



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI ENDÜSTRİYEL ÜRÜNLERİN RADYASYON ZIRHLAMA
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FAHRETTİN SAĞLAM

HAZİRAN

**BAZI ENDÜSTRİYEL ÜRÜNLERİN RADYASYON ZIRHLAMA
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Fahrettin SAĞLAM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Danışman

Prof. Dr. Betül ÇETİN

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Fahrettin SAĞLAM tarafından hazırlanan “Bazı Endüstriyel Ürünlerin Radyasyon Zırlama Özelliklerinin Belirlenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Betül ÇETİN

Fizik Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak yüksek lisans tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Doç. Dr. Serpil ERYILMAZ

Fizik Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak yüksek lisans tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Arzu POYRAZ

Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Toros Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak yüksek lisans tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 19/06/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fahrettin SAĞLAM
(19/06/2025)

BAZI ENDÜSTRİYEL ÜRÜNLERİN RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fahrettin SAĞLAM

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Teknolojinin ilerlemesi ve hemen her alanda hayatımızda kullanım alanı bulması sebebiyle hayatımıza giren radyasyonun; başta tıbbi alanda görüntüleme ve hastalık tanılarının yapılmasının yanı sıra birçok farklı alanda olduğu gibi endüstriyel alanda da yararlı etkilerinden faydalandığı bilinmektedir.

Radyasyonun oluşturduğu zararları en aza indirebilmek amacıyla radyasyondan korunmanın en etkili yollarından biri olan zırhlama metodu gereği yeni zırhlama malzemelerinin geliştirilme çalışmaları hız kazanmıştır. Bu sebeple bu tez çalışmasında, endüstride sıklıkla kullanılan ve temin edilmesi oldukça kolay olan Al 6000 serisi, AISI 4140 alaşımlı çelik, AISI 8620 alaşımlı çelik ve 1040 imalat çeliği numunelerinin radyasyon zırhlamada nasıl bir etkinlik gösterdiği araştırılmıştır. Çalışmalar deneysel olarak NaI (Tl) dedektör gama spektrometresi ile yapılmış ve zırhlama deneylerinde Cs-137 (662keV) ve Co-60 (1173keV, 1332keV) radyoaktif kaynaklar kullanılmıştır. Deneysel olarak elde edilen radyasyon zırhlama parametreleri, XCOM nükleer yazılımı programı ile teorik olarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçların uyum içinde olduğu ve en iyi zırhlamanın alaşımlı çelik numunelerine ait olduğu görülmüştür.

Sayfa Adedi : 47

Anahtar Kelimeler :Radyasyon, Zırhlama, Gama Spektrometresi, Endüstriyel Çelik, Alüminyum

Danışman : Prof. Dr. Betül ÇETİN

DETERMINATION OF RADIATION SHIELDING PROPERTIES OF SOME
INDUSTRIAL PRODUCTS

(M.Sc.Thesis)

Fahrettin SAĞLAM

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

Due to the advancement of technology and its application in almost every field of our lives, it is known that the radiation that has entered our lives is beneficial not only in the medical field for imaging and disease diagnosis but also in many different areas, including the industrial sector.

In order to minimize the damage caused by radiation, the development of new shielding materials has accelerated as part of the shielding method, which is one of the most effective ways to protect against radiation. For this reason, this thesis study investigates the effect of Al 6000 series, AISI 4140 alloy steel, AISI 8620 alloy steel and 1040 manufacturing steel samples, which are frequently used in the industry and easily obtainable, on radiation shielding. The studies were conducted experimentally using a NaI (Tl) detector gamma spectrometer and Cs-137 (662keV) and Co-60 (1173keV, 1332keV) radioactive sources were used in the shielding experiments. The radiation shielding parameters obtained experimentally were compared with the values theoretically calculated using the XCOM nuclear software programme. It has been observed that the theoretical and experimental results are in agreement, and the best shielding belongs to the alloy steel samples.

Number of pages : 47

Keywords : Radiation, Shielding, Gamma Spectrometer, Industrial Steel, Aluminium

Supervisor : Prof. Dr. Betül ÇETİN

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları ve tez yazımı süresince bilgi birikimi, öneri ve yönlendirmelerinden faydalandığım danışman hocam sayın Prof. Dr. Betül ÇETİN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma jürisinde bulunmayı kabul eden ve savunma sınavı esnasında göstermiş oldukları hoşgörü ve desteklerinden dolayı sayın Doç. Dr. Serpil ERYILMAZ hocama ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Arzu POYRAZ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Güzel kızım TUANA ve sevgili eşim İlayda SAĞLAM' a manevi desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Radyasyonun Tanımı.....	4
2.2. İyonlaştırıcı radyasyon.....	6
2.2.1. Alfa parçacıkları.....	6
2.2.2. Beta parçacıkları.....	7
2.2.3. Gama ışınları.....	9
2.2.4. X ışınları.....	10
2.3. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar.....	10
2.4. Fotonların Madde ile Etkileşimi.....	11
2.4.1. Fotoelektrik olay.....	11
2.4.2. Compton saçılması.....	12
2.4.3. Çift oluşum.....	13
2.4.4 Toplam zayıflatma katsayısı.....	14
2.5. Tesir Kesiti.....	14
2.6. Dış Radyasyon Kaynaklarından Korunma Yöntemleri.....	16
2.6.1. Zaman Kuralı.....	17
2.6.2. Mesafe Kuralı.....	17

2.6.3. Zırhlama Kuralı.....	18
2.6.3.1. Lineer soğurma katsayısı	19
2.6.3.2. Kütle soğurma katsayısı	20
2.6.3.3. Ortalama serbest yol	21
2.6.3.4. Yarı-değer kalınlık.....	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Gama Spektrometre Sistemi.....	27
3.2. NaI (TI) detektörü.....	27
3.3. Elektronik Aygıtlar ve Yazılım.....	29
3.4. XCOM.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	31
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Elektromanyetik dalga ve çeşitleri.....	11



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Deniz seviyesinden yükseldikçe kozmik ışın dozunun değişimi	5
Şekil 2.2.Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon doz oranları.....	5
Şekil 2.3. Radyasyon ve çeşitleri.....	6
Şekil 2.4. Alfa, beta ve gama radyasyonlarının oluşum mekanizması.....	9
Şekil 2.5. X-ışınlarının oluşumu.....	10
Şekil 2.6. Etkileşmeden önce ve etkileşmeden sonra fotoelektrik olay.....	12
Şekil 2.7. Compton saçılmasının temsili bir gösterimi.....	13
Şekil 2.8. Çift oluşumu.....	13
Şekil 2.9. Etkileşim mekanizmalarının enerji ve atom numarasına göre değişimi...	14
Şekil 2.10. Hedef malzemeye parçacıkların bir demetinin A alanı üzerine temsili düşürülmesi.....	15
Şekil 2.11. Dış radyasyon kaynaklarından korunmanın üç temel yöntemi.....	16
Şekil 2.12. Ters kare kanununa göre radyasyon şiddetindeki azalma.....	18
Şekil 2.13. Farklı radyasyon türlerine göre zırhlama malzemeleri.....	19
Şekil 2.14. Lambert–Beer yasasına göre fotonların madde ile etkileşimi.....	20
Şekil 3.1. Gama spektroskopi sistemini oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi..	27
Şekil 3.2. NaI(Tl) detektörünün çalışma mekanizması.....	29
Şekil 4.1. 662 keV enerjisi için deneysel lineer zayıflama katsayıları.....	31
Şekil 4.2. 1173 keV enerjisi için deneysel lineer zayıflama katsayıları.....	32
Şekil 4.3. 1332 keV enerjisi için deneysel lineer zayıflama katsayıları.....	32
Şekil 4.4. Deneysel soğurma katsayılarının enerji ile değişimi.....	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Al 6000 serisinin lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafiği.....	33
Şekil 4.6. AISI 4140 için lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafiği.....	34
Şekil 4.7. AISI 1040 için lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafiği.....	34
Şekil 4.8. AISI 8620 için lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafiği.....	35
Şekil 4.9. Numunelerin lineer soğurma katsayısının enerjiye göre karşılaştırmalı korelasyon grafiği	35
Şekil 4.10. Al 6000 serisi için deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı grafiği.....	36
Şekil 4.11. AISI 4140 için deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı grafiği.....	36
Şekil 4.12. AISI 1040 için deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı grafiği.....	37
Şekil 4.13. AISI 8620 için deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı grafiği.....	37
Şekil 4.14. HVL ve TVL değerlerinin 662 keV enerjisindeki değişimi.....	38
Şekil 4.15. HVL ve TVL değerlerinin 1173 keV enerjisindeki değişimi	39
Şekil 4.16. HVL ve TVL değerlerinin 1332 keV enerjisindeki değişimi.....	39
Şekil 4.17. Al 6000 serisi için teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	40
Şekil 4.18. AISI 4140 için teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	40
Şekil 4.19. AISI 1040 için teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	41
Şekil 4.20. AISI 8620 için teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
g	Gram
keV	Kilo elektron volt
MeV	Mega elektron volt
GeV	Giga elektron volt
s	Saniye
μ s	Mikrosaniye
V	Volt
mm	Milimetre
$^{\circ}$ C	Santigrat derece
ml	Mililitre
n	Nötron
p	Proton
ν	Nötrino
$\bar{\nu}$	Antinötrino
α	Alfa parçacığı
β	Beta parçacığı
γ	Gama ışını
EC	Elektron yakalama
μ	Lineer soğurma katsayısı
μ_m	Kütle soğurma katsayısı

Simgeler	Açıklama
I_0	Madde ortamına gelen fotonların sayısı
I	Maddeden geçen foton sayısı
x	Malzeme kalınlığı
ρ	Malzeme yoğunluğu
$x_{1/2}$	Yarı değer kalınlık
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
SAE	Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği
HVL	Yarı değer kalınlık
MFP	Ortalama serbest yol
TVL	Onda bir kalınlık
XCOM	Foton kesiti veritabanı

1.GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesi ile hayatımızın hemen her alanında var olan radyasyon kavramı, ortamda taşınan enerji olarak adlandırılabilir. Temel olarak iyonize ve iyonize olmayan radyasyon olarak iki grupta incelenen radyasyon, teknolojinin gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. Wilhelm Conrad Röntgen'in Crooke's tüpüyle elektrik akımı deneyleri yaparken X ışınını keşfetmesi ile ortaya atılan radyasyon kavramı, Henri Becquerel'in uranyumun radyoaktif olduğunu keşfetmesi ile hız kazanmıştır. Radyasyon bilimindeki bu önemli gelişmeler, Polonyalı fizikçi ve kimyager Marie Curie' nin keşiflerine ışık tutmuş ve Curie, uranyumun radyoaktivitesi üzerinde çalışırken radyum ve polonyum elementlerini keşfetmiştir. Ernest Rutherford radyoaktivite üzerine yaptığı çalışmalarda radyasyon ışınlarının farklı enerjilere sahip olduğunu fark etmiş, alfa, beta parçacıklarını ve gama ışımasını bulmuştur. 1932 yılında James Chadwick' in nötronları keşfetmesiyle yüksek giriciliğe sahip nötronların da nükleer reaksiyonlarda kullanılabileceği öne sürülmüştür. Bu çalışmalar; yeni parçacıkların keşfi ve teknolojinin de gelişmesi ile günümüzde yapılan çalışmaların temelini oluşturmuştur.

Yapay yollarla radyoaktif maddelerin üretilmesiyle birlikte çekirdek fiziği, tıp alanından yapı analizine kadar birçok sektörel çalışmanın önünü açmıştır. Bu çalışmaların artması, radyasyona maruz kalmaları da beraberinde getirmiştir. Yararlı etkilerinden yararlanan radyasyonun, zararlı etkilerinden korunma yollarının bulunması, özellikle radyasyon çalışanları için önemli bir konu haline gelmiştir. Her ne kadar radyasyondan korunmanın üç temel kuralından bahsedilse de, canlılar üzerinde biyolojik zararlara sebebiyet veren iyonize radyasyondan korunmak ve bu zararı en aza indirmek için yapılan çalışmalardan en etkili, radyasyon kaynağı ile çalışan arasında özel bir radyasyon kalkanı kullanmaktır.

Radyasyonla çalışılan ortamlarda ortaya çıkan bu gereksinimden dolayı, radyasyon çalışanlarını radyasyonun zararlı etkilerinden koruyabilecek zırhlama materyallerinin kullanılması önem arz etmektedir. Bu sebeple, bu materyallerin radyasyon geçirgenliğinin bilinmesi ve ona göre seçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, radyasyon zırhlamada geleneksel hale gelen beton ve kurşuna alternatif malzemeler geliştirmek amacıyla, endüstride sıklıkla kullanılan endüstriyel malzemelerin radyasyon tutuculuk özellikleri incelenmiş, böylece yüksek maliyetlerden kaçınılarak

radasyunun zararlı etkilerinin minimum seviyelere indirilip indirilemeyeceği araştırılmıştır.

elik ve alüminyum gibi endüstriyel malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik özellikler, korozyon direnci, kireçlenmeye karşı direnç ve yüksek esneklik gibi temel nitelikleri nedeniyle modern endüstri, tıbbi, inşaat ve ulaştırma sektörü uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Nayak ve diğerleri, 2014; Baldissera ve Delprete, 2010; Alım, 2020; Sahin ve Ubeyli, 2008). Ayrıca, paslanmaz çeliklerin uzun yıllardır çeşitli nükleer reaktör sistemlerinde kullanıldığı ve füzyon reaktörlerinde yapısal kullanım için önemli potansiyel malzemeler olduğu belirtilmiştir (Sahin ve Ubeyli, 2008; Marashdeh ve Al-Hamarneh, 2021; Li ve diğerleri, 2021). Paslanmaz elikler, bu üstün özellikleri nedeniyle koruyucu malzeme olarak tercih edilebilir.

AISI 4140 alaşımlı çeliği; dişliler, civatalar, şaftlar, akslar gibi genel amaçlı yüksek çekme dayanımlı elik bileşenlerde sıklıkla kullanılan bir krom-molibden alaşımlı çeliktir.

1040 imalat çeliği, %0,37- %0,44 karbon içeren orta karbonlu elik türüdür. Bu karbon içeriği, çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesinin yanında sertliği nedeniyle dayanıklılığı artırır. AISI/SAE standartlarına göre belirlenen sınıflandırmalar aracılığıyla orta karbonlu elik grubuna girer. İşlenebilirliği ve dayanıklılığı nedeniyle çeşitli şekillerde şekillendirilebilir ve imalat süreçlerinde kolayca işlenebilir.

Sementasyon eliği olarak da bilinen ve düşük karbonlu elik sınıfında yer alan AISI 8620 eliği, yüksek mukavemeti ve mekanik özellikleri sayesinde yüksek zorlanmalara maruz kalan makine ve otomobil sektöründe kullanılan parçaların üretiminde kullanılmaktadır (Güney, 2021). Sementasyon, eliğin sertleşme kabiliyetidir ve yüksek sıcaklıklarda karbon verilen çeliklerin su verme işlemiyle martenzite dönüşümü gerçekleşir. Çeliğin sahip olduğu karbon oranı sertleştirilmesinde oldukça önemlidir (Tekin, 1984; Güney ve Kam, 2022).

Orta karbonlu çelikler, düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek sertlik derecesine ve dayanıklılığa sahiptir, yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Isıl işlem yoluyla çeşitli sertlik seviyelerine ulaşılabilir ve çok çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Bu zellikleri nedeniyle, imalat sektöründe çeşitli bileşenlerin yapımında güvenilir ve etkili bir malzeme olarak

kabul edilir ve imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılır.

Bu nedenle, endüstriyel malzemelerin radyasyon koruma amaçları için kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, Alüminyum, AISI 4140 alaşımlı çelik ve AISI 8620 alaşımlı çelik, 1040 imalat çeliği numunelerinin radyasyon zırlama parametre değerleri tüm materyaller için hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda deneysel ve teorik sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sayede endüstride sıklıkla kullanılan bu malzemelerin gama ışını geçirgenlik düzeyleri belirlenmiştir.



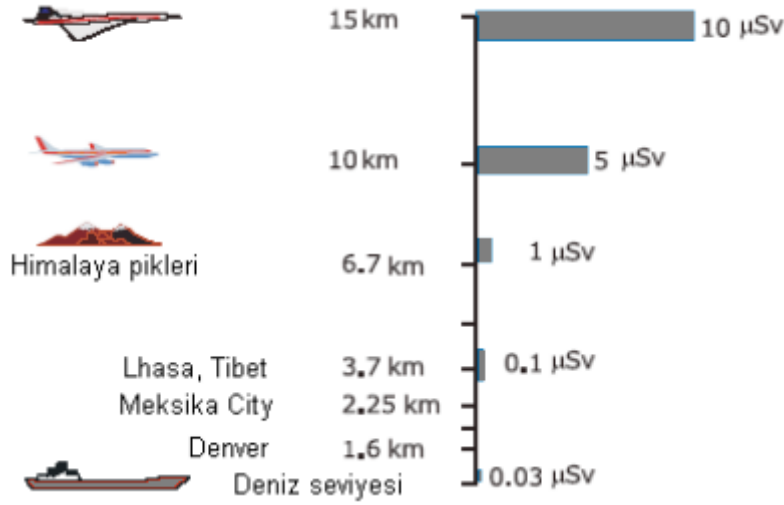
2. TEMEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Radyasyonun Tanımı

Doğada mevcut elementlerin atomlarının bir kısmı çekirdeklerindeki nötron/proton dengesizliğinden dolayı kararsız olsa da bir kısmı da kararlı haldedir. Ağır çekirdekler ve radyoaktivite özelliğine sahip atomların çekirdeklerinin kararsızlığının sebebi sahip oldukları fazla enerjidir. Bu çekirdeklere radyoaktif çekirdek veya radyoizotop adı verilir. Kararsız olan bu radyoaktif çekirdekler fazla enerjilerinden atarak kararlı duruma geçmeye çalışırlar ve parçalanıp yeni bir çekirdek üretirler. Bu olay radyoaktif parçalanma veya radyoaktivite olarak adlandırılırken atomun değişikliğe uğraması olayı ise bozunma olarak adlandırılır (Yülek, 1992:38). Çekirdekte meydana gelen bu değişiklikler sonucunda radyasyon yayınlanır.

Evrenin yaratılışı sırasında oluşan, yeryüzünün derinliklerinde bulunan ve uzun yarı-ömürlerinden dolayı günümüze kadar ulaşabilmiş radyoaktif çekirdeklerin bozunmasından meydana gelen radyasyon, günlük doğal fon radyasyonunun büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Deniz seviyesine göre değişiklik gösteren doğal fon radyasyonunun dünya genelinde ortalama değeri ışınlanmanın en düşük seviyesi için baz alınmıştır.

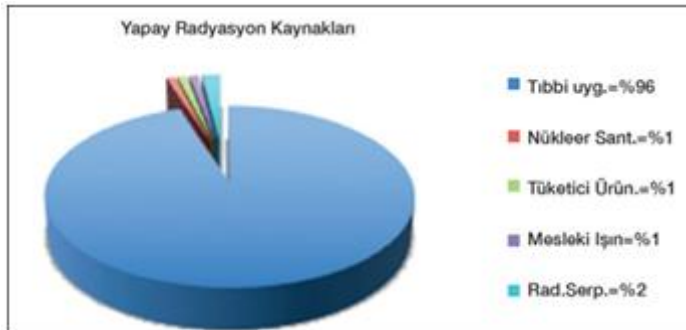
Doğal fondan dolayı meydana gelen ışınlanma iç ve dış kaynaklıdır. Dış ışınlanmalarda uzaydan yeryüzüne gelen kozmik ışınlar, yer kabuğundaki uranyum ve toryum gibi radyoaktif maddeler etkilidir. Uzaydan atmosfere gelen kozmik ışın parçacıkları azot ve oksijen gibi maddelerle etkileşir. Kozmik ışınların sebep olduğu bu radyasyon dozu deniz seviyesi ve enleme bağlı olarak değişir (Yülek, 1992: 6). Örneğin, uçakta seyahat eden bir kişi, deniz seviyesinde bulunan bir kişiye göre çok daha fazla kozmik radyasyona maruz kalır (Şekil 2.1). Bu yüzden bir pilotun, uçuş süresi boyunca, tahmini olarak deniz seviyesinde bulunan bir kişinin maruz kaldığı doğal radyasyon düzeyinden 20 kat daha fazla radyasyon dozuna maruz kaldığı belirtilmiştir (TENMAK, 2024).



Şekil 2.1. Deniz seviyesinden yükseldikçe kozmik ışın dozunun değişimi (NDK, 2024)

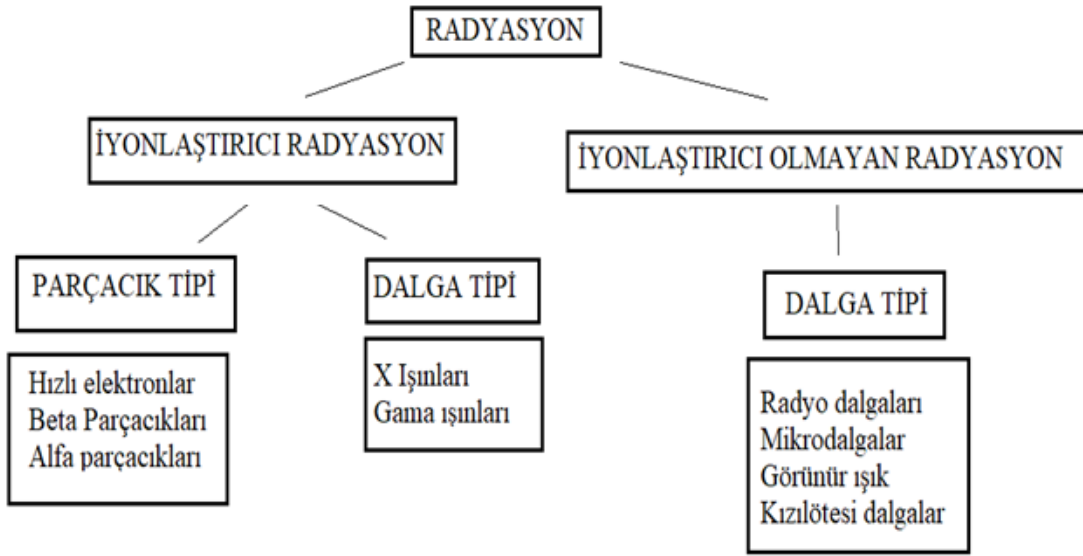
Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bazı radyasyon kaynakları insanlar tarafından üretilebilmiştir. Yapay kaynaklardan gerçekleşen radyasyon miktarı toplam radyasyon miktarının % 21'i kadarken, gelişmiş ülkelerde bu yapay radyasyon oranının % 50'sini sadece tıbbi görüntüleme oluşturmaktadır. Tıbbi kaynaklar, nükleer bomba denemeleri sonucu oluşan nükleer serpintiler, nükleer güçten salınan radyoaktif maddeler yapay radyasyon alanları olarak sınıflandırılabilir (Hacıosmanoğlu, IAEA, 2017).

Şekil 2.2'de verilen grafikte yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon doz oranlarının %14'ü tıbbi işımlar, %0,25'i nükleer endüstri, %43'ü doğal radon, %14'ü ise kozmik ışımalardan oluşturmaktadır (IAEA,1996).



Şekil 2.2. Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon doz oranları (IAEA, 1996).

Radyasyon; dalga, parçacık veya foton şeklindeki enerji paketleri halinde yayılır ve yayımlandığı kaynağın özelliğine göre parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar tarafından taşınabilir. Parçacıklar biçimindeki enerji aktarımı olarak tanımlanabilen, kütlesi ve enerjisi belirli bir değere sahip olan atom ve atom altı parçacıklar parçacık tipi radyasyonu oluşturur. Kütlesiz fotonlardan oluşan ama enerji taşıyabilen radyasyonlar ise dalga tipi radyasyonunu oluşturur. Dalga tipi radyasyon, iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki gruba ayrılır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Radyasyon ve çeşitleri

2.2. İyonlaştırıcı radyasyon

Bir maddenin atom veya moleküllerinden elektron kopararak iyonlar oluşturabilen yüksek enerjili radyasyondur. Atomun elektronlarından bir veya birden fazlasının koparılmasıyla iyonlaşma meydana gelir. Oluşan pozitif yüke sahip atom veya moleküller ve negatif yüklü serbest elektronlar iyon adını alır. Maddenin çekirdeğindeki elektronlar ile etkileşime girdiğinde maddeyi yapısal olarak değiştirebilir. Alfa parçacıkları, beta parçacıkları, gama ışınları, X ışınları ve nötronlar iyonlaştırıcı radyasyon grubundadır (Coşkun, 2023:15; Yülek, 1992:36).

2.2.1. Alfa parçacıkları

Alfa parçacıkları (α), iki nötron ve iki protondan oluşur ve helyum atomunun çekirdeği olarak tanımlanabilir. Radyoaktif bozunma sürecinde, radyoaktif çekirdeği kararlı hale

getiren alfa parçacıkları pozitif yüklüdür. Alfa ışıması yapan bir elementin atom numarası 2 birim, kütle numarası 4 birim azalır yani nötron sayısı 2 azalır. Böylelikle daha küçük ve kararlı bir çekirdeğe dönüşmüş olur. Alfa parçacıklarına ait bozunma denklemi Eşitlik 1’de görülmektedir.



Bir çekirdeğin alfa yayımlayabilmesi ağır çekirdek olmasıyla mümkündür. Bu nedenle alfa bozunması genel olarak kütle numarası $A > 150$ olan çekirdeklerde yaygındır (Rn-222, Ra-226 v.b.).

Alfa parçacıkları bir maddeye nüfuz ettiği zaman, atomların elektronları ile etkileşerek iyon çiftleri oluştururlar. Bu süreçte enerjilerini hızla kaybederler. Çok yüksek bir iyonizasyon gücüne sahip oldukları için, kısa mesafelerde yüksek iyonlaşmaya sebep olmalarından ötürü maddeye nüfuz etme özellikleri azdır ve ince bir kâğıt parçası tarafından bile durdurulabilirler. Sağlıklı deriden geçip insan vücuduna giremezler. Ancak alfa yayınlayan radyoaktif elementler, sindirim sistemi ya da açık yaralar yoluyla vücuda alındığında insan sağlığı üzerinde ciddi zararlara sahip olabilirler.

2.2.2. Beta parçacıkları

Çekirdekten yayılan beta parçacıkları (β) belli enerji değerine sahip elektronlardır. Çekirdeğe yaklaşırken fazla enerjilerini X-ışını yayarak kaybederler. Enerjileri tipik olarak 4 MeV' nin altındadır. Beta parçacıkları, alfa parçacıklarına kıyasla kütlece daha hafiftirler ve giricilikleri ile menzilleri daha yüksektir.

Beta bozunumu üç farklı şekilde incelenir;

β^- bozunumu

Çekirdeğin kararsızlığı nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, fazla nötronun protona dönüşmesi sırasında bir elektron ve bir de kütesiz antinötrino ($\bar{\nu}$) oluşur (Krane, 1998). β^- parçacıkları yükü ve kütlesi bakımından elektronun yükü ve kütlesine eşittir. Hızları çok yüksektir ve bu sebeple havada 3-5 m yol alabilirler.

β^- bozunma denklemi Eşitlik 2’de görülmektedir.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (2)$$

Burada, n, nötronu; p, protonu; $\bar{\nu}$, antinötrinoyu ifade eder. Antinötrino elektrik yükü taşımayan ve çok küçük kütleyle sahip bir parçacıktır.

β^+ bozunumu

Çekirdeğin kararsızlığı proton fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdek bu fazla protonunu nötrona dönüştürmek suretiyle kararlı yapıya geçmeye çalışır. Bozunma sonucu bir nötron ve pozitif yüklü elektron (pozitron) oluşur (Krane, 1998). β^+ bozunma denklemi Eşitlik 3’de görülmektedir.

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \quad (3)$$

Eşitlik 3 ‘de gerçekleşen reaksiyon sonucunda çekirdeğin proton sayısında bir birim azalma, nötron sayısında bir birim artış olacağından atomun kütle numarası değişmeden sabit kalır.

Elektron yakalama olayı

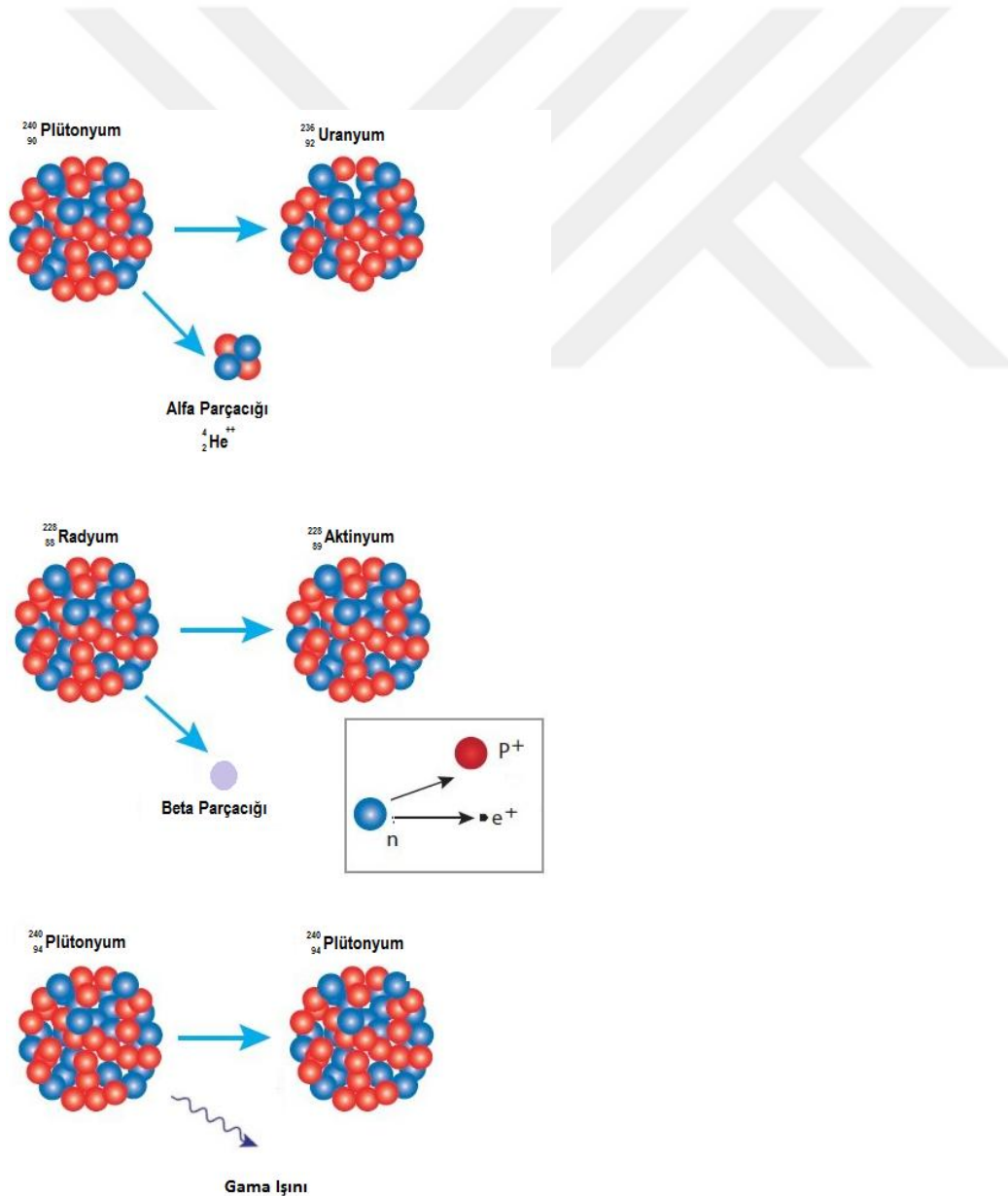
Çekirdeğin kararsızlığı proton fazlalığından kaynaklanıyor fakat çekirdek β^+ yayımlayamıyorsa, atomun iç yörünge elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanarak proton ile birleşir. Reaksiyon sonucunda çekirdeğin yükü bir azalırken nötron sayısı bir artar. Elektron yakalama (EC) bozunma denklemi Eşitlik 4’de görülmektedir.

$$p + e^- \rightarrow n + \bar{\nu} \quad (4)$$

Eşitlik 4’ de verilen beta bozunum denkleminde, çekirdek yükünün değişmesine rağmen kütle numarası aynı kaldığı için bu dönüşüm “izobarik dönüşüm” olarak adlandırılır.

2.2.3. Gama ışınları

Radyoaktif parçalanma sonrasında uyarılmış durumda kalan çekirdek, fazla enerjisini gama ışını (γ) olarak yayınlamaya kararlı hale gelir. Yüksek enerjili olduklarından giricilik etkileri çok yüksektir, kütle veya elektrik yükleri yoktur. Maddeye nüfuz etme özelliği fazla olduğundan dolayı ancak zırhlama yöntemleriyle durdurulabilir. Gama radyasyonunu zırhlamak için kalın beton duvarlar veya kurşun bloklar gibi yüksek yoğunluklu ve kalın malzemeler tercih edilir. Son yıllarda, beton ve kurşuna alternatif malzeme üretme çalışmaları hız kazanmıştır. Şekil 2.4’ de α , β , γ radyasyonlarının oluşum mekanizması görülmektedir.



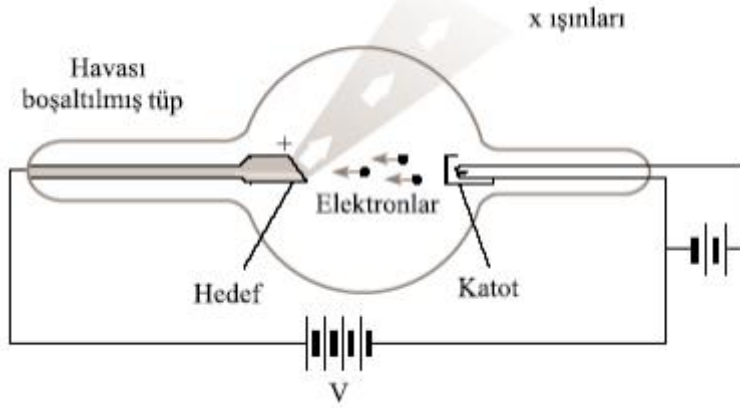
Şekil 2.4. Alfa, beta ve gama radyasyonlarının oluşum mekanizması

2.2.4. X ışınları

Röntgen, 1895 yılında katot tüpüyle yaptığı deneyler sırasında, havası alınmış bir tüp içindeki metal yüzey üzerine hızlandırılmış elektronların çarpması sonucu elektronların yavaşlayarak durduğunu ve gericiliği çok yüksek ışınların açığa çıktığını gözlemlemiştir. Daha önce bilinmeyen bu ışınlara X ışınları adını vermiştir (Yülek, 1192:78) (Şekil.2.5).

Birçok özellik bakımından X-ışınları, γ radyasyonu ile özdeş özellikler taşımaktadır. İki radyasyon türü arasındaki temel fark başlangıçtaki yayımlandıkları yerlerden kaynaklanmaktadır. Gama ışınları çekirdeklerdeki değişikliklerden kaynaklanırken, X-ışınları atomun tabakaları arasındaki elektromanyetik geçişlerden kaynaklanır.

X-ışınlarının doku gibi yumuşak maddelerin içinden geçme özellikleri olduğundan tıpta tanı amaçlı kullanılır. X-ışınları canlı dokularına zarar verip öldürücü etki yaptığından dolayı bu ışınlara gerekmedikçe maruz kalınmamalıdır.



Şekil 2.5. X-ışınlarının oluşumu (Beiser,1995:70)

2.3. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar madde içinden geçerken iyonlaşmaya etki eden gama ve x ışınlarından daha küçük enerjide ve dalga boyları 100 nm'den daha büyük olan radyasyonlar olduğundan maddede iyonlaşma meydana gelmez. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, atomları veya molekülleri iyonlaştırmak (elektronları uzaklaştırmak) için yeterli enerjiye sahip değildir, bunun yerine enerji, maruz kalma süresine, dalga boyuna-frekansa ve radyasyonun ene

rji konsantrasyonuna bağı olarak yanıklara yol açabilen ısıya dönüştürülür (Yülek, 1992:169). Bu sebeple özellikle iyonlaştırıcı olmayan radyasyonla çalışanların hasar meydana gelmeden önce gerekli tedbirler almaları önemlidir.

Elektromanyetik radyasyonlar frekans ve enerjilerine göre sınıflandırılabilir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Elektromanyetik dalga ve çeşitleri (Coskun, 2023)

<u>Elektromanyetik Dalga Çeşidi</u>	<u>Frekans (Hz)</u>	<u>Enerji (MeV)</u>
<u>Radvo dalgaları</u>	10^3-10^{10}	$10^{-12}-10^{-5}$
<u>Mikrodalgalar</u>	$10^{10}-10^{12}$	$10^{-5}-10^{-3}$
<u>Kızılötesi</u>	$10^{12}-10^{14}$	$10^{-3}-1$
<u>Görünür Işık</u>	$10^{22}-10^{15}$	1-3
<u>Morötesi</u>	$10^{15}-10^{17}$	3-10
<u>X-ışını</u>	$10^{17}-10^{19}$	10^2-10^4
<u>Gama ışını</u>	$10^{19}-10^{22}$	10^4-10^8
<u>Kozmik ışınlar</u>	$>10^{22}$	$>10^8$

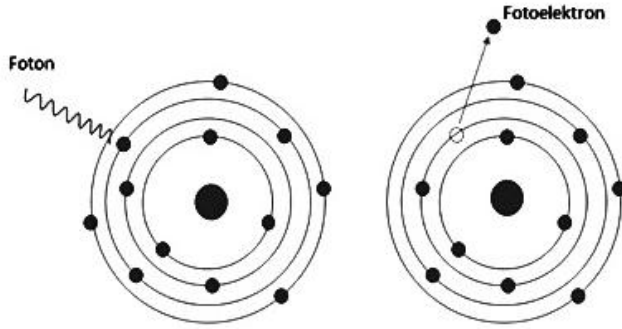
2.4. Fotonların Madde ile Etkileşimi

Radyasyonun madde ile etkileşim mekanizması parçacığın çeşidine ve enerjisine bağı olup, etkileştiği atomun proton sayısı ve yoğunluğuna göre değişir. Fotonların madde ile etkileşimleri Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu başlıkları altında incelenir. Fotoelektrik olay ve çift oluşum fotonların soğrulmasına dayalı iken Compton saçılması fotonların saçılmasına dayalı bir fiziksel olayı tanımlar.

2.4.1. Fotoelektrik olay

Fotonların madde ile etkileşiminden kaynaklanan fotoelektrik olayda $h\nu$ enerjisine sahip foton, hedef maddeyi oluşturan atomların yörüngesinden bir elektron koparır. Fotoelektrik olayın gerçekleşmesi için fotonun enerjisinin elementin bağlanma enerjisinden büyük olması gerekir. Atom numaraları küçük olan elementlerin bağlanma enerjileri de küçük

olduğu için elektron koparmak kolay olur. Foton bütün enerjisini yörüngeden koparılan elektrona aktarır, elektron, soğurduğu bu kinetik enerji ile yörüngeden ayrılarak kinetik enerji kazanır. Yörüngeden koparılan bu elektrona fotoelektron denilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Fotoelektrik olay (Çiçek, 2020)

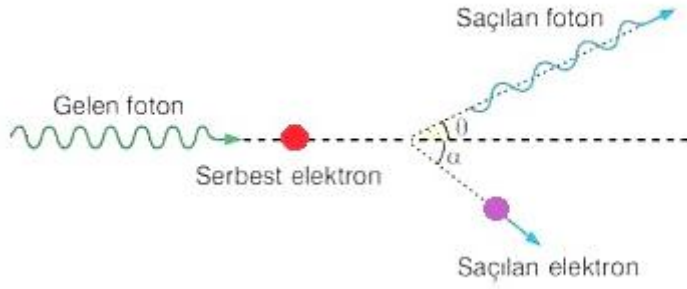
2.4.2. Compton saçılması

Yüksek enerjili fotonların (genellikle x-ışınları veya gama ışınları) serbest veya zayıf bağlı elektronlarla çarpışması sonucu, enerjisinin bir kısmını elektrona aktararak saçılması olayıdır (Şekil 2.7.). Çarpışma öncesi ve sonrası enerji ve momentum korunur. Enerji ve momentumun korunumu ilkelerine göre saçılan fotonun dalga boyu ve saçılma açısı ile saçılan elektronun enerjisi Eşitlik 2.1-2.3 ile hesaplanır.

$$E_{GELEN} = E_{SAÇILAN} + E_{ELEKTRON} \quad (2.1)$$

$$h\nu_{GELEN} = h\nu_{SAÇILAN} + h\nu_{ELEKTRON} \quad (2.2)$$

$$P_{GELEN} = P_{SAÇILAN} + P_{ELEKTRON} \quad (2.3)$$



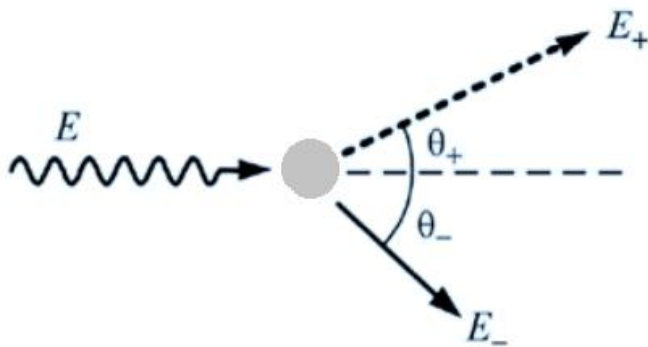
Şekil 2.7. Compton saçılmasının temsili bir gösterimi (Arpaç, 2023)

Saçılan fotonun enerjisi, gelen fotonun enerjisine ve saçılma açısına bağlı olur (Şekil 2.7). Compton saçılmasında foton soğrulmaz ve yok olmaz. Fotonun dalga boyundaki değişim Eşitlik 2.4 ile ifade edilir.

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{SAÇILAN}} - \lambda_{\text{GELEN}} = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad (2.4)$$

2.4.3. Çift oluşum

Yüksek enerjiye sahip bir fotonun, atom çekirdeğinin elektromanyetik alanına yaklaşması sonucu, sahip olduğu enerjisini pozitron ve elektron çiftine dönüştürmesi olayıdır. Gelen gama enerjisinin 1,022 MeV'den daha büyük olma şartıyla gerçekleşir. Eğer 1,022 MeV'den büyük enerjilere sahipse, kalan enerjisini kinetik enerjiye dönüştürür ve parçacıklara aktarır. Pozitron da atom içindeki elektronlarla etkileştiğinde enerjisinin tamamını kütleye dönüştürür ve zıt yüklü iki foton yayımlanır (Şekil 2.8).

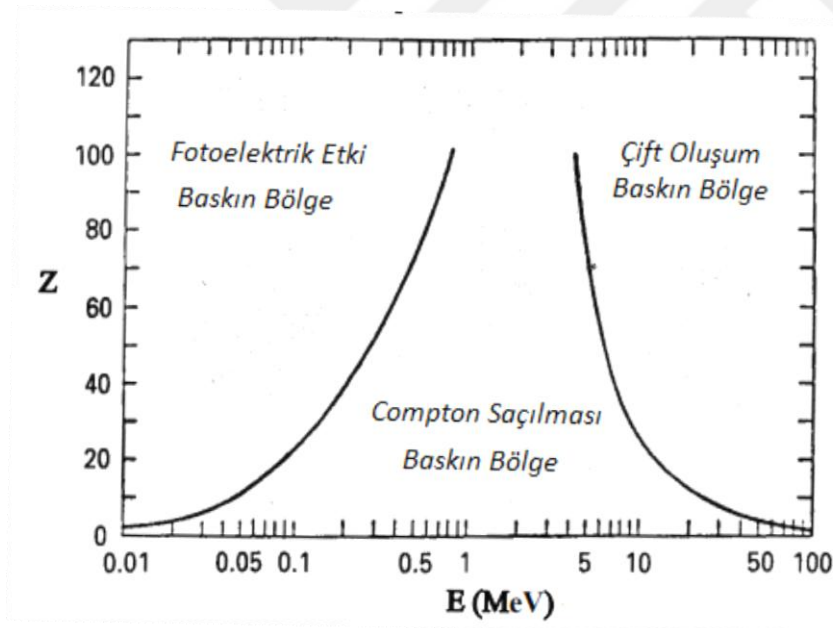


Şekil 2.8. Çift oluşumu

Compton saçılımı, çift oluşumu ve fotoelektrik olay maddeler ile fotonların etkileşimleri sonucu ortaya çıkar ve genellikle bu olaylarda madde ile etkileşime giren fotonlar enerji kaybeder veya yok olurlar. Bu enerji kayıpları maddenin atom numarası, kalınlığı, yoğunluğu gibi faktörlere bağlı olarak gerçekleşir.

2.4.4. Toplam zayıflatma katsayısı

Bir gama ışını maddenin içinden geçerken, enerjisine bağlı olarak yukarıda bahsedilen etkileşim mekanizmalarından herhangi birini gerçekleştirebilir. Üç etkileşim mekanizmasının gama ışını enerjisi ve atom numarasına göre değişimi Şekil 2.9.' da gösterilmiştir. Düşük enerjilerde fotoelektrik etkileşim, yüksek enerjilerde ise çift oluşum baskındır. Orta enerji değerlerinde ise Compton saçılması en önemli etkileşim türü olarak karşımıza çıkmaktadır.

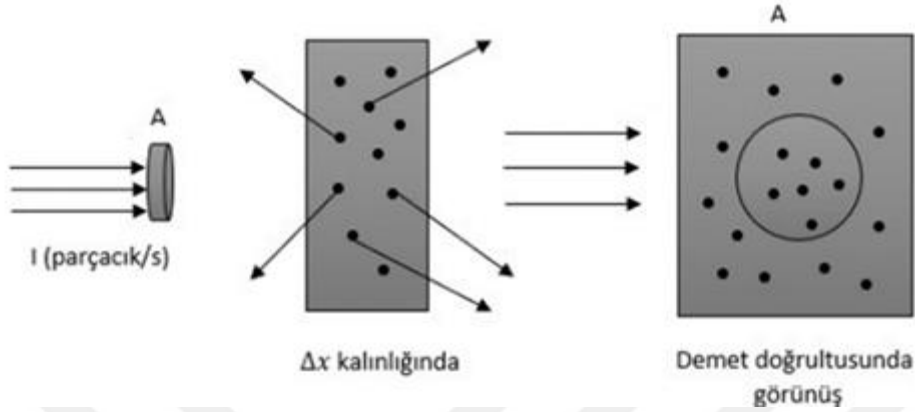


Şekil 2.9. Etkileşim mekanizmalarının enerji ve atom numarasına göre değişimi

2.5. Tesir Kesiti

Bir nükleer reaksiyonun gerçekleşme olasılığı tesir kesiti kavramı ile ifade edilir. Bir nükleer reaksiyondaki etkileşmeler çekirdekten bağımsız meydana gelir. Hedef çekirdekte

oluşacak tepkimenin olasılığını ifade etmek için Δx kalınlığında çok ince bir hedef malzemenin A yüzey alanı üzerine bir demetin düşürüldüğü varsayılır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Hedef malzemeye parçacıkların bir demetinin A alanı üzerine temsili düşürülmesi (Yücel, 2019).

Nükleer reaksiyonda tesir kesiti (σ), hedef çekirdeğin kesitsel alanından bağımsızdır. Birim zamanda N tane atom içeren bir hedef ile gelen parçacığın/merminin (I) çarpışmadan önceki ve sonraki birim alan başına mermi sayılarının ölçülmesiyle belirlenir.

n tane çekirdek hedefi için yüzey başına düşen çekirdek sayısı; $n \cdot \Delta x$

A yüzey alanındaki toplam çekirdek sayısı; $n \cdot \Delta x \cdot A$

Her çekirdeğin σ etkin alanıyla tepkimeye girdiğinde toplam etkin alan; $(n \cdot \Delta x \cdot A) \cdot \sigma$

olmak üzere, parçacık demetinin şiddeti (I) etkin alan kesri, ince levhayı geçerken değişiklik kesrini ifade eder.

$$f = \frac{\text{toplam etkin alan}}{\text{toplam yüzey alanı}} = \frac{(n \cdot \Delta x \cdot A) \cdot \sigma}{A} \quad (2.5)$$

$$f = -dI/I = n \cdot \sigma \cdot dx \quad (2.6)$$

$x=0$ değerini aldığı anda I_0 şiddetinin (-) işareti kalınlığın artmasıyla şiddetin azaldığını gösterir. Böylece,

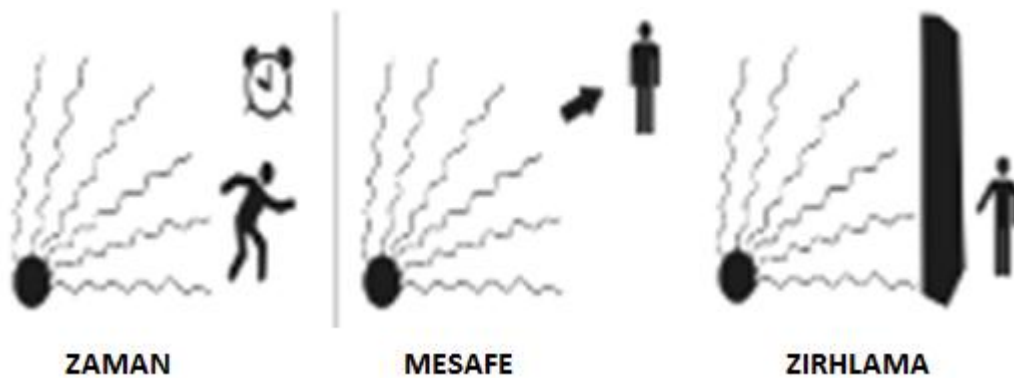
$$I = I_0 \cdot e^{-n \cdot \sigma \cdot dx} \quad (2.7)$$

yazılabilir (Yücel, 2019).

2.6. Dış Radyasyon Kaynaklarından Korunma Yöntemleri

Gelişen teknoloji nedeniyle doğal ve yapay radyoaktif maddelerin başta hastaneler olmak üzere araştırma merkezlerinde, nükleer tesislerde, endüstride, tarım alanları ve ziraat uygulamalarında, tohum ve böcek ıslahında kullanımı hızla artmaktadır. Kozmik radyasyon, vücudumuzda bulunan doğal radyoaktif maddeler, yiyecek ve içeceklerimizdeki karasal radyasyon kaynaklı radyoizotoplar, tarım arazilerinde kullanılan fosfor içerikli suni gübreler, nükleer tesisler ve radyoaktif madde içeren cihazlar ile hastalık teşhis ve tedavisinde kullanılan cihazlar, korunmamız gereken bir radyasyon kavramını karşımıza çıkarmıştır. Yararlı etkilerinin ve kullanım çeşitliliğinin yanında oluşturduğu biyolojik riskleri en aza indirebilmek amacıyla radyasyondan koruyucu özel elbiselere ve radyasyona karşı güçlendirilmiş çalışma alanlarına gereksinim duyulmaktadır.

Radyasyona maruz kalındığında, canlılar üzerinde ciddi biyolojik etkiler yaratmasından dolayı, maruz kalınan radyasyon dozunun müsaade edilen değerinden düşük tutulması gerekir. Bu dozun düşük tutulması için gerekli tedbirler alınmalıdır. Dış radyasyon kaynaklarından korunmak için üç temel yöntem bulunmaktadır. Bunlar zaman kuralı, mesafe kuralı ve zırhlama kuralıdır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Dış radyasyon kaynaklarından korunmanın üç temel yöntemi (EPA, 2025).

2.6.1. Zaman Kuralı

Zaman kuralı, radyasyondan korunmada en basit kural olarak ifade edilebilir ve ALARA (“As Low As Reasonably Achievable”, makul olarak gerçekleştirilebilecek ölçüde düşük) prensibine dayanır ve mümkün olduğunca az radyasyona maruz kalmayı amaçlar. Maruz kalma süresini ve alınan dozu azaltmak için geliştirilmiştir (EPA, 2018). Radyasyon alanında kalınan süre ne kadar az olursa o kadar az doza maruz kalınır. Bu nedenle yapılacak işlemin daha kısa sürmesi için doz hızının önceden bilinmesi yapılacak işlemin daha kısa sürmesini sağlar.

Maruz kalınan doz miktarı kaynak yakınında geçirilen süre ile orantılıdır.

$$Doz = (Doz \text{ Şiddeti}) \times (Zaman) \quad (2.8)$$

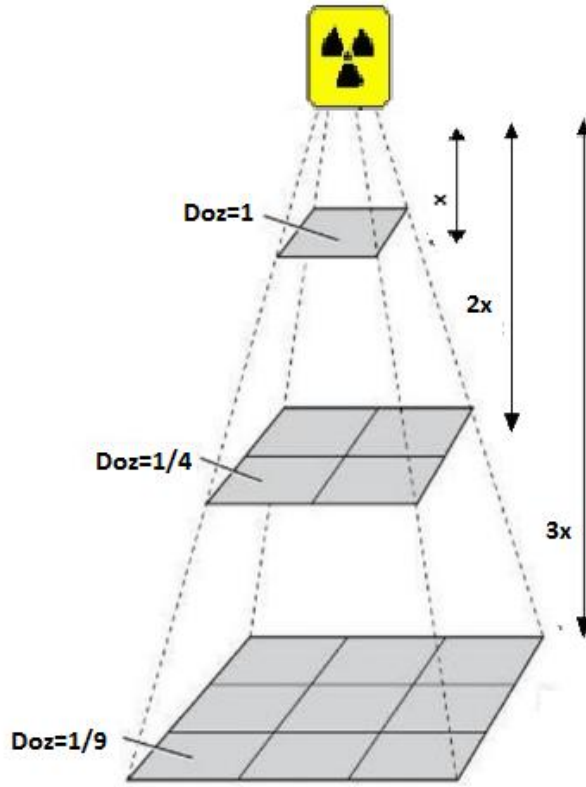
Alınan doz (ΔX) zaman (t) ile orantılıdır:

$$\Delta X = \Gamma \frac{A}{r^2} \Delta t \quad (2.9)$$

Burada, A radyoaktif kaynağın aktivitesini, r kaynakla aradaki mesafeyi ve Γ gama ışını sabitini ifade eder.

2.6.2. Mesafe Kuralı

Radyasyon kaynağından uzaklaştıkça radyasyona maruz kalınan alan şiddeti azalır çünkü fotonların enerjisi ve şiddeti artan mesafe ile azalmaktadır. Girici bir radyasyon kaynağının şiddetinde mesafeye bağlı azalma, bu mesafenin karesiyle ters orantılı olur (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Ters kare kanununa göre radyasyon şiddetindeki azalma

Ters kare kanunu adı verilen bu kanuna göre radyasyon kaynağından belli bir uzaklıkta maruz kalınabilecek doz miktarının hesaplama formülü Eşitlik 2.10 ile verilmiştir.

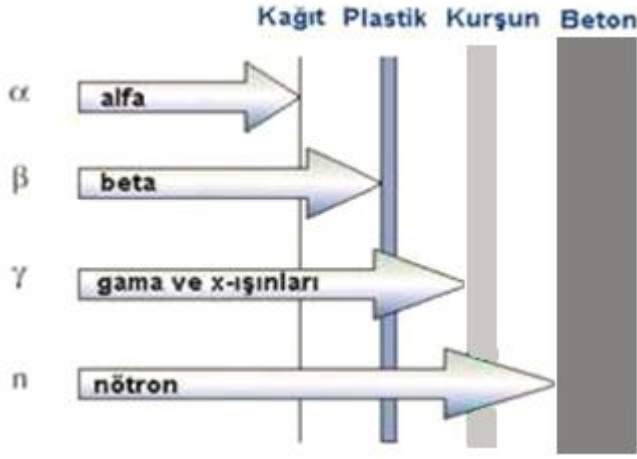
$$D_r = D_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (2.10)$$

2.6.3. Zırhlama Kuralı

İyonlaştırıcı radyasyonun insan sağlığına ve doğaya olan zararlarını en aza indirmek için kullanılan en iyi korunma yöntemi zırhlama yöntemidir. Zırhlama yönteminde; kişi ile radyasyon kaynağı arasına koruyucu engel konulup maruz olunan radyasyon dozu en aza indirilir.

Radyasyon, zırh materyalinde kullanılan malzemenin atom ve molekülleri ile etkileşmesi sonucunda, zırh materyalinin özelliklerine bağlı olarak enerjisini kaybeder. Radyasyonun enerjisini minimum düzeye indirebilmek amacıyla radyasyon kaynağı ile kişi arasına

konulan malzemeye zırhlama malzemesi denilir. Farklı radyasyon türleri için seçilmesi önerilen zırhlama malzemeleri Şekil 2.13’de görölmektedir.



Şekil 2.13. Farklı radyasyon türlerine göre zırhlama malzemeleri (NED, 2017).

Radyasyonda zırhlama amacıyla kullanılması planlanan malzemelerin radyasyon tutuculuğunu değerlendirebilmek için bazı parametrelerin incelenmesi gerekmektedir. Bu parametreler radyasyon zırhlama parametreleri olarak adlandırılır. Bahsi geçen parametreler şu şekilde sıralanabilir:

2.6.3.1. Lineer soğurma katsayısı

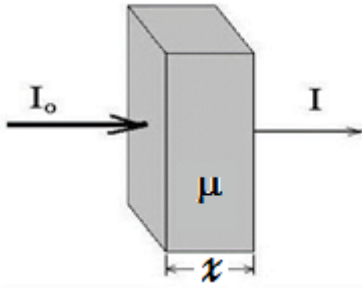
Lineer soğurma katsayısı (μ) madde ortamının birim yüzeyine gelen fotonun azalma miktarını ifade eder. Radyasyon yoğunluğundaki azalma miktarı soğurulan maddenin kalınlığı (x) ile orantılı olmalıdır ve Beer-Lambert yasasına göre yazılırsa (Şekil 2.14);

$$dI = -\mu I dx \rightarrow I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.11)$$

olur. Burada x soğurucu maddenin kalınlığı, μ lineer soğurma katsayısı (cm^{-1}) olarak ifade edilir. Buradan

$$\mu = -\frac{\ln(I/I_0)}{x} \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 2.14. Lambert–Beer yasasına göre fotonların madde ile etkileşimi (Bengtson, 2019).

Radyasyondan korunmak için kullanılan kalkan için kaynaktan çıkan radyasyon yoğunluğunun (I_0), malzemeyi geçen radyasyon yoğunluğuna (I) göre daha büyük olması gerekir (Şekil 2.14). Beer- Lambert yasası (denk. 2.1) radyasyon türünden bağımsız olarak üstel olarak ifade edilir (Chilton ve diğerleri, 1984). Radyasyon yoğunluğunun zırlama sonrasında değişimi; zırlama materyalinin kalınlığı ve dayanma gücü ile orantılı olup, zamanla azaldığı için negatif değer alır (Sezer, 2022).

2.6.3.2. Kütle soğurma katsayısı

Kütle soğurma katsayısı (μ_m), gelen fotonun madde ile etkileşmesi sonucunda enerjisinin soğrulmasını ifade eden bir etkileşim parametresidir. Bir maddenin doğrusal zayıflatma katsayısının yoğunluğuna oranı, kütle zayıflatma katsayısı olarak bilinir (Hubbell, 1982). Kütle zayıflatma katsayısının zırlayıcı materyalin yoğunluğu ile çarpılması sonucu lineer soğurma katsayısı elde edilir.

Kütle soğurma katsayısı (cm^2/g), saçılma etkileşimleri de dahil olmak üzere tüm etkileşim süreçlerini içerdiği için, soğurucu malzemenin yapısı kadar gelen fotonun enerjisine de bağlıdır. Kütle soğurma katsayısının hesaplama formülü Eşitlik 3.10'da görülmektedir.

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\rho x} \quad (2.13)$$

Bu eşitlikte;

I = Maddeden geçen foton sayısı,

I_0 = Madde ortamına gelen fotonların sayısı,

ρ = malzeme yoğunluğu (g/cm^3),

x = soğurucu maddenin kalınlığı (cm) olarak verilir.

Kompozit materyaller, birden fazla malzemenin birleştirilmesi ile oluştuğu için, zırlama parametreleri hesaplanırken kütle soğurma katsayısı için kullanılması gereken hesaplama yöntemi Eşitlik 2.14' de görülmektedir (Jackson ve Hawkes, 1981).

$$\mu_m = w_i (\mu/\rho)_i \quad (2.14)$$

Bu eşitlikte;

w_i , malzemedeki i. elementin ağırlıkça birleşim kesri (ağ. %),

$(\mu/\rho)_i$, i. foton enerjisi için kütle soğurma katsayısıdır.

2.6.3.3. Ortalama serbest yol

Bir malzemenin maruz kaldığı farklı gamma enerjilerindeki radyasyon zırlama performansını belirlemek amacıyla kullanılan ortalama serbest yol (MFP), gama radyasyonunun zırlayıcı madde içinde ilerlerken etkileşme gerçekleştirmeden aldığı yol olarak tanımlanır ve hesaplama yöntemi Eşitlik 2.15' de görülmektedir (Alım vd., 2020).

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (2.15)$$

2.6.3.4. Yarı-değer kalınlık

Gelen fotonun malzeme ile etkileşmeden önceki yoğunluğunu (I_0) yarıya indirebilmek ($I = I_0/2$) için gerekli zırlama malzemesinin kalınlığı yarı-değer kalınlık olarak tanımlanır. HVL veya $x_{1/2}$ ile sembolize edilir.

Bir kaynaktan çıkan ve zırlama materyali üzerine düşen fotonların sayısının üstel azalımını gösteren yarı değer kalınlık hesaplama formülü Eşitlik 2.16' da görülmektedir.

$$\frac{I_x}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}} \quad (2.16)$$

Eşitlik 2.16 kullanılarak elde edilen yarı-değer kalınlığı, Eşitlik 2.17' de verilmiştir.

$$x_{1/2} = HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.17)$$

Her malzemenin radyasyon zırlama özelliği vardır. Zırlamada kullanılacak malzemeler, radyasyonun enerjisine ve radyasyonun türüne göre seçilmelidir (Bor, 2016). Materyal seçimi, radyasyonun soğurulmasına bağlı olduğu gibi farklı özelliklere de bağlıdır. Bu özelliklerden başlıcaları; malzemenin radyasyonu zayıflatması, ısı iletkenlik katsayısı, radyasyon hasarına karşı gösterdiği direnç, homojen olması, kullanım süresi ve ekonomikliği olarak gösterilebilir (Low ve Noor Azman, 2020:101).

Radyasyondan korunmak amacıyla zırlama yapılırken radyasyonun türüne, enerjisine ve doz azaltma seviyelerine uygun bir koruyucu malzeme seçmek gerekir. Bunun için, gelen radyasyon ve soğurucu ortamın atomlarının malzeme ile etkileşimi esas alınarak zırlama materyali seçilir. Bu etkileşimler radyasyonun türüne ve soğurucu ortamın atom numarasına bağlıdır (Sezer, 2022).

Fotonlar girici olduklarından dış radyasyon maruziyeti açısından önemlidirler ve kurşun, çelik gibi yüksek atom numaralı yoğun malzemelerden yapılan zırhlar gerekli olurken nötronlar için su, prafin, beton gibi yüksek hidrojenli malzemelerden yapılan zırhlar tercih edilir. Alfa parçacıkları, dış radyasyon tehlikesi yaratmadıkları için çoğunlukla zırlama gerektirmezler. Beta parçacıkları için plastik, alüminyum gibi düşük yoğunluklu materyallerle kullanılır.

Yaygın olarak kullanılan zırlama materyalleri hidrojen içeren bileşikler, beton çeşitleri, su, çelikler, polietilen, bor katkılı parafin ve bor katkılı metaller olup zırh olarak kullanılan maddelerin çoğu ikincil gama ışını oluşmasına sebep olurlar ve bu ışınları da durdurmak için ikinci bir zırha gereksinim duyulur (Rockwell, 1956, Demir, 2009).

Son yıllarda araştırmacılar, radyasyon zırlamada kullanılmak üzere kurşuna ve betona alternatif olacak yeni zırh materyalleri arayışına girmişlerdir. Literatüre bakıldığında, koruyuculuğu yüksek materyallerden kurşuna ve betona alternatif olabilecek çelik, alaşım, cam ve kompozit malzemelerin yeni zırh materyali olarak tercih edildiği görülmektedir.

Chen, Bourham ve Rabiei (2014) sızdırılmış dökme alüminyum, kapalı hücreli kompozit metal köpükler ve açık hücreli alüminyum köpüklerin gama ışını zayıflatma etkinliğini 2, 5 ve 10 g/cm² lik üç farklı alan yoğunluğuna sahip altı numune seti için 0,060; 0,662; 1,173 ve 1,332 MeV foton enerjilerinde incelemişlerdir. Kapalı hücreli kompozit metal köpüklerin, dolgulu açık hücreli alüminyum köpüklere kıyasla daha iyi bir koruma kabiliyeti sergilediği ayrıca, yakın hücreli kompozit metal köpüklerin 0,662 MeV'nin altındaki enerjiler için dökme alüminyuma kıyasla üstün koruma etkinliği sağladığı, çelik-çelik kompozit metal köpüğün ve Al-çelik kompozit metal köpüğün kütle zayıflama katsayılarının alüminyum A356'dan %400 ve %300 daha yüksek ölçüldüğünü gözlemlemişlerdir. Bu çalışma ile düşük enerjili gama ışınının zayıflatılması için kullanılan mevcut ağır malzemelerin yerine hafif kompozit metal köpüklerin kullanılmasının, yüksek enerji emilimi ve mükemmel ısı reddetme yetenekleri gibi ek avantajları olduğunu göstermişlerdir (Chen ve diğerleri, 2014).

Çetin ve ekibi (2017) tarafından yumurta kabuğu ve fıstık kabuğu tozu gibi farklı gıda malzemeleriyle katkılanmış soda-kireç-silika camlarının radyasyon zırhlama özellikleri araştırılmıştır. Yumurta kabuğu ve fıstık kabuğu tozları, atık kabukların bir akik havanda öğütülmesiyle elde edilmiştir. Değişen yumurta kabuğu/fıstık kabuğu içeriğine sahip SLS cam numuneleri eritilerek üretilmiştir. Yumurta kabuğu ile katkılanmış soda-kireç silika camlarının, radyasyon kalkanı malzemesi olarak fıstık kabuğu içerenlere göre daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Singh ve diğerleri (2017) çelik cüruf, yumuşak demir cürufu ve sert demir cürufu kullanarak hazırladıkları 10 farklı numunede gama radyasyonu-madde etkileşim parametrelerini 60 keV, 136 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjilerinde teorik olarak hesaplanmışlar ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır (Singh ve diğerleri, 2017).

Hassanzadeh ve SadatKiai (2018), MnFe₂O₄ nanopartiküllerinden oluşan yeni bir beton malzemesi için gama ışını zayıflatma katsayılarını ve doz oranlarını Monte Carlo kodu kullanarak hesaplamış ve SiO₂ nanopartikül beton malzemesi için elde edilen teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. SiO₂ nanopartikül malzemelerindeki doğrusal zayıflama katsayısı için simülasyonlar ile teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki ortalama bağıl farkları sırasıyla %6,4 ve %5,5 olarak bulmuşlardır. Betona SiO₂ ve MnFe₂O₄

nanopartiküllerinin eklenmesinin, betonun nükleer özelliklerini iyileştirdiği ve radyasyon kalkını açısından daha kullanışlı hale getirebileceği sonucuna varmışlardır.

Mkhaiber ve Dheyaa (2018) temel malzemesi epoksi ve farklı katkı oranlarında (%10, %20, %30, %40, %50) C, Ni, PbO ve Bi kullanarak 1x10x10 boyutlarında ürettikleri kompozit malzemelerin lineer azaltma katsayısı, etkin atom numarası ve yarı kalınlık değeri parametrelerini 1218 keV-1480 keV enerji aralığında, NaI(Tl) dedektörü yardımıyla belirlemişlerdir. Bu parametrelerin takviye oranı ve gama ışını enerjisinden etkilendiği; doğrusal zayıflama katsayısının ve atom etkin sayısının takviye oranı arttıkça arttığı ve özellikle yüksek konsantrasyonlarda (%40, %50) ve düşük enerjilerde ($E\gamma < 0.662$ MeV) enerji arttıkça azaldığı, $X_{1/2}$ değerleri takviye oranı arttıkça azaldığı görülmüştür. Üretilen tüm zırhlama malzemeleri kurşunla karşılaştırıldığında, bu zırhlama malzemelerinin kurşundan daha hafif olduğu ve bu nedenle kurşun ve beton gibi geleneksel malzemelere göre daha tercih edilir olduğu sonucuna varmışlardır (Mkhaiber ve Dheyaa, 2018).

Cherkashina, Pavlenko ve Noskov (2019) %70 bizmut silikat ile güçlendirilmiş polimid tabanlı kompozitin radyasyon zırhlama özelliklerini 1- 6 MeV elektron enerjisi ve 0,4-0,662 MeV foton enerjisi aralığında incelemişlerdir. Çalışma bulgularından, etkin elektron aralığının polimide göre iki kat azaldığı ve 0,5MeV-1MeV foton enerjilerinde alüminyuma göre lineer azaltma katsayılarının sırasıyla 2,5 kat ve 1,4 kat daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır (Cherkashina ve diğerleri, 2019).

Kavanoz ve diğerleri (2019) hem gama ışını zırhlaması hem de yangına dayanıklı olabilecek yeni kompozit malzemeler üzerine yaptıkları çalışmada farklı oranlardaki vanadyum cürufu, epoksi reçinesi ve antimon-trioksit ile hazırlanan üçlü kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini farklı enerjilerde incelemişlerdir. Epoksi reçine-vanadyum cürufu ve antimon-trioksit üçlü camsı kompozitin betondan daha iyi radyasyon zırhlama özelliklerine sahip olduğunu, ancak kurşundan daha zayıf olduğunu göstermişlerdir (Kavanoz ve diğerleri, 2019).

Tijani ve Al-Hadeethi (2019) izoftalik-Bi₂O₃ polimer kompozitinin (100-x)C₈H₆O₄-xBi₂O₃ (burada x = 40, 30, 20, 10, 5 ve 0 yüzdelik kesirler), tanısal nükleer tıp merkezlerinde yaygın olarak kullanılan enerjilerde radyasyon koruyucu bariyer olarak uygunluğu araştırmış, İzofthalik-Bi₂O₃ Polimer Kompozitlerinin 140 keV (Tc-99m) ve 511 keV (F-18)

enerjilerindeki kütle zayıflama katsayılarını (MAC) incelemiş ve bu malzemenin hem hafif hem de radyasyondan korunma açısından betona göre daha etkin olduğunu ifade etmişlerdir (Tijani ve Al-Hadeethi, 2019).

Alorfi, Hussein ve Tijani (2020) tarafından Nükleer Tıpta yaygın olarak kullanılan Tc-99m ve I-131 radyoaktif kaynaklarının 140 keV ve 364 keV foton enerjileri için, dört farklı içerikli kaya malzemesinin radyasyon zırhlama parametreleri incelenmiş, bu malzemelerin tuğla ve betona kıyasla daha etkin bir radyasyon zırh malzemesi olduğu saptanmış, maliyet ve etkin radyasyondan koruma özelliği bakımından betonun yerini alabileceği ifade edilmiştir (Alorfi ve diğerleri, 2020).

Turhan, Akman, Polat, Kaçal ve Demirkol (2020) tarafından farklı hematit oranlarına sahip (%25, 50, 75 ve 100) polimer kompozitlerin gama radyasyonu zayıflatma karakteristiklerini belirlemek için, geçirgenlik faktörü, kütle ve doğrusal zayıflatma katsayıları, yarım ve onda bir değer tabakaları, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu, enerji emilim birikim faktörü ve maruziyet birikim faktörü gibi bazı gama ışını radyasyonu zayıflatma parametreleri HPGe dedektörü ve sekiz farklı radyoaktif kaynak kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hematit (%100) polimer kompozit numunesinin diğer hazırlanmış kompozitlere göre daha iyi bir gama radyasyon zırhlama malzemesi olduğu bildirilmiştir (Turhan ve diğerleri, 2020).

Abualroos, Yaacob ve Zainon (2023) epoksi tabanlı ve farklı oranlarda tungsten karbit, tungsten karbit kobalt, bizmut oksit, baryum sülfat veya kalay içeren malzemelerle kompozitler üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu zırhlama özelliklerini 140 ve 364 keV enerjilerde incelemişlerdir. Katkılanan malzemelerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerini iyileştirdiğini ve 140 keV'de %98 ve 364 keV'de %65 gama radyasyonu zırhlamasına ulaşıldığını raporlamışlardır.

Coşkun ve Çetin (2023) tarafından bizmut oksitin (Bi_2O_3) gama ışını radyasyonu emilim özelliklerini araştırmak ve Bi_2O_3 'ün zırhlanmasında kurşun oksit (PbO) katkısının etkisini belirlemek amacıyla Bi_2O_3 , PbO ve %50 Bi_2O_3 -%50 PbO için radyasyon zayıflatma parametreleri 511 keV, 662 keV, 1173 keV, 1274 keV ve 1332 keV enerji aralığında GATE/Geant4 (Tomografik Emisyon için Geant4 Uygulaması) simülasyon kodu ile ve 1 keV ila 1 GeV enerji aralığında XCOM programı kullanılarak hesaplanmıştır.

GATE/Geant4 sonuçlarının XCOM sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğu bildirilmiştir (Coşkun ve Çetin, 2023).

Gili ve Jecong (2023) tarafından Filipin maden atıklarını ve madencilik yan ürünlerinin (ferronikel cürufu, nikel madeni atıkları, altın madeni atıkları ve bakır madeni atıkları) radyasyon zırlama özellikleri incelemiş, incelenen maden atıkları arasında, nikel atıklarının tipik olarak X ve gama ışınlarını zayıflatması açısından en iyi dolgu malzemesi olarak önerilmiştir (Gili ve Jecong, 2023).

Poyraz, Yigitoglu, Canimkurbey ve Cetin (2025) tarafından cam numuneleri sırasıyla CuO, ZnO ve TiO₂ ile 1:1:3 oranında hazırlanan ve %50 ZrB₂.50%PbO karışımı olan bir çözelti ile kaplanmıştır. Hazırlanan numunelerin radyasyon parametreleri deneysel olarak NaI (TI) dedektörlü gama spektrometrisi ile Na-22 (511 keV, 1274 keV), Cs-137 (662 keV) ve Co-60 (1173 keV, 1332 keV) radyoaktif kaynakları kullanılarak incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen radyasyon zırlama parametreleri (doğrusal zayıflama katsayısı, yarım değer tabakası ve ortalama serbest yol), Geant4 tabanlı GATE simülasyon programı ve XCOM programında teorik olarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılmış ve deneysel değerler ile teorik değerlerin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür (Poyraz ve diğerleri, 2025).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

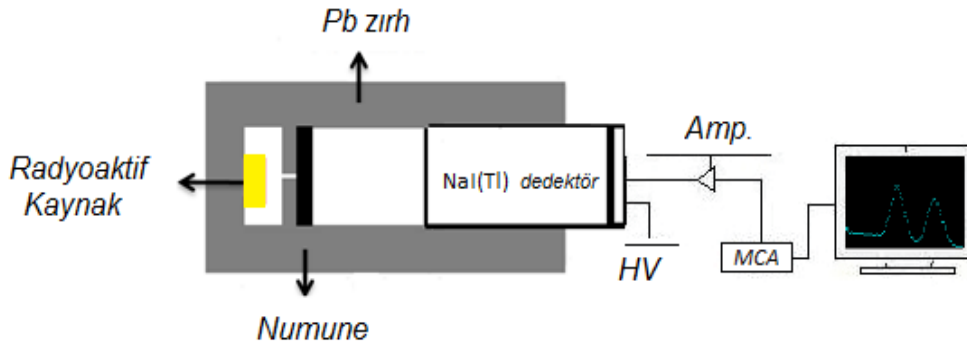
Bu çalışmada endüstride sıklıkla kullanılan çelik ve alüminyum numunelerinin lineer soğurma katsayıları, ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktif kaynaklarından elde edilen 662, 1173 ve 1332 keV enerjilerinde NaI(Tl) detektörü ve çok kanallı analizörden oluşan gama spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar Amasya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan Radyoaktif Araştırma Laboratuvarında, MAESTRO-32 7.01 yazılımı kullanan NaI (Tl) detektörlü gama spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1. Gama Spektrometre Sistemi

Bir radyoaktif kaynaktan yayınlanan radyonüklidlerin varlığının tespit edilmesi ve aktivitelerinin belirlenmesi, yayılan gama ışınlarının enerjilerine göre ayırt edilebilmesiyle mümkündür.

Gama spektroskopi sistemini oluşturan bileşenler Şekil 3.1.'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Gama spektroskopi sistemini oluşturan bileşenlerin şematik gösterimi

3.2. NaI (Tl) detektörü

Dedektör, radyasyon kaynağından gelen radyoaktif ışınlar sonucu oluşan analog elektrik sinyallerini dedekte eder. Radyasyon dedeksiyonu, nükleer dedektörlerin geliştirilmesi ve dizaynı ile radyasyondan korunma ilkelerinin belirlenmesi gibi birçok alanın kullanımında

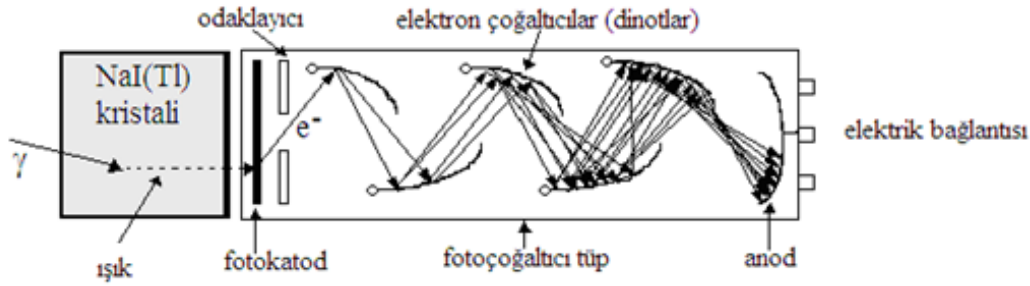
önemli yer tutar. Kullanılacak dedektör malzemesi parçacık türüne ve enerjisine göre seçilmelidir.

Radyasyon ölçümlerinde kullanılan dedektörlerin çalışma prensipleri birbirlerine benzer özellikler gösterir. En yaygın olarak kullanılan sintilasyon malzemesi NaI (Tl) (talyum ihtiva eden sodyum iyodür) dür ve özellikle gama ışınlarının ölçümü için mükemmeldir. Maksimum emisyonun dalga boyu 415 nm'dir. İyot, sodyum iyodürde durdurma gücünün çoğunu sağlar ($Z=53$) ve özellikle yüksek atom numarasına sahip olduğu için çok yüksek verimlilik gösterir.

Bu kristal sintilatörler, yüksek yoğunluk, yüksek atom numarası ve yaklaşık 10^{-6} sn darbe bozulma süreleri ile karakterize edilir. NaI inorganik kristallerin dezavantajı, nemden korunmaları için hava geçirmez bir kaptaki muhafaza edilme gerekliliğidir. Bu nedenle NaI(Tl) kristali, tüm kristal/fotoçoğaltıcı ünitesi için uygun bir montaj görevi gören alüminyum ile kaplanmak suretiyle nemden korunur.

Sintilasyon dedektörü iki ana bölümden oluşur. İlk bölümde parıldama özelliği olan sintilatör, ikinci bölümde foto katot odaklayıcı elektrot, dinotlar ve fotoçoğaltıcı tüp bulunur. Sintilasyon dedektörü, gama ışınlarını kaydetmek için ışın etkileşimlerini sağlar. Bu nedenle, gama ışınları elektron-pozitron çiftine veya elektrona transfer edilir. Uyarılmış elektronlar temel enerji seviyesine geri dönerken görünür ışık veya çok yakınında bir ışın gönderirler. Bu tür ışık flüoresan radyasyon olarak adlandırılır (Coşkun, 2023). Foto çoğaltıcıda, bu ışınlar fotokatotla etkileşime girerek elektron çoğaltıcı tabakalardan birine doğru hareket eder. Elektron çoğaltıcı tabakasıyla etkileşen elektronlar, çoğaltıcıdan birden fazla ikincil elektron alabilirler. Bu, başlangıç enerjilerine bağlıdır. Koparılan elektronlar da odaklayıcılara ulaşmadan önce elektron çoğaltıcıya gider. Anottan gelen elektronlar bir akım sinyali oluşturur. Bu sinyaller daha sonra fotoçoğaltıcılar ve elektronik bileşenler tarafından okunabilir spektruma dönüştürülür (Akyıldırım, 2011).

Bu çalışmada 3"x3" boyutlu NaI(Tl) sintilasyon detektörü (ORTEC) kullanılmıştır. Kullanılan dedektörün çalışma mekanizması Şekil 3.2.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. NaI(Tl) detektörünün çalışma mekanizması

Sintilatör malzemesi ile etkileşen radyasyon, bu etkileşim sonrası enerjisini ortamdaki atomları uyararak kaybeder. Kristalde, foton veya bir yüklü parçacığın neden olduğu ilk iyonlaşma nedeniyle serbest elektronlar oluşur. Kristalin moleküllerine veya atomlarına bağlanan bu elektronlar görünür ışık ışını yayınlanmasına sebep olurlar. Fotokatot'a çarpan ışık ışınları, foton başına en çok bir elektron salınmasına neden olur. Fotokatotun dış yüzeyi ince bir Cs-Antimon alaşımı ile kaplanmıştır. Her bir çoğaltıcıda (800 ila 1500) voltaj yükselmeleri vardır. Salınan elektronlar, fotokatot içerisinde bulunan ve dinod adı verilen elektron çoğaltıcılar sayesinde çoğaltılır, şekillendirilir ve gelen radyasyonun enerjisi ile orantılı sayısal verilere dönüştürülür.

3.3. Elektronik Aygıtlar ve Yazılım

Dedektördeki radyasyon sinyallerini yükseltmek için yükseltici kullanılır. Bu sinyaller, Çok Kanallı Analizöre (CKA) sahip DSPEC LF'e gönderilir. DSPEC LF ile sayısal hale getirilen veriler, dedektörde bulunan MAESTRO-32 yazılımı ile spektruma dönüştürülür. Bir Gauss eğrisi ortaya çıkar. Yazılım, kanal sayısı ve enerji başına düşen sinyalleri kaydetmektedir. Bir yüksek gerilim birimi sistemi besler. Bu birim, dedektörün çalışma gerilimi olan 800 V'yi sağlar.

3.4. XCOM

XCOM programı; element, bileşik ve karışımların hesaplamalarında kullanılan ve 1 keV ile 100 GeV arasında kütle zayıflama katsayılarını hesaplayan bir bilgisayar programıdır. Oluşturulan materyalin fotoelektrik etki, çift oluşumu, tutarsız saçılma ve tutarlı saçılma gibi seçenekler için hesaplama yapılabilir.

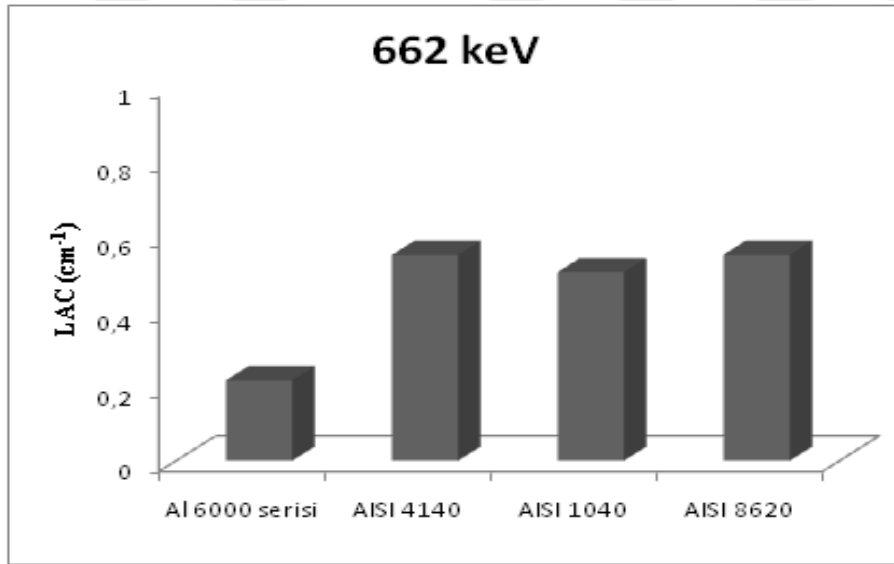
XCOM programı, karışımların kütle soğurma katsayılarını hesaplamak için karışım kuralını kullanır (Jaeger ve diğerleri, 1968). Bu işlem, karışımı oluşturan bileşiklerin her birinin kısmi kütle zayıflatma katsayılarının ağırlıklı ortalamalar alınarak gerçekleştirilir (Jalali ve Mohammadi, 2008).



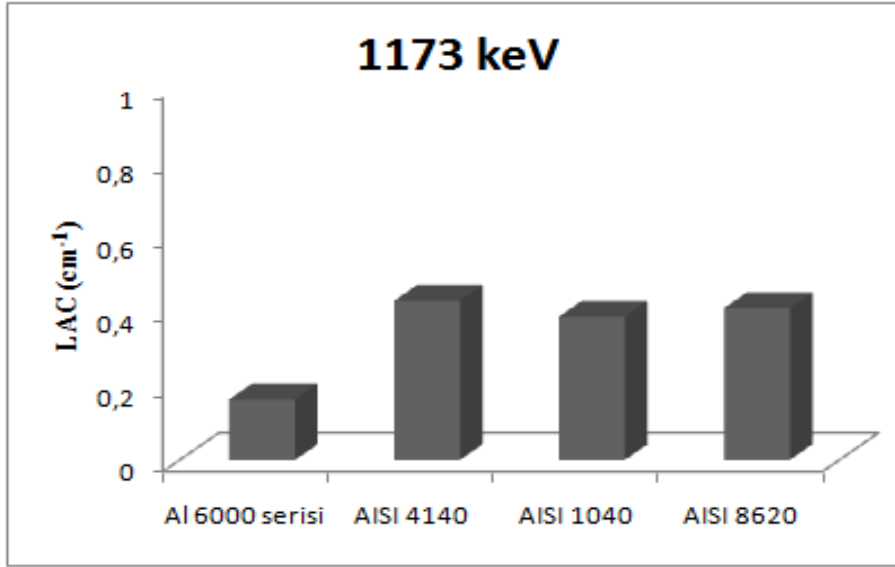
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Endüstride sıklıkla kullanılan Al 6000 serisi, AISI 4140 alaşımlı çelik, AISI 8620 alaşımlı çelik ve 1040 imalat çeliği numunelerinin radyasyon zırlama özelliklerini incelemek için ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktif kaynaklarından elde edilen 662, 1173 ve 1332 keV enerjilerindeki gama pikleri kullanılmış ve elde edilen ölçümlerden hesaplanan lineer zayıflatma katsayısı μ (cm^{-1}) değerleri kullanılarak numunelerin radyasyon zayıflama özellikleri hesaplanmıştır.

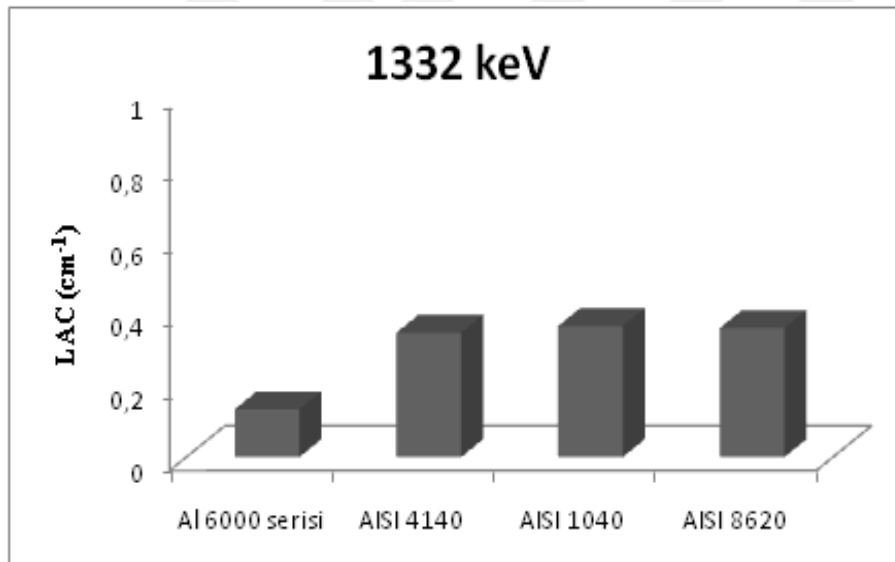
Numunelerin ölçümlerinden elde edilen lineer zayıflama katsayısı sonuçları Şekil 4.1-Şekil 4.3 de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. 662 keV enerjisi için deneysel lineer zayıflama katsayıları

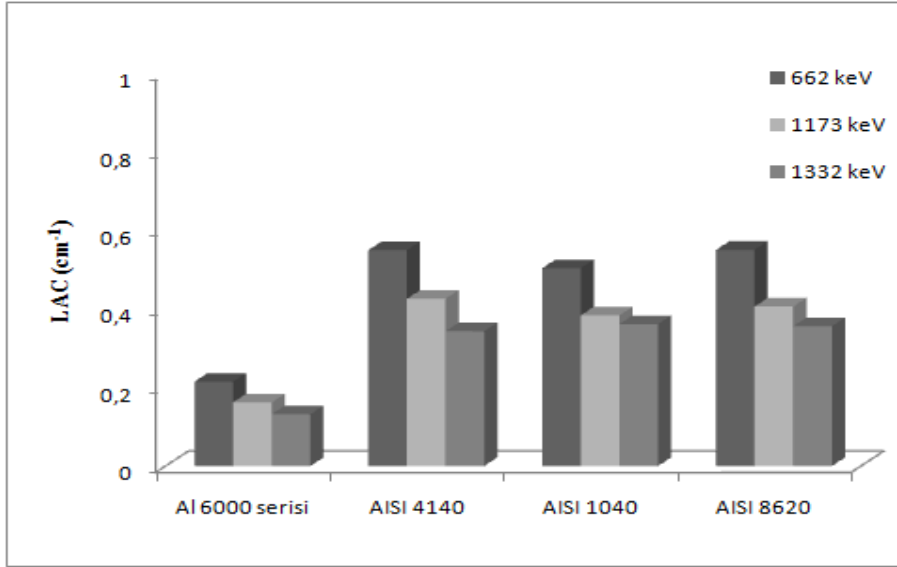


Şekil 4.2. 1173 keV enerjisi için deneysel lineer zayıflama katsayıları



Şekil 4.3. 1332 keV enerjisi için deneysel lineer zayıflama katsayıları

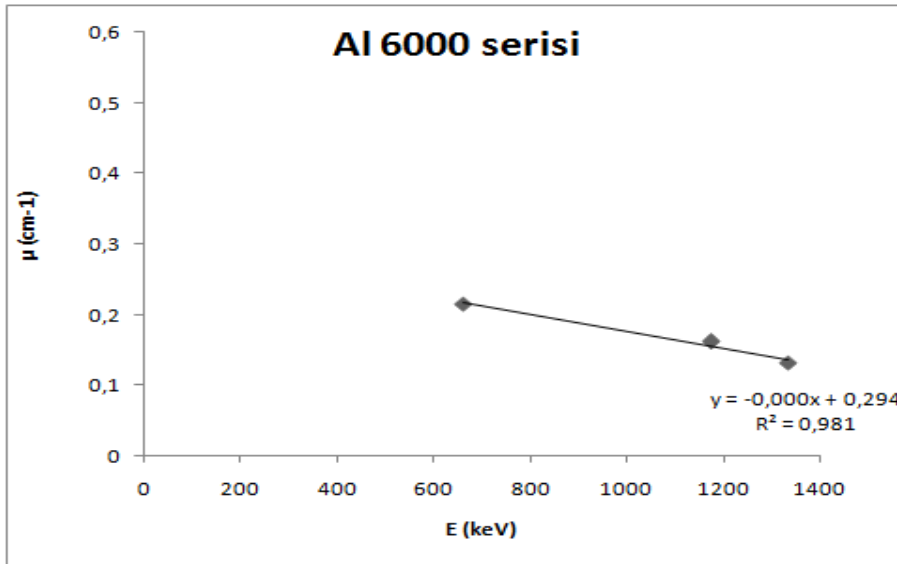
Endüstriyel malzemelerin deneysel soğurma katsayısı değerlerinin enerji ile değişimi Şekil 4.4. de verilmiştir.



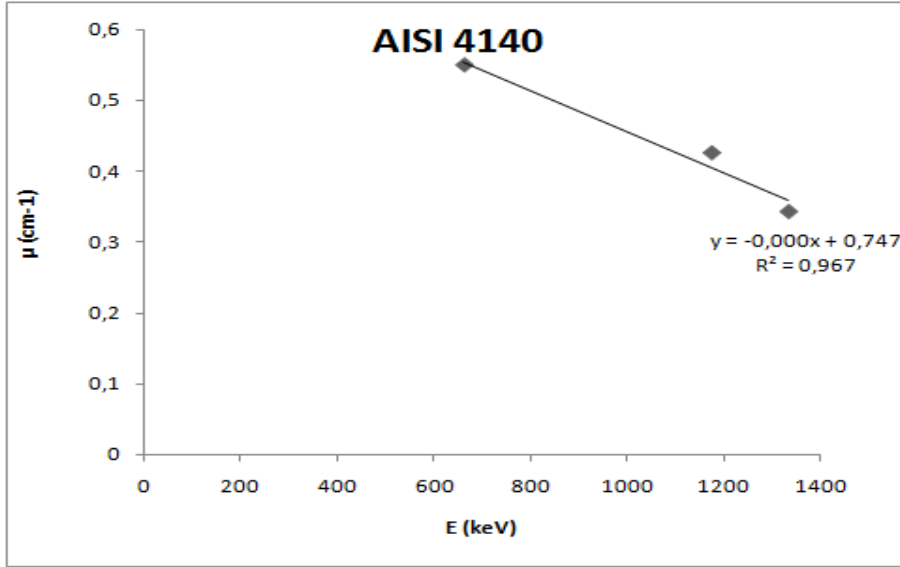
Şekil 4.4. Deneysel soğurma katsayılarının enerji ile değişimi

Şekil 4.4. den, lineer soğurma katsayısının artan gama enerjisi ile azaldığı açıkça görülmektedir.

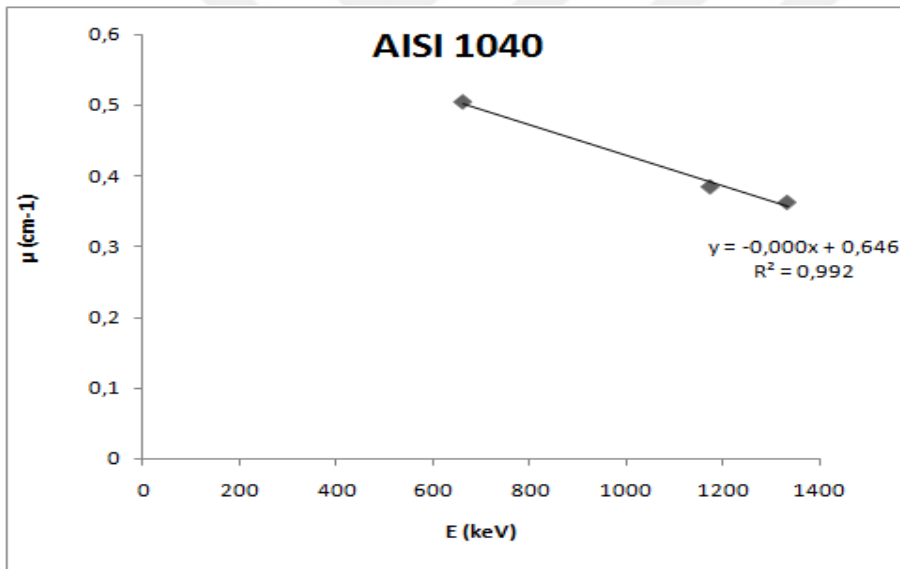
Şekil 4.5.- Şekil 4.8. de, numunelerin lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafikleri (R^2) verilmiştir. Korelasyonun tüm örnekler için 0,90 üzeri olduğu görülmektedir.



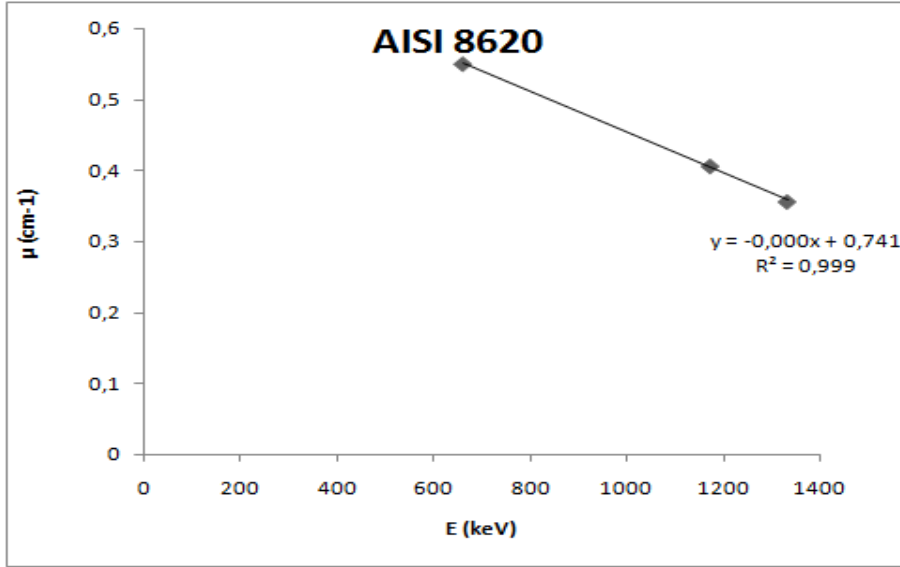
Şekil 4.5. Al 6000 serisinin lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafiği



Şekil 4.6. AISI 4140 için lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafiği

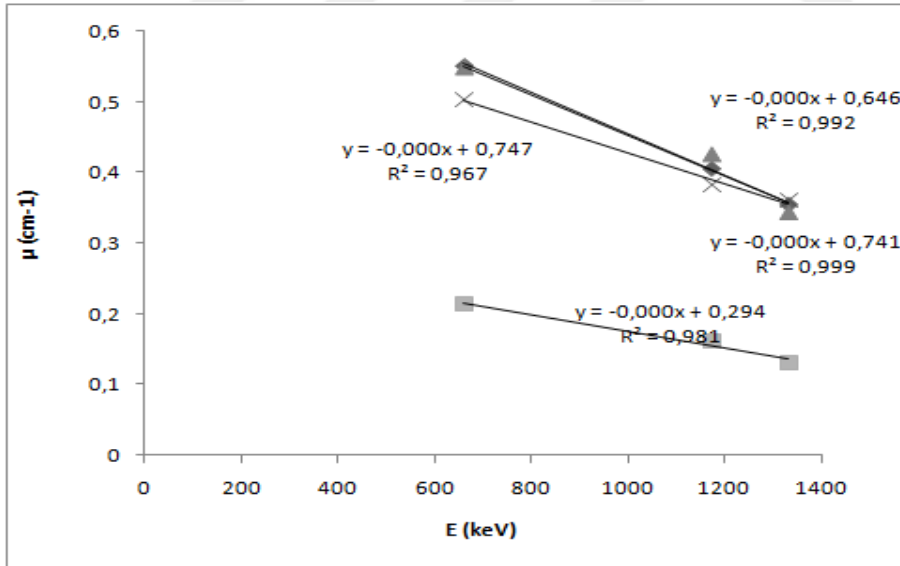


Şekil 4.7. AISI 1040 için lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafiği



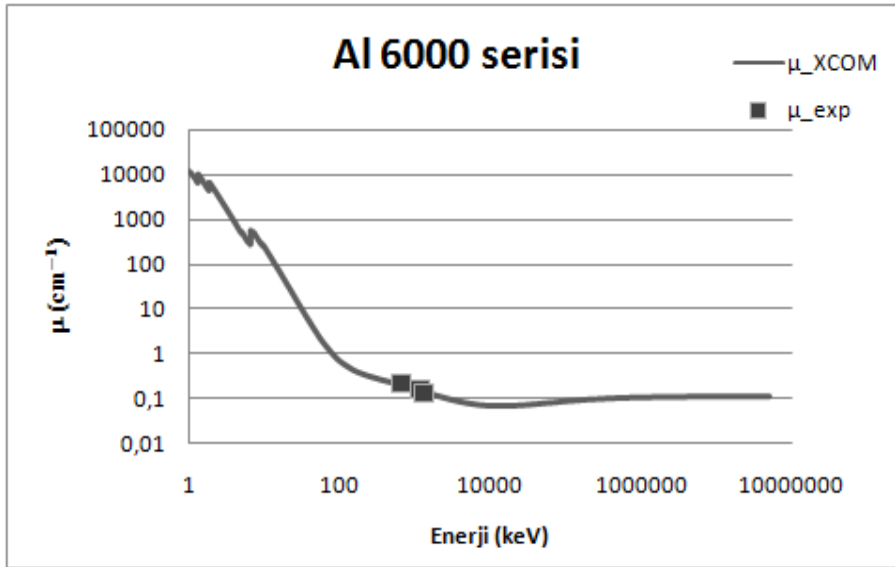
Şekil 4.8. AISI 8620 için lineer soğurma katsayısının enerjiye göre korelasyon grafiği

Şekil 4.9' da lineer soğurma katsayılarının enerjiye göre değişim korelasyonu ve Al 6000 serisindeki farklılık görülmektedir.

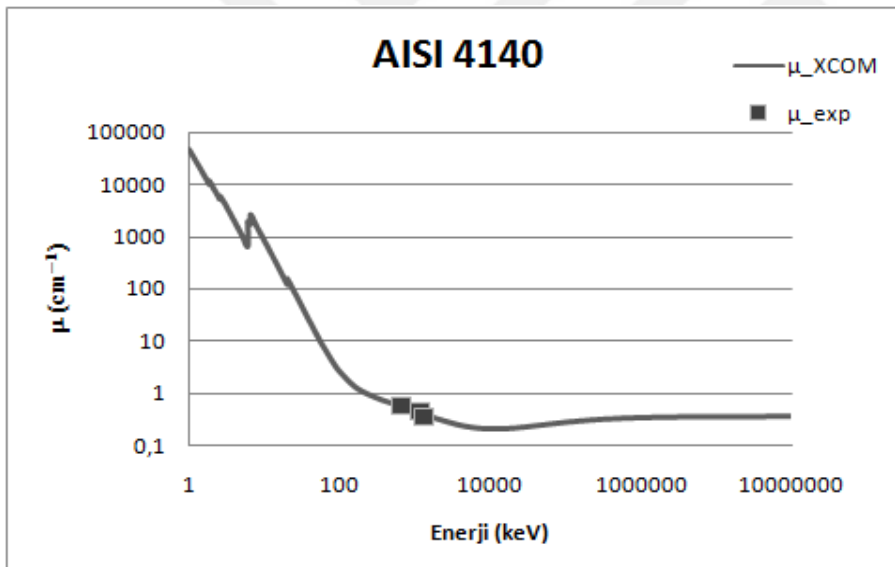


Şekil 4.9. Numunelerin lineer soğurma katsayısının enerjiye göre karşılaştırmalı korelasyon grafiği

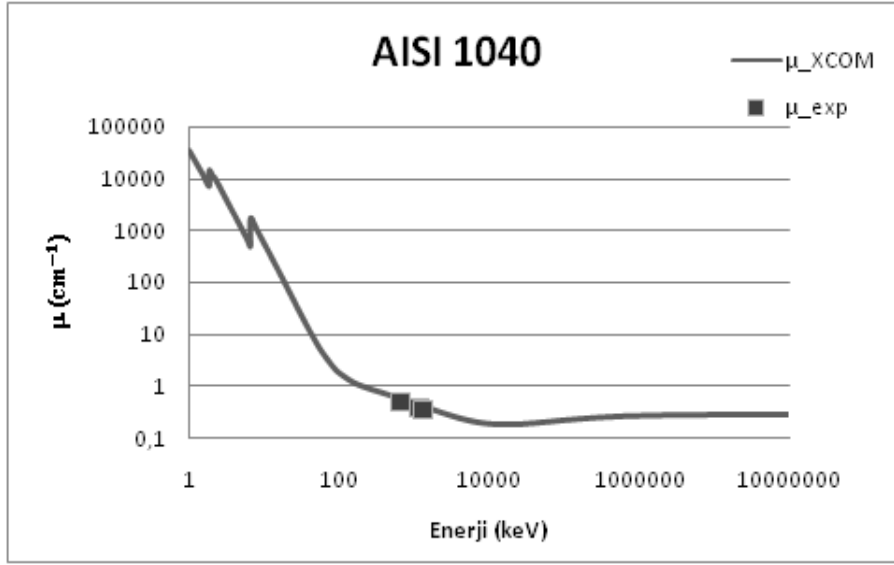
Şekil 4.10- Şekil 4.13 de numunelere ait deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her numune çeşidi için deneysel ve teorik hesaplama sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



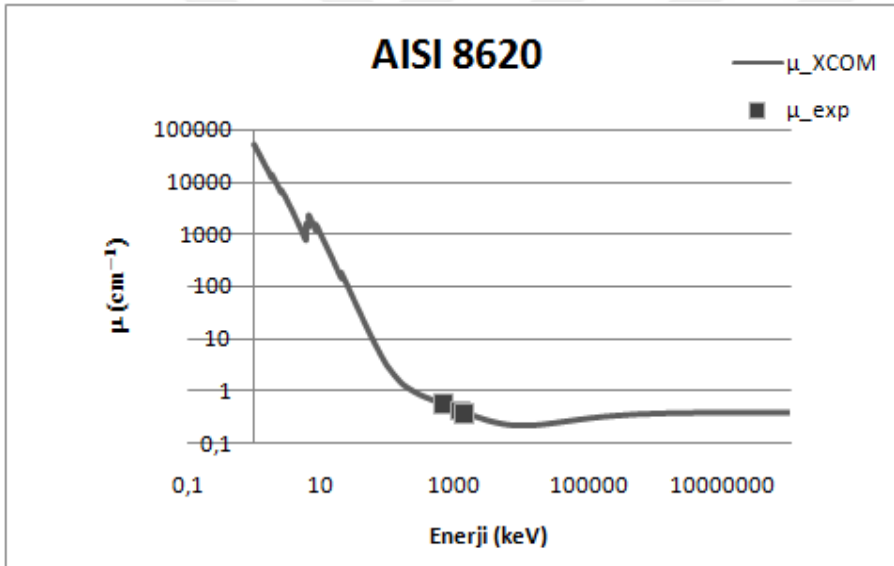
Şekil 4.10. Al 6000 serisi için deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı grafiği



Şekil 4.11. AISI 4140 için deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı grafiği



Şekil 4.12. AISI 1040 için deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı grafiği



Şekil 4.13. AISI 8620 için deneysel ve teorik hesaplama sonuçları karşılaştırmalı grafiği

Malzemenin özelliklerini doğrudan yansıtan kütle zayıflatma katsayısı, malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı değildir. Bu özelliği ile kütle zayıflatma katsayısı lineer zayıflama faktöründen daha önemlidir. Enerji ve atom numarasına bağlı olan kütle zayıflama faktörü; sağlık, nükleer fizik, temel fizik, radyasyon fiziği gibi birçok alanda elementlerin ve moleküllerin özelliklerinden yararlanılarak kullanılır.

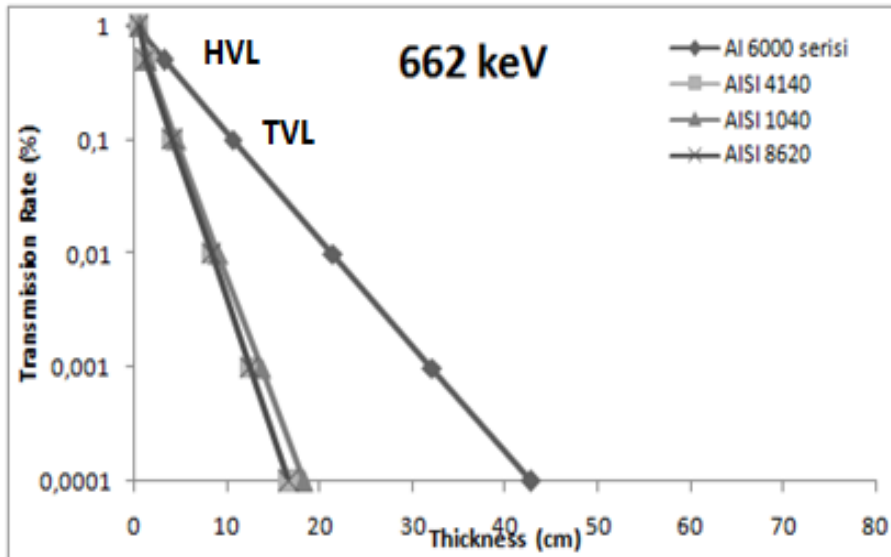
Gama radyasyonlarına zırlama görevinde kullanılacak malzemelerin etkinliğini belirlemek için sadece lineer zayıflatma ve kütle zayıflatma katsayıları tek başına yeterli değildir; HVL ve TVL gibi parametrelerin de hesaplanması gerekir.

Malzemenin gelen radyasyon şiddetini yarıya düşürmesi olarak bilinen yarı değer kalınlığı (HVL) ve onda bir değerine düşüren onda bir değer kalınlığı (TVL) için gerekli kalınlıkların hesaplanmasında ise lineer zayıflama katsayıları kullanılır (Sezer, 2022).

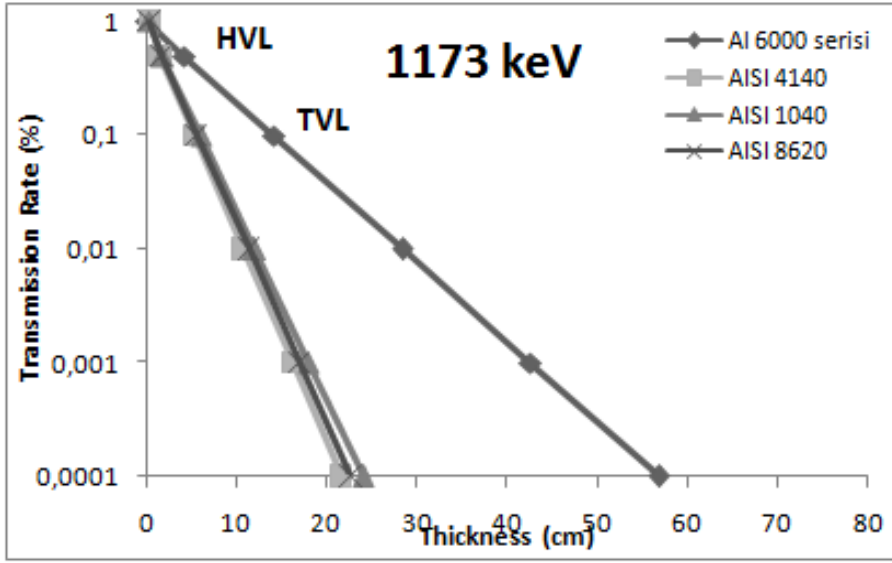
$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (4.1)$$

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (4.2)$$

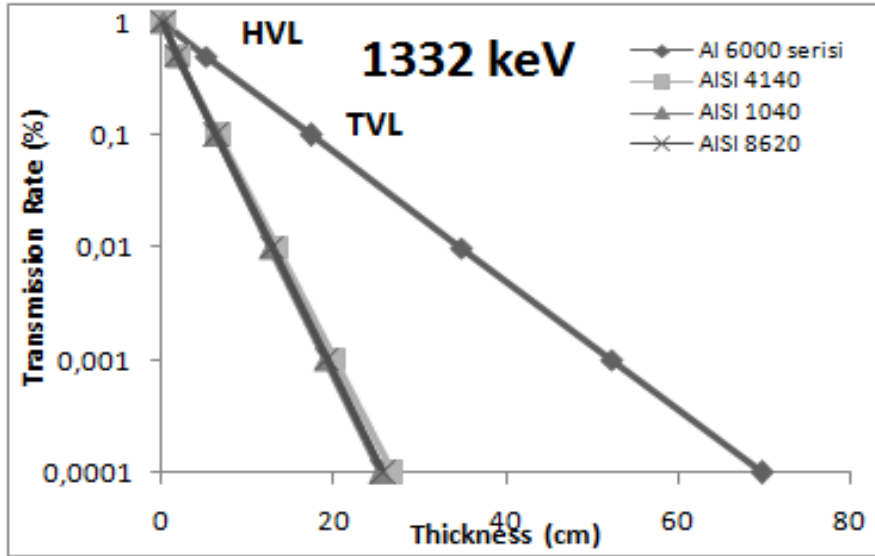
Şekil 4.14- Şekil 4.16’ da, kalınlığa göre HVL ve TVL değerlerinin nasıl değiştiği görülmektedir. Bu değerler, daha yüksek enerjili gama radyasyonunu durdurmak için daha fazla kalınlık gerektirdiğini göstermektedir.



Şekil 4.14. HVL ve TVL değerlerinin 662 keV enerjisindeki değişimi

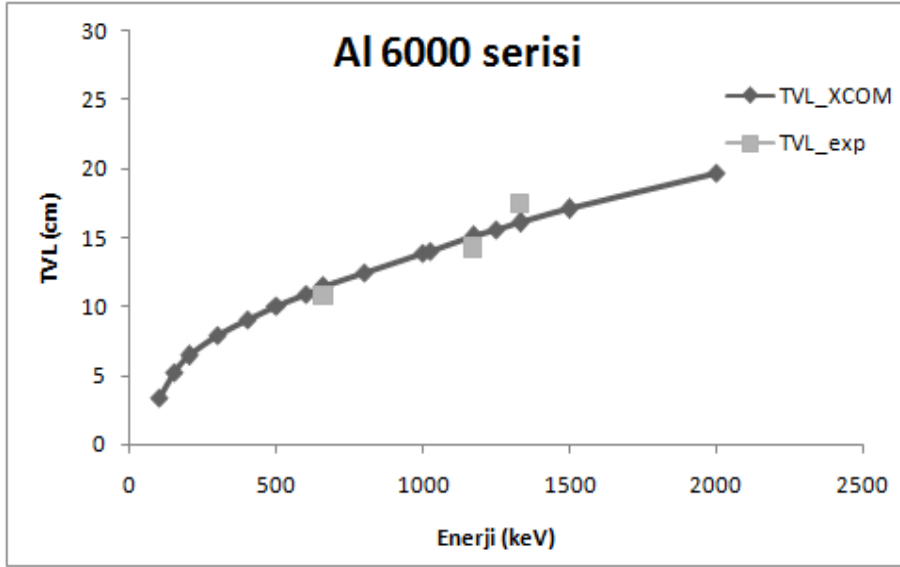


Şekil 4.15. HVL ve TVL değerlerinin 1173 keV enerjisindeki değişimi

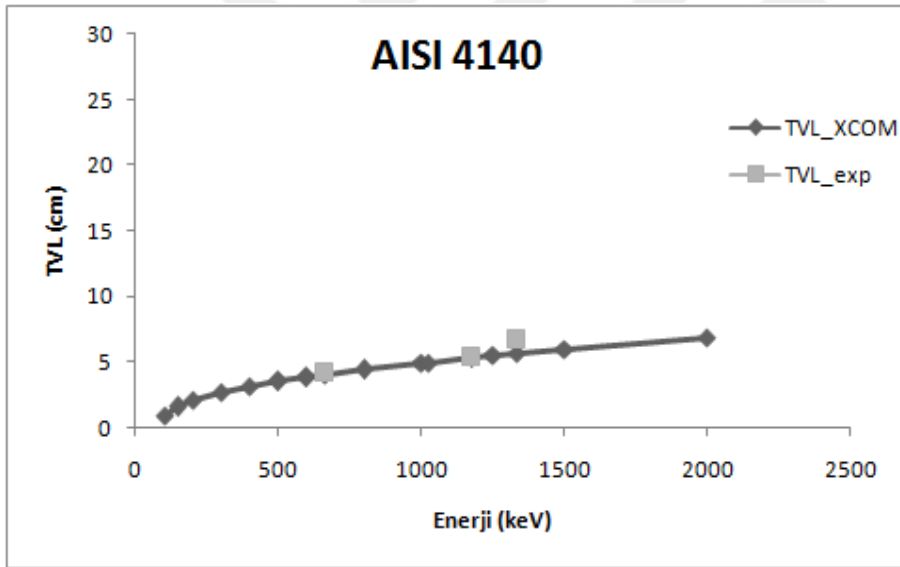


Şekil 4.16. HVL ve TVL değerlerinin 1332 keV enerjisindeki değişimi

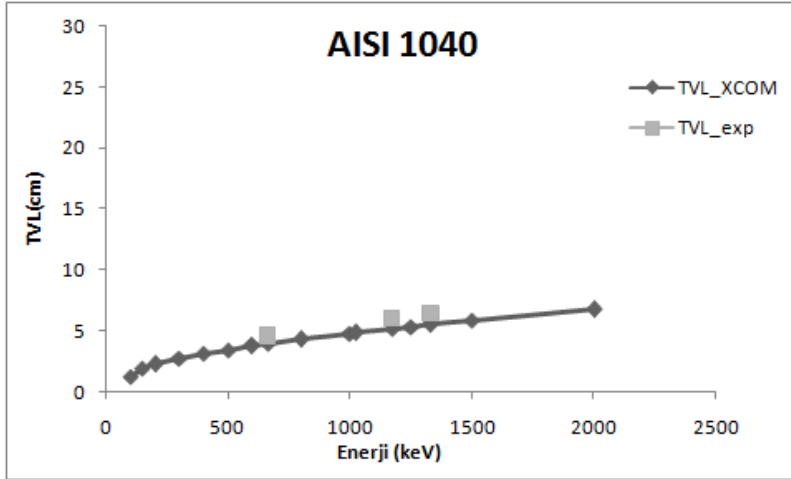
Şekil 4.17-Şekil 4.20' de, teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre nasıl değiştiği görülmektedir. Teorik verilerle deneysel verilerin uyum içinde olduğu söylenebilir.



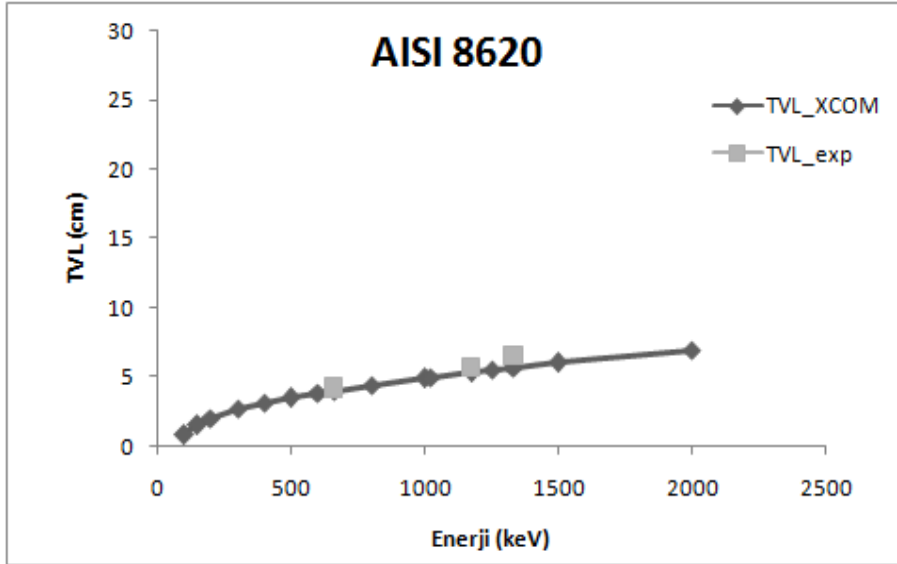
Şekil 4.17. Al 6000 serisi için teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.18. AISI 4140 için teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.19. AISI 1040 için teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.20. AISI 8620 için teorik ve deneysel hesaplanan TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi

Sonuç olarak; "Bazı Endüstriyel Ürünlerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi" isimli bu tez çalışmasında, Al 6000 serisi alüminyum numuneleri ile AISI 4140 ve AISI 1040 VE AISI 8620 alaşımlı çeliklerinin gama radyasyonuna karşı zırhlama özellikleri NaI(Tl) detektörlü gama spektrometresi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, 662, 1173 ve 1332 keV enerjili ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktifleri kullanılmıştır. Radyasyon zırhlama parametreleri olan lineer zayıflatma katsayıları ile HVL-TVL parametreleri hesaplanmıştır.

Ölçümler sonucunda gerçekleştirilen hesaplamalar, gama enerjisinin değişmesiyle lineer zayıflatma katsayılarının değiştiğini göstermiştir. Gama ışınlarının endüstriyel malzemeler ile etkileşimi bu değişimlere neden olur. Şekil 4.1. ve 4.3., lineer zayıflatma katsayılarının 662, 1173 ve 1332 keV enerjilerine göre değişimlerini göstermektedir. Şekil 4.5-Şekil 4.8’ den, lineer zayıflatma katsayıları ile gama enerjileri arasında lineer bir korelasyon olduğu görülmektedir ve R^2 değeri 0.95’ in üzerindedir. Ayrıca lineer zayıflama katsayısının artan enerjiyle birlikte doğrusal azaldığı da grafiklerden görülmektedir. Bununla birlikte çelik numunesinin daha önce yapılan çalışma verileri ile karşılaştırıldığında, önceki makalelerde incelenen granit ve beton numunelere kıyasla iyi bir zırhlama materyali olduğu söylenebilir (Mavi, 2012; Akkurt ve diğerleri, 2011). Numunelerin içeriği ve kimyasal yapılarının farklılık bu lineer soğurma katsayısındaki bu değişimin sebebi olabilir.

Teorik hesaplama kısmında XCOM’ da endüstriyel numunelerin yoğunluk değerleri ve kimyasal formülleri ayrı ayrı belirlenmiş ve radyasyon emilim katsayılarını temsil eden LAC ve HVL değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemlerden elde edilen hesaplamaların XCOM verileriyle tutarlı olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Abualroos, N. J., Yaacob, K. A., and Zainon, R. (2023). Radiation attenuation effectiveness of polymer-based radiation shielding materials for gamma radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 111070.
- Akkurt, I., Kılıçarslan, Ş., Basyigit, C., Gunoglu, K., Mavi, B. and Akkaş, A. (2011). Ağır Agregaların Radyasyon Zırhlama Özellikleri. *Engineering Sciences*, 6(4), 1481-1485.
- Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M. I. and Demir, L. (2020). Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108455.
- Alorfi, H. S., Hussein, M. A. and Tijani, S. A. (2020). The use of rocks in lieu of bricks and concrete as radiation shielding barriers at low gamma and nuclear medicine energies. *Construction and Building Materials*, 251, 118908.
- Baldissera, P. and Delprete, C., 2010. Deep cryogenic treatment of AISI 302 stainless steel: Part II – fatigue and corrosion. *Mater. Des.* 31, 4731–4737.
- Beiser, A., 1995. Modern Fiziğin Kavramları. Mc Graw-Hill, Inc. Çeviri: Gülsen Önengüt. Aralık 1997, İstanbul Ayhan Matbaası.
- Chen, S., Bourham, M. and Rabiei, A. (2014). Novel light-weight materials for shielding gamma ray. *Radiation physics and chemistry*, 96, 27-37.
- Cherkashina, N. I., Pavlenko, V. I., and Noskov, A. V. (2019). Radiation shielding properties of polyimide composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 159, 111-117.
- Coşkun, A. and Çetin, B. (2023). The Effect of Lead Oxide on the Change in Gamma Ray Protection Parameters of Bismuth Oxide. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi* (47), 18-21.
- Coşkun, A. (2023). *Bazı metal içeren kompozitlerin radyasyon zırhlama değerlerinin deneysel ve teorik olarak hesaplanması*. Yayınlanmış Doktora Tezi, Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya.
- Çetin, B., Yalçın, Ş., Aktas, B. and Albaskara, M. (2017). Investigation of radiation shielding properties of soda-lime-silica glasses doped with different food materials. *Acta Physica Polonica A*, 132(3), 988-990.
- Demir, F. (2009). *Bor ve barit agregalı ağır betonların nötron parçacıkları, x-ve γ -ışınları radyasyon soğurganlıklarının belirlenmesi*. Yayınlanmış Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Güney, F. (2021). *AISI 8620 çeliğinin farklı şartlar altındaki mekanik özellikleri, korozyon direnci ve mikroyapılarının incelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce.
- Güney, F. and Kam, M. (2022). AISI 8620 (20NiCrMo2) Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Kriyojenik İşlemin Etkisinin İncelenmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 3(2), 22-31.
- Hassanzadeh, M. and SadatKiai, S.M. (2018) Calculation of photon attenuation coefficient and dose rate in concrete with the addition of SiO₂ and MnFe₂O₄ nanoparticles using MCNPX code and comparison with experimental results. *Nuclear Science and Technology* 29:152.
- Hubbell, J. H. (1982). Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 33 (11), 1269-1290.
- İnternet: EPA, (2018). *Radiation Protection, Protecting Yourself from Radiation*. URL: <https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation>. Son Erişim Tarihi: 21.09.2024.
- İnternet: IAEA (1982). *Basic Safety Standart of Radiation Protection*. No 9. URL: https://gnssn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_009_1982.pdf. Son Erişim Tarihi: 29.09.2024.
- İnternet: Nükleer Düzenleme Kurulu (NDK), 2024. *Kozmik Radyasyon Sebebiyle Uçuş Personelinin Maruz Kaldığı Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesine İlişkin Kılavuz*. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu RSGD-KLV-022. URL: <https://www.ndk.org.tr/kilavuzlar>. Son Erişim Tarihi 24.11.2024.
- Jaeger, R.G., Blizard, E.P., Chilton, A.B., Grotenhuis, M., Hönig, A., Jaeger, T.A. and Eisenlohr, H., (1968). *Engineering Compendium on Radiation Shielding*. Springer-Verlag, 537 s., New York
- Jalali, M. and Mohammadi, A., (2008). Gamma ray attenuation measurement for neutron-absorbent materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 77, 523-527.
- Kalyon, M. (2019). *Radyasyon içeren birimlerin zırhlamasında kullanılan farklı tipteki betonların radyasyon güvenliği ile iş sağlığı ve güvenliği açısından incelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kavanoz, H. B., Akçalı, Ö., Toker, O., Bilmez, B., Çağlar, M. and İçelli, O. (2019). A novel comprehensive utilization of vanadium slag/epoxy resin/antimony trioxide ternary composite as gamma ray shielding material by MCNP 6.2 and BXCOR. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108446.
- Li, B., Liao, Q., Zhang, H., Shen, T., Ge, F. and Daghbouj, N. (2021). The effects of stress on corrosion behavior of SIMP martensitic steel in static liquid lead-bismuth eutectic. *Corrosion Science*, 187, 109477.

- Low, I.M. and Noor Azman, N.Z. (2020). *Polymer Composites and Nanocomposites for X-Rays Shielding*. Composites Science and Technology. Springer, Singapore.
- Marashdeh, M. and Al-Hamarneh, I. F. (2021). Evaluation of Gamma Radiation Properties of Four Types of Surgical Stainless Steel in the Energy Range of 17.50–25.29 keV. *Materials*, 14(22), 6873.
- Mavi, B. (2012). Experimental investigation of γ -ray attenuation coefficients for granites, *Annals of Nuclear Energy*, 44, 22–25.
- Mkhaiber A.F. and Dheyaa, A. (2018). Experimental study of some shielding parameters for composite shields. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series* 1003: 012109.
- Nayak, S.K., Patro, J.K., Dewangan, S. and Gangopadhyay, S., 2014. Multi-objective optimization of machining parameters during dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using grey relational analysis. *Procedia Materials Science* 6, 701–708.
- Poyraz, A., Yigitoglu, I., Canimkurbey, B. and Cetin, B. (2025). Experimental and theoretical investigation of gamma radiation absorption properties of oxide nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36(10), 634.
- Rockwell III, T. (1956). *Reactor shielding design manual* (No. TID-7004). United States Atomic Energy Commision, Washington, DC (United States).
- Sahin, S. and Ubeyli, M., 2008. A review on the potential use of austenitic stainless steels in nuclear fusion reactors. *J. Fusion Energy* 27, 271–277.
- Savaş, Y., Başaran, B. and Çetin, B. (2023). The Effect of Marble Powder Additive at Different Ratios on the Radiation Absorption Parameters of Barite Based Concretes. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 9(4), 376-381.
- Sezer, B. (2020). *Binalarda Yahtım Malzemesi Olarak Kullanılan Bazı Yapı Malzemelerinin Radyasyon Tutuculuk Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya.
- Shapiro, J. (2002). *Radiation protection: a guide for scientists, regulators, and physicians*. La Editorial, UPR.
- Singh R, Singh S, Singh G. and Thind KS (2017) Gamma Radiation shielding properties of steel and iron slags. *New Journal of Glass and Ceramics*, 7: 1-11
- Tekin, A. (1984). *Çelik ve Isıl İşlemi*, Bofors El Kitabı, Hakan Ofset, İstanbul.
- Tijani, S. A. and Al-Hadeethi, Y. (2019). The use of isophthalic-bismuth polymer composites as radiation shielding barriers in nuclear medicine. *Materials Research Express*, 6(5), 055323.

- Turhan, M. F., Akman, F., Polat, H., Kaçal, M. R. and Demirkol, İ. (2020). Gamma-ray attenuation behaviors of hematite doped polymer composites. *Progress in Nuclear Energy*, 129, 103504.
- Yülek, G. G. (1992). *Radyasyon fiziği (İyonlayıcı ve İyonlayıcı Olmayan) ve Radyasyondan Korunma*. SEK Yayınları.

