



**PARAFİN VE METAL TOZU DOLGULU
EPOKSİ REÇİNESİ ÜRETİMİ VE NÖTRON
ZIRHLAMA PAREMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Mehmet Topal

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

**2019
(Her Hakkı Saklıdır.)**

AĞRI İBRAHİM ÇEÇEN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PARAFİN VE METAL TOZU DOLGULU EPOKSİ REÇİNESİ ÜRETİMİ VE
NÖTRON ZIRHLAMA PAREMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Mehmet Topal

FİZİK ANABİLİM DALI

AĞRI

2019

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
AĞRI İBRAHİM ÇEÇEN ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

PARAFİN VE METAL TOZU DOLGULU EPOKSİ REÇİNESİ ÜRETİMİ VE NÖTRON ZIRHLAMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Prof. Dr. İbrahim HAN ve Dr. Öğretim Üyesi Bünyamin ALIM danışmanlığında, Mehmet TOPAL tarafından hazırlanan bu çalışma, 30/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. İbrahim HAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ebru SENEMTAŞI ÜNAL

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin AYGÜN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALIM

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erdem ŞAKAR

İmza :

İmza :

İmza :

İmza :

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu .../04/2019 tarih ve / nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim HAN
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PARAFİN VE METAL TOZU DOLGULU EPOKSİ REÇİNESİ ÜRETİMİ VE NÖTRON ZIRHLAMA PAREMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet TOPAL

Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İbrahim HAN

Ortak Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALIM

Parafinin nötron ve gama parçacıklarını iyi soğuran bir materyal olduğu bilinir. Bu çalışmada amaç parafine belli oranlarda metal tozu karıştırarak nötronları en iyi soğuran zırhlama malzemesini elde etmektir. Monte Carlo Simülasyon tekniği kullanılarak Parafin, Epoksi, Alüminyum, Bor Karbür, Niyobyum, Bor, Krom, Nikel metal tozları ile parafin örnekleri oluşturuldu. Bazı materyaller 4,5 MeV'lik nötronlarla ayrı ayrı ışınlanarak nötron soğurganlıkları gözlemlendi. Metal tozu dolgulu materyallerin diğer materyallerden nötronları soğurmada daha uygun olduğu belirlendi.

2019 , 73 sayfa

Anahtar Kelimeler: Parafin , Nötron, Bor Karbür, Alüminyum, Bor, Epoksi, Krom, Nikel,Niyobyum, Monte Carlo, Soğurganlık, Zırhlama

ABSTRACT

Master Thesis

PARAFINE AND METAL POWDER FILLED EPOXY RESIN PRODUCTION AND DETERMINATION OF NEUTRON SHIELDING PARAMETERS

Mehmet TOPAL

Ağrı İbrahim Çeçen University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Physics Department
Advisor: Prof. Dr. İbrahim HAN
Co Advisor: Assist. Prof. Dr. Bünyamin ALIM

It is known that paraffin is a material that absorbs neutron and gamma particles. The aim of this study is to obtain the shielding material that absorbs neutrons by mixing metal powder with certain proportions of paraffine. Paraffin, epoxy, aluminum, boron karbide, niobium, boron, chromium, nickel metal powders and paraffin samples were created using Monte Carlo simulation technique. Some materials were irradiated separately with 4.5 MeV neutrons, and neutron attenuations were observed. It was determined that metal powder-filled materials were more suitable for absorbing neutrons than other materials.

2019,73 pages

Keywords: Paraffin wax, Neutron, Gamma, boron carbide, aluminum, boron, epoxy, chrome, nickel, niobium Monte Carlo, absorbance, shielding.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın deneysel kısmı Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nötron Doz Ölçüm Laboratuvarında yapılmıştır. Bana bu imkanı tanıdığı için Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümüne teşekkür ederim.

Bu araştırma için beni yönlendiren, çalışmalarım süresince görüş ve önerilerinden istifade ettiğim değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim HAN'a ve ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin ALIM'a teşekkür ederim.

Araştırmalarımda önerilerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Turgay KORKUT her aşamada bana destek olan, deneylerimde ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesinde yardım eden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bünyamin AYGÜN'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca manevi yardımlarını esirgemeyerek bana destek olan sevgili eşime de teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet TOPAL

Nisan 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	7
2.1. Atom ve Genel Özellikleri	7
2. 2. Atomun Yapısı ve Nükleonları	7
2. 2. 1. Nötronun keşfi ve özellikleri.....	8
2. 2. 2. Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması.....	11
2. 3. Nötron Kaynakları.....	12
2. 3. 1. α (alfa) - berilyum kaynakları	12
2. 3. 2. Foto-nötron kaynakları.....	13
2. 3. 3 Kendiliğinden fisyon.....	15
2. 3. 4. Nükleer reaksiyonlar	16
2. 3. 5. Reaktörler	16
2. 4. Nötronların madde ile etkileşimleri	16
2. 4. 1. Elastik saçılma	17
2.4. 2. İnelastik saçılma.....	18
2. 4. 3. Nötron yakalanması	18
2. 4. 4. Nükleer reaksiyonlar	19
2. 4. 5. Fisyon olayı.....	19
2. 4. 6. Yüksek enerji hadron sağanağının üretilmesi	19
2. 5. Nötronların soğurulması ve yavaşlatılması	20

2. 6. Monte Carlo Simülasyon Tekniği	21
2. 7. Radyasyon	22
2. 8. 1. İyonlaştırıcı radyasyon	23
2. 8. 1. a. İyonlaştırıcı Elektromanyetik radyasyonlar	23
2. 8. 1. b. Parçacık radyasyonu.....	24
2. 8. 2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar	27
2. 8. 2. a. Optik (görünür) radyasyonlar	27
2. 8. 2. b. İyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik radyasyonlar (EMR).....	27
2. 9 . Radyoaktiflik.....	28
2.10. Radyasyon Birimleri	28
2.11. Radyasyonun İnsan ve Çevre Üzerindeki Etkileri	30
2. 12. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi	32
2. 12. 1. Fotoelektrik olay	35
2. 12. 2. Compton saçılması	36
2.13. 3. Çift oluşumu.....	36
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	39
3.1. Geant4 Simülasyon Programı	39
3. 2. Kullanılan Dedektör ve Özellikleri	40
3.3. Üretimlerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	42
3. 3. 1. Parafin ve özellikleri	42
3. 3. 2. Alüminyumun genel özellikleri.....	43
3. 3. 3. Nikel'in genel özellikleri.....	44
3. 3. 4. Kromun genel özellikleri.....	45
3. 3. 5. Niyobyumun genel özellikleri.....	46
3. 3. 6. Borun genel özellikleri.....	47
3. 3. 7. Bor karbürün genel özellikleri	47

3. 3. 8. Epoksinin genel özellikleri.....	48
3. 3. 9. Makroskobik tesir kesiti.....	50
Şekil 3. 10. Deneyde kullanılan nötron kaynağı	52
Şekil 3. 11. Deney düzeneği.....	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	54
4. 1. Numunelerin Nötron Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi.....	54
4.2. Numunelerin Ölçüm Sonuçları	56
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	64
KAYNAKLAR	70
ÖZ GEÇMİŞ.....	73

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$\text{\AA}$	Angström ($10^{-10}m$)
α	Alfa parçacığı
ADS	Hızlandırıcı sürümlü sistemler
$B^+ - B^-$	Beta Parçacığı
Bq	Becquerel, radyoaktivite birimi
B	Manyetik alan
c	Işık hızı
C	Coulomb
D	Döteryum
e	Elektron
eV	Elektron volt
E	Enerji (keV, MeV)
EMR	Elektromanyetik Radyasyon
γ	Gama Parçacığı
Gy	Gray, absorblanmış doz birimi
I	Şiddet
h	Planck sabiti
keV	Kilo elektron volt
m	Elektron kütlesi
m_0	Elektronun durgun kütlesi
M	Nötronun çarptığı çekirdeğin kütlesi
MeV	Mega elektron volt
n	Nötron
NASA	Uluslararası Uzay Araştırma Merkezi
OTK	Onuncu tabaka kalınlığı
p	Proton
R	Röntgen
Sv	Sievert, eşdeğer doz birimi
SI	Uluslar Arası Birim Sistemi

T	Tridyum
μ	Mikro, alt birim (10^{-6})
τ	Lineer toplam soğurma katsayısı
UV	Ultraviyole ışınları
ν	Frekans
ξ	Enerji yüzdesi
v	Nötronun hızı
YBCO	Yttrium-baryum-bakır-oksit
YTK	Yarı tabaka kalınlığı
Z	Atom numarası
σ_t	Toplam tesir kesiti
θ	Kütle merkezi sistemindeki saçılma açısı
λ	Dalga boyu
MIBK	Metil İzo Butil Keton

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Chadwick'in deney düzeneği ve alfa parçacıklarının soğurulması	9
Şekil 2. 2. Basit bir fotonötron kaynağının yapısı	14
Şekil 2. 3. ^{252}Cf Nötronların enerji spektrumları	15
Şekil 2. 4. Nötron'un çekirdekten elastik saçılması.....	18
Şekil 2. 5. Nötron'un çekirdekten inelastik saçılması	18
Şekil 2. 6. Nötron yakalanması	19
Şekil 2. 7. Fisyon olayı	19
Şekil 2. 8. Radyasyon çeşitleri	22
Şekil 2. 9. Çekirdek kararlılığının nötron proton oranına bağlılığı.....	23
Şekil 2. 10. α , β - Parçacıklarının ve γ ışınlarının manyetik ve elektrik alandaki sapmaları (Yaramış 1985).....	26
Şekil 2. 11. Fotoelektrik olay	35
Şekil 2. 12. Compton saçılması.....	36
Şekil 2. 13. Çift oluşumu	37
Şekil 2. 14. Fotoelektrik olay, compton olayı ve çift oluşumun baskın olduğu yerler (Krane 2002)	38
Şekil 2. 15. Radyasyon enerjisine göre lineer soğurma katsayısındaki değişim	38
Şekil 3. 1. Deneyde kullanılan ADM-606 model NP serisi nötron dedektörü ve nötron kaynağı.....	42
Şekil 3. 2. Parafinin görünümü	43
Şekil 3. 3. Alüminyum tozu görünümü.....	44
Şekil 3. 4. Nikel tozu görünümü	45
Şekil 3. 5. Krom tozu görünümü.....	45
Şekil 3. 8. Niyobyum tozu görünümü	46
Şekil 3. 6. Bor tozunun görünümü	47
Şekil 3. 7. Bor karbür tozunun görünümü.....	48
Şekil 3. 8. Epoksinin görünümü.....	49
Şekil 3. 9. Numuneleri deneye hazırlama aşaması	51

Şekil 3. 10. Deneyde kullanılan nötron kaynağı	51
Şekil 3. 11. Deney düzeneği	53
Şekil 4. 1. Numunelerin teorik toplam makroskobik tesir kesitleri	56
Şekil 4. 2. Numunelerin soğurduğu doz miktarları ve yüzde oranı	58
Şekil 4. 3. Teorik tesir kesiti ve numunelerde tutulan doz karşılaştırılması	60
Şekil 4. 4. Teorik tesir kesiti ve numunelerden geçen doz karşılaştırılması	61
Şekil 4. 5. Tesir kesitlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 4. 6. Numunelerin soğurma oranları	63



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1. Nötronların genel özellikleri	11
Çizelge 2. 2. Nötronların kullanım alanları	11
Çizelge 2. 3. Alternatif (α ,n) izotopik nötron kaynakları	13
Çizelge 2. 4. Foto-nötron kaynaklarının özellikleri	15
Çizelge 2. 5. Bazı α kaynakları	26
Çizelge 3. 1. Deneyde kullanılan nötron dedektörünün özellikleri	41
Çizelge 3. 2. Alüminyumun özellikleri	43
Çizelge 3. 3. Nikelin özellikleri	44
Çizelge 3. 4. Kromun özellikleri	45
Çizelge 3. 5. Niyobyumun özellikleri	46
Çizelge 3. 6. Borun özellikleri	47
Çizelge 3. 7. Üretimde kullanılan malzemelerin makroskobik tesir kesitleri	50
Çizelge 3.8. Monte Carlo simülasyon tekniği ile belirlenen numunelerin % kütlece birleşim oranları ve kimyasal içerikleri	51
Çizelge 4. 1. Numunelerin teorik tesir kesitleri	55
Çizelge 4. 2. Numunelerin doz eşdeğer ölçüm sonuçları	57
Çizelge 4. 3. Numunelerin nötron geçişi ve deneysel toplam makroskobik tesir kesiti	59
Çizelge 4. 4. Numunelerin tesir kesitlerinin karşılaştırılması	59
Çizelge 4. 4. Numunelerin tesir kesitleri ve soğurduğu doz miktarları	60
Çizelge 4. 6. Numunelerin soğurma oranı	62
Çizelge 4. 6. Numunelerin soğurduğu doz miktarı ve makroskobik tesir kesiti	63

1.GİRİŞ

İnsanoğlu var oluşundan beri, Dünya'nın yapısında bulunan radyoaktif çekirdeklerden, Güneş sisteminde oluşan kozmik ışınlardan ya da kendi ürettiği yapay radyoaktif maddelerden kaynaklı radyasyona maruz kalmaktadır. Dünyanın oluşumuyla birlikte tabiatta yerini alan çok uzun ömürlü (milyarlarca yıl) radyoaktif elementler yaşadığımız çevrede normal ve kaçınılmaz olarak kabul edilen doğal bir radyasyon düzeyi oluşturmuşlardır. Geçtiğimiz yüzyılda bu doğal düzey, nükleer bomba denemeleri ve bazı teknolojik ürünlerin kullanımı ile bir hayli artış göstermiştir. Maruz kalınan doğal radyasyon seviyesini belirleyen birçok etken vardır. Yaşanılan yer, bu yerin toprak yapısı, barınılan binalarda kullanılan malzemeler, mevsimler, kutuplara olan uzaklık, hava şartları, yağmur, kar, alçak basınç, yüksek basınç ve rüzgâr yönü gibi parametreler bu etkenlerden bazılarıdır.

Henrie Becquerel tarafından 1896 yılında radyoaktivitenin keşfinden sonra, radyoaktivite ve radyasyon uygulamaları çalışmaları artan ilgi ve merakla devam etmiştir. Radyasyondan yararlanma isteği, yeni radyasyon kaynaklarının bulunmasına ve onların zararlı etkisini yok edecek ya da azami dereceye indirecek zırhlama materyallerinin üretimine ilgiyi artırmıştır. Nötronlar yüksüz oldukları için madde ile etkileştiklerinde Coulomb kuvvetinden etkilenmeden maddenin içlerine kadar nüfuz edebilirler. Nötronlar doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon değildirler ancak madde ile etkileştiklerinde ikincil radyasyona (α , β , γ ve X-ışınları) sebep olarak iyonlaştırıcı özelliğe sahip olurlar. Nötronlar, elektrik yükü taşımadıklarından pozitif ya da negatif yüklü parçacıklarla herhangi bir itme veya çekme şeklinde bir etkileşime girmezler. Nötronların bu özelliği sayesinde bir maddenin atom çekirdeği nötronlarla bombardıman edilerek elektronik yapı değişmeden atom çekirdeğinde değişikliklere neden olunabilir. Nötronla bombardıman neticesinde kararsız hale gelen bir çekirdek kararlı hale geçerken ışıma yapar. Nötronlar diğer yüklü parçacıklardan (alfa, beta, gama) madde içinde daha girici olduğundan zırhlanması da aynı ölçüde zor olmaktadır. Nötron radyasyonunun zırhlanması üç aşamada gerçekleştirilir. Yüksek enerjili (Rölativistlik $E > 10 \text{ MeV}$) ve hızlı ($E \cong 200 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$) nötronlar hidrojene karşı

duyarlı olduklarından, birinci aşamada nötronlar hidrojenle zengin olan su, polietilen, parafin, gibi maddelerden geçirilerek nötronların enerjileri azaltılır ve epitermal ($E \approx 0,4 - 100 \text{ eV}$) ve Termal ($E \approx 0,003 - 0,4 \text{ eV}$) nötronlar elde edilir. İkinci aşamada, hidrojenle zengin maddelerden sonra yavaş (termal) nötronlara karşı yüksek soğurucu tesir kesitine sahip kadmiyum, bor ve lityum gibi malzemeler kullanılarak nötronların soğurulması sağlanır. (Aygün 2010).

Radyasyon ve radyoaktivitenin keşfedilmesiyle birlikte oluşan zararlı enerjiden korunma isteği insanları bu alanda araştırma yapmaya yönlendirmiş ve bu alandaki zırhlama çalışmalarını artırarak devam ettirmelerine sebep olmuştur. Literatürde farklı malzemeler için nötron zırhlama özelliklerinin araştırıldığı birçok çalışma bulunmaktadır.

Gwaily *et al.* (2002), radyasyon zırhlamada hem nötron hem de gama ışınlarının soğurulmasının, bor karbür ve Parafin ile karıştırılmış doğal kauçuk kompozitlerdeki kurşun konsantrasyonuna olan bağımlılığı incelemişlerdir. Ayrıca kauçuk kükürtlerin iletkenlik, şişme özellikleri ve yaşlanmaya olan etkilerini araştırmışlardır. 60 phr Parafin ile 20 phr B₄C'nin 18 mm kalınlığındaki numunelerin hızlı nötronların yaklaşık %50'sini azaltabildiğini ileri sürmüşlerdir.

Atsuhiko *et al.* (2007), %6 bor içeren fenol-bazlı reçine geliştirmişler ve bu reçineyi nükleer ısınmayı azaltmak ve nötron akısını önlemek için plazma aygıtının çevresine uygulamışlardır. Geliştirilen reçinenin nötron zırhlama performansını, ²⁵²Cf nötron kaynağıyla incelemişlerdir ve reçinenin yüksek sıcaklıkta mekanik mukavemetini koruduğunu ileri sürmüşlerdir.

Huasi *et al.* (2008), nötron ve gama radyasyonu için optimize edilmiş hafif, yoğun ve yüksek sıcaklığa dayanıklı zırhlama malzemelerini MCNP (Monte Carlo N-Particle) ile birleştirilmiş GA (genetic algorithms) kullanarak belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan hareketle hazırlanan numunelerin Pb₂O ve KRAFTON-XP₃ ile karıştırılmasının radyasyon zırhlama da daha etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir. Özellikle Fe-Interlayer-Pb'nin çok katlı yapılarının performansının mükemmel

olduğunu ifade etmişlerdir. Malzemedeki elementlerin oranı dikkate alınarak nano-TiO₂ ile polimer üretilmesini deneysel olarak DSC (differential scanning calorimetry) ile belirlemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre mevcut tasarımın radyasyon zırhlamada malzemenin en iyi tasarım olduğunu ileri sürmüşlerdir. Yapılanların nükleer bilimi ve nükleer uygulamalar için oldukça uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Alhajali *et al.* (2009), altı çeşit sıradan ve özel zırhlama beton karışımını incelemişlerdir. MNSR (Miniature Neutron Source Reactor) kullanarak X-ışınları, nötron aktivasyon analizleri ve doz sonuçları ile kompozitleri belirlemişlerdir. Referanstaki yayınlanan sonuçlar ve analiz sonuçlarına dayanarak ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu ve ¹³⁴Cs'nin betondaki mevcut etkili nüklitler olduğunu ifade etmişlerdir. Fakat kalsiyumlu ve magnezyumlu agregaların bunları minimum seviyede içerdiğini ve Mg, Fe, Ti'nin betondaki önemli zırhlama elementleri olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Bartoli *et al.* (2009), nötron yüzey saçılmalarında zırhlama malzemesi olarak bor karbürü dayalı seramik kompozitlerin etkinliğini incelemişler ve kompozitlerdeki killi materyalin varlığının yüzeydeki saçılmalarda yaygın olarak kullanılan diğer zırhlama malzemelerinden daha iyi olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Korkut vd. (2010), sırasıyla %0, %5, %10 ve %15 kolemanit konsantrasyonlarına sahip dört barit ve dört beton numunesi için nötron doz transmisyon ölçümlerini tek enerjili ($E_{ff}=4,5$ MeV ²⁴¹Am-⁹Be) nötron kaynağını kullanarak yapmışlardır. Numunenin kolemanit yüzdesi arttıkça nötron doz transmisyon değerinin artacağını ileri sürerek farklı oranlarda kolemanit ekleyerek barit ve normal betonun nötron zırhlama özelliğini artırmanın mümkün olacağını ifade etmişlerdir.

Korkut vd. (2010), bir numunenin nötron zırhlama özelliğini değerlendirmek için makroskopik tesir kesiti ve maddedeki nötron akısının kullanılabilir faktörler olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun için farklı bor yüzdeleri içeren MgB₂, NaBH₄ ve KBH₄ örneklerinin nötron makroskopik tesir kesiti ölçümlerini tek-enerjili ($E_{ff}=4,5$ MeV ²⁴¹Am-⁹Be) kaynağını kullanarak yapmışlardır. Ortalama nötron akısı değerini

ve her bir numunenin hızlı nötron akış dağılımını FLUKA Monte Carlo kodunu kullanarak hesaplamış ve aynı zamanda numunelerin yarı kalınlık değerlerini parafin ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak artan bor konsantrasyonun materyalin nötron zırhlama özelliğini artırabildiğini ileri sürmüşlerdir.

Atsuhiko *et al.* (2011), ısıya dayanıklı %1 ağırlığında bor ile polimer reçine içeren nötron zırhlama malzemesi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri reçinenin nötron zırhlama performansını, polietileninki ile hemen hemen aynı olan ^{252}Cf nötron kaynağı ile incelemişler ve nötron zırhlama parametresini artırmak için reçineyi ek koruyucu malzeme olarak ve JT-60SA gibi süper iletken cihazından nötron akısını azaltmak için vakumlu kabın çevresine uygulamışlardır.

Donzella *et al.* (2011), EURITRACK (EUROpean Illicit Trafficking Countermeasures Kit) projesi kapsamında inşa edilmiş ve Rijeka (Hırvatistan) limanında test edilmiş nötron denetim portalının referansıyl, portalın gelecekte tasarlanacak farklı yapılandırmaları için gerekebilecek biyolojik zırhlamaları MCNP ile oluşturduklarını belirtmişlerdir. Yapılandırmalarda çalışanlar için doz limitlerinin analizini yapmış ve Avrupa yasaları tarafından belirlenen kontrollü bir alanda nötron kaynağının zırhlanmasının sağlanabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Gencil vd. (2011), hematit içeren beton numunelerin gama ve nötron soğurmalarını elde etmek için deneysel ölçümler ve Monte Carlo simülasyonları yapmışlardır. Aynı zamanda numunelerin mekanik mukavemetlerini incelemişlerdir. Nötronların zayıflatılmasında betondaki hematit içeriğinin etkili olmadığını ifade etmişlerdir. Hematit yüzdesi ile gama ışınlarının zayıflatıldığı ve mekanik mukavemetin arttığını ileri sürmüşlerdir.

Korkut *et al.* (2011), radyasyon zırhlama malzemesi olarak ametist cevherini kullanmışlardır. WDXRF spektroskopisi tekniğini kullanarak ametistin temel bileşenlerini belirlemişlerdir. Birkaç foton enerjisinde ametistin zırhlama kabiliyetini anlamak için elde ettikleri sonuçları FLUKA Monte Carlo radyasyon transmisyon koduyla simülasyon sürecinde kullanmışlardır. Elde ettikleri değerleri ince bir zırhlama

beton malzemesi ile karşılaştırmışlardır. Ametistin gama ışınlarını betondan daha iyi zıhladığını ileri sürmüşlerdir.

Korkut *et al.* (2012), ^{241}Am - ^9Be kaynak ile kolemanit, üleksit ve tinkal olarak adlandırılan borun birim hacim başına farklı yüzdelerini içeren üç numune için toplam makroskopik tesir kesitlerini elde etmişlerdir. FLUKA Monte Carlo kodu ile elde ettikleri sonuçların parafin ile karşılaştırılmasında numunelerin nötron zırhlama kabiliyetlerinin artan bor konsantrasyonu ile arttığını belirtmişlerdir.

Akkurt *et al.* (2014), Farklı oranlarda bor ile kaplanmış olan Penye ve Alpaka türü kumaşlarda nötron tutuculuk özelliklerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Artan bor oranı ile nötron tutuculuk penyede alpaka türü kumaşa nazaran daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Ünal, *et al.* (2016), barit agregası kullanılarak üretilen ağır betonların soğurma özellikleri ve betonun radyasyon zırhlanmasındaki etkisini incelenmişlerdir. Bu amaçla genel olarak radyasyona maruz kalınan yerlerde ağır betonların kullanılması ile betonların soğurma özelliklerinin iyileştirilebileceği fikrinden hareketle üç farklı tane boyutunda barit agregası kullanarak üretilen beton serilerinde 5-22 mm tane grubundaki iri agrega sabit tutulurken 0-5 mm tane grubundaki ince agrega miktarları taş unu ile ikame etmişlerdir. Bağlayıcı miktarı 270 kg/m^3 ve Su-Çimento oranı 0,46 ve 0,50 olarak seçilen karışımlarda işlenebilirliğini sağlamak amacıyla bağlayıcının %1,5 oranında yeni nesil süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Üretilen numuneler üzerinde radyasyon soğurma katsayısı, birim ağırlık, ultrases hızı, basınç dayanımı deneyleri yapılarak beton özellikleri incelenmişler ve elde edilen sonuçlara göre üretilen numunelerde taş unu miktarının azalması ile birim ağırlıklarda artış eğilimi görülürken betonun soğurma miktarlarında azalma tespit etmişlerdir.

Canel, *et al.* (2018), epoksinin nükleer zırh olarak oldukça popüler bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle bu çalışmalarında epoksi tabanlı kompozit zırh malzemelerinin radyasyon zırhı olarak geliştirilmesi konusunu çalışmışlardır. Demir (Fe), tantal (Ta), toryum (Th), tungsten karbür (WC) ve bizmut (Bi) tozlarının %10'luk artan

oranlarda epoksi reçinesine karışırıldırđđ simüle eldilerek elde edilen hedef numunelerin 4,5 MeV enerjili nştronlar ile bombardımana tutulması sonucu tesir kesitleri hesaplamışlar ve radyasyon zırhlama açısından değerlendirmişlerdir. Ayrıca reaksiyon sonucunda ortaya çıkan diğer şrşnler de enerji aralıkları ile birlikte tahmin edilmiştir. Bu hesaplamalar GEANT4 Monte Carlo Hesaplama Kodu kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama sonucunda %40 epoksi ve %60 tantal içeren kompozit en iyi nştron zırhı olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada hızlı nştronlar için daha iyi soğurucu/tutucu malzemeler elde etmek amacı ile parafin, bor, bor karbşr, alşminyum, epoksi, nikel, niyobyum ve krom metal tozlarını farklı kombinasyonlarda içeren kompozitler hazırlanmıştır. şretilen kompozitler hızlı nştronlarla bombardıman edilerek soğurulan doz şlşmleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel verilerden hareketle numuneler için tesir kesitleri parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar FLUKA Monte Carlo tekniği ile elde edilen simşlasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve numunelerin nştron zırhlama kabiliyetleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Atom ve Genel Özellikleri

Evrendeki tüm maddeler atomlardan oluşmuştur. Her atom, küçük bir pozitif yüklü merkezi bir çekirdek ile belli sayıda elektron içerir. Elektronlar eksi elektrik yükü taşırlar ve çekirdek etrafında sınırları kesin olmayan bulutlar içinde veya kabuklarda hareket ederler. Atomun çekirdeği, yük şiddeti elektronlarla aynı olan protonlar ve yüksüz nötronlar içerir. Proton ve nötron parçacığına nükleon adı verilir. Atomlar içerdikleri atom altı parçacıkların sayısı ile birbirlerinden farklılık gösterirler. Aynı elementin atomları aynı sayıda protona sahiptirler, bu sayıya atom numarası denir. Aynı elementin atomları farklı sayıda nötron'a sahip olabilirler böyle olan sayılar o elementin izotoplarını belirler. Bir atom, sahip olduğu proton ve nötron sayısına göre sınıflandırılır: atomdaki proton sayısı kimyasal elementi tanımlarken, nötron sayısı da bu elementin izotopunu tanımlar. Her elementin radyoaktif bozunma veren en az bir izotopu vardır. Çekirdekdeki proton ve nötron sayısı ise nükleer fisyon, nükleer füzyon ve radyoaktif bozunma yoluyla değişebilir bu durumda atom başka bir elemente dönüşebilir.

2.2. Atomun Yapısı ve Nükleonları

Kuantum Atom Teorisi, atomun yapısını açıklayan ve günümüzde kabul edilen son teoridir. Kuantum Atom Teorisine göre atom modeli Bohr atom modelinden farklıdır. Bohr Atom Modeline göre atomun merkezindeki çekirdeğin etrafında elektronlar belirli enerji seviyelerindeki daire şeklindeki yörüngelerde dolanmaktadırlar. Yörüngeler arası elektron geçişleri atomun renkli görünmesini sağlar. Ancak bu model birçok spektrumu açıklayamamıştır. Kuantum Atom Modelinde ise atomun merkezinde bulunan çekirdeğin etrafındaki elektronlar orbital denilen belli bölgelerde bulunurlar. Belli enerji seviyesine sahip bu orbitaller küresel bir katman oluştururlar. Bu küresel katmanlarda orbitallerin belirli şekilleri ve açıları (yönelimleri) vardır. Orbitallerin bulunduğu katmanların enerji seviyelerini baş

kuantum sayısı belirler. $n=1,2,3\dots$ gibi tam sayılarla ifade edilir ve elektronun enerjisini tayin eder.

l orbital kuantum sayısı elektronun çekirdek etrafındaki açısal momentumunu kontrol eder ve $0,1,\dots(n-1)$ gibi tam değerler alır.

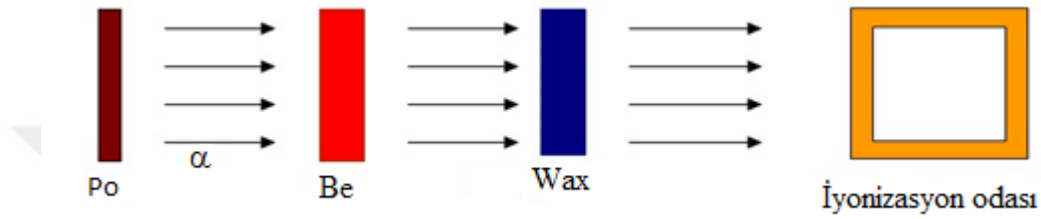
m_l manyetik kuantum sayısı elektronun çekirdek etrafında hareketinden kaynaklanan manyetik alan kuantum sayısıdır. l 'ye bağlıdır ve $-l$ 'den $+l$ 'ye kadar değer alabilir.

s spin kuantum sayısı $+1/2$ ve $-1/2$ değerlerini alabilir. İşareti onun l orbital kuantum sayısına paralel veya antiparalel olduğunu gösterir. Böylece bir atom içindeki elektron bu dört kuantum sayısı ile karakterize edilebilir. Pauli Prensibi gereği bir atomda dört kuantum sayısı n, m_l, l, s aynı olan iki elektron bulunmaz. (Pauli Prensibi).

2. 2. 1. Nötronun keşfi ve özellikleri

Nükleonların yüksüz üyesi nötrondur. W. Bothe ve H. Becker polonyum elementinden çıkan çok hızlı alfa parçacıklarıyla berilyumu bombardıman ederek çok delici ancak iyonlaştırıcı olmayan bir ışınım elde ettiler. Bu ışınların, ilk anda bir X ışını ya da gama ışınları gibi elektromanyetik ışın olduklarını düşündüler. Ancak daha sonra Poliot ve Curie berilyumdan çıkan bu ışınları hidrojeni bol bir madde olan parafine yönlendirdiler ve bu ışınların parafinden geçerken yüksek enerjili protonlar yayımlandığını fark ettiler. Eğer bu ışın gerçekten gama ışını olsaydı protonların parafinden Compton olayı gibi koparılması gerekirdi. Compton saçılmasındaki formülleri kullanarak bu kadar yüksek enerjili bir proton koparabilmek için en az 52 MeV'lik bir gama ışınına ihtiyaç vardır. Bu da olası değildir. 1932'de Chadwick berilyumdan ışıma yapan α ışınlarını parafinden başka birçok maddeye yönelterek incelemeye başladı (Şekil 2.1). Bu maddeler bu ışınlarla bombardıman edildiklerinde bu maddelerin çekirdeklerinde de geri tepeler; fakat hidrojenin çok daha düşük bir hızla hareket ederler. Geri tepen çekirdeğin atom ağırlığı arttıkça geri tepme hızının azalması berilyum ışınlarının elektromanyetik ışıma olmadığını gösterir. Çünkü bu

olay ancak kütlesi protonun kütlesine yakın bir parçacıkla meydana gelebilir. Bu parçacık büyük nüfuz etme gücüne de sahiptir. Bu da ancak elektrikçe yüksüz olmasıyla mümkündür. Yüklü parçacıklar, atomun içerisindeki elektrik alanları tarafından saptırılırlar. Elektrikçe yüksüz gamma ışınlarının alfa veya beta ışınlarına göre yüksek giricilik özelliğinin olması da bu yüzdendir. Chadwick bu berilyum ışınına kütlesi yaklaşık protonunkine eşit ve yüksüz bir parçacık olan nötron ismini verdi.



Şekil 2. 1. Chadwick'in deney düzeneği ve alfa parçacıklarının soğurulması

Curie-Juliot, Po kaynağından çıkan α parçacıklarını bir Berilyum (Be) parçası üzerine düşürdüler. Berilyumun hemen arkasında bir wax parafin levhası koyarak yüksek bir hidrojen atomu konsantrasyonu sağlamıştır.

Nötronlar protonlarla atomun çekirdeğini oluştururlar. Nötronların kütlesi yaklaşık protonun ki kadardır ($1,6748 \times 10^{-27}$ kg). Hidrojen dışında bildiğimiz bütün atomların çekirdeklerinde nötronlar vardır. Hidrojenden sonra en basit atom olan Helyum'un çekirdeğinde iki proton, iki nötron vardır. Bir elementin atomları hep aynı durumda değildir. Çekirdeklerindeki nötron sayıları değişebilir. Nötronun elektrik yükü olmadığından, atomun çekirdeğinde farklı sayıda nötron bulunması o atomun kimyasal özelliğini değiştirmez. Nötron sayısının az ya da çok olması atomun sadece kütlesini değiştirir. Nötronlar çok çeşitli teknolojik alanlarda kullanılmaktadır.

Nötronlar hidrojen atomlarına duyarlıdır. Bu nedenle hidrojen atomlarının farklı yerlere yerleştirilmesin de ve yeni ilaç dizaynında önemli olan daha hassas moleküler yapının tespit edilmesinde kullanılırlar.

Büyük biyolojik moleküller çok sayıda hidrojen atomu içerdiklerinden biyomolekülün bir parçasının görülebilmesi için izotop yerleştirilir. Bu hidrojen atomlarının ağır hidrojen (döteryum) ile yerleştirilmesiyle yapılır. Döteryum atomları ile hidrojen atomlarında nötronlar farklı saçılırlar. Kontrant değişimi denilen bu yöntemle kromozomdaki bir proteinin ya da nükleik asit gibi farklı çeşit moleküller görülebilir. Bu şekilde bir makro molekülün her parçası hakkında bilgi toplanılabilir. Sudaki hidrojenden saçılan nötronları kullanarak bir jet uçağının kanatlarında küçük bir nem tespit edilerek mikroskobik çatlak ve korozyon işaretlerinin tam yeri tespit edilerek değiştirilecek parça saptanır.

Nötronların sudaki hidrojenden saçılması olayını kullanarak NASA Ayda ve Marsta kozmonogların ulaşamadığı kutup noktalarında su bulunup bulunmadığı çalışmalarında kullanılıyor.

Hidrojenin yanında nötronlar ağır atomlar arasındaki diğer hafif atomlarda yerleştirebilirler. Nötronların bu özelliği YBCO (Yttrium-barium-Copper oxide) içindeki hafif oksijen atomlarının kritik pozisyonlarını tespit etmede de kullanılabilir.

Bir nötron pusula ibresi gibi bir yönü işaret eden bir manyetiğe benzer. Bu manyetizasyonun yönü ve büyüklüğü bir manyetik momentin manyetik momentleri aynı yönü gösteren polarize nötron ışınları üretebilir. Bu ışınlar manyetik malzemenin özelliklerinde kullanılabilir (CD, kredi kartları).

Termal nötronların enerjileri hareketli atomların enerji seviyesinde olduğundan atomların ve moleküllerin hareketlerinin gözlenmesinde kullanılabilir. Nötronlar kemiklerin gelişim evrelerinin izlenmesi ve kemiklerin mineralize olmaları osteoporoz gibi bozulmalarında da kullanılabilir.

Nötronlar yüksek enerjili plastik üretmek için polimerlerin geliştirilmesinde de kullanılabilir. Bu plastikler CD vb. ürünlerin üretilmesinde kullanılır. Nötronların bazı kullanım alanları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Nötronun genel özellikleri (Karadeniz, Yaramış ve Özkök 1973; Şahin 1999; Korkut 2010)

Kütle (akb)	1,008982
Yük	0
Spin	$\frac{1}{2}$
Yaşam Süresi (s)	887
Asal Bozunum Kipi	$p+e+\nu_e$
Çap (cm)	$1,45 \times 10^{-13}$
Manyetik Moment	$-1,935 \mu_N$

Çizelge 2.2. Nötronların kullanım alanları

Fizik, Kimya, Jeofizik, Uzay ve Materyal bilimi araştırmalarında
Hidrojen atomlarının moleküllerdeki yer tayininde
Uçak sanayinde - Silah yapımında
Hızlandırıcı Sürümlü Sistemler (ADS)
Süper iletken üretiminde - Kristalize malzemeler üretiminde
Tıbbi tanı malzemelerinde - Manyetizma ve süper iletkenlik
Transuranic (uranyum içeren) elementleri belirlemek
Nötron lambası ile nano ürünler gibi ileri teknoloji ürünlerini test etmede
Toryumla birleşerek nükleer enerji üretiminde, radyoaktif kalıntıların yok edilmesi
Medikal izotop üretiminde - Yüksek enerjili plastik üretiminde
Nötron aktivasyon analizinde - Kanser tedavisinde

2. 2. 2. Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması

Nötronlar, farklı farklı nükleer reaksiyonlarla elde edilebilir. Bu nükleer reaksiyonlarla elde edilen nötronlar genelde yüksek enerjilidirler. Çeşitli ve daha düşük enerjili nötronlar elde etmek için yüksek enerjili nötronlar farklı atomları ile çarpıştırılır. Nötronlar enerjilerine göre şu gruplara ayrılabilir (Hançerlioğulları 2007).

Yavaş nötronlar	$E \cong 0-1000 \text{ eV}$
Soğuk nötronlar	$E < 0-0,1 \text{ eV}$
Isıl nötronlar	$E \cong 0,01 - 0,3 \text{ eV}$
Termik nötronlar	$E \cong 0,01 - 0,3 \text{ eV}$
Rezonans nötronlar	$E \cong 1 - 100 \text{ keV}$
Epitermik nötronlar	$E \cong 0,3 \text{ eV} - 10 \text{ keV}$
Hızlı nötronlar	$E \cong 10 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$
Yüksek Enerjili (Rölativistik)	$E > 10 \text{ MeV}$

2. 3. Nötron Kaynakları

2. 3. 1. α (alfa) - berilyum kaynakları

Bir α parçacığı ile Berilyumun kararlı izotopu olan ^9Be ile çarpıştırılmasıyla 13 MeV'e kadar enerjilere sahip nötronlar elde edebilir.



Burada α kaynağı olarak uzun ömürlü bir α yayınlayıcı olan ^{226}Ra kullanılabilir. ^{226}Ra yaklaşık 5-8 MeV'lik α yayınlar. Bu kaynakla elde edilen nötronlar aşağıdaki sebeplerden dolayı tek enerjili değildir.

1. Berilyuma gelen birçok α grubunun olması.
2. Berilyum içindeki çarpışmalar sonucu α 'ların yavaşlaması.
3. Geliş doğrultuları bilinmeyen α 'lara göre yayınlanan nötronların doğrultularının farklı oluşu.
4. Bazı ^{12}C izotoplarının uyarılmış enerji seviyelerinde olması ihtimali.

^{226}Ra Curie (Ci) cinsinden 10^7 parçacık / saniye nötron (5 MeV) üretebilir. ^{226}Ra ve radyoaktif ürünleri de yüksek enerjili γ ışını yayınladıklarından dolayı radyum - berilyum kaynağı yerine yaygın olarak ^{210}Po (138 gün) ^{238}Pu (86 yıl)

^{241}Am (486 yıl) kaynakları kullanılmaktadır. Bu kaynaklar Ci cinsinden $2-3 \times 10^6$ parçacık / saniye nötron üretebilirler.

Alfa parçacığının oluşturduğu reaksiyonlar nötron kaynağı olarak kullanılabilir ancak hepsi Be reaksiyonlarıyla karşılaştırıldığında birim alfa aktivitesi daha düşük nötron verimine sahiptirler. Daha iyi reaksiyon sonuçlarından Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Alternatif (α , n) izotopik nötron kaynakları

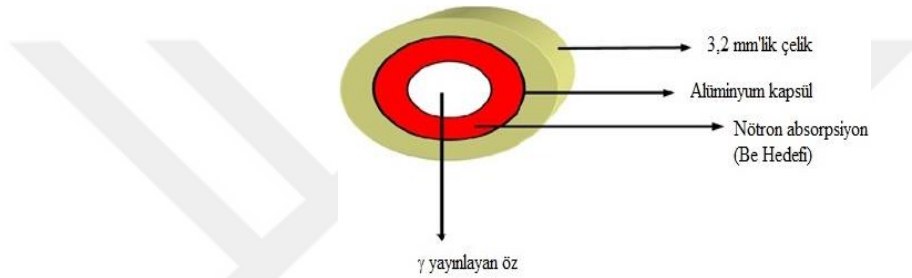
Hedef	Reaksiyon	Q değeri (MeV)	$10^6\alpha$ parçacığı başına nötron verimi
Tabii Be	$^{10}\text{Be} (\alpha, n)$	+ 1,07	$^{241}\text{Am} - \alpha$ parçacığı için 13
Be	$^{11}\text{Be} (\alpha, n)$	+0,158	$^{241}\text{Am} - \alpha$ parçacığı için 13
F	$^{19}\text{F} (\alpha, n)$	-1,93	$^{241}\text{Am} - \alpha$ parçacığı için 4,1
^{13}C	$^{13}\text{C} (\alpha, n)$	+2,2	$^{241}\text{Am} - \alpha$ parçacığı için 11
Be	$^9\text{Be} (\alpha, n)$	+5,71	$^{241}\text{Am} - \alpha$ parçacığı için 70

2. 3. 2. Foto-nötron kaynakları

Alfa-nötron kaynaklarına benzer olarak gama-nötron reaksiyonu da gerçekleştirilebilir. Buradaki avantajlı durum eğer foton yaklaşık olarak tek enerjili ise elde edilecek olan nötronlarda yaklaşık olarak tek enerjili olabilirler. Bu da tek enerjili nötronları birçok alanda kullanma olanağı verir. ^{24}Na izotopu tarafından yayınlanan 2,76 MeV' lik γ - ışınlarının soğrulması ile ^9Be ' un zayıf bağlı bir nötronunu koparabilir ve yaklaşık enerjisi 0, 8 MeV' lik nötron elde edebilir (Yaramış 1985 ; Knoll 1989).



${}^{24}\text{Na}$ ' un verimi Ci cinsinden aktifliği başına 2×10^6 nötron /s olup bu değer ${}^9\text{Be}$ ' un zayıf bağlı bir nötronunu koparmak için yeterlidir fakat yarı ömrü kısadır (15 saat). Daha uzun ömürlü olan ${}^{124}\text{Sb}$ (60 gün) γ kaynağı kullanılarak 24 keV' lik düşük enerjili nötronlar elde edilebilir.



Şekil 2. 2. Basit bir foto-nötron kaynağının yapısı

Bazı foto nötron kaynaklarının özellikleri çizelge 2.4'te verilmiştir.

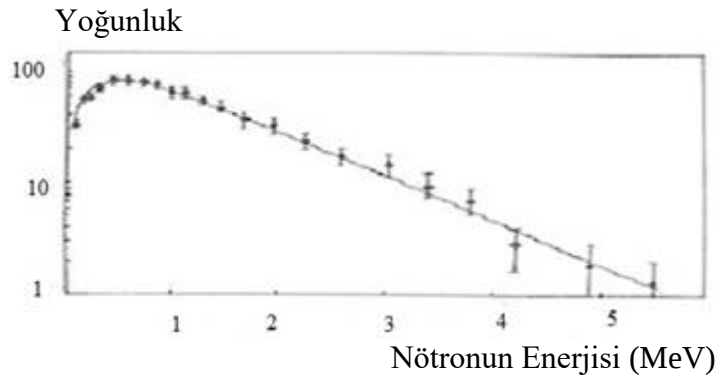
Kullanımları sırasında γ yayınlayıcıların çoğunun yarı ömürleri kısa olduğundan nükleer reaktörlerde yeniden aktiflenmeleri gerekmektedir. Ayrıca büyük γ - ışını aktiviteli kaynakların belli enerjili nötronları üretmek için kullanılması bu kaynakların bir dezavantajıdır.

Çizelge 2.4. Foto-nötron kaynaklarının özellikleri (Wiley 1996)

α ışını yayınlayıcısı	Yarı ömür	γ ışınının enerjisi (MeV)	Hedef	Nötron enerjisi (keV)	10^{10} Bq'lık aktivite için nötron verimi (n/s)
^{24}Na	15 saat	2,7541	Be	967	340 000
^{28}Al	2,2 dak.	1,7787	Be	101	32 600
^{38}Cl	37,3 dak.	2,1676	Be	446	43 100
^{56}Mn	2,58 saat	2,9598	D	365	162
^{72}Ga	14,1 saat	1,8611	Be	174	64 900
^{88}Y	107 gün	1,8361	Be	152	229 000
^{116}In	54,1 dak.	2,1121	Be	397	15 600
^{124}Sb	60,2 gün	1,6910	Be	23	210 000
^{140}La	40,3 saat	2,5217	Be	760	10 200
^{144}Pr	17 dak.	2,1856	Be	462	690

2. 3. 3 Kendiliğinden fisyon

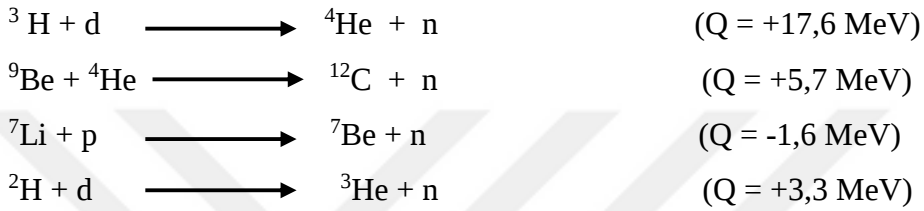
^{252}Cf (2,65 yıl) gibi kendiliğinden fisyonu uğrayan izotoplar yaygın olarak nötron kaynağı olarak kullanılırlar. Nötronlar doğrudan fisyon reaksiyonu sonucu üretilir ve her parçalanma başına yaklaşık 4 nötron elde edilir. Bozunmaların sadece % 3'ü nötron ve kalanı ise α bozunumudur. 1gr ^{252}Cf başına $2,3 \times 10^{12}$ nötron/s düşer. Buradaki nötron enerjileri yaklaşık 1-3 MeV' dir (Knoll 1989).



Şekil 2. 3. ^{252}Cf nötronların enerji spektrumları (Aygün 2010).

2. 3. 4. Nükleer reaksiyonlar

Nötronlar birçok reaksiyonla elde edilebilir. Ancak reaksiyonun başlaması için gerekli yüklü parçacıkların parçacık hızlandırıcılarla hızlandırılması gerektiğinden radyoaktif bozunma kaynaklarına nisbeten kullanışlı değillerdir. Kullanılan yüklü parçacığın enerjisi ile yayınlanan nötronların yayınlanma açısı ayarlanarak belli ve tek enerjili nötron demetleri elde edilebilir. Bunun için genelde aşağıdaki reaksiyonlar kullanılır (Yaramış 1985).



2. 3. 5. Reaktörler

Bir nükleer santralin yakınlarında nötron akısı oldukça yüksek olabilir ve cm^2 başına yaklaşık 10^{14} parçacık / saniye 5-7 MeV'lik nötronlar elde edilebilir. Bu nötronlar reaktör içinde termal nötronlara kadar yavaşlatılırsalar da, reaktör merkezinde hızlı nötronlar bulunabilir. Reaktör kazanının zırhından açılacak küçük bir delikten gelecek nötronlar laboratuvar deneylerinde kullanabilir. Gelen hızlı nötronlar su veya parafin gibi maddelerle yavaşlatılarak çeşitli enerjilerde nötron elde edilebilir. Gelen yüksek düzeydeki nötronlardan nötron soğrulmasıyla radyoizotop da üretilebilir.

2. 4. Nötronların madde ile etkileşimleri

Nötronlar γ -ışınları gibi yük taşımadıklarından dolayı Coulomb etkileşimi olmadan maddeyle etkileşirler. Coulomb kuvvetleri yüklü parçacıklar ve elektronlar için maddeyle etkileşimde enerji kaybettiren ana sebeptir. Nötronlar herhangi bir etkileşme yapmaksızın maddenin içine santimetrelerce ilerleyebildiklerinden sıradan büyüklüğe sahip bir dedektörle tamamen gözlemlenemeyebilirler. Etkileşmenin sonucu olarak nötronlar görünmezler ya da daha çok ikincil radyasyonla yer

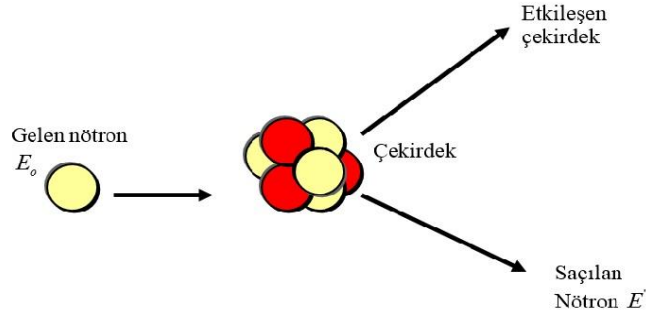
değiştirebilirler veya ilaveten nötronların enerjileri ve doğrultuları önemli derecede değiştirilir. γ -ışınlarının aksine nötron etkileşmelerinin sonucu oluşan ikincil radyasyonlar neredeyse her zaman ağır yüklü parçacıklardır. Bu parçacıklar ya nötronların indüklediği nükleer reaksiyonlar sonucu olarak üretilebilirler ya da nötron çarpışmalarının sonucu olarak enerji alan soğurucunun kendi çekirdekleri olabilir.

Nötronlar nötr olduğundan dolayı çekirdek reaksiyonlarında hemen hemen her enerjideki nötronları kullanmak mümkündür (Karadeniz et al 1973; Yaramış 1985).

Nükleer reaksiyonların oluşmasıyla nötron akıları elde edilebilir. Yüklü parçacıklar gibi hızlandırılmayan nötronlar yüksek enerjili oldukları zaman farklı madde atomlarıyla çarpıştıklarında enerjilerini azaltabilirler. Bu işlem “yavaşlatma” olarak adlandırılır. Böylece yukarıda da ifade edildiği gibi düşük enerjili nötronlar sınıflandırılabilir (Zeren 2008).

2. 4. 1. Elastik saçılma

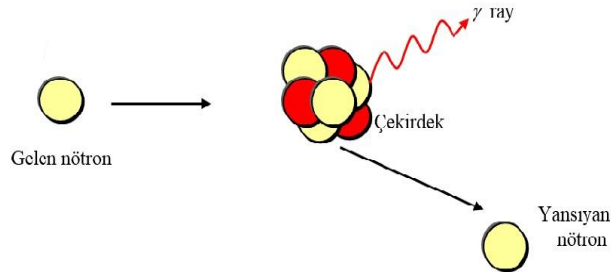
Elastik saçılma MeV mertebesinde enerjiye sahip olan nötronların temel enerji kaybetme mekanizmasıdır. Çarpışan iki parçacığın toplam kinetik enerjisi korunur. Bu çarpışma (n, n) şeklindeki reaksiyonlardır. Nötron bir atom çekirdeğine çarpar ve kinetik enerjisinin bir kısmını ona aktardıktan sonra kendi geliş doğrultusundan saparak farklı bir doğrultuda çekirdekten uzaklaşır. Burada çekirdeğin yapısında değişiklik olmaz. Yavaş nötronlar küçük kinetik enerjilerinden dolayı bu çarpışmada enerjilerinin küçük bir kısmını çekirdeğe aktarabilir. Bu etkileşim yavaş nötron detektörlerinin temelini oluşturabilecek bir etkileşme değildir. Yine de elastik saçılmalar mümkün olduğunca olma eğilimindedir ve farklı bir etkileşme yapmadan önce soğurucuyla yavaş nötronları termal dengeye getirmeye çalışır. Bu nedenle yavaş nötronların enerji aralığındaki enerjilere sahip olan nötronların çoğunluğu oda sıcaklığında yaklaşık 0,025 eV ortalama enerjiye sahip olan termal nötronlar arasında bulunacaktır.



Şekil 2. 4. Nötron'un çekirdekten elastik saçılması (Aygün 2010).

2.4. 2. İnelastik saçılma

Bu saçılma (n, n') (n, 2n') gibi reaksiyonların olduğu durumlarda ortaya çıkan saçılma. Bu çeşit reaksiyonlarda, çekirdek uyarılmış durumda bırakılır ve bu çekirdek daha sonra gama veya radyasyonun diğer çeşit formları ile bozunur. Nötronun çekirdeği uyarması için yeterince enerjiye (1 MeV veya fazla) sahip olması gerekir. Bu eşik enerjisinin altında, sadece elastik saçılma olur.

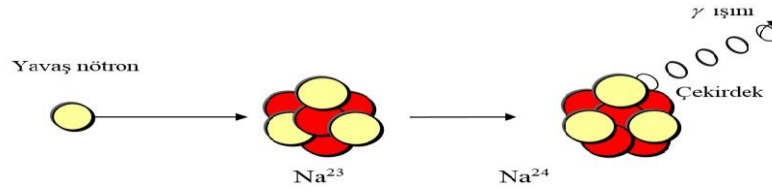


Şekil 2.5. Nötron'un çekirdekten inelastik saçılması (Aygün 2010).

2. 4. 3. Nötron yakalanması

$n + {}^A X \longrightarrow \gamma + {}^{A+1} X$ şeklindeki reaksiyonlardır. Nötron

yakalanması için tesir kesiti $\cong \frac{1}{v}$ ile değişir. v nötronun hızıdır. Bu sebeple düşük enerjilerde nötron yakalanma olasılığı daha yüksektir.



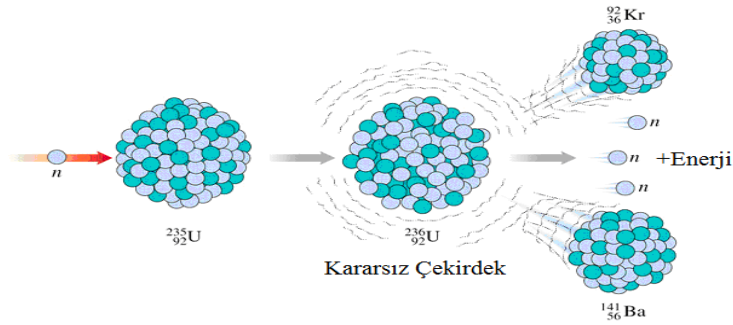
Şekil 2.6. Nötron yakalanması (Aygün 2010).

2. 4. 4. Nükleer reaksiyonlar

Nükleer reaksiyonlar eV ile keV mertebesinde enerjiye sahip nötronların çekirdek tarafından yakalanıp yüklü parçacığın yayınlanması ile oluşur. Bu reaksiyonlar (n, p), (n, d), (n, α), (n, t) gibi reaksiyonlardır.

2. 4. 5. Fisyon olayı

Fisyon termal enerjili ($E \cong 0,003 - 0,4 \text{ eV}$) nötronların çekirdek ile etkileşmesi sonucu çekirdeğin parçalanmasıdır. Bu parçalanma sonucunda iki ürün çekirdeğin yanı sıra daha birçok element meydana gelmektedir.



Şekil 2. 7. Fisyon olayı (Aygün 2010).

2. 4. 6. Yüksek enerji hadron sağanağının üretilmesi

Enerjisi 100 MeV veya daha fazla olan yüksek enerjili (rölativistik) nötronlar bir çekirdek içinde tutulduklarında çeşitli tipte parçacıklardan oluşan bir sağanağa

sebeep olabilirler. Nötronların madde ile etkileşebilmesi için toplam olasılık bu ayrı ayrı etkileşmelerin tesir kesitlerinin toplamı olmalıdır.

2. 5. Nötronların soğrulması ve yavaşlatılması

Nötronlar madde içinden geçerken nükleer reaksiyonlar aracılığı ile zayıflarlar. Hızlı nötronlar için (n, p) , (n, α) ya da $(n, 2n)$ gibi reaksiyonların olması olasıdır. Ancak termal ve yavaş nötronların yok olması (n, γ) yakalama reaksiyonlarıdır. Nötronlar madde içinde d_x kalınlığında bir mesafe aldıklarında maddenin birim yüzeyi başına $n d_x$ atomla çarpışırlar (n , maddenin birim yüzeyindeki atom sayısıdır), σ_t toplam tesir kesiti olmak üzere nötron şiddetindeki kayıp ise;

$$dI = -I\sigma_t n d_x \quad (2.4)$$

olur. Şiddet soğurucu kalınlığı ile üstel olarak yazılırsa;

$$I = I_0 e^{-\sigma_t n x} \quad (2.5)$$

olur. Bu soğurma sırasında düşük enerjili ve değişik tesir kesitine sahip nötronlar meydana gelebilir. Bu etkiler hesaba katılacak olursa denklem (2. 5) kullanılamaz. Bu sadece ilk enerjili nötronların şiddet değişiminin hesaplanmasında yardımcı olur. Ancak ilk enerjisi E ve hızı v olan bir nötron durgun olan A kütleli bir hedef atomuyla elastik bir çarpışma yaparsa enerji ve momentum korunum yasaları dikkate alındığında E ilk ve E' son enerjili nötronların enerji oranları ;

$$\frac{E}{E'} = \frac{A^2 + 1 + 2A \cos\theta}{(A+1)^2} \quad (2.6)$$

olur. Burada E , nötron' un ilk enerjisi, E' , nötron' un son enerjisi, θ , kütle merkezi sistemindeki saçılma açısıdır. Saçılma olmadığı durumlarda $\theta = 0^\circ$ olur ki ve o zamanda

$$E/E' \cong 1 \quad (2.7)$$

olması beklenir. Maksimum enerji kaybı merkezi çarpışmada meydana gelirse o zaman $\theta = 180^\circ$ olur ve (2. 6) daki denklem yeniden yazılırsa

$$\frac{E}{E'} = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \quad (2.8)$$

elde edilir. $A = 1$ için (hidrojenden saçılma) nötronun tüm enerjisini çarptığı protona aktardığı anlamına gelir.

10 MeV ve daha düşük enerjili nötronların saçılması s dalgası şeklindedir. Her nötron birkaç defa saçılacağı için enerji kaybı art arda hesaplanmalıdır. Çünkü ikinci saçılmalarda nötronlar artık tek enerjili olmayacaklardır. Bu saçılmalar θ 'dan bağımsızdır. Nötronlar, diğer parçacıklara (α, β, γ) oranla madde içinde daha fazla mesafe alabildiğinden durdurma ve soğurma kalınlığı nötronların sahip olabileceği enerji aralığına göre değişir. Nötronlar soğurulmanın yanında soğurucu malzemenin çekirdeği tarafından yakalanarak gama yayınlanmasına da sebep olabilirler bu nedenle gamaların da tutulması için bir malzemeye ihtiyaç duyulur. Nötronların soğurucu malzemenin içindeki giricilik mesafe boyunun azaltılması soğurucu tarafından sağlanan doz eşdeğerinin azaltılmasını belirler. Nötronların soğurulması için kaynak önüne yeterli kütle (yüksek atomik kütleli yoğun bir materyal) konulmalıdır. Nötronların şiddetlerinin azaltılması için hidrojen ile elastik saçılma yapması gerekir. Bu nedenle az bütçeli ve en kolay soğurucu madde betondur çünkü yüksek hidrojen içeriğine sahiptir (Krane 2002).

2. 6. Monte Carlo Simülasyon Tekniği

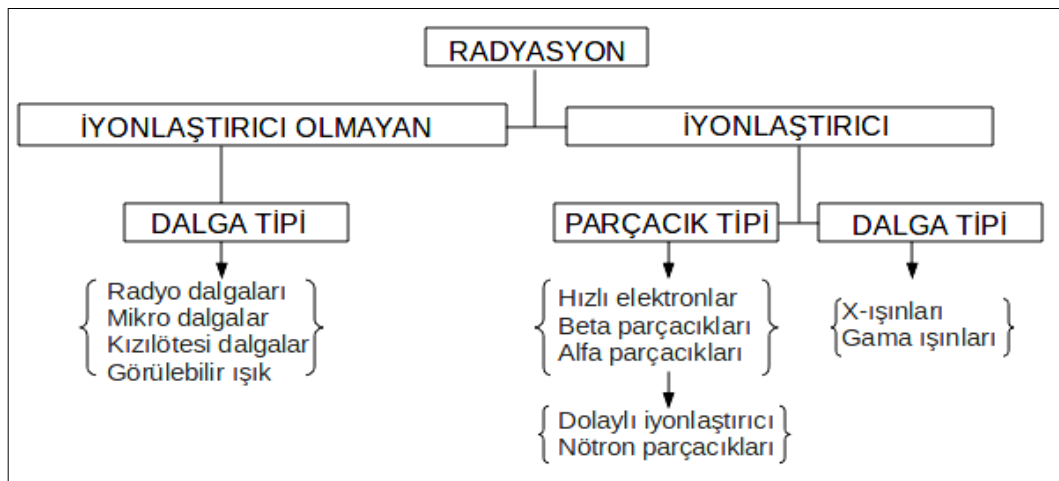
Yüksek enerji fiziğindeki çalışmalarda deney öncesi ve deney sonrası olası durumları tahmin etmek için Geant4 ve Fluka programları ile yapılan simülasyonlar kullanılmaktadır. Fluka programı Fortran altyapısı ile çalışmaktadır. Fluka programı, proton ve elektron hızlandırıcı sürüm sistemlerinin zırhlaması tasarımlarında, parçacıkların geçişinde, madde ile etkileşimlerinde, dedektör tasarımlarında,

dozimetride, nötron fiziğinde ve radyoterapide vb. yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu program ile ağır iyonların, termal ve daha düşük enerjideki nötronların anti parçacıkların, enerjisi 1 keV 1000 TeV'e kadar değişen protonların ve elektronların, 20 TeV ve daha yukarı enerjiye sahip hadronlar ve müonlar gibi 60 farklı tanecığın madde ile etkileşimlerinin karşılaştırılmasında yüksek doğrulukla kullanılır. İyi bilinen ilerlemiş kopleks Birleşik Geometri (Coplexed Geometry) versiyonu ile işlem yapılır. Bu geometri yüklü parçacıkların elektrik ve manyetik alanda izledikleri yollara göre tasarlanmıştır. Başka bilgisayar programlarına gerek duymadan rahatlıkla kurulabilir.

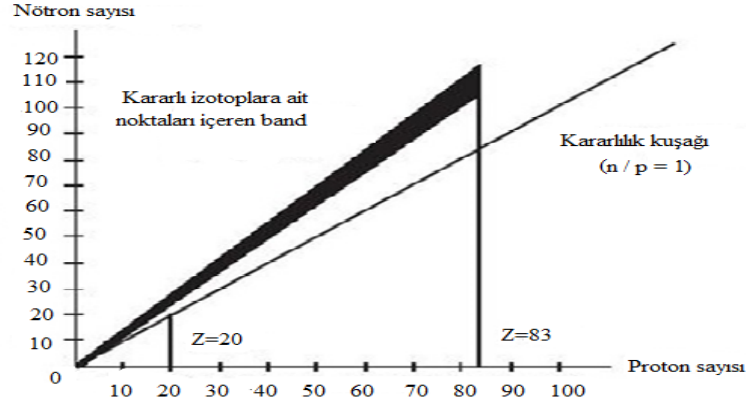
2. 7. Radyasyon

Radyasyon, dalga, parçacık veya foton olarak adlandırılan ve kaynağından doğru çizgiler boyunca yayılan enerji paketleridir. Çekirdeklerindeki n / p oranı 1 veya 1'e yakın olmayan yani nötron sayısı ve proton sayısı arasında denge olmayan atomlar aşırı enerjiye sahip olduklarından kararsızdır. Çekirdek kararlılığının N_n / N_p oranına bağlılığı şekil 2.9'da verilmiştir. Bu durumdaki elementler N_n / N_p dengesini sağlamak için fazla olan enerjilerini çeşitli yollarla kayıp ederek kararlı duruma geçmeye çalışırlar. Bu süreçte ortaya çıkan enerji radyasyon olarak adlandırılır.

2.8. Radyasyon çeşitleri



Şekil 2.8. Radyasyon çeşitleri (Korkut 2010).



Şekil 2.9. Çekirdek kararlılığının nötron proton oranına bağlılığı (Berber 2005).

2. 8. 1. İyonlaştırıcı radyasyon

İyonlaşabilen atomlardan veya iyonlaşabilen moleküllerden elektron koparmak için yeterli enerji taşıyan kuantumlara sahip olan herhangi bir elektromanyetik radyasyon türüne denir. İyonlaştırıcı radyasyonlar elektromanyetik ve parçacık olmak üzere ikiye ayrılırlar.

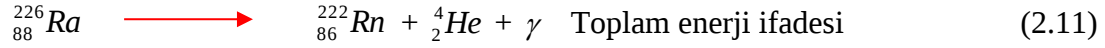
2. 8. 1. a. İyonlaştırıcı Elektromanyetik radyasyonlar

γ ve X- ışınları İyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyonlardır. Bunlar yüksek frekanslı görünen ışık ve radyo dalgaları gibi elektromanyetik dalgalar olup bunların dalga boyları çok küçük fakat enerjileri yüksektir.

- γ -Işınları

γ -ışınları 1900'da Paul Ulrich Villard tarafından bulunmuş 10^{-10} m ve 10^{-14} m dalga boyuna sahip elektromanyetik radyasyondur. α veya β yayılımını takiben meydana gelen çekirdek tarafından yayınlanır. Radyoaktif bir çekirdek α veya β - parçacıkları yayınladıktan sonra çekirdek uyarılmış halde kalır ve bu çekirdekte yüksek enerji oluşur. Çekirdek normal hale geçerken enerjisini kaybetmesi çekirdekten bir parçacık fırlatılması şeklinde olmazsa buna izomerik geçiş denir ve bu

arada bir γ -ışını yayınlanır. Yüksek enerjili gama ışınları birkaç cm kalınlıktaki kurşundan geçerler. γ ışınları meydana getirdikleri elektronlarla iyonizasyon yaparlar. γ lar aşağıdaki reaksiyonlar ile elde edilirler:



Manyetik alanda sapmadıkları için belirli bir elektrikle yüklü değildir. γ -ışınları elektromanyetik dalgalardan meydana gelmiştir. Radyoaktif bozunmalar ya da nükleer reaksiyonlar sonucu oluşan ve Sezyum (Cs^{137}), Kripton (Kr^{88}), Kobalt (Co^{60}), gibi kararsız atom çekirdeklerinden yayılan bir çeşit elektromanyetik ışınlardır.

- **X-ışınları**

10^{-5} - $100 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalardır. Yüksek enerjili parçacıkların yavaşlatılması veya atomik yörüngelerdeki elektron geçişlerinden oluşurlar. Canlı dokulara ve organizmalara zarar verici ve öldürücü ışınlardır.

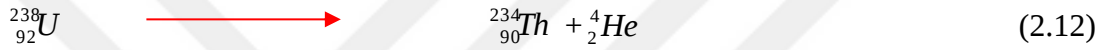
2. 8. 1. b. Parçacık radyasyonu

Parçacık özeliğine sahip radyasyon α , β^- , β^+ parçacıkları, elektronlar (e^-), pozitronlar (e^+), nötronlar (n),yüksek enerjili protonlar (p^+), müonlar, tarafından oluşturulan radyasyondur.

- **α -parçacıkları**

1903 yılında Rutherford tarafından bulunmuştur. α -parçacıkları iki defa pozitif yüklü helyum çekirdekleridir. α -parçacıkları radyoaktif atomdan ve atoma bağlı olarak çok büyük bir hızla (ışık hızının 1/10-1/15'i kadar) yayınlanırlar. α -parçacıklarının

enerjileri 4- 8 MeV arasında değişir. Bir radyoaktif atomun verdiği enerjileri hemen hemen aynıdır. α -parçacıkları iyonlaştırıcı parçacıklardır. α parçacıkları β parçacıklarından daha gıricidirler. Birkaç cm kalınlığındaki havadan veya mm'den daha küçük kalınlıktaki alüminyum tabakalarından geçebilirler. Bir radyasyonun meydana geldiği andan bir ortamda durana kadar aldığı yola o madde ya da ortamdaki gıriciliği denir. Radyoaktif maddelerin elektrik, ısı ve kimyasal olayları genelde α parçacıklarının oluşumuyla ilgilidir. (α) alfa bozunması radyoaktif çekirdekten kütle numarası 4 atom numarası 2 olan bir taneciğin ayrılması sonucu olduğundan bir atom çekirdeği α - bozunmasına uğradığında kütle numarası 4 ve atom numarası da 2 azalır. Örneğin $^{238}_{92}\text{U}$ α - bozunmasına uğradığında $^{234}_{90}\text{Th}$ ' e dönüşür.



- **β -parçacıkları**

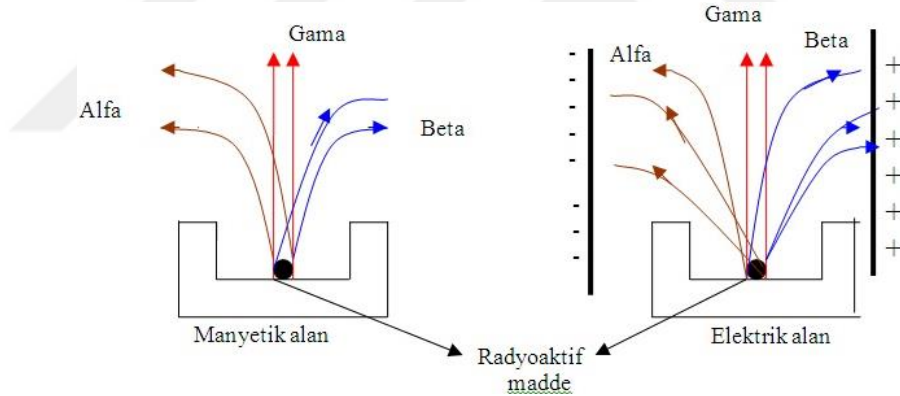
β -parçacıkları elektronlardan oluşmuştur. Işık hızına yakın hızla hareket ederler. Gıricilikleri α - parçacıklarından fazladır. İyonlaştırıcı parçacıklardır. β -parçacıklarını iki gruba ayırabiliriz; birincil ve ikincil β -parçacıkları. ekirdekten gelen ilk ışınlara Primer β -parçacıkları denir.

Bazı geçişlerde uyarılmış çekirdekle γ -ışını yayınlamazlar fazla enerjilerini çekirdekten değil de dıştaki genelde K tabakasından elektron koparıp fırlatarak normal hale gelirler. Buna i dönüşüm denir. Burada meydana gelen β -parçacıklarına sekonder β -parçacıkları denir. Sekonder β -parçacıklarının enerjileri farklıdır. Çünkü ekirdek dışındaki elektronlar belli enerji seviyelerinde bulunur. Bu i dönüşüm olayında elektronun koparılmasından sonra boşalan yere st tabakalardan elektron geçer. Bu durumda ya elektronun geldiği seviye ile yerleştiği seviye arasındaki fark kadar enerjiye sahip o elementin karakteristiği olan X-ışınları yayınlanır yada bu enerji st tabakalardaki bir elektronun koparılması için harcanır. Bu duruma ışımasız i dönüşüm denir ve bu durumda meydana gelen elektronlara

Auger elektronları denir. β -parçacıkları fotoğraf plakalara etki ettikleri gibi cam, porselen, fayans gibi maddelerin renklenmesine neden olurlar. β -parçacığı saçan atomlara örnek olarak Potasyum(K^{40}), Stronsiyom(Sr^{90}), Karbon(C^{14}) verilebilir (Yaramış 1985).

Çizelge 2.5. Bazı α kaynakları

Element	Enerji (MeV)	Havadaki yol (cm)
Uranyum $^{238}_{92}U$	4,18	2,73
Toryum $^{234}_{90}Th$	4,75	3,28
Plutonyum $^{239}_{94}Pu$	5,159	3,75
Polonyum $^{210}_{84}Po$	5,298	3,84



Şekil 2. 10. α , β - parçacıklarının ve γ ışınlarının manyetik ve elektrik alandaki Sapmaları (Yaramış 1985)

Sonuç olarak β - parçacıklarının dağılımı karışıktır. Kesiksiz bir enerji dağılımı gösteren pirirmer β - parçacıkları yanında belli enerjili iç dönüşüm elektronları ve Auger elektronları da bulunur. Radyoaktif atomlardan yayınlanan α , β - parçacıkları ve γ ışınları canlı hücrelere etki ederler. Bu etki kaynağın şiddetine, kaynağın canlıya uzaklığına bağlıdır. (Yaramış 1985)

- **Serbest nötronlar**

Serbest nötronlar radyasyonla oluşan yüksüz parçacıklardır. Bu nedenle her maddeye kolayca girebilirler. Bunların doğrudan iyonlaştırıcı özellikleri yoktur. Ancak bu serbest nötronların, girdikleri maddelerin atomları ile etkileşimleri sonucu α , β -parçacıkları, γ ve X-ışınları gibi radyasyon oluştururlar. Bu radyasyonlar ise etkileşme sonucu girdiği maddenin atomundan koparak iyonlaşmayı gerçekleştirir.

2. 8. 2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar

Madde ile etkileşince iyon meydana getirmeyen yani atomdan veya molekülden bir elektron koparacak kadar yeterli enerjiye sahip olmayan radyasyon çeşididir. Kendi arasında ikiye ayrılır.

2. 8. 2. a. Optik (görünür) radyasyonlar

Optik radyasyonların asıl kaynağı Güneş olan ultraviyole ışınlarıdır. Ultraviyole ışınları güneş tam doğarken bolca yayılmaktadır. Ultraviyole ışınları beyaz elbise giyilerek engellenebilir. Bazen bu ışınlar kar veya kumdan yansarak kar ve güneş körlüğü yapabilirler. Ultraviyole ışınlarının giriciliği az olduğundan madde içlerine çok fazla nüfuz edemezler ancak canlı organizmalarda büyük oranda deri ve gözleri etkileyerek deri kanserlerinin %80'ine gözlerde ise katarak oluşmasına neden olurlar.

2. 8. 2. b. İyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik radyasyonlar (EMR)

Radyo dalgaları, mikrodalgalar, mobil ve cep telefonları, radyo FM ve TV vericileri, radarlar, trafolar, mikrodalga fırınlar, bilgisayarlar, akım taşıyan kablolar bu gruba girmektedir.

2.9 . Radyoaktiflik

Radyoaktiflik 1896’da Fransız kimyacı Henri Becquerel tarafından, potasyum uranil sülfatın (KUO_2SO_4) yaydığı ışının bazı maddelerden geçip fotoğraf plağını karartmasıyla keşfedilmiştir.

Atomda bulunan nötron sayısı proton sayısından oldukça fazla ise; bu madde kararsız bir yapı göstermektedir. Çekirdeğindeki nötronlar alfa, beta, gama gibi çeşitli ışınlar yayan maddelere radyoaktif maddeler denir. Radyoaktivite doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılır.

Doğada bulunan bazı atomlar kararsızdır. Yani n / p oranı 1,5’den büyüktür. Bu atomlar ($^{238}_{92}U$, $^{226}_{88}Ra$ vb.) dışarıya enerji (radyasyon) yayarak kararlı hale geçmek isterler, bu olaya doğal radyoaktivite denir.

Örneğin $^{238}_{92}U$ ile başlar ya bir radyoaktif bozulma $^{206}_{82}Pb$ ile sona erer



Curie ve Joliot 1934 yılında alüminyum, bor gibi hafif elementleri polonyum ve α -parçacıklarıyla bombardıman ederek radyasyon yayınlandığını ve kaynağı uzaklaştırdıklarında ise yayınlanmanın yavaş yavaş sifira düştüğünü gözlemlediklerinde yapay radyoaktiviteyi keşfetmişlerdir. Doğada kararlı durumda olan bazı izotoplar yapay olarak kararsız duruma getirilebilir. Bu kararlı izotoplar radyasyona maruz bırakılarak aktif hale getirilir. Aktif hale gelen çekirdek parçalanmaya başlar. Kararsız çekirdeğin enerji fazlalığı vardır ve bu enerji fazlalığı genelde ya bir nötronunu bir protona ya da bir protonunu bir nötrona dönüştürerek veya elektron yakalayarak kaybedilir. Bu durumda bu olay yapay radyoaktivite olarak adlandırılır (Yaramış 1985).

2.10. Radyasyon Birimleri

Becquerel ve Curie: Bir radyoaktif maddenin birim zamanda yaptığı bozunumun ortalama sayısı olup becquerel ile ölçülür. Aktivite birimi olarakta bilinir (Açıkgöz ve Yıldırım 2001).

Klasik Birim : Curie (Ci)

SI Birim : Becquerel (Bq)

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^7 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

Gray ve sievert (rad ve rem): Bir malzemedeki herhangi bir noktada mutlak soğurulmuş ışıma dozu, malzeme tarafından soğurulan birim hacimdeki enerjinin bu noktadaki kütle yoğunluğuna bölümü olarak tanımlanır.

Klasik Birim : rad (Radiation Absorbed Dose)

SI Birim : Gray(Gy)

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$$

Birim zamanda soğrulan doz miktarına soğrulan doz hızı denir.

Klasik Birim : rad/sn, mrad/saat vb.

SI Birim : Gy/sn, mGy/dakika vb.

Işınlanma düzeyi: Radyasyonun belirli bir ortamda (hava) atomları iyonlaştırma (iyonizasyon meydana getirme) özelliğine dayanan bir ölçüdür ve elektromanyetik radyasyon için tanımlanmıştır.

Klasik Birim: Röntgen (R)

SI Birim: Coulomb/kg (C/kg)

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$$

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4}$$

Sievert, bağıl biyolojik etkinlik (BBE) çarpanını mutlak soğurulmuş doza bağlayan bir birimdir. Sv eşdeğeri doz, söz konusu ışıma için uygun BBE çarpanıyla çarpılmış olarak Gy dozuna eşittir. Sv dozu, verilen bir ışıma dozunu almış canlı dokuya yönelik potansiyel hasarın bir göstergesidir. Uygulamada dozlar genellikle milisievert (mSv) olarak ifade edilir. Rem ile rad arasındaki ilişki sievert ile gray arasındaki ilişkinin aynıdır (Çizelge 2.6), yani $1 \text{ Sv} = 10^2 \text{ rem}$ 'dir (Açıkgöz ve Yıldırım 2001).

Röntgen ışınlama birimi olup 1 cm^3 kuru havada, normal koşullarda iyon çifti oluşturan ışınlam miktarı olarak tanımlanır. Havada bir iyon çifti oluşturmak için gerekli enerji 32,5 eV olduğuna göre bir röntgen 1 cm^3 havada 0,108 erg'lik bir enerji soğurulmasına karşılıktır. 1 gram Radyum'un yayınladığı süzölmüş gama ışınları, 10 cm uzaklıkta 1 saatte 85 röntgenlik bir doz yaratır (Yılmaz 1998).

Çizelge 2.6. Radyasyon birimleri

Radyasyon Birimleri	SI Birimi	Özel Birim	Dönüştürme
Eşdeğer Doz Birimi	Sievert (Sv)	Rem	1 Sv =100 Rem
Aktivite Birimi	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)	1 Ci =3,7x10 ¹⁰ Bq
Soğurulma Doz Birimi	Gray (Gy)	Rad	1 Gy =100 Rad
Işınlama Birimi	Coulomb/kilogram (C/kg)	Röntgen (R)	1 R =2,58x10 ⁻⁴ C/kg

2.11. Radyasyonun İnsan ve Çevre Üzerindeki Etkileri

Yaşam her zaman, iyonlaştırıcı ışımanın tehlikeleriyle karşı karşıyadır. Başlıca üç doğal kaynak söz konusudur. Bunlar kozmik ışınlar, vücudun kimyasında rol oynayan radyoaktif çekirdekler ve toprakta bulunan radyoaktif elementler.

Kozmik ışınlar galaksiyi baştanbaşa geçen çok yüksek enerjili parçacıklardır. Yer atmosferine çarpan kozmik ışınlar ikincil parçacık sağanağına neden olurlar; deniz yüzeyinde bu ikincil sağanak insan vücuduna yaklaşık olarak 0,25 mSv/yıl'lık bir doz iletir. Kesin doz enleme bağlıdır ve yükseklikle artar. 4000 metre yükseklikteki doz yaklaşık olarak 2 mSv/yıl'dır.

Vücutta bulunan en önemli radyoaktif çekirdek ⁴⁰K'dır. Potasyum, toplam vücut ağırlığının yaklaşık olarak %0,2'sini oluşturur. Spin ve paritesi 4⁻ olan ⁴⁰K izotopu yerin oluşumundan beri varlığını sürdürmekte olup doğal potasyumun %0,0117'sini oluşturur. Bu izotop bir tek-tek çekirdektir ve üç tip beta bozunumuna uğrayabilir. Fakat en yaygın kip 1,32 MeV kinetik enerji salan elektron yayımıdır. Bozunumların geriye kalan %11'i ⁴⁰Ar'nin uyarılmış bir durumuna geçişle sonuçlanan elektron yakalaması yoluyla oluşur; bu durum 1,46 MeV enerjili gama ışını yayarak kendiliğinden bozunur. Bu bozunmalar nedeniyle vücut, 0,17 mSv/yıl'lık bir doz alır. Vücuttaki diğer radyoaktif çekirdekler de benzer büyüklükte bir katkı yapar.

Yerdeki radyoaktif elementlerin bozunum ürünlerinden çıkan gama ışıması dozu, yerel jeolojiye bağlı olup oldukça değişkendir. Gama ışıması dozu, tipik olarak

yılda 0,2-0,4 mSv arasında olmakla birlikte, granit kayalarının olduğu bölgelerde birkaç kat yüksek olabilir. Büyük bir tehlike, inert gaz olan radonun ^{222}Rn ve ^{220}Rn izotoplarının solunumuyla ortaya çıkar. Bunlar uranyum ve toryumun bozunum ürünleri olup hava içinde yayılabilecek özelliktedirler. Bu izotoplar, bazı yapı malzemelerinden ortama yayılabilir ve sağlıklı biçimde havalandırılmayan odalarda birikebilirler. ^{222}Rn , katı olan ve akciğerde biriken bir dizi alfa yayıcısına bozunur. ^{232}Th zincirinden gelen ^{220}Ra da benzer biçimde zararlıdır. Alınan doz; yapı malzemelerine ve kurulma şekline, zemin toprağına ve havalandırmaya bağlı olarak geniş bir ölçekte değişir. Eşdeğer tüm vücut dozunun ortalama olarak 1 mSv/yıl olduğu tahmin edilmektedir. Böylece toplam art-alan ışımasının 2 mSv/yıl olduğu görülmektedir. 20. yüzyılda insanların uğraşları, bu miktarı biraz da olsa artırmıştır. İngiltere’de, radyoaktivitenin ve X ışınlarının sağlık alanındaki kullanımının ortalama olarak 0,5 mSv/yıl’a eşdeğer olduğu tahmin edilmektedir. Denenen silah çekirdeklerinden dolayı atmosferde biriken radyoaktif serpentinin yaklaşık olarak 0,01 mSv/yıl olduğu bulunmuştur; bu miktar 1963 yılındaki en büyük değerin %1’i civarındadır.

Sağlık kuruluşlarında ve çekirdekle bağlantılı endüstri kuruluşlarında çalışan çok sayıda birey, ortalamadan daha fazla düzeydeki ışımanın etkisine açık durumdadır. ABD’de tüm vücudun kabul edebildiği en yüksek dozun 50 mSv/yıl olduğu belirlenmiştir.

Gray ve Sievert, biyolojik hasar açısından büyük birimlerdir: Yaklaşık 50 Gy’lik vücut dozları %50 oranında ölümle sonuçlanmaktadır. Çok düşük dozlarda biyolojik hasar için eşik değerin varolup olmadığı henüz kesinleştirilmemiştir. Zarara uğrama tehlikeleri, doz ve etki arasındaki orantı dikkate alınarak tespit edilmektedir. Eğer bu doğruysa 1 milyonluk bir nüfusun 1 mSv’lik dozuna uğraması halinde 20 öldürücü kanser, bir o kadar da tedavi edilebilir kanser olayı görüleceği ileri sürülmektedir. Bununla birlikte, söz konusu sayılar o kadar küçüktür ki bir kural konması olası olmamıştır (Açıkgöz ve Yıldırım 2001).

2. 12. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

X ve γ -ışını gibi tüm elektromanyetik radyasyonlar birçok olayda parçacıklara benzer olaylar sergilediklerinden birim elamanına foton adı verilmiştir. Radyasyonun belli bir frekansı için tüm paketlerde taşınan enerji miktarı aynıdır ve

$$E = h\nu \quad \rightarrow \quad E = hc / \lambda \quad (2.14)$$

gibi ifade edilir. Bir fotonun madde ile etkileşmesi bir atomik elektron veya çekirdek alanı ile olur. Bu çarpışmalar elastik, inelastik olabilir ya da fotonun tamamıyla soğrulması ile sonuçlanabilir. Radyasyonun madde ile etkileşimindeki temel olarak üç olay: Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumdur.

Bu üç etkileşim için de gerçekleşme ihtimali, X veya γ - ışınlarının enerjileri ve maddenin atom numarasına bağlı olarak değişir. I şiddetinde paralel bir γ ışını demeti Δx kalınlığında soğurucu bir madde üzerine gönderilir ise radyasyon şiddetinde meydana gelen ΔI azalması

$$dI = -\mu I dx \quad (\text{Lambert-Beer Kanunu}) \quad (2.15)$$

ifadesi ile verilir. Burada μ lineer soğurma katsayısıdır ve her soğurucuya göre değişen bir sabittir. I soğurucudan çıkan radyasyon şiddeti, I_0 soğurucuya gelen radyasyon şiddeti, x soğurucu kalınlığıdır. Bu ifadenin integrali alınır ise

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.16)$$

ifadesi elde edilir. Bu etkileşmeler fotonların iki önemli özelliklerini açıklar. Bunlardan birincisi fotonların madde içerisinde yüklü parçacıklarla karşılaştırıldığında daha uzun mesafelere penetrasyonu, ikincisi ise belli bir kalınlıktaki malzemeyi geçince fotonların enerjilerinde bir azalma meydana gelmemesi, sadece şiddetinde azalmanın olmasıdır. Bu durum lineer soğurma katsayısı ile ifade edilir ve içerisinde geçtiği maddeye ve radyasyon enerjisine bağlı olup etkileşmenin toplam tesir kesitini yansıtır.

Bu lineer soğurma katsayısı eğer soğurucu maddenin özgül ağırlına bölünürse kütle soğurma katsayısını elde edilir.

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (2.17)$$

Gelen radyasyon şiddetini yarıya indiren soğurucu maddenin kalınlığına yarı tabaka

kalınlığı (YTK), onda birine indiren kalınlığa onuncu tabaka kalınlık (OTK) denir. Bu kalınlık lineer soğurma katsayısına bağılı olarak;

$$\text{Yarı Tabaka Kalınlığı} \quad (YTK) = \ln 2 / \mu \quad (2.18)$$

$$\text{Onuncu Tabaka Kalınlığı} \quad (OTK) = \ln 10 / \mu \quad (2.19)$$

şeklinde verilirler. Foton demeti paralel ve geniş bir yapıya sahip ise, ölçülen radyasyon şiddeti saçılan fotonları da içerir. Bu nedenle zırh malzemesini geçen radyasyon şiddeti dar demet geometrisine göre daha büyük olur ve 2.15 ifadesine bir düzeltme çarpanı girer.

$$I = B \cdot I_0 e^{-\mu x} \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilir. B düzeltme faktörü olup $1 \leq B$ olarak tanımlanır. Bu faktör deneysel olarak elde edilen foton zayıflatma ölçümleri ile bulunabilir. Düzeltme faktörü ile ilgili yapılan çalışmalardan, bu faktörün

- a) Zayıflatan ortamın doğasına
- b) Kaynak fotonların enerjisine
- c) Kaynak ile nokta arasındaki uzaklığın, ortalama serbest uzaklığa oranına
- d) Kaynağın geometrisine bağılı olduğu görülmüştür.

Makroskobik tesir kesiti nötron madde ile etkileşince elastik, inelastik saçılma ve nötron yakalanması olayları olur. Makroskobik tesir kesitide ΣR şeklinde gösterilir.

$$\Sigma_{\text{Toplam}} = \Sigma_{\text{fisyon}} + \Sigma_{\text{kaçan}} + \Sigma_{\text{yakalanan}} + \Sigma_{\text{.....}} \quad (2.21)$$

$$dI = -n\sigma dx I \longrightarrow \frac{dI}{I} = -n\sigma dx \text{ integral alırsak;} \quad (2.22)$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^x -n\sigma dx \text{ ise;} \quad (2.23)$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -n\sigma x \longrightarrow I = I_0 e^{-n\sigma x} \text{ olur.} \quad (2.24)$$

Bu bize şiddetin tesir kesitine bağlı olarak değiştiğini söyler.

Burada I , soğurucudan çıkan radyasyon şiddeti, I_0 soğurucuya gelen radyasyon şiddeti, x , soğurucu maddenin kalınlığı olmak üzere bu durumda ΣR makroskobik tesir kesitidir.

Nötronlar tıpta, eczacılıkta, endüstride, uzay araştırmalarında, nükleer bomba yapımında, nano teknolojide çok geniş kullanım alanına sahiptir. Bu kadar geniş kullanım alanına sahip nötronların radyasyonundan korunmak da oldukça önemlidir.

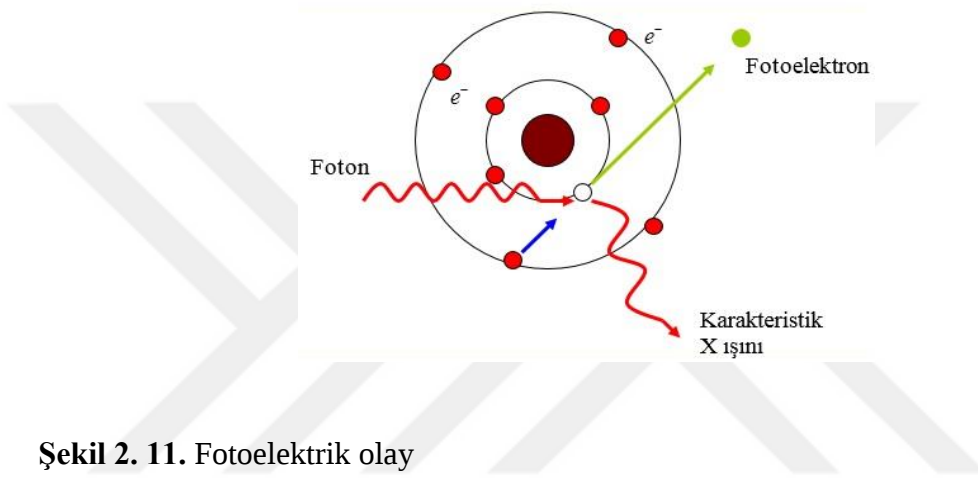
Nötronlar yüksüz parçacıklar olduklarından hızlandırılmazlar, elastik ve inelastik çarpışmalar sonucu yavaşlatılabilirler. Nötron zırhlanması kullanılan nötron kaynağına, oluşan nötronların enerjilerine, zırh malzemesine, kaynakla zırh arasındaki mesafeye bağlı olarak değişiklik gösterir.

Enerjileri 10 keV ve 10 MeV arasında olan hızlı ve relativistik nötronların madde ile önemli bir etkileşimi elastik çarpışmalardır. Nötron bir atom çekirdeğine çarptığında kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktardıktan sonra geliş doğrultusundan saparak yoluna devam eder. Bu durumda çekirdeğin fiziksel yapısında bir değişim olmaz. Nötronların çekirdekle elastik çarpışma yapmasında momentum ve enerji korunum kanununa uygun olarak toplam kinetik enerji değişmez.

İnelastik çarpışmalarda ise nötron çarpıştığı çekirdeğin içine girer ve çok kısa bir sürede çekirdeğin yapısını değiştirir. Nötron kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktararak geliş yönünü değiştirir ve çekirdeği terk eder.

2. 12. 1. Fotoelektrik olay

Fotoelektrik olay yeterli bir enerjideki bir radyasyonun bütün enerjisini kaybederek atomdan elektron koparması olayıdır.



Şekil 2. 11. Fotoelektrik olay

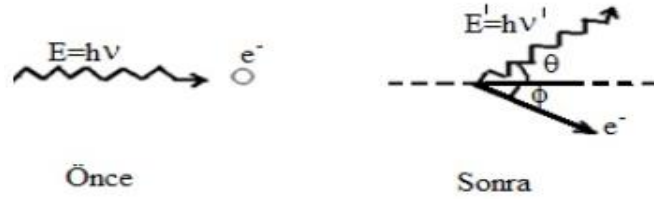
Atomdan koparılan bu elektronlara fotoelektron denir. Bu olay sonucunda meydana gelen, elektron boşluğu yörüngedeki diğer elektronla doldurulur ve bir x-ışını yayınlanır. 0,5 MeV' den daha az enerjili radyasyonun ağır elementler tarafından soğrulmasında bu olayın önemi büyüktür. Fotoelektrik olayda koparılan elektronun enerjisi

$$E = h\nu - w \quad (2.25)$$

Einstein bağıntısı ile verilir. Burada w , elektronun çekirdeğin elektrik alanından koparılabilmesi için gerekli minimum enerjidir. Gelen fotonun $h\nu$ enerjisinin w kadarı bağlanma enerjisini aşmak için harcanır geri kalan kısmı ise elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. Burada h Planck sabiti olup $h = 6,62 \times 10^{-23} \text{ j. s'}$ dir.

2. 12. 2. Compton saçılması

Compton saçılmasında gelen gama ışını atomun elektronu ile etkileşir. Bu etkileşimde gelen gama ışını enerjisinin bir kısmını elektrona kinetik enerji olarak aktarır ve elektron ϕ açısıyla saçılır. Gelen gama ışını da geliş doğrultusuyla θ açısı yapacak şekilde saçılmaya uğrar. Bu saçılma işlemini enerjisini tüketinceye kadar gerçekleştirir.



Şekil 2.12. Compton saçılımı

bir kısmını elektrona vermiştir. Enerjisinin bir kısmını kaybeden γ - ışını geliş yönünü değiştirir. Her iki durumda da gelen parçacık çarpışmadan sonra ortamda kalmaya devam eder. Gelen γ - ışınının enerjisi $h\nu$ ise compton soğurulmasında, Einstein bağıntısı geçerlidir. Bu bağıntı ;

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.26)$$

olarak verilir. Bu ifadede E; gelen gama ışınının enerjisi, $\cos \theta$; gelen gama ışınının saçılma açısı; $m_e c^2$ durgun kütle enerjisi değeri 0,511 MeV dir. (Knoll 1999)

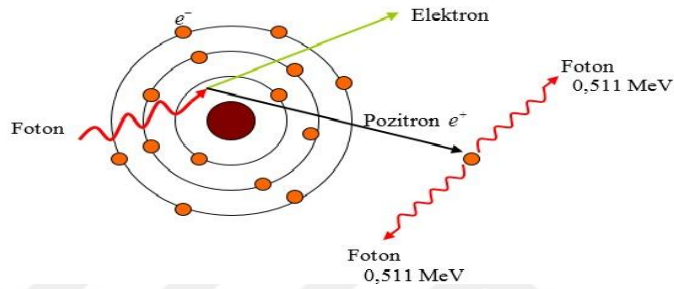
2.13. 3. Çift oluşumu

Çift oluşumun gerçekleşebilmesi için gelen gama ışınının enerjisi 1,02 MeV ve üzerinde olmalıdır. Çünkü bir elektron-pozitron çiftinin meydana gelmesi için enerjinin iki durgun kütle enerjisi kadar olması gerekir. Çift oluşum olayı soğurucu ortamın çekirdeğindeki protonların elektrik alanında meydana gelir. Ortama gelen gama ışınının tamamen yok olduğu anda bir elektron-pozitron çifti oluşur. Eğer

enerjisi 1.02 MeV'in üzerindeyse fazla enerji elektron-pozitron çiftine kinetik enerji olarak aktarılır (Knoll 1999).

$$h\nu \cong 2m_0c^2 = 2 \times 0,511 = 1,022 \text{ MeV} \quad (2.27)$$

Bir γ - ışınının enerjisi (2. 22) de ifade edilen elektronun durgun kütle enerjisinin iki katından (1,02 MeV) daha büyükse çift oluşumu olayı meydana gelir.

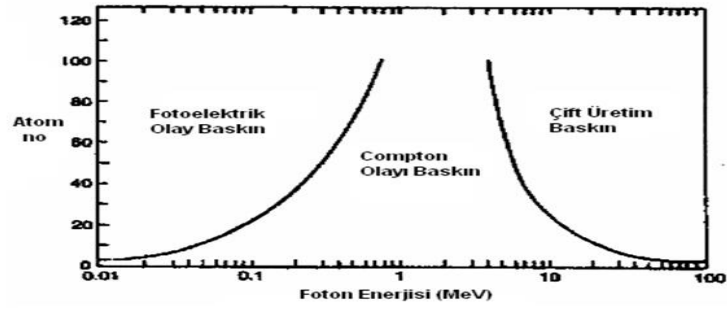


Şekil 2. 13. Çift oluşumu (Varol 2015)

Bu oluşan pozitronlar madde içerisinde ilerlerken elektronlar gibi iyonlaşma ve radyasyonla enerji kaybederler. Pozitron enerjisinin çoğunu kaybettikten sonra bir elektron yakalayarak pozitronyum diye adlandırılan hidrojene benzer bir atom meydana getirir. Ancak bu meydana gelen atom kararsızdır ve 10^{-10} s' lik bir yarı ömre sahiptir.

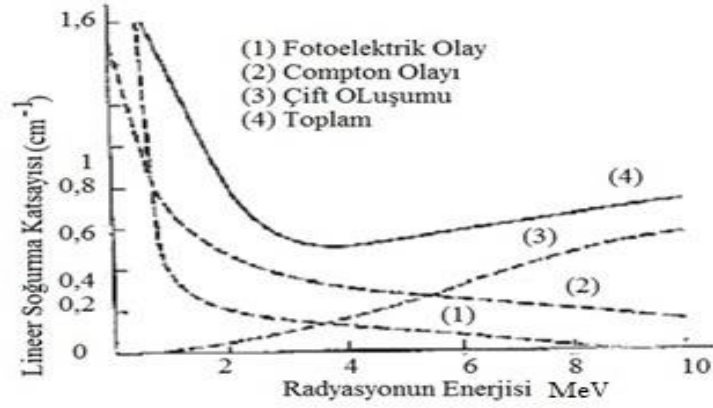
Dolayısıyla pozitronyum bozularak (anihilasyon) birbirine zıt yönlü, eşit enerjili iki foton meydana getirir (Şekil 2.14). Bu fotonların her birinin enerjisi momentum korunumu için 0,511 MeV olmalıdır.

Gelen radyasyonun enerjisine göre (Şekil 2. 15) fotoelektrik olayın olma ihtimali atom numarasına bağlı olarak hızla artmaktadır. Compton olayı γ - ışınlarının frekansına bağlı olarak 0,1-10 MeV enerjileri arasında olma ihtimali daha baskındır. Çift Oluşumu olayı 1,02 MeV'lik enerjilerde olabilir ancak yüksek enerjilerde daha baskındır (Yaramış 1985).



Şekil 2. 14. Fotoelektrik olay, Compton olayı ve çift oluşumun baskın olduğu yerler (Krane 2002)

Lineer soğurma katsayısı Fotoelektrik ve Compton olaylarında gelen radyasyonun enerji artışıyla ters orantılı olarak değişirken Çift oluşumu olayında doğru orantı olarak değişmektedir. Çünkü Çift Oluşum olayında gelen radyasyon pozitif ve negatif elektrona dönüşerek kaybolur. Toplam lineer soğurma katsayısı hesaplanırken denklem (2. 16) kullanılır.



Şekil 2. 15. Radyasyon enerjisine göre lineer soğurma katsayısındaki değişim (Aygün 2010)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Geant4 Simülasyon Programı

Adını “Geometry And Tracking” kelimelerden alan GEANT4, madde içerisinden geçen ve madde ile etkileşen parçacıkların simülasyonunu yapmakta ve Monte Carlo kodlarını kullanarak istatistiksel metotlarla yaklaşık sonuçları hesaplamaktadır.

GEANT 1933 yılında Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı (CERN)’nda yüksek enerji ve nükleer fizik deneylerinde kullanılan dedektörler ile etkileşen parçacıkların simülasyonunu yapmak için tüm dünyadaki yazılım mühendisleri ve bilim adamları tarafından geliştirilmiş olan bir yazılım programıdır. Fortran diline sahip olan ilk sürümü GEANT3 yaygın olarak kullanılmaktaydı. C++ programlama diline sahip olan GEANT4 sürümü ise 1998 yılında geliştirilmiş ve günümüze kadar kullanılagelmıştır. Bu sürüm ile birlikte nükleer, tıp, uzay, biyoloji, radyasyon kimyası gibi alanlarda da yoğun bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. GEANT4 ile simülasyon yapılırken ortam geometrisi, parçacığın türü, parçacığın enerjisi ve parçacığın madde ile olan etkileşimi gibi ihtiyaç duyabilecek bilgiler kullanıcı tarafından belirlenmelidir. GEANT4 kullanıcıları ihtiyaç duyabilecekleri 250 eV'den TeV mertebesine kadar enerjiye sahip olan parçacıkların meydana getirebileceği elektromanyetik, hadronik, optik olaylarını içeren tüm bilgileri GEANT4 kütüphanelerinde bulabilirler. Programın gerçekçi olması düşüncesi ile farklı fizik modelleri geliştirilip bunların farklı enerji değerlerinde kullanılması sağlanmış ve simülasyonu yapılacak olan modelin belirlenmesi GEANT4 kullanıcılarına bırakılmıştır. Kullanıcının ihtiyaç duyabileceği farklı enerji aralıklarında işlem yapan bu modellerden bazıları şöyledir: Hadronik etkileşimlere precompound, high energy, high energy parameterized, elastic, cascade ve low energy parameterized modellemeleri örnek olarak verilebilir. Elektromanyetik etkileşimlere penelope, standard ve low energy modellemeleri örnek olarak verilebilir. GEANT4 kullanıcısı tutarlı sonuçlara hızlı bir şekilde bütün fizik olaylarını dikkate almadan kendi çalışmasına uygun bir model seçerek ulaşabilir (Arslan 2011).

Programın çalıştırılması için birden fazla dosyaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dosyalar *src* şeklinde isimlendirilen bir kaynak klasör içerisinde hazırlanır. Her bir dosya farklı simülasyon ayarları içermektedir. Örneğin kullanılan materyaller *Detector Construction.cc* isimli dosyada, madde üzerine uygulanacak radyasyon ile ilgili ayarlar *Primary Generator Action.cc* adlı dosya içinde bulunur. Bu alt dosyalar arasında en önemli olanı *Physics List.cc* dosyasıdır. Simülasyonun yapılmasında bu dosya büyük ölçüde sorumludur.

Monte Carlo Simülasyonu karmaşık problemleri çözebilmek için kullanılan güçlü bir araçtır. Monte Carlo Simülasyonu model sistemimizin farklı düzenlemelerini kontrol etme fırsatı tanınması nedeniyle fizik öğrenimi için yüksek bir potansiyele sahiptir ve öğrenciler için heyecan vericidir (Peralta 2002). Bir yere kadar Monte Carlo Simülasyonu teori ve deneyin arasında kalır. Fizikte tüm bilinenler program içine yerleştirilebilir ve farklı durumlar bulunabilir. Monte Carlo Simülasyonu sonuçların rastgele sayılar olarak alınıp kullanıldığı bir hesaplama tekniği olarak tanımlanabilir. Monte Carlo Simülasyonu fiziği de içine alan farklı problemlere hitap eder. Monte Carlo tekniği parçacık fiziği ve nükleer fizik ile yoğun madde fiziği gibi birçok alanda sıkça kullanılır.

3. 2. Kullanılan Dedektör ve Özellikleri

Bu tez çalışmasında kullanılan dedektörün özellikleri Çizelge 3.1 de fotoğrafı ise Şekil 3.1 verilmiştir. BF_3 gazlı ADM-606-Model NP serisi bir nötron dedektörü kullanılmıştır. Dedektörün çalışma prensibi; $10_B + n \rightarrow {}^7_3Li + \alpha ({}^4_2He)$ denkleminde anlatılan nükleer reaksiyona dayanmaktadır. Boron nötron reaksiyonu ile üretilen $\alpha ({}^4_2He)$ 'lar iyonize olan gazın ikincil iyonizasyonuna sebep olur. İyonizasyonla oluşan elektronlar merkezi anot telin yakınlarına vardığında bir pulsa neden olurlar. Bu pulsla oluşan şarj hassas yükselticilerle yükseltilir ve ADM 616 seri dijital veri okuyucuyla değerlendirilir.

Dedektör içinde aşağıdaki olaylar olur:

1. ^{10}B ile etkileşim sonucu alfa parçacıklarının oluşması
2. ^3He ile etkileşim sonucu proton oluşması
3. H , çekirdeği ile yapılan elastik saçılma.

İlk iki reaksiyon 0,5 eV'luk enerjiye sahip nötronlar tarafından meydana getirilen reaksiyonlardır. Bu nötronlar orta enerjili nötron bölgesinin en altında ve termal bölgede (0,025 eV) olan nötronlardır. Elastik saçılmalar hızlı nötronların dedekte edilmesinde kullanılırlar.

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan nötron dedektörünün özellikleri

Dedektör'ün Karakteristiği	NP100B
Dedektör tipi	BF_3 gazlı orantılı sayacı
Dedektör hassasiyeti	0–100 mSv/h (0–10 Rem/h)
Enerji aralığı	0,025 eV – 15 MeV
Kalınlık, mm (inch)	244 x 292 mm
(dia. x L)	(9,6 X 11,5 in.)
Çalışma sıcaklık aralığı	–10 °C / +50 °C,
Ağırlık kg (lb)	(+14°F / +122°F) 10 kg (22 lb)
Nemde çalışması	0–% 100 yoğunluk
Dedektör linearitesi	% (+5 -5)
Doğruluk	% (+5 -5)
Yüksek voltaj aralığı	1750-1950 V



Şekil 3. 1. Deneyde kullanılan ADM-606 Model NP serisi nötron dedektörü ve nötron kaynağı.

3.3. Üretimlerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu çalışmada parafin, bor, bor karbür, epoksi, alüminyum, krom, nikel ve niyobyum kullanılmıştır.

3. 3. 1. Parafin ve özellikleri

Parafin ince madeni yağ damıtma işlemi sırasında elde edilen organik bir maddedir. Parafin ortalama 20-30 karbon atomu içeren hidrokarbonların kompleks bir karışımıdır. Genelde formülleri C_nH_{2n+2} ' dir. Bileşimlerinde %80 - %90 oranında düz zincirli hidrokarbonlar olan normal parafinler bulunur. Geri kalan kısmını ise dallanmış ve halka yapılı parafinler oluşturur.

Parafinin en önemli özelliği reaksiyon hızının çok düşük olması ve suya karşıda oldukça ilgisiz olmasıdır. Ayrıca tepkime vermezler, toksik etki taşımazlar, su geçirgenlikleri yoktur, renksizdirler, yakıt olarak kullanılabilirler. Antiblocking katkısı özelliği kazandırarak iki yüzeyin birbirine yapışmasını engelleyici bir dirence sahip olması durumu söz konusudur. Bu özellik sıcaklık, basınç ve nem gibi etkenler altında bile iki yüzeyin yapışmasına karşı direnç gösterme özelliğidir. Kaydırıcı özellikleri vardır. Birbirleri üzerinde herhangi bir mekanik zarara yol açmaksızın kaydırma yeteneğidir. Aşınma, sürtünme ve yıpranmaya karşı güçlü dirence sahiptirler. Nötronları iyi soğurucu özellikleri vardır.



Şekil 3. 2. Parafinin görünümü

3. 3. 2. Alüminyumun genel özellikleri

Çizelge 3.2. Alüminyumun özellikleri

Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,9815 g/mol
Erime Noktası	660°C
Yoğunluğu	2,7 gcm ⁻³
Rengi	Beyaz gümüş
Sağlığa Etkisi	Bileşikleri toksiktir
Hava ile Kimyasal Reaksiyonları	Normal şartlarda hava ile reaksiyona girmez.
Su ile Kimyasal Reaksiyon	Normal şartlarda su ile reaksiyona girmez.

Metaller, medeniyetin gelişmesinde önemli görev yapmaktadır. Bu gelişme sürecinde, alüminyum kadar önemli rol oynayan az sayıda metal bulunur. Alüminyum kendine has özellikleri ile çok eski çağlardan beri bilinen ağaç, bakır, demir ve çelik gibi birçok malzemeden daha önem kazanmış bulunmaktadır Alüminyum tabiatta en fazla bileşiği bulunan elementtir. 19. yüzyılın ikinci yarısından beri endüstriyel çapta üretilen çok genç bir metal olmasına rağmen, bugün bakır ve alaşımları, kurşun, kalay ve çinko gibi tüm demir dışı metallerin toplam kullanımından daha çok miktarda kullanılmaktadır.

Alüminyum yüzeyi metali oksijenin etkisine karşı koruyan ince bir oksit tabakasıyla örtüldüğünden havaya karşı dayanıklıdır. Kolaylıkla levha ve tel durumuna getirilebilir. Çekiçle dövülebilir. Isı ve elektrik için iyi bir iletkendir.



Şekil 3. 3. Alüminyum tozu görünümü

3. 3. 3. Nikel'in genel özellikleri

Çizelge 3.3. Nikelin özellikleri

Atom Numarası	28
Atom Ağırlığı	58,6934g/mol
Erime Noktası	1455 °C
Yoğunluğu	8,908 gcm ⁻³
Rengi	Parlak, altın rengi ile karışık metalik gümüş
Sağlığa Etkisi	Deride alerjik etki gösterebilir.
Hava ile Kimyasal Reaksiyonları	Normal şartlarda hava ile reaksiyona girmez.
Su ile Kimyasal Reaksiyon	Reaksiyona girmez

Uygun oranda zenginleştirilirse demirle alaşım yapabilir. Kimya endüstrisinde genellikle bu özelliğinden yararlanılır. Kullanım alanları nikelin en çok kullanıldığı alan, paslanmaz çelik üretimidir. Paslanmaz çeliğin dövülebilirliğini ve paslanmaya karşı dayanıklılığını artırır. Uçak, kamyon, lokomotif, vagon ve çeşitli ev araçlarının yapımında gerekli olan paslanmaz çelik gereçlerin üretiminde büyük oranda nikel kullanılır. Ayrıca, motor parçaları ya da buzdolaplarında olduğu gibi, yüksek ve düşük ısı koşullarında güçlü ve paslanmaya karşı dayanıklılık gibi özelliklerin gerektiği durumlarda da nikelden yararlanılır.



Şekil 3. 4. Nikel tozu görünümü

3. 3. 4. Kromun genel özellikleri

Çizelge 3.4. Kromun özellikleri

Atom Numarası	24
Atom Ağırlığı	51,9961 g/mol
Erime Noktası	1907 °C
Yoğunluğu	7,140 gcm^{-3}
Rengi	Parlak, metalik gümüş
Sağlığa Etkisi	Bileşikleri zararlıdır
Hava ile Kimyasal Reaksiyonları	Normal şartlarda hava ile reaksiyona girmez.
Su ile Kimyasal Reaksiyon	Reaksiyona girmez

Krom çok sert olması nedeniyle metallere sertlik sağlanması ve zırhlı araç yapımı için kullanılır. En önemli kullanım alanı Ni ile beraber paslanmaz çeliklerdedir. Oluşturduğu kromoksit tabakası çelik yüzeyini film tabakası gibi kaplar ve kimyasal korozyona karşı dayanıklılık sağlar. Krom kandaki şekerin hücrelere aktarılmasına yardımcı olur.



Şekil 3. 5. Krom tozu görünümü

3. 3. 5. Niyobyumun genel özellikleri

Çizelge 3.5. Niyobyumun özellikleri

Atom Numarası	41
Atom Ağırlığı	92,90 g/mol
Erime Noktası	2470 °C
Yoğunluğu	8,56 gcm ⁻³
Rengi	Metalik gri ve gümüşü beyaz rengindedir
Sağlığa Etkisi	Bileşikleri toksik özellikler gösterebilir
Hava ile Kimyasal Reaksiyonları	Reaksiyona girmez.
Su ile Kimyasal Reaksiyon	Normal şartlarda su ile reaksiyona girmez.

Sert olma özelliğinin yanında cilalı bir metaldir. Kırılgan, dövülebilir, kolaylıkla erir ve kararmaz. Niyobyum erimiş halinde iken alkali metal soğutucuların yenim (Kimyasal ve elektrokimyasal tepkime sonucu, metal yüzeylerin aşınması olayı) etkisine karşı dayanıklılığı ve ısıl nötron tepkime karşı kesitin düşük olması nedeniyle uranyuma benzer. Bu özellikleri ile nükleer reaktör çekirdeklerinde kullanılır. Sıcak baskı kalıplarının yapımında da kullanılan kanıtlanmış bir karbürle niyobyum katıldığında daha da sertleşme özelliği verir. Bu durumda darbelere ve ısınmaya karşı daha dayanıklı bir hale gelir. Paslanmaz çelik gibi malzemelerin hazırlanmasında kullanılır. Çünkü niyobyum yüksek sıcaklıkta bile korozyonu önler. Yani çözeltideki niyobyum oksidine dönüştürülür ve karbon ve sodyum ile birleşerek indirgenerek saf metalik bir niyobyum meydana gelir. Bu yüzden niyobyumun eklenmesiyle krom çeliği işlenebilir ve dayanıklılığı artar. Niyobyum ile zirkonyum aşamasında niyobyum ve kalay alaşımları bir nevi iletken oldukları için elektronik sanayide kullanılır.



Şekil 3. 6. Niyobyum tozunun görünümü

3. 3. 6. Borun genel özellikleri

Çizelge 3.6. Borun özellikleri

Atom Numarası	5
Atom Ağırlığı	10,811 g/mol
Erime Noktası	2076 °C
Yoğunluğu	2,34 gcm ⁻³
Rengi	Kahverengi
Sağlığa Etkisi	Sağlığa zararlı
Hava ile Kimyasal Reaksiyonları	Yüksek sıcaklıkta reaksiyona girer.
Su ile Kimyasal Reaksiyon	Normal şartlarda su ile reaksiyona girmez.

Bor, saf olmayan haliyle hemen hemen aynı zamanda birçok kimyacı tarafından 1808 yılında üretildi. Fransız Kimyacılar Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850) ve Louis Jacques Thénard (1777-1857) bortioksiti (B₂O₃) potasyum ile etkileşiminden elde etmişlerdir. Sir Humphrey Davy in London borik asidin hidrolizinden elde etmiştir. Davy, bu yeni elemente ilk olarak "Boracium" adını vermiştir, bu sonra "Boron" olarak kısaltılmıştır. Bor için kullanılan kimyasal simgeyi "B" 1814 yılında J. J. Berzelius teklif etmiştir. Yüksek derecede saf Bor 1909 yılında Amerikalı kimyacı W. Weintraub tarafından üretilmiştir.



Şekil 3. 7. Bor tozunun görünümü

3. 3. 7. Bor karbürün genel özellikleri

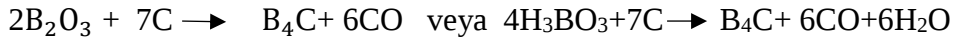
Bor karbür, metal olmayan en önemli gruba ait olup, en sert malzemedir. Mükemmel özellikleri arasında: ekstrem sertliği; onu ancak bu özelliğinden daha iyi

olan elmas ve kübik Bor Nitrür (cBN) aşar. Birçok kimyasal reaksiyonlara karşı dayanımı çok yüksektir. Diğer mükemmel özelliği ise düşük yoğunluğu ile ısı dayanımıdır.

İçerik bakımından yaklaşık % 80 Bor ihtiva etmesi, bileşiğin yüksek ergime noktası ve iyi kimyasal ve fiziksel kararlılığından dolayı nötronların absorbe edilmesinde Bor Karbür daha etkin ve daha ekonomiktir. İçeriğinde yüksek Bor ihtiva etmesi, Bor Karbürü diğer Bor bileşikleri üretmede önemli bir kaynak kılmaktadır. Örneğin; en ilginç olanlar arasında, Bor halojenleri veya borlu metaller bulunmaktadır.

Bor Karbür 2500 °C de, Bor oksit bileşimi ve Karbondan elde edilmektedir. Bileşimdeki sınır aralıkları (bor oranları) nispeten muhtelifdir.

Bor karbür, B₂O₃ 'ün veya H₃BO₃ 'ün aşağıdaki reaksiyonu sonucu oluşan



yaklaşık % 70-90 civarı bor içeren, yüksek erime noktası, kimyasal ve fiziksel kararlılığı sahip yüksek basınç çekme dayanımı olan bir bileşiktir. Bu nedenden dolayı nükleer uygulamalarda nötronların soğrulmasında kullanılır.



Şekil 3. 8. Bor karbür tozunun görünümü

3. 3. 8. Epoksinin genel özellikleri

Epoksi; likit olarak uygulanan ve kuruduktan sonra suya, asitlere ve alkaliye dirençli bir madde haline gelen zaman içerisinde bu direncini yitirmeyen, kolay

temizlenen, mekanik mukavemeti yüksek, tekne yapımı ve onarımı dahil bir çok alanda kullanılan yapıştırıcı bir kimyasal reçinedir. Epoksi 1993 yılında Almanya'da bulunmuştur.

Epoxi adı, Yunanca "*Epi* (Üzerinde)" ve "*Oxy* (Keskin/Asitli)" kelimelerinin birleşmesinden meydana gelmiştir.

Epoksinin özelliklerinden bahsedecek olursak; solvent içermez, kaymaz, kokusuzdur, hijyeniktir, kolay temizlenir. Sürtünmeye ve aşınmaya karşı dayanıklı yüzeyler oluşturur. Yüksek mekanik direnç sağlar. Yağ ve kimyasallara karşı dirençlidir. Kolay ve hızlı uygulanır.

Epoksi kullanım alanları olarak ; donatı ve demirlerin yapıştırılmasında , betonarmede, yalıtma (kaplama), prefabrik beton elemanları ve kolonların montajında, taze betonu, eski sertleşmiş beton veya harca bağlamak için yapıştırıcı reçine olarak, aşınmaya karşı koruyucu kaplama yüzeyi olarak, yüksek dayanımlı zemin ve duvar boyası olarak, su altı imalatlarında, boya ve astar olarak, endüstriyel üretim tesisleri, gıda üretim tesisleri, tekstil fabrikaları, ilaç fabrikaları, entegre büyükbaş hayvan çiftlikleri süt sağım ve sağmal üniteleri, hastaneler, okullar, elektrik santralleri, depolar, yükleme boşaltma alanları, montaj alanları, oto galeri, gösteri alanları, boyahane ve bakım üniteleri, otoparklar, servis alanları ve benzeri tesislerde, betonun aşınma, darbe ve kimyasal dayanımını arttırmasından ötürü zemin kaplaması olarak da kullanılmaktadır.



Şekil 3. 9. Epoksinin görünümü

3. 3. 9. Makroskobik tesir kesiti

Parçacık fiziği ve çekirdek fiziğinde nötron makroskobik tesir kesiti, gelen nötronun hedef çekirdekle etkileşime girme ihtimalini ifade eder. Sabit enerjideki nötronlar için, birim uzunluk başına reaksiyona girme olasılığı herhangi bir etkileşim mekanizması için sabittir. Bu olasılık, her etkileşim için, çekirdek başına tesir kesiti (σ) olarak ifade edilir. Tesir kesiti (σ), birim hacim başına çekirdek sayısı (N) ile çarpıldığında, makroskobik tesir kesiti, $\Sigma = N\sigma$ haline gelir. Mikroskopik tesir kesiti, σ ile tanımlanan belirli bir işlem için birim uzunluk başına reaksiyona girme olasılığını ifade eder. Bu deney aşamasında elde edilen makroskobik tesir kesitleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Üretimde Kullanılan Malzemelerin Makroskobik Tesir Kesitleri

Malzeme	4.5 MeV Nötron Makroskobik Tesir Kesiti (cm ⁻¹)
Epoksi	0,145
Bor	0.214
Krom	0.308
Nikel	0.329
Parafin	0.180
Niyobyum	0,418
Alüminyum	0,124
Bor karbür	0,224

Çizelge 3.8’de numunelerin içinde bulunan malzemelerin yüzdelik oranları verilmiştir.

Bu oranlara bağlı olarak numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 3.9. Numuneleri deneye hazırlama aşaması

Çizelge 3.8. Monte Carlo simülasyon tekniği ile belirlenen numunelerin % kütlece birleşim oranları ve kimyasal içerikleri

Numune Kodu	Epoksi	Parafin	Bor	Bor Karbür	Alüminyum	Krom	Nikel	Niyobyum
CM1	100	-	-	-	-	-	-	-
CM2	30	60	10	-	-	-	-	-
CM3	30	60	-	10	-	-	-	-
CM4	30	55	-	10	5	-	-	-
CM5	30	50	10	-	-	10	-	-
CM6	80	-	-	-	-	-	-	20
CM7	30	45	10	-	-	10	5	-
CM8	50	-	-	-	-	50	-	-
CM9	50	-	-	-	-	-	50	-
CM10	80	-	-	20	-	-	-	-

CM: Kompozit malzeme

Tüm numuneler için önce Monte Carlo simülasyon tekniği kullanılarak teorik hesaplamalar yapılmıştır.

Çalışmanın deneysel kısmı Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nötron Doz Ölçümü ve X-ışınları Flöresans Laboratuvarlarında yapılmıştır.

Deneysel ölçümler için nötron kaynağı olarak 0-11 MeV enerjili nötronlar yayan $Am^{241}(\alpha-n)$ kaynak ve ADM-606-Model NP serisi bir nötron dedektörü kullanılmıştır.

Kullanılan dedektörün fotoğrafı Şekil 3. 9 'da verilmiştir.

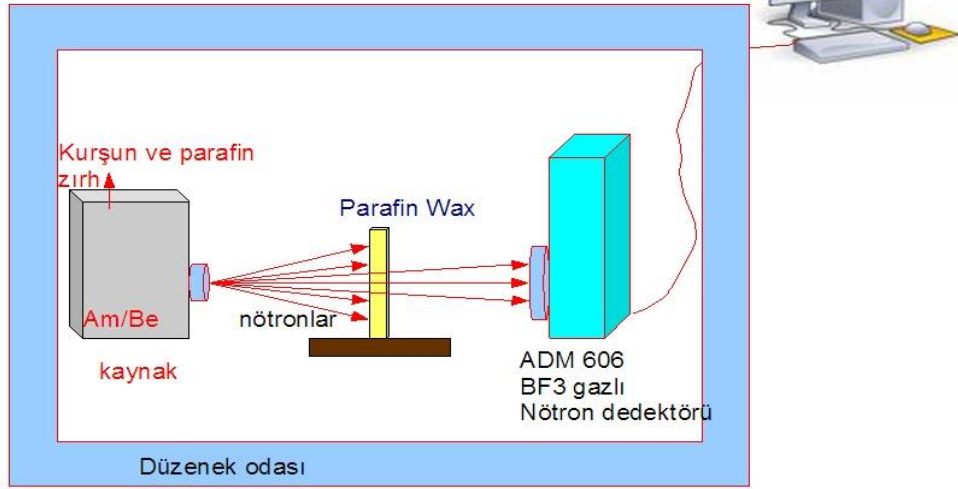
$Am^{241}(\alpha-n)$ kaynağı nötronların yanında γ -ışınları da yayınladığından kaynağın zırhlanmasında, 5 cm kalınlığında kurşun onun üstüne aynı kalınlıkta parafin ve en üstte yine 2 cm kalınlığında kurşun plakalarla kaplanmıştır. Nötronların çıkabilmesi için zırhta küçük bir kesit açılmış, kaynak kullanılmayınca kesit, içinde kurşun ve parafin tabakalar olan bir kapakla kapatılmıştır. Gerekli testler yapılarak kaynaktan herhangi bir sızıntının olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 3. 10. Deneyde kullanılan nötron kaynağı

Ölçümler için hazırlanan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil.3.10'da verilmiştir.

DENEY DÜZENEGİ



Şekil 3. 11. Deney düzeneği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4. 1. Numunelerin Nötron Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi

Nötronların hedef malzemeler ile yaptığı etkileşmelerinin bilinmesi zırhlama çalışmaları açısından oldukça önemlidir. Nötronlar enerjilerine göre herhangi bir malzemeden geçerken malzeme atomları ile etkileşebildikleri gibi hiç etkileşmeden de geçebilirler bu etkileşimler tesir kesitiyle belirlenir ve σ sembolüyle gösterilir. Nötronların hafif parçacık veya çekirdeklerle yaptıkları etkileşim ihtimalini mikroskobik tesir kesiti ve beton gibi ağır materyallerle etkileşme ihtimalini de makroskobik tesir kesiti belirler. Makroskobik tesir kesiti ise soğrulma, fisyon ve saçılma tesir kesiti olmak üzere üç çeşittir. Makroskobik tesir kesiti Σ şeklinde gösterilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (McLane *et al* (1988)).

$$\Sigma_{Toplam} = \Sigma_{fisyon} + \Sigma_{kaçan} + \Sigma_{yakalanan} + \Sigma_{.....} \quad (4.1)$$

$$\Sigma = N\sigma \quad (4.2)$$

$$N = \frac{\rho}{A} N_A \quad (4.3)$$

Burada

N ; hedef maddedeki atom yoğunluğu

ρ ; hedef maddenin yoğunluğu

N_A ; Avogadro sayısıdır.

Bir malzemenin nötron makroskobik tesir kesitinin büyük olması o malzemenin nötron radyasyonu zırhlama kabiliyetinin iyi olduğu anlamına gelir.

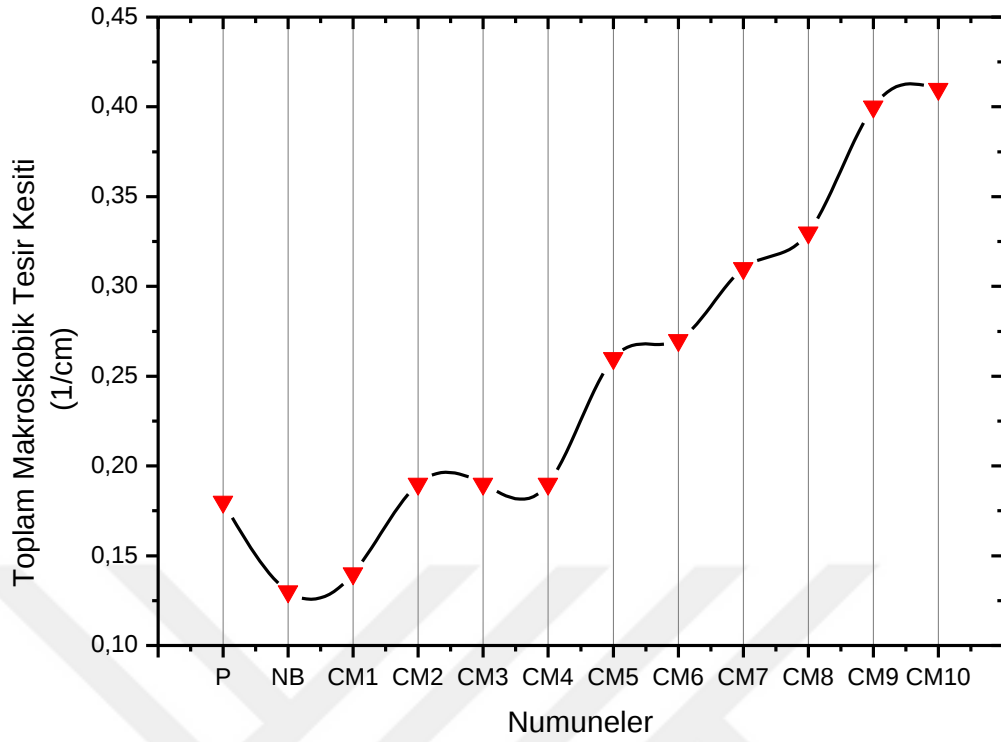
Monte Carlo simülasyon tekniği Geant4 kodu kullanılarak yapılan simülasyonda numuneler 4,5 MeV enerjili hızlı nötronlara maruz bırakılmış ve Çizelge 4.1’de verilen teorik tesir kesitleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada ticari olarak temin edilen sarf malzemeleri kullanılarak kompozisyonları Çizelge 3.7 de verilen ve her birinin ağırlığı 30 gr, yarıçapları 2,25 cm olan 10 farklı numune hazırlanmıştır.

Çizelge 4.1. Numunelerin teorik tesir kesitleri (cm^{-1} , 2cm kalınlık için)

Numune Kodu	Toplam Makroskopik Tesir Kesiti (cm^{-1})
P (Parafin)	0,1838
NB (Normal Beton)	0.1360
CM1	0,1450
CM2	0,1905
CM3	0,1926
CM4	0,1985
CM5	0,2673
CM6	0,2719
CM7	0,3106
CM8	0,3396
CM9	0,4003
CM10	0,4176

CM: Kompozit malzeme,



Şekil 4. 1. Numunelerin teorik toplam makroskobik tesir kesitleri (GEANT4)

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi üretilen numunelerin Toplam makroskobik tesir kesitleri referans numune olarak seçilen normal beton ve parafinden büyüktür. Bu sonuçlara göre üretilen CM10. numunesinin nötron radyasyonu tutma kabiliyetleri referans numunelerden oldukça iyidir.

4.2. Numunelerin Ölçüm Sonuçları

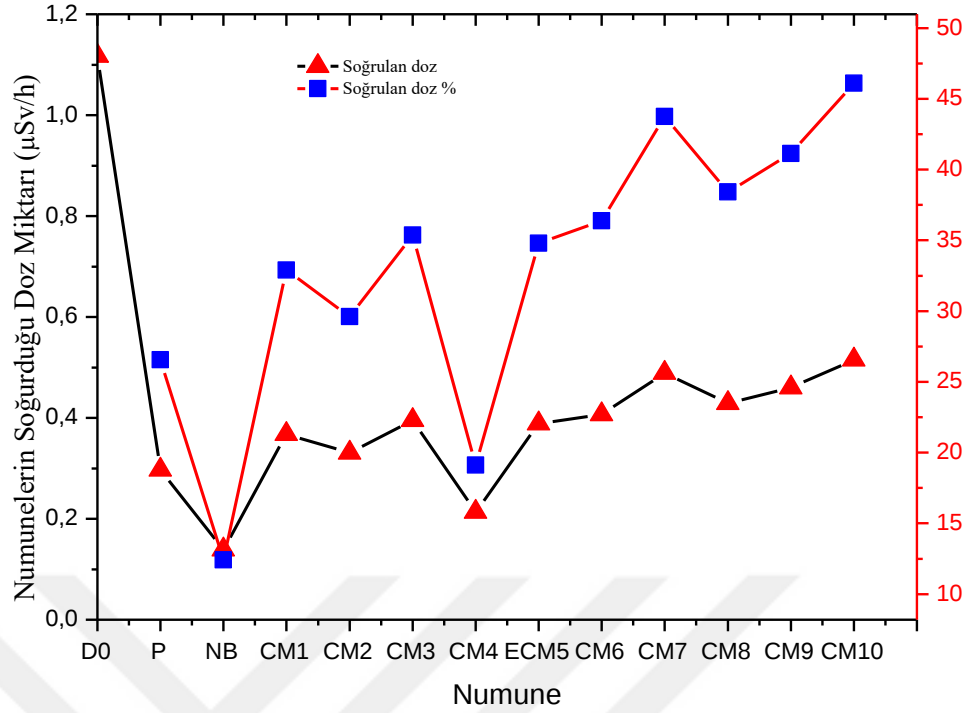
Numuneler üzerine 4,5 MeV’lik hızlı nötronlar ile bombardıman edilerek simülasyon sonuçlarına göre üretilen 10 farklı numunenin nötron soğuruculuğu belirlenip, nötron zırhlamada yaygın olarak kullanılan parafin ve normal beton ile karşılaştırıldı. Nötron kaynağı olarak $^{241}\text{Am} / \text{Be}$ ve dedektör olarakta ADM 606 model BF_3 , gazlı ($\alpha - n$) nötron dedektörü ile ortalama doz ölçümü $\mu\text{Sv}/h$ yapılarak ortamdaki nötronların belirlenmesi için 100 boş sayım alındı. Bütün numuneler kaynak ile dedektör arasına yerleştirildi. Hızlı nötron kaynağından gelen dozun malzeme tarafından ne kadar soğrulduğu belirlendi. Bunun için $D_S = D_0 - D_D$ eşitliği kullanıldı ve buna göre kaynaktan gelen doz miktarı dedektörün ölçtüğü doz miktarından

çıkarılarak numunenin soğurduğu doz miktarı hesaplandı. Burada, D_s ; numunenin soğurduğu eşdeğer doz oranı, D_0 ; kaynaktan gelen doz miktarı, D_D ; dedektörün ölçtüğü doz miktarı. Çizelge 4.2’de gösterilen sonuçlar elde edildi.

Çizelge 4.2. Numunelerin doz eşdeğer ölçüm sonuçları

Numune Kodu	Dedektörün Ölçtüğü Doz Miktarı (D_D)	Numunelerin Soğurduğu Doz Miktarı ($\mu\text{Sv/h}$) (D_s)	Soğrulan Doz Yüzde Miktarı (%)
Kaynaktan Gelen Doz Miktarı (D_0)	1,1171	-	-
Parafin (P)	0.8203	0,2968	26,56
Normal Beton (NB)	0.9782	0,1388	12,42
CM1	0,7496	0,3675	32,89
CM2	0,7864	0,3307	29,60
CM3	0,7218	0,3953	35,38
CM4	0,9034	0,2137	19,12
CM5	0,7283	0,3888	34,80
CM6	0,7106	0,4065	36,38
CM7	0,6284	0,4887	43,74
CM8	0,6879	0,4292	38,42
CM9	0,6575	0,4596	41,14
CM10	0,6019	0,5152	46,11

Çizelge 4. 2’ deki deney sonuçlarına göre aşağıdaki grafikler oluşturuldu. Grafiklerdeki doz ölçümü mikro sievert / saat ($\mu\text{Sv/h}$) cinsinden verilmiştir.



Şekil 4. 2. Numunelerin soğurduğu doz miktarları ve yüzde oranları

Dedektörden alınan $\frac{I}{I_0}$ değerleri Çizelge 4.3' de verilmiştir. Bu değerlerin $\ln$ değerini alarak numunelerin kalınlığı olan (ilk beş numunenin 1,8 cm, son beş numunenin 1,4 cm) bölüp aşağıdaki tabloda verilen toplam makroskobik tesir kesitlerini 2.24 eşitliği kullanılarak hesaplandı.

Çizelge 4.3. Numunelerin nötron geçişi ve deneysel toplam makroskobik tesir kesiti

Numune Kodu	Soğurucuya Gelen Radyasyon Şiddeti	Soğurucudan Çıkan Radyasyon Şiddeti	Deneysel Toplam Makroskobik Tesir Kesiti (cm ⁻¹)
CM1	1,1171	0,7496	0,2216
CM2	1,1171	0,7864	0,1949
CM3	1,1171	0,7218	0,2426
CM4	1,1171	0,9034	0,1179
CM5	1,1171	0,7283	0,2376
CM6	1,1171	0,7106	0,3231
CM7	1,1171	0,6284	0,4109
CM8	1,1171	0,6879	0,3463
CM9	1,1171	0,6575	0,3786
CM10	1,1171	0,6019	0,4417

Çizelge 4.4. Numunelerin tesir kesitlerinin karşılaştırılması

Numune Kodu	Teorik Makroskobik Tesir Kesiti	Deneysel Makroskobik Tesir Kesiti
CM1	0,1450	0,2216
CM2	0,1905	0,1949
CM3	0,1926	0,2426
CM4	0,1985	0,1179
CM5	0,2673	0,2376
CM6	0,2719	0,3231
CM7	0,3106	0,4109
CM8	0,3396	0,3463
CM9	0,4003	0,3786
CM10	0,4176	0,4417

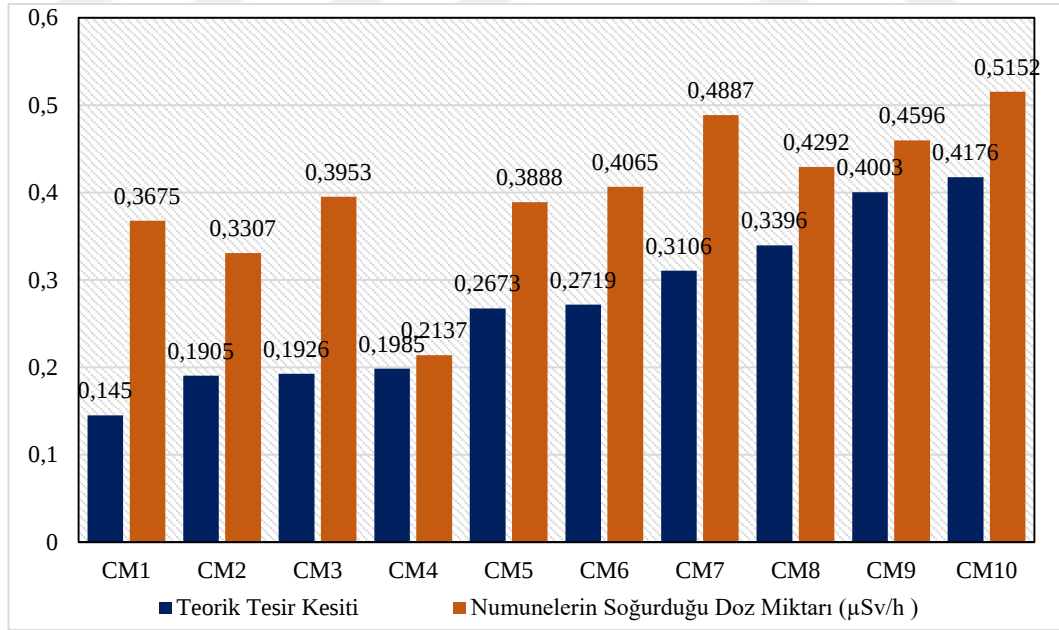
Bu çalışmada parafin ve metal tozu dolgulu epoksi reçinesi üretimi ile radyasyon zırhlama parametrelerinin belirlenmesi ve bunların nötron soğurganlık

değişimi her bir numune için 30 dakika beklenerek incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4. 1' de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Numunelerin tesir kesitleri ve soğurduğu doz miktarları

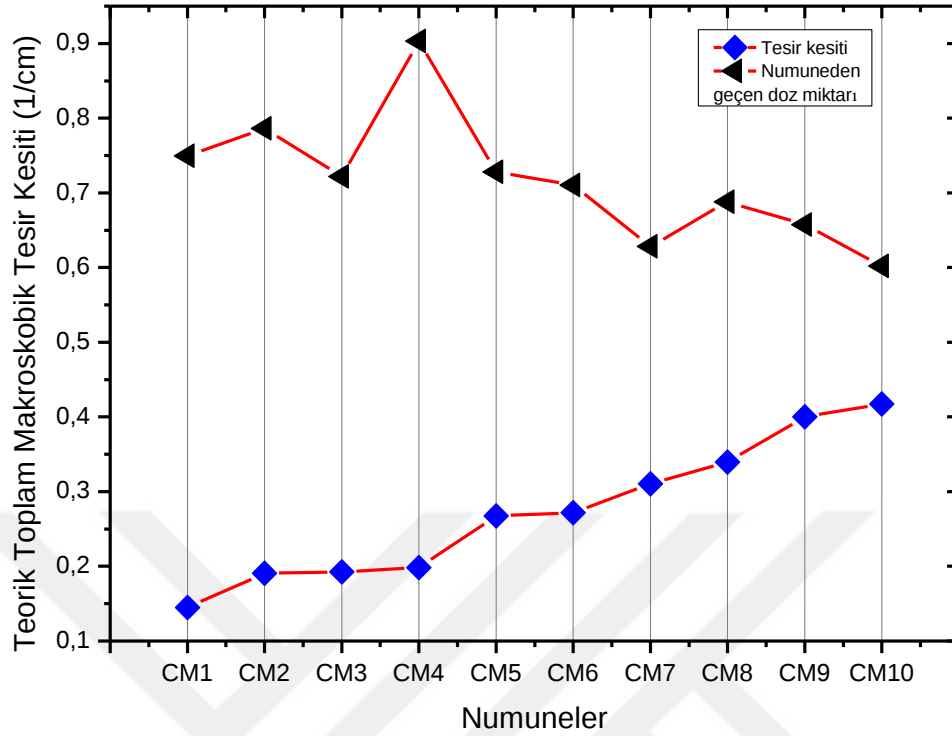
Numune Kodu	Teorik Makroskopik Tesir Kesiti	Numunelerin Soğurduğu Doz Miktarı ($\mu\text{Sv/h}$)
CM1	0,1450	0,3675
CM2	0,1905	0,3307
CM3	0,1926	0,3953
CM4	0,1985	0,2137
CM5	0,2673	0,3888
CM6	0,2719	0,4065
CM7	0,3106	0,4887
CM8	0,3396	0,4292
CM9	0,4003	0,4596
CM10	0,4176	0,5152

Çizelge 4.5 deki değerlerin kullanılarak Şekil (4.3) oluşturuldu.



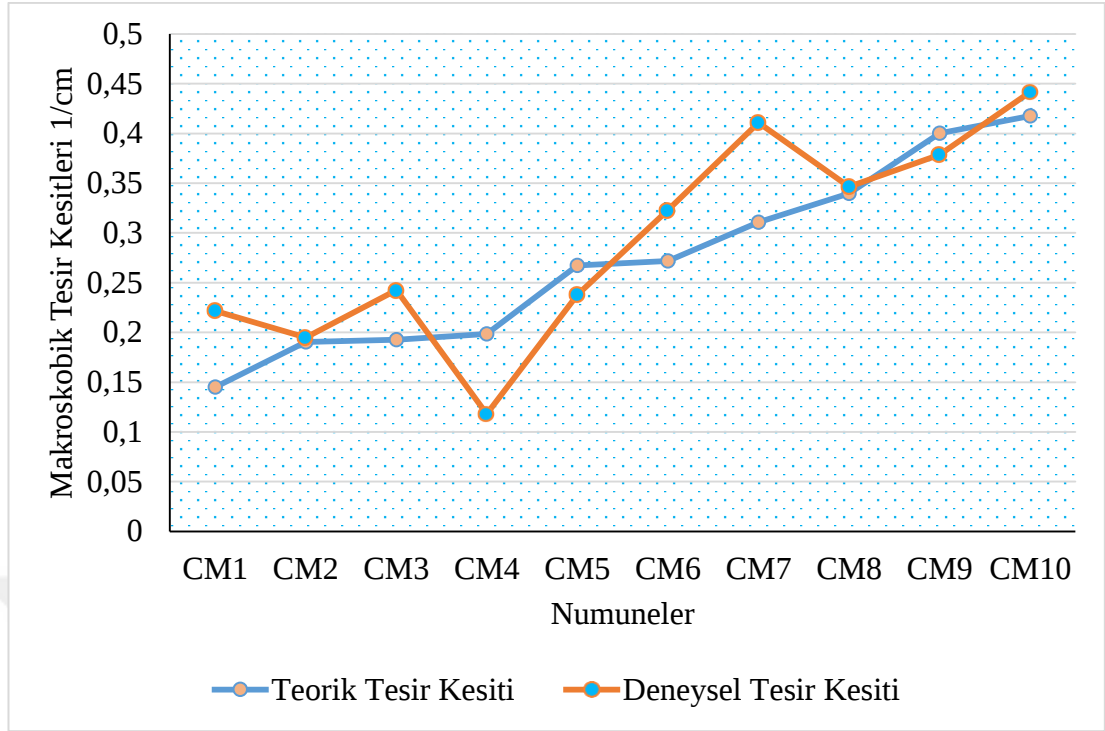
Şekil 4.3. Teorik Tesir kesiti ve numunelerde tutulan doz karşılaştırılması

Çizelge 4.3 deki değerlerin kullanılarak Şekil (4.4) oluşturuldu.



Şekil 4.4. Teorik Tesir kesiti ve numunelerden geçen doz karşılaştırılması

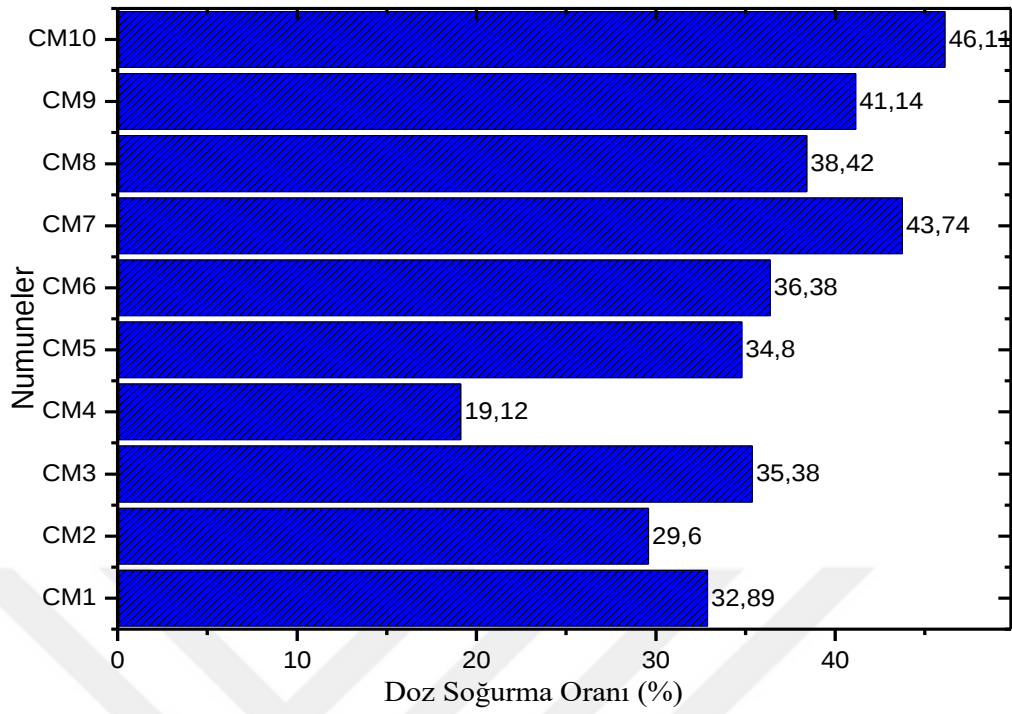
Parafinler nötron zırhlanmasında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bir dezavantajları erime noktalarının ortalama $56C^0 - 58C^0$ arasında olmasıdır. Bu nedenle yüksek sıcaklık olan ortamlarda kullanımı problemlere neden olabilir. Belki de erime noktası bazı katkılarla artırılabilir ancak o zamanda nötron soğurganlığında bir değişme olabilir bu durumun daha iyi anlaşılması için ölçüm yapılması gerekmektedir.



Şekil 4. 5. Tesir kesitlerinin karşılaştırılması

Çizelge 4.6. Numunelerin soğurma oranları

Numune	Soğurucuya Gelen Radyasyon Şiddeti	Soğurucudan Çıkan Radyasyon Şiddeti	Soğurma Oranı %
CM1	1,1171	0,7496	32,89
CM2	1,1171	0,7864	29,60
CM3	1,1171	0,7218	35,38
CM4	1,1171	0,9034	19,12
CM5	1,1171	0,7283	34,80
CM6	1,1171	0,7106	36,38
CM7	1,1171	0,6284	43,74
CM8	1,1171	0,6879	38,42
CM9	1,1171	0,6575	41,14
CM10	1,1171	0,6019	46,11



Şekil 4. 6. Numunelerin soğurma oranları

Şekil 4.5’ de görüldüğü gibi CM10 numune örneği 4,5 MeV’lik hızlı nötronları ortalama CM4 numune örneğinden %27,02 daha iyi soğurmuştur.

Çizelge 4.7. Numunelerin soğurduğu doz miktarı ve makroskobik tesir kesiti

Numune	Makroskobik Tesir Kesiti	Numunenin Soğurduğu Doz Miktarı
CM1	0,2216	0,3675
CM2	0,1949	0,3306
CM3	0,2426	0,3953
CM4	0,1179	0,2137
CM5	0,2376	0,3888
CM6	0,3231	0,4065
CM7	0,4109	0,4886
CM8	0,3463	0,4292
CM9	0,3786	0,4596
CM10	0,4417	0,5152

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çok disiplinli olan radyasyon zırhlama, çeşitli radyasyon kaynaklarından korunmanın bir yoludur ve birçok geometrik tasarımla oluşturulabilir. Bu sebeple, kaynak ile alıcı arasına yerleştirilmiş kompozit materyaller kaynaktan alıcıya geçen radyasyon miktarını etkileyebilir. Bu etkiler yayınlanan radyasyonun, kaynak kapsülünde veya zırhlama materyalinde azaltılması ve soğurulmasından dolayıdır. Zırhlama, radyasyonun nasıl oluştuğuna bakılmaksızın, radyasyondan korunmak için önemlidir. Çünkü zırhlama radyasyon kontrolünün bir şeklidir. Bu sebeple zırh malzemelerinin özellikleri, tasarımları, kullanımları ve etkinlikleri özel şartları belirler.

Radyasyonun birçok özelliği bilinse de radyasyon zırhlama, pek çok radyasyon kaynağı ve geometrik düzenlenişleri için çok karmaşık bir alandır. Örneğin, alfa parçacıkları ve diğer hafif iyonları zırhlama, genellikle ince bir tabaka ile kolayca yapılabilir. Çünkü nispeten büyük kütle ve yükünden dolayı birçok ortamdaki menzilleri birkaç 10 μm kadardır. Beta parçacıklarının zırhlaması, maksimum enerjilerine karşılık gelen menzile eşit veya daha büyük kalınlıklı bir materyal ile yapılır. Ancak, yüksek enerjili beta parçacıkları, özellikle büyük Z'li maddelerde, bremsstrahlung ışını üretebileceğinden, beta zırhlamasında plastik, alüminyum veya diğer küçük Z'li materyallerden sonra bremsstrahlung ve karakteristik X-ışınlarını soğuracak kurşun veya başka yoğun materyallerin kullanılması gerekir.

Yükü parçacıklardan farklı olarak fotonların zırhlaması, elektromanyetik radyasyonun üstel olarak azalmasına dayanır. Ayrıca foton radyasyon zırhlama diğer radyasyon tiplerinde olduğu gibi uyarıcı kaynağın yayınladığı foton enerjisine ve kompozit materyalin sahip olduğu özelliklere bağlıdır.

Yukarıda bahsedilen radyasyon (partikül ve foton radyasyonu) çeşitlerine ek olarak nötron partikül radyasyonu teknolojik uygulamalardan büyük önem arz etmektedir. Nükleer dönüşümlerin üretiminde nötronların özellikle etkili olduğu bilinmektedir. Çünkü elektrik yüküne sahip olmayan nötronların çekirdeklere nüfuz etme olasılıkları proton, diteron ve alfa parçacıklarına göre daha fazladır. Nükleer

reaktörlerin bol miktarda nötron sağlaması ve nötron kaynaklarının teknolojik uygulamalarda kullanımının gün geçtikçe artmasının bir sonucu olarak nötron zırhlamanın önemi ve yeni zırh malzemelerinin tasarımı araştırmacılar için daha önemli olmaya başlamıştır.

Koruyucu maddeler (zırh malzemesi) ile hızlı nötronların zayıflatılması ve / veya yakalanması, çok nüfuzlu olmaları nedeniyle çok kolay değildir. Herhangi bir zırh malzemesinin nötron zırhlaması, düşük kinetik enerjili nötronların tamamen emilmesini ve yüksek kinetik enerjili nötronların yavaşlamasını gerektirir. Enerjik nötronlar saçılmaya maruz kaldıklarında yavaşlarlar. Tüm enerji spektrumunda nötronları yavaşlatan (termalleştiren) en etkili unsurlardan biri Hidrojen (H)'dir.

Yukarıda bahsedilen açıklamalardan dolayı, nükleer güç santrallerinde, bor nötron tedavi ünitelerinde, laboratuvar araştırma ve inceleme çalışmalarında, radyoaktif (radyaizotop) maddelerinde taşınmasında ve depolanmasında, uzay araçlarında, nükleer ve radyasyon uygulamalarında kullanılabilecek yeni zırh malzemelerinin tasarımı ve zırhlama kapasitelerinin araştırılması oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple nötronlar için bu tez çalışmasında yeni nötron zırh malzemesi tasarlamak ve tasarlanan bu malzemelerin nötron zırhlama parametrelerini araştırmak amaçlanmıştır.

Herhangi bir malzemenin nötron koruma kapasitesinin değerlendirilmesinde güvenilir çözüm, bu malzemenin hızlı nötronlar için makroskobik tesir kesiti (cm^{-1}) değerlerinin belirlenmesidir. Makroskobik tesir kesiti, hızlı nötronların koruyucu malzeme ile etkileşim ihtimaliyetlerini karakterize etmek için kullanılan ve nötron zırhlamada büyük önem taşıyan çok faydalı bir parametredir. Belirli bir malzemede hızlı nötronların zayıflaması, art arda üç (3) işlemle meydana gelebilir. Bunlar;

1. Esnek veya elastik olmayan çarpışma
2. Esnek veya elastik çarpışma
3. Absorpsiyon sürecidir.

Nötronların madde ile etkileşimleri kinetik enerjilerine çok bağlıdır. Bununla birlikte, hem teorik hem de deneysel olarak makroskobik tesir kesiti hesaplamalarının 2-12 MeV kinetik enerji aralığında yaklaşık olarak 4,5 MeV’de yapıldığı bilinmektedir.

Yukarıda bahsedilen bilgiler ışığında, bu tez çalışmasında parafin ve metal tozu dolgulu epoksi reçineleri Monte Carlo GEANT4 simülasyon programı yardımı ile tasarlanmış ve tasarlanan numuneler laboratuvar ortamında üretilmiştir. Üretilen numunelerin özellikleri ve içerdikleri element konsantrasyonları sırasıyla Çizelge 3.8 - Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ayrıca diğer deneysel sonuçlar tablolar halinde Çizelge 4.2 – Çizelge 4.7’de ayrı ayrı verilmiştir.

Deneysel olarak doğru sonuçlara varabilmek ve en iyi zırhlayıcı malzemeyi incelenen malzemeler arasından seçebilmek için önce ortamın nötron seviyesini tespit edebilme amacıyla 100 (yüz) adet temel sayım ölçümleri yapılarak hatalar minimize edilmiştir.

Bu tez çalışmasında yapısında % 100 epoksi bulunan CM1 numunesi, yapısında % 30 epoksi, % 60 parafin ve % 10 bor bulunan CM2 numunesi, yapısında % 30 epoksi, % 60 parafin ve % 10 bor karbür bulunan CM3 numunesi, yapısında % 30 epoksi, % 55 parafin, % 10 bor karbür ve % 5 alüminyum bulunan CM4 numunesi, yapısında % 30 epoksi, % 50 parafin, % 10 bor ve % 10 krom bulunan CM5 numunesi, yapısında % 80 epoksi ve % 20 niyobyum bulunan CM6 numunesi, yapısında % 30 epoksi, % 45 parafin, %10 bor, % 10 krom ve % 5 nikel bulunan CM7 numunesi, yapısında % 50 epoksi ve % 50 krom bulunan CM8 numunesi, yapısında % 50 epoksi ve % 50 nikel bulunan CM9 numunesi ve son olarak yapısında % 80 epoksi ve % 20 bor karbür bulunan CM10 numunesi üretilmiştir. Üretilen 10 farklı içerikli bu numunelerin nötron zırhlama kapasitelerinin belirlenmesi için nötron kaynağı ve detektörü kullanılarak ölçümler alınmış ve gerekli tüm hesaplar yapılarak tablo ve şekiller halinde sonuçlar bulgular kısmında sunulmuştur. Bulunan bu sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1. Çizelge 4.1 incelendiğinde, sunulan numunelerin teorik olarak hesaplanan toplam makroskobik tesir kesitleri (cm^{-1}) sonuçlarından en yüksek değere $0,4176 \text{ cm}^{-1}$ değerle CM10 numunesi sahip iken, en düşük değere $0,1450 \text{ cm}^{-1}$ değerle CM1 numunesi sahip olmuştur.
2. Çizelge 4.2 incelendiğinde, nötron doz miktarı soğurma durumlarına göre en yüksek soğurulan doz yüzde oranı CM10 numunesinde % 46,11 olarak elde edilmişken, en düşük soğurulan doz yüzde oranı CM4 numunesinde % 19,12 olarak elde edilmiştir.
3. Çizelge 4.3 incelendiğinde, deneysel olarak bulunan toplam makroskobik tesir kesiti $0,4417 \text{ cm}^{-1}$ değerle CM10 numunesinde bulunmuş olup, bu değer teorik sonuçları desteklemektedir. Bu karşılaştırma detaylı olarak Çizelge 4.4 'de verilmiştir.
4. Çizelge 4.5 incelendiğinde, incelenen numunelerin hem toplam makroskobik tesir kesitleri (cm^{-1}) hem de soğurdukları doz miktarları ($\mu\text{Sv/h}$) karşılıklı olarak karşılaştırmalı bir şekilde verilmiş olup, bu değerler arasında hem toplam makroskobik tesir kesiti hem de soğurduğu doz miktarı en yüksek olan numune $0,4176 \text{ cm}^{-1}$ ve $0,5152 \mu\text{Sv/h}$ değerleri ile CM10 numunesi olmuştur.
5. Yukarıdaki maddeler birlikte değerlendirildiğinde, incelenen numuneler arasında CM10 numunesi %80 epoksi ve %20 bor karbür içeriği ile en iyi nötron zırlayıcısı olarak belirlenmiştir. Bu sonucun bor karbür ile epoksi reçinesi arasında oluşan bağlar ile ilişkili olduğu açık bir şekilde söylenebilir.
6. İncelenen numuneler kendi içlerinde ve sahip oldukları element cinsi ve konstrasyonu olarak değerlendirildiğinde ise aşağıdaki sonuçlar açık bir şekilde elde edilmiştir.

% 80 epoksi ve % 20 niyobyum içeren CM6 numunesi ile % 80 epoksi ve % 20 bor karbür içeren CM10 numunesi birlikte değerlendirildiğinde CM10 numunesinin CM6 numunesinden daha büyük makroskobik tesir kesitine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak Çizelge 3.7 incelendiğinde bor karbürün makroskobik tesir kesiti $0,224 \text{ cm}^{-1}$ olup niyobyumun makroskobik tesir kesiti olan $0,418 \text{ cm}^{-1}$ 'den küçüktür. Yani CM6 ve CM10 numuneleri eşit oranlarda epoksi bulundurmalarına ve eşit oranda niyobyum ve bor karbür bulundurmalarına rağmen CM6 numunesinin daha

büyük ΣR değerine sahip olması beklenirken CM10 numunesinin daha büyük ΣR değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, bor karbürün tek başına iyi bir nötron zırhlayıcısı olmamasına rağmen epoksi ile birleşimi sonucu yapıyı çok daha iyi nötron zırhlayıcısı yaptığı açıkça söylenebilir. Bu sebeple bor karbürün nötron zırh malzeme tasarımlarında kullanılabileceği bu tez çalışmasıyla ortaya konulmuştur.

% 50 epoksi ve % 50 krom içeren CM8 numunesi ile % 50 epoksi ve % 50 nikel içeren CM9 numunesi birlikte değerlendirildiğinde, nikel elementinin makroskobik tesir kesitinin $0,329 \text{ cm}^{-1}$ değerle krom elementinin makroskobik tesir kesitinden ($0,308 \text{ cm}^{-1}$ 'den) büyük olması sebebiyle CM9 numunesinin makroskobik tesir kesiti CM8 numunesinden daha büyük bulunmuştur. Bu sonuca ek olarak, nikel elementi yapıya östenitik özellik sağlaması sebebiyle hem foton radyasyonunda hem partikül radyasyonunda zırh malzeme tasarımında kullanılabileceği açıkça söylenebilir.

CM2 ve CM3 numuneleri birlikte değerlendirildiğinde ise, aynı oranda (% 30) epoksi, aynı oranda parafin (%60) bulunduran bu malzemeler birbirlerinden farklı olarak % 10 bor (CM2) ve % 10 bor karbür (CM3) bulundurmaktadır. Bu malzemelerin makroskobik tesir kesitleri karşılaştırıldığında ise CM3' ün daha büyük ΣR değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple nötron zırh tasarımlarında bor karbürün daha etkin olduğu sonucuna varılabilir.

Bütün bu çıkarımlar birlikte değerlendirildiğinde üretilen ve incelenen numuneler arasından % 80 epoksi ve % 20 bor karbür içeriğine sahip CM10 numunesinin nötron zırhlama uygulamalarında diğerlerine göre daha tercih edilebilir bir kompozit olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca bu tez çalışması ile bir zırh malzemesinin makroskobik tesir kesiti ile nötron soğurganlığı oranının birbirleriyle doğru orantılı olduğu sonucuna varılabilir.

Sonuç olarak bu tez çalışması ile, epoksi, bor, parafin, krom, nikel ve niyobyum maddeleri kullanılarak ayrı ayrı ve farklı kompozisyonlarda üretilen numunelerin radyasyon zırlama endüstrisinde, nükleer reaktörlerde, radyoaktif kaynak taşıma ve depolama ünitelerinde, nötron sızıntısı değerlendirme çalışmalarında, bor nötron tedavi ünitelerinde, laboratuvar araştırma ve inceleme çalışmaları başta olmak üzere birçok zırlama uygulamalarında kullanılabilirlikleri ortaya konulmuş olup zırh tasarımlarında incelenen numuneler içerisinde katılan maddelerin farklılığının hangi oranda ve nasıl zırlamaya etki ettiği açıklanmıştır. Bu sebeple bu tez çalışmasının iler ki çalışmalar için teşvik edici olacağı umut edilmektedir.



KAYNAKLAR

- Abdel - Aziz, M M., Gwaily, S. E., 1997. Thermal and mechanical properties of styrene-butadiene rubber/lead oxide composites as gamma-radiation shields, *Polymer Degradation and Stability*, 55 269-214.
- Açıkgöz, İ., Yıldırım, S., 2001. Çekirdek Fizikine Giriş, Literatür Yayınları:55, İstanbul, Türkiye.
- Akkurt,İ., F. Akarslan, K. Günoğlu, Ş. Kılınçarslan, İ. S. Üncü, H. Demiralay (2014). Bazı Kumaş Türlerinin Nötron Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi
- Alhajali, S., Kharita, M H., Naoom, B., Yousef, S., AlNassar, M., 2009. Estimation of theactivation of localreactor shielding concretes , *Progress in Nuclear Energy*, 51 374–377.
- Arslan, H., 2011. Dünya'nın Elektrik ve Manyetik Alanının Deniz Seviyesindeki Kozmik Müon Akısı Üzerine Etkisinin GEANT4 ile İncelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Atsuhiko, M., Shinji, S., Koichi, O., Satoshi, S. , Yury, V., Atsushi, K., Takeo, N. , Hiroshi, T.,Yusuke, K., Shigeru, Y., Makoto, M., 2007. Development of 300°C heat resistant boron-loadedresin for neutron shielding, *Journal of Nuclear Materials* 367–370 1085–1089.
- Atsuhiko, M., Yoshimasa, A., Koichi, O., Shinji, S., Atsushi, K., 2011. Flexible heat resistantneutron shielding resin, *Journal of Nuclear Materials*, 417 850–853.
- Aygün, B., 2010, Değişik Yağ Oranlarına Sahip Parafin Waxlarda Hızlı Nötronların MakroskopikSoğrulma Tesir Kesitlerinin Belirlenmesi ve Değişen Yağ Oranının Zırhlama ÜzerindekiEtkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Bartoli, L., Becherini, F., Grazzi, F., Zoppi, M., 2009. Surface scattering efficiency of some commonmaterials for shielding pulsed neutron scattering instruments, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 608 360–362.
- Berber, H., 2005. İnternet Sitesi. www.aof.anadolu.edu.tr/kitap/IOLTP/2280/unite19.pdf. Erişim Tarihi: 13.05.2006
- Beyster, J. R., Henkel, R. L., Nobles, R. A., Kister, J. M., 1955. Inelastic collision cross sections at 1,0-, 4,0-, and 4,5-MeV neutron energies, *Physical Review*, volume 98, number 5, June 1 1955.
- Büyükuslu, H., 2007. Isparta'nın Yalvaç İlçesi ve Çeresinin Doğal Fon (Background) Radyasyon Düzeylerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Canel A., 2018. Güncel Nükleer Uygulamalara Yönelik Yeni Nesil Epoksi Tabanlı Nötron Zıhrlarının Geliştirilmesi Konulu Yüksek Lisans Tezi Sinop Üniversitesi,Sinop
- Donzella, A., Bonomi, G., Giroletti, E., Zenoni, A., 2011. Monte Carlo simulations of a D-T neutron generator shielding for landmine detection , *Radiation Measurements* 46 1187-1193

- Elbio, C., Florian G., Burkhard, S., Harald, T., 2011. Reusable shielding material for neutron and gamma radiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 651 77–80.
- Gencil, O., Bozkurt, A., Kam, E., Korkut, T., 2011. Determination and calculation of gamma and neutron shielding characteristics of concretes containing different hematite proportions, Annals of Nuclear Energy, 38 2719–2723.
- Gwaily, S. E., 2002. Galena/(NR+SBR) rubber composites as gamma radiation shields, Polymer Testing 21 883–887.
- Gwaily, S. E., Hassan, H. H., Badaw, M., Madani, M., December 2002. Study of Electrophysical Characteristics of Lead-Natural Rubber Composites as Radiation Shields, Polymercomposites, Vol. 2 ,No. 6.
- Gwaily, S. E., Hassan, H. H., Badawy, M. M., Madani, M., 2002. Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields, II — H₃BO₃/NR composites, Polymer Testing 21 513– 517.
- Gwaily, S. E., Hassan, H. H., Badawy, M. M., Madani, M., 2002. S.E. Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields , I. B₄C/NR composites , Polymer Testing 21 129–133.
- Hançerlioğulları, 14-18 Kasım 2007 A, 14.1 ve 14.6 MeV nötronlar ile ⁹³Nb⁴¹ (n,xp) tepkimesi içindenge öncesi (precompound) tesir kesiti hesaplaması, XI. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, Antalya ,
- Huasi, H., Qunshu, W., Juan, Q., Yuelei, W., Tiankui, Z., Zhongsheng, X., Xinbiao, J., Guoguang, Z., Hu, X., Xiangyang, Z., Jing, Z., Wenhao, L., Zhenghong, L., Boping, Z., Linbo, L., Zhaohui, S., Xiaoping, O., Jun, Z., Yaolin, Z., Xiaoqin, M., Zhengping, D., Cheng, L., Zhenyu, J., Yuanping, Z., 2008. Study on Composite Material for Shielding Mixed Neutron and Gamma-Rays, Ieee Transactions on Nuclear Science, VOL. 55, NO. 4.
- Karadeniz, C., Yaramış, B., Özkök, Ş., 1973. Atom ve Çekirdek Fiziği, Şikketi Mürettibiye Basımevi, İstanbul, Türkiye.
- Knoll, G. F., 1989. Radiation detection and measurement, John Wiley and Sons, New York.
- Knoll, G.F., (1999), Radiation Detection and Measurement, New York :John Wiley&Sons Inc.,
- Korkut, T., 2010, Deneysel ve Cern Fluka Monte Carlo Simülasyon Kodu Yöntemleri Kullanılarak 4,5 MeV Enerjili Hızlı Nötronların Borlu Bileşik ve Cevherler Tarafından Yavaşlatılmasına İlişkin Parametrelerin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Korkut, T., Ün, A., Demir, F., Karabulut, A., Budak, G., Şahin, R., Oltulu, M., 2010. Neutron dose transmission measurements for several new concrete samples including colemanite, Annals of Nuclear Energy 37 996–998.
- Korkut, T., Karabulut, A., Budak, G., Korkut, H., 2010. Investigation of fast neutron shielding characteristics depending on boron percentages of MgB₂, NaBH₄ and KBH₄, J Radioanal Nucl Chem 286:61–65, DOI 10.1007/s10967-010-0619-0.
- Korkut. T., Korkut. H., Karabulut, A., Budak G., 2011. A new radiation shielding material: Amethyst ore, Contents lists available at ScienceDirect, Annals of Nuclear Energy 38 56–59.
- Korkut, T., Karabulut, A., Budak, G., Aygun, B., Gencil, O., Hancerlioğulları, A., 2012. Investigation of neutron shielding properties depending on number of

- boron atoms for colemanite, ulexite and tincal ores by experiments and FLUKA Monte Carlo simulations, Applied Radiation and Isotopes, 70 341–345.
- Krane, S. K. Şaşer, B. (çeviri). 2002. Nükleer Fizik. Palme Yayıncılık, 835, Ankara
- O. Ünal, Y. İçağa, A.Çoşkun (2016) Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
- McLane, V., Dunford, 1988. Web., C.L., and Rose, P.F.. Neutron cross sections: Volume 2, Neutron cross section curves. United States: N. p.
- Peralta, L. (2002) Monte Carlo simulation of neutron thermalization in matter"" Eur. J. Phys. 23, 307–314
- Tuart, Donald. R. , Arlryan, D. , 1980. Epithermal neutron activation analysis with a Slowpoke nuclear reactor. Trace Analysis Research Centre, Chemistry
- <https://www.kimyadersi.org/niyobyum.html>
- Varol, Z., 2015. Radyasyon Madde Etkileşimi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler ABD
- Yaramış, B., 1985. Nükleer Fizik, İ.T.Ü., Fen Edebiyet Fakültesi, Yayın No:7, İstanbul, Türkiye.
- Yılmaz, M., 1998. Çekirdek Fiziği, Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi Yayınları, no: 003, Balıkesir, Türkiye.
- Zeren , M. A., 2008. Atomlar Moleküller, Birsen Yayınevi, İstanbul.

ÖZ GEÇMİŞ

1978 yılında Giresun’da doğdu. İlk ve Orta öğrenimini Giresun / Görele’de Lise öğrenimini Kocaeli / Gebze’de tamamladı. Lisans Eğitimi Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden 2006 yılında mezun oldu. 2012 yılında Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesine Memur olarak atandı. 2013 yılında Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Nükleer Fizik dalında yüksek lisansa başladı. Halen Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesinde Memur olarak görevine devam etmektedir.