

**ELEMENTLERİN KRİSTAL YAPILARININ  
NÖTRON ZIRHLAMA ÜZERİNE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Muhammet Cenap YERLİKAN**

**Yüksek Lisans Tezi  
Fizik Ana Bilim Dalı  
Prof. Dr. Abdulhalik KARABULUT  
2013  
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEMENTLERİN KRİSTAL YAPILARININ NÖTRON  
ZIRHLAMA ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Muhammet Cenap YERLİKAN**

**FİZİK ANA BİLİM DALI**

**ERZURUM  
2013**

**Her Hakkı Saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

ELEMENTLERİN KRİSTAL YAPILARININ NÖTRON ZIRHLAMA ÜZERİNE ETKİLERİNİN  
İNCELENMESİ

Prof. Dr. Abdulhalik KARABULUT danışmanlığında, Muhammet Cenap YERLİKAN tarafından hazırlanan bu çalışma 13/12/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak ~~oybirliği/oy~~ **çokluğu (3./3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rıdvan DURAK

İmza :

Üye : Prof. Dr. Abdulhalik KARABULUT

İmza :

Üye : Prof. Dr. Önder ŞİMŞEK

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEYOĞLU  
Enstitü Müdürü

Bu çalışma TÜBİTAK ve BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.  
Proje No: 111T764 ve 2011/364-2012/71

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

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELEMENTLERİN KRİSTAL YAPILARININ NÖTRON ZIRHLAMA ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammet Cenap YERLİKAN

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdulhalik KARABULUT

Boron ve tungsten gibi bazı elementlerin nötron zırhlamada kullanıldığı ve iyi malzemeler oldukları bilinmektedir. Bu tür elementler daha iyi zırh malzemesi olabilirken klor ve lityum gibi elementler iyi birer nötron zırhlayıcı değildir. Hangi elementin neden daha iyi zırh malzemesi olduğu bazı parametrelere bağlı olup yoğunluk ve kristal yapı analizleri önem taşımaktadır. Bu çalışma sürecinde periyodik tabloda bulunan elementlerin büyük bölümünün kristal yapılarından kaynaklanan farklılıkların, nötron zırhlamalarına olan etkileri üzerinde durulmuştur. Birçoğu kristal yapılarına bağlı olarak sınıflandırılmış ve 3' er cm kalınlığındaki numuneler; GEANT4 simülasyon programı yardımıyla 4,5 MeV enerjili 1.000.000 adet nötron parçacığı ile bombardıman edilerek nötron yakalama makroskobik tesir kesiti hesaplanmıştır. Ayrıca her bir element için birim hücre hacmi ve bu hacmin, atomlar tarafından hacimsel olarak hangi oranlarda işgal edildiği yani birim hücre doluluk oranları (BHDO)

$$\text{Birim hücredeki Atom Sayısı} \times \frac{V_{\text{atom}}}{V_{\text{Bir.Hüc.}}} \times 100$$

Bağıntısı ile hesaplanarak (BHDO × d) çarpımı elde edilmiştir.

Toplam makroskobik tesir kesitleri; ayrı ayrı BHDO, yoğunluklar (d) ve (BHDO × d) çarpımı ile karşılaştırılmış olup grafiksel değerler elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde makroskobik tesir kesiti üzerine etkileri sırasıyla (BHDO × d) çarpımının %90, yoğunluğun %91 ve yalnızca BHDO' nın %47 lineer olduğu yani doğru oranlı görülmüştür. Ayrıca monoklinik kristal yapılarda bu oranların (BHDO × d) çarpımında %92, yoğunlukta %95 ve yalnızca BHDO' nda %92; izometrik sistemlerde (BHDO × d) çarpımında %95, yoğunlukta %95 ve yalnızca BHDO' nda %50; ortorombik yapılarda (BHDO × d) çarpımında %97, yoğunlukta %98 ve yalnızca BHDO' nda %98; hekzagonal yapılarda (BHDO × d) çarpımında %84, yoğunlukta %82 ve yalnızca BHDO' nda %39 olduğu saptanmıştır.

**2013, 80 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Kristal yapılar, nötron, nötron zırhlama, makroskobik tesir kesiti, GEANT4 Monte Carlo kodu

## ABSTRACT

Master Thesis

### THE CRYSTAL STRUCTURES OF THE ELEMENTS EFFECTS ON NEUTRON SHIELDING

Muhammet Cenap YERLIKAN

Ataturk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Abdulhalik KARABULUT

It is well known that several elements such as boron and tungsten widely used in neutron shielding applications. Although these elements are fine neutron shields, other several elements such as chlorine and lithium are not an effective neutron shielding materials. In the literature, there is not a study about parameters which effect of neutron shielding capacities of elements. This study has been focused on the effects of differences of crystal structures of most of elements in the periodic table on neutron shielding properties. Rectangular samples which have 3 cm thickness have been irradiated with 4.5 MeV energy 1.000.000 neutrons via GEANT4 Monte Carlo toolkit and total neutron macroscopic cross sections have been calculated. Also volume of unit cell and what proportions by volume was occupied by atoms (the occupancy rate of the unit cell values for each element-BHDO) have been calculated used formula described below and  $(BHDO \times d)$  multiplication has been obtained.

$$\text{Number of atoms in the unit cell} \times \frac{V_{\text{atom}}}{V_{\text{unit cell}}} \times 100$$

Total macroscopic cross sections have been compared with density (d), BHDO and  $(BHDO \times d)$  values and graphical values have been given. When the plots reviewed, effects of  $(BHDO \times d)$ , d and BHDO on total neutron macroscopic cross sections have been seen as 90%, 91% and 47% linearity, respectively. Also these values have been found as 92%, 95% and 92% for monoclinic crystal structures; 95%, 95% and 50% for isometric crystal structures; 97%, 98% and 98% for orthorhombic crystal structures; 84%, 82% and 39% for hexagonal crystal structures.

**2013, 80 pages**

**Keywords:** Crystal structures, neutrons, neutron shielding, total macroscopic cross sections, GEANT4 Monte Carlo Toolkit

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın simülasyonların yapılmasında GEANT4 Monte Carlo simülasyon kodu kullanılmıştır.

Çalışmalarım boyunca yaptığım araştırmalar için beni yönlendiren, destek ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Abdulhalik KARABULUT' a teşekkür ederim.

Danışmanlığında başlamış olduğum çalışmam esnasında aramızdan ayrılan, varlığı boyunca hem lisans hem de yüksek lisans eğitimimde her yönden destek ve önerilerini esirgemeyen, bilgilerinden istifade ettiğim çok değerli saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Gökhan BUDAK' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarımın her aşamasında bana destek olan GEANT4 simülasyon programının kullanılmasını öğrenmemde bana destek olup sonuçlarımın değerlendirilmesinde yardım eden Sayın Doç. Dr. Turgay KORKUT ve Sayın Uzman Fizikçi Bünyamin AYGÜN'e, simülasyon sonuçlarının elde edilmesinde yardımlarından dolayı Sayın Uzman Fizikçi Zeynep İtr UMAÇ' a teşekkür ederim.

Son olarak; manevi desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü emekli teknisyeni sevgili babam Mehmet Nuri YERLİKAN başta olmak üzere anneme, eşime ve tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Muhammet Cenap YERLİKAN

Aralık, 2013

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>5</b>
2.1. Radyasyon .....	5
2.1.1. Radyasyonun oluşması .....	5
2.1.2. Radyasyon birimleri .....	5
2.1.2.a. Aktivite birimi.....	5
2.1.2.b. Işıma düzeyleri .....	7
2.1.2.c. Soğurulma doz birimi .....	7
2.1.2.d. Eşdeğer doz birimi.....	8
2.1.3. Radyasyon çeşitleri.....	8
2.1.3.a. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon.....	9
2.1.3.b. İyonlaştırıcı radyasyon .....	10
2.2. Nötron ve Özellikleri.....	16
2.2.1. Nötron kaynakları.....	17
2.2.1.a. $\alpha$ (Alfa) – Be (Berilyum) kaynakları .....	17
2.2.1.b. Fotonötron kaynakları .....	18
2.2.1.c. Kendiliğinden fisyon .....	20
2.2.1.d. Nükleer reaksiyonlar .....	21
2.2.1.e. Reaktörler .....	21
2.2.2. Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması.....	22
2.2.3. Nötronların madde ile meydana getirdikleri etkileşimler.....	23
2.2.3.a. Elastik saçılma.....	23
2.2.3.b. İnelastik saçılma .....	24

2.2.3.c. Nötron yakalanması .....	24
2.2.3.d. Yüklü parçacıkların yayınlanması .....	25
2.2.3.e. Fisyon .....	25
2.2.3.f. Yüksek enerjili nötronlarla meydana gelen reaksiyonlar .....	26
2.2.4. Radyasyondan korunma .....	26
2.2.4.a. Zaman kuralı .....	26
2.2.4.b. Mesafe kuralı .....	26
2.2.4.c. Zırhlama kuralı .....	27
2.2.5. Nötronların yavaşlatılması ve soğurulması .....	29
2.3. Element ve Minerallerin Özellikleri .....	31
2.3.1. Elementler .....	31
2.3.1.a. Metaller .....	33
2.3.1.b. Ametaller .....	34
2.3.1.c. Soygazlar .....	34
2.3.1.d. Halojenler .....	35
2.3.1.e. Aktinitler .....	35
2.3.1.f. Lântanitler .....	35
2.3.2. Mineraller .....	36
2.4. Atomların Bağlanma Şekilleri .....	39
2.4.1. İyonik bağlar .....	39
2.4.2. Kovalent bağlar .....	40
2.4.3. Metalik bağ .....	40
2.4.4. Van der Waals bağ .....	41
2.5. Kristal Yapılar .....	41
2.5.1. Kristal yapı çeşitleri .....	46
2.5.1.a. Monoklinik yapılar .....	46
2.5.1.b. İzometrik yapılar .....	47
2.5.1.c. Triklinik yapılar .....	48
2.5.1.d. Trigonal yapılar .....	49
2.5.1.e. Tetragonal yapılar .....	49
2.5.1.f. Ortorombik yapılar .....	50
2.5.1.g. Hekzagonal yapılar .....	51



<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>54</b>
3.1. Geant 4 Simülasyon Programı.....	54
3.2. Çalışma Sürecinde kullanılan Elementler ve Bazı Özellikleri .....	56
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....	<b>59</b>
4.1. Bu Çalışmada Kullanılan Elementlerin Kristal Yapılarından Kaynaklanan Birim Hücre Doluluk Oranları Değerlerinin (BHDO) ve Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Tesir Kesitlerinin Karşılaştırılması .....	59
4.2. Bu Çalışmada Kullanılan Elementlerin yoğunluklarının (d) ve Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Tesir Kesitlerinin Karşılaştırılması .....	62
4.3. Bu Çalışmada Kullanılan Elementlerin Kristal Yapılarından Kaynaklanan Birim Hücre Doluluk Oranı×yoğunluk (d) Değerlerinin ve Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Tesir Kesitlerinin Karşılaştırılması .....	65
<b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ</b> .....	<b>70</b>
KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ .....	81

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Å	Angström ( $10^{-10}$ m)
A	Kütle numarası
B	Manyetik alan
BHDO	Birim Hücre Doluluk Oranı
BHH	Birim Hücre Hacmi
Bq	Becquerel, radyoaktivite birimi
C	Coulomb
c	Işık hızı
Ci	Curie
e	Elektron
E	Enerji (keV, MeV)
eV	Elektron volt
GeV	Giga elektron volt
Gy	Gray, absorblanmış doz birimi
h	Planck sabiti
keV	Kilo elektron volt
M	Nötronun çarptığı çekirdeğin kütlesi
m	Elektron kütlesi
$m_0$	Elektronun durgun kütlesi
MeV	Mega elektron volt
mSv	Milisievert (Eşdeğer doz)
n	Nötron
p	Proton
r	Atom Yarıçapı
R	Röntgen, radyasyon şiddet birimi
SI	Uluslararası Birim Sistemi
Sv	Sievert, eşdeğer doz birimi
I	Şiddet
$t_{1/2}$	Yarı Ömür

$v$	Nötronun hızı
$Z$	Atom numarası
$\alpha$	Alfa parçacığı
$\beta$	Beta parçacığı
$\gamma$	Gama radyasyonu
$\mu$	Mikro, alt birim ( $10^{-6}$ )
$\mu\text{Sv}$	Mikrosievert (Eşdeğer doz)
$\lambda$	Bozunma Sabiti
$\tau$	Ortalama ömür
$\sigma_t$	Toplam tesir kesiti
$d$	Yoğunluk ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
$\Sigma$	Makroskopik Tesir Kesiti (Taşınım katsayısı)
$\Theta$	Kütle merkezi sistemindeki saçılma açısı
$v$	Hacim

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Radyasyon türleri.....	9
Şekil 2.2. Gama ışını yayınlanması .....	11
Şekil 2.3. Yüklü bir parçacık ile su molekülünün iyonlaştırılması.....	12
Şekil 2.4. Alfa parçacıklarının oluşumu .....	13
Şekil 2.5. $\beta^-$ Bozunumu.....	14
Şekil 2.6. $\beta^+$ Bozunumu .....	14
Şekil 2.7. Elektron yakalamaya bir örnek .....	15
Şekil 2.8. Radyasyonun madde içinden geçişi.....	15
Şekil 2.9. $^{252}\text{Cf}$ , nin kendiliğinden parçalanmasında ölçülen nötronların enerji spektrumu (Demir 2009). .....	20
Şekil 2.10. Bir nükleer reaktörün çalışma şeması.....	22
Şekil 2.11. Elastik saçılma .....	23
Şekil 2.12. İnelastik saçılma .....	24
Şekil 2.13. Filyon olayının şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.14. Noktasal bir kaynağın etki alanı .....	27
Şekil 2.15. Berilyum (alfa-nötron) kaynaklar için tipik bir kaplama.....	28
Şekil 2.16. Değişik Radyasyonlar için zırh malzemeleri.....	28
Şekil 2.17. Periyodik tablo.....	33
Şekil 2.18. Saf maddenin kristalleşmesi .....	38
Şekil 2.19. NaCl' nin kristal örgüsü .....	40
Şekil 2.20. Hidrojen atomlarının kovalent bağ ile hidrojen molekülü oluşturması.....	40
Şekil 2.21. Kristal elemanlarının tek, iki ve üç boyutta oluşturdukları kristal örgü örnekleri .....	42
Şekil 2.22. Üç boyutlu kafes yapıda birim hücrenin gösterimi.....	43
Şekil 2.23. 7 Farklı kristal yapısı için 14 adet bravais kafesleri .....	44
Şekil 2.24.a. Birim hücrenin; sırasıyla basit, hacim merkezli ve yüzey merkezli yapısının gösterimi .....	45
Şekil 2.24.b. Hacim merkezli birim hücrenin doluluk oranı .....	45
Şekil 2.24.c. Yüzey merkezli birim hücrenin doluluk oranı .....	46

<b>Şekil 2.25.</b> Monoklinik yapılarda birim hücre özellikleri.....	46
<b>Şekil 2.26.</b> İzometrik yapılarda birim hücre özellikleri .....	47
<b>Şekil 2.27.</b> Triklirik yapılarda birim hücre özellikleri .....	48
<b>Şekil 2.28.</b> Trigonal yapılarda birim hücre özellikleri.....	49
<b>Şekil 2.29.</b> Tetragonal yapılarda birim hücre özellikleri .....	50
<b>Şekil 2.30.</b> Ortorombik yapılarda birim hücre özellikleri.....	51
<b>Şekil 2.31.</b> Hekzagonal yapılarda birim hücre özellikleri.....	52
<b>Şekil 3.1.</b> Nikel'in GEANT4 programı ile yapılmış simülasyonun sonuç ekranı .....	55
<b>Şekil 4.1.</b> Monoklinik Yapılar için Tesir Kesiti-BHDO grafiği .....	60
<b>Şekil 4.2.</b> İzometrik Yapılar için Tesir Kesiti-BHDO grafiği.....	60
<b>Şekil 4.3.</b> Ortorombik Yapılar için Tesir Kesiti-BHDO grafiği .....	61
<b>Şekil 4.4.</b> Hekzagonal yapılar için tesir kesiti-BHDO grafiği .....	61
<b>Şekil 4.5.</b> Monoklinik Yapılar için Tesir Kesiti-d grafiği.....	62
<b>Şekil 4.6.</b> İzometrik Yapılar için Tesir Kesiti-d grafiği .....	63
<b>Şekil 4.7.</b> Ortorombik Yapılar için Tesir Kesiti-d grafiği.....	64
<b>Şekil 4.8.</b> Hekzagonal Yapılar için Tesir Kesiti-d grafiği .....	65
<b>Şekil 4.9.</b> Monoklinik yapılar için tesir kesiti-(birim hücre doluluk oranı × d) grafiği .....	66
<b>Şekil 4.10.</b> İzometrik kristal yapılar için tesir kesiti-(birim hücre doluluk oranı × d) grafiği .....	67
<b>Şekil 4.11.</b> Ortorombik kristal yapılar için makroskopik tesir kesiti -(birim hücre doluluk oranı × d) grafiği.....	68
<b>Şekil 4.12.</b> Hekzagonal kristal yapılar için tesir kesiti-(birim hücre doluluk oranı × d) grafiği .....	69
<b>Şekil 5.1.</b> Bütün elementler için tesir kesiti – BHDO grafiği .....	70
<b>Şekil 5.2.</b> Bütün elementler için tesir kesiti – yoğunluk grafiği .....	71
<b>Şekil 5.3.</b> Bütün elementler için tesir kesiti – (BHDO*d) grafiği .....	72

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Birim dönüşüm tablosu.....	8
Çizelge 2.2. Nötronların genel özellikleri.....	16
Çizelge 2.3. Alternatif ( $\alpha,n$ ) izotopik nötron kaynakları.....	18
Çizelge 2.4. Fotonötron kaynaklarının özellikleri .....	19
Çizelge 2.5. Periyodik Tabloda Elementlerin Sınıflandırılması .....	32
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan elementlerin bazı özellikleri.....	56
Çizelge 5.1. Elementlerin bazı özelliklerinin tesir kesitine etkilerinin gösterimi.....	73
Çizelge 5.2. Grafik 5.1, 5.2, 5.3' ten elde edilen denklemlerin elementler için uygunluğu.....	73

## 1. GİRİŞ

Doğal ortamda mevcut radyasyonun yanı sıra, gelişen dünyanın gereksinimlerine ayak uydurmaya çalışılırken çevrede yer alan ve maruz kalınan radyasyon miktarı insan hayatını etkiler durumlara gelmiştir ve bu durumun ortadan kaldırılması için çalışmalar ihtiyaç haline gelmiştir.

Kullanım alanlarının artması ve radyasyondan yararlanma isteği yeni radyasyon kaynaklarının bulunmasına sebep olurken onların zararlı etkisini yok edecek ya da asgari dereceye indirecek zırlama çalışmalarına olan ilgi artarak günümüze kadar devam etmiştir. Nötronlar kullanım alanları geniş olan ve doğrudan olmasa da madde ile etkileştiklerinde ikincil radyasyona ( $\alpha, \beta, \gamma$  ve x ışınları) sebep olarak iyonlaştırıcı özelliğe sahip olan bu nedenle zırhlamaya ihtiyaç duyulan radyasyon çeşididir. Diğerlerinden farklı olarak nötronlar yüksüz olduklarından madde ile etkileşime girdiklerinde Coulomb kuvvetinin etkisinde kalmadan maddenin derinliklerine kadar ilerleyebilirler. Bu özellikleriyle nötronlar, bir madde çekirdeğinde değişiklik yapılması istenildiğinde kullanılırlar. Nötronla bombardıman edilen çekirdek nötronu soğurarak kütlesini artırabilir. Kütlesi artan atom kararsız hale gelir ve kararsız haldeki atom çeşitli ışımaya yaparak kararlı hale gelir ki bu ışımada radyasyon olarak adlandırılır. Nötronlar diğer yüklü parçacıklara göre (alfa, beta, gama) madde içinde daha girici olduğundan zırhlaması da aynı ölçüde zor olmaktadır. Nötron radyasyonunun zırhlaması üç aşamada gerçekleştirilir. Yüksek enerjili nötronlar (rölativistlik  $E > 10$  MeV) ve hızlı nötronlar (10 keV–10 MeV) hidrojene karşı duyarlı olduğundan, birinci aşamada nötronlar hidrojen bakımından zengin olan su, polietilen, parafin gibi maddelerden geçirilmek suretiyle enerjileri azaltılarak Epitermal (0,3eV-10 keV) ve Termal (0,01-0,3 eV) nötronlar elde edilir. İkinci aşamada hidrojen bakımından zengin maddelerden sonra yavaş (termal) nötronlara karşı yüksek soğurucu tesir kesitine sahip olan kadmiyum, bor ve lityum gibi malzemeler kullanılarak nötronların soğurulması sağlanır. Üçüncü aşamada ise, ikinci aşamada nötronların soğurulması sonucu, yüksek soğurucu tesir kesitine sahip madde tarafından yayınlanan gamaların tutulması için kurşun gibi, gama soğurucu maddeler kullanılır. Bu aşamalarda kullanılan

zırhlamalarda, hafif elementler en etkili olduğundan su, beton ve plastik gibi malzemelerin kullanılması en uygundur. Bu çalışmada ise birçok elementin nötron zırhlama makroskopik tesir kesitleri GEANT4 simülasyon kodları kullanılarak hesaplanıp, her element için değişen bu değerlerin elementlerin kristal yapılarının bazı özelliklerine bağlı olup olmadığı incelenerek bu özelliklerin nötron zırhlamamda kullanılacak malzemenin seçiminde bir kriter olması amaçlanmıştır. Gelineen noktada son zamanlarda yapılan çalışmaların bazıları ise aşağıda verilmiştir.

Elbio *et al.* (2011), çimento bazlı bileşiklerin mevcut yaklaşımlarında eksiklikler olduğunu, ağır betonun nötron ve gama radyasyonunu iyi soğuramayan elementleri (örneğin; kalsiyum, karbon, oksijen, silisyum ve alüminyum) aşırı miktarda içerdiğini belirtmişlerdir. Demir, hidrojen, bor gibi istenilen elementlerin yüksek yoğunluklu zırhlama malzemesi nötron radyografi tesisi ANTARES' in yeniden tasarlanması için geliştirmişlerdir. Malzemenin bileşenlerini Monte Carlo'nün MNCP5 kodu ile belirlenmişlerdir. Bu zırhlama malzemesi ile background radyasyonunun önemli derecede soğurulmasını ağır betonlara kıyasla elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

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

Ghassoun *et al.* (2011), 10 MV üzerinde faaliyet gösteren medikal hızlandırıcıların istenmeyen, tedavi edici foton ışınını kirleten nötron kaynakları olduğunu ileri sürmüşlerdir. Aynı zamanda bu foto-nötronların hasta vücudu, personel ve halk için dozu artıran ikincil gama ışınlarını oluşturduğunu söylemişlerdir. Monte Carlo N-Particle MCNP5 kodunu 18 MV' de medikal lineer hızlandırıcı işleminin radyoterapi odasını modellemek için, nötron ile ikincil gama ışınlarının enerji spektrumlarını hesaplamak için ve tedavi odasının çeşitli noktalarında doz eşdeğerini hesaplamak için



kullanmışlardır. Monte Carlo simülasyonunu doğrulayan rapor IAEA' nın analitik metotlarıyla sonuçları karşılaştırmışlardır. Ayrıca literatürde yayınlanan simülasyonlar ile deneysel değerleri karşılaştırmışlardır. Bu işlemlerden sonra Monte Carlo simülasyonu radyoterapi odasının zırhlama performansını değerlendirmek için kullanmışlardır. Yapılan çalışmalarda radyoterapi odasının iç yüzeyinde bor karbür içeren parafin waxın kullanılmasının hem nötron hem de gama ışını dozunu azaltmak için yeterince etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Böyle bir değerlendirmenin oda malzemesi ve duvar yüzeyi dikkate alındığında analitik metotlar ile yapılamayacağını ileri sürmüşlerdir.

Gwaily (2002), kurşun cevher minerallerinin (galena) farklı miktarlarını doğal kauçuk (NR) ve stiren-bütadien kauçuk (SBR-1502)'in kompozitlerine ilave etmiştir. Kompozitlerin, gama radyasyonunu ne ölçüde zırhladığını bulmak için  $^{137}\text{Cs}$ 'yi kaynak olarak kullandığını belirtmiştir. Kauçuk matris 500 phr için lineer soğurma katsayısının  $\mu$  ( $\text{m}^{-1}$ ), yaklaşık  $29 \text{ m}^{-1}$  değerine kadar galena miktarının artmasıyla belirgin bir şekilde artmış olduğunu ileri sürmüştür. Aynı zamanda termal özellikleri (termal yayılma katsayısı, özgül ısı ve termal iletkenlik) bu kompozitler için ölçtüğünü ifade etmiştir.

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

Korkut vd (2010), numunenin nötron zırhlama özelliğini yorumlamak için makroskopik tesir kesiti ve maddedeki nötron akısının kullanılabilir faktörler olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun için farklı bor yüzdeleri içeren  $\text{MgB}_2$ ,  $\text{NaBH}_4$  ve  $\text{KBH}_4$  örneklerini kullanmış, bunların nötron makroskopik tesir kesiti ölçümlerini  $^{241}\text{Am-Be}$  ( $E_{\text{ff}} =4,5$ ) kaynağını kullanarak yapmışlardır. Ortalama nötron akısı değerini ve her bir numunenin

hızlı nötron akış dağılımını FLUKA Monte Carlo kodunu kullanarak hesaplamışlardır. Aynı zamanda numunelerin yarı kalınlık değerlerini parafin ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak artan bor konsantrasyonunun materyalin nötron zırlama özelliğini artırabildiğini ileri sürmüşlerdir.

Korkut vd (2011), radyasyon zırlama malzemesi olarak ametist cevherini kullanmışlardır. WDXF spektroskopisi tekniğini kullanarak ametistin temel bileşenlerini belirlemişlerdir. Birkaç foton enerjisinde ametistin zırlama kabiliyetini anlamak için elde ettikleri sonuçları FLUKA Monte Carlo radyasyon transmisyon koduyla simülasyon sürecinde kullanmışlardır. Sonrasında ise değerleri ince bir zırlama beton malzemesi ile karşılaştırmışlardır. Ametistin gama ışınlarını betondan daha iyi zırladığını ileri sürmüşlerdir. Ametist cevherinin radyasyon zırlama özellikleriyle ilgili yapılan ilk araştırma olduğunu ifade etmişlerdir.

Korkut vd (2012), <sup>241</sup>Am-Be kaynak ile kolemanit, üleksit ve tinkal olarak adlandırılan borun birim hacim başına farklı yüzdelere içeren üç numuneyi toplam makroskopik tesir kesitinin bulunduğu deneylerde kullanmışlardır. Aynı zamanda FLUKA Monte Carlo kodu düşük enerjili nötron etkileşimleriyle depo edilen enerji, doz ve toplam makroskopik tesir kesiti simülasyonlarını yapmak için kullanmış ve parafin wax ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak bor atomlarının artan konsantrasyonunun numunenin nötron zırlama özelliğini artırabildiğini ileri sürmüşlerdir.

Medhat *et al.* (2011), nükleer güç istasyonunun işlevi bittikten sonra reaktörün yüksek radyoaktivitesine neden olan elementlerin konsantrasyonlarını belirlemeye çalışmışlardır. Bu elementleri reaktör ömrü boyunca (n,  $\gamma$ ) reaksiyonları ile aktif hale getirmiş ve beton içerisinde bulunan çimentodaki Ce, Co, Cs, Eu, Fe, Hf, Sb, Sc ve Tb elementleri olduğunu ileri sürmüşlerdir. Farklı çimento örneklerini nötron demetine maruz bırakmış ve sayma sistemleriyle analiz etmişlerdir. Bu elementlerden gelen radyoaktivitenin, uzun bir soğutma süresinden sonra veya reaktörün devre dışı bırakılmasından sonra, büyük ölçüde önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2.1. Radyasyon**

Radyasyon, kaynağından parçacık veya elektromanyetik dalga halinde doğrular boyunca ıraksayan enerji olarak tanımlanır.

#### **2.1.1. Radyasyonun oluşması**

Bazı elementlerin çekirdeklerindeki nötron / proton oranı 1 veya 1'e yakın olmayan yani nötron sayısı ve proton sayısı arasında denge olmayan atomlar aşırı enerjiye sahip olduklarından dengesizdirler ve bu durumdaki atomlar kararsızdırlar.

Bu durumdaki elementler nötron / proton dengesini sağlamak için fazla olan enerjilerini çeşitli şekillerde kayıp ederek farklı elementlere dönüşürler. İşte bu durumdan ortaya çıkan enerjiye radyasyon denir.

#### **2.1.2. Radyasyon birimleri**

Radyasyon birimi, bir radyoaktif maddenin birim zamandaki parçalanma sayısı olarak belirlenir.

##### **2.1.2.a. Aktivite birimi**

Özel Birim: Curie (Ci)

SI Birimi: Becquerel (Bq)

**Curie (Ci):** Tarihsel olarak bilinen en eski radyasyon birimi Curie' dir. Yarıömrü 1620 yıl olan 1 gr Radium ile dengede bulunan Rodanun aktivite miktarı olarak belirlenen Curie' nin değeri hesaplanacak olursa,

$$\lambda_{Radyum} = \frac{0,693}{1,62 \times 10^3} = 13,8 \times 10^{-12} s^{-1}$$

elde edilir.

Radium' un kütlesi 226 akbdır ve 1 atom-gram Radium' da  $6,02 \times 10^{23}$  tane atom vardır. Bu durumda Radium' un saniyedeki parçalanma sayısı  $3,7 \times 10^{10}$  olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$dN/dt = |\lambda N| = 13,8 \times 10^{-12} \times 2,66 \times 10^{21} = 3,7 \times 10^{10} \text{ parç/s}$$

Deneysel olarak da Radium' un saniyedeki parçalanma sayısı  $3,4 \times 10^{10}$  ile  $3,7 \times 10^{10}$  arasında hesaplanmıştır. Curie' nin alt birimleri ise  $3,7 \times 10^7$  parç/s olan milicurie (mCi) ve  $3,7 \times 10^4$  parç/s olan mikrocurie ( $\mu$ Ci)' dir (Şahin 1999).

**Becquerel (Bq):** Saniyede bir bozunma gösteren radyoaktif maddenin aktivitesi olarak bilinir ve

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

$$1\text{Bq} = 27,03 \times 10^{-12} \text{ Ci}$$

olarak yazılır.

**Ruthertford (rd):** Yine bir radyoaktif elementten, bir saniyede yayınlanan parçalanma sayısı olarak belirlenir. 1 Ruthertford (rd) saniyede  $10^6$  parçalanma olarak verilir. Alt birimleri, miliruthertford (mrd) saniyede  $10^3$  parçalanma ve mikroruthertford ( $\mu$ rd) ise saniyede 1 parçalanmadır (Şahin 1999).

### 2.1.2.b. Işıma düzeyleri

Özel Birim: Röntgen (R)

SI Birimi: Coulomb / kg (C/kg)

1 Röntgen, normal şartlar altında ( $0^{\circ}\text{C}$ ' de, 760 mmHg basınç altında)  $1\text{ cm}^3$  havada 1 elektrostatik yük birimlik iyon çifti oluşturan X- veya  $\gamma$ -ışınımı miktarıdır.

1 C/kg ise  $1\text{ m}^3$  havada 1 elektrostatik birim iyonizasyon değişikliği yapan X- veya  $\gamma$ -ışınımı miktarıdır.

$$1\text{ R} = 2,58 \times 10^{-4}\text{ C/kg} \quad (2.51)$$

Röntgen birimi 3 MeV enerji altındaki X- veya  $\gamma$ -ışını için tanımlanmıştır. Partiküler ışınlarda kullanılmaz. Sadece havadaki iyonizasyonu gösterir. Röntgen kümülâtif (toplam) saçılımı ölçer ve radyasyon hızından bağımsızdır (Aygün 2010; Umaç 2012).

### 2.1.2.c. Soğurulma doz birimi

Özel Birim: Rad

SI Birimi: Gray (Gy)

**Rad:** Işınlanan maddenin 1 kg' ına  $10^{-4}$  Joule' lük enerji veren radyasyon miktarıdır.

**Gray:** Işınlanan maddenin 1 kg 'ına 1 joule' lük enerji veren radyasyon miktarıdır.

$$1\text{ Rad} = 0.01\text{ Gy}$$

### 2.1.2.d. Eşdeğer doz birimi

Özel Birim: Rem

SI Birimi: Sievert (Sv)

**Sievert:** 1 Gray' lik X veya gama ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren radyasyon miktarıdır.

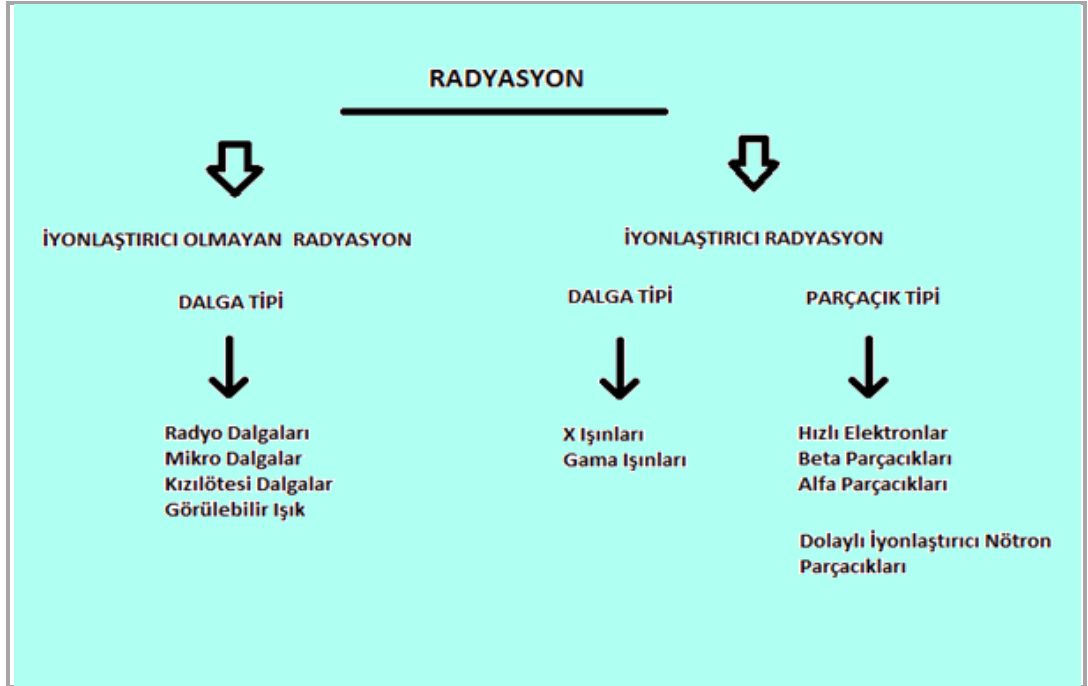
$$1 \text{ Rem} = 10^{-2} \text{ Sv} \text{ n } 1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem} = 1 \text{ J/kg}$$

**Çizelge 2.1.** Birim dönüşüm tablosu

	ESKİ	YENİ	DÖNÜŞÜM
AKTİVİTE	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1 Ci=3,7X10 <sup>10</sup> Bq
İŞINLANMA DOZU	Röntgen (R)	C/Kg	1 C/Kg=3876 R
SOĞURULMUŞ DOZ	Rad	Gray (Gy)	1 Gy=100 Rad
DOZ EŞDEĞERİ	Rem (Sv)	Sievert (Sv)	1 Sv=100 Rem

### 2.1.3. Radyasyon çeşitleri

Radyasyon parçacık ya da dalga olmak üzere iki farklı formda bulunur. Parçacık radyasyonu; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden atomik boyutlardaki parçacıkları ifade eder. Bunlar hızla giden mermilere benzerler, ancak gözle görülemeyecek kadar küçüktürler. Dalga tipi radyasyon ise; belli bir enerjiye sahip ancak durgun kütlesi olmayan radyasyon çeşididir. Bunlar, titreşim yaparak ilerleyen elektrik ve manyetik enerji dalgalarıdır. Bütün dalga tipi radyasyonlar ışık hızıyla ( $3 \times 10^8$  m/saniye) hareket ederler (Anonim 2013). Radyasyon çeşitleri Şekil 2.1'de verilmiştir.



**Şekil 2.1.** Radyasyon türleri

### 2.1.3.a. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

Kısa dalga boylarına ve dolayısıyla düşük enerjilere sahip olduklarından etki ettiği madde üzerinde iyonlaşma etkisi oluşturmayan radyasyon türüdür. Yalnızca dalga şeklinde bulunan ve elektromanyetik spektrumda belirli enerji aralığında yer alan radyasyonlardır.

● **Görünür Bölge Radyasyonu:** Dalga boyları  $4 \times 10^2 \text{ nm}$  ile  $7,5 \times 10^2 \text{ nm}$  arasında olan elektromanyetik dalgalardır. Enerjileri 1 eV – 10 eV arasında olup giricilik güçleri çok düşüktür. Kendi aralarında dalga boylarına göre 6' ya ayrılırlar.

**Mor Işık:**  $4 \times 10^2 \text{ nm}$  –  $4,5 \times 10^2 \text{ nm}$  arasındaki görünür bölge radyasyonlarıdır.

**Mavi Işık:**  $4,5 \times 10^2 \text{ nm}$  –  $5 \times 10^2 \text{ nm}$  arasındaki görünür bölge radyasyonlarıdır.

**Yeşil Işık:**  $5 \times 10^2 \text{ nm}$  –  $5,75 \times 10^2 \text{ nm}$  arasındaki görünür bölge radyasyonlarıdır.

**Sarı Işık:**  $5,75 \times 10^2 \text{ nm}$  –  $5,9 \times 10^2 \text{ nm}$  arasındaki görünür bölge radyasyonlarıdır.

**Turuncu Işık:**  $5,9 \times 10^2 \text{ nm} - 6,5 \times 10^2 \text{ nm}$  arasındaki görünür bölge radyasyonlarıdır.

**Kırmızı Işık:**  $6,5 \times 10^2 \text{ nm} - 7,5 \times 10^2 \text{ nm}$  arasındaki görünür bölge radyasyonlarıdır.

● **Kızılötesi Dalgalar (IR):** Dalga boyları  $10^3 \text{ nm} - 10^6 \text{ nm}$  arasında olan elektromanyetik dalgalardır. Enerjileri daha düşük olduğundan ( $10^{-3} \text{ eV} - 10 \text{ eV}$ ) görünür ışığa göre daha az giriciliğe sahiptirler.

● **Mikro Dalgalar (ESR-EPR):** Dalga boyları  $10^6 \text{ nm} - 10^8 \text{ nm}$  arasında olan dalgalardır. Enerjileri  $10^{-5} \text{ eV} - 10^{-3} \text{ meV}$  mertebesinde dir. Kızılötesi dalgalardan daha az giriciliğe sahiptirler.

● **Radyo Dalgaları:** Dalga boyları  $10^9 \text{ nm} - 10^{12} \text{ nm}$  arasında olan dalgalardır. Enerji ve dalga boylarına göre; Kısa Dalga, Orta Dalga ve Uzun Dalga olarak üç grupta sınıflanırlar. Enerji bakımından elektromanyetik spektrumun en alt bölgelerinde bulunurlar. Mikro dalgalara göre enerjileri ve giricilikleri daha azdır.

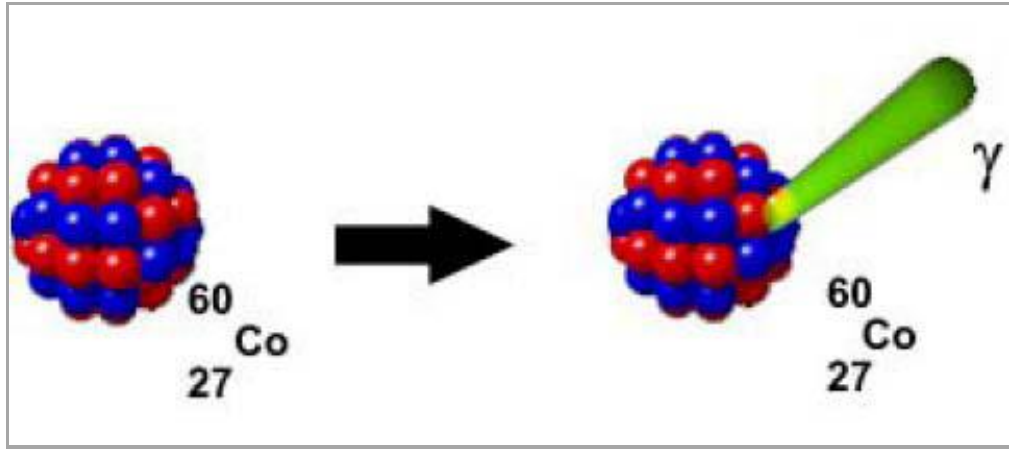
### 2.1.3.b. İyonlaştırıcı radyasyon

Madde ile etkileştiğinde iyonizasyon meydana getirerek elektrik yüklü parçacıklar veya iyonlar oluşturan ve radyoaktif maddelerden yayılan alfa, beta, gama ışınları gibi radyasyonlar, iyonlaştırıcı radyasyon olarak adlandırılırlar (Anonim 2013).

**1. Dalga Tipi (Elektromanyetik) Radyasyonlar:** Bu tip radyasyonlar, enerjileri; Radyo dalgaları, Mikro dalgalar ve Kızılötesi dalgalar gibi diğer elektromanyetik dalgalara göre çok daha yüksek olan radyasyonlardır. Elektromanyetik spektrumda yüksek enerji bölgesinde bulunurlar ve enerjileri yüksek olduğundan etki ettikleri maddeler kazandıkları bu fazla enerjiyi dengeleyip kararlı olmak için iyonlaşmaya maruz kalırlar.



● **Gama Işınları ( $\gamma$ ):** Sıklıkla alfa ve beta parçacığı yayınlayan kararsız atom çekirdeğinden çıkan çok yüksek enerjili fotonlardır. Radyoaktif bir çekirdek alfa veya beta ışınları yayınladıktan sonra uyarılmış halde kalır. Bu durumda çekirdek yüksek enerjiye sahip olur. Çekirdek bu fazla enerjisini dışarı vererek kararlı hale gelmesini, yine bir parçacık yerine elektromanyetik dalga şeklinde bir ışınım yaparak sağlar. Bu esnada atom ve kütle sayılarında bir değişme olmaz. Bu sebeple bu tür bozunmaya izomerik bozunma denir. Bu arada bir gama ışını yayınlanır (Demir 2009; Aygün 2010; Anonim 2013).



**Şekil 2.2.** Gama ışını yayınlanması

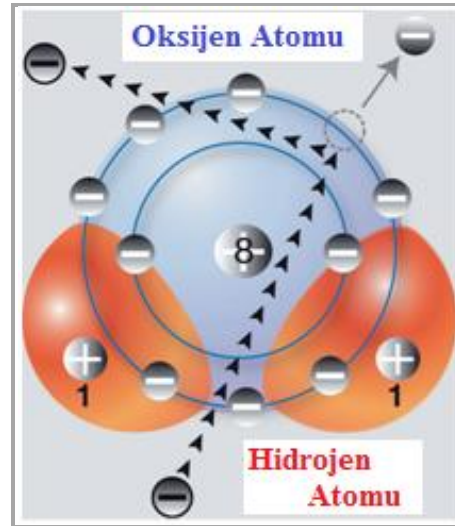
Gama ışınları madde içinden geçerken, elektronlarla etkileşmelerde bulunur. Bu nedenle de atomlarda iyonlaşmaya neden olur. Ancak atom ve kütle sayılarında bir değişme olmaz.

Yüksek enerjili gama ışınları birkaç cm kalınlıktaki kurşundan geçerler. Ancak çok girici olan bu radyasyona karşı, sadece kurşun ya da çelik gibi, yoğunluğu oldukça yüksek ve kalın malzemeler iyi bir zırhlama sağlayabilir. Yüksüz parçacıklar manyetik alanda sapma göstermezler (Demir 2009; Aygün 2010; Anonim 2013).

● **X-Işınları:** X-ışınları, yüksek hızlara sahip hareketli yüklü parçacıkların yavaşlatılmasından yada atomik iç yörüngeler arasındaki elektron geçişlerinden

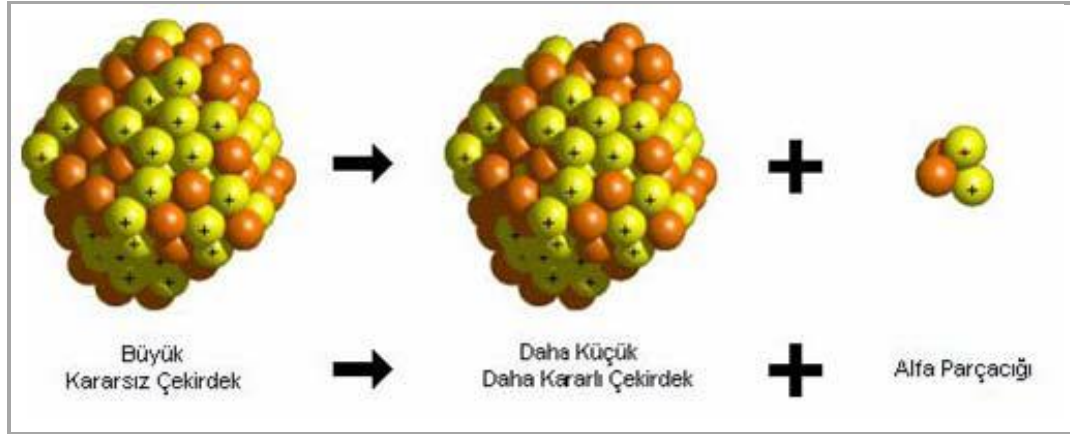
kaynaklanan yaklaşık  $10^{-5}$ -  $100 \text{ \AA}$  aralığında dalga boylarına sahip elektromanyetik dalgalardır. Bilimsel araştırmalarda, tıp ve dişçilikte görüntüleme amacıyla, endüstride malzeme kontrolü ve analizlerinde, kristal yapı ve elemental düzey analizlerinde kullanılırlar. Giricilikleri, yüksek enerjili olduklarından çok fazladır.

**2. Parçacık Tipi Radyasyonlar:** Parçacık olarak yayınlanan radyasyonlar olup Alfa ( $\alpha$ ) parçacığı veya  $\text{He}^{++}$  çekirdeği,  $\beta^-$  parçacıkları, elektronlar ( $e^-$ ), pozitronlar ( $\beta^+$  veya pozitif yüklenmiş elektronlar), nötronlar ( $n$ ), yüksek enerjili protonlar ( $p^+$ )’dan oluşmakta olan birincil kozmik ışınlardır. Bu parçacıklar etki ettikleri maddede iyonlaşmaya sebep olurlar.



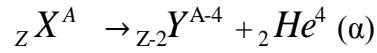
**Şekil 2.3.** Yüklü bir parçacık ile su molekülünün iyonlaştırılması (Anonim 2013)

● **Alfa Parçacıkları ( $\alpha$ ):** Kararsızlığı nötron ve protondan kaynaklanan radyoaktif çekirdeklerin iki nötron ve iki proton yayınlamaya kararlı hale gelmeleri esnasında yayınladıkları parçacıklar veya iki kez iyonlaşmış He atomlarıdır. Yayınladıkları atomlardan yüksek hızlarda ve dolayısıyla yüksek enerjilerde yayınlanırlar. Enerjileri yaklaşık 4-8 MeV arasında olmasına rağmen kütlelerinin ağır olması nedeniyle menzilleri 2-3 cm’ dir. İnce kâğıt veya cilt tarafından tamamen soğurulabilir. Manyetik alan ve elektrik alandaki sapmalarına bağlı olarak pozitif yüklüdürler.



**Şekil 2.4.** Alfa parçacıklarının oluşumu

Alfa bozunması esnasında radyoaktif çekirdekten kütle numarası 4, atom numarası 2 olan bir taneciğin ayrılması nedeniyle, bir atom çekirdeği alfa bozunmasına uğradığında kütle numarası 4 ve atom numarası 2 azalmış olur (Aygün 2010, Umaç 2012, Demir 2009, Anonim 2013).



● **Beta Parçacıkları ( $\beta$ ):** İyonlaştırıcı özelliğe sahip beta parçacıklarının bu özellikleri daha az olmasına karşın, alfa parçacıklarından daha fazla giriciliğe sahiptirler. Beta parçacıklarının maddeden yayınlanması veya elde edilmesi üç şekilde olur (Demir 2009).

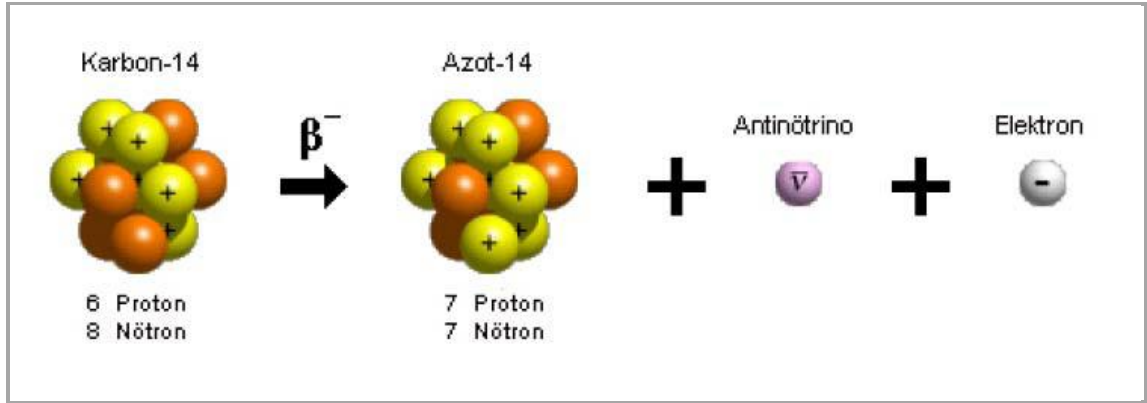
\*  $\beta^-$  bozunumu

\*  $\beta^+$  bozunumu

\* Elektron Yakalanması

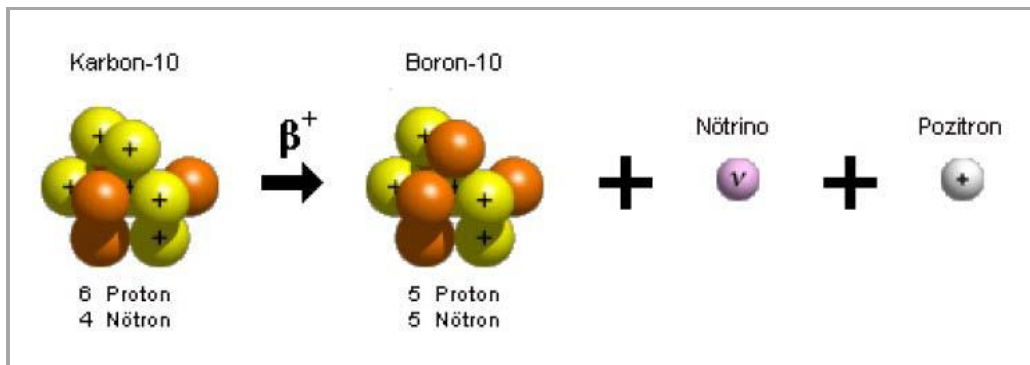
**a)  $\beta^-$  Bozunumu:** Bir çekirdeğin kararsızlığı çeşitli fazlalıklardan (parçacık veya dalga gibi) kaynaklanabilir. Kararsız durumdaki çekirdek bu fazlalığı atarak kararlı hale geçer.  $\beta^-$  bozunumlarında ise çekirdek fazladan nötrona sahip olmasından dolayı bu nötronun

bozunuma uğrayarak bir protona, bir elektrona ve ayrıca kütlesi sıfır olan antinötrinoya dönüşür.



Şekil 2.5.  $\beta^-$  Bozunumu

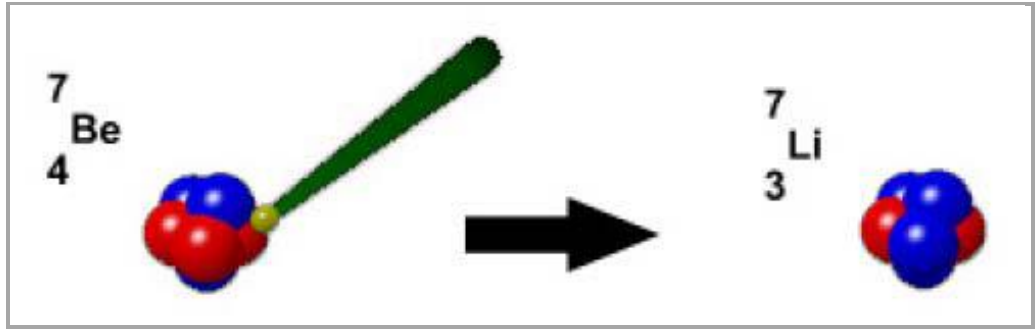
**b)  $\beta^+$  Bozunumu:**  $\beta^-$  bozunumundakinin aksine, kararsızlık nötron eksikliğinden ileri geliyorsa, protonlardan biri bu eksikliği tamamlamak için nötron ve pozitif yüklü elektrona dönüşür. Burada oluşan nötron çekirdekte kalır ve pozitron ise dışarı bırakılır. Böylece çekirdekteki nötron eksikliği giderilmiş ve fazla olan pozitif yük ise dışarı bırakılmış olur.



Şekil 2.6.  $\beta^+$  Bozunumu

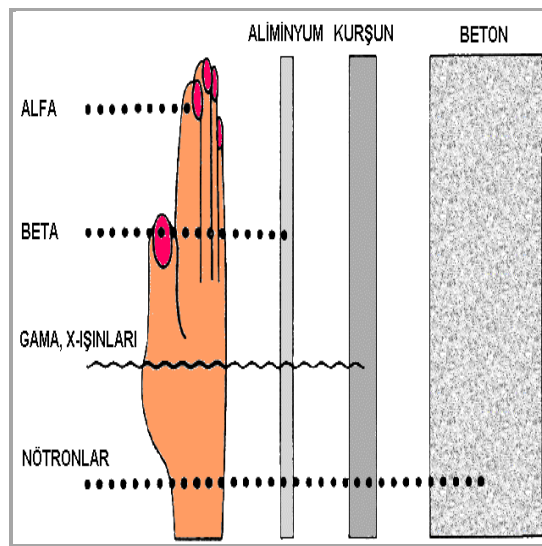
**c) Elektron Yakalama:** Proton fazlalığından dolayı kaynaklanan kararsızlıkta çekirdek, yakın yörüngelerinden (K, L) birinden bir elektron yakalayarak, fazla olan protonla birleşip, bir nötron ve bir nötrinoya dönüşür. Bu olay sonucunda herhangi bir radyasyon

yayınlanması olmasa da sonrasında elektron eksilen yörüngedeki eksikliği doldurmak için, üst yörüngelerden bir elektron, fazla enerjisini X-ışını olarak dışarı yayımlayarak tabakadaki boşluğu doldurur. Bu olayda proton eksildiğinden proton sayısı bir azalırken, aynı zamanda nötron sayısı artacağından kütle numarası değişiklik göstermez (Demir 2009).



Şekil 2.7. Elektron yakalamaya bir örnek

Nötronlar yüksüz ve kütleleri protonun kütlesine yakın parçacıklardır. Bu nedenle doğrudan iyonlaştırma yapamazlar. Ancak etkileştikleri maddelerin nötronlarıyla oluşturdukları etki sonucu  $\alpha$  ve  $\beta$  parçacıkları veya  $\gamma$  ve x ışınları oluşumuna yol açarlar.



Şekil 2.8. Radyasyonun madde içinden geçişi

## 2.2. Nötron ve Özellikleri

Nötronlar protonlarla atomun çekirdeğini oluştururlar. Belirsizlik prensibine göre mümkün olabildiği haliyle nötronun kütlesi yaklaşık olarak protonunkine ( $1,6748 \times 10^{-27}$  kg) eşit ve protonlarla birlikte çekirdek içerisinde bulunmaktadır. Nötronlar, spinleri elektron ve proton gibi  $1/2$  olan yüksüz parçacıklardır. Ancak nötron net bir yüke sahip olmasa da negatif bir manyetik momente sahiptir. Bu nötronun manyetik moment vektörü ile spininin ters yönlü olduğunu gösterir (Şahin 1999).

Atom çekirdeğinde nötron bulunmayan tek element hidrojenidir. Hidrojenden sonra en basit atom olan helyum' un çekirdeğinde ise iki proton ve iki nötron vardır. Bir elementin yapısal anlamda atomları farklılıklar gösterebilirler. Çekirdeklerindeki nötron sayıları veya diğer nükleonlarının sayıları değişebilir. Ancak nötronun elektrik yükü olmadığından, atomun çekirdeğinde farklı sayıda nötron bulunması o atomun kimyasal özelliğini değiştirmez. Bu durum atomun yalnızca kütlesini değiştirir. Bir elementin nötron sayıları farklı olan ve ağırlıkça birbirinden farklı atomlarına o elementin "izotopları" denir. Nötronların en önemli özelliklerinden biri hidrojen atomlarına duyarlı olmalarıdır. Bu nedenle hidrojen atomlarının farklı yerlere yerleştirilmesinde kullanılır. Ayrıca nötronların zırhlanmalarında ise hidrojenin etkili olma sebeplerindedir (Aygün 2010; Umaç 2012).

**Çizelge 2.2.** Nötronların genel özellikleri

Sınıfı	Baryon
Bileşimi	Bir yukarı, iki aşağı kuark
Ailesi	Fermiyon
Grup	Kuark
Etkileşimi	Yer çekimsel, Zayıf Elektromanyetik, Güçlü Nükleer
Anti-parçacığı	Anti-nötron
Keşfi	James Chadwick (1932)
Sembol	N, $n_0$
Kütle	$1.674\ 927\ 29(28) \times 10^{-24}$ gr
Ortalama Yarı Ömrü	885. 7(8) s (serbest)

**Çizelge 2.2** (devam)

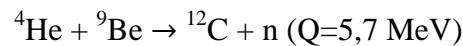
Elektrik yükü	0 Coulomb (yüksüz)
Elektrik Dipol Moment	$< 6,3 \times 10^{-26} \text{ e cm}$
Elektrik Polarizesi	$1.16(15) \times 10^{-3} \text{ fm}^3$
Magnetik Moment	$-1.913 \ 0427(5) \ \mu\text{N}$
Magnetik Polarizesi	$3.7 \ (20) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$
Spin	$\frac{1}{2}$
Izo-Spin	$\frac{1}{2}$
Parite	+1

### 2.2.1. Nötron kaynakları

#### 2.2.1.a. $\alpha$ (Alfa) – Be (Berilyum) kaynakları

Bu tür nötron kaynaklarında;  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  gibi ağır radyoaktif çekirdekler tarafından yayınlanan alfa ( $\alpha$ ) parçacıklarının,  $^9\text{Be}$  gibi hafif elementlerle etkileşmeleri sonucunda,

- Hedef çekirdek içerisindeki etkileşmeler nedeniyle alfa parçacıklarının yavaşlaması
- Hedef çekirdeğe çarpan  $\alpha$  parçacıklarının farklı gruplarda bulunması
- Yayınlanan nötron ve çekirdeğe hedeflenen  $\alpha$  parçacıklarının doğrultularının farklı olması
- Bazı  $^{12}\text{C}$  izotoplarının uyarılmış halde olmasından bir kısım  $\alpha$  parçacığı enerjilerini soğurmasından dolayı farklı enerji aralıklarında 13 MeV'e kadar değişebilen nötronlar elde edilir. Bu tür bir tepkimenin denklemi aşağıdaki gibidir:



Bu etkileşmede,  $^9\text{Be}$  izotopunun 1,7 MeV' lik zayıf bağlanma enerjisi ile bağlanmış olan nötronları alfa parçacıklarına maruz kalarak çekirdekten ayrılırlar ve nötronlar elde edilmiş olur. Çeşitli alfa kaynaklarından yayınlanacak farklı enerjilerdeki alfa

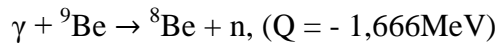
parçacıklarına bağlı olarak, üretilen nötron verimi değişiklik gösterebilir. Öyle ki bir alfa kaynağından yayınlanan  $10^6$  parçacıktan yalnızca bir tanesi Be ile tepkimeye girer. Bu nedenle  $\alpha$  şuasının şiddetindenise, enerjisi ne kadar fazla olursa yayınlanan nötron verimi de o kadar fazla olacaktır (Demir 2009; Aygün 2010; Umaç 2012; Anonim 2013). Alternatif hedef olarak Be yerine farklı çekirdeklerde kullanılabilir. Ancak nötron verimi açısından bunlar daha düşük seviyededirler. Bazı hedefler ve reaksiyon sonuçları aşağıda verilmiştir:

**Çizelge 2.3.** Alternatif ( $\alpha,n$ ) izotopik nötron kaynakları

Hedef	Reaksiyon	Q değeri (MeV)	$10^6$ $\alpha$ parçacığı başına nötron verimi
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
$^{13}\text{C}$	$^{13}\text{C} (\alpha,n)$	+2,2	$^{241}\text{Am}$ $\alpha$ parçacığı için 11
Be	$^9\text{Be} (\alpha,n)$	+5,71	$^{241}\text{Am}$ $\alpha$ parçacığı için 70

### 2.2.1.b. Fotonötron kaynakları

Uygun bir hedef, yeterli enerjiye sahip gama ışınlarıyla bombardıman edilerek de nötron elde edilebilir. Bu olay gama ışınına maruz kalan hedefin uyarılması sonucunda zayıf bağlı bir nötronunu bırakmasıyla olur. Reaksiyonun gerçekleşmesi için hedefe çarpan şuanın enerjisi, hedefin eşik enerjisinden yüksek olmalıdır. Örnek bir reaksiyon olarak



verilebilir.

Bu tür bir reaksiyon için 2,76 MeV enerjili gama kaynağı olarak  $^{24}\text{Na}$  kullanılırsa, 0,8 MeV enerjili nötronlar elde edilir. Bu tip kaynakların en büyük avantajı foton kaynağı tek enerjili ise tek enerjili nötronlar elde edilebilir. Fakat buna karşın hedefin uyarılması



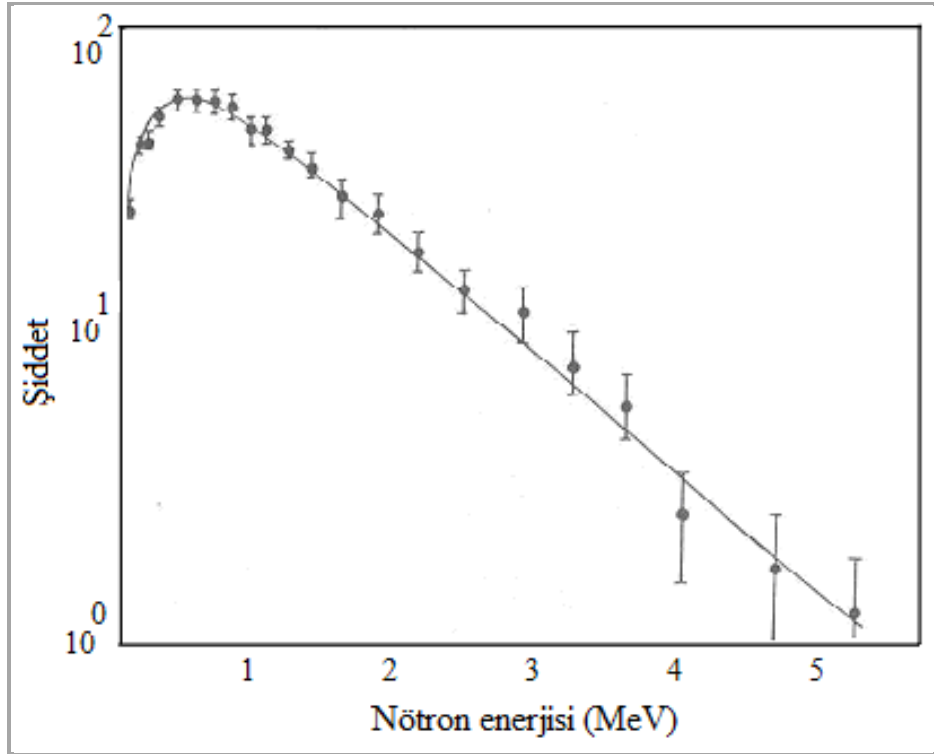
için yüksek enerjili gama yayan kaynaklar kullanılması ise bir dezavantajdır. Yaygın olarak kullanılan gama ışını kaynakları  $^{140}\text{La}$ ,  $^{72}\text{Ga}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{28}\text{Al}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  çekirdekleridir. Bazı fotonötron kaynakları için kullanılan foton kaynağı, hedef ve reaksiyon değerleri aşağıdaki tabloda mevcuttur (Demir 2009; Aygün 2010; Umacı 2012; Anonim 2013).

**Çizelge 2.4.** Fotonötron kaynaklarının özellikleri

$\gamma$ ışını yayınlayıcısı	Yarı ömür	$\gamma$ ışınının enerjisi (MeV)	Hedef	Nötron enerjisi (keV)	$10^0\text{Bq}'$ lik aktivite için nötron verimi (n/s)
$^{24}\text{Na}$	15 h	2,7541	Be	967	340 000
		2,7541	D	263	330 000
$^{28}\text{Al}$	2,2min	1,7787	Be	101	32 600
$^{38}\text{Cl}$	37,3min	2,1676	Be	446	43 100
$^{56}\text{Mn}$	2,58 h	1,8107	Be	129	
		2,1131		398	91 500
		2,9598		1,1491	
		2,9598	D	365	162
$^{72}\text{Ga}$	14,1 h	1,8611	Be	174	64 900
		2,2016		476	25 100
		2,5077		748	
		2,5077	D	140	
$^{76}\text{As}$	26,3 h	1,7877	Be	109	
		2,0963		383	3 050
$^{88}\text{Y}$	107 d	1,8361	Be	152	229 000
		2,7340		949	
		2,7340	D	253	160
$^{116}\text{In}$	54,1min	2,1121	Be	397	15 600
$^{124}\text{Sb}$	60,2 d	1,6910	Be	23	210 000

### 2.2.1.c. Kendiliğinden fisyon

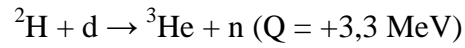
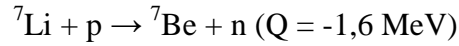
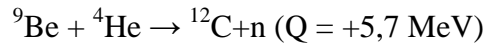
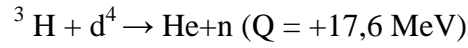
Birçok ağır çekirdek dışarıdan herhangi bir uyarı olmadan kendiliğinden bozunma yeteneğine sahiptirler. Uygun çekirdeklere, bu şekilde gerçekleşen parçalanmalarda parçalanma başına yaklaşık 4 nötron elde edilebilir ve bu tür çekirdekler doğal nötron kaynağı olarak kullanılabilir. Gerçekleşen olay sonrasında nötronlarla beraber  $\alpha$  parçacığı da yayınlanır. Bozunmaların sadece %3 lük kısmı nötron içerir. Yaygın olarak  $^{252}\text{Cf}$  ( $t_{1/2}=2,65$  yıl) izotopu bu tip nötron kaynağı olarak kullanılmaktadır. 1 gr.  $^{252}\text{Cf}$  için parçalanma başına üretilen nötron sayısı yaklaşık olarak  $4,3 \times 10^{12}$  n/s' dir. Ayrıca bu tip kaynaklarda üretilen nötron enerji spektrumu Şekil 2.9'da verilmiştir. 5 MeV'e kadar çıkabilen enerji değerleri bu bölgede çok fazla yoğun olmamada, 0,5-3 MeV aralığında en yoğun değerlerine sahiptirler.



Şekil 2.9.  $^{252}\text{Cf}$ 'nin kendiliğinden parçalanmasında ölçülen nötronların enerji spektrumu.

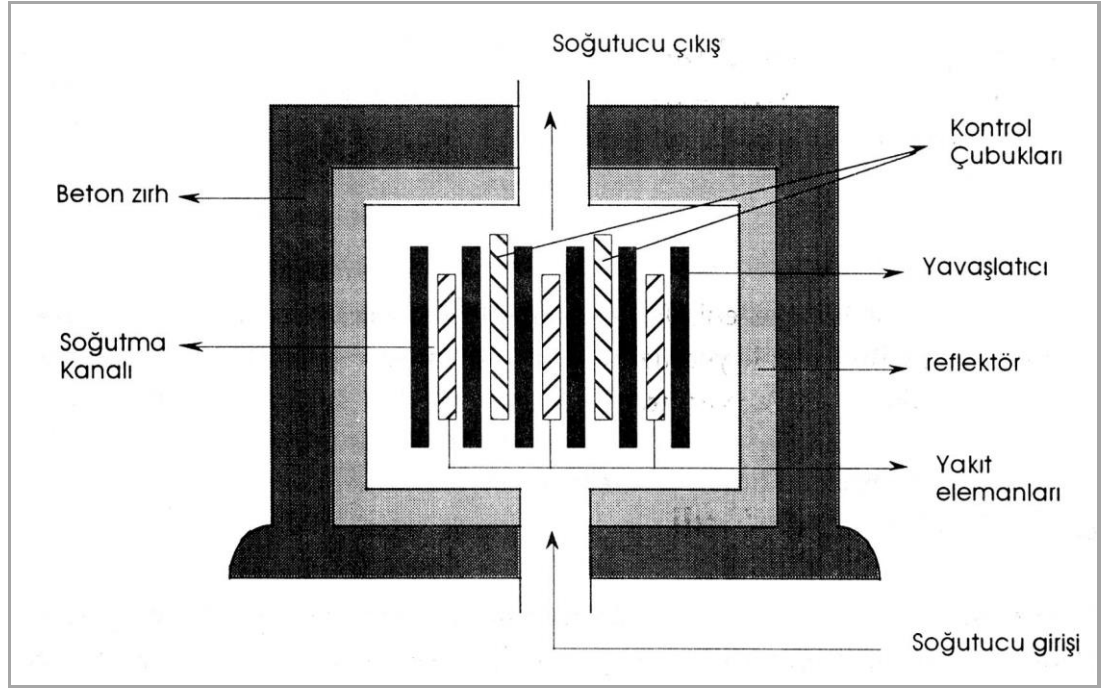
### 2.2.1.d. Nükleer reaksiyonlar

Parçacık hızlandırıcılarda hızlandırılmış yüklü parçacıklar yardımıyla oluşturulacak nükleer reaksiyonlar sonucunda nötronların elde edildiği bir yöntemdir. Hızlandırılmış parçacıklara ihtiyaç duyulduğundan kullanışlı bir kaynak değildir. Ancak hızlandırılan yüklü parçacık ile yayınlanacak olan nötronların açıları aynı olacak şekilde ayarlanırsa tek enerjili ve istenen enerjide nötron elde etmek mümkündür. Kullanılan bazı reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Umaç 2012)



### 2.2.1.e. Reaktörler

İçerisinde sürekli ve kontrollü çekirdek bölünmelerinin olduğu sistemlere Nükleer Reaktör adı verilir. Bir nükleer reaktörde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda reaktör korunda 5-7 MeV enerjili birçok nötron ortaya çıkar. Bu nötronlar reaktör zırhında kontrollü olarak açılacak bir delikten çıkarılarak kullanılabilirler. Bir bölünme reaktöründe, birim zamanda (s) ve birim yüzey alanından ( $\text{m}^2$ ) yayılan nötron sayısı yaklaşık  $10^{19}$  nötron/ $\text{m}^2\text{s}$  değerindedir (Yörükoğulları 1998). Bu yüksek bir nötron verimidir.



**Şekil 2.10.** Bir nükleer reaktörün çalışma şeması

### 2.2.2. Nötronların enerjilerine göre sınıflandırılması

Çeşitli nötron kaynakları ile farklı enerjilerde nötronlar elde edilir. Nötronlar yüklü parçacıklar olmadıklarından hızlandırılmazlar. Nükleer reaksiyonlar sonucu yüksek enerjili hızlı nötronlar elde etmek mümkündür. Hızlı nötronların başka atomlarla çarpıştırılmaları sonucunda daha düşük enerjili nötronlar elde edilir. Bu şekilde var olan nötronlar enerjilerine göre aşağıdaki gibi gruplandırılır:

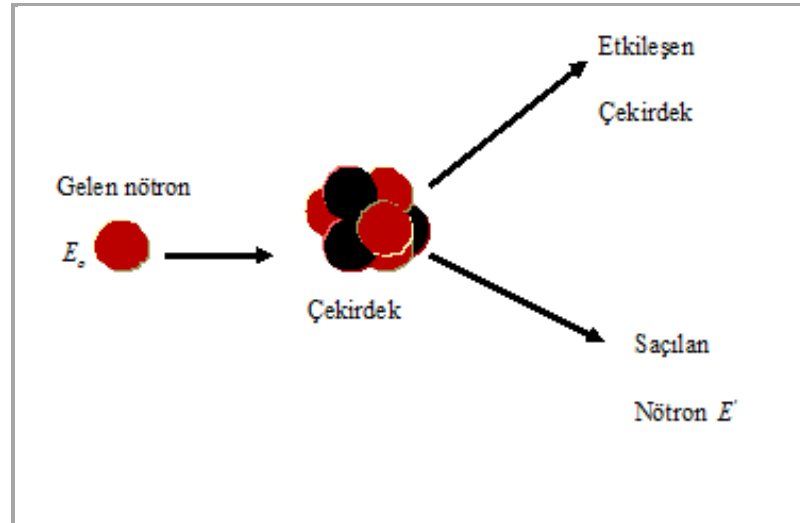
- Soğuk nötronlar: 0-0,1 eV
- Termik nötronlar: 0,01-0,3 eV
- Epitermik nötronlar: 0,3 eV-10 keV
- Rezonans nötronlar: 1-100 eV
- Yavaş nötronlar: 0-1000 eV
- Hızlı nötronlar: 10 keV-10 MeV
- Çok hızlı veya relativistik nötronlar: 10 MeV 'den büyük enerjili nötronlar

### 2.2.3. Nötronların madde ile meydana getirdikleri etkileşimler

Radyasyonun bütün türleri madde ile etkileştiklerinde saçılma(elastik saçılma, inelastik saçılma), fotoelektrik olay ve çift oluşum gibi çeşitli olaylar gerçekleşebilir. Bir radyasyonun madde ile etkileşme ihtimali tesir kesiti olarak tanımlanır. Nötronların madde ile etkileşmelerinde meydana gelebilecek olaylar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

#### 2.2.3.a. Elastik saçılma

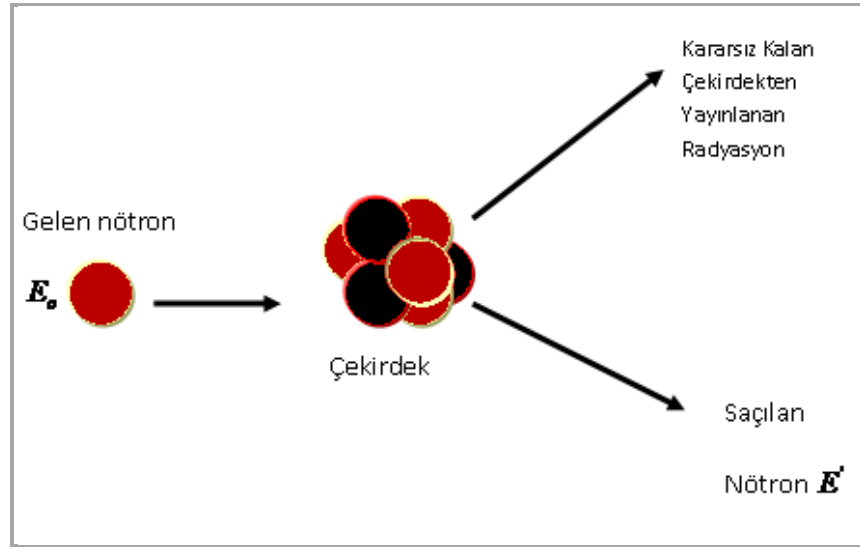
MeV seviyesinde yüksek enerjilere sahip nötronların enerjilerinin bir kısmını kaybederek meydana getirdikleri çarpışma türüdür. Çekirdek üzerine gönderilen nötron çekirdeğe çarparak kinetik enerjisinin bir kısmını, çekirdeğin kütlesiyle ters orantılı olacak şekilde çekirdeğe aktarır gelme doğrultusundan saparak çekirdeği terk eder. Aktarılan enerji çok düşük olduğundan saçılma sonunda çekirdeğin yapısında herhangi bir değişiklik olmaz. Bu tip çarpışmalar enerjinin korunumu kanunu çerçevesinde olur.



Şekil 2.11. Elastik saçılma

### 2.2.3.b. İnelastik saçılma

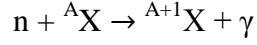
Çarpışmanın gerçekleşeceği çekirdeğin eşik enerjisinden yüksek enerjiye (1 MeV ve daha fazla) sahip nötronun enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktaracak şekilde, çekirdeğe çarpması ve onu uyarmasıyla oluşan saçılmadır. Nötron, etkileşmeden sonra enerjisi kaybeder ve gelme doğrultusundan farklı bir doğrultuda kalan enerjisi oranında çekirdekten uzaklaşır. Uyarılmış halde kalan çekirdekse daha sonra radyasyonun farklı bir çeşidini yayımlayarak temel hale döner. Bu olayda çekirdeğin yapısı değişikliğe uğrar.



Şekil 2.12. İnelastik saçılma

### 2.2.3.c. Nötron yakalanması

$v$  hızıyla hareket eden bir nötron, yakınından geçtiği bir çekirdek tarafından yakalanabilir. Bu esnada nötronun yakalanma ihtimaliyeti yani nötron yakalanması tesir kesiti  $1/v$  ile orantılıdır. Dolayısıyla nötronlar ne kadar yavaş olurlarsa çekirdek tarafından yakalanmaları o kadar kolaydır ve etkileşmeleride o kadar kaçınılmazdır. Etkileşme sonrasında çekirdek yeni bir izotopuna dönüşürken fazla enerjisini de gama ışını olarak dışarı verir. Genel bir ifadeyle,



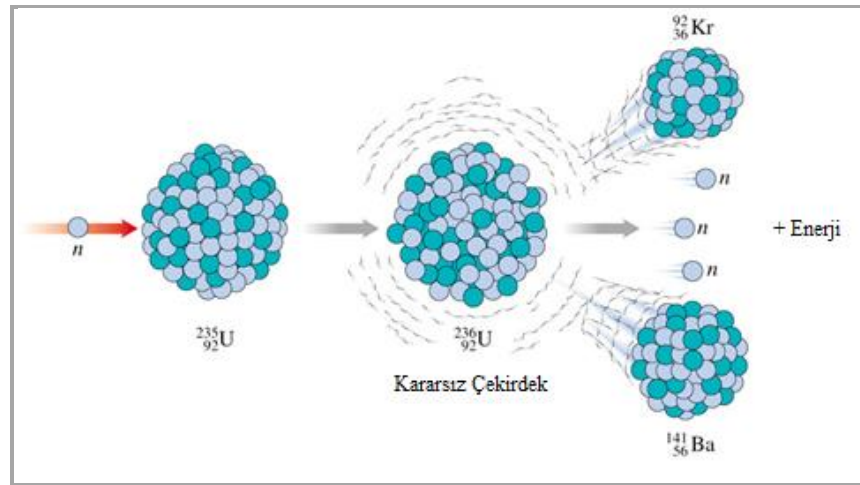
şeklinde bir reaksiyon denklemi yazılır.

### 2.2.3.d. Yüklü parçacıkların yayınlanması

Hızlı nötronların madde ile yaptıkları (n, p), (n, d), (n,  $\alpha$ ), (n, t) şeklindeki reaksiyonları sonucunda çekirdek tarafından yakalanır. Nötron yakalayan çekirdek uyarılmış (enerji fazlalığı) haldedir ve bu enerjiyi dışarı yüklü parçacık yayınlamaya verir. Bu olayın oluşması için Coulomb çekim enerjisi duvarının aşılması gereklidir. Bu nedenle de hafif çekirdekler ile hızlı nötronlar arasında gerçekleşir.

### 2.2.3.e. Filyon

Termal nötronların, çekirdek ile reaksiyona girmeleri sonucunda meydana gelen durumdur. Reaksiyon sonucunda çekirdek parçalanarak daha hafif iki farklı ürün çekirdek meydana gelir ve büyük miktarda enerji açığa çıkar. Nükleer reaktörlerde genel olarak zincirleme filyon tepkimeleri temeldir.



Şekil 2.13. Filyon olayının şematik gösterimi

### 2.2.3.f. Yüksek enerjili nötronlarla meydana gelen reaksiyonlar

Yüksek enerjili veya rölativistik hızlardaki nötronlar çekirdek içinde tutularak farklı tipte parçacıklar olacak şekilde çoklu bir saçılmaya neden olurlar. Oluşan bu ayrı ayrı etkileşimlerin tesir kesitlerinin toplamı nötronun madde ile etkileşiminin olasılığıdır.

### 2.2.4. Radyasyondan korunma

Radyasyon kaynaklarından korunmak için üç temel unsura dikkat etmek gerekir. Bunlar zaman, mesafe ve zırlama kuralıdır.

#### 2.2.4.a. Zaman kuralı

Radyasyon kaynaklarıyla süre gelen işlemlerde maruz kalınan doz miktarı; doz hızı ile zamanın çarpımının sonucudur. Şöyle ki zaman ne kadar çok artarsa alınan dozda o kadar artar. Bu durumda radyasyon alanında ne kadar kısa süre kalınırsa o kadar düşük dozda radyasyona maruz kalınır. Radyoaktif kaynağın veya cihazın yanında yapılacak işlem ne kadar kısa sürede tamamlanırsa, alınan doz miktarı da o kadar az olacaktır. Eğer çalışılan malzemenin doz hızı önceden bilinirse bu bölümde çalışacak personelin ne kadar süre ile çalışmasına izin verileceği belirlenir (Demir 2009).

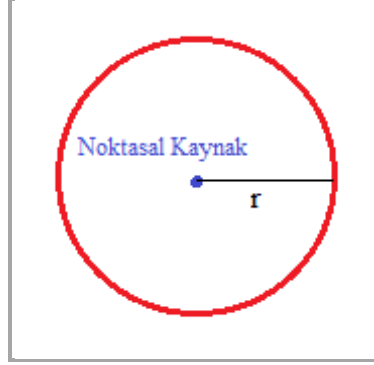
#### 2.2.4.b. Mesafe kuralı

Radyasyon yayan bir kaynağın şiddeti kaynaktan olan uzaklık arttıkça azalır. Belirli bir oranda (n tane) ışın yapan bir kaynak r yarıçaplı bir kürenin merkezinde iken; kürenin yüzeyindeki akı kaynaktan olan uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. Bu durum ters kare kanunu olarak bilinen aşağıdaki denklem ile verilir:

$$F = \frac{n}{4\pi r^2} \text{ foton. cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



Bu kanun kaynağın ölçülerinin, kaynakla söz konusu nokta arasındaki uzaklık ile karşılaştırıldığında ihmal edilecek kadar küçük olması yani kaynağın noktasal kaynak olması halinde geçerlidir.



**Şekil 2.14.** Noktasal bir kaynağın etki alanı

Eğer belirli bir mesafedeki doz hızı değeri biliniyorsa, başka bir uzaklık için doz hızı değeri uzaklıkların kareleriyle ters orantılı olarak hesaplanır.

$D_1$ , kaynaktan  $d_1$  uzaklıktaki doz hızı ve  $D_2$ , kaynaktan  $d_2$  uzaklıktaki doz hızı olmak üzere,

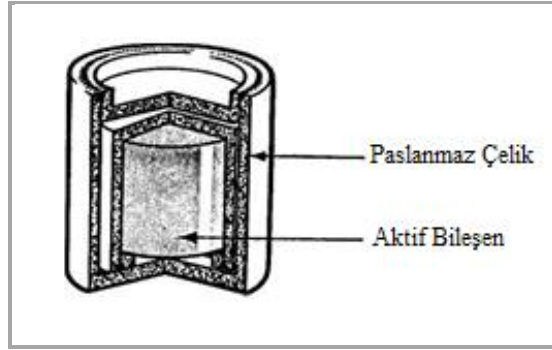
$$D_1 \cdot d_1 = D_2 \cdot d_2$$

bağıntısı da yazılabilir. Girici radyasyon yayan noktasal bir kaynak varsa, radyasyon kaynağının şiddeti mesafeye bağlı olarak azalma gösterir ve mesafenin karesiyle ters orantılıdır (Demir 2009).

#### **2.2.4.c. Zırlama kuralı**

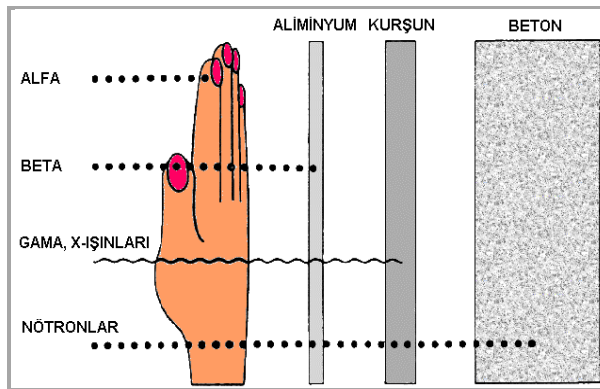
Radyasyon yayan kaynağın sebep olduğu dozdan etkilenilmemesi için kaynağın kurşun, tuğla, beton, duvar gibi malzemelerle kaplanmasına zırlama denilmektedir. Zırlamanın yapıldığı radyasyon dozunu azaltan malzemeye de zırlama malzemesi

denir. Zırhlama malzemelerinin yoğunluğu ne kadar fazla ise radyasyon tutuculuğu da o kadar iyidir. Zırhlama, kaynağın ve kaynağın bulunduğu ortamın zırhlanması olarak iki farklı şekilde yapılır. Kaynağın zırhlanması kaynağın etrafında kolimatörler kullanılarak ve dış koruyucu tabakaların çevrenmesiyle yapılır.



**Şekil 2.15.** Berilyum (alfa-nötron) kaynaklar için tipik bir kaplama

Zırhlama hesaplamaları malzemelerin yarı tabaka kalınlıklarının radyasyonlara karşı gösterdikleri direncin ölçülmesiyle elde edilen değerler kullanılarak yapılır. Farklı radyasyonlar için kullanılan zırhlama maddeleri ve zırhlama işlemleri birbirinden farklıdır (Demir 2009). Bazı radyasyonlar için iyi zırh malzemeleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



**Şekil 2.16.** Değişik radyasyonlar için zırh malzemeleri

### 2.2.5. Nötronların yavaşlatılması ve soğurulması

Nötronlar içlerinden geçtikleri maddeler ile meydana getirdikleri nükleer reaksiyonlar sonucu yavaşlarlar ve enerji kaybederek kimi zaman tamamen soğurulurlar. Hızlı nötronlar  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  ya da  $(n, 2n)$  tipindeki reaksiyonlar meydana getirebilirler ve bunun sonucu olarak yavaşlarlar. Aynı şekilde termal ve yavaş nötronlar, nötronların madde ile etkileşmesi sonucunda yakalanma sonucunda soğurulabilirler. Elastik ve inelastik saçılma sonucunda da soğurulma mümkündür.

$dx$  kalınlığında ve birim hacimde  $n$  tane atomu bulunan bir madde içinden geçen  $\sigma_t$  tesir kesitine sahip nötronlar,  $ndx$  sayıda atomla etkileşirler ve şiddetlerinde aşağıdaki denklemlere bağlı olarak azalma olur:

$$dI = - I \sigma_t n dx$$

$$I = I_0 e^{-\sigma_t n x}$$

Bu bağıntı tek enerjili nötron şuaları için geçerlidir. Farklı enerjilere sahip nötronlar için tesir kesitleri farklı olacağından, enerjileri bilinen nötronların şiddetlerindeki değişimler hakkında bilgi edinilebilir.

Elastik saçılma sonucunda momentum ve enerjinin korunumu kanunu kapsamında, ilk enerjisi  $E$ , etkileşme hızı  $v$  olan bir nötronun başlangıç kütlesi durgun ve  $A$  olan bir hedef çekirdek ile çarpışarak  $\theta$  açısıyla saçılması durumunda, son enerjisinin ( $E'$ ) ilk enerjisine oranı

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

şeklinde olur. Eşitliğe bağlı olarak saçılmanın olmadığı durumda ( $\theta=0$  olduğunda),  $E' = E$  olur ve yukarıdaki oran 1'e eşit olur. Yani etkileşme olmadığından enerjide bir azalma olmaz. Etkileşmenin olması durumunda gelen nötron farklı bir açıyla saçılır ve

bu açıya bağlı olarak  $E'/E$  oranı  $0 < E'/E \leq 1$  olacak şekilde bir değer alacaktır. Bu oran en küçük değerine  $\theta=180^\circ$  olduğunda sahip olur ve yukarıdaki denklem aşağıdaki şeklini alır:

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

Çok iyi bir nötron zırhlayıcı olan Hidrojen için  $A=1$ ' dir. Bu durumda nötron bütün enerjisini protona aktarır.

Enerjisi 10 MeV' den düşük nötronlarda saçılmalar doğrusal değildir. Bu enerji seviyesinde her nötron birkaç defa saçılacak ve ortamda enerjileri farklı birçok nötron bulunacaktır. Böylece nötron şuları tek enerjili olmaktan çıkacaktır. Bu durumda her bir nötronun enerji kaybedişi her saçılma için ardı ardına hesaplanmalıdır. Her saçılma sonrasındaki  $E'/E$  değerinin ortalama değeri  $\xi$  olmak üzere, bu değer aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$\xi = \left( \log \frac{E'}{E} \right) = \frac{\int \log \left( \frac{(A+1)^2}{A^2 + 2A \cos \theta + 1} \right) d\Omega}{\int d\Omega}$$

Burada  $d\Omega$ , kütle merkezi sistemindeki katı açı elemanıdır. Saçılmanın izotropik olduğu kabul edilerek integrali alındığında ve her çarpışmadan sonra  $\log E'$  nin değeri bir  $\xi$  kadar azalır ve  $n$  çarpışma sonraki ortalama değeri,  $\log E_n' = \log E - n \xi$  denklemi ile bulunabilir. MeV mertebesinde enerjiye sahip nötronlar yüksek hızlarda olduğundan, bu hesaplamalar yapılırken hedef çekirdek atomları (düşük hızlarda hareket ettiklerinden ve nötron hızıyla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir olduğundan) hareketsiz kabul edilebilir. Ancak termal enerjili nötronlarda nötron hızı az olduğundan, çekirdeğin hızı ile karşılaştırıldığında ihmal edilemez seviyededir. Böyle durumlarda istatistik mekanik ile hesaplama yapılır.

## 2.3. Element ve Minerallerin Özellikleri

### 2.3.1. Elementler

Elementleri tanımlamadan ve özelliklerinden bahsetmeden önce bazı ön bilgiler vermek gerekir.

**Atom:** Çekirdek etrafında belirli kurallara göre dizilmiş elektron bulutu içerisine gömülmüş çekirdekte proton ve nötronların yer aldığı, maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini taşıyan en küçük yapı birimidir.

**Kütle Numarası (A):** Atomun çekirdeği içinde yer alan proton ve nötronların sayılarının toplamıdır. Atomun kütleini belirler.

**Atom Numarası (Z):** Atomdaki proton sayısını veya nötr bir atomdaki elektron sayısını belirtir. Nötr bir atomda elektron ve proton sayısı birbirine eşit olduğundan, bu sayısı aynı zamanda atomun elektriksel yükünü de verir.

**Atom Ağırlığı:** Bir araya gelmiş avogadro sayısı ( $6,02 \times 10^{23}$ ) kadar atomun gram cinsinden ağırlığıdır.

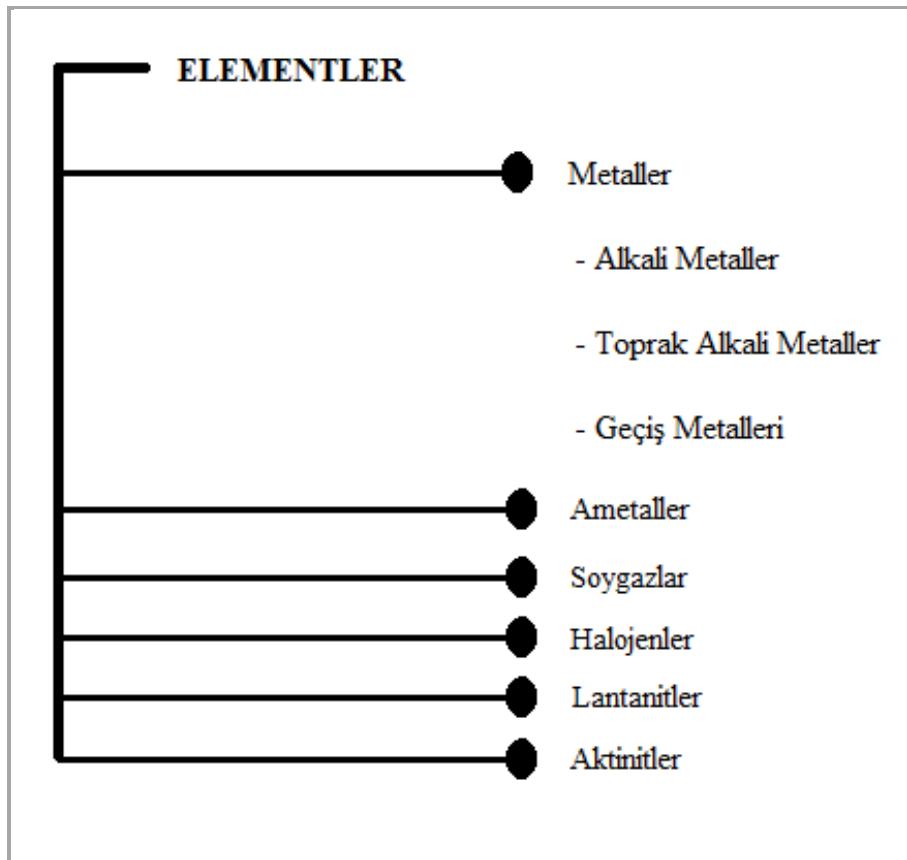
**Molekül Ağırlığı:** Avogadro sayısı kadar molekülün gram cinsinden ağırlığıdır. Birimi mol' dür.

**İzotop Atomlar:** Proton sayıları eşit ancak nötron sayıları olarak farklı atomlara birbirinin izotopu denir (Kurt ve Arık 2003).

**Element:** Basitçe tanımlanırsa, element; aynı cins atomların birleşmesiyle oluşan ve kimyasal yollarla kendinden daha basit ve farklı maddelere ayrılamayan saf maddelerdir. Bir element için farklılıklar moleküler yapıdan, kristal şeklinden veya her

ikisinden kaynaklanabilir. Elementlerin kristal durumlarındaki atomik yapıları oldukça basittir. Elementlerin kristal yapılarında sık rastlanan dizilimler kübik sıkı paket, hekzagonal sıkı paket ve hacim merkezli kübik dizilimlerdir. Bunların dışında azda olsa hekzagonal, trigonal gibi diğer kristal dizilimlerde görülür (Altınata 2001; Kurt ve Arık 2003) Kendi aralarında aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar.

**Çizelge 2.5.** Periyodik Tabloda Elementlerin Sınıflandırılması



Yeryüzünde bilinen elementlerin sınıflandırılması ve bu sınıflandırmaya göre yerleştirildiği sisteme periyodik sistem denir. Elementlerin, soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru artış gösteren atom numaralarına göre diziliminden oluşan bu sistemde, yatay sıralara "**periyot**", dikey sütunlaraysa "**grup**" adı verilir. Yedi adet periyot, sekiz adet baş grup (A) ve sekiz adet yan grup (B) olmak üzere onaltı tane grup vardır.

	1A	2A	3B	4B	5B	6B	7B	8B	8B	8B	1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	8A	
1. periyot	1 H																		2 He
2. periyot	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3. periyot	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4. periyot	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5. periyot	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6. periyot	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7. periyot	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq					
			Lantanitler	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
			Aktinitler	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Şekil 2.17. Periyodik tablo

### 2.3.1.a. Metaller

**Alkali Metaller:** Periyodik tablonun ilk grubunda (dikey sırasında) yani 1A grubunda yer alırlar. Fransiyum haricinde geri kalanları, yumuşak yapıya sahip ve parlaktırlar. Erime noktaları düşüktür. Kolaylıkla eriyebilir ve uçucu hale gelebilirler. Erime ve kaynama noktaları, bağlı atom kütleleri arttıkça düşüş gösterir. Diğer metallerle kıyaslandığında, özkütleleri oldukça düşüktür. Bu grup metaller tepkimelerde etkindirler. En yüksek temel enerji düzeylerinde bir tek elektron vardır. Bu elektronu çok kolay kaybederek +1 yüklü iyonlar oluşturabilirler. Bu nedenle, kuvvetli indirgendirler. Isı ve elektriği çok iyi iletirler. Suyla kolayca etkileşebilirler ve tepkime sonucunda hidrojen gazı açığa çıkarırlar.

**Toprak Alkali Metaller:** Periyodik tabloda 2A grubunda yer alan elementlerdir. Renkleri genellikle beyazdır. Yapısal olarak yumuşak ve işlenebilir özelliktedirler. Alkali metallere göre tepkimeye girme özellikleri daha azdır ve aynı zamanda erime ve kaynama sıcaklıkları da daha düşüktür. Ancak iyonlaşma enerjileri alkali metallere göre daha yüksektir. Toprak elementleri ismi, bu gruptaki elementlerin toprakta bulunan

oksitlerinin, eski kimya bilimciler tarafından ayrı birer element olarak düşünülmesinden gelir.

**Geçiş Metalleri:** Periyodik tabloda B grubunda yer alan elementlerdir. Fiziksel olarak sert yapıya sahiptirler. Yoğunlukları yüksektir ve ısıyı iyi iletirler. Yüksek erime-kaynama sıcaklıklarıyla tanınırlar. Sertlikleri nedeniyle, saf halde veya alaşım halinde yapı malzemesi olarak kullanılabilirler. Geçiş elementlerinde, elektron dizilimlerine bakıldığında, en dış kabukta her zaman d orbitalinde elektron bulunur. Tepkimelere giren elektronlar da, d orbitalindeki elektronlardır. Çoğu asit çözeltilerinde hidrojenle yer değiştirecek kadar elektropozitifdir. İyonları renkli olduğundan, analizlerde kolayca ayırt edilirler.

### **2.3.1.b. Ametaller**

Metal özelliği göstermeyen elementlerdir. Metaller çözeltilerde pozitif yüklü iyonlar oluştururken, ametaller negatif yüklü iyon oluştururlar. Metaller gibi iyi iletken değildirler ve metallerin aksine elektronegatiflikleri çok yüksektir. Metaller ve ametaller arasındaki sınırı periyodik tabloda basamaklı ve köşegen bir hat belirler. Ametaller bu hattın sağında, metaller ise solunda kalır. Ancak bu hat çok belirgin değildir. Bu bölgede, hem metal hem ametal özellik gösteren bazı yarıiletken elementler vardır, bunlar "metaloitler" olarak da adlandırılır. Halojenler ve soy gazlar da ametal özelliktedirler.

### **2.3.1.c. Soygazlar**

Periyodik tablonun 8A grubunda yer alan, tek atomlu ve renksiz gaz halinde bulunan elementlerdir. En dış yörüngelerindeki orbitallerinin tamamı elektronlarla dolu olduğu için kararlıdır ve bu nedenle de tepkimeye girme ihtimalleri çok düşüktür. Atmosferde bulunurlar ve sıvı havanın damıtılmasıyla elde edilirler. İlk keşfedilen soygaz, hidrojenden sonra en hafif element olan helyumdur. Erime ve kaynama



noktaları çok düşüktür ve grupta yukarıdan aşağıya inildikçe sıcaklıklar artar. İyonlaşma enerjileri, sıralarında en yüksek olan elementlerdir (www.biltek.tubitak.gov.tr).

#### **2.3.1.d. Halojenler**

Periyodik tablonun 7A grubunda bulunurlar ve bir elektron alarak tepkime gerçekleştirme eğilimli ametallerdir. Bu gruptaki elementlerin hepsi elektronegatif yani elektron alma özelliğine sahiptir. Elektron alma eğilimi en yüksek olan elementlerdir. Doğada mineraller halinde bulunurlar. Element halinde iken 2 atomlu moleküllerden oluşurlar. Oda şartlarında flor ve klor gaz, brom sıvı, iyot katı haldedir. Erime ve kaynama noktaları yukarıdan aşağı doğru artar. Zehirli ve tehlikeli elementlerdir.

#### **2.3.1.e. Aktinitler**

Doğada çok ender bulunabilen bu elementlerin en önemli ortak özelliği, elektron katılımının 5f orbitalinde meydana gelmesidir. Geçiş metallerinin bir alt serisi durumundadırlar.

#### **2.3.1.f. Lantanitler**

Aktinitler gibi geçiş metallerinin bir alt serisini oluştururlar. Toprakta çok az miktarda bulduklarından "nadir toprak elementleri" olarak da isimlendirilirler. En önemli ortak özellikleri, elektron değişimlerinin yalnızca 4f orbitaline elektron eklenerek gerçekleşmesidir. Özellikle +3 değerlikli durumlarında, birbirlerine çok yakın özellikler gösterirler. Kuvvetli elektropozitif olmaları nedeniyle, üretilmeleri zordur. Genelde iyon hallerinin karakteristik renkleri vardır.

### 2.3.2. Mineraller

Yunanca mina (kuyu) kelimesinden gelir ve yerkabuğundan çıkarılan maddeler olarak düşünülmüştür. Yer kabuğuna ait doğal yollarla oluşmuş homojen ve anorganik maddelerdir (Sür ve Yiğitbaşıoğlu 2001). Farklı bir tanımla doğal şekilde oluşan belirli bir kimyasal birleşime sahip inorganik olarak kristalleşmiş katkılardır. Kimyasal birleşimleri olduğundan kimyasal formüllerle belirtilirler. Yer kabuğunda kayaçları oluşturan bileşenlerdir (Uz 2000). Civa dışındaki tüm mineraller katıdır. Ekonomik değere sahip olanlar maden olarak adlandırılırlar. Genel olarak mineraller aşağıdaki özelliklere sahiptirler:

- Doğada oluşurlar.
- Saftırlar.
- Parçası bütününe özelliklerine sahiptir.
- Kimyasal formülleri vardır.
- Katı haldedirler. Ancak çok nadiren sıvı olarak bulunurlar.
- İnorganik yapıdadırlar.

İnsanların mineralleri araştırmaları ve kullanmaları savunma aracı ihtiyaçlarıyla başlamış daha sonra süs eşyaları yapıp ticari amaçla kullanmışlardır.

Bilimsel olarak minerallerle ilgilenilmesi M.Ö. 372 tarihinde Yunanlılarla başlar. Daha sonra Ortaçağda Türkler ve Araplar yerkabuğuna ait taşların fiziksel özellikleri üzerinde durmuşlardır. İbni Sina taşlar, madenler ve tuzlar olarak ayırmıştır. 18. Yüzyılda araştırmacı Werner taşlarla fosillerin ayrı maddeler olduklarını belirtmiş ve mineral sistematigi yapmıştır.

1895' te Röntgen' in X-ışınlarını bulmasıyla, 1912 tarihinde Love x-ışınları yardımıyla kristallerin içyapılarını incelemeye başlamıştır. Bunun sonucunda ise, minerallerin şekillerini, içyapılarını, fiziksel ve kimyasal özelliklerini, oluşumlarını, kullanım

alanları ve coğrafi dağılımlarını inceleyen bilim olarak mineroloji ortaya çıkmıştır. Mineroloji genel ve özel mineroloji olarak iki ayrı alanda inceleme yapar.

Genel Mineroloji; oksitler, karbonatlar, silikatlar... vs. adı altında alt tipleri toplar. Minerallerin fiziksel, kimyasal ve geometrik özellikleriyle içyapıları, oluşum şekilleri ve değişimlerini inceler.

Özel mineroloji; minerallerin gruplandırılmaları, her mineralin ayrı ayrı fiziksel, kimyasal, geometrik özelliklerini, doğadaki yayılımlarını, kullanımlarını; sertlik, parlaklık gibi özelliklerini mineralleri tek tek ele alarak inceler.

Sonuç olarak ise mineraller; Amorf haldeki ve Kristal haldeki olarak iki kısımda incelenir (Sür ve Yiğitbaşoğlu 2001).

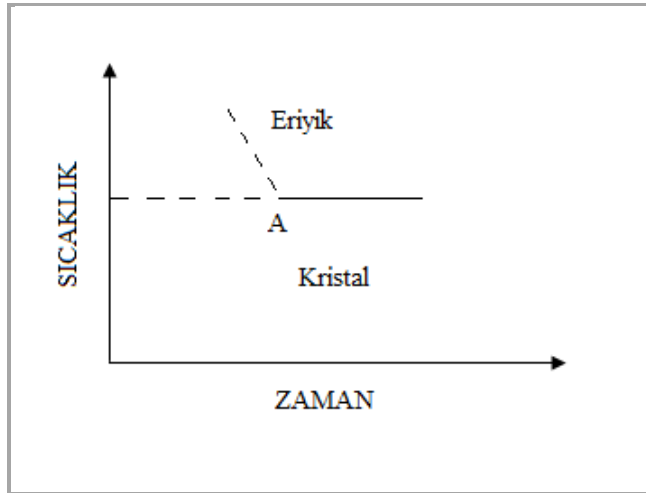
Amorf yapılarda, atom veya moleküllerin gelişigüzel olarak bir araya gelmesi sonucunda oluşan yapılardır. Maddenin katı, sıvı ve gaz olarak üç hali için, gaz ve sıvılarda maddeyi oluşturan unsurlar (atom, iyon, molekül) serbest ve düzensizdirler.

Kristaller yapılarda, atom veya moleküller belirli bir düzen içinde birleşirler (Uz 2000).

Kristalleşme, maddenin herhangi bir durumdan kristal durumuna geçmesidir. Maddenin dış görünüşünden ziyade madde içindeki atom, iyon veya moleküllerin diziliş şekilleri ve düzenleriyle alakalıdır. Esasen basınç (P), sıcaklık (T), kimyasal birleşim parametrelerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Sıvı haldeki maddelerin atomları düzensiz halde hareket ederler ve hareketleri sınırlandırılmıştır. Atomlar katılarda olduğu gibi birbirlerine çok yakındır. Sıvı soğumaya başlayınca atomların hareketi yavaşlar ve sonuç olarak yeterli zaman sonra kristal veya amorf katılar oluşurlar. Eğer madde yavaş soğursa atomların dizilimi düzenli olur ve kristal hal alır. Hızlı soğursa atomlar düzensiz halde dizilim gösterirler ve amorf yapı oluştururlar (Uz 2000). Kristalleşme farklı durumlarda meydana gelebilir.

- Çözeltilerin soğutulması veya çözeltideki konsantrasyonun artırılması ile oluşabilir.
- Buharın kondenzasyonu (aniden soğuyup sıvı hale geçmesi) oluşabilir.
- Sıvı haldeki bir maddenin katılaşmasıyla kristalleşme olabilir. Her madde sıcaklığın azalmasıyla kristal hale dönüşebilir. Bu tür bir durumda sıcaklık düşüşünün yeterli derecede yavaş olması gerekir aksi durumda oluşan madde amorf olarak katılaşır.
- Bazen katı maddelerden de basınç ve/veya sıcaklık değişimiyle farklı bir kristal oluşabilir.

Saf bir madde kristal oluştururken kristalleşme belli bir sıcaklıkta başlar ve bu sıcaklık kristalleşme bitinceye kadar sabit kalır. Kristalleşme oluşumundaki saf bir madde için zaman-sıcaklık grafiği aşağıdaki gibi olur.



**Şekil 2.18.** Saf maddenin kristalleşmesi

Saf bir madde kristalleşmeye bırakıldığında A noktasında kristalleşme başlıyorsa, bu madde tamamen kristal oluncaya kadar sıcaklık sabit değerde kalır. Örneğin suyun buza dönüşmesi sabit sıcaklıkta gerçekleşir. Maddelerin (minerallerin, elementlerin ... vs.) optik ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra tayinlerinin yapılmasında en önemli özelliklerinden biri atomsal yapısı ve kimyasal dizilimleridir (Kurt ve Arık 2003). Bu dizilimler atomlar arası mesafe ve açı gibi özelliklere bağlı olarak çeşitli kristal yapıları meydana getirir.

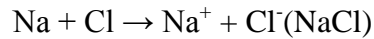
## 2.4. Atomların Bağlanma Şekilleri

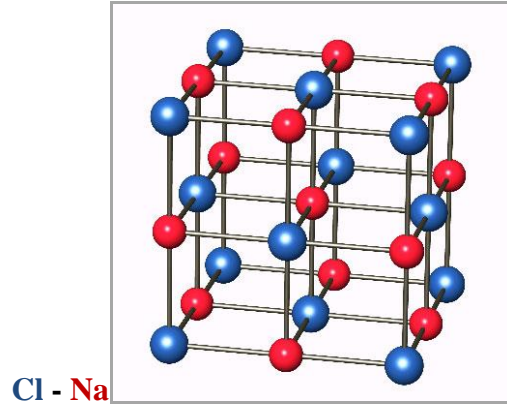
Atomlar basit bir şekilde düşünülduğünde küre gibi davranırlar ve yarıçapları 1 Å civarındadır. Bu değer elementten elemente değıştiği gibi iyonlaşma derecesine ve atomun diğer atomlarla bağlanma şekline görede değışiklik gösterir. Atomların birbiriyle bağlanma şekilleri aşağıdaki şekillerde oluşur.

- İyonik Bağ
- Kovalent Bağ
- Metalik Bağ
- Van der Waals Bağ

### 2.4.1. İyonik bağlar

Zıt yüklü iyonlar arasında gerçekleşen bağlardır. Elektronların bir metal atomdan ametale atoma aktarılmasıyla gerçekleşir. Bir araya gelen atomlardan biri elektron kaybederken diğerinin elektron sayısı artar. Elektronu fazla olan atoma anyon, az olana ise katyon denir. Negatif anyonlar ve pozitif yüklenmiş katyonlar elektrostatik çekim kuvveti ile bir kristal içinde bir arada tutulur. Örneğin bir sodyum ve klor atomu arasındaki etkileşme için, 1A grubunda bulunan ve 1 değerlik elektronu (bağ yapmak için verebileceği elektron sayısı) bulunan sodyum, 7A grubu elementi ve 7 değerlik elektronu olan klora bir elektron vererek pozitif yüklenirken klor ise bu elektronu alarak negatif yüklenmiş olur. Oluşan elektrostatik çekim kuvvetiyle bir kristal oluşturmuş olurlar. Bu tepkimenin denklemi aşağıdaki gibi olur.

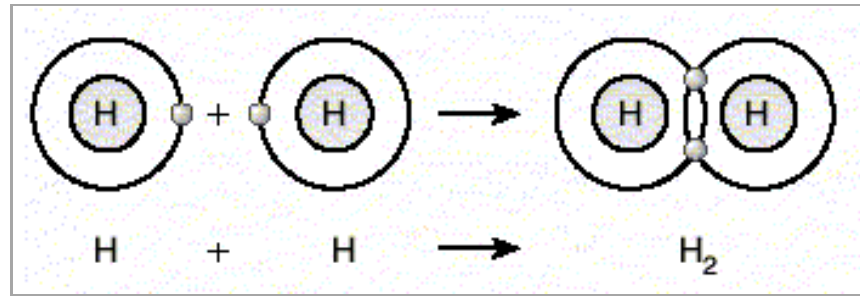




Şekil 2.19. NaCl' nin kristal örgüsü

### 2.4.2. Kovalent bağlar

Elektronların bir atomdan diğerine aktarılmadan, iki atom tarafından ters spinli bir elektron çiftinin ortak olarak kullanıldığı durumlardaki bağlanma şeklidir. Ametal atomlar etkileştiklerinde kovalent bağlarla oluşan moleküller meydana gelir. İki hidrojen atomunun birer elektronu ortaklaşa kullanarak kovalent bağ ile bir araya gelmesi bunun bir örneğidir.



Şekil 2.20. Hidrojen atomlarının kovalent bağ ile hidrojen molekülü oluşturması

### 2.4.3. Metalik bağ

Metal ve alaşımlarda meydana gelen bağlanma şeklidir. Metal atomları üç boyutlu bir yapıda düzenlenirler ve bu atomların en dış kabuğundaki elektronlar yapının her

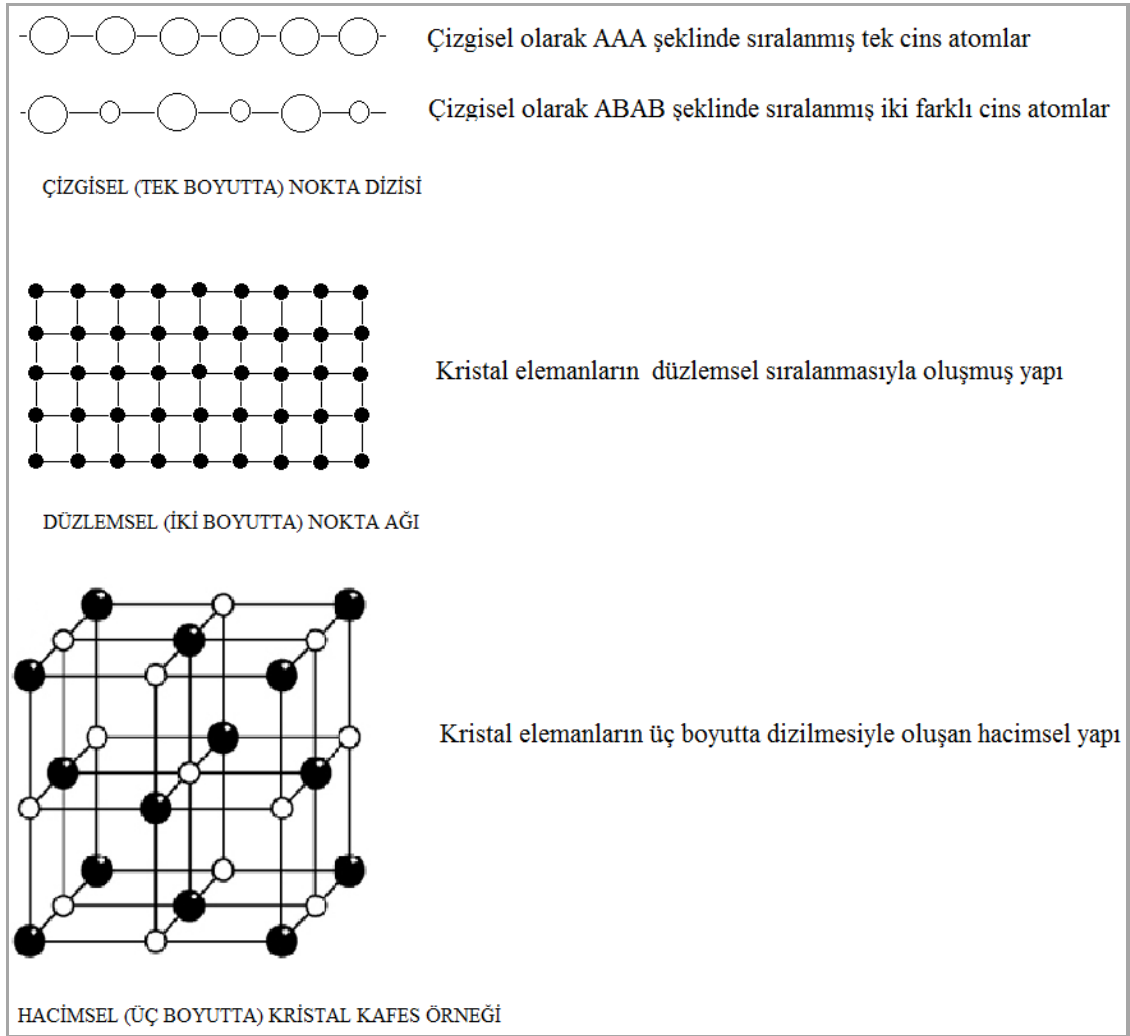
bölgesinde serbest olarak dolaşarak yapının bağlanmasını sağlarlar. Metaller dış elektronlarını rahatlıkla kaybedebilen elementlerdir. Dolayısıyla kristal yapıları pozitif yüklü atom paketi halindedir. Dış kabukları terk eden elektronlar ise atomlar arasında serbestçe dolaşırlar. Bu hareketlilik metallere iyi elektrik ve ısı iletkenliği özelliği verir.

#### **2.4.4. Van der Waals bağ**

Bu tür bağlanmalarda atomlar arası çekim kuvveti oldukça düşüktür. Organik maddelerde meydana gelir. Bu bağa sahip kristallere örnek olarak kükürt ve buz verilebilir (Altınata 2001; Kurt ve Arık 2003).

#### **2.5. Kristal Yapılar**

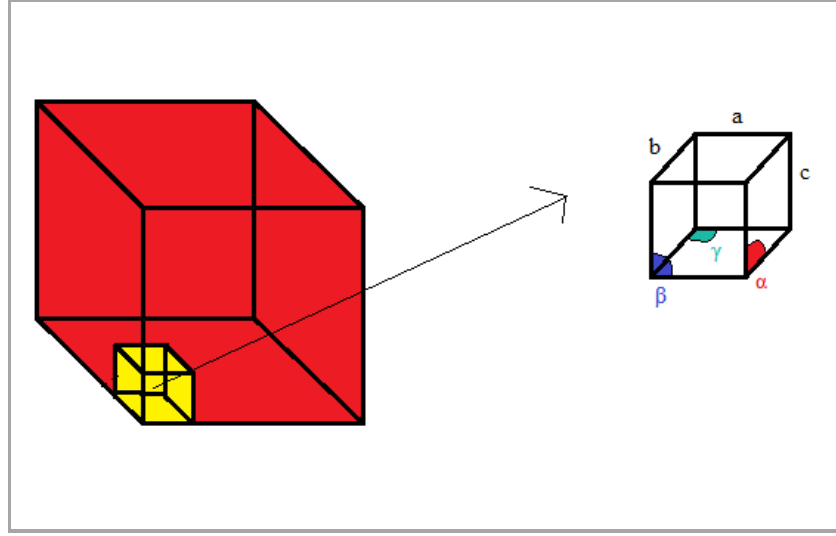
Bir birleriyle bağ yapmak üzere, atom veya iyonların üç boyutlu uzayda düzgün ve periyodik bir dizilim ile bir araya gelmesiyle oluşan yapılardır. Kristallerin düzgün yüzeylerle çevrilmiş geometrik şekilleri ve periyodik olarak sıralanmış atomik yapıları vardır. Kristallerin en önemli özellikleri düzenli bir iç yapıya sahip olmalarıdır. Bu yapı kristali oluşturan kimyasal elementlerin tek tek veya grup olarak atomlarının muntazam bir düzen içinde çizgisel (Tek Boyut), düzlemsel (İki Boyut) veya hacimsel (Üç Boyut) olarak dizilimleriyle oluşur. Kristal yapıyı oluşturan atom veya iyonların topluluklarına nokta denir. Bu noktaların tek boyutta sıralanmasına nokta dizisi, iki boyutlu sıralanmasına nokta ağı, üç boyutlu sıralanmasına ise kafes veya lattice denir.



**Şekil 2.21.** Kristal elemanlarının tek, iki ve üç boyutta oluşturdukları kristal örgü örnekleri

HAÜY adlı bilim adamı; kristallerin, küçük paralel yüzlü ünitelerin düzgün bir şekilde tekrarlanmasıyla oluştuğunu söylemiştir. Ancak bu küçük paralel yüzlü üniteler günümüzde kristal kafesleri olarak adlandırılır (Uz 2000). Kristal kafesler; üç boyutlu düzlemlerde, x,y,z koordinatlarının her biri yönünde birim hücrelerin tekrarlanmasıyla oluşur. Bir kristalin özelliklerini taşıyan en küçük yapı birim hücre olarak adlandırılır.





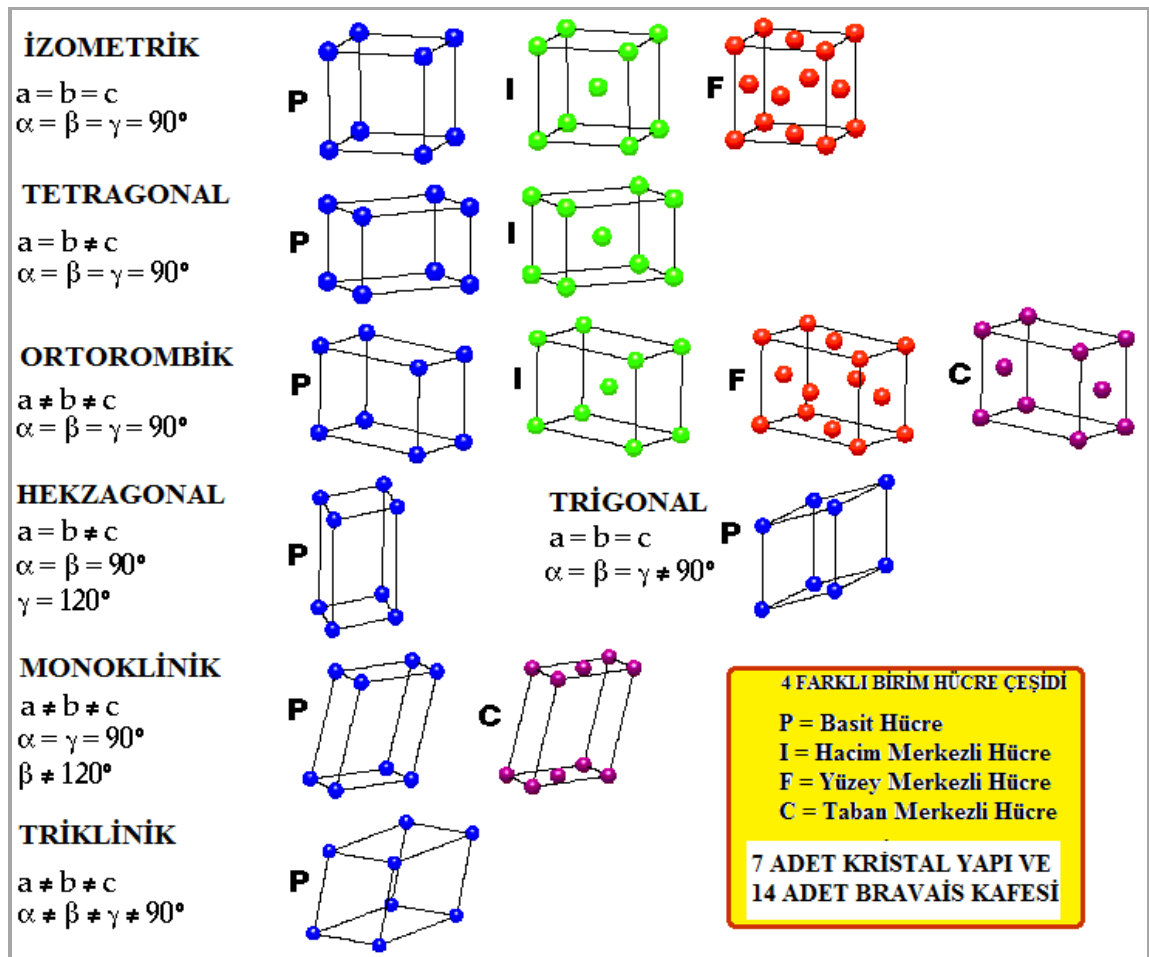
**Şekil 2.22.** Üç boyutlu kafes yapıda birim hücrenin gösterimi

Üç doğrultuda;  $a, b, c$  uzunlukları ve doğrultular arasındaki  $\alpha, \gamma, \beta$  açıları birim hücreyi tanımlar.  $a, b$  ve  $c$  birim hücrenin kenarları;  $b \wedge c = \alpha$ ,  $a \wedge c = \beta$  ve  $a \wedge b = \gamma$  açıları olarak gösterilir (Kurt ve Arık 2003). Bu değerlerin değişimine bağlı olarak birim hücre ve kristal kafes değişiklik gösterir. Farklı değerlere bağlı olarak temel yedi adet kristal yapısı mevcuttur. Bu yapılar aşağıdaki gibidir.

- Monoklinik Yapı
- İzometrik Yapı
- Triklinik Yapı
- Trigonal Yapı
- Tetragonal Yapı
- Ortorombik Yapı
- Hekzagonal Yapı

Bir birim hücrede, atomlar yalnızca köşelerde yer alıyorsa basit (primitive) birim hücre; köşelerle beraber, hücrenin merkezinde de yer alan bir atom var ise bu hücreye hacim merkezli (body centered) birim hücre denir. Eğer birim hücrenin köşelerine ek olarak yüzeylerinde de bir atom varsa bu durumda birim hücre yüzey merkezli (face centered) birim hücre olarak isimlendirilir. Bunlara benzer olarak köşelere ilaveten karşılıklı iki

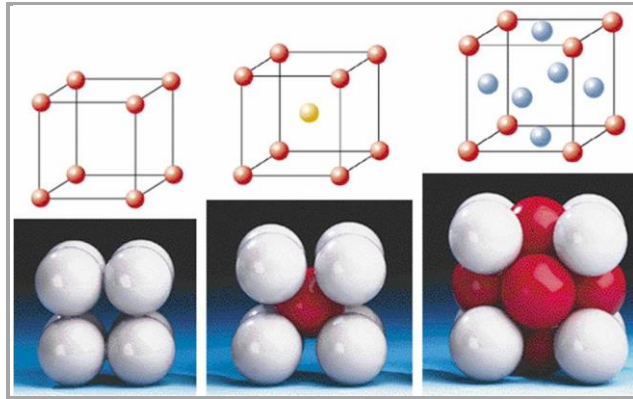
yüzeyde atomlar varsa birim hücre taban merkezli (side centered) birim hücre olarak nitelendirilir (Uz 2000). Yedi ayrı kristal yapı için; 7 adet basit (hepsinde), 3 adet hacim merkezli (Kübik, Tetragonal, Ortorombik), 2 adet yüzey merkezli (Kübik, Ortorombik) ve 2 adet taban merkezli (Ortorombik, Monoklinik) birim hücre olmak üzere 14 adet kristal kafes vardır. Bunlar ilk olarak Bravais tarafından 1850 yılında keşfedilmiştir ve Bravais Kafesleri adı verilmiştir (Kurt ve Arık 2003). 7 farklı kristal yapınının, 14 adet Bravais Kafesleri Şekil 2.22’de verilmiştir.



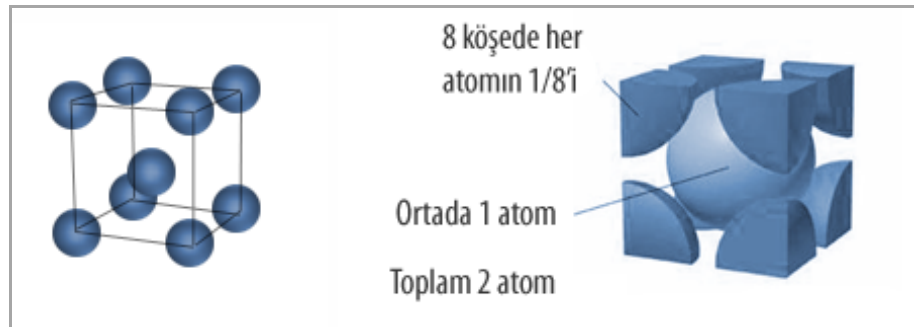
Şekil 2.23. 7 Farklı kristal yapısı için 14 adet bravais kafesleri

Birim hücrenin içinde bulundurduğu atom miktarına o hücrenin doluluk oranı denir. Kristaller birim hücrelerin üç boyutlu olarak tekrarlanmasıyla oluşurlar. Bunun sonucu olarak birim hücrenin köşelerinde ve yüzeylerinde bulunan atomlar, bitişik diğer birim

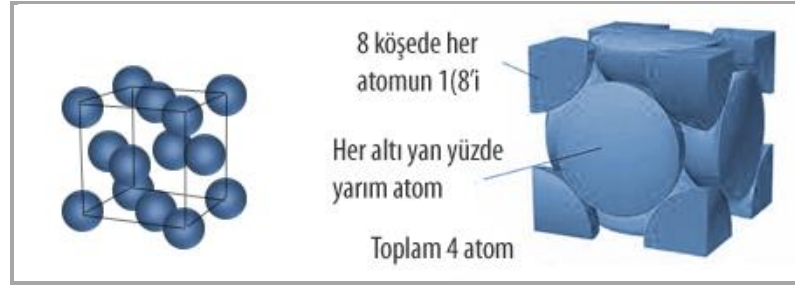
hücre tarafından ortak olarak kullanılırlar. Dolayısıyla birim hücrenin ihtiva ettiği atom sayısını yani doluluk oranını hesaplarken basit birim hücre için köşelerdeki atomlar diğer 8 adet birim hücre ile ortak kullanıldığından her bir birim hücresi köşedeki bir atomun yalnızca  $1/8$ ' ini ihtiva eder ve 8 ayrı köşede ( $1/8 \times 8 = 1$ ) toplam 1 atom mevcut olur. Aynı şekilde yüzey merkezli birim hücrelerde yüzeylerde bulunan atomlarda iki birim hücresi ile ortak kullanılır ve her bir hücre bir atomun  $1/2$ ' sini ihtiva ederek 6 farklı yüzey için ( $1/2 \times 6 = 3$ ) toplam 3 atom, köşelerde de 1 atom olacak şekilde toplam 4 atom bulunur. Eğer hacim merkezli ise köşelerden ayrı merkezinde de bir atom bulunur ve bu hücre bu atomun tamamını kapsar. Bu durumda köşelerde 1 atom ve merkezde de 1 atom bulundurur ve toplam 2 atom ihtiva eder (Altınata 2001). Atomların birim hücre tarafından kullanılması aşağıdaki şekilde verilmiştir.



**Şekil 2.24.a.** Birim hücrenin; sırasıyla basit, hacim merkezli ve yüzey merkezli yapısının gösterimi



**Şekil 2.24.b.** Hacim merkezli birim hücrenin doluluk oranı

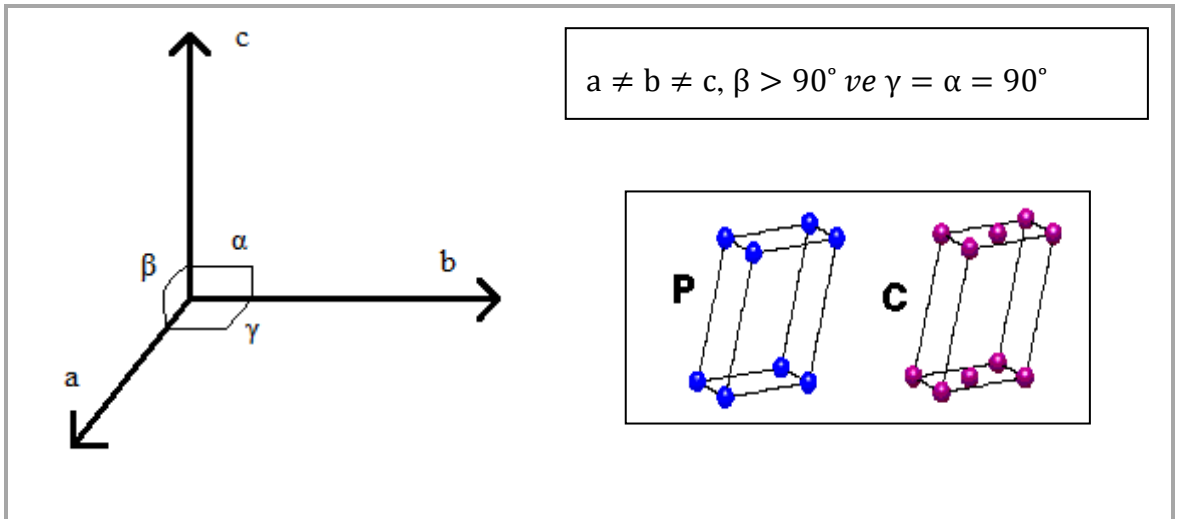


Şekil 2.24.c. Yüzey merkezli birim hücrenin doluluk oranı

## 2.5.1. Kristal yapı çeşitleri

### 2.5.1.a. Monoklinik yapılar

Birim hücresi paralel kenar tabanlı eğik dikdörtgen prizma şeklindedir. Prizmanın kenarlarının (a, b, c) üçüde farklı boyutlardadır ve c eksenini yataya eğik konumdadır. Bu tür yapılara sahip minerallere mika, ojit, jips... vs. örnek verilebilir (Sür 2001). Element olarak ise bizmut, oksijen, selenyum, flor ve plutonyum örnek verilebilir.



Şekil 2.25. Monoklinik yapılarda birim hücre özellikleri

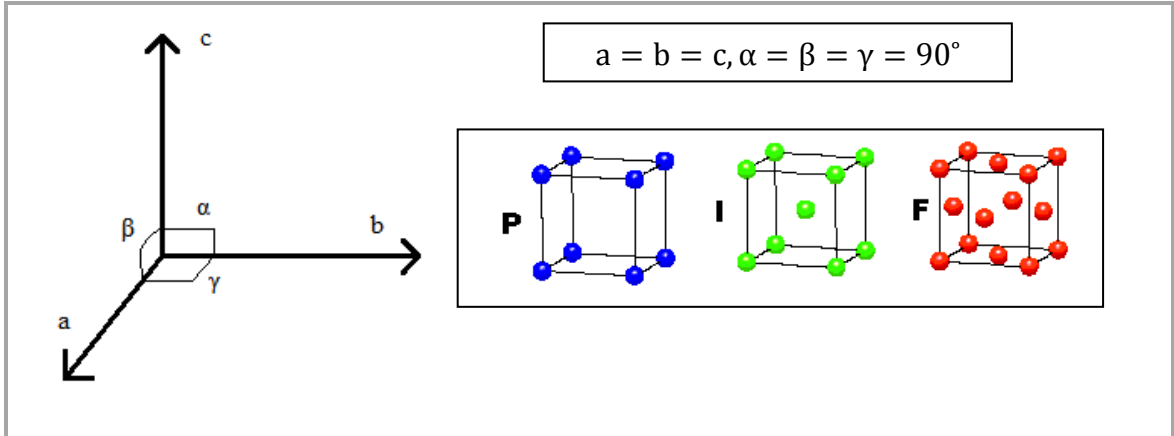
Monoklinik kristal sistemine ait iki farklı bravais kafesi vardır. Bunlar basit kafes ve taban merkezli kafeslerdir. Dolayısıyla monoklinik sisteme sahip element veya

minerallerde doluluk oranı köşe noktalarındaki 8 atom için ( $1/8 \times 8$ ) ve tabanlardaki 2 atom için ( $1/2 \times 2$ ) olacak şekilde maksimum taban merkezli birim hücrelerde toplam 2 atom olarak belirlenebilir. Basit birim hücre yapısında ise yalnızca 1 atom bulundurulur. Bir monoklinik kristal yapıdaki birim hücrenin hacmi açıl değerler ve uzunluklar göz önünde bulundurularak paralelkenar olarak ele alınırsa aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V = a \cdot b \cdot c \cdot \sin\beta$$

### 2.5.1.b. İzometrik yapılar

Birim hücre küp şeklindedir. Bütün eksenler birbirine dik ve boyutları eşittir (Kurt ve Arık 2003). Manyetit, pirit, elmas gibi mineraller örnek verilebilir (Sür 2001). Örnek elementler ise potasyum, demir, nikel, bakır, gümüş... vs. verilebilir.



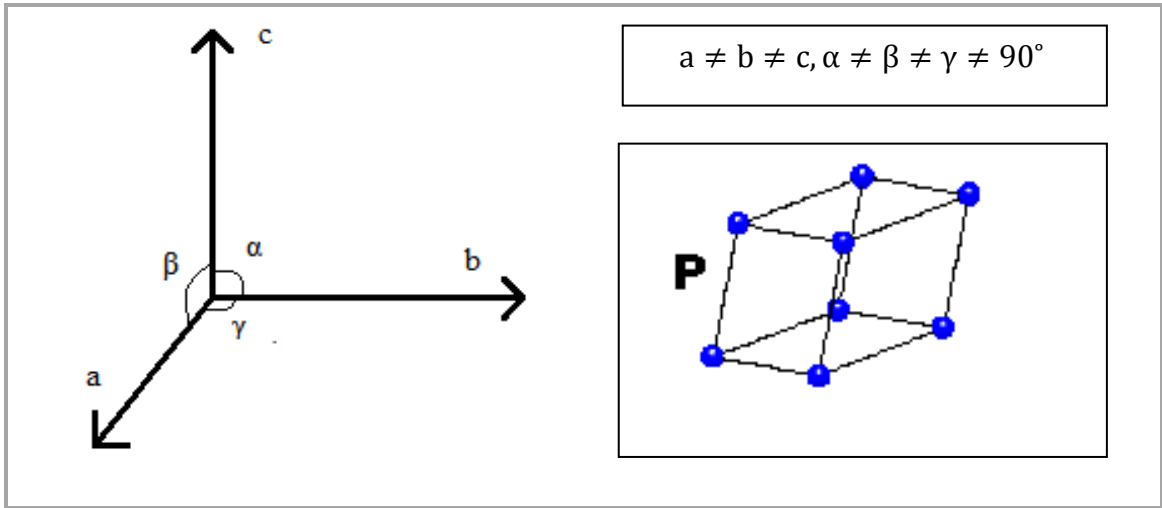
**Şekil 2.26.** İzometrik yapılarda birim hücre özellikleri

İzometrik (kübik) kristal yapılara ait basit, hacim merkezli ve yüzey merkezli olmak üzere üç farklı bravais kafesi mevcuttur. Basit kafes için ihtiva edilen atom sayısı 1 atom, hacim merkezli kafes için 2 ve yüzey merkezli kafes için 4 atom olarak hesaplanır. İzometrik yapılarda hücre eksenleri arasındaki açılar  $90^\circ$  olduğundan hacim

$$V = a \cdot b \cdot c \text{ ve } a = b = c \text{ olduğundan } V = a^3 \text{ olarak verilir.}$$

### 2.5.1.c. Triklinik yapılar

Triklinik yapılarda birim hücre paralel kenar tabanlı eğik prizma şeklindedir. Tüm eksenler farklı uzunluklara sahip ve aralarındaki açılar  $90^\circ$ 'den ve birbirlerinden farklıdır. Bu tür yapıya sahip minerallere rodonit, dioplas, ditsen, kaolin, plajiolklas örnek verilebilir (Sür 2001). Aynı zamanda fosfor da triklinik yapıya sahip tek elementtir.



**Şekil 2.27.** Triklinik yapılarda birim hücre özellikleri

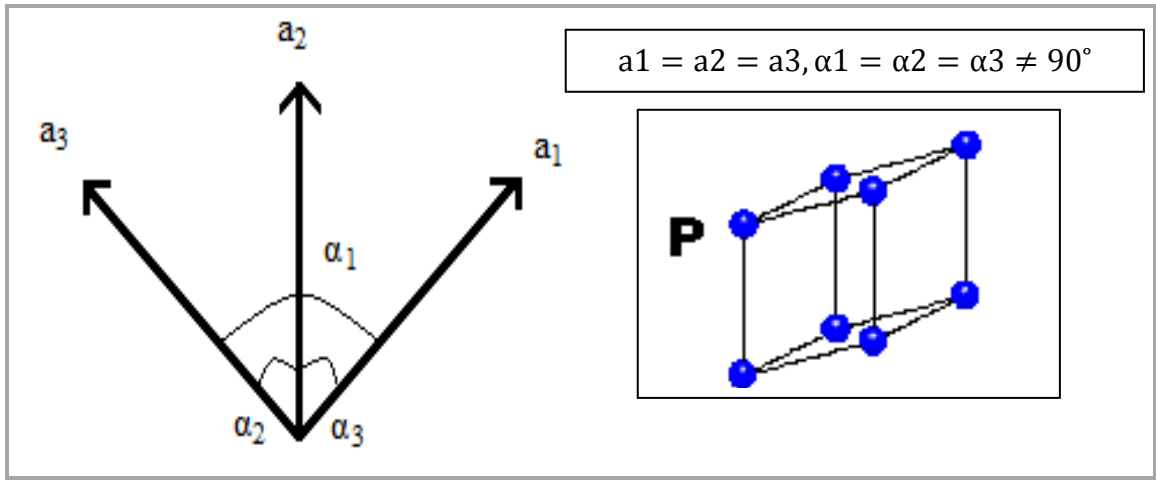
Triklinik kristal sistemde yalnızca basit bravais kafesi şekli vardır. Hücrede bulunan atom sayısı buna bağlı olarak 1' dir. Triklinik yapıda birim hücre hacmi, açıları  $90^\circ$ ' den farklı paralelkenar gibi düşünülürse,

$$V = a \cdot b \cdot c \sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha \cos\beta \cos\gamma}$$

bağıntısı ile bulunur.

### 2.5.1.d. Trigonal yapılar

Bu tür yapılarda üç eksenin değerlerine göre özel bir sistem vardır. Birim hücresi eşkenar dörtgen yüzeilidir. Üç kenar uzunlukları ve aralarındaki açılar birbirine eşittir. Açılar  $90^\circ$ ' den farklıdır (Kurt ve Arık 2003). Bu tip yapılara sahip elementlere örnek olarak boron, arsenik, antimon, telleryum, samaryum ve civa verilebilir.



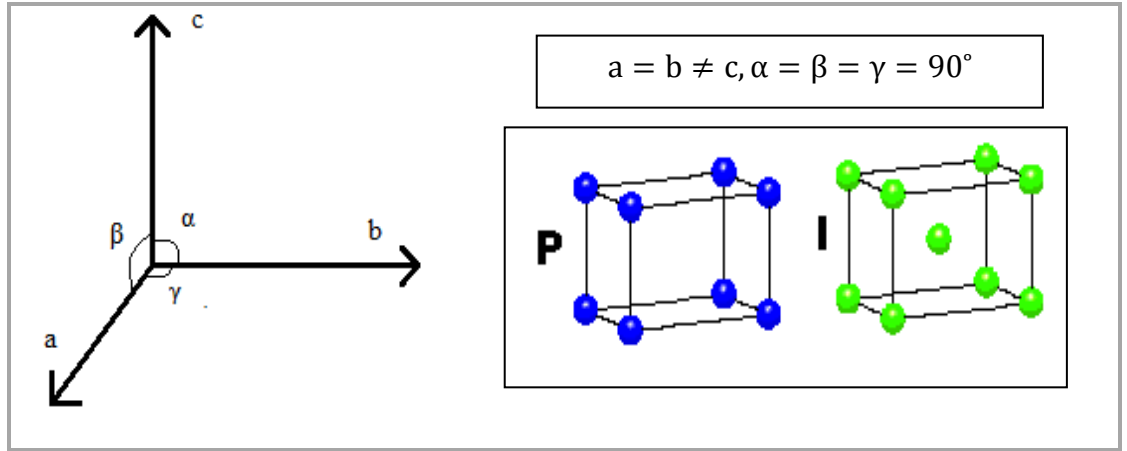
**Şekil 2.28.** Trigonal yapılarda birim hücre özellikleri

Trigonal yapılar yalnızca basit kafesler şeklinde bulunurlar. Mevcut olan atom sayısı ise bir birim hücrede 1 atom kadardır. Trigonal kristal yapılı bir birim hücrenin hacmi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$V = a^3 \sqrt{1 - 3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha}$$

### 2.5.1.e. Tetragonal yapılar

İlkel şekli kare tabanlı dik prizma halindedir. Yatay eksenleri (a ve b) birbirine eşit, düşey eksen (c) bunlardan farklıdır. Üç eksen de birbirine diktir (Kurt ve Arık 2003). Bu özelliklere sahip olan bazı mineraller mellit, rutil, lösit, apofillit; elementler ise indiyum, tin ve protaktinyumdur.



**Şekil 2.29.** Tetragonal yapılarda birim hücre özellikleri

Tetragonal sistemler basit ve hacim merkezli kafesler halinde oluşum gösterirler ve basit kafesler için 1 atom, hacim merkezli kafesler için 2 atom içerecek şekildedir. Tetragonal yapıdaki birim hücrenin kenarlar arasındaki açılar  $90^\circ$  olduğundan hacim hesaplaması

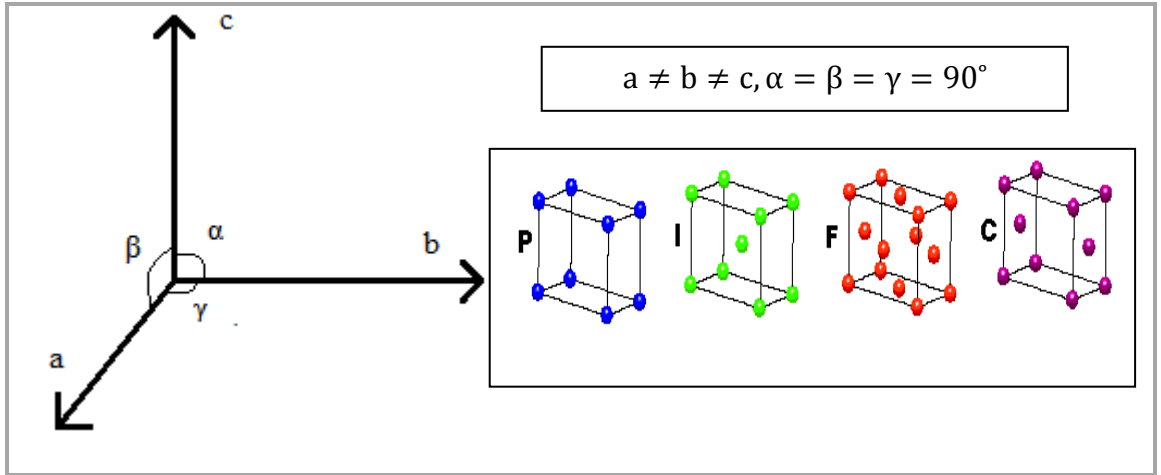
$V = a \cdot b \cdot c$  ve  $a = b$  olduğundan,

$V = a^2 c$  ile verilir.

### 2.5.1.f. Ortorombik yapılar

Bu tip yapılar dikdörtgen tabanlı dik prizma halinde birim hücrelerin birleşimi ile meydana gelir. Üç eksen birbirine dik ancak farklı uzunluklardadır (Kurt ve Arık 2003). Olivin, aragonit, topaz, seruzit, barit gibi mineraller ve klor, sülfür, galyum, brom, iyot, uranyum, neptünyum gibi elementler örnek verilebilir.





**Şekil 2.30.** Ortorombik yapılarda birim hücre özellikleri

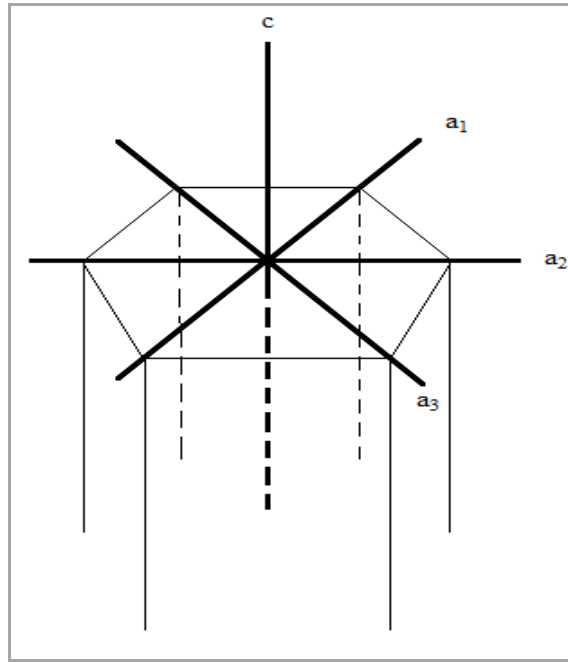
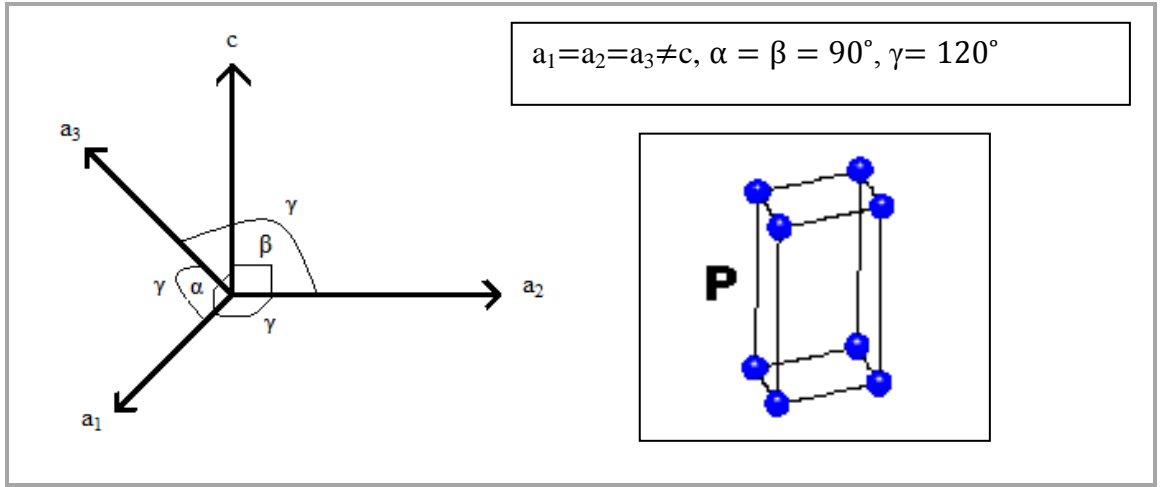
Bu yapılar dört farklı kafes türünde bulunurlar. Bunlar basit kafes (1 atom ihtiva eder), taban merkezli kafes (2 atom ihtiva eder), hacim merkezli kafes (2 atom ihtiva eder), yüzey merkezli kafeslerdir (4 atom ihtiva eder) ve birim hücre hacmi kenarlar arasındaki açılar  $90^\circ$  olduğundan

$$V = a.b.c$$

bağıntısı ile hesaplanır.

### 2.5.1.g. Hekzagonal yapılar

Altıgen tabanlı dik prizma şeklinde birim hücelere sahiptirler. Yatayda üç eksen bulunur, bu eksenlerin arasındaki açılar ve uzunlukları birbirine eşittir. Dikey eksen ise yatay eksenlerden farklı uzunluktadır ve yatay eksenlerle arasındaki açı  $120^\circ$ 'dir. Bunlara örnek mineraller beril, apatit, siderit ve grafit verilebilir (Sür 2001). Bu yapıda bulunan bazı elementler ise titanyum, kobalt, seryum, terbiyum, osmiyumdur.



**Şekil 2.31.** Hekzagonal yapılarda birim hücre özellikleri

Hekzagonal yapıda yalnızca basit kafes örgüsü vardır. Ancak diğer yapılardan farklı olarak köşelerde bulunan atomlar 8 farklı hücre tarafından değil, 6 farklı hücre tarafından kullanılacağından ve köşe sayısı 12 olduğundan köşelerdeki atomların birim hücrenin doluluk oranına etkisi  $\frac{1}{6} \times 12 = 2$  şeklinde olacaktır. Diğer taraftan tabanlardaki  $\frac{1}{2}$  oranında iki atomda doluluk oranına 1 atom katkıda bulunur ayrıca

merkezinde de 3 atom vardır ve sonuç olarak doluluk oranı 6 atomdur. Bu tip yapıya sahip birim hücrenin hacmi altıgen prizma olarak kabul edilerek

$$V = \frac{6a^2c\sqrt{3}}{4}$$

bağıntısı ile hesaplanır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Geant 4 Simülasyon Programı

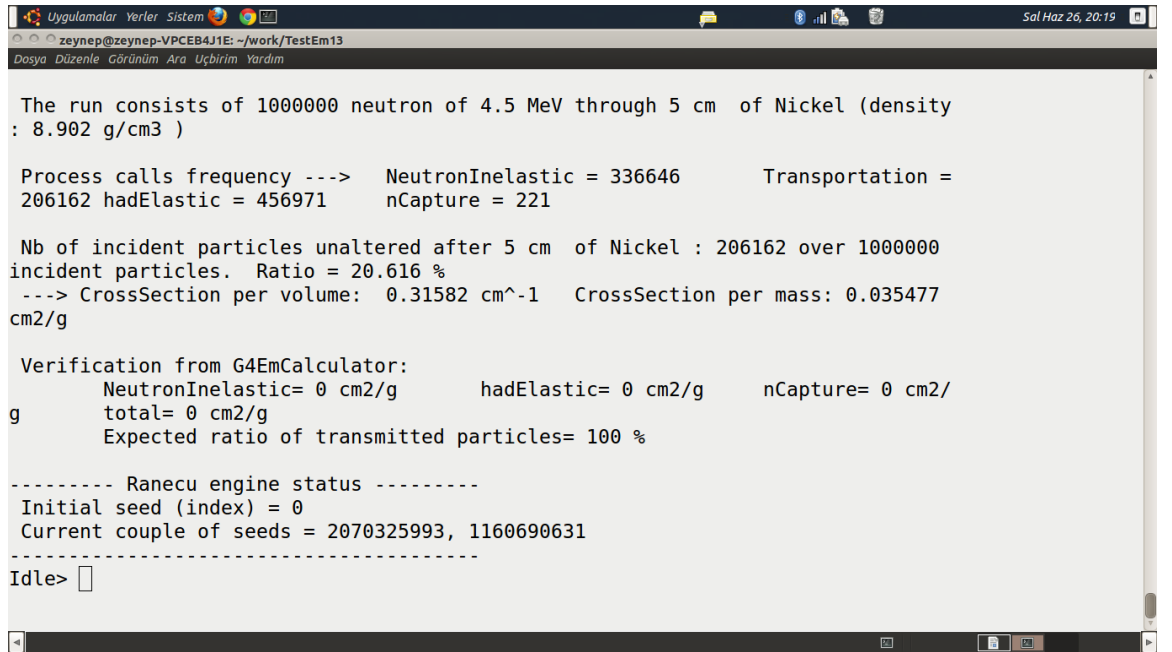
Adını “Geometry And Tracking” kelimelerden alan GEANT4’ ün ilk sürümü, 1993 yılında GEANT 3 olarak Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı (CERN)’ de kullanılan ve deneysel sonuçlar elde etmek için laboratuvar ortamında dedektör kullanılarak yapılan ölçümlerin daha hızlı sonuçlandırılması amaçlanıp dünya genelinde yazılım mühendisleri ve bilim insanlarınca parçacıkların madde ile etkileşmelerini, simülasyon yöntemi ile Monte Carlo Kodları kullanılarak fortran programlama dili ile oluşturulmuştur. Sonrasında ise 1998 yılında C++programlama dili ile GEANT 4 sürümü geliştirilmiştir. Daha gelişmiş olan bu sürüm nükleer tıp, uzay, biyoloji, radyasyon kimyası gibi alanlarda da sıkça bir kullanılmaya başlanmıştır. Programın çalıştırılabilmesi için Linux işletim sistemine ihtiyaç duyulur.

Bu program ile 250 eV'den TeV mertebesine kadar enerjiye sahip olan parçacıkların meydana getirebileceği elektromanyetik, hadronik, optik olayları içeren sonuçları elde etmek mümkündür. Farklı enerji aralıklarında işlem yapılabilen bu modellerden, hadronik etkileşimlere precompound, high energy, high energy parameterized, elastic, cascade ve low energy parameterized modellemeleri, elektromanyetik etkileşimlere penelope, standard ve low energy modellemeleri örnek gösterilebilir. GEANT4 ile işlem yaparken deneyselle yakın sonuçlara, hızlı bir şekilde bütün fizik olaylarını dikkate almaksızın sadece istenilen etkileşim için seçilen modelleme ile ulaşılabilir. Yapılan simülasyonda ortam geometrisi, parçacığın türü, parçacığın enerjisi ve parçacığın madde ile olan etkileşimi gibi ihtiyaç duyulabilecek bilgiler araştırmacının kendisi tarafından belirlenir.

Program içerisinde; kullanılan materyaller için *Detector Construction. cc* isimli dosya, madde üzerine uygulanacak radyasyon ile ilgili ayarlar için *Primary Generator Action. cc* adlı dosya gibi farklı simülasyonlar için ihtiyaç duyulan bilgiler içeren paket dosyalar

yer alır. Bunlar arasında en önemli olan dosya *Physics List. cc* dosyasıdır ve simülasyonun gerçekleşmesini sağlar. Programın çalışması ve sonucun alınması için, istenilen etkileşmeye göre bu var olan alt programlardan uygun olanlar aktifleştirilerek geometrik özellikler ve parçacık türü gibi istenilen değerler girilir ve sonuçlar alınır.

Bu çalışma süresince yapılan Geant4 simülasyonlarından bir tanesinin sonuç ekranı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



```

The run consists of 1000000 neutron of 4.5 MeV through 5 cm of Nickel (density
: 8.902 g/cm3 )

Process calls frequency --->   NeutronInelastic = 336646       Transportation =
206162 hadElastic = 456971       nCapture = 221

Nb of incident particles unaltered after 5 cm of Nickel : 206162 over 1000000
incident particles. Ratio = 20.616 %
---> CrossSection per volume: 0.31582 cm^-1   CrossSection per mass: 0.035477
cm2/g

Verification from G4EmCalculator:
      NeutronInelastic= 0 cm2/g       hadElastic= 0 cm2/g       nCapture= 0 cm2/
g      total= 0 cm2/g
      Expected ratio of transmitted particles= 100 %

----- Ranecu engine status -----
Initial seed (index) = 0
Current couple of seeds = 2070325993, 1160690631
-----
Idle>

```

**Şekil 3.1.** Nikel'in GEANT4 programı ile yapılmış simülasyonun sonuç ekranı

Yapılan simülasyonda 4,5 MeV enerjiye sahip olan 1.000.000 adet nötron parçacığı 5 cm kalınlığındaki nikel elementi üzerine gönderilmiş ve etkileşmenin sonucu olarak, 336.646 adet nöron inelastik saçılmaya, 456.971 adet nötron elastik saçılmaya uğrarken; 206.162 adet nötron titanyumdan etkilenmeden geçmiş ve 221 adet nötron nikel tarafından yakalanmış olup bu etkileşimler neticesinde nikelin nötron için mikroskobik tesir kesiti  $0,31582 \text{ cm}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır.

### 3.2. Çalışma Sürecinde kullanılan Elementler ve Bazı Özellikleri

Periyodik tabloda mevcut olan elementlerin birçoğu araştırma sonucuna etki edecek fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önüne alınarak oluşturulan tablo aşağıda verilmiştir. Elementlerin birim hücrelerine ait yapı çeşitleri, yoğunlukları, birim hücre hacimleri (BHH) ve atomik hacimleri özellikleri tabloda yer almaktadır. Elementlerin atomik hacimleri yarıçapı  $r$  olan küre gibi düşünülerek  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$  bağıntısı ile hesaplanmıştır. Birim hücre hacimleri (BHH) ise farklı her kristal yapı için belirtilen hacim formülleri üzerinde  $a, b, c$  değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca her bir element için Geant4 simülasyon programı ile makroskopik kesit değerleri elde edilerek birim hücre doluluk oranları (BHDO):

$$\text{Birim hücredeki atom sayısı} \times \frac{V_{\text{atom}}}{V_{\text{Bir.Hüc.}}} \times 100$$

denklemiyle hesaplanmıştır. Burada  $V_{\text{Atom}}$  söz konusu elementin atom hacmi,  $V_{\text{Bir. Hüc.}}$  söz konusu elementin birim hücre hacmidir.

**Çizelge 3.1.** Çalışmada kullanılan elementlerin bazı özellikleri

Element Adı	Simgesi	Yapı Çeşidi	d(g/cm <sup>3</sup> )	BHH (pm <sup>3</sup> )	Atom Hacmi (pm <sup>3</sup> )
İridyum	Ir	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	22,65	56578878,72	10310142,86
Osmiyum	Os	Sıkı Paket	22,61	83866439,38	9206476,19
Renyum	Re	Sıkı Paket	21,02	88253082,2	10310142,86
Platin	Pt	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	21,09	60430112,16	10310142,86
Tungsten	W	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	19,25	31710527,84	10310142,86
Talyum	Tl	Sıkı Paket	11,85	171501016,6	28742476,19
Tantalyum	Ta	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	16,65	35979487,73	12775190,48
Altın	Au	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	19,3	67827461,09	10310142,86
Gümüş	Ag	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	10,49	68182333,73	17164190,48
Uranyum	U	Ortorombik	19,05	82991870,14	22458333,33
Paladyum	Pd	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	12,023	58895652,13	11498666,67
Rodyum	Rh	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	12,45	55019419,82	10310142,86

Çizelge 3.1 (devam)

Element Adı	Simgesi	Yapı Çeşidi	d(g/cm <sup>3</sup> )	BHH (pm <sup>3</sup> )	Atom Hacmi (pm <sup>3</sup> )
Hafnium	Hf	Sıkı Paket	13,31	134078794,6	15604809,52
Kurşun	Pb	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	11,34	121346190,5	24438857,14
Toryum	Th	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	11,724	131421941,5	24438857,14
Civa	Hg	Trigonal	14,19	23351246,39	14142857,14
Molibdenun	Mo	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	10,28	31166657,52	12775190,48
Nikel	Ni	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	8,908	43763061,82	10310142,86
Rutenyum	Ru	Sıkı Paket	12,37	81446292,58	9206476,19
Kobalt	Co	Sıkı Paket	8,9	66456314,54	10310142,86
Bakır	Cu	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	8,92	47237713,02	10310142,86
Demir	Fe	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	7,874	23553520,98	11498666,67
Lutetyum	Lu	Sıkı Paket	9,841	176978438,9	22458333,33
Tulyum	Tm	Sıkı Paket	9,321	180591611,5	22458333,33
Krom	Cr	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	7,14	24642171	11498666,67
Erbiyum	Er	Sıkı Paket	9,066	183852192,6	22458333,33
Holmiyum	Ho	Sıkı Paket	8,795	186712865,4	22458333,33
Kadmiyum	Cd	Sıkı Paket	8,65	129579896,3	15604809,52
Niobiyum	Nb	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	8,57	35950069,58	12775190,48
Disprosyum	Dy	Sıkı Paket	8,551	189626522,5	22458333,33
Gadolinyum	Gd	Sıkı Paket	7,901	198619913	24438857,14
Terbiyum	Tb	Sıkı Paket	8,219	191816111,2	22458333,33
Seryum	Ce	Sıkı Paket	6,689	203936917,1	26532523,81
Çinko	Zn	Sıkı Paket	7,14	91272106,15	10310142,86
Vanadyum	V	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	6,11	27818127	10310142,86
Zirkonyum	Zr	Sıkı Paket	6,511	139684674,1	15604809,52
İndiyum	In	Tetragonal	7,31	52317151,61	15604809,52
Yterbium	Yb	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	6,57	164990383,9	22458333,33
Yitriyum	Y	Sıkı Paket	4,472	198070030,9	24438857,14
Titanyum	Ti	Sıkı Paket	4,507	105995487,9	11498666,67
Uropyum	Eu	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	5,244	96134854,94	26532523,81
Neodmiyum	Nd	Sıkı Paket	6,8	410189453,4	26532523,81
Lantanum	La	Sıkı Paket	6,146	448907656,9	31071857,14
Praseodinyum	Pr	Sıkı Paket	6,64	414723300,1	26532523,81
Baryum	Ba	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	3,51	127111782	41646523,81
Skandiyum	Sc	Sıkı Paket	2,985	150012655,8	17164190,48

Çizelge 3.1 (devam)

Element Adı	Simgesi	Yapı Çeşidi	d(g/cm <sup>3</sup> )	BHH (pm <sup>3</sup> )	Atom Hacmi (pm <sup>3</sup> )
Tin	Sn	Tetragonal	7,31	108216072,9	12775190,48
Strontyum	Sr	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	2,63	225299556,1	33523809,52
Telleryum	Te	Sıkı Paket	6,24	306025474,8	11498666,67
Samaryum	Sm	Sıkı Paket	7,353	894207367,6	26532523,81
Sezyum	Cs	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	1,879	231588661,2	73651809,52
Alüminyum	Al	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	2,7	66405524,29	6885086,476
Berilyum	Be	Sıkı Paket	1,848	48655584,65	4851000
Magnezyum	Mg	Sıkı Paket	1,738	139445334,2	14142857,14
Germanyum	Ge	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	5,323	181081335,1	8184523,81
Rubidyum	Rb	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	1,532	174208576,6	54383476,19
Bizmut	Bi	Monoklinik	9,78	126482939,3	12253819,81
Antimon	Sb	Sıkı Paket	6,697	543301791,3	12775190,48
Kalsiyum	Ca	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	1,55	174526931	24438857,14
Galyum	Ga	Ortorombik	5,904	156761707,8	9206476,19
Sodyum	Na	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	0,968	78986721,01	24438857,14
Arsenik	As	Sıkı Paket	5,727	387374392	6373190,476
Potasyum	K	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	0,856	151249047,6	44620190,48
İyot	I	Ortorombik	4,94	331786092,6	11498666,67
Zenon	Xe	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	3,64	238593334,4	5278793,143
Lityum	Li	İzometrik Yapı (Cisim Merkezli)	0,535	43243551	12775190,48
Brom	Br	Ortorombik	4,05	271905670,9	6373190,476
Karbon	Ca	Sıkı Paket	2,267	105857231,6	1437333,333
Kripton	Kr	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	2,155	185778435,8	2855692,19
Klor	Cl	Ortorombik	2,03	226810564,9	4190476,19
Boron	B	Trigonal	2,46	87533273,6	2573476,19
Argon	Ar	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	1,616	145199817,2	1499817,524
Selenyum	Se	Monoklinik	4,819	953941693,6	4579046,476
Nitrojen	N	Sıkı Paket	1,026	242645680,7	1150809,524
Neon	Ne	İzometrik Yapı (Sıkı Paket)	1,44	86879445,59	229939,8095
Flor	F	Monoklinik	1,7	131331200	523809,5238
Fosfor	P	Triklinik	1,823	635231175,8	4190476,19
Oksijen	O	Monoklinik	1,495	69438641,09	463433,1429
Sülfür	S	Ortorombik	1,96	3266987705	4190476,19

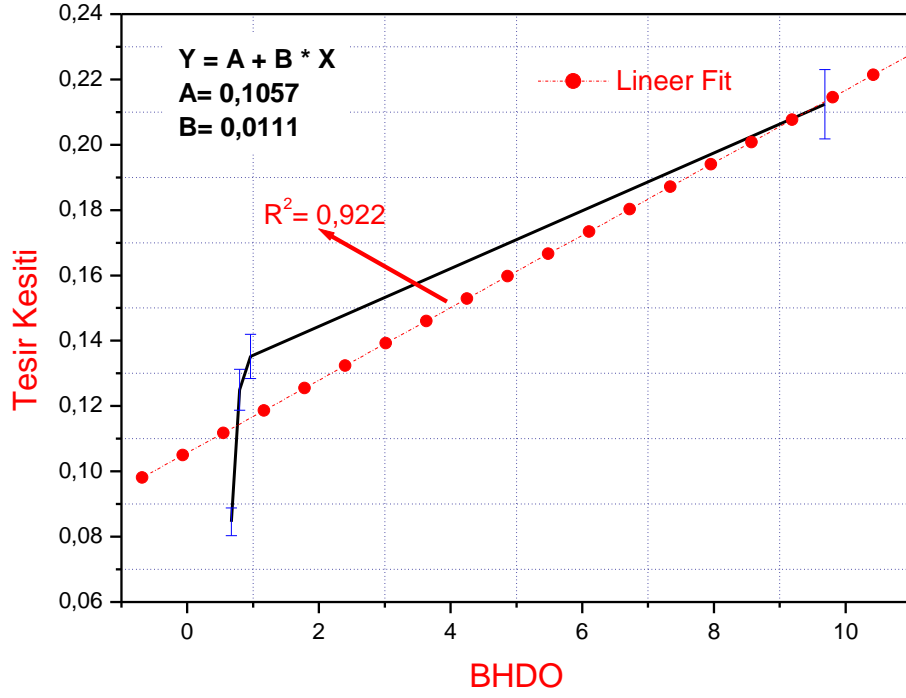


#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

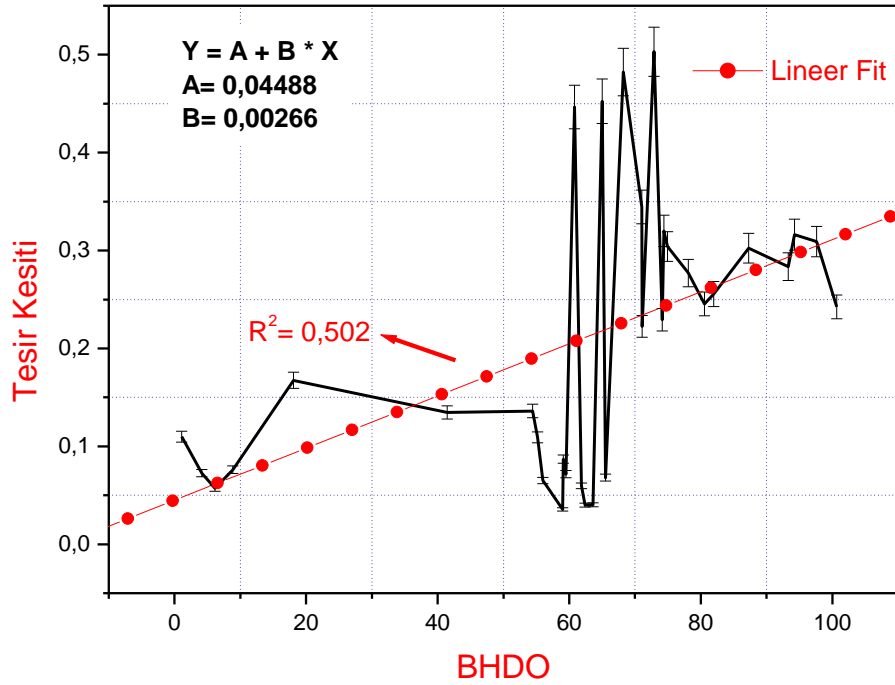
##### 4.1. Bu Çalışmada Kullanılan Elementlerin Kristal Yapılarından Kaynaklanan Birim Hücre Doluluk Oranları Değerlerinin (BHDO) ve Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Tesir Kesitlerinin Karşılaştırılması

Kullanılan elementlerin kristal yapılarını oluşturan birim hücrelerinin, birim uzunluk ve açıl parametlerinden dolayı göstermiş oldukları farklılıkların makroskobik tesir kesiti üzerindeki değişimleri incelenmiştir.

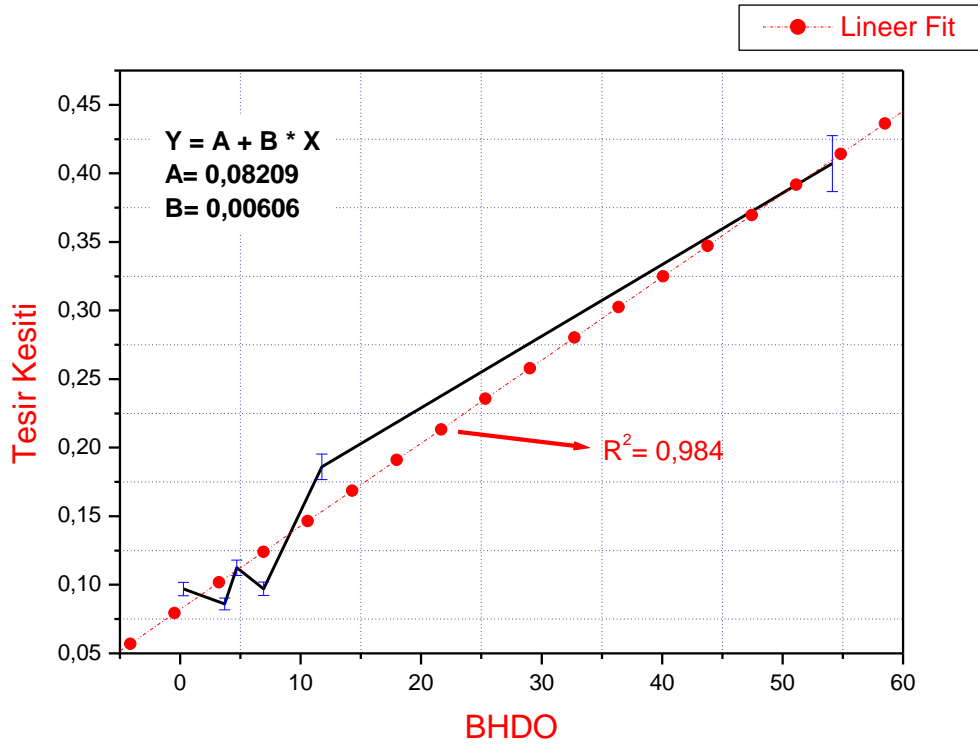
Her bir element için birim hücre hacmi ve bu hacmin, atomlar tarafından hacimsel olarak hangi oranlarda işgal edildiği ( $\text{Atom Sayısı} \times V_{\text{Atom}} / V_{\text{Bir. Hüc.}} \times 100$ ) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Karşılaştırma sonucunda bazı yapılar için elde edilen grafikler aşağıdaki gibidir. Monoklinik sistemler için yapılan çalışmada birim hücre doluluk oranı (BHDO) ile tesir kesitinin %92 oranında lineer yani uyumlu olduğu, izometrik yapılar için %50 oranında lineer, ortorombik yapılar için %98 ve hekzagonal yapılar için ise %39 lineer yani %39 oranında uyumlu olduğu görülmektedir. Bu oranlar bize izometrik yapılar ve hekzagonal yapılar için BHDO ve tesir kesiti arasında iyi bir uyum yokken monoklinik ve ortorombik yapılarda BHDO ve tesir kesiti arasında iyi bir uyum vardır.



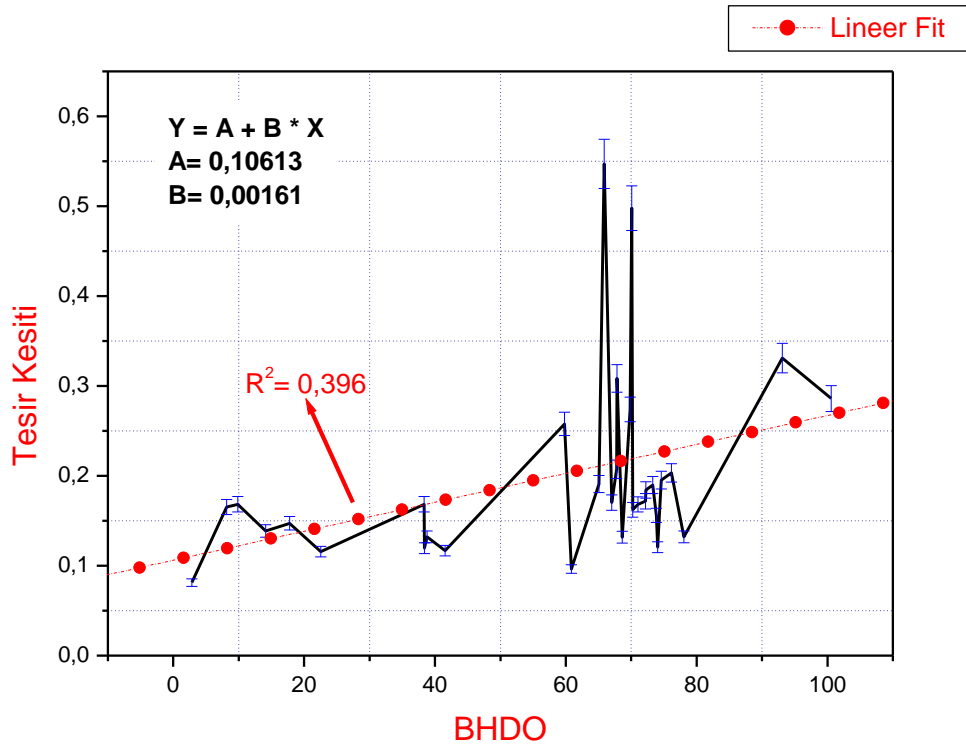
Şekil 4.1. Monoklinik Yapılar için Tesir Kesiti-BHDO grafiği, (---- GEANT4)



Şekil 4.2. İzometrik Yapılar için Tesir Kesiti-BHDO grafiği, (---- GEANT4)



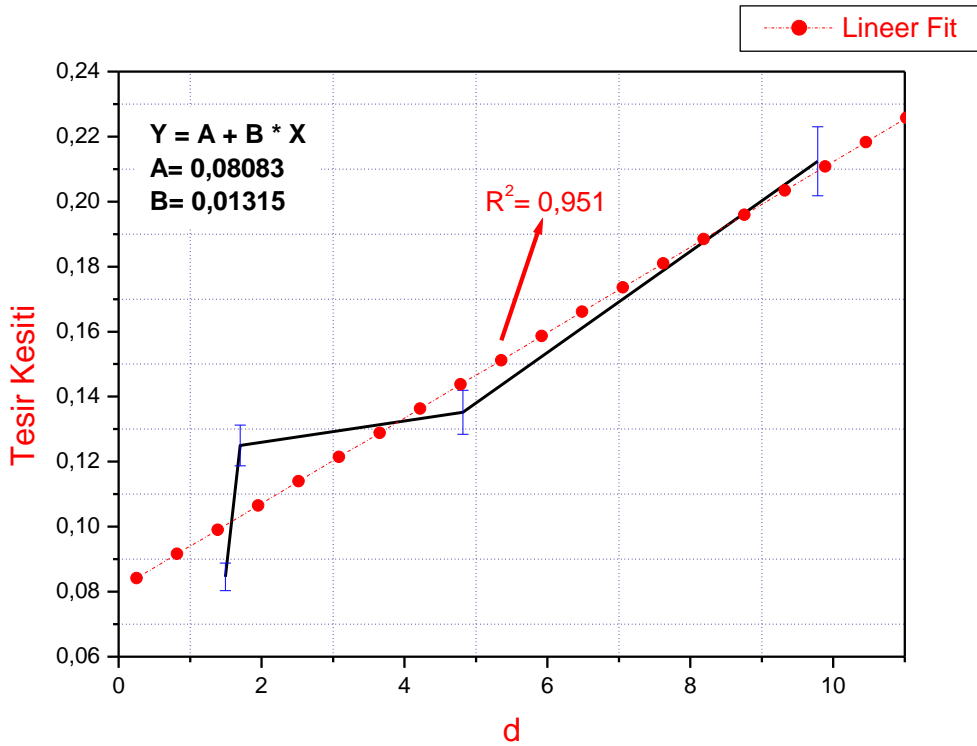
Şekil 4.3. Ortorombik Yapılar için Tesir Kesiti-BHDO grafiği, (---- GEANT4)



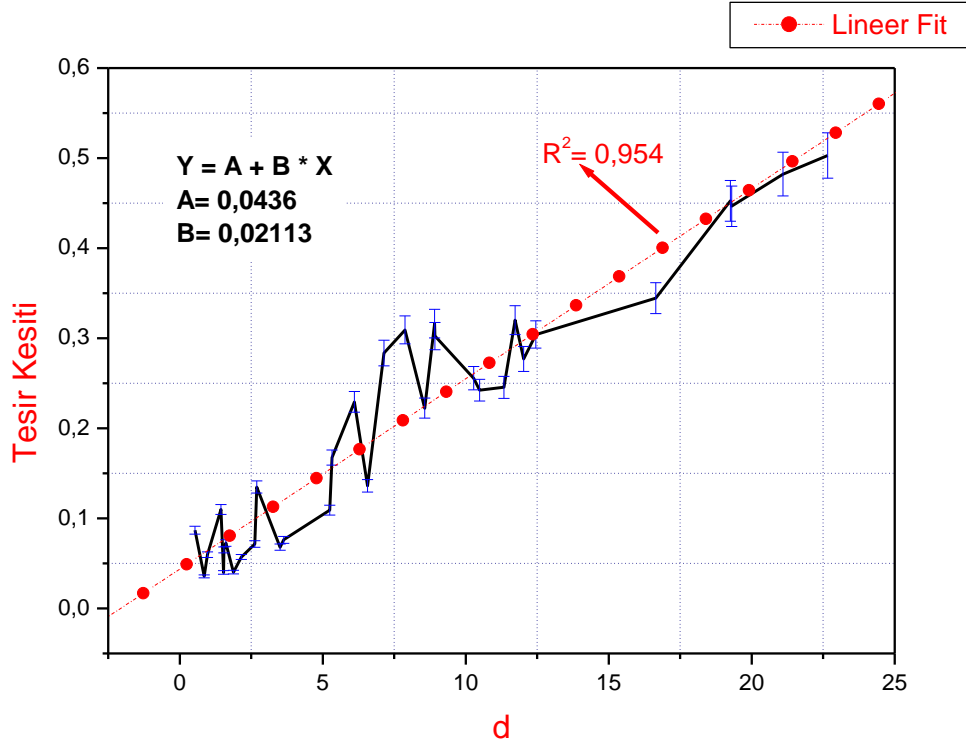
Şekil 4.4. Hekzagonal yapılar için tesir kesiti-BHDO grafiği, (---- GEANT4)

#### 4.2. Bu Çalışmada Kullanılan Elementlerin yoğunluklarının (d) ve Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Tesir Kesitlerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın bu aşamasında kristal sistemlerine göre sınıflandırılan elementlerin yoğunluklarının tesir kesitine etkileri incelenmiş ve grafiksel sonuçlar aşağıda verilmiştir. Yoğunluk değerleri ve ölçülen tesir kesitleri değerleri karşılaştırıldığında; monoklinik yapılar için sonuç %95 lineer yani yoğunlukla tesir kesitinin neredeyse doğru orantılı olduğu gözlenmiştir.

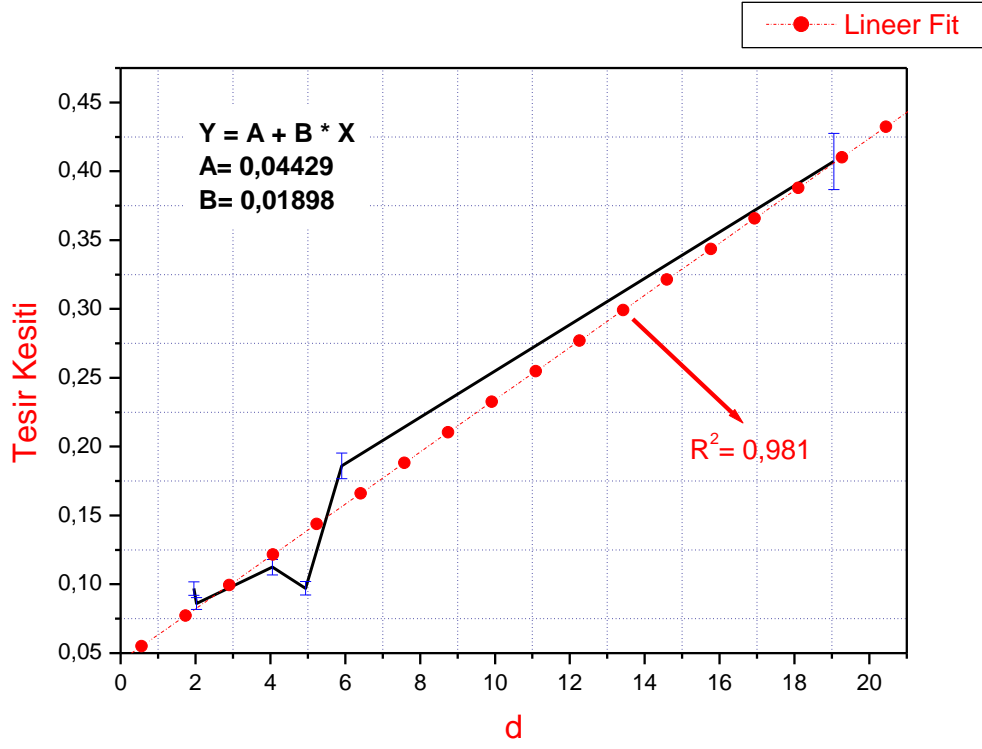


Şekil 4.5. Monoklinik Yapılar için Tesir Kesiti-d grafiği, (---- GEANT4)



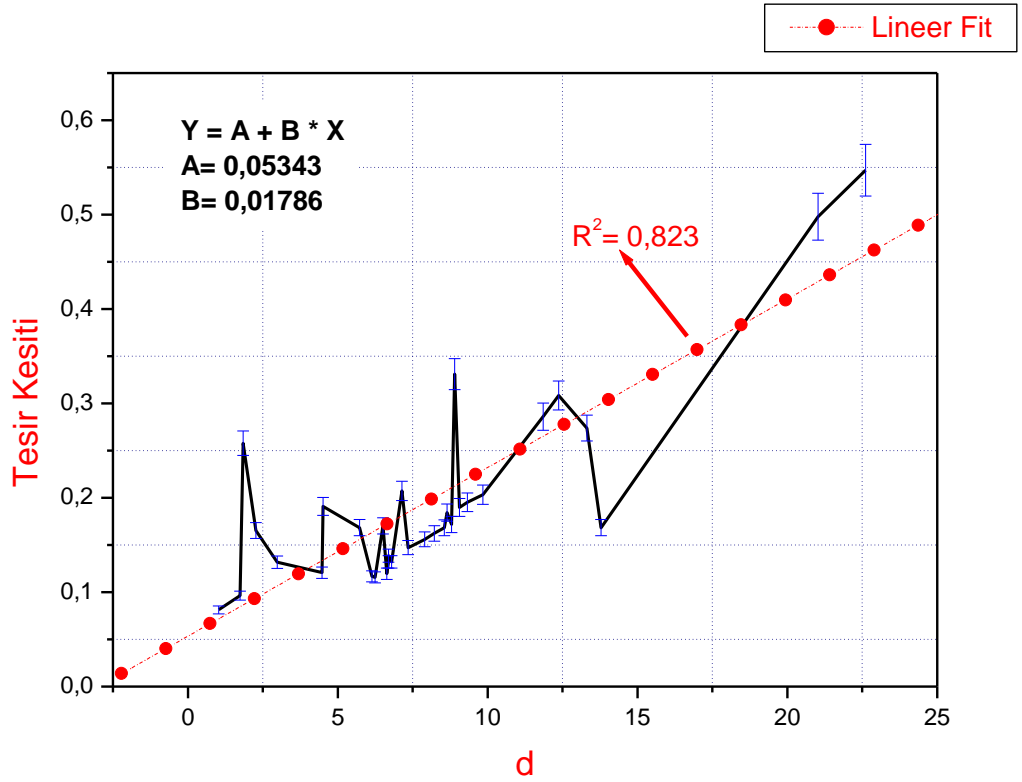
Şekil 4.6. İzometrik Yapılar için Tesir Kesiti-d grafiği, (---- GEANT4)

Monoklinik yapılara benzer şekilde izometrik yapılar içinde tesir kesitinin, elementlerin yoğunluklarıyla %95 doğrusal olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Ortorombik Yapılar için Tesir Kesiti-d grafiği, (---- GEANT4)

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere ortorombik yapılarda da yoğunluk ve tesir kesiti ilişkisi %98 oranında doğrusal olarak sonuç vermiştir.

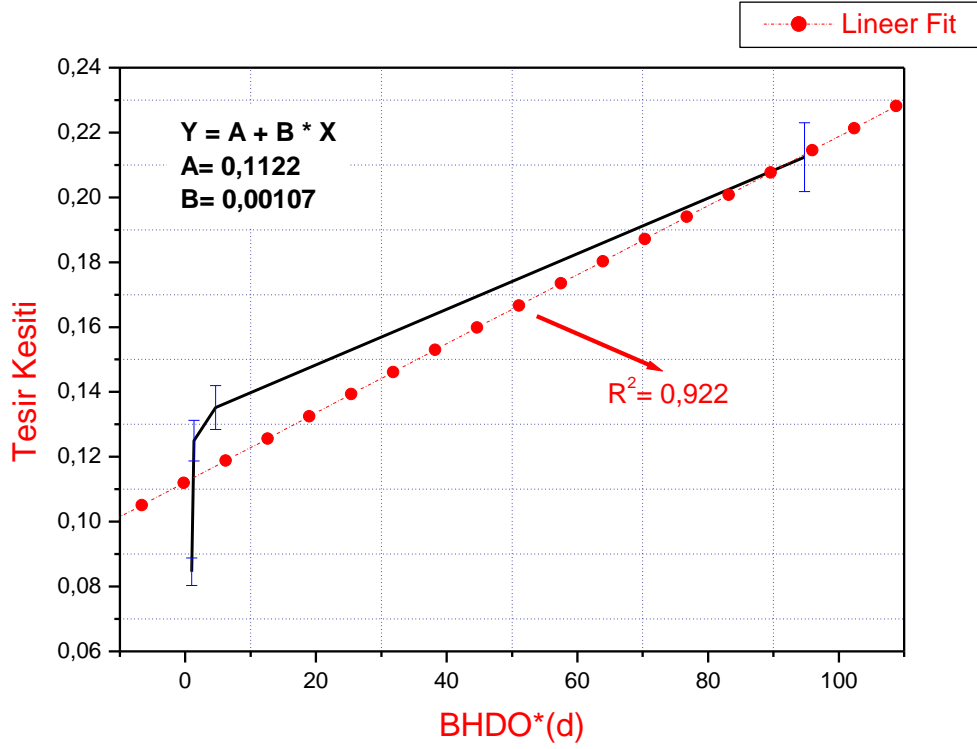


Şekil 4.8. Hekzagonal Yapılar için Tesir Kesiti-d grafiği, (---- GEANT4)

Hekzagonal yapılarda yoğunluğun tesir kesitine etkisi %82 oranında doğrusal elde edilmiştir. Yani çoğu zaman, yoğunluk arttıkça tesir kesiti de artarken; yoğunluk azaldıkça tesir kesiti azalır.

#### 4.3. Bu Çalışmada Kullanılan Elementlerin Kristal Yapılarından Kaynaklanan Birim Hücre Doluluk Oranı×yoğunluk (d) Değerlerinin ve Simülasyon Sonucunda Elde Edilen Tesir Kesitlerinin Karşılaştırılması

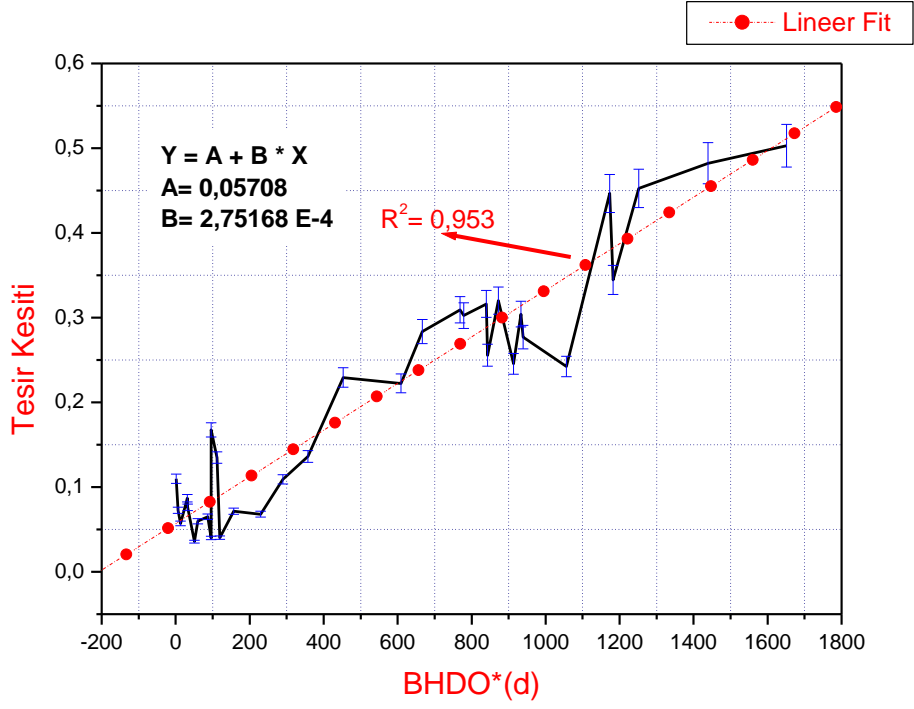
Önceki kısımlarda ayrı ayrı ele aldığımız BHDO ve yoğunluk (d) parametlerini bir arada inceleyerek tesir kesiti üzerindeki etkileri araştırılarak aşağıda yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen BHDO×d (birim hücre doluluk oranı×d) değerlerine karşı makroskopik tesir kesiti grafikleri verilmiştir.



**Şekil 4.9.** Monoklinik yapılar için tesir kesiti-(birim hücre doluluk oranı × d) grafiği, (-- GEANT4)

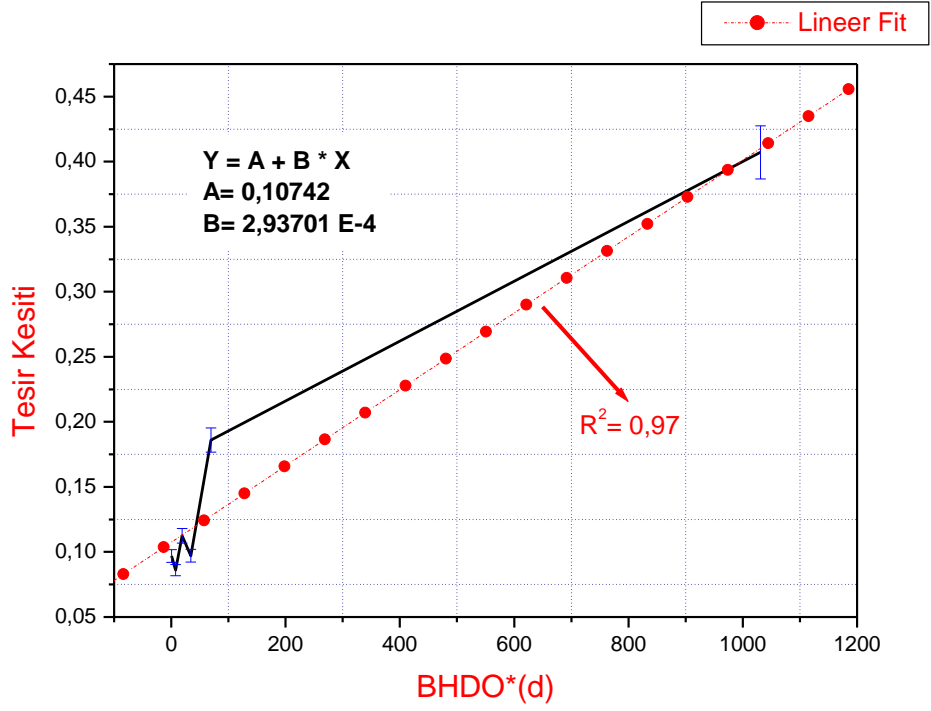
Grafiktende görüleceği gibi monoklinik yapılarda BHDO\*(d) değeri ile tesir kesitinin değişimi %92 oranında doğrusaldır.





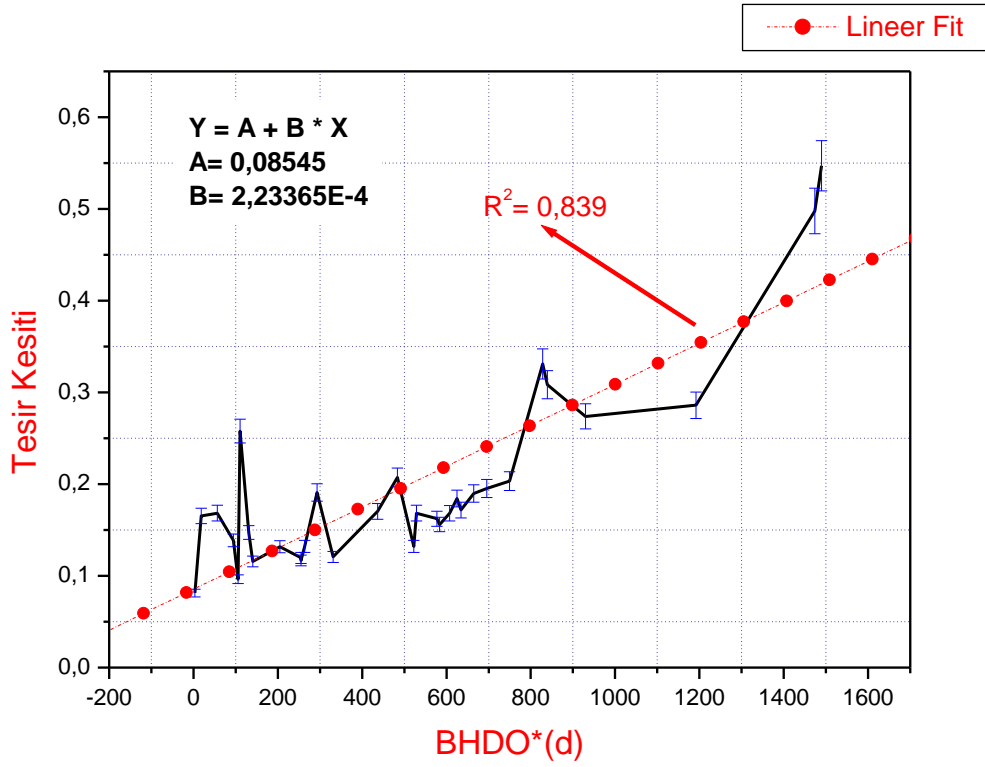
**Şekil 4.10.** İzometrik kristal yapılar için tesir kesiti-(birim hücre doluluk oranı × d) grafiği, (---- GEANT4)

Şekil 4.10' a göre bu oran %95'tir ve izometrik yapılarda BHDO\*(d) çarpımının tesir kesitine etkisi daha açıktır.



**Şekil 4.11.** Ortorombik kristal yapılar için makroskopik tesir kesiti-(birim hücre doluluk oranı × d) grafiği, (---- GEANT4)

Ortorombik yapılarda daha yüksek oranda lineerlik söz konusu olduğu gözlenmiştir. Bu durum Şekil 4.11’de de görülmektedir.

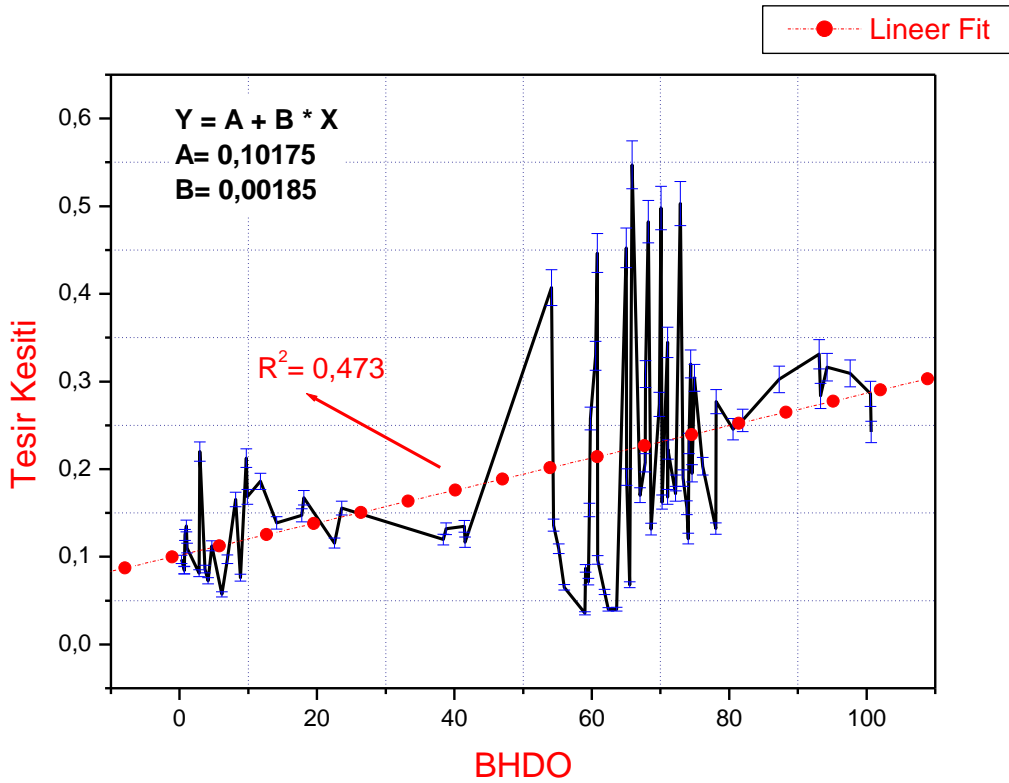


**Şekil 4.12.** Hekzagonal kristal yapılar için tesir kesiti-(birim hücre doluluk oranı × d) grafiği, (---- GEANT4)

Hekzagonal yapıdaki elementler için tesir kesiti (BHDO×d) çarpımıyla değişim grafiği yukarıda verilmiştir. Grafikte%84 oranında doğru orantı olduğu görülmektedir.

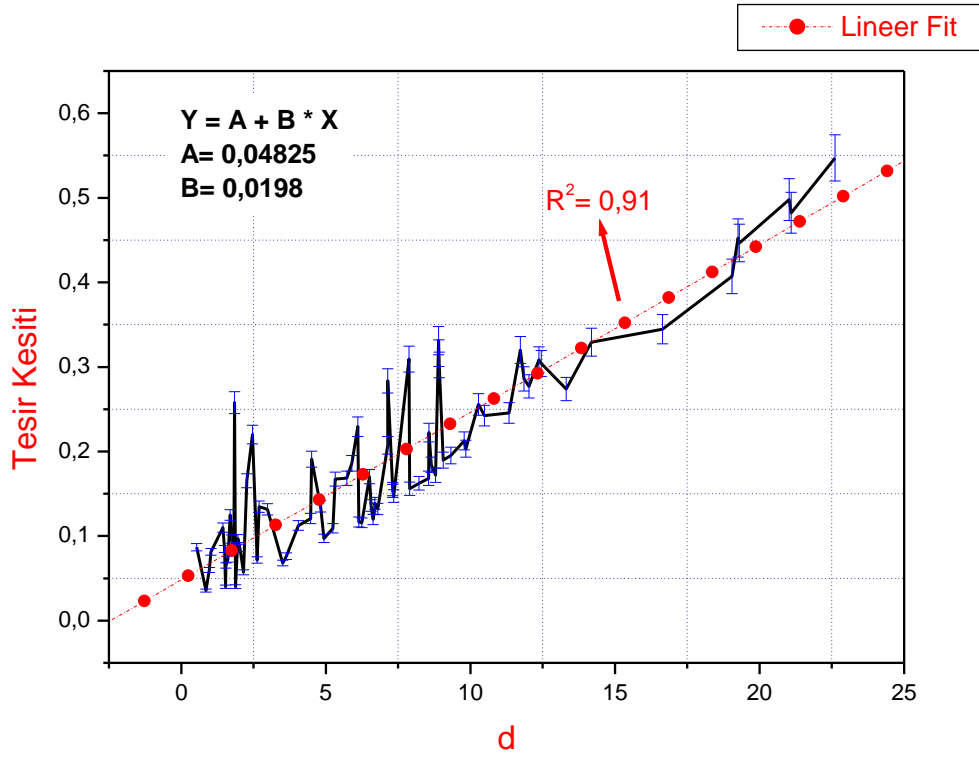
## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Güvenlik ve sağlık nedeniyle nötronların zırhlanması konusu önemli bir faktördür. Çalışmada nötronların zırhlanması için kullanılabilecek elementlerin kristal yapıları incelenmiş ve her bir elementin yapısal özelliklerinin nötron yakalama tesir kesitleri üzerine etkileri araştırılmıştır. İlk olarak kristal birim hücrelerin doluluk oranları (BHDO) hesaplanmış ve tesir kesiti üzerine etkisi incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda monoklinik ve ortorombik yapılarda %92 ve %98 oranında doğru orantı varken, izometrik ve hekzagonal yapılarda %50 ve %39 oranında doğru orantı olduğu belirlenmiştir. Ancak genel olarak çalışmada kullanılan 7 farklı kristal yapı ve elementlerin tümü ele alındığında sonuç %47 doğrusal çıkmıştır. Bu oran kristal birim hücrelerinin doluluk oranlarının tesir kesitine yüksek ölçüde etki etmediğini göstermektedir. Yani BHDO ve tesir kesiti doğrudan ilişkili değildir.



Şekil 5.1. Bütün elementler için tesir kesiti – BHDO grafiği, (---- GEANT4)

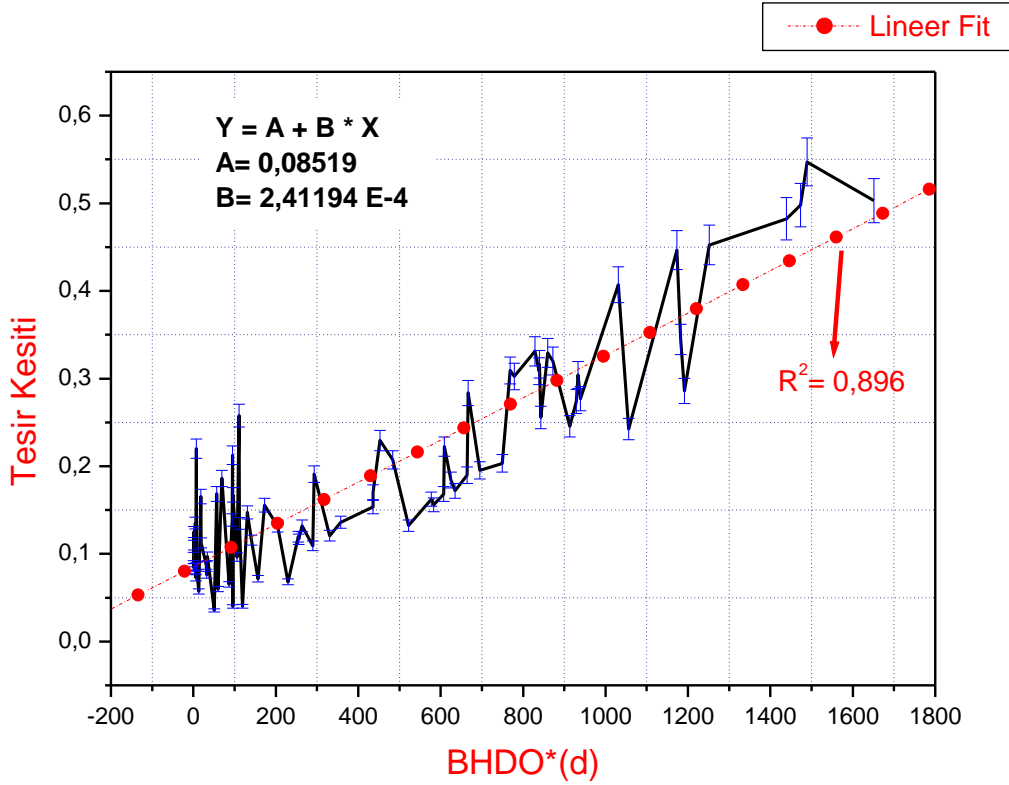
Aynı şekilde element yoğunlukları ile tesir kesitini karşılaştırdığımızda monoklinik, izometrik, ortorombik ve hekzagonal yapılarda sonuçlar sırasıyla beklendiği gibi %95, %95, %98 ve %82 oranlarında doğrusal olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar nötron tesir kesitinin bir elementin yoğunluğuyla beraber doğru orantılı bir şekilde artabileceğini veya azalabileceğini göstermektedir. Kullanılan elementlerin tümünü ele alarak yoğunluk-tesir kesiti etkileşimi için genel bir ifade kullanılmak istenirse, bu iki parametre %91 oranında doğru orantılıdır denilebilir. Yani %91 oranında uyumludurlar.



**Şekil 5.2.** Bütün elementler için tesir kesiti – yoğunluk grafiği, (— GEANT4)

Yoğunluk ve BHDO ayrı ayrı incelediğimizde, elementin kristal yapısının değişmesine rağmen yoğunluğun her durumda tesir kesitine doğru orantılı olarak etki etmesine rağmen BHDO yalnızca monoklinik ve ortorombik yapılarda tesir kesiti üzerinde doğru orantılı olarak etkili olmaktadır. Son olarak bu iki parametreyi bir arada tutarak çarpımlarıyla elde edilen (BHDO×d) sonucunun tesir kesiti üzerindeki etkilerine baktığımızda monoklinik yapılarda %92, izometrik yapılarda %95, ortorombik yapılarda %97 ve hekzagonallarda %84 olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar (BHDO×d)

çarpımının tesir kesitini yapı farkı olmaksızın etkilediğini verir. Bütün elementleri bir arada ele alıp Şekil 5.3' ile değerlendirecek olursak tesir kesitinin, (BHDO×d) çarpımıyla yaklaşık %90 oranında doğru orantılı olduğu sonucuna varıyoruz.



Şekil 5.3. Bütün elementler için tesir kesiti – (BHDO\*d) grafiği, (--- GEANT4)

Çizelge 5.1'de yoğunluk, BHDO ve (BHDO×d) çarpımının; farklı yapılar ve genel olarak bütün elementlerin tesir kesitiyle ilişkilerinin ölçüsü % lineer olarak verilmiştir. BHDO' na bağlı olarak yalnızca monoklinik ve ortorombik yapıların tesir kesiti üzerinde etkili olduğu ve BHDO arttıkça tesir kesiti artar, BHDO azaldıkça tesir kesiti azalır denilebilir. Ancak genel bir ifade kullanılamaz. Genel bir ifade belirtmek gerekirse elementlerin yoğunlukları ve (BHDO×d) çarpımları ile tesir kesiti doğru orantılı olarak artacağı veya azalacağı söylenebilir.

Çizelge 5.1, kullanılan elementlerin yapısal olarak ayrı ayrı değerlendirilmesi ve tümünün bir arada ele alınarak değerlendirilmesi sonucunda elde edilen grafiklerin %lineer değerlerini gösteren tablodur.

**Çizelge 5.1.** Elementlerin bazı özelliklerinin tesir kesitine etkilerinin gösterimi

Yapı Türü	Yoğunluk - Tesir Kesiti (%Lineer)	BHDO - Tesir Kesiti (%Lineer)	(BHDO*d) - Tesir Kesiti (%Lineer)
Monoklinik Yapı	95	92	92
İzometrik Yapı	95	50	95
Ortorombik Yapı	92	98	97
Hekzagonal Yapı	89	39	84
Genel (Tüm elementler)	90	47	90

**Çizelge 5.2.** Şekil 5.1, 5.2, 5.3' ten elde edilen denklemlerin elementler için uygunluğu

Element Adı	Simgesi	Uygun Formülizasyon (Doğru Denklemi)
İridyum	Ir	d
Osmiyum	Os	d
Renyum	Re	d
Platin	Pt	d
Tungsten	W	d
Talyum	Tl	BHDO
Tantalyum	Ta	(BHDO × d)
Altın	Au	d
Gümüş	Ag	d
Uranyum	U	d
Paladyum	Pd	BHDO
Rodyum	Rh	(BHDO × d)
Hafnium	Hf	d
Kurşun	Pb	BHDO
Toryum	Th	(BHDO × d)
Civa	Hg	d
Molibdenun	Mo	BHDO
Nikel	Ni	(BHDO × d)

Çizelge 5.2 (devam)

Element Adı	Simgesi	Uygun Formülizasyon (Doğru Denklemi)
Rutenyum	Ru	d
Kobalt	Co	(BHDO × d)
Bakır	Cu	(BHDO × d)
Demir	Fe	BHDO
Lutetyum	Lu	d
Tulyum	Tm	d
Krom	Cr	BHDO
Erbiyum	Er	d
Holmiyum	Ho	d
Kadmiyum	Cd	d
Niobiyum	Nb	d
Disprosyum	Dy	d
Gadolinyum	Gd	d
Terbiyum	Tb	d
Seryum	Ce	d
Çinko	Zn	(BHDO × d)
Vanadyum	V	BHDO
Zirkonyum	Zr	d
İndiyum	In	(BHDO × d)
Yterbium	Yb	(BHDO × d)
Yitriyum	Y	d
Titanyum	Ti	BHDO
Uropyum	Eu	d
Neodmiyum	Nd	(BHDO × d)
Lantanum	La	(BHDO × d)
Praseodinyum	Pr	(BHDO × d)
Baryum	Ba	d
Skandiyum	Sc	(BHDO × d)
Tin	Sn	BHDO
Strontyum	Sr	d
Telleryum	Te	(BHDO × d)
Samaryum	Sm	BHDO
Sezyum	Cs	d
Alüminyum	Al	(BHDO × d)



Çizelge 5.2 (devam)

Element Adı	Simgesi	Uygun Formülizasyon (Doğru Denklemi)
Berilyum	Be	BHDO
Magnezyum	Mg	d
Germanyum	Ge	d
Rubidyum	Rb	d
Bizmut	Bi	d
Antimon	Sb	BHDO
Kalsiyum	Ca	d
Galyum	Ga	d
Sodyum	Na	d
Arsenik	As	d
Potasyum	K	d
İyot	I	(BHDO × d)
Zenon	Xe	(BHDO × d)
Lityum	Li	(BHDO × d)
Brom	Br	BHDO
Karbon	Ca	BHDO
Kripton	Kr	(BHDO × d)
Klor	Cl	(BHDO × d)
Boron	B	BHDO
Argon	Ar	d
Selenyum	Se	d
Nitrojen	N	(BHDO × d)
Neon	Ne	BHDO
Flor	F	BHDO
Fosfor	P	d
Oksijen	O	(BHDO × d)
Sülfür	S	BHDO

Çizelge 5.2’de; Şekil 5.1, 5.2, 5.3’ten elde edilen doğru denklemleri kullanılarak BHDO, d ve (BHDO\*d) için ayrı ayrı hesaplanan % hata sonuçları karşılaştırılarak ilgili element için en uygun yani en az % hatası olan denklemler belirtilmiştir.

Bir maddenin yoğunluğu,  $d = \frac{m}{V}$  bağıntısı yardımıyla birim hücresi üzerinden hesaplanacak olursa,  $m$  yerine bir birim hücredeki atomların kütlesi (gr) ve  $V$  yerine o birim hücrenin hacmi ( $V$ ) alınır ve sonuç;

$$m = \frac{\text{Birim Hücredeki Atom Sayısı (n)} \times \text{Elementin Atomik Kütlesi (m)}}{\text{Avagadro Sayısı (N)}}$$

$V = \text{Birim Hücrenin Hacmi (V}_{\text{Birim Hücre}})$

$$d = \frac{m}{V} = \frac{n \times m}{N} \times \frac{1}{V_{\text{Birim Hücre}}}$$

$$d = \frac{n \times m \text{ (gr)}}{N \text{ (mol}^{-1}) \times V_{\text{Birim Hücre}} \text{ (cm}^3\text{)}}$$

olarak elde edilir ve BHDO' nı da bir formülle ifade edersek

$$\text{BHDO} = \frac{\text{Birim Hücredeki Atom Sayısı (n)} \times \text{Elementin Atom Hacmi (V}_{\text{Atom}})}{\text{Birim Hücre Hacmi (V}_{\text{Birim Hücre}})} \times 100$$

$$\text{BHDO} = \frac{n \times V_{\text{Atom}} \text{ (cm}^3\text{)}}{V_{\text{Birim Hücre}} \text{ (cm}^3\text{)}} \times 100$$

elde edilir.

Son olarak ( $\text{BHDO} \times d$ ) çarpımı için eşitlik yazarsak,

$$(\text{BHDO} \times d) = \frac{n \times m \text{ (gr)}}{N \text{ (mol}^{-1}) \times V_{\text{Birim Hücre}} \text{ (cm}^3\text{)}} \times \frac{n \times V_{\text{Atom}} \text{ (cm}^3\text{)}}{V_{\text{Birim Hücre}} \text{ (cm}^3\text{)}} \times 100$$

$$BHDO \times d = \frac{n^2 \times m \times V_{Atom}}{N \times (V_{Birim\ H\u00fccre})^2} \times 100$$

olarak elde edilir.

Burada birim analizi yapılırsa ( $BHDO \times d$ ) çarpımının birimi  $\frac{gr.mol}{cm^3}$  olarak çıkar. Bu da bize tesir kesitinin madde miktarı ve mol sayısı ile doğru orantılı yani kütle ve mol sayısı arttıkça tesir kesitinde arttığını, hacim ile ters orantılı olduğunu yani hacim arttıkça tesir kesitinin azalacağını gösterir. Diğer yandan  $gr/cm^3$  yoğunluk olarak ele alınırsa, toplam makroskopik tesir kesitinin yoğunlukla ve mol sayısı ile doğru orantılı olduğu ortaya konulmuş olur. Bu durum ise çalışma sürecinde elde edilen grafiklerden çıkan sonuçları desteklemektedir. Son olarak nötron zırhlamada kullanılacak bir malzeme, yüksek oranda ( $BHDO \times d$ ) çarpımının yardımıyla seçilebileceği söylenebilir. Ayrıca Çizelge 5.2 yardımıyla en uygun formülizasyon belirlenerek Çizelge 5.1, 5.2 ve Çizelge 5.3' te elde edilen doğru denklemleri kullanarak seçilmek istenen malzemenin tesir kesiti en az hata payı ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

## 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 Fiziğine Giriş, Literatür Yayınları:55, İstanbul, Türkiye.
- Alhajali, S., Kharita, M H., Naom, B., Yousef, S., AlNassar, M., 2009. Estimation of the activation of local reactor shielding concretes, *Progress in Nuclear Energy*, 51 374–377.
- Anonim, 2013. [www.taek.gov.tr](http://www.taek.gov.tr)
- 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-loaded resin for neutron shielding, *Journal of Nuclear Materials* 367–370 1085–1089.
- Atsuhiko, M., Yoshimasa, A., Koichi, O., Shinji, S., Atsushi, K., 2011. Flexible heat resistant neutron shielding resin, *Journal of Nuclear Materials*, 417 850–853.
- Aydoğan, Ş., 2007. Fizik Terimleri Sözlüğü, Erzurum.
- Aygün, B., 2010, Değişik Yağ Oranlarına Sahip Parafin Waxlarda Hızlı nötronların Makroskopik Soğrulma Tesir Kesitlerinin Belirlenmesi ve Değişen Yağ Oranının Zırlama Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Bartoli, L., Becherini, F., Grazzi, F., Zoppi, M., 2009. Surface scattering efficiency of some common materials for shielding pulsed neutron scattering instruments, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 608 360–362.
- Berkem, A. R., 1951. Radyoaktivite, İstanbul Üniversitesi Yayınlarından, sayı: 440, İstanbul, Türkiye.
- 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.
- Boushaki, G. M. I., Allab., M., 2012. Comparison between standard unfolding and Bayesian methods in Bonner spheres neutron spectrometry, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 689 35–39.
- Büyükuslu, H., 2007. Isparta'nın Yalvaç İlçesi ve Çevresinin Doğal Fon (Background) Radyasyon Düzeylerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Cansoy, Ç., 1978. Teorik Fizik Dersleri-cilt 10, İstanbul Üniversitesi Yayınlarından, sayı: 2416, İstanbul, Türkiye.
- Demir, F., 2009. Bor ve barit agregalı ağır betonların nötron parçacıkları, x- ve  $\gamma$ -ışınları için radyasyon soğurganlıklarının belirlenmesi, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

- 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
- Durmaz, H., 2002. Radyasyon Zırhlaması Amacıyla Karbonlu Yapı Çeliklerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- 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.
- Ghassoun, N., Senhou, A., 2011. Neutron and photon doses in high energy radiotherapy facilities and evaluation of shielding performance by Monte Carlo method, *Annals of Nuclear Energy*, 38 2163–2167.
- 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., 2002. Study of Electrophysical Characteristics of Lead-Natural Rubber Composites as Radiation Shields, *Polymer Composites*, December 2002, 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 — H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>/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. B<sub>4</sub>C/NR composites, *Polymer Testing* 21 129–133.
- Hawk, A. E., Blue, T. E., Woollard, J. E., 2004. A shielding design for an accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy, *Applied Radiation and Isotopes* 61 1027–1031.
- Huasi, H., Qunshu, W., Juan, Q., Yuele, 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.
- Juárez, R., Sanz, J., Perlado, J. M., 2012. Advances in neutronics and radiological protection of HiPER 4a, *Fusion Engineering and Design*, 87 336–343.
- 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.
- Kopecky, S., Harvey, J. A., Hill, N. V., Krenn, M., Pernicka, M., Riehs, P., Steiner, S., 1997. Neutron charge radius determined from the energy dependence of the neutron transmission of liquid <sup>208</sup>Pb and <sup>209</sup>Bi, *Physical Review C*, Volume 56, Number 4, S0556-2813(97)02610-1.
- 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., Karabulut, A., Budak, G., Aygun, B., Gencel, 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.
- Korkut, T., Karabulut, A., Budak, G., Korkut, H., 2010. Investigation of fast neutron shielding characteristics depending on boron percentages of  $MgB_2$ ,  $NaBH_4$  and  $KBH_4$ , *J Radioanal Nucl Chem* 286:61–65, DOI 10.1007/s10967-010-0619-0.
- 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., 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.
- Kreider, M. L., Panko, J. M., McAtee, B. L., Sweet, L. I., Finly, B. L., Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies, *Science of the Total Environment* 408 652–659.
- Kurt, H., Arık, F., 2003. Mineraloji, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Medhat, M., Fayez-Hassan, M., 2011. Elemental analysis of cement used for radiation shielding by instrumental neutron activation analysis, *Nuclear Engineering and Design*, 241 2138–2142.
- Onur, S., 2002. Gama Radyasyonu Zırhlaması Amacıyla Farklı Betonların Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Proctor, A., Gabriel, T., A., Hunt, A. W., 2012. JoAnn Manges, Thomas Handler, Detecting fissionable materials in a variety of shielding matrices via delayed gamma and neutron photofission signatures—Part 2: Experimental results, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 662 71–80.
- Reda, A. M., 2011. Monte Carlo simulations of a D-T neutron generator shielding for landmine detection, *Radiation Measurements*, 46 1187–1193.
- Şahin, Y., 1999. Çekirdek Fiziğinin Esasları, Aktif Yayıncılık, Erzurum, Türkiye.
- Şarer, B., 2002. Nükleer Fizik 1. cilt, Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye.
- Şarer, B., 2002. Nükleer Fizik 2. cilt, Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye.
- Uz, B., Mineraller Kristallografi – Mineraloji, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Yaramış, B., 1985. Nükleer Fizik, İ.T.Ü., Fen Edebiyat Fakültesi, Yayın No:7, İstanbul, Türkiye.
- Yeniçay, F., 1971. Çekirdek Fiziği ikinci cilt, Fen Fakültesi Basım Evi, No: 106, İstanbul, Türkiye.
- Yılmaz, M., 1998. Çekirdek Fiziği, Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi Yayınları, no: 003, Balıkesir, Türkiye.
- Yusuf, M., Canan, K., Mehmet, V. K., 2011. Thermal and neutron shielding properties of  $10B_2O_3$ /polyimide hybrid materials, *Polym. Bull.*, 67:1741–1750.
- Yörükoğulları, E., 1998. Çekirdek Fiziği, Anadolu Üniversitesi, Açıköğretim Fakültesi, İlköğretim Öğretmenliği, Lisans Tamamlama Programı, Eskişehir.
- Zeren, M. A., 2008. Atomlar Moleküller, Birsen Yayınevi, İstanbul.

## ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Erzurum'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini sırasıyla Erzurum Atatürk İlk Öğretim Okulu (1991-1996), Erzurum Sabancı Orta Okulu (1996-1999) ve Erzurum Anadolu Lisesi' nde (1999-2004) tamamladı. 2005 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü' nde öğrenimine devam etti ve 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Atom ve Molekül Fiziği bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Erzurum'da yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.