	0.023	0.023	0.024	0.024	0.024	0.082	0.047	0.037	0.014
4.00E+00	0.025	0.025	0.026	0.025	0.026	0.026	0.024	0.026	0.026	0.027	0.027	0.026	0.025	0.025	0.026	0.026	0.026	0.094	0.053	0.041	0.015
5.00E+00	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.025	0.027	0.027	0.029	0.029	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.104	0.057	0.044	0.014
6.00E+00	0.027	0.027	0.027	0.027	0.028	0.028	0.026	0.028	0.028	0.030	0.030	0.028	0.027	0.027	0.028	0.028	0.028	0.112	0.059	0.046	0.014
8.00E+00	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.026	0.029	0.029	0.030	0.031	0.028	0.028	0.028	0.028	0.029	0.028	0.124	0.062	0.047	0.013
1.00E+01	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028	0.026	0.028	0.028	0.030	0.031	0.028	0.028	0.028	0.028	0.029	0.028	0.132	0.064	0.048	0.012
1.50E+01	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.025	0.027	0.027	0.030	0.030	0.027	0.027	0.026	0.027	0.027	0.027	0.142	0.064	0.048	0.011

4.4. Ortalama Serbest Yol

Ortalama serbest yol (MFP) değerleri HVL ile aynı birime sahip olup LAC değerlerinden elde edilen ve LAC değerlerinin değişimine göre tam tersi değişim gösteren parametredir. MFP değeri ne kadar küçükse o kadar iyi soğurucu özellik gösterir. Bunun anlamı daha kısa mesafelerde soğurma becerisinin yüksek olduğunu ifade eder. Araştırılan alaşımların MFP değerlerinin ilgili enerji aralığındaki değişimlerini gösteren eğrilere ait grafik Şekil 27’de; diğer yapı malzemeleri ile öne çıkan alaşım türü CALM7’nin kıyası Şekil 28’de gösterilmiştir. İncelenen alaşımlara ve beton türleri ile kurşuna ait tüm veriler ise Tablo 7’de sunulmuştur.



Şekil 27. İncelenen alaşımlara ait ortalama serbest yol katsayılarının (MFP) 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi



Şekil 28. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin ortalama serbest yol katsayı (MFP) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

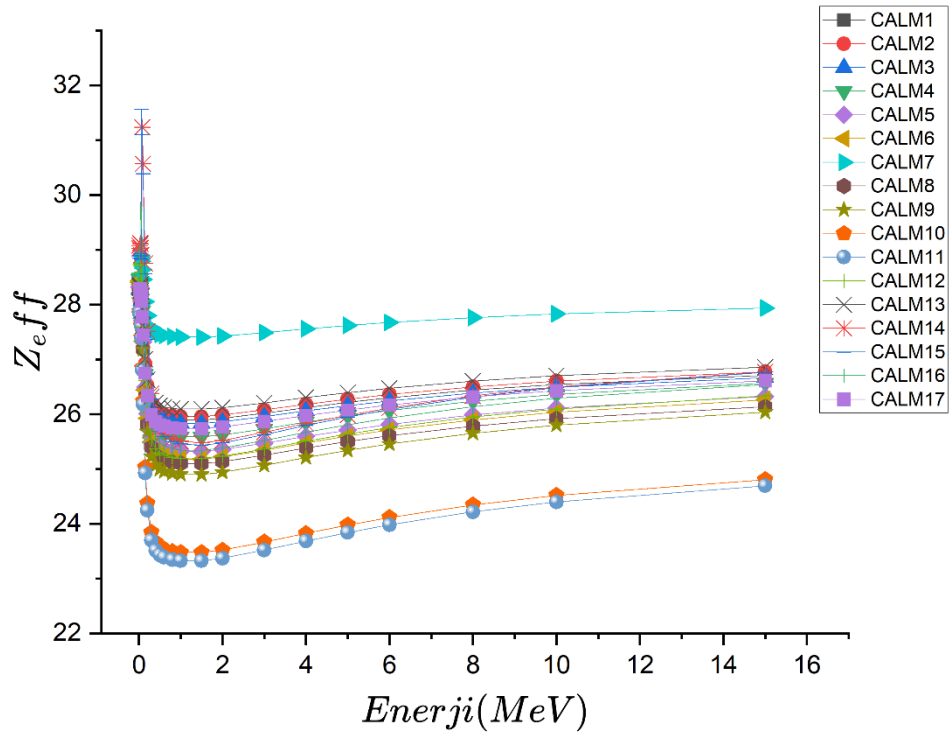
İncelenen alaşımlarla ilgili Şekil 27 ve Tablo 7’de sunulan MFP değerleri enerji değerinin artması ile arttığı bunun sonucu olarak da soğurucu özelliğinin azaldığı görülmekte ve alaşımlar arasında MFP değeri en düşük olan CALM7 ile belirtilen alaşım olup diğer alaşımlara nazaran yüksek enerjili fotonları soğurmada daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 28’de verilen grafikte CALM7 kodlu alaşımın beton türü yapı malzemelerine göre daha iyi soğurucu olduğu kurşun malzemesine göre ise kıyaslanabilir olduğu ve CALM7 alaşımı haricindeki diğer alaşımlarında bu anlamda yaklaşık değerlerde olması ve beton türlerine göre daha iyi radyasyon soğurucu olabilecekleri görülmektedir.

Tablo 7. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Ortalama Serbest Yol Katsayıları (MFP)

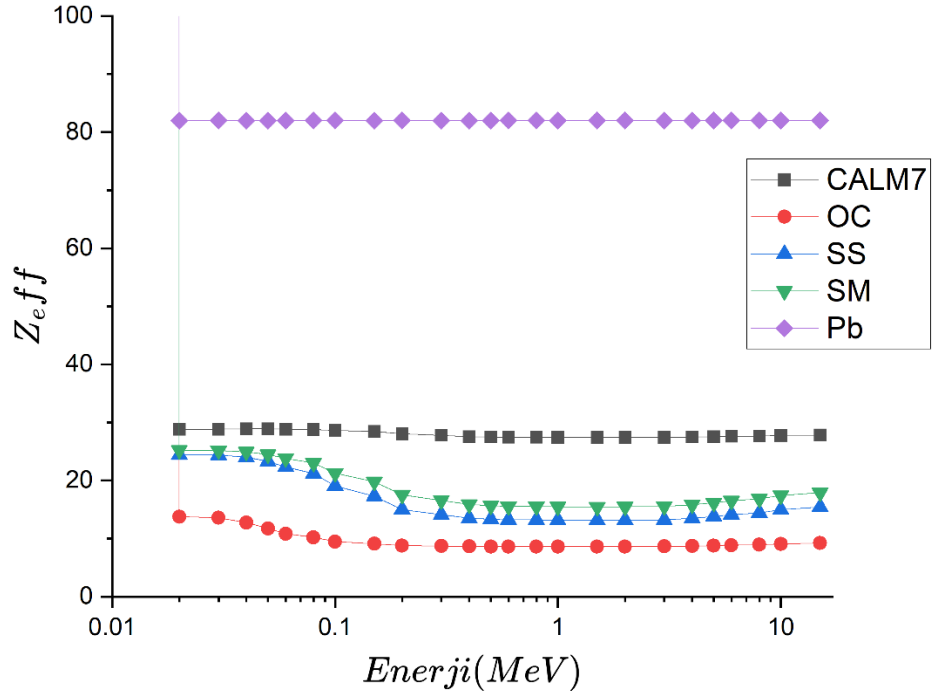
Enerji (MeV)	CALM1	CALM2	CALM3	CALM4	CALM5	CALM6	CALM7	CALM8	CALM9	CALM10	CALM11	CALM12	CALM13	CALM14	CALM15	CALM16	CALM17	OC	SS	SM	Pb
1.50E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
2.00E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
3.00E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
4.00E-02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.001	0.001	0.000
5.00E-02	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.012	0.002	0.001	0.000
6.00E-02	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.016	0.003	0.002	0.000
8.00E-02	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.021	0.006	0.004	0.000
1.00E-01	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.025	0.008	0.006	0.000
1.50E-01	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.006	0.006	0.030	0.014	0.011	0.000
2.00E-01	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008	0.034	0.018	0.014	0.001
3.00E-01	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.010	0.011	0.011	0.012	0.012	0.011	0.011	0.010	0.011	0.011	0.011	0.040	0.023	0.018	0.002
4.00E-01	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.045	0.026	0.021	0.004
5.00E-01	0.014	0.014	0.014	0.014	0.015	0.015	0.014	0.015	0.015	0.015	0.016	0.015	0.014	0.014	0.015	0.015	0.015	0.049	0.029	0.023	0.005
6.00E-01	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.015	0.016	0.016	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.053	0.032	0.025	0.007
8.00E-01	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.017	0.019	0.019	0.019	0.020	0.019	0.018	0.018	0.019	0.019	0.018	0.061	0.036	0.029	0.010
1.00E+00	0.020	0.020	0.020	0.020	0.021	0.021	0.019	0.021	0.021	0.022	0.022	0.021	0.020	0.020	0.021	0.021	0.021	0.068	0.040	0.032	0.012
1.50E+00	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.024	0.024	0.026	0.026	0.027	0.027	0.025	0.025	0.025	0.026	0.026	0.025	0.083	0.050	0.039	0.017
2.00E+00	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.027	0.027	0.029	0.029	0.031	0.031	0.029	0.029	0.029	0.029	0.030	0.029	0.096	0.057	0.045	0.019
3.00E+00	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.032	0.032	0.034	0.034	0.036	0.036	0.034	0.034	0.033	0.034	0.035	0.034	0.119	0.068	0.054	0.021
4.00E+00	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.035	0.035	0.037	0.037	0.040	0.040	0.037	0.037	0.036	0.038	0.038	0.037	0.136	0.076	0.059	0.021
5.00E+00	0.039	0.038	0.039	0.039	0.039	0.036	0.036	0.039	0.039	0.042	0.042	0.039	0.038	0.038	0.039	0.040	0.039	0.150	0.082	0.063	0.021
6.00E+00	0.040	0.039	0.040	0.040	0.040	0.037	0.037	0.040	0.040	0.043	0.043	0.040	0.039	0.039	0.040	0.041	0.040	0.162	0.086	0.066	0.020
8.00E+00	0.040	0.040	0.040	0.040	0.041	0.038	0.038	0.041	0.041	0.044	0.044	0.041	0.040	0.040	0.041	0.041	0.040	0.178	0.090	0.068	0.019
1.00E+01	0.040	0.040	0.040	0.040	0.041	0.041	0.038	0.041	0.041	0.044	0.044	0.041	0.040	0.040	0.041	0.041	0.040	0.190	0.092	0.069	0.018
1.50E+01	0.039	0.038	0.039	0.039	0.039	0.036	0.036	0.040	0.040	0.043	0.043	0.039	0.038	0.038	0.039	0.040	0.039	0.205	0.092	0.069	0.016

4.5. Etkin Atom Numarası, Etkin Elektron Sayısı ve Etkin İletkenlik

Öncelikle incelenen alaşımlara ait etkin atom numarasının (Z_{eff}) enerjiye bağlı değişim eğrileri grafiği Şekil 29’ da; diğer yapı malzemeleri ile kıyasını gösteren eğrilerin enerjiye bağlı değişim grafiği Şekil 30’ da; incelenen alaşımlar ve beton türleri ile kurşuna ait tüm veriler ise Tablo 8’de sunulmuştur. Aynı şekilde etkin elektron sayısı (N_{eff}) için gerekli grafikler Şekil 31 ve Şekil 32’de diğer tüm veriler ise Tablo 9’da; etkin iletkenlik enerjisi (C_{eff}) için ise grafikler Şekil 33 ve Şekil 34’te diğer tüm veriler ise Tablo 10’da sunulmuştur.



Şekil 29. İncelenen alaşımlara ait etkin atom numaralarının (Z_{eff}) 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

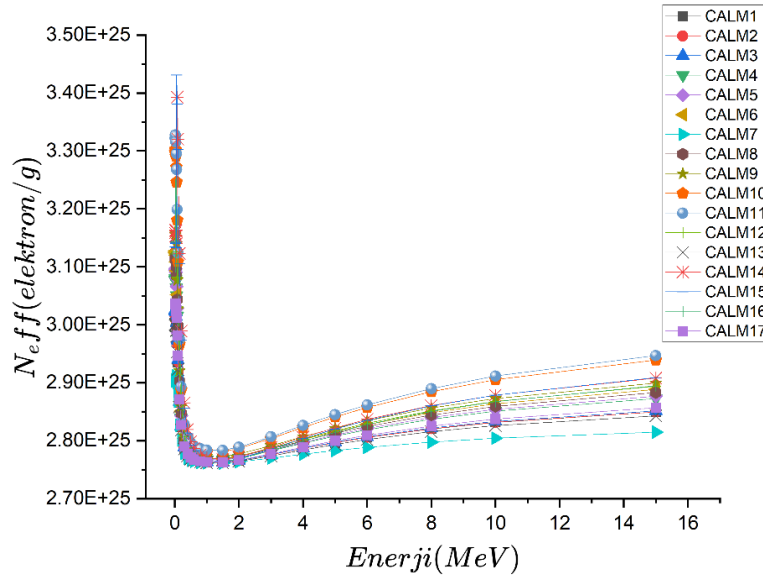


Şekil 30. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin etkin atom numaralarının (Z_{eff}) 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

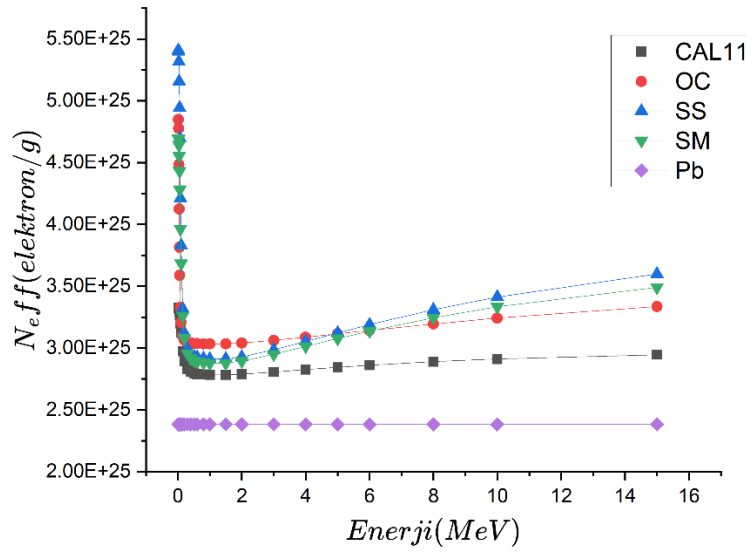
İncelenen alaşımlar için etkin atom numarası (Z_{eff}) değerleri incelendiğinde fotoelektrik olayın baskın olduğu bölgelerde hemen hemen aynı değerlere sahip iken enerjinin artışı ile Compton saçılması bölgesine geldikçe düşüşlerin olduğu ve çift oluşum bölgesine gelindiğinde tekrar artışların olduğu görülmektedir (Şekil 29). Bunun nedeni çift oluşum bölgesinde meydana gelen elektron pozitron çiftleri ile birlikte elektron sayısının artışı soğurma kabiliyetine olumlu katkı sağlamış ve tekrardan Z_{eff} değerinde artışlara sebep olmuştur. Ayrıca Şekil 30’da görüldüğü üzere CALM7 kodlu alaşımın beton türlerine göre daha iyi soğurucu özellik gösterdiği açıkça görülmektedir. Kurşuna göre CALM7 kodlu alaşımın Z_{eff} değeri kıyaslanabilir ve geliştirilebilir. İlgili enerji değerlerine göre Z_{eff} parametresine ait veriler Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Etkin Atom Numaraları (Z_{eff})

Enerji (MeV)	CALM1	CALM2	CALM3	CALM4	CALM5	CALM6	CALM7	CALM8	CALM9	CALM10	CALM11	CALM12	CALM13	CALM14	CALM15	CALM16	CALM17	OC	SS	SM	Pb
1.50E-02	28.29	28.34	28.27	28.46	28.31	28.41	28.81	28.23	28.35	27.83	27.84	28.41	28.33	29.02	28.84	28.42	28.27	13.79	24.44	25.22	82.00
2.00E-02	28.31	28.37	28.30	28.48	28.34	28.44	28.84	28.26	28.38	27.88	27.88	28.73	28.35	29.08	28.89	28.45	28.29	13.58	24.40	25.18	82.00
3.00E-02	28.31	28.37	28.30	28.48	28.34	28.43	28.90	28.26	28.37	27.87	27.88	28.75	28.35	29.13	28.93	29.72	28.29	12.75	24.03	24.94	82.00
4.00E-02	28.27	28.33	28.26	28.43	28.28	28.37	28.88	28.20	28.31	27.78	27.78	28.70	28.32	29.11	28.90	29.75	28.25	11.73	23.31	24.47	82.00
5.00E-02	28.20	28.25	28.18	28.34	28.19	28.27	28.85	28.10	28.20	27.62	27.62	28.60	28.25	29.03	28.83	29.68	28.17	10.85	22.34	23.80	82.00
6.00E-02	28.10	28.15	28.08	28.22	28.05	28.12	28.79	27.96	28.04	27.40	27.39	28.45	28.16	28.91	31.57	29.54	28.06	10.21	21.22	23.00	82.00
8.00E-02	27.83	27.88	27.80	27.89	27.71	27.75	28.64	27.59	27.64	26.85	26.81	28.05	27.91	31.24	31.10	29.09	27.77	9.47	19.03	21.29	82.00
1.00E-01	27.52	27.58	27.49	27.52	27.32	27.33	28.46	27.18	27.18	26.24	26.18	27.59	27.62	30.57	30.39	28.54	27.45	9.12	17.31	19.79	82.00
1.50E-01	26.86	26.92	26.81	26.73	26.50	26.44	28.05	26.32	26.23	25.04	24.93	26.61	27.00	28.75	28.57	27.28	26.75	8.81	14.99	17.51	82.00
2.00E-01	26.47	26.53	26.41	26.26	26.01	25.92	27.80	25.81	25.68	24.37	24.25	26.03	26.63	27.52	27.37	26.50	26.34	8.72	14.11	16.55	82.00
3.00E-01	26.14	26.20	26.08	25.87	25.61	25.49	27.57	25.40	25.23	23.84	23.70	25.55	26.32	26.38	26.28	25.83	25.99	8.66	13.52	15.88	82.00
4.00E-01	26.02	26.08	25.96	25.73	25.47	25.34	27.49	25.25	25.06	23.66	23.51	25.37	26.21	25.96	25.87	25.59	25.86	8.64	13.33	15.67	82.00
5.00E-01	25.97	26.03	25.90	25.67	25.40	25.27	27.46	25.19	24.99	23.58	23.43	25.30	26.16	25.76	25.69	25.49	25.81	8.64	13.25	15.57	82.00
6.00E-01	25.94	26.00	25.88	25.64	25.37	25.23	27.44	25.15	24.96	23.54	23.39	25.26	26.13	25.66	25.59	25.43	25.78	8.63	13.21	15.53	82.00
8.00E-01	25.91	25.97	25.85	25.61	25.34	25.20	27.42	25.12	24.92	23.50	23.35	25.22	26.11	25.56	25.50	25.37	25.75	8.63	13.17	15.48	82.00
1.00E+00	25.90	25.96	25.84	25.59	25.32	25.18	27.41	25.10	24.90	23.48	23.33	25.20	26.09	25.51	25.46	25.35	25.74	8.63	13.16	15.46	82.00
1.50E+00	25.90	25.96	25.84	25.59	25.32	25.18	27.41	25.10	24.90	23.48	23.33	25.20	26.09	25.48	25.43	25.34	25.74	8.63	13.16	15.46	82.00
2.00E+00	25.93	25.99	25.86	25.62	25.36	25.22	27.43	25.14	24.94	23.52	23.37	25.24	26.12	25.52	25.48	25.38	25.77	8.65	13.24	15.55	82.00
3.00E+00	26.02	26.08	25.96	25.73	25.47	25.34	27.49	25.25	25.07	23.67	23.52	25.37	26.21	25.67	25.63	25.52	25.87	8.71	13.50	15.85	82.00
4.00E+00	26.12	26.18	26.06	25.86	25.60	25.48	27.56	25.38	25.21	23.83	23.69	25.51	26.31	25.83	25.80	25.67	25.98	8.78	13.80	16.19	82.00
5.00E+00	26.22	26.28	26.16	25.97	25.71	25.60	27.62	25.50	25.34	23.98	23.84	25.64	26.39	25.98	25.95	25.81	26.08	8.86	14.11	16.53	82.00
6.00E+00	26.30	26.36	26.25	26.07	25.82	25.71	27.68	25.61	25.46	24.12	23.98	25.76	26.47	26.12	26.09	25.93	26.17	8.94	14.41	16.85	82.00
8.00E+00	26.44	26.50	26.39	26.24	25.99	25.90	27.77	25.79	25.65	24.35	24.22	25.95	26.61	26.34	26.31	26.14	26.32	9.09	14.96	17.43	82.00
1.00E+01	26.55	26.61	26.49	26.37	26.12	26.04	27.83	25.92	25.80	24.52	24.40	26.10	26.70	26.50	26.49	26.29	26.43	9.22	15.42	17.91	82.00
1.50E+01	26.71	26.78	26.67	26.57	26.32	26.26	27.94	26.14	26.04	24.81	24.70	26.34	26.86	26.77	26.77	26.54	26.61	9.49	16.27	18.76	82.00



Şekil 31. İncelenen alaşımlara ait etkin elektron sayısı (N_{eff}) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

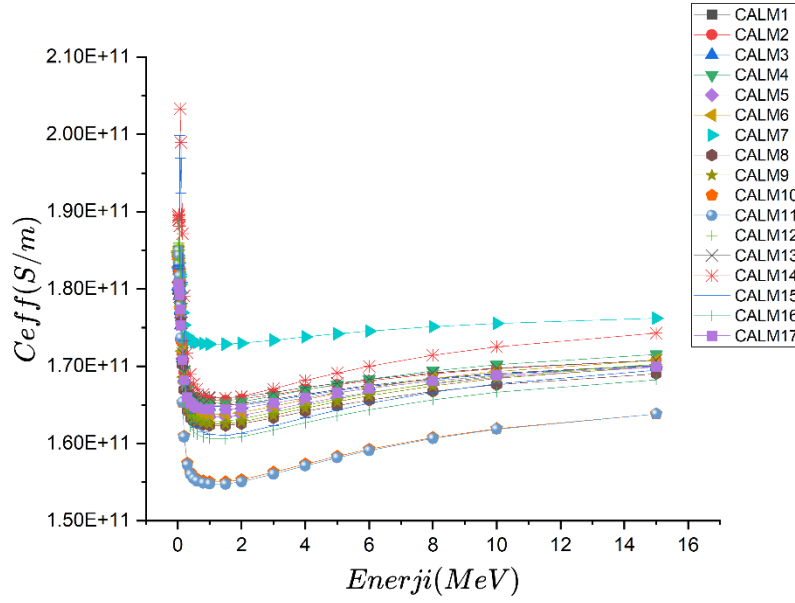


Şekil 32. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin etkin elektron sayısı (N_{eff}) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

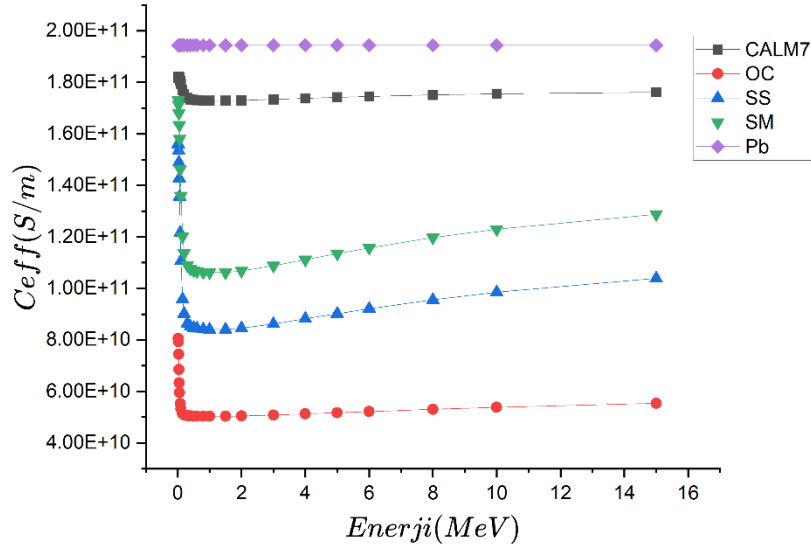
Alaşımların etkin elektron sayıları (N_{eff}) incelendiğinde Z_{eff} değerlerine göre tam tersi bir durum görülmektedir. Z_{eff} değerlerinde en iyi soğurucu özellik gösteren alaşım türü CALM7 kodlu alaşım iken N_{eff} değerlerine ait grafik ve veriler incelendiğinde (Şekil 31), (Tablo 9) en iyi değer CALM11 kodlu alaşıma ait olduğu görülmüştür. Bunun nedeni alaşımı oluşturan atomların atomik kütlelerine, mol oranlarına ve atomların elektron dağılımına bağlı olarak yorumlanabilir. Etkin elektron sayısı parametresi özellikle orta ve yüksek enerji bölgelerinde daha anlamlıdır çünkü serbest elektron sayısı ne kadar çoksa o oranda Compton saçılması meydana gelir. Bir diğer durumda çift oluşumu sonucu ortaya çıkan parçacıkların elektron yoğunluğunu arttırmasıdır. Atomik boyuttaki bu olaylar N_{eff} parametresini daha anlamlı hale getirir. Şekil 31’de görüldüğü üzere N_{eff} değerleri enerjinin artmasıyla birlikte tekrardan artış göstermiştir. Bu durum bize gösteriyor ki düşük enerji bölgesinde yani fotoelektrik olayın baskın olduğu bölgede CALM7 alaşımı; orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise CALM11 alaşımı daha etkin soğurucu olabilir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta alaşımın N_{eff} değerinin tek başına büyük olması o malzemenin çok iyi soğurucu özellik gösterdiği anlamına gelmez. Çünkü CALM11 alaşımının Z_{eff} değeri incelendiğinde düşük enerji bölgesinde CALM7’ye göre foton soğurma konusunda daha zayıf kaldığı anlaşılmaktadır (Şekil 29). Genel olarak iyi bir radyasyon soğurucu yapı malzemesi için yoğunluk, N_{eff} ve Z_{eff} değerlerinin birlikte anlamlı bir bütün oluşturması gerekir. CALM11 malzemesi N_{eff} değerleri için diğer beton türleri ve kurşunla kıyaslandığında kurşuna göre daha iyi olduğu fakat beton türlerine göre zayıf kaldığı görülmüştür (Şekil 32).

Tablo 9. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Etkin Elektron Sayıları (N_{eff})

Enerji (MeV)	CALM1	CALM2	CALM3	CALM4	CALM5	CALM6	CALM7	CALM8	CALM9	CALM10	CALM11	CALM12	CALM13	CALM14	CALM15	CALM16	CALM17	OC	SS	SM	Pb
1.50E-02	3.02E+25	3.02E+25	3.02E+25	3.08E+25	3.09E+25	3.12E+25	2.90E+25	3.11E+25	3.16E+25	3.30E+25	3.32E+25	3.12E+25	3.00E+25	3.15E+25	3.14E+25	3.10E+25	3.08E+25	4.85E+25	5.41E+25	4.69E+25	2.38E+25
2.00E-02	3.02E+25	3.02E+25	3.03E+25	3.08E+25	3.10E+25	3.13E+25	2.91E+25	3.12E+25	3.16E+25	3.30E+25	3.33E+25	3.16E+25	3.00E+25	3.16E+25	3.14E+25	3.10E+25	3.04E+25	4.78E+25	5.40E+25	4.69E+25	2.38E+25
3.00E-02	3.02E+25	3.02E+25	3.03E+25	3.08E+25	3.10E+25	3.13E+25	2.91E+25	3.12E+25	3.16E+25	3.30E+25	3.33E+25	3.16E+25	3.00E+25	3.16E+25	3.14E+25	3.10E+25	3.04E+25	4.48E+25	5.52E+25	4.64E+25	2.38E+25
4.00E-02	3.02E+25	3.02E+25	3.02E+25	3.07E+25	3.09E+25	3.12E+25	2.91E+25	3.11E+25	3.15E+25	3.29E+25	3.32E+25	3.15E+25	3.00E+25	3.16E+25	3.14E+25	3.10E+25	3.03E+25	4.12E+25	5.16E+25	4.55E+25	2.38E+25
5.00E-02	3.01E+25	3.01E+25	3.01E+25	3.06E+25	3.08E+25	3.11E+25	2.91E+25	3.10E+25	3.14E+25	3.27E+25	3.30E+25	3.14E+25	2.99E+25	3.15E+25	3.13E+25	3.10E+25	3.02E+25	3.81E+25	4.94E+25	4.43E+25	2.38E+25
6.00E-02	3.00E+25	3.00E+25	3.00E+25	3.05E+25	3.07E+25	3.09E+25	2.90E+25	3.08E+25	3.12E+25	3.25E+25	3.27E+25	3.13E+25	2.98E+25	3.14E+25	3.43E+25	3.22E+25	3.01E+25	3.59E+25	4.70E+25	4.28E+25	2.38E+25
8.00E-02	2.97E+25	2.97E+25	2.97E+25	3.02E+25	3.03E+25	3.05E+25	2.89E+25	3.04E+25	3.08E+25	3.18E+25	3.20E+25	3.08E+25	2.95E+25	3.39E+25	3.38E+25	3.17E+25	2.98E+25	3.33E+25	4.21E+25	3.96E+25	2.38E+25
1.00E-01	2.94E+25	2.94E+25	2.94E+25	2.98E+25	2.99E+25	3.01E+25	2.87E+25	3.00E+25	3.03E+25	3.11E+25	3.12E+25	3.03E+25	2.92E+25	3.32E+25	3.30E+25	3.11E+25	2.95E+25	3.21E+25	3.83E+25	3.68E+25	2.38E+25
1.50E-01	2.87E+25	2.87E+25	2.87E+25	2.89E+25	2.90E+25	2.91E+25	2.83E+25	2.90E+25	2.92E+25	2.97E+25	2.97E+25	2.92E+25	2.86E+25	3.12E+25	3.10E+25	2.97E+25	2.87E+25	3.10E+25	3.32E+25	3.26E+25	2.38E+25
2.00E-01	2.82E+25	2.82E+25	2.82E+25	2.84E+25	2.84E+25	2.85E+25	2.80E+25	2.85E+25	2.86E+25	2.89E+25	2.89E+25	2.86E+25	2.82E+25	2.99E+25	2.97E+25	2.89E+25	2.83E+25	3.07E+25	3.12E+25	3.08E+25	2.38E+25
3.00E-01	2.79E+25	2.79E+25	2.79E+25	2.80E+25	2.80E+25	2.80E+25	2.78E+25	2.80E+25	2.81E+25	2.82E+25	2.83E+25	2.81E+25	2.79E+25	2.87E+25	2.86E+25	2.82E+25	2.79E+25	3.05E+25	2.99E+25	2.96E+25	2.38E+25
4.00E-01	2.78E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.79E+25	2.77E+25	2.79E+25	2.79E+25	2.80E+25	2.81E+25	2.79E+25	2.77E+25	2.82E+25	2.81E+25	2.79E+25	2.78E+25	3.04E+25	2.95E+25	2.92E+25	2.38E+25
5.00E-01	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.77E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.79E+25	2.80E+25	2.78E+25	2.77E+25	2.80E+25	2.79E+25	2.78E+25	2.77E+25	3.04E+25	2.93E+25	2.90E+25	2.38E+25
6.00E-01	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.78E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.78E+25	2.79E+25	2.79E+25	2.78E+25	2.77E+25	2.79E+25	2.78E+25	2.77E+25	2.76E+25	3.04E+25	2.92E+25	2.89E+25	2.38E+25
8.00E-01	2.76E+25	2.76E+25	2.76E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.78E+25	2.79E+25	2.78E+25	2.76E+25	2.78E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.75E+25	3.03E+25	2.92E+25	2.88E+25	2.38E+25
1.00E+00	2.76E+25	2.76E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.75E+25	3.03E+25	2.91E+25	2.88E+25	2.38E+25
1.50E+00	2.76E+25	2.76E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.75E+25	3.03E+25	2.91E+25	2.88E+25	2.38E+25
2.00E+00	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.78E+25	2.79E+25	2.79E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.77E+25	2.77E+25	2.76E+25	2.75E+25	3.04E+25	2.93E+25	2.90E+25	2.38E+25
3.00E+00	2.78E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.78E+25	2.79E+25	2.77E+25	2.79E+25	2.79E+25	2.80E+25	2.81E+25	2.79E+25	2.77E+25	2.79E+25	2.79E+25	2.78E+25	2.77E+25	3.06E+25	2.99E+25	2.95E+25	2.38E+25
4.00E+00	2.79E+25	2.79E+25	2.79E+25	2.80E+25	2.80E+25	2.80E+25	2.78E+25	2.80E+25	2.81E+25	2.82E+25	2.83E+25	2.80E+25	2.78E+25	2.81E+25	2.80E+25	2.80E+25	2.79E+25	3.09E+25	3.05E+25	3.01E+25	2.38E+25
5.00E+00	2.80E+25	2.80E+25	2.80E+25	2.81E+25	2.81E+25	2.82E+25	2.78E+25	2.81E+25	2.83E+25	2.84E+25	2.85E+25	2.82E+25	2.79E+25	2.82E+25	2.82E+25	2.81E+25	2.80E+25	3.12E+25	3.12E+25	3.08E+25	2.38E+25
6.00E+00	2.81E+25	2.81E+25	2.81E+25	2.82E+25	2.82E+25	2.83E+25	2.79E+25	2.82E+25	2.83E+25	2.86E+25	2.86E+25	2.83E+25	2.80E+25	2.84E+25	2.84E+25	2.83E+25	2.81E+25	3.14E+25	3.19E+25	3.14E+25	2.38E+25
8.00E+00	2.82E+25	2.82E+25	2.82E+25	2.84E+25	2.84E+25	2.85E+25	2.80E+25	2.84E+25	2.86E+25	2.88E+25	2.89E+25	2.85E+25	2.82E+25	2.86E+25	2.86E+25	2.85E+25	2.83E+25	3.20E+25	3.31E+25	3.24E+25	2.38E+25
1.00E+01	2.83E+25	2.83E+25	2.83E+25	2.85E+25	2.85E+25	2.86E+25	2.80E+25	2.86E+25	2.87E+25	2.91E+25	2.91E+25	2.87E+25	2.83E+25	2.88E+25	2.88E+25	2.87E+25	2.84E+25	3.24E+25	3.41E+25	3.33E+25	2.38E+25
1.50E+01	2.85E+25	2.85E+25	2.85E+25	2.87E+25	2.88E+25	2.89E+25	2.82E+25	2.88E+25	2.90E+25	2.94E+25	2.95E+25	2.89E+25	2.84E+25	2.91E+25	2.91E+25	2.89E+25	2.86E+25	3.34E+25	3.60E+25	3.49E+25	2.38E+25



Şekil 33. İncelenen alaşımlara ait etkin iletkenlik (C_{eff}) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi



Şekil 34. CALM7 alaşımı ile diğer yapı malzemelerinin etkin iletkenlik (C_{eff}) değerlerinin 15keV-15MeV enerji aralığında değişimi

İncelenen alaşımlar için Şekil 33’te verilen grafik yardımı ile etkin iletkenlik (C_{eff}) değişimleri incelendiğinde yoğunluğu en fazla olan CALM7 kodlu alaşımın daha baskın olduğu görülmektedir. Tablo 10’da verilen C_{eff} değerleri incelendiğinde de bu durum görülmektedir. C_{eff} değerinin artması, CALM7 alaşımının yoğunluğunun diğerlerine göre fazla olması ve yüksek enerji bölgelerinde çift oluşumu etkisi ile yakından ilgilidir. Bir önceki kısımda bahsedilen N_{eff} değerlerinin C_{eff} ve Z_{eff} değerlerine göre tam tersi bir sonuç vermesi araştırılan alaşımların değerlendirilmesinde yanıltıcı olabilir. Çünkü N_{eff} ve C_{eff} malzemeye ilişkin bilgi verir. Bu nedenle incelenen alaşımlar için N_{eff} , C_{eff} ve Z_{eff} parametreleri birlikte değerlendirilmeli ve buna göre genel bir yorum yapılmalıdır. Özetle CALM7 alaşımı yoğunluğu en fazla olan alaşım olup etkin atom numarası ve etkin iletkenliği yüksek olan etkin elektron sayısı ise düşük olan bir alaşımdır. Ayrıca CALM7 alaşımı diğer yapı malzemeleri olan beton türleri ve kurşunla kıyaslandığında C_{eff} parametresi bakımından beton çeşitlerine göre daha yüksek kurşuna göre düşük ama kıyaslanabilir düzeyde olduğu Şekil 34’te verilen grafikte görülmektedir.

Tablo 10. Cu-Al-Mn Alaşımları ile Beton Türleri ve Kurşun İçin Etkin İletkenlik Değerleri (C_{eff})

Enerji (MeV)	CALM1	CALM2	CALM3	CALM4	CALM5	CALM6	CALM7	CALM8	CALM9	CALM10	CALM11	CALM12	CALM13	CALM14	CALM15	CALM16	CALM17	OC	SS	SM	Pb
1.50E-02	1.80E+11	1.81E+11	1.80E+11	1.84E+11	1.83E+11	1.85E+11	1.82E+11	1.83E+11	1.85E+11	1.84E+11	1.85E+11	1.84E+11	1.80E+11	1.89E+11	1.83E+11	1.80E+11	1.81E+11	8.05E+10	1.50E+11	1.73E+11	1.94E+11
2.00E-02	1.80E+11	1.81E+11	1.80E+11	1.84E+11	1.83E+11	1.85E+11	1.82E+11	1.83E+11	1.85E+11	1.84E+11	1.85E+11	1.84E+11	1.80E+11	1.89E+11	1.83E+11	1.80E+11	1.81E+11	7.93E+10	1.50E+11	1.73E+11	1.94E+11
3.00E-02	1.80E+11	1.81E+11	1.80E+11	1.84E+11	1.83E+11	1.85E+11	1.82E+11	1.83E+11	1.85E+11	1.84E+11	1.85E+11	1.84E+11	1.80E+11	1.90E+11	1.83E+11	1.88E+11	1.81E+11	7.45E+10	1.54E+11	1.71E+11	1.94E+11
4.00E-02	1.80E+11	1.81E+11	1.80E+11	1.84E+11	1.83E+11	1.85E+11	1.82E+11	1.82E+11	1.85E+11	1.83E+11	1.84E+11	1.86E+11	1.80E+11	1.89E+11	1.83E+11	1.89E+11	1.80E+11	6.85E+10	1.49E+11	1.68E+11	1.94E+11
5.00E-02	1.80E+11	1.80E+11	1.80E+11	1.83E+11	1.82E+11	1.84E+11	1.82E+11	1.82E+11	1.84E+11	1.82E+11	1.83E+11	1.85E+11	1.80E+11	1.89E+11	1.83E+11	1.88E+11	1.80E+11	6.33E+10	1.43E+11	1.63E+11	1.94E+11
6.00E-02	1.79E+11	1.80E+11	1.79E+11	1.82E+11	1.81E+11	1.83E+11	1.82E+11	1.81E+11	1.83E+11	1.81E+11	1.82E+11	1.84E+11	1.79E+11	1.88E+11	2.00E+11	1.87E+11	1.79E+11	5.96E+10	1.30E+11	1.58E+11	1.94E+11
8.00E-02	1.77E+11	1.78E+11	1.77E+11	1.80E+11	1.79E+11	1.80E+11	1.81E+11	1.78E+11	1.80E+11	1.77E+11	1.78E+11	1.81E+11	1.77E+11	2.03E+11	1.97E+11	1.84E+11	1.77E+11	5.53E+10	1.22E+11	1.46E+11	1.94E+11
1.00E-01	1.75E+11	1.76E+11	1.75E+11	1.78E+11	1.76E+11	1.78E+11	1.79E+11	1.76E+11	1.77E+11	1.73E+11	1.74E+11	1.78E+11	1.76E+11	1.99E+11	1.92E+11	1.81E+11	1.75E+11	5.33E+10	1.11E+11	1.36E+11	1.94E+11
1.50E-01	1.71E+11	1.72E+11	1.71E+11	1.73E+11	1.71E+11	1.72E+11	1.73E+11	1.70E+11	1.71E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.72E+11	1.72E+11	1.87E+11	1.81E+11	1.73E+11	1.71E+11	5.14E+10	9.58E+10	1.20E+11	1.94E+11
2.00E-01	1.69E+11	1.69E+11	1.68E+11	1.70E+11	1.68E+11	1.69E+11	1.75E+11	1.67E+11	1.68E+11	1.61E+11	1.61E+11	1.68E+11	1.69E+11	1.79E+11	1.73E+11	1.68E+11	1.68E+11	5.09E+10	9.02E+10	1.14E+11	1.94E+11
3.00E-01	1.66E+11	1.67E+11	1.66E+11	1.67E+11	1.65E+11	1.66E+11	1.74E+11	1.64E+11	1.65E+11	1.57E+11	1.57E+11	1.65E+11	1.67E+11	1.72E+11	1.66E+11	1.64E+11	1.66E+11	5.06E+10	8.64E+10	1.09E+11	1.94E+11
4.00E-01	1.66E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.64E+11	1.65E+11	1.73E+11	1.63E+11	1.64E+11	1.56E+11	1.56E+11	1.64E+11	1.67E+11	1.69E+11	1.64E+11	1.62E+11	1.65E+11	5.05E+10	8.52E+10	1.08E+11	1.94E+11
5.00E-01	1.65E+11	1.66E+11	1.65E+11	1.66E+11	1.64E+11	1.64E+11	1.73E+11	1.63E+11	1.63E+11	1.56E+11	1.55E+11	1.64E+11	1.66E+11	1.68E+11	1.63E+11	1.62E+11	1.65E+11	5.04E+10	8.47E+10	1.07E+11	1.94E+11
6.00E-01	1.65E+11	1.66E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.64E+11	1.64E+11	1.73E+11	1.63E+11	1.63E+11	1.55E+11	1.55E+11	1.63E+11	1.66E+11	1.67E+11	1.62E+11	1.61E+11	1.65E+11	5.04E+10	8.44E+10	1.07E+11	1.94E+11
8.00E-01	1.65E+11	1.66E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.64E+11	1.64E+11	1.73E+11	1.62E+11	1.63E+11	1.55E+11	1.55E+11	1.63E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.61E+11	1.61E+11	1.64E+11	5.04E+10	8.42E+10	1.06E+11	1.94E+11
1.00E+00	1.65E+11	1.66E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.63E+11	1.64E+11	1.73E+11	1.62E+11	1.63E+11	1.55E+11	1.55E+11	1.63E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.61E+11	1.61E+11	1.64E+11	5.04E+10	8.41E+10	1.06E+11	1.94E+11
1.50E+00	1.65E+11	1.66E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.63E+11	1.64E+11	1.73E+11	1.62E+11	1.63E+11	1.55E+11	1.55E+11	1.63E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.61E+11	1.61E+11	1.64E+11	5.04E+10	8.41E+10	1.06E+11	1.94E+11
2.00E+00	1.65E+11	1.66E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.64E+11	1.64E+11	1.73E+11	1.63E+11	1.63E+11	1.55E+11	1.55E+11	1.63E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.61E+11	1.61E+11	1.65E+11	5.05E+10	8.46E+10	1.07E+11	1.94E+11
3.00E+00	1.66E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.64E+11	1.65E+11	1.73E+11	1.63E+11	1.64E+11	1.56E+11	1.56E+11	1.64E+11	1.67E+11	1.67E+11	1.62E+11	1.62E+11	1.65E+11	5.08E+10	8.63E+10	1.09E+11	1.94E+11
4.00E+00	1.66E+11	1.67E+11	1.66E+11	1.67E+11	1.65E+11	1.66E+11	1.74E+11	1.64E+11	1.65E+11	1.57E+11	1.57E+11	1.65E+11	1.67E+11	1.68E+11	1.63E+11	1.63E+11	1.66E+11	5.13E+10	8.82E+10	1.11E+11	1.94E+11
5.00E+00	1.67E+11	1.68E+11	1.67E+11	1.68E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.74E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.58E+11	1.58E+11	1.66E+11	1.68E+11	1.69E+11	1.64E+11	1.64E+11	1.67E+11	5.17E+10	9.02E+10	1.14E+11	1.94E+11
6.00E+00	1.68E+11	1.68E+11	1.67E+11	1.68E+11	1.67E+11	1.67E+11	1.75E+11	1.66E+11	1.66E+11	1.59E+11	1.59E+11	1.67E+11	1.68E+11	1.70E+11	1.65E+11	1.64E+11	1.67E+11	5.22E+10	9.21E+10	1.16E+11	1.94E+11
8.00E+00	1.68E+11	1.69E+11	1.68E+11	1.69E+11	1.68E+11	1.68E+11	1.75E+11	1.67E+11	1.67E+11	1.61E+11	1.61E+11	1.68E+11	1.69E+11	1.71E+11	1.67E+11	1.66E+11	1.68E+11	5.31E+10	9.56E+10	1.20E+11	1.94E+11
1.00E+01	1.69E+11	1.70E+11	1.69E+11	1.70E+11	1.69E+11	1.69E+11	1.76E+11	1.68E+11	1.68E+11	1.62E+11	1.62E+11	1.69E+11	1.70E+11	1.72E+11	1.68E+11	1.67E+11	1.69E+11	5.38E+10	9.85E+10	1.23E+11	1.94E+11
1.50E+01	1.70E+11	1.71E+11	1.70E+11	1.72E+11	1.70E+11	1.71E+11	1.76E+11	1.69E+11	1.70E+11	1.64E+11	1.64E+11	1.70E+11	1.71E+11	1.74E+11	1.69E+11	1.68E+11	1.70E+11	5.54E+10	1.04E+11	1.29E+11	1.94E+11

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikle nükleer yapı için araştırılan ve geliştirilmeye çalışılan radyasyon zırh malzemelerinin (alaşım, beton, cam vb.) literatürdeki genel taraması yapılmıştır. Bir sonraki aşamada iyi bir zırh malzemesi olabileceği düşünülen Cu-Al-Mn tipi alaşımlar için araştırma yapılmış ve bu araştırmadan elde edilen veri ve bilgiler ile bu alaşımı oluşturmak için belirlenen ağırlıkça yüzdelik oranlar kullanılmıştır. Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımlar ile ilgili literatürde daha çok mekanik özellikler, korozyona karşı direnç, mikroyapılarındaki değişim, sıcaklığa bağlı değişimlerde sönümleme kapasiteleri vb. olaylar deneysel veya teorik olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Cu-Al-Mn (CALM) şekil hafızalı alaşımları için 17 farklı alaşım tipi belirlenmiştir. Belirlenen alaşımlardan altı tanesi sadece Cu, Al ve Mn elementlerinden oluşurken diğerleri bu alaşıma farklı elementlerin katkılanması ile elde edilmiştir. Belirlenen alaşımların radyasyon zırhlama konusunda yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi için Phy-X/PSD yazılımı ile MAC, LAC, HVL, MFP, Z_{eff} , N_{eff} ve C_{eff} parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler tercih edilen Cu-Al-Mn alaşımları için yorumlanmıştır. CALM7 alaşımının; kütle soğurma ve lineer soğurma katsayıları, yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve etkin iletkenlik parametreleri araştırılan diğer alaşımlardan ve beton türlerinden daha üstün teorik sonuçlar ortaya koymuştur. CALM7 ve CALM11 alaşımlarının N_{eff} parametreleri incelendiğinde CALM11 alaşımının daha iyi sonuç gösterdiği görülmüştür. N_{eff} parametresinin tek başına yüksek olması çok iyi zırh malzemesi yorumunu desteklemek için yeterli olmaz. Bunun sonucu olarak CALM7 kodlu alaşımın diğer alaşımlara göre verilerin bütünlüğü bakımından değerlendirmesi yapıldığında daha iyi radyasyon soğurucu özellikler barındırdığı söylenebilir. Ayrıca beton türlerine ve kurşuna göre yapılan karşılaştırmalarda beton türlerinden daha iyi sonuçlar verdiği kurşun malzemeye göre radyasyon soğurma bakımından zayıf kaldığı ama kurşunun toksik etkilerine kıyasla daha olumlu sonuçlar göstereceği düşünülmüştür. HVL ve MFP değerleri incelendiğinde CALM7 alaşımının beton türlerine göre kalınlık olarak daha düşük bir değer göstermesi, yapı malzemesi olarak daha ince ve ergonomik dolayısıyla daha düşük maliyetli olması nükleer çalışmalarda

ve medikal alanında referans olarak değerlendirilebilir. CALM11 kodlu alaşımların etkin elektron sayısı (N_{eff}) parametresinde daha iyi sonuçlar göstermesi nikel (Ni) katkısının etkisi olarak yorumlanmıştır. Çünkü CALM9, CALM10, CALM11 alaşımlarının nikel katkılı oluşu etkin elektron sayısı bakımından birbirine yakın ve diğer alaşım türlerinden hemen hemen daha iyi sonuçlar verdiği ilgili grafik ve tabloda görülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmada seçilen alaşımların radyasyon zırh malzemesi üretimine olumlu katkılar sunacağı ayrıca alaşımların içeriğindeki elementlerin ağırlıkça yüzdelik oranları, yoğunlukları ve katkı elementleri açısından optimize edilerek daha verimli zırh malzemeleri üretimine yol gösterebileceği düşünülmektedir.

Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımlarının daha önceki kısımlarda belirtildiği gibi farklı amaçlar doğrultusunda kullanımına karşı radyasyon zırhlama konusunda da iyi bir yapı malzemesi olabileceği sonucuna varılmıştır. Diğer bir sonuç ise bu alaşımların teknolojik olması ve farklı mekanik özellikleri içermesi radyasyon zırhlama konusunda amaca uygunluk açısından (örneğin hafiflik, korozyona karşı direnç, sıcaklığa karşı dayanıklılık, elastiklik vb.) olumlu katkılar sunacak olmasıdır. Dolayısıyla gelişen teknolojinin yanında doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının canlı yaşamı için faydaları olduğu gibi zararları da söz konusu iken bu zararları azaltacak önlemler almak ve şartlara uygun zırh yapı malzemelerinin çeşitliliğini arttırmak ve en iyi seçeneği belirlemek gerekmektedir. Bu tez çalışmasının en genel amacı özetle bu seçeneklere bir yenisini eklemek olmuştur.

KAYNAKLAR

- AbuAlRoos, N. J., Azman, M. N., Amin, N. A. B., & Zainon, R. (2020). Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine. *Physica Medica*, 78, 48-57.
- Akamine, H., Takamatsu, R., Xu, S., Omori, T., Kainuma, R., Kise, S., ... & Nishida, M. (2025). Successive stress-induced phase transformations with large stress-strain hysteresis in single crystal Cu-Al-Mn shape memory alloys. *Acta Materialia*, 292, 121054.
- Akman, F. (2023). Determination of gamma radiation shielding characteristics for some iron-based metallic glasses. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 12(1), 53-60.
- Al-Buriahi, M. S., Echeweozo, E. O., Sriwunkum, C., Alomayrah, N., & Alzahrani, J. S. (2025). Gamma radiation shielding and interaction properties of MoO₃-Doped cadmium zinc lithium-borate glasses. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(4), 103313.
- Al-Ghamdi, H., Elsafi, M., Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H., & Tamayo, P. (2022). Performance of newly developed concretes incorporating WO₃ and barite as radiation shielding material. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 4103-4114.
- Algüneş, Ç. (2002). *Radyasyon biyofiziği*. Trakya Üniversitesi Rektörlüğü Yayınları.
- Alhakami, M. H., Abouhaswa, A. S., Althubiti, N. A., & Taha, T. A. M. (2025). Investigation of optical and radiation shielding properties in bismuth oxide-doped barium borate glasses. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(9), 103633.
- Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M. I., & Demir, L. (2020). Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108455.

- Alves, R. F., Raimundo, R. A., Lima, B. A., Oliveira, D. F., de Santana, R. A., Gomes, R. M., & de Araújo, C. J. (2023). Effect of small vanadium addition on the microstructure, transformation temperatures, and corrosion behavior of a Cu₇₂Al₁₇Mn₁₁ shape memory alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 6009-6021.
- Andrade, B. H., Silva, D. D., Brito, I. C., Caluête, R. E., Sousa, A. R., Gomes, R. M., & Oliveira, D. F. (2022). Influence of strain rate on mechanical properties of a CuAlMnTiB shape memory alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 1667-1672.
- Araki, Y., Shrestha, K. C., Maekawa, N., Koetaka, Y., Omori, T., & Kainuma, R. (2016). Shaking table tests of steel frame with superelastic Cu–Al–Mn SMA tension braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(2), 297-314.
- Aral, İ. (2019). *Alumina ve zirkonya esaslı seramiklerin nükleer zırlama kabiliyetlerinin MCNP-X kodu ile araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı.
- Araz, A., (2020), *Radyasyon zırlama için yeni, hafif, kompozit malzemeler*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Atakan, Y., 2006. TÜBİTAK, Bilim ve Teknik, Yeni Ufuklar, Nisan
- Atakır, K., Özevci, G., & Ceyhan, B. (2022). Elektromanyetik radyasyon ve insan sağlığına etkileri. *Environmental Toxicology and Ecology*, 2(1), 9-21.
- Aygun, M., Aygun, Z., & Ercan, E. (2024). Yeni üretilen kobalt ve tungsten esaslı alaşımlar: Yapısal özellikler ve radyasyon koruma potansiyelleri. *Nükleer Mühendislik ve Tasarım*, 428, 113490.
- Aygün, B., & Karabulut, A. (2018). Development and production of high heat resistant heavy concrete shielding materials for neutron and gamma radiation. *Eastern Anatolian Journal of Science*, 4(2), 24-30.

- Bakırhan, E. (2017). *Kurşun maden atığı katkılı ağır betonların radyasyon soğurma katsayılarının 662-1460 kev enerji aralığında incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi.
- Bashter, I. I. (1997). Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes. *Annals of nuclear Energy*, 24(17), 1389-1401.
- Brouwer, P. N. (2003). Theory of XRF 1st ed PANalytical BV The Netherlands.
- Cardis, E., Vrijheid, M., Blettner, M., Gilbert, E., Hakama, M., Hill, C., ... & Veress, K. (2005). Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries. *Bmj*, 331(7508), 77.
- Coşkun, Ö. (2011). İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 1(2), 13-17.
- Çetin, H. (2011). *Tıbbi amaçlı x ışını uygulamalarında radyasyondan korunmak amacıyla kullanılan kurşunlu önlük malzemelerine alternatif olarak üretilen kurşunsuz örneklerin soğurma özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- de Souza, J. S., de Oliveira, M. C. L., Antunes, R. A., & da Silva, R. A. G. (2022). Quaternary CuAlMn-based alloys with Gd and Sn additions: surface chemistry and corrosion behavior in sodium chloride solution. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 1213-1230.
- Dridi, W., Alsulami, R. A., Albarqi, M. M., Alsufyani, S. J., & Hosni, F. (2024). Radiation shielding features of Na₂O–P₂O₅ glasses doped with MnO experimentally and using FLUKA and Phy-X. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(1), 100805.
- Durmaz, H. (2002). Radyasyon zırhlaması amacıyla karbonlu yapı çeliklerinin değerlendirilmesi. 9-10.
- Erdoğan, M., Çimen, B. ve Oğul, R. (2017). İyonlaştırıcı Radyasyon ve Korunma Yöntemleri. Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 43(2), 139-147.

- Ertay, H. (2014). *Kurşun madeni atıklarının radyasyon zırlama etkilerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi.
- Gedikoğlu, A. (1988). *Çekirdek fiziğine giriş*, Trabzon: KTÜ Basımevi, 36-38
- Gençay, Ş. (1994). Nükleer Elektrik ve Çevre, Elektrik Enerjisi ve Teknolojileri Sempozyumu. *İTÜ Yayınları*.
- Gowda, S. (2016). The mass attenuation coefficients, effective atomic cross sections, effective atomic numbers and electron densities of some halides. *Int. J. Phys. Math. Sci*, 10(8), 392-399.
- Gümüş, E. (2011). *Cr, Fe, Cu ve Zn geçiş elementlerin oluşturduğu bazı bileşiklerin K kabuğu floresans parametreleri üzerine kimyasal etki*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Güngör, N. (1991). Sağlık Fiziği, İTÜ Matbaası, İstanbul.
- Hayrat, A. Ö. (2007). *Radyasyon ve radyoizotopların tıpta kullanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Hubbell, J. H. (1999). Review of photon interaction cross section data in the medical and biological context. *Physics in Medicine & Biology*, 44(1), R1.
- Hussein, E. A., & Rammah, Y. S. (2024). Optical UV–visible, Raman spectroscopy, and gamma radiation shielding properties of borate glass systems; B₂O₃+ Na₂O+ Al₂O₃/MgO/Li₂O. *Optical and Quantum Electronics*, 56(3), 387.
- Issa, SA, Ahmad, M., Tekin, HO, Saddeek, YB, & Sayyed, MI (2019). Bi₂O₃ içeriğinin Bi₂O₃-MoO₃-B₂O₃-SiO₂-Na₂O-Fe₂O₃ cam sisteminin mekanik ve nükleer radyasyon koruma özellikleri üzerindeki etkisi. *Fizikte Sonuçlar*, 13, 102165.
- Işık Karadoğan, Z. (2019). *Ni, Fe, Co tabanlı süperalaşımların radyasyon zırlama kabiliyetlerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- İlik, E. (2023). A Study on the Physical, Optical and Radiation Shielding Capabilities of Phosphate Zinc Telluride Glasses as a Result of ZnO/In₂O₃ Translocation. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 11(4), 1686-1699. <https://doi.org/10.29130/dubited.1160535>
- Jackson, D. F., & Hawkes, D. J. (1981). X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures. *Physics Reports*, 70(3), 169-233.
- Kainuma, R., Takahashi, S. ve Ishida, K. (1996). Snek Cu-Al-Mn alaşımlarında termoelastik martensit ve şekil hafızası etkisi. *Metallurji ve Malzeme İşlemleri A* , 27 , 2187-2195.
- Karthika, S., Sundari, S. S., Marimuthu, K., & Meena, P. (2024). Enhancement of electrical and radiation shielding properties of vanadium doped lithium telluroborate (LTB) glasses. *Chemical Physics Impact*, 8, 100430.
- Kavun, Y. (2019). Pb(NO₃)₂ katkılı duvar kağıtlarının radyasyon emme özelliklerinin incelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* , 8 , 1-6.
- Kavun, Y. (2021). The Theoretical Investigation of Chitin Doped Concretes for Gamma-ray Shielding Properties. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Dergisi*, 3(2), 80-91.
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons. (Sayfa 326)
- Krane, K.S., “Nükleer Fizik 2.Cilt”, eviri Editörü, Başar şarer, **Palme Yayıncılık**, Ankara, (2002).
- Kurudirek, M. (2017). Heavy metal borate glasses: potential use for radiation shielding. *Journal of Alloys and Compounds*, 727, 1227-1236.
- Li, Y., Dang, M., Xiang, H., Hou, Y., & Wei, Q. (2024). Improving plasticity by Si-addition-induced coherent nanoprecipitates in Cu–Al–Mn alloy fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 70-78.

- Liu, D. H., Chen, X. Z., Sun, R., Wu, X., Bai, H. W., Zhao, Y. F., ... & Liu, X. C. (2025). Cu segregation and symbiotic precipitation at the dispersoid/matrix interface in a Cd-microalloyed Al–Cu–Mn alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 7204-7214.
- Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Thind, K. S., & Gerward, L. (2008). On the effective atomic number and electron density: a comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(18), 3906-3912.
- Mokhtari, K., Saadi, M. K., Ahmadpanahi, H., & Jahanfarnia, G. (2021). Fabrication, characterization, simulation and experimental studies of the ordinary concrete reinforced with micro and nano lead oxide particles against gamma radiation. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(9), 3051-3057.
- Naito, M., Kodaira, S., Ogawara, R., Tobita, K., Someya, Y., Kusumoto, T., ... & Orimo, S. I. (2020). Investigation of shielding material properties for effective space radiation protection. *Life sciences in space research*, 26, 69-76.
- Narmanlı Han, E. (2024). *Kobalt esaslı nanoyapılı Heusler alaşımların üretimi, yapısal ve morfolojik özelliklerinin incelenmesi, radyasyon zırhlama karakteristiklerinin belirlenmesi*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Nükleer Düzenleme Kurumu. (2023). Türkiye’de radyasyon kaynakları. <https://www.ndk.gov.tr/haberler/turkiyede-radyasyon-kaynaklari-2022-yayin>
- Onur, S. (2002). Gama radyasyonu zırhlaması amacıyla farklı betonların değerlendirilmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özavcı, S. (2017). *Farklı katkılanmış betonların radyasyon zırhlama üzerine etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya.

- Özdoğan, T., Kara, M., Gümüş, S., Orbay, M., “Fizik IV Modern Fizik”, (1.Basım). *Pegem A Yayıncılık*, Ankara, (2005).
- Perişanoğlu, U. (2024). Gamma Radiation Shielding Efficiency of High Entropy Alloys: A Comparative Study. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29(2), 458-467.
- Praveen, N., Kumar, N. S., Prasad, C. D., Giri, J., Albaijan, I., Mallik, U. S., & Sathish, T. (2024). Effect of pulse time (Ton), pause time (Toff), peak current (Ip) on MRR and surface roughness of Cu–Al–Mn ternary shape memory alloy using wire EDM. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 1843-1851.
- Rezvani, M., & Ghezelgechi, H. J. (2025). Bi₂O₃ additive effects on gamma radiation shielding properties of 45SiO₂-20B₂O₃-23Na₂O₃-9CaO-3Al₂O₃ glass. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(8), 103545.
- Sayyed, M. I., Rashad, M., More, C. V., & Kumar, A. (2024). Preparation and radiation shielding features of high density, transparent borosilicate glasses with different Bi₂O₃ contents. *Nuclear Engineering and Technology*, 56(12), 5043-5047.
- Shapiro, J., 1972. Radiation Protection, Harward University Press. Cambridge.
- Şahin, Y., 1999. Çekirdek Fizisinin Esasları. Çeviri, Atatürk Üniversitesi Yayınları, Erzurum, 340 s.
- Şakar, E., Özpolat, Ö. F., Alım, B., Sayyed, M. I., & Kurudirek, M. (2020). Phy-X/PSD: development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108496.
- Topal, M. (2019). *Paraşin ve metal tozu dolgulu epoksi reçinesi üretimi ve nötron zırhlama parametrelerinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı.

- Tuna, T., Balnan, İ., Samur, M. G., & Sezgin, N. (2022). Investigation of neutron shielding behaviour of unreinforced and calcite reinforced concrete samples. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Akademi Dergisi*, 1(1), 73-86.
- Turhan, A. (2008). *Borlamanın paslanmaz çeliğin radyasyon zırhlama özelliğine etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Türkiye Uzay Ajansı <https://tua.gov.tr/tr/blog/havacilik-ve-teknoloji/dalgalar-ve-elektromanyetik-tayf-spektrum>
- Ünlü, P., İngeç, Ş.K., Budak, M.G., Avcı, D.E., 2014. Modern Fizik. Anı yayıncılık, 182, Ankara.
- Yang, L., Jiang, X., Sun, H., Shao, Z., Fang, Y., & Shu, R. (2021). Effect of Ta addition on microstructures, mechanical and damping properties of CuAlMnTi alloy. *Journal of materials research and technology*, 15(3825), e3835.
- Y.E. Togay, “Radyasyon ve Biz,” Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayınları, pp. 2-12, 2002.
- Yerlikan, M. C., (2013). *Elementlerin kristal yapılarının nötron zırhlama üzerine etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı.
- Zeytinoğlu, M., & Şahin, Y. (1993). Radyasyonun Biyolojik Etkisi. *Anatolia: Turizm Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 37-38.
- Wang, Y., Huang, Y., He, W., Luo, Q., Peng, H., Qiu, S., & Wen, Y. (2025). Evolution of damping capacity and vacancy behavior with the environmental temperature in ductile Cu–Al–Mn–Ni alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 3596-3609.

Xi, X., Zhang, J., Tang, H., Cao, Y., & Xiao, Z. (2022). The ultrahigh functional response of CuAlMnNb shape memory alloy by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 671-680.

Xu, D., Wang, H., Yuan, X., Sun, H., & Feng, J. (2023). Comparison of shape memory properties between Cu-12.5 Al-3Mn and Cu-12.5 Al-3Mn-1Ni produced by additive manufacturing technology. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 4070-4077



ÖZGEÇMİŞ

