

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NÜKLEER TEKNİKLER KULLANAN BİR MAYIN  
ALGILAMA SİSTEMİNİN TASARIMI ve SAYISAL  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yüksek Fizikçi Derya YILMAZ BAYSOY

**FBE Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 9 Temmuz 2010  
**Tez Danışmanı** : Prof. Dr. Metin SUBAŞI (YTÜ)  
**Jüri Üyeleri** : Prof. Dr. Mehmet ŞİRİN (YTÜ)  
: Prof. Dr. Melih BOSTAN (İÜ)  
: Prof. Dr. M. Nizamettin ERDURAN (İÜ)  
: Doç. Dr. Ayşe DURUSOY (YTÜ)

**İSTANBUL, 2010**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ.....	xii
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER.....	6
2.1 Mayın ve Mayın Çeşitleri .....	6
2.2 Mayın Tespit Yöntemleri.....	9
2.2.1 Nükleer kuadrupol rezonans (NQR) sistemleri .....	10
2.2.2 Nötron sorgulama sistemleri.....	12
2.2.2.1 Nötron uyarmalı-foton deteksiyonu.....	13
2.2.2.1 Nötron yakalama gama ışınları (Isıl Nötron Analizi).....	13
2.2.2.1.2 Nötron inelastik saçılma gama ışınları (Hızlı Nötron Analizi).....	15
2.2.2.1.3 Nötron aktivasyonu.....	16
2.2.2.1.4 Aktivasyon analizi spektrumunun analizi yapılarak element miktarının tayini .....	16
2.2.2.2 Nötron uyarmalı – nötron deteksiyonu .....	18
2.2.2.2.1 Nötron moderasyonu .....	18
2.2.2.2.2 Nötron elastik rezonans saçılması .....	18
2.2.2.2.3 Nötron inelastik saçılması .....	19
2.2.2.3 Foton uyarmalı- nötron deteksiyonu.....	19
2.2.2.3.1 Foto-nötron emisyonu.....	19

2.3	Deteksiyon Sisteminin Gereksinimleri.....	20
3.	MONTE CARLO METODU .....	21
3.1	MCNP – Monte Carlo Nötron-parçacık Taşınım Kodu .....	21
3.2	MCNP Hesaplamaları.....	22
4.	NÖTRON SORGULAMA SİSTEMİ.....	24
4.1	Nötron Kaynağı Seçimi .....	24
4.2	Nötron Kaynakları .....	24
4.2.1	D-D Ve D-T nötron jeneratörleri.....	25
4.2.2	Radioizotopik nötron kaynakları .....	25
4.3	Gama Işını Detektör Seçimi.....	26
4.3.1	Sintilatör detektörleri .....	27
4.3.2	Yarı iletken detektörler .....	29
4.4	Nötron Detektörü Seçimi.....	30
4.4.1	BF <sub>3</sub> orantılı sayacı.....	32
4.4.2	Nötron sorgulama sisteminin geometrisi .....	33
5.	SİMULASYON ÇALIŞMALARİ.....	36
5.1	MCNP Hesaplamaları ile Modelin Optimizasyonu .....	36
5.1.1	Nötron kaynağı konumunun belirlenmesi .....	36
5.1.2	Nötron kaynağına uygun zırhın tasarımı .....	39
5.1.2.1	Moderatör (zırh) malzemesinin seçimi .....	39
5.1.2.2	Deteksiyon sisteminin konumunun belirlenmesi .....	51
5.1.2.3	Bor katkılı parafin zırh genişliğinin belirlenmesi .....	53
5.1.2.4	Bor katkılı parafin zırh yüksekliğinin belirlenmesi .....	55
5.2	Kireçtaşı içerisinde plastik patlayıcı ve mayınların deteksiyonu ile ilgili MCNP hesaplama sonuçları.....	58
5.2.1	Deteksiyon sisteminin derinlik hassasiyetinin belirlenmesi .....	58
5.2.2	Deteksiyon sisteminde patlayıcının ortamda bulunması olası diğer malzemelerden ayırt edilmesi.....	62
5.2.3	Farklı çapa sahip mayınların deteksiyonunun incelenmesi .....	69
5.2.4	Kireçtaşı içerisindeki farklı nem miktarlarının plastik patlayıcı ve mayın deteksiyonu üzerine etkilerinin incelenmesi.....	70
5.3	Toprak içerisinde plastik patlayıcı ve mayınların deteksiyonu ile ilgili MCNP hesaplama sonuçları.....	77
5.3.1	Deteksiyon sisteminin derinlik hassasiyetinin belirlenmesi .....	77
5.3.2	Deteksiyon sisteminde patlayıcının diğer olası cisimlerden ayırt edilmesi .....	80
5.3.3	Farklı çapa sahip mayınların deteksiyonunun incelenmesi .....	82
5.3.4	Toprak içerisindeki farklı nem miktarlarının plastik patlayıcı ve mayın deteksiyonuna etkilerinin incelenmesi.....	83
5.4	Kütle ve elementel oran hesaplamaları.....	87
5.4.1	Kireçtaşı ortamı içerisinde yerleştirilen TNT için bulunan kütle ve elementel oranlar .....	88
5.4.2	Toprak içerisinde yerleştirilen TNT için bulunan kütle ve elementel oranlar .....	90
6.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	93
	KAYNAKLAR.....	98

İNTERNET KAYNAKLARI .....	100
EKLER .....	101
Ek 1 Soğurulan Nötronlar için Kalite Faktörü.....	102
Ek 2 Kireçtaşı ortamı içerisine yerleştirilmiş TNT için stokiyometrik hesaplamalarda kullanılan gama spektrumları .....	103
Ek 3 Toprak ortamı içerisine yerleştirilmiş TNT için stokiyometrik hesaplamalarda kullanılan gama spektrumları .....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	107

## SİMGE LİSTESİ

$Z$	Çekirdek Element Numarası
$A$	Çekirdek Kütle Numarası
$E$	Enerji
$\gamma$	Gama ışını
$\Phi$	Akı
$N$	Gömülü cisim var iken nötron akısı veya gama ışını sayısı
$N_0$	Gömülü cisim yok iken nötron akısı veya gama ışını sayısı

## **KISALTIMA LİSTESİ**

ATM	Anti-Tank Mayın
APM	Anti-Personel Mayın
BF <sub>3</sub>	Boron TriFloride
BGO	Bismuth Germanate
DUNBLAD	Delft University Neutron Backscattering Landmine Dedector
FWHM	Full Width at Half Maximum
HYDAD	Hydrogen Density Anomaly Detector
HPGe	High Purity Germanium
ILDS	Improved Landmine Detection System
MD	Metal detektörü
NaI	Sodium Iodide
NBS	Neutron Back-Scattering
NIS	Neutron Inelastic Scattering
MCNP	Monte Carlo N-Particle Transport Code System
SNR	Signal-Noise Ratio
TNC	Thermal Neutron Capture
TNT	2,4,6- Trinitrotoluene
TOF	Time Of Flight

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Çeşitli anti-tank ve anti-personel mayınlar .....	7
Şekil 2.2 Patlayıcı ve zararsız malzemeler için stokiyometrik oranların karşılaştırılması .....	9
Şekil 2.3 Taşınabilir NQR mayın detektörü (Garroway vd, 2001) .....	11
Şekil 2.4 TNT için MCNP kod kullanılarak elde edilen gama ışını spektrumu .....	12
Şekil 2.5 Isıl nötron yakalama reaksiyonu .....	13
Şekil 2.6 $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$ reaksiyonu ile uyarılan $^{15}\text{N}$ için 10833 keV enerji seviyeleri (Debertin, 1988) .....	14
Şekil 2.7 Hızlı nötron inelastik saçılma reaksiyonu .....	15
Şekil 4.1 $^{252}\text{Cf}$ nötron kaynağının MCNP kod kullanılarak hesaplanan nötron enerji spektrumu .....	26
Şekil 4.2 Detektöre giren $\gamma$ -ışınının detektör kristali ile yapabileceği etkileşimlerden bazıları .....	28
Şekil 4.3 Nötron deteksiyonuyla ilgili bazı reaksiyonların enerjiye bağlı tesir kesitleri (Knoll, 2000) .....	31
Şekil 4.4 MCNP hesaplamalarda kullanılan sistemin geometrisinin şematik çizimi .....	33
Şekil 5.1 TNT içerisindeki hızlı nötron akısının kaynağın konumuna göre değişimi .....	36
Şekil 5.2 TNT içerisindeki ısıl ve epıısıl nötron akısının kaynağın konumuna göre değişimi .....	37
Şekil 5.3 $\text{BF}_3$ detektörlerinde net ısıl nötron akısının kaynağın konumuna göre değişimi .....	37
Şekil 5.4 Kaynağın konumuna bağlı olarak $\text{BF}_3$ detektörlerinde sinyal- gürültü oranının değişimi .....	38
Şekil 5.5 Kaynağın konumuna bağlı olarak $\text{NaI}$ detektörlerinde sinyal- gürültü oranının değişimi .....	39
Şekil 5.6 TNT deki nötron akısının farklı zırh malzemeleri için enerjiye bağlı değişimi .....	41
Şekil 5.7 Farklı zırh malzemeleri için enerji aralıklarında nötron akısı .....	42
Şekil 5.8 $\text{BF}_3$ detektörlerinde TNT li ortamda farklı zırhlar için nötron akıları .....	43
Şekil 5.9 $\text{BF}_3$ detektörlerde net nötron akıları .....	44
Şekil 5.10 $\text{NaI}$ detektörlerde TNT' nin gömülü olduğu ve olmadığı durumlar için gama spektrumu .....	47
Şekil 5.11 a) $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ reaksiyonu için spektrum kesiti .....	47
Şekil 5.11 b) $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$ reaksiyonu için spektrum kesiti .....	48
Şekil 5.11 c) $^{16}\text{O}(n,n'\gamma)^{16}\text{O}$ reaksiyonu için spektrum kesiti .....	48
Şekil 5.11 d) $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$ reaksiyonu için spektrum kesiti .....	49

Şekil 5.12 Zırh malzemeleri için NaI detektörlerde doz eşdeğerlerinin enerjiyle değişimi .....	50
Şekil 5.13 Moderatörün kireçtaşından yüksekliğine göre TNT deki hızlı ve ısıl nötron akısının değişimi .....	51
Şekil 5.14 Moderatörün kireçtaşından yüksekliğine göre BF <sub>3</sub> detektörlerinde ısıl nötron akısının değişimi.....	52
Şekil 5.15 Moderatörün yerden yüksekliğine göre NaI detektörlerine gelen nötron akısı.....	52
Şekil 5.16 Zırh genişliğine göre TNT deki ısıl ve hızlı nötron akısının değişimi .....	54
Şekil 5.17 Zırh genişliğine göre NaI detektörlerine gelen nötron akısı.....	54
Şekil 5.18 Zırh kalınlığına göre TNT deki ısıl nötron akısının değişimi .....	55
Şekil 5.19 Zırh kalınlığına göre BF <sub>3</sub> detektörlerde 0 – 1 keV enerji aralığında akı değişimi ..	56
Şekil 5.20 Zırh kalınlığına göre NaI detektörlerine gelen nötron akısı .....	56
Şekil 5.21 Deteksiyon sisteminin geometrisi .....	57
Şekil 5.22 TNT merkez ekseninden uzaklığın fonksiyonu olarak BF <sub>3</sub> detektörlerindeki net nötron akısı .....	58
Şekil 5.23 Kireçtaşı içinde TNT' nin derinliğine bağlı olarak TNT de değişen nötron akısı ..	59
Şekil 5.24 TNT de 1-20MeV/0,025eV nötron akısı oranının değişimi .....	59
Şekil 5.25 BF <sub>3</sub> detektörlerde farklı TNT derinlikleri için nötron akısının değişimi.....	60
Şekil 5.26 BF <sub>3</sub> detektörlerinde TNT' nin gömülü olduğu farklı derinlikler için nötron akısının değişimi .....	60
Şekil 5.27 Patlayıcının gömülü olduğu farklı derinlikler için NaI detektörlerinde sinyal-gürültü oranının değişimi.....	62
Şekil 5.28 Kireçtaşı içerisine gömülü farklı tipte patlayıcıların karşılaştırılması .....	64
Şekil 5.29 Kireçtaşı içerisine gömülü patlayıcıların diğer malzemeler ile karşılaştırılması ....	64
Şekil 5.30 Farklı malzemelerin BF <sub>3</sub> detektörlerde karşılaştırılması.....	65
Şekil 5.31 Kireçtaşı, TNT ve su için gama spektrumu.....	66
Şekil 5.32 Kireçtaşı, TNT ve polietilen için gama spektrumu .....	67
Şekil 5.33 Kireçtaşı ve patlayıcılar için gama spektrumu .....	67
Şekil 5.34 <sup>1</sup> H(n,γ) <sup>2</sup> H reaksiyonu için gama spektrum kesiti .....	68
Şekil 5.35 Farklı yarıçaplara sahip TNT mayınları için nötron akısı değerleri.....	70
Şekil. 5.36 TNT de nötron akısının nem miktarıyla değişimi .....	71
Şekil 5.37 1-20 MeV/0,025 eV enerjili nötron akısı oranının nem miktarı ile değişimi.....	72
Şekil 5.38 Kireçtaşı içinde değişen nem oranlarına göre BF <sub>3</sub> detektörlerinde kaydedilen nötron akısı .....	73
Şekil 5.39 BF <sub>3</sub> detektörlerinde net nötron akısının kireçtaşı ortamının nem oranı ile değişimi	73



Şekil 5.40 Farklı nem içeriklerinin mayın deteksiyonuna etkileri.....	75
Şekil 5.41 NaI detektörlerinde 10-11 MeV enerjili aralığındaki gamaların sayısı.....	76
Şekil 5.42 TNT de ısı nötron akısının nem miktarıyla değişimi .....	76
Şekil 5.43 Toprak içerisinde TNT' nin derinliğine bağlı olarak TNT de değişen nötron akısı	77
Şekil 5.44 TNT de 1-20 MeV/0.025 eV nötron akısı oranı.....	78
Şekil 5.45 Toprak içerisinde TNT' nin gömülü olduğu farklı derinlikler için BF <sub>3</sub> detektörlerinde nötron akısının değişimi.....	79
Şekil 5.46 Farklı malzemelerin BF <sub>3</sub> detektörlerinde karşılaştırılması.....	81
Şekil 5.47 Farklı yarıçaplı TNT mayınları için nötron akısı değerleri .....	83
Şekil 5.48 TNT de nötron akısının nem miktarıyla değişimi .....	84
Şekil 5.49 1-20MeV/0,025eV enerjili nötron akısı oranının nem miktarı ile değişimi.....	85
Şekil 5.50 BF <sub>3</sub> detektörlerinde toprak ortamından geri saçılan nötron akısı.....	85
Şekil 5.51 BF <sub>3</sub> detektörlerinde net nötron akısının değişimi.....	86
Şekil 5.52 NaI detektörlerinde 10,7- 11 MeV enerji aralığındaki gamaların sayımı .....	87
Şekil 5.53 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş TNT için gama spektrumu .....	88
Şekil 5.54 Toprak içerisine yerleştirilmiş TNT için NaI detektörlerindeki gama spektrumu ..	91
Şekil Ek 2.1 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş hidrojen için gama spektrumu .....	103
Şekil Ek 2.2 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş karbon için gama spektrumu .....	103
Şekil Ek 2.3 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş oksijen için gama spektrumu.....	104
Şekil Ek 2.4 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş azot için gama spektrumu.....	104
Şekil Ek 3.1 Toprak ortamına yerleştirilmiş hidrojen için gama spektrumu.....	105
Şekil Ek 3.2 Toprak ortamına yerleştirilmiş karbon için gama spektrumu .....	105
Şekil Ek 3.3 Toprak ortamına yerleştirilmiş oksijen için gama spektrumu.....	106
Şekil Ek 3.4 Toprak ortamına yerleştirilmiş azot için gama spektrumu .....	106

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Kara-mayınlarında kullanılan patlayıcıların bazı özellikleri .....	8
Çizelge 2.2 Formasyon içerisinde bulunabilecek zararsız malzemelere ait bazı özellikler. ....	9
Çizelge 2.3 Isıl nötron yakalama karakteristik gama ışınları (NNDC,[1]; Choi vd.,2006).....	15
Çizelge 2.4 Nötron inelastik saçılma gama ışınları .....	16
Çizelge 3.1 MCNP' de kullanılan hesap kartları .....	23
Çizelge 4.1 Gama ışını detektörleri için boyut, yoğunluk , çözünürlük, hız kapasitesi ve fiyat karşılaştırılması (Knoll, 2000).....	29
Çizelge 4.2 Nötron deteksiyonu için kullanılan ekzotermik reaksiyonlar (Tsoulfanidis, 1995).....	30
Çizelge 4.3 Nötron deteksiyonununda kullanılan yöntemler (Tsoulfanidis, 1995).....	31
Çizelge 4.4 Hesaplamalarda kullanılan detektör ve karamayınının yoğunluk ve geometrik özellikleri .....	34
Çizelge 5.1 Hesaplamalarda kullanılan elementlere ait kütle oranları ve malzeme yoğunlukları .....	40
Çizelge 5.2 TNT deki toplam nötron akısı .....	43
Çizelge 5.3 NaI detektöre gelen toplam nötron akısı .....	45
Çizelge 5.4 NaI detektörlerdeki gama sayımlarının zırh malzemelerine göre karşılaştırılması	45
Çizelge 5.5 NaI detektörlerdeki gama sayımlarının zırh kullanılmadığı durum için karşılaştırılması.....	46
Çizelge 5.6 NaI detektörler için nötron, gama ve toplam doz eşdeğerlerinin karşılaştırılması	50
Çizelge 5.7 Farklı boyutlardaki zırhlar için BF <sub>3</sub> detektörlerindeki ısıl nötron akısı .....	53
Çizelge 5.8 Farklı derinliklerde gömülü TNT için gama ışını sayım değerleri.....	61
Çizelge 5.9 Elementlere ait kütle oranları ve malzeme yoğunlukları.....	63
Çizelge 5.10 Malzemelerin nötron akıları ve kıyaslamaları .....	66
Çizelge 5.11 İncelenen malzemelere ait yoğunluk ve H oranı .....	69
Çizelge 5.12 Azotun 10,83 MeV enerjili gama ışını için sayım değerleri .....	69
Çizelge 5.13 Farklı yarıçaplara sahip TNT mayınları için FWHM değerleri .....	70
Çizelge 5.14 Farklı nem miktarlarına sahip kireçtaşı için yoğunluk değerleri.....	71
Çizelge 5.15 Farklı nem miktarları için BF <sub>3</sub> detektörlerindeki net nötron akısı değerleri .....	74
Çizelge 5.16 Farklı kaynak nötron sayıları için BF <sub>3</sub> detektörlerinde net nötron akısı .....	79
Çizelge 5.17 5 cm derinlikte gömülü TNT için gama ışını sayım değerleri .....	80
Çizelge 5.18 Malzemelerin nötron akıları ve kıyaslamaları (10 <sup>7</sup> nötron için) .....	82
Çizelge 5.19 Malzemelerin nötron akıları ve kıyaslamaları (10 <sup>8</sup> nötron için) .....	82

Çizelge 5.20 Farklı yarıçaplara sahip TNT mayınları için FWHM değerleri .....	83
Çizelge 5.21 Farklı nem miktarlarına sahip toprak için yoğunluk değerleri .....	84
Çizelge 5.22 MCNP hesaplamalarında kullanılan elementlere ait yoğunluklar .....	88
Çizelge 5.23 Kütle miktarlarının karşılaştırılmaları .....	89
Çizelge 5.24 Kütleli oranların karşılaştırılmaları .....	89
Çizelge 5.25 Atom değerlerinin karşılaştırılması .....	90
Çizelge 5.26 Elementsel oran değerlerinin karşılaştırılması .....	90
Çizelge 5.27 Kütle miktarlarının karşılaştırılmaları .....	91
Çizelge 5.28 Kütleli oranların karşılaştırılmaları .....	91
Çizelge 5.29 Atom değerlerinin karşılaştırılması .....	92
Çizelge 5.30 Elementsel oran değerlerinin karşılaştırılması .....	92
Çizelge Ek.1.1 Soğurulan nötronlar için kalite faktörü .....	102

## **ÖNSÖZ**

Doktora çalışmam süresince bana yol gösteren, sahip olduğu deneyimlerini benimle paylaşan tez danışmanım, Y.T.Ü. Fizik Bölümü Öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Metin SUBAŞI' ya sağlamış olduğu destek ve yardımları için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmamda daima akıl danıştığım, bilimsel konularda bilgisini ve yardımlarını benden esirgemeyen İ.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyeleri Sayın Prof.Dr. Nizamettin ERDURAN'a , Sayın Prof. Dr. Melih BOSTAN'a ve Y.T.Ü. Fizik Bölümü Öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Mehmet ŞİRİN' e içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak ta doğrudan ve dolaylı olarak yardımı dokunanlara ve her zaman bana destek olan olan canım aileme teşekkür ederim.

**Derya YILMAZ BAYSOY**

**Temmuz, 2010**

## ÖZET

Son zamanlarda, plastik kara-mayınlarının nükleer teknikler kullanılarak tespit edilmesi ile ilgili pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu tekniklerden birisi, nötronlarla indüklenen gama ışınlarının sayılmasına dayanır. Yani, belirli oranlarda karbon, hidrojen, oksijen ve azottan oluşan tüm plastik patlayıcılar, bu elementlerin ısıl nötron yakalama veya nötron inelastik saçılma sonucu yayınladıkları özel gama ışınları ölçülerek tespit edilebilir. Bir diğer teknik ise, ışınlanan hacim içerisindeki hidrojen konsantrasyonuna bağlı olarak geri saçılan düşük enerjili nötronların sayılmasıdır.

Mevcut çalışmada, bu iki tekniğin birlikte kullanıldığı bir mayın tespit sistemi tasarlanmış ve Monte Carlo hesaplama yöntemiyle sistemin verimliliği test edilmiştir. Geliştirilen modelde, ışınlamada kullanılmak üzere, taşınabilir bir izotropik nötron kaynağı ( $^{252}\text{Cf}$ ,  $10\mu\text{g}$ ), patlayıcılardan gelen karakteristik gama ışınlarının sayımı için üç adet NaI detektörü ( $3\times 3$  inç) ve geri saçılan nötronların sayımı için de sekiz adet  $\text{BF}_3$  detektör kullanılmıştır. Bunlar, nötronlar için moderatör ve zırlama görevi gören bir blok üstüne tespit edilmişlerdir. Blok malzemesi ve geometrisi, değişik boyutlarda farklı malzemeler (bor katlı parafin, bor katlı polietilen, bor ve kurşun katlı polietilen ve borik asit) denenerek belirlenmiştir. Hesaplamalar bor katlı parafinin en uygun malzeme olacağını göstermiştir. Tasarlanan sistemin mayın tespit ve tanımlamada etkinliği değişik toprak ortamları için nem oranı göz önüne alınarak test edilmiş, mayının cinsi, boyutu ve gömülme derinliği gibi parametrelerin sisteme getirdiği sınırlamalar belirlenmiştir.

Tasarlanan sistem için uygulanan Monte Carlo hesaplamaları, 5 cm derinlikteki ‘topuk mayınlarının’, nötron geri saçılma yöntemiyle, yaklaşık 1,5 km uzunluğundaki bir yol boyunca 1 saat içinde, daha derinlerdeki büyük kütleli patlayıcıların ise, nötronların indüklediği gama ışınlarını ölçerek daha uzun sürede tespit edilebileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kara-mayını , NaI ,  $\text{BF}_3$  ,  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağı, TNC, NIS

## ABSTRACT

### NUMERICAL EVALUATION OF A MINE DETECTION SYSTEM BASED ON NUCLEAR TECHNIQUES

Recently many studies have been reported on the detection of landmines by some nuclear techniques. One of them is based on the measurement of neutron-induced gamma rays. That is, all plastic explosives which are composed of certain amounts of carbon, hydrogen, oxygen and nitrogen can be characterized by measuring the characteristic gamma rays emitted from these elements in thermal neutron capture or inelastic neutron scattering reactions. In another technique, the anomaly in the volume can be defined by counting the low energy, back-scattered neutrons due to the hydrogen content of the irradiated volume.

In the present work, a model detection system which uses both these two techniques was designed and its efficiency was tested by applying the Monte Carlo calculation technique (MCNP). The system consists of a fast neutron source ( $^{252}\text{Cf}$ , 10 $\mu\text{g}$ ), three gamma-ray detectors (NaI, 3x3 inches) and eight neutron detectors ( $\text{BF}_3$ ) placed on a neutron moderating and shielding block. The effects of the block on the efficiency of the detection system were investigated using various materials (borated polyethylene, borated paraffin, borated – lead polyethylene and boric acid) in different dimensions. Borated-paraffin was found to be the best suitable material for the system. The system was further tested in various soil formations and its detection limits were determined considering the identity, size, burial depth of the land mine and moisture content of formations.

The Monte Carlo calculations revealed that the detection system can uncover an APM (NBS technique) buried at 5 cm under the limestone by scanning a distance of 1,5 km in one hour. In addition, it can characterize a massive plastic explosive buried deeper in a formation by counting the neutron induced gamma rays for less than 5 minutes.

**Keywords:** landmine, NaI,  $\text{BF}_3$ ,  $^{252}\text{Cf}$ , NIS, TNC

## 1. GİRİŞ

Terkedilmiş kara-mayınları, günümüzde dünyanın pek çok bölgesinde ciddi bir insani problemdir (Monin ve Gallimore, 2002). Son tahminlere göre, 70 ülkeden fazlasını etkilemekte olan 100 milyondan fazla terk edilmiş karamayını bulunmaktadır. Her yıl kara-mayınları yüzünden yanlışlıkla öldürülen insanların sayısının 25,000' i aştığına ve bunu aşan sayıda da sakatlanan insanın bulunduğu inanılmaktadır. Ölenlerin çoğunluğunu kadınlar ve çocuklar oluşturmaktadır. Ayrıca kayıpların çoğu şu anki teknoloji ile kullanılarak tespit edilmesinin zor olduğu küçük plastik, anti-personel mayınlardan (APM) kaynaklanmaktadır (Brooks, vd., 2004).

Bu nedenle plastik korumalı ve düşük metal içerikli mayınların tespit edilmesi için kullanılabilecek nükleer yöntemler araştırılmaktadır. Kullanılabilecek yöntemlerden biri nötron geri saçılma (NBS) yöntemidir. Bu yöntemde, toprak, hızlı nötron kaynağı kullanılarak ışınladığında ışınlanan hacimdeki hidrojen miktarına bağlı olarak ortamdan geri saçılan düşük enerjili nötronlar sayılır. APM lar içerisindeki hidrojen miktarı toprağinkinden çok daha yüksek olduğu için mayının yerleştirildiği bölge üzerindeki geri saçılan nötron akısındaki güçlü artış ile mayının varlığı belirlenebilir (Barbui, vd., 2001). NBS tekniğinin en büyük avantajı mümkün olan en hızlı yöntem olmasıdır. Mayın deteksiyonu, yeterince güçlü bir nötron kaynağı kullanıldığında bu yöntemle bir saniyeden daha az sürede yapılabilir. Bu nedenle, NBS sistemlerinin kara-mayınları için alan taramasında da kullanılabileceği ifade edilmektedir (Bom vd., 2006a; 2006b; Bom vd., 2008).

NBS tekniği, kara-mayınlarının, kimyasal patlayıcıların ve aynı zamanda kara-mayınlarının plastik muhafazalarında da bulunan hidrojenin konsantrasyonuna bağlı olan bir tekniktir. Bu nedenle, aynı zamanda topraktaki nem miktarında bağlı olan duyarlılığı bu tekniğin en büyük zayıflığıdır. Önceki sistemlerde, kara-mayınlarındaki hidrojen miktarı belirlenerek, topraktaki %10 nem içeriğine kadar karamayını çevresindekilerden ayırt edilebilmiştir. Bu nedenle, NBS tekniğinin Mısır, Libya ya da Orta Doğu ülkeleri gibi kurak yerlerde kullanımı çok daha avantajlıdır (Datema vd., 2002; Obhodas vd., 2004).

NBS tekniği, 1980'lerden beri, birkaç cins toprakta gömülü kara-mayınlarının tesbiti için çeşitli laboratuvarlarda denenmektedir. Son zamanlarda, nötron jeneratörü ve <sup>252</sup>Cf nötron kaynağı ile birkaç detektör tipine bağlı yeni sonuçlar elde edilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıdaki paragraflarda kronolojik olarak özetlenmiştir.

Brooks ve arkadaşları, nötron kaynağı olarak <sup>252</sup>Cf (  $2,7 \cdot 10^5$  n/s) ve geri saçılan nötronları

saymak için de  $^3\text{He}$  orantılı sayıcısı kullanarak bir naylon disk test objesini toprakta ayırt etmeye çalışmışlardır (Brooks vd. 2001). Hidrojen-yoğunluk-anomali-detektörü (Hydrogen-Density-Anomaly-Dedector (HYDAD)) olarak adlandırdıkları detektör sisteminde, düşük enerjili nötronların seçimi için bir tek kanallı analizör kullanmışlar ve bu analizörü toprakta herhangi bir kontrast farkedildiğinde duyulabilir "beep" çıkışı sağlayan bir elektronik düzeneğe bağlamışlardır. Elde ettikleri test sonuçlarında detektörün hassasiyetinin 5 cm derinlikten sonra hızla düştüğünü, ancak, bu derinlikten sonra patlayıcının tehdit oluşturmayacağı için operatörün çalışmasının sakıncalı olmadığını belirtmişlerdir.

Datema ve arkadaşları (Datema vd, 2001a), tasarladıkları DUNBLAD adlı detektör sisteminde, 1,85 MBq (220.000 n/s) aktiviteli  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağı, 15 cm etkin uzunluğunda 2,5 cm çapında iki adet  $^3\text{He}$  detektörü ve detektörler üzerinde nötron reflektörü olarak 20x20x5 cm boyutlarında karbon moderatör kullanarak NBS tekniğini uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmada, kumdaki nem oranının derinlere inildikçe arttığını ve bu oranın yüzeyde %0,2 iken, 10 cm de %2 olduğunu ve 20 cm de %4,2 ye kadar da artmaya devam ettiğini belirtmişlerdir. TNT ve RDX e oldukça benzeyen toz melamin malzeme ve muhafaza kabı olarak da delrin kullandıkları çalışmalardan elde ettikleri verilere göre, 6 cm çapındaki anti-personel mayını maksimum 10 cm derinlikte ve 20 cm çapında naylon muhafazalı anti-tank mayını da maksimum 20 cm derinlikte 20 s ölçüm sürelerinde tesbit etmişlerdir. Bu çalışmalarda, umut verici sonuçlar elde etmelerine rağmen kullandıkları detektör sisteminin pek çok kusur gösterdiği için detektör sistemini yeniden tasarlayarak (Datema vd, 2001b) kaliforniyum kaynakla birlikte sekiz adet  $^3\text{He}$  detektör kullanmışlardır. Detektör sisteminin bu versiyonunda optimum geometri için Monte Carlo simülasyonları yaptıklarında, sinyal-gürültü oranınının (SNR) artırılmasının gerektiğini ve bu deteksiyon sistemi ile NBS tekniğinin kuru topraklar ve düz zeminlerle sınırlı olduğunu belirtmişlerdir.

Maucec ve Meijer, yine nötron geri saçılma tekniği ile, kullanımı basit bir mayın deteksiyon sisteminde, MCNP4C' yi kullanarak Monte Carlo simülasyonları gerçekleştirmişlerdir (Maucec ve Meijer, 2002). 4,5 cm çapında 10 cm uzunluğunda ve kaliforniyum kaynağın 5 cm yukarısına yerleştirilmiş bir  $^3\text{He}$  detektör ile farklı malzeme ve değişik dış koşullar için simülasyonlar yapmışlardır. Özellikle kireçtaşı ortamı içerisindeki nemin etkisini incelemişlerdir. MCNP hesaplamalarının sonuçlarında, bu sistem için, NBS tekniğinin az gözenekli homojen kireçtaşı ortamlarında uygulanabileceğini, TNT' nin kuru kireçtaşı içerisinde, tahta hariç diğer hidrojen içeren malzemelerden ayırt edilebildiğini, silisli parçalardan oluşmuş kuru kum içerisinde ise TNT ve tahtanın da ayırt edilebilebildiğini



belirtmişlerdir. Fakat %5 neme sahip kireçtaşı ortamında TNT tesbit edilemediğini söylemişlerdir.

Bom ve arkadaşları da, tasarladıkları detektör sisteminde,  $^{252}\text{Cf}$  ( $10^6$  n/s ) nötron kaynağı ve 16 adet  $^3\text{He}$  detektörü kullanarak kum ortamına yerleştirdikleri, 6x4 cm boyutlarında polietilen ve naylon örnekler için maksimum deteksiyon derinliğinin 15 cm, anti-tank mayın olarak kabul ettikleri 28x6 cm boyutlarındaki PVC muhafazalı melamin için de 25 cm olarak belirlemişlerdir (Bom vd., 2008).

Ochbelagh ve grubu, NBS yöntemi kullanarak MCNP kod ile, Am-Be nötron kaynağı ve  $\text{BF}_3$  nötron detektörü için uygun zırh malzemesini araştırmışlar, NBS tekniğinin topraktaki nem miktarının %14' üne kadar uygulanabilir olduğunu belirlemişlerdir (Ochbelagh vd., 2009).

Nötron sorgulama sistemlerinde, genellikle plastik mayınların içeriğinde bulunan C, N, O ve H gibi diğer elementlerin tespit edilmesi ile ilgili de çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda nötronların C, N, O ve H ile yaptığı etkileşmelerden meydana gelen (bu elementler için sırasıyla 4,95, 5,27, 0,87 ve 2,22 MeV olan) ısıl nötron yakalama karakteristik gama ışınları deteksiyonu kullanılmaktadır. Özellikle, Azot çekirdeğinden ısıl nötron yakalama sonucu yayılan 10,83 MeV enerjili karakteristik gama ışınları, çok düşük tesir kesitine (11,3 mb) sahip olmasına rağmen  $^{29}\text{Si}$  dan gelen 10,61 MeV enerjili zayıf geçiş (0,37 mb) dışında başka bir rekabet edici reaksiyon bulunmadığından dolayı gömülmüş patlayıcıların parmak izi gibi görülmektedir (Buffler, 2001; Pazirandeh vd., 2006).

Kuznetsov vd. (2003, 2004), gizli patlayıcı ve diğer tehlikeli maddelerin belirlenmesi için, nötronlarla indüklenen gama ışınları tekniğine dayalı olan nanosaniye nötron analiz tekniği (NNA) geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, nötron kaynağı olarak iki farklı nötron kaynağı, nano saniyelik  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağı ve 14 MeV nötron jeneratörü kullanmışlardır. Bu sistemde,  $\gamma$ -ışınlarını detekte etmek için BGO (bizmut germanate) detektörü kullanmışlardır. Geliştirilen prototip,  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağı kullanılarak 400 gr patlayıcının belirlenmesini 10 dakikada yapabilme yeteneğine sahiptir.

MCNP4C Monte Carlo simulasyon kodu kullanan Pazirandeh ve grup arkadaşları yaptıkları çalışmada, 5 Ci aktiviteye sahip Am-Be nötron kaynağı ve su tankı içerisinde yerleştirilmiş bir NaI(Tl) detektörü ile, azotun 10,829 MeV enerjili ısıl nötron yakalama gama ışını ile tek ve çift kaçış piklerini inceleyerek deteksiyona uygun kaynak- hedef- detektör mesafesini ve patlayıcı deteksiyonunda en iyi sonucu veren topraktaki nem miktarını araştırmışlardır. Topraktaki nem miktarı arttıkça yüksek enerji bölgesindeki gama ışınlarının da arttığı

görülmüştür. Tasarladıkları deteksiyon geometrisi için, %20 - %22 nem oranları değerinde detektöre ulaşan gama ışını şiddetinin arttığını belirtmişlerdir (Pazirandeh vd., 2006).

Bir başka çalışmada, Takahashi ve grubu, D-D füzyon nötron kaynağı ( $3,8 \times 10^6$  n/s ) kullanarak, sırasıyla hidrojen ve azottan gelen 2,22 MeV ve 10,83 MeV enerjili  $\gamma$  -ışınlarını detekte eden bir sistem tasarlamışlardır (Takahashi vd. 2007). Çalışmada NaI (TI) sintilatör ile çevrelenmiş BGO sintilatörünü,  $\gamma$ -ışınlarını detekte etmek için kullanmışlardır. Patlayıcı yerine kullandıkları 100 gr melamini 10 cm derinlikte azot un gama ışını ile detekte edilebilmişlerdir. Daha sonra da bu çalışmayı 2 detektörle tekrarlamışlar ve 800 g melamin içinde benzer sonuçlar bulmuşlardır (Yoshikawa vd., 2007).

Clifford ve grubu da, geliştirdikleri ILDS adlı karamayını deteksiyon sisteminde bir dizi farklı sensörleri taşıyan uzaktan kumandalı bir araç kullanmışlardır (Clifford vd., 2007). Sistemleri, dört adet NaI(Tl) detektörü ve  $100 \mu\text{g}$   $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağı içermektedir. Bu sistem azot'un 10,835 MeV karakteristik  $\gamma$ -ışını deteksiyonuna dayandırılmış ve anti-tank mayının detekte edilebildiği derinlik araştırılmıştır. Reçine muhafazalı ve 1,2 kg azot kütleli anti-tank mayını 2 saniyede sadece yüzeydeyken ve 28 s de 10 cm derindeyken tesbit edebilmişlerdir. Plastik muhafazalı 1 kg azot kütleli anti-tank mayını ise 69 saniyede 10 cm derinlikte tesbit edebilmişlerdir. 1000 saniye ölçüm süresinde de anti-tank mayının 30 cm derinlikte detekte edilebileceği bulunmuştur.

Bu tezin amacı, ısıl nötron geri saçılma ve nötronlarla indüklenmiş gama tekniklerinin birlikte uygulandığı, taşınabilir bir plastik patlayıcı ve mayın deteksiyon sisteminin tasarlanması ve bu iki yöntemin mayın tespitinde etkinliğinin araştırılmasıdır. Deteksiyon sisteminde bu iki yöntemin birleştirilmesindeki temel fikir, öncelikle, ısıl nötron geri saçılma tekniği kullanılarak topraktaki hidrojen anomalisinin hızlı bir şekilde belirlenmesi, daha sonra da, NBS yöntemine göre çok çok daha yavaş fakat oldukça kesin bilgiler sağlayan nötronlarla indüklenmiş gama ışınlarının sayımı yoluyla plastik patlayıcı ve mayınların belirlenmesidir. Tezde, MCNP4C2 Monte Carlo simulasyon kodu kullanılarak,  $10 \mu\text{g}$   $^{252}\text{Cf}$  izotopik fisyon kaynağının yer aldığı bir deteksiyon sistemi tasarlanmıştır. Geri saçılma yoluyla gelen nötronların sayımı için sekiz adet  $\text{BF}_3$  detektörü kullanılmış, ayrıca, nötronlarla indüklenen karakteristik  $\gamma$ -ışınlarının sayımı içinde NaI detektörlerden yararlanılmıştır Böylece,  $\text{BF}_3$  detektörlerle birlikte üç adet NaI detektörü kullanılarak oluşturulan deteksiyon sisteminin verimliliğinin belirlenmesi için simulasyonlar yapılmıştır.

Aşağıdaki paragraflarda, sırasıyla, tez konusuyla ilgili temel bilgiler, hesaplamalarda kullanılan

MCNP4C2 kodu, nötron sorgulama sistemi ve geometrisi, simulasyon çalışmaları, ve sonuçların değerlendirildiği tartişma kısmı verilmektedir.

## 2. TEMEL BİLGİLER

### 2.1 Mayın ve Mayın Çeşitleri

Mayın; kara, hava ve deniz taşıtlarını tahrip etmek, personeli yaralamak veya öldürmek için tasarlanan genelde koruyucu bir kasa veya kılıf içinde bulunan patlayıcı ve onu harekete geçiren düzeneğe verilen addır.

İçi patlayıcı madde veya kimyasal maddelerle dolu, toprak üstüne veya bir kaç cm derine gömülen mayınlara ise kara-mayınları adı verilir.

Dünya üzerinde çok fazla bulunması, savaş ve terörizmin sık olduğu bölgelerde yaşayan insanlar için büyük tehlike oluşturması nedeniyle araştırmaların büyük çoğunluğu kara mayınlarına yöneliktir.

Kara-mayınları, düşük tahribat gücüne sahip anti-personel (APM) ve yüksek tahribat gücüne sahip anti-tank (ATM) mayınlar olmak üzere iki ana grupta toplanırlar.

Anti-tank mayınları, tank veya zırhlı savaş aracını imha edecek veya yatak takımını ağır bir biçimde tahrip ederek hareketsiz duruma getirecek kadar patlayıcı içeren mayınlardır. Bu mayınların ateşleyicileri yüksek basınç gerektirdiği için yaya bir kişinin temas etmesi patlamasını sağlamamaktadır.

Düşük tahribat gücüne sahip anti-personel mayınları ise anti-tank mayınlar gibi taşıtlara karşı kullanılan mayınların etkisiz hale getirilmesini önlemek için tuzak olarak, önemli askeri noktaları savunmak, sınır hatları boyunca askeri ve sivil geçişlere engel olmak için kullanılır. Bu tür mayınlar, askeri nedenlerden dolayı, genellikle yaklaşan veya temas eden kişiyi öldürmek amaçlı değil, daha çok temas eden kişiyi yaralamak üzere geliştirilmiştir.

AT ve AP mayınlar her türlü şekil ve büyüklükte olabilirler. Muhafaza kasaları metal, plastik ve ahşap gibi malzemelerden yapılmış olabilir. Günümüzde bir çok anti-personel mayında plastik malzemelerden yapılmış olan mayın kutusu bulunmaktadır. Bu mayınların sadece ateşleme pimi metal olabileceği için metal detektörü ile bulunmaları zordur.

AP mayınları etkilerine göre infilak ve parça tesirli mayın olarak sınıflandırılabilirler. Anti-tank ve anti-personel mayınları şekil ve büyüklük bakımından karşılaştırsak;

Anti-personel kara mayınları genellikle silindir veya disk şeklinde olup çapları 20 ile 125 mm ve kalınlıkları 50 ile 100 mm arasında değişirken kütleleri 30 gr civarındadır. AP mayınlarda

patlayıcı malzeme olarak genellikle TNT, Tetryl ve CompB kullanılır. AP mayınlar genellikle yüzeye yakın gömülür ve maksimum 50 mm kadar derinlikte olabilir.

Anti-tank kara mayınları genellikle tepesi kesilmiş silindir yada köşeleri yuvarlatılmış kare biçiminde olup çapları 150 ile 300 mm ve kalınlıkları 50 ile 90 mm arasında değişir. Patlayıcı malzeme olarak genellikle TNT, CompB ve RDX kullanılır. Toprak yüzeyinde büyük patlamalara sebep olan AT mayınlar 150 mm'den daha derinlerde gömülmüş olabilir (Hussein vd., 2000). Şekil 2.1 de en az 350 çeşiti bulunan anti-personel ve anti-tank mayınların dan birkaç tanesi gösterilmiştir.

Eğer plastik muhafazalı AP mayınlar detekte edilebilirse AT mayınların da detekte edilmesi kolaylaşacaktır. Bu nedenle, kara mayınının deteksiyonu için yapılan araştırmalarda öncelik AP mayınlardadır.



Şekil 2.1 Çeşitli anti-tank ve anti-personel mayınlar

Patlayıcılar genel olarak düşük ve yüksek patlayıcılar olarak iki kategoride sınıflandırılır. Düşük patlayıcılar oksijen içeren yanıcı maddelerdir ve alev almak üzere tasarlanmışlardır. Yüksek patlayıcılar da ise hacim ve basınçta hızlı değişiklikler üretmek, çok kısa süre içinde

yüksek miktarlarda enerji açığa çıkarmak için kimyasal reaksiyon malzemeleri bulunmaktadır. Patlayıcıların bileşimi de genellikle saf kimyasal bileşikler ve yakıtlarla birleşince yanıcı olan oksidan maddeler olarak iki kategoride sınıflandırılır.

Askeri patlayıcılar dikkate alındığında, saf kimyasal bileşikler RDX, PETN ve HMX içerirken yakıtlarla birleşince yanışa yardımcı olan oksidan maddeler ise amonyum nitrat ile yakıt ve kara barut ile talaş içerir (Davis, 1972).

Çizelge 2.1 de kara-mayınlarında kullanılan patlayıcıların kimyasal formülleri, yoğunlukları ve stokiyometrik oranları listelenmiştir. Çizelgeden görülebileceği gibi pek çok patlayıcı oksijen ve azot içeriğince zengindir. Büyük çoğunluğu Birinci ve İkinci Dünya Savaşı sırasında üretilen TNT (2,4,6-Trinitrotoluen) yaklaşık son 100 yıldan beri en yaygın olarak kullanılan askeri patlayıcıdır. İkinci Dünya Savaşı sırasında üretilen ve TNT den sonra bugünde hala çok yaygın olarak kullanılan ikinci plastik patlayıcı da RDX (Hexogen) patlayıcısıdır. PETN (Nitropenta) ve çok güçlü ve pahalı bir askeri patlayıcı olan HMX (Octogen) de plastik patlayıcılardandır (Bruschini, 2001). Çizelge 2.2 de ise kara-mayınlarının bulunduğu ortam içerisinde bulunabilecek bazı zararsız malzemelerin kimyasal formülleri, yoğunlukları ve stokiyometrik oranları verilmiştir.

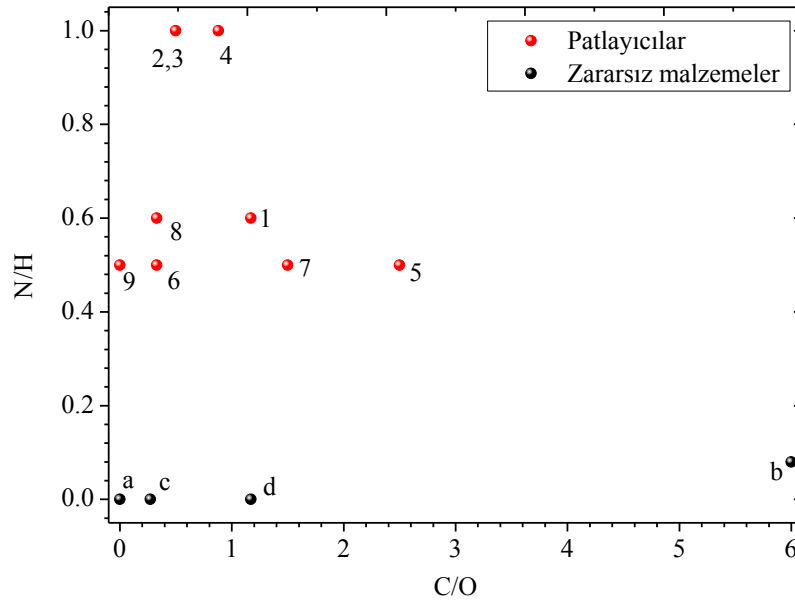
Şekil 2.2 de, Çizelge 2.1 ve 2.2 deki oranlar kullanılarak, azotun hidrojene oranının, karbonun oksijene oranına göre çizimi verilmiştir. Patlayıcı ve diğer malzemelerin stokiyometrik oranlarının birbirlerinden farkedilir biçimde ayrıldığı görülmektedir.

Çizelge 2.1 Kara-mayınlarında kullanılan patlayıcıların bazı özellikleri

	Patlayıcılar	Kimyasal Formül	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	N/H	O/H	C/H	C/O
1	TNT	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	1,65	0,6	1,2	1,4	1,17
2	RDX	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	1,83	1	1	0,5	0,5
3	HMX	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>8</sub> O <sub>8</sub>	1,96	1	1	0,5	0,5
4	Tetryl	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>5</sub> O <sub>8</sub>	1,73	1	1,6	1,4	0,88
5	PETN	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1,78	0,5	0,25	0,63	2,5
6	EGDN	CH <sub>2</sub> NO <sub>3</sub>	1,49	0,5	1,5	0,5	0,33
7	DNB	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1,58	0,5	1	1,5	1,5
8	NG	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>9</sub>	1,59	0,6	1,8	0,6	0,33
9	AN	H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,59	0,5	0,75	0	0

Çizelge 2.2 Formasyon içerisinde bulunabilecek zararsız malzemelere ait bazı özellikler.

	Malzeme	Kimyasal Formül	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	N/H	O/H	C/H	C/O
	Parafin	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	0,9	0	0	0,48	---
	Polietilen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,92	0	0	0,50	---
A	Su	H <sub>2</sub> O	1	0	0,5	0	0
B	Naylon	C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	1,15	0,08	0,08	0,46	6
C	Tahta	---	0,5	0	0,03	0,009	0,272
D	Kağıt	---	0,25	0	0,52	0,61	1,17



Şekil 2.2 Patlayıcı ve zararsız malzemeler için stokiometrik oranların karşılaştırılması

## 2.2 Mayın Tespit Yöntemleri

Bilinen en iyi AP mayın deteksiyon cihazı metal detektördür (MD). Bu deteksiyon tekniği elektromanyetik indüksiyon prensibine dayanır. MD lerinde bir bobin tarafından oluşturulan zaman bağımlı birincil manyetik alan, metalik nesnelere içerisinde Eddy akımlarının oluşmasına neden olur ve Eddy akımlarının yarattığı ikincil manyetik alan MD lerindeki diğer bir bobin tarafından detekte edilir. Böylece şüpheli bölgenin taranması sırasında, mayının bulunduğu yer sebep olduğu manyetik alan değişimi ile tesbit edilir. Bu deteksiyon tekniği, neredeyse bütün kara-mayınlarının en azından küçük miktarlarda metal içerdiğini (>10g) kabul eder. Temelde mayınların deteksiyonu için çok hassastır. Fakat, toprak içerisinde bulunan şarapnel parçaları veya diğer metalik enkazlar gibi metalik kalıntılar sorun

yaratmaktadır. Örneğin, eski çatışma bölgelerinde düşük metal içeriği olan AP mayınların deteksiyonunda, metalik enkazlardan gelen tepkilerin sayısı, kara mayınlarından gelen tepkilerden 100' den fazla faktör tarafından aşılabilir. Tüm tepkilerin incelenmesi gerekliliği, mayınlı bölgenin dōşeli mayınlardan temizlenme hızının azalmasına ve onların ortadan kaldırılmasına yönelik maliyetin artmasına neden olur (Brooks vd., 2004).

Patlayıcı deteksiyon yöntemi genel olarak iz ve kütle analizi olarak iki ana grupta sınıflandırılır. İz analizi yöntemi, patlayıcıların gram türünden sınıflandırılması ile ilgilidir. Patlayıcının moleküllerinin hava veya toprak çevresindeki örneklerde belirlenmesine dayanır. Kütle analizi yöntemi, fiziksel araştırma, kimyasal kimlik analizi, X- ışını ve gama ışını görüntüleme, nükleer kuadrupol rezonans ve nötron sorgulama sistemlerini içerir. Fiziksel araştırma, patlayıcının personel tarafından görsel olarak tanınmasıdır. Ancak patlayıcı büyük olasılıkla gizlenmiş veya gömülmüş olacağı için element analizi gerekmektedir.

Burada patlayıcı deteksiyonu için kullanılan nükleer tekniklerden nükleer kuadrupol rezonans ve nötron sorgulama sistemleri kısaca tanıtılacaktır.

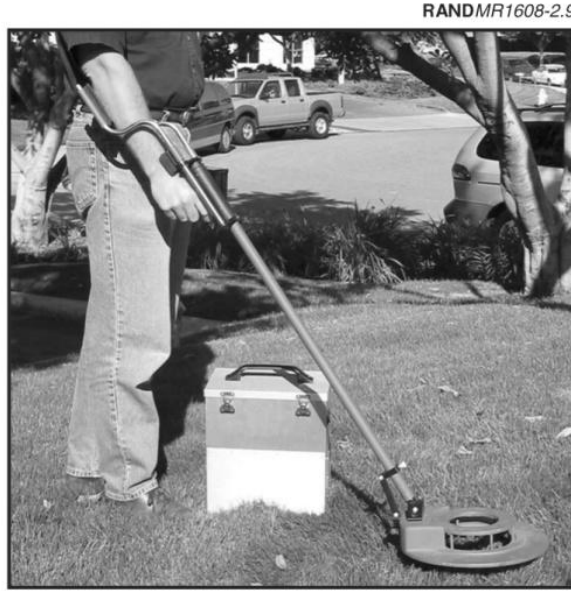
### **2.2.1 Nükleer kuadrupol rezonans (NQR) sistemleri**

Nükleer kuadrupol rezonans (NQR) , çekirdeklerin doğal nükleer manyetik momentlerindeki farklılıkları avantaj olarak kullanan bir tekniktir. Elemental analiz, hedef içindeki spin durumlarında çekirdeği uyarmak için kısa radyo frekans pulsları kullanılarak gerçekleştirilir. Uyarılan çekirdek daha sonra karakteristik frekanslarda foton yayınlar. Çekirdeğin tepkisi moleküler yapısına da bağlı olabilir. Böylece, aynı elementleri içeren ama farklı moleküler yapıları olan malzemeleri de ayırt etmek mümkün olur.

Nükleer Kuadrupol rezonans tekniği, patlayıcılarda dahil olmak üzere özel kimyasal bileşiklerin tespit edilmesi için kullanılabilir. Bu teknik, diğer tekniklerde rastlanan yanılıcı ve ayırt edilmesi zor sinyaller yerine, çok daha karakteristik sinyal algılamaya imkan vermesi bakımından üstün durumdadır. Şekil 2.3 de taşınabilir bir NQR mayın detektörü görölmektedir.

NQR' ın kara-mayınları için en belirgin özelliği, sinyallerin sadece belirli patlayıcı miktarlarının varlığı durumunda olmasıdır. NQR sinyali patlayıcının varlığının tespiti ve tanımlanmasının yanısıra, patlayıcının miktar ve derinliğinin de tahmin edilmesini sağlar.





Şekil 2.3 Taşınabilir NQR mayın detektörü (Garroway vd, 2001)

Sinyal-gürültü oranının (SNR) çok düşük olması nedeniyle girişim problemleri yaşanmasına rağmen, yanlış alarm durumlarında bile kabul edilebilirliği yüksek özgün NQR sinyalleri elde edilebilmektedir. SNR, patlayıcının sorgulama süresinin kareköküyle ve kütlesiyle lineer orantılı olarak artar. Böylece, yeterli sorgulama süresi ile, NQR için neredeyse mükemmel sonuçlar elde edilebilir.

NQR tekniğinin en büyük zaafı, çoğu patlayıcının içinde bulunan TNT' e ait NQR sinyallerinin, kendi nükleer özelliğinden dolayı, RDX ve Tetryl den çok daha zayıf olmasıdır. Bu da çok küçük SNR' a neden olur. Ayrıca TNT, yine nükleer özelliklerinden dolayı uzun sorgulama zamanı gerektirir ve bu da SNR'yi düşürür.

Diğer bir önemli sınırlama ise, NQR' ın çevreden gelen RF' ların girişimine maruz kalmasıdır. Bu da, TNT' nin deteksiyonunda bir problem oluşturur. Çünkü TNT den cevap üretmesi için gerekli olan frekans (790-900 kHz ) AM radyo bandında bulunmaktadır.

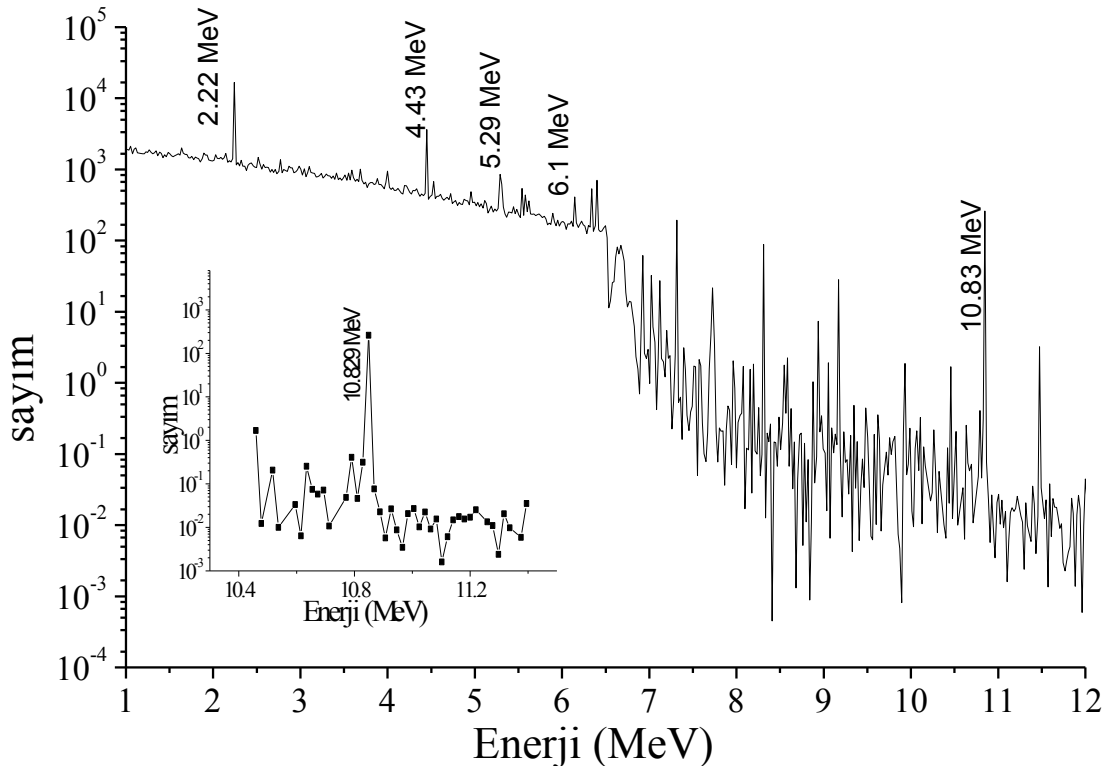
NQR tekniğinin bir diğer zayıflığı da, RF dalgalarının metal kasalı patlayıcıların içine nüfus edememeleri nedeniyle tespit yapamamalarıdır. Aynı zamanda sıvı patlayıcıları da algılayamaz. Ancak anti-personel mayınların çoğu plastik muhafazalı ve pek azında sıvı patlayıcılar kullanılması nedeniyle bu çok büyük bir kusur değildir.

NQR deteksiyonu, bobini ile patlayıcı arasındaki uzaklığa çok bağlıdır. Bu yüzden bobin mutlaka toprağa çok yakın olmalıdır. Bu yüzden, engebeli ve kırsal arazilerde kullanımı

problemlili olabilir. Bunlara ek olarak, Şimdiye kadar yapılan çalışmalardan anlaŐıldığına göre, doğru ölçümler için sabit deteksiyon gerekmektedir. Deteksiyon sırasında sistemin hareket ettirilmesi SNR' yi önemli miktarda düşürür.

### 2.2.2 Nötron sorgulama sistemleri

Nötron ölçümlerine dayanan mayın tarama sistemlerinde, genellikle, nötronlarla indüklenmiş gama spektroskopisinden yararlanılır. Kaynaktan çıkan nötronlar, hedefteki çekirdekleri uyarırlar. Uyarılan her bir ekirdek 1-11 MeV enerji aralığında gama ışını yayınlar. Bir dizi gama ışını detektörleri de gama ışınlarını detekte ederler ve gama ışınlarının enerjisine karşılık gelen pikleri içeren spektrumunu oluŐtururlar. Bu pikler hedefin izotopik içeriğini tesbit etmek için daha sonra analiz edilebilir. Patlayıcının varlığı, her bir karakteristik izotopun sinyal gücü üzerinden oldukça kolay bir Şekilde tesbit edilebilir. Bu sistemler, benzer Z'li elementler kolaylıkla ayrılabilđiđi için oldukça etkindirler. Örneğin, azot (Z=7) için karakteristik gama ışını 10,83 MeV iken, oksijen (Z=8) için karakteristik gama ışını 6.1 MeV dir. Şekil 2.4 de kara-mayınlarında çoğunlukla kullanılan patlayıcılardan biri olan TNT için gama ışını spektrumu verilmiştir.



Şekil 2.4 TNT için MCNP kod kullanılarak elde edilen gama ışını spektrumu

Bu spektrum, MCNP kodu kullanılarak çok yüksek miktardaki TNT patlayıcısının  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağının nötronları ile doğrudan ışınlanması sonucunda TNT den yayımlanan gama ışınlarının bir nokta detektör ile sayımı sonucunda elde edilmiştir.

Karakteristik gama ışınları başlıca 3 nötron reaksiyonunun sonucudur.

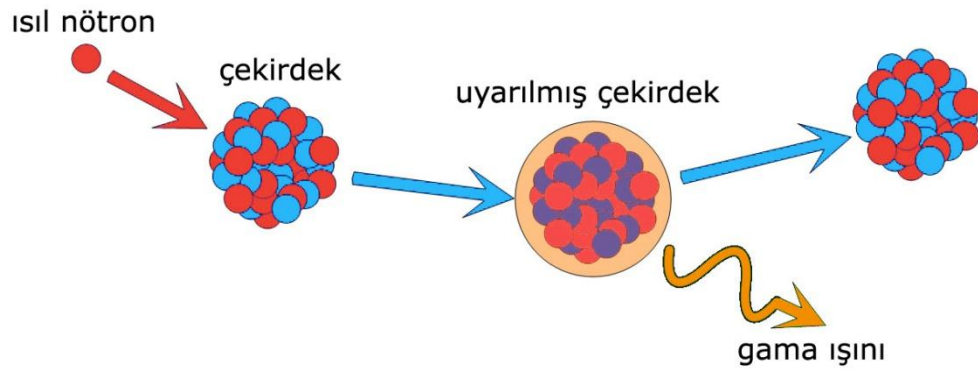
- Nötron uyarmalı-foton deteksiyonu
  - Nötron yakalama gama ışınları
  - Nötron inelastik saçılma gama ışınları
  - Nötron aktivasyon
- Nötron uyarmalı- nötron deteksiyonu
  - Nötron moderasyon
  - Nötron elastik rezonans saçılma
  - Nötron inelastik saçılma
- Foton uyarmalı-nötron deteksiyonu
  - Fotonötron emisyonu

İleriki sayfalarda bu deteksiyon yöntemlerinden kısaca bahsedilecektir.

## 2.2.2.1 Nötron uyarmalı-foton deteksiyonu

### 2.2.2.1.1 Nötron yakalama gama ışınları (Isıl Nötron Analizi)

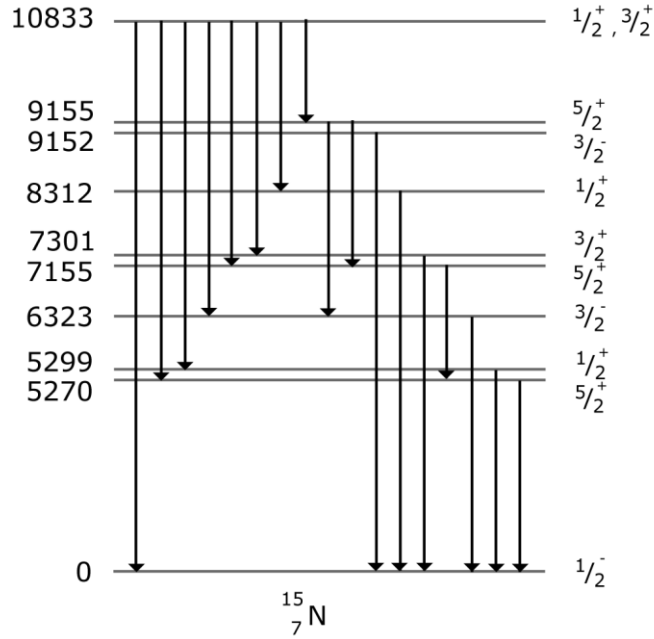
Termal (ısıl) nötron (0,025 eV) çekirdek tarafından yakalandığında çekirdek uyarılmış duruma geçer ve gama ışını yayınlarken temel seviyeye döner (Şekil 2.5). Isıl nötron yakalama reaksiyonu  ${}^A_Z(n,\gamma) {}^{A+1}_Z$  şeklindedir.



Şekil 2.5 Isıl nötron yakalama reaksiyonu

Toprak ve mayınlarda bulunan pek çok malzeme ısıl nötron yakalama yoluyla gama ışınları yayınlıyor. Kara-mayınlarında kullanılan patlayıcılar azot içeriğince zengindir. Toprakta azot miktarı %0,07 den daha az iken kara-mayınlarında kullanılan patlayıcılarda %18 ile %38 arasında değişmektedir. Yapılan araştırmalar azotun 10,835 MeV enerjili geçişi üzerine

yoğunlaşmıştır (Şekil 2.6). Çünkü patlayıcının varlığının göstergesi olan azot için bu enerjide  $^{29}\text{Si}$  dan gelen 10,611 MeV enerjili zayıf geçiş dışında hiç bir rekabet edici reaksiyon bulunmamaktadır (MacDonald, 2003).



Şekil 2.6  $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$  reaksiyonuyla uyarılan  $^{15}\text{N}$  için 10833 keV enerji seviyeleri (Debertin,1988)

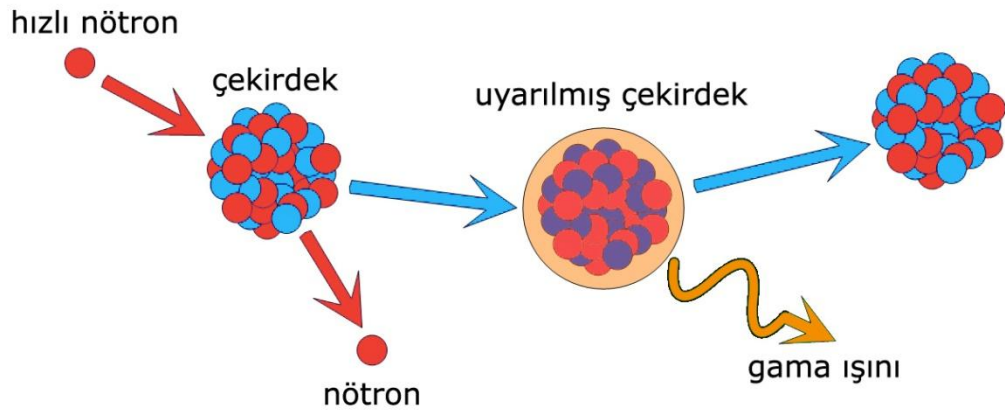
Isıl nötronlar aynı zamanda hidrojen ve silisyum'u aktive etmek için de kullanılabilir. Bu elementler için baskın karakteristik gama ışınları, sırasıyla, 2,22 MeV ve 3,54 MeV enerjiye sahiptirler. Bütün askeri patlayıcılar %2 ile %3 oranında hidrojen içerirken, toprak içerisindeki su miktarına bağlı olarak farklı oranlarda hidrojen konsantrasyonu ölçülebilir. Isıl nötron aktivasyon sistemlerinde, silisyum patlayıcıda değil, sadece toprakta bulunduğu için, topraktaki nemin etkilerini belirlemekte hidrojen-silisyum oranından yararlanılabilir. Ancak, toprakta patlayıcı dışında hidrojen içeren başka bir malzeme olması halinde ölçümler yanıltıcı olabilir. Örneğin, toprakta bulunan bir tahta parçasıda silisyumun varlığının göstergesi olmadan aynı miktarda hidrojen hatta azot içeriğini gösterebilir. Çizelge 2.3 de patlayıcılarda bulunan başlıca elementlerin güçlü ısıl nötron yakalama karakteristik gama ışınları ve tesir kesitleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 Isıl nötron yakalama karakteristik gama ışınları (NNDC,[1]; Choi vd.,2006)

Element	Isıl Nötron Yakalama Gama Işınları (keV)	$f\gamma$ (%)	$\sigma$ (mb) ( $E_n=0,0253$ eV)
H	2223,25	100	332,6
C	1261,76	47,9	1,24
	3683,92	47,6	1,22
	4945,3	100	2,61
N	5269,16	100	23,6
	5297,83	71,1	16,8
	5533,39	65,5	15,5
	10829,1	47	11,3
O	870,71	100	0,177
	1087,93	82	0,158
	2184,48	82	0,164

### 2.2.2.1.2 Nötron inelastik saçılma gama ışınları (Hızlı Nötron Analizi)

Enerjisi 1 MeV'e eşit veya daha büyük olan hızlı nötronların çekirdeği uyarması halinde, çekirdek ani (prompt) gama ışınları yayınlarken temel enerji düzeyine döner (Şekil 2.7). Bu reaksiyonlar, çekirdeği ilk veya daha yüksek uyarılmış durumlarına çıkarabilmek için bir eşik enerjisi gerektirirler. Nötron inelastik saçılma reaksiyonu  $X(n,n'\gamma)X$  şeklindedir.



Şekil 2.7 Hızlı nötron inelastik saçılma reaksiyonu

Toprak ve karamayını içinde hızlı nötronların inelastik saçılması yoluyla uyarılan çekirdekler karakteristik gama ışını yayınlarken temel enerji düzeyine döner. Hızlı nötron kaynağı olarak en pratik olanı 14,8 MeV nötron enerjili D-T nötron jeneratörüdür.  $^{12}\text{C}$  hızlı nötron inelastik saçılma reaksiyonundan 4,44 MeV enerjili fotonların üretimi büyük tesir kesitine sahiptir. Kara-mayınlarının belirlenmesi için ısıl nötron analizinde öne çıkan azot ise bu enerjide çok küçük tesir kesitine sahiptir ve

herhangi bir avantaj sunmamaktadır. Hızlı nötron analizi, patlayıcıları topraktaki malzemelerden ayırmak için C:H:O oranlarını belirlemede kullanılabilir. Ancak tesir kesitleri dikkate alınırca güvenilir ve doğru oranları elde etmek için ısı nötron analizine göre daha uzun süreye ihtiyaç duyar.

Isıl nötron analizi (TNA) ile hızlı nötron analizi (FNA) birleştirilerek, TNA' dan azotun deteksiyonu ve FNA'dan da karbonun deteksiyonu yapılabilir. Nötron inelastik gama ışınları Çizelge 2.4 de listelenmiştir.

Çizelge 2.4 Nötron inelastik saçılma gama ışınları

Element	Nötron İnelastik Saçılma Gama Işınları (MeV)
C	4,439
N	0,72 1,64 5,1 2,34
O	3,8 6,13

### 2.2.2.1.3 Nötron aktivasyonu

Aktivasyon reaksiyonlarında hızlı nötronun çekirdek tarafından yakalanması sonucu radyoaktif kız çekirdek oluşur. Oluşan radyoaktif çekirdeğin fazla enerjisini yayınlamak temel seviyeye dönmesi milisaniyeden dakikalara ya da çok daha uzun süreler kadar sürebilir. Gecikmiş (delayed) gama ışınları reaksiyonun ve izotopun karakteristiğine göre üretilir. Nötron aktivasyonu, genellikle, kısa süreli nötron sorgulama sistemleri için TNA ve FNA sistemlerine göre pek kullanışlı değildir.

### 2.2.2.1.4 Aktivasyon analizi spektrumunun analizi yapılarak element miktarının tayini

Hedef elementin nötronlar ile bombardımanı sonucunda oluşan çekirdeğin sahip olduğu aktivite

$$A = \lambda N = \Phi \sigma \frac{hm}{M} N_A (1 - e^{-\lambda T}) \quad (2.1)$$

bağıntısıyla ifade edilir.

$\Phi$  ; nötron akısı

$\sigma$  ; reaksiyon tesir kesiti

$m$ ; hedef elementin kütlesi

$h$ ; reaksiyona uğrayan çekirdeğe ait izotopik bolluk yüzdesi

$M$ ; hedef çekirdeğin atomik kütlesi

$N_A$ ; Avogadro sayısı ( $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )

$\lambda$ ; bozunma sabiti

$T$ ; ışınlama süresidir.

Radyoaktif çekirdeğin yayınladığı gama ışını spektrumundan bulunan tüm enerji tepesindeki (fotopik) değeri,  $n$ , ışınlamanın sonundaki aktiviteyi

$$A = \frac{nC}{p\varepsilon(E_\gamma)} e^{\lambda t} \quad (2.2)$$

bağıntısından elde etmek için kullanılır.

$C$ ; sayım katı açısı, öz-soğurulması, detektör verimi gibi hususlarla ilgili düzeltme faktörü

$\varepsilon(E_\gamma) = E_\gamma$  enerjisinde gama sayım sisteminin mutlak fotopik verimi

$t$ = ışınlamanın bitiminden sayımın başlangıcına kadar geçen bekleme süresini gösterir.

denklem 2.1 ve 2.2 nin çözümünden elde edilen

$$m = \frac{nCM e^{\lambda t}}{p\Phi \sigma \varepsilon(E_\gamma) h N_A (1 - e^{-\lambda T})} \quad (2.3)$$

bağıntısıyla analizi yapılan elementin miktarı tayin edilebilir.

Miktarının belirlenmesi istenen elementin bilinen miktarını içeren bir referans örneği aynı geometride ve aynı koşullarda ışınlanırsa, nötron akısının, verimin ya da diğer sabitlerin bilinmesi gerekmez. Bu durumda,

$$m = m_r \frac{n}{n_r} \quad (2.4)$$

bağıntısıyla elementin miktarı tayin edilebilir. Burada, alt indis  $r$ , referans örneği işaret

etmektedir. ((Debertin, 1988; Tsoulfanidis, 1995)

Elementin miktarının hesaplanmasında beklenen hata ise

$$\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{n_r}}{n_r}\right)^2 \quad (2.5)$$

ifadesiyle kestirilebilir.

### 2.2.2.2 Nötron uyarmalı – nötron deteksiyonu

#### 2.2.2.2.1 Nötron moderasyonu

Bu method bölgenin hızlı nötronlarla ışınlanması ve yavaşlatılıp geri dönen (geri saçılan) yavaş nötronların detekte edilmesine dayanır. Bu teknikte hidrojenin yüksek durdurma gücüne sahip olması bir avantajdır. Genellikle, topraktaki nem miktarını belirlemek için kullanılır. Hidrojen yoğunluğundaki bir anormalliğin ölçümü böyle bir durumda mayının varlığının bir göstergesi olarak düşünülebilir. Topraktan dönen yavaş nötronların sayısının hızlı nötronların sayısına oranı olan albedo sinyalinin ölçümü mayının varlığını belirlemek için kullanılabilir. Ancak, topraktaki ve mayındaki hidrojen miktarı aynı değerde olması halinde mayınlar detekte edilemez. Yani mayının detekte edilebilmesi için topraktaki neme göre çok daha büyük bir termalizasyon yeteneği olmalıdır. Bu nedenle mayınların deteksiyonunda sadece patlayıcı malzemenin değil aynı zamanda dış kabınında özelliği hesaba katılmalıdır. Özellikle plastik muhafazalı mayınların, toprak ve mayın arasındaki kontrastın yok olduğu ve detekte edilmesinin imkansız olduğu durumlarda, dış kabındaki plastik malzeme sayesinde nem miktarının bu kritik değerinde mayının detekte edilmesi mümkün olabilir.

#### 2.2.2.2.2 Nötron elastik rezonans saçılması

Nötron elastik saçılmasında, nötron çekirdeğe çarparak çekirdeğin fiziksel yapısını değiştirmeden kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe iletmiş olarak geliş açısından farklı bir açıda ve daha az bir kinetik enerjiyle terkeder. Enerji kaybı çarptıkları çekirdeğin kütlesi ile ilişkilidir. Düşük kütleli bir çekirdekten (hidrojen gibi) saçıldıklarında kayıp ettikleri enerji daha fazla olur. Bu nedenle hidrojen zengin malzemeler hızlı nötronların yavaşlatılmasında kullanılır. Nötron elastik saçılma reaksiyonu  $X(n,n')X$  şeklindedir.

Patlayıcılar ve toprakta bulunan elementler gibi hafif elementler için nötronların elastik saçılma tesir kesitleri keV ile MeV enerji bölgesinde enerjinin fonksiyonu olarak rezonanslar sergiler. Her element bir takım karakteristik rezonans enerjilerine ve şiddetine sahiptir. Bu



method, rezonanslar geniş ve sürekli tesir kesitinde yer alan dar bileşenler oldukları için tek enerjili nötronlar üreten Van de Graff gibi hızlandırıcılar kullanmayı gerektirir. Ancak, bu hızlandırıcının açık alan uygulamalarında kullanımı pratik değildir. Bu durumda, fisyon kaynakları gibi geniş spektrumlu kaynaklar daha kullanışlıdır.

Patlayıcı ve toprak malzemelerinde yaygın olarak tesir kesitlerinin rezonans bileşenleri genellikle sürekli bileşenlerinden çok daha küçüktür. Böylece hedef ve background arasında ölçülebilir bir fark görülememektedir. Uçuş zamanı ölçümü (TOF) gibi yüksek enerji çözünürlüğüne sahip detektörlerin ya da  $^3\text{He}$  iyanizasyon odalarının rezonans bileşenlerini sürekli bileşenlerden ayırt edilmesine yardımcı olması mümkün gözükmemektedir.

### **2.2.2.2.3 Nötron inelastik saçılması**

Nötron çarptığı çekirdeğin içerisine girerek çekirdeğin fiziksel yapısını değiştirir. Çok kısa bir zaman içerisinde enerjisinin bir kısmını çekirdeğe iletmış olarak, geliş açısından farklı bir açıda ve daha az bir kinetik enerjiyle terkeder. Çekirdeğin temel seviye ile uyarılmış durumu enerjisi arasındaki fark kadar daha düşük enerjili nötronların detekte edilmesi sayesinde patlayıcılar belirlenebilir. Karbon detektörü organik malzemelerden ve karbonlu topraktan gelen yanlış alarmı yatkin olmasına rağmen, 4,4 MeV enerji seviyesinde karbonun büyük tesir kesitinin olması onu en olası aday yapar. Patlayıcılar için önemli olan azot 3 ila 8 kez daha küçük tesir kesite sahiptir. Tek pratik nötron kaynağı 14,8 MeV monoenerjili nötron jeneratörüdür. Prensipinde, sürekli fisyon spektrumu dağılımı inelastik nötron spektrumunda ortaya çıkan piklerin görülmesini sağlayabilir. Fakat diğer malzemelerden, doğrudan ya da düşük düzeylerden inelastik saçılmalarda dahil olmak üzere çoklu saçılmalar nedeniyle gelen nötronların sürekliliği bu metodu elverişsiz yapabilir. Karbon için 10 MeV civarında ve azot için 7-13 MeV civarında nötronlar vardır. Bu enerji aralığında tek pratik detektörler, verimsiz ve büyük olan TOF sistemleridir. Bu sistemler, tarama için  $10^{11}$  nötron/s lik nötron akısına ihtiyaç duyulabilir. Şu anda bu tekniğin nötron inelastik saçılma gama ışınlarına göre hiç bir avantaj ve dezavantajı gözükmemektedir. Ancak, mayın deteksiyonu için herhangi bir TOF sistemi çok büyük ve ağır olabilir.

### **2.2.2.3 Foton uyarmalı- nötron deteksiyonu**

#### **2.2.2.3.1 Foto-nötron emisyonu**

Gelen fotonun enerjisi nötron üretimi için gerekli olan eşik enerjisinin üzerindeyse fotonu soğuran çekirdek uyarılmış halde kalır ve bir nötron yayınlar. Daha önce yapılan çalışmalarda, nötronların deteksiyonu enerji ayırt edilmeden, bitiş nokta enerjisi  $^{14}\text{N}$  için

10,5MeV eşik değerinden biraz daha yüksek olan bremsstrahlung demeti kullanılarak denenmiş ve silikondan gelen nötronların oluşturduğu güçlü arka plan (background) nedeniyle başarısız bulunmuştur. Eğer 6 MeV enerji kullanılacak olursa sadece  $^{13}\text{C}$  ve  $^2\text{H}$  izotopları uyarılacağından karbon ve hidrojenin deteksiyonu mümkündür.

### 2.3 Deteksiyon Sisteminin Gereksinimleri

Bir mayın deteksiyon sisteminin sahip olması istenilen özellikler şöyle sıralanabilir;

- Mayınların pek çok farklı türde, şekilde ve farklı patlayıcı içerikli olmaları nedenlerinden dolayı, deteksiyon sistemi mayın ve patlayıcıların şekillerinden, türlerinden ve kullanılan patlayıcının içeriğinden bağımsız olmalıdır.
- Mayınların daha net ayırt edilebilir olması için, ölçme sisteminin arka-plan (background) gürültülerini (kaya, taş, metal parçalar) ayırt etmesi gerekir. Böylece, yanlış - pozitif alarm oranı azaltılabilir ve mayın gibi düşünülen zararsız malzemeler için zaman harcanması engellenebilir.
- Deteksiyon sisteminin 'yanlış-negatif alarm' oranı sıfıra yakın olmalıdır.
- Patlayıcılar farklı derinliklerde bulunabileceği için derinliğe duyarlı bir deteksiyon sistemi olmamalıdır.
- Deteksiyon sisteminin operatörünün, yanlışlıkla mayının tetiklenmesine neden olmaması için operatör mayına yakın olmamalıdır.
- Deteksiyon makul bir işlem süresine ve ekonomik bir maliyete sahip olmalıdır. Yani, ne yavaş ne de pahalı olmamalıdır.

### 3. MONTE CARLO METODU

Monte Carlo yönteminde istatistiksel ve matematiksel tekniklerle bir deneyi veya çözülmesi gereken bir fiziksel olayı defalarca rasgele sayılarla özdeşleştirerek çözmek esastır (Briesmeister, 2000).

Monte Carlo yöntemleri deterministik transport yöntemlerinden çok farklıdır. Deterministik yöntemleri (en çok yaygın olan kesikli ordinatlar yöntemi) ortalama parçacık davranışı için transport denkleminin çözümünü gerektirir. Buna karşılık, Monte Carlo, net bir denklem çözmez; onun yerine, parçacıkların bireysel davranışını ve hepsinin ortalama davranışlarının bazı yönlerini belirleyerek çözüme ulaşır. Ortalama davranışlar, fiziksel sistemde ele alınan parçacıkların davranışlarından hareket edilerek (merkezi limit teoremi kullanılarak) belirlenir. Monte Carlo ve deterministik yöntemlerinin sadece çözüm yolları değil, sundukları çözümler bile farklıdır. Deterministik yöntemler, genellikle, problemin faz uzayı boyunca bilgilerini eksiksiz verirler. Monte Carlo ise, kullanıcı tarafından istenilen ‘özel’ bilgileri sağlar (Briesmeister, 2000).

Monte Carlo simulasyon yöntemi pek çok alanda kullanılmaktadır. Örneğin, nümerik entegrasyon, sistem analizi, kısmi diferansiyel denklemler, integral denklemler, ekonomik modelleme, matematiksel finans, kuantum mekaniği, istatistiksel fizik, nükleer ve katı-hal fiziği ve sosyal bilimler dallarında kullanılmaktadır.

#### 3.1 MCNP – Monte Carlo Nötron-parçacık Taşınım Kodu

MCNP, sürekli enerjiye sahip, genelleştirilmiş-geometri kullanan, zamana bağlı, nötron, foton ve elektron etkileşimlerini sanal ortamda oluşturan genel amaçlı bir Monte Carlo transport kodudur. ABD’de Los Alamos Ulusal Laboratuvar’ında Monte Carlo grubu tarafından geliştirilmiş, 48,000 satıra yakın Fortran ve 1,000 satır da C kaynak kodundan oluşmuştur.

MCNP de farklı transport durumları göz önüne alınabilir. Bu durumlar, sadece nötronların, fotonların veya elektronların transportunu içerebileceği gibi, bunların birlikte bulunması halinde transportlarını da içerebilir. Örneğin, nötron etkileşimlerinden foton üretildiği nötron/foton transport durumu, ya da nötron/foton/elektron gibi ihtiyaca göre birleştirilebilirler. Nötronların enerjisi  $10^{-11}$  MeV ile 20 MeV arasında, foton ve elektronları ise 1 keV ile 1000 MeV arasında bulunabilir. Bölünebilir çekirdekler içeren sistemler için keff özdeğerlerinin hesaplanmasında MCNP nin standart bir özelliğidir.

Monte Carlo yöntemi ile radyasyon etkileşimlerinin gerçeğe uygun bir biçimde yaratılması, hedef çekirdeğe ve gelen radyasyonun enerjisine bağlı olan tesir kesitinin doğru şekilde modellenbilmesine bağlıdır. Böyle gerçekçi bir modelleme için bilgisayar ortamında oluşturulmuş veri tabanlarına ihtiyaç vardır. MCNP, sürekli enerjiye sahip nükleer ve atomik veri kütüphanelerini kullanır. Fiziksel ölçümlere, ya da, matematiksel hesaplamalara dayanan bu nükleer veriler, Livemore'dan ve Los Alamos'taki Applied Nuclear Science (T-2) Group 4,5,6 tarafından derlenen bilgilerin Evaluated Nuclear Data File (ENDF) sistemi, Evaluated Nuclear Data Library (ENDL), Advanced Computational Technology Initiative (ACTI), Evaluated Photon Data Library (EPDL), Activation Library (ACTL) 'nin değerlendirmeleri sonucunda elde edilir. MCNP tarafından ulaşılan bütün veri tabloları MCNP dizininde XSDIR tesir kesiti dosyası içerisinde bulunur. Nükleer veri tabloları nötron etkileşimlerini, nötron-indüklenmiş foton, foton etkileşimleri, nötron dozimetrisini ve ısı parçacık saçılımını ( $\alpha, \beta$ ) içerir (Briesmeister, 2000).

### 3.2 MCNP Hesaplamaları

Çözülmesi gereken bir fiziksel problemde mevcut olan geometri özelliklerinin, malzeme bilgilerinin, kaynak karakteristiğinin ve programdan istenilen sonucun türü ile ilgili bilgilerin bir veri giriş dosyası ile MCNP programına tanıtılması gerekir. Giriş bilgileri, hücre kartı, yüzey kartı ve veri kartı olmak üzere üç temel bölümden meydana gelir ve bu temel bölümler bir satırlık boşlukla birbirlerinden ayrılır.

Hesap kartları ise kullanıcının Monte Carlo hesaplamalarından ne tip bir bilgi türü istediğini belirtmek için kullanılır. Örneğin, yüzeyden geçen parçacık akımı veya bir noktadaki parçacık akısının hesaplanması istenebilir. Bu bilgiler, Çizelge 3.1 deki kartların bir kombinasyonu kullanılarak istenir. Hesap sonuçlarını elde etmek için sadece Fn kart gereklidir, diğer hesap kartları isteğe bağlı olarak seçilebilen çeşitli özellikler sağlar.

MCNP 6 standart nötron, 6 standart foton, 4 standart elektron hesaplamaya sahiptir. Bunların hepsi başlangıçtaki parçacık sayısına bölünerek normalize edilmiştir. Çizelge de MCNP4C2 Monte Carlo kodunda bulunan standart hesaplamalardan bazıları verilmiştir. Bu tez çalışmasında, hücre üzerinden akı (F4), herbir hürede biriken enerji (F6) ve detektörde üretilen darbelerin (puls) enerji dağılımı (F8) hesaplama kartları kullanılmıştır. Bu hesaplama kartları ve Monte Carlo yönteminin MCNP4C2 de nasıl uygulandığı ile ilgili daha detaylı bilgiler MCNP kitapçığından bulunabilir (Briesmeister, 2000).

Çizelge 3.1 MCNP' de kullanılan hesap kartları

Sembolü	Hesap Türü	Birimi
F1	Tüm yüzey üzerinden integre edilen parçacık akımı	
F2	Yüzey üzerinden ortalama akı	1/cm <sup>2</sup>
F4	Hücre üzerinden ortalama akı	1/cm <sup>2</sup>
F5	Nokta veya halka detektörün parçacık akısı	1/cm <sup>2</sup>
F6	Herbir hücrede biriken enerji	MeV/g
F8	Detektörde üretilen pulsların enerji dağılımı	

## 4. NÖTRON SORGULAMA SİSTEMİ

### 4.1 Nötron Kaynağı Seçimi

Nötron kaynağı seçiminin deteksiyon sisteminin performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Örneğin, azotun deteksiyonu için yavaş nötronlara ihtiyaç duyulurken, oksijen için reaksiyon eşik enerjisi gerektirdiğinden, 6 MeV enerjili nötronlara ihtiyaç vardır. Bu enerjideki nötronların toprakla hiç bir girişim yapmaması nedeniyle sadece azotun 5,10 MeV karakteristik gamalarının üretilmesini sağlaması bir avantajdır. Ancak, ne yazık ki, 6 MeV nötron enerjisine sahip, bilinen bir taşınabilir kaynak yoktur.

Askeri operasyonlarda kullanılacak olan detektörlerde yoğun muharebe alanında hızlı ölçüm yapılması zorunludur. Barış ortamındaki insani mayın temizleme çalışmalarında ise daha iyi yüksek belirleme olasılığı (PD) ve düşük yanlış alarm oranları (FAR) beklenir. Bu nedenle, ölçümlerin doğrulanması ve kabul edilebilir bir zaman içerisinde gerçekleşmesi için yüksek yoğunluklu nötron kaynakları gerekmektedir. Düşük yoğunluklu kaynaklar, darbe yığılmasına neden olabilen yüksek yoğunluklu kaynak sistemlerinin ulaştığı sonucu sağlayamazlar. Ayrıca, nötron kaynağın taşınabilir olması zorunludur.

Kaynağın civarındaki radyasyon güvenliği açısından nötron üretiminin gerektiğinde durdurulması tercih edilmelidir.

### 4.2 Nötron Kaynakları

Nötronlar, nükleer reaktörler , hızlandırıcılar ve izotopik kaynaklar kullanılarak elde edilirler.

Nükleer reaktörlerde ışınlama yapılarak çoğunlukla yüksek akılarda ısıl nötronlar ve düşük akılarda keV mertebesinde hızlı nötronlar elde edilmektedir.

Hızlandırıcılarda ise yüklü tanecik reaksiyonları kullanılarak hızlı nötronlar üretilir. Reaksiyonu başlatabilmek için gerekli olan yüklü parçacık demeti hızlandırıcılar vasıtasıyla elde edilir. Yüklü parçacık enerjisinin ve gözlenen nötron yayınlanma açısının dikkatli seçimi ile neredeyse istenilen her enerjide tek enerjili nötronlar elde edilebilmektedir.

Nötronların üretildiği reaksiyonlar üç grupta sınıflandırılırlar: alfa-berilyum kaynakları ve kendiliğinden fisyon kaynakları gibi radyoizotopik kaynaklar, fotonötron kaynakları ve döteryum-döteryum (D-D) ya da döteryum-trityum (D-T) ya da nükleer füzyon reaksiyonları.

4.2.1 ve 4.2.2 kısımlarında bu nötron kaynaklarının özelliklerinden kısaca bahsedilmektedir.

#### 4.2.1 D-D Ve D-T nötron jeneratörleri

D-D ve D-T nötron jeneratörleri , nükleer reaksiyonlar yoluyla yüksek enerjide tek enerjili nötronlar üreten küçük hızlandırıcılardır. Bu nükleer reaksiyonlar için reaksiyon denklemleri



olarak verilir. Bu reaksiyonlarda, hızlandırılan döteron ile hedef çekirdek arasındaki Coulomb engeli küçük olduğundan iyi bir nötron verimi elde etmek için döteronların çok yüksek enerjide olmaları gerekmez (Knoll, 2000). D-D reaksiyonuyla 2,2 MeV enerjili ve D-T reaksiyonuyla da 14,1 MeV enerjili nötronlar üretilir. D-D reaksiyonuyla üretilen nötronlar ileri yönde anizotrop olarak üretilirken D-T reaksiyon nötronları izotropiktirler.

Onlarca kilogram ağırlığında hantal bir yapıya sahip olan nötron jeneratörleri günümüzde çok küçük boyutlarda (15–20 cm) üretilebilmektedir. Küçük boyutlu hızlandırıcılarda  $10^8 - 10^9$  n/s nötron çıkışı vardır. Sürekli veya darbeleri (pulsu) nötron çıkışı yapabilirler. Darbeleri çalışmaları sayesinde arka-plan (background) sinyalini düşürme avantajına sahiptirler. Örneğin, ani gamaları darbe sonrası oluşan gecikmiş gamalardan ayırt etmek mümkündür. Bununla birlikte,  $\gamma$  ışınlarını darbeler sırasında, özellikle güçlü darbeler halinde, detekte etmek güç olabilir. Fiyatları 30–70 k€ arasında değişen bu hızlandırıcıların ortalama ömürleri bir kaç bin saattir.

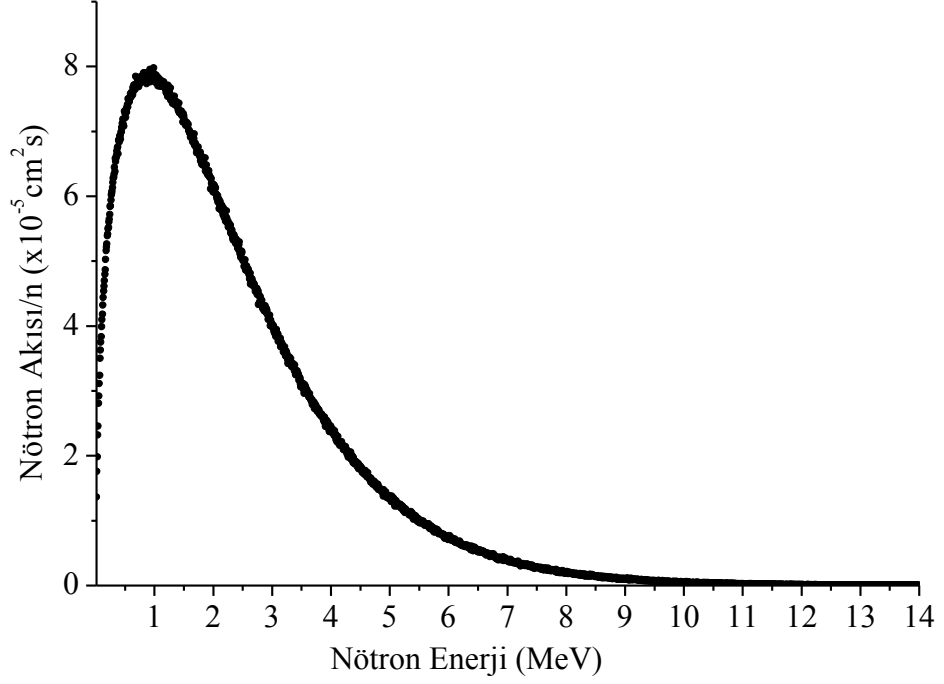
#### 4.2.2 Radyoizotopik nötron kaynakları

$^{252}\text{Cf}$  kendiliğinden fisyon kaynağının ortalama nötron enerjisi 2,14 MeV ve en olası nötron enerjisi ise 0,7 MeV dir. Nötron enerji spektrumu 0,1 MeV ile 6 MeV enerji aralığına yayılır. 1 gramından saniyede yaklaşık  $2,3 \times 10^{12}$  nötron yayınlanır ve 2.646 yıl yarılanma süresine (yarı-ömür) sahiptir.

Amerisyum-Berilyum (Am-Be) nötron kaynağının ortalama nötron enerjisi 4,5 MeV dir. Nötron enerji spektrumu 2 MeV ile 10 MeV enerji aralığına yayılır. 1 gramından saniyede yaklaşık olarak  $7 \times 10^6$  nötron yayınlanır ve 432 yıl yarılanma süresine (yarı- ömür) sahiptir.

Radyoaktif kaynaklar daha ucuz ve daha küçük oldukları için daha avantajlıdır. Ancak, hızlandırıcılar gibi istenildiği zaman kapatılamazlar. Küçük ve hafif oldukları için kolaylıkla

taşınabilirler ama özel koşullarda taşınmaları gerekmektedir. Kısa yarı ömürlü olan nötron kaynaklarının düzenli aralıklarla değiştirilmeleri yani bir ya da iki yarı ömür sonra yenilenmeleri gerekmektedir. Bu süre  $^{252}\text{Cf}$  kaynağı için 5 yıldır.



Şekil 4.1  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağının MCNP kod kullanılarak hesaplanan nötron enerji spektrumu

Bu çalışmada,  $^{252}\text{Cf}$  nötron enerji spektrumu Watt fisyon spektrumu ile MCNP kod tarafından verilen katsayılar kullanılarak simüle edildi (Watt, 1952; Briesmeister, 2000).

$$n(E) = C \exp(-E/a) \sinh(bE)^{1/2} \quad (4.3)$$

$^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağı için  $a = 1,025 \text{ MeV}$ ,  $b = 2,926 \text{ MeV}^{-1}$ ,  $C = 0,30033$  olarak verilmiştir.  $n$ ,  $E$  enerjisine sahip nötronların sayısıdır. Şekil 4.1. de MCNP kod ile yapılan hesaplamalarda kullanılan  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağının enerji spektrumu gösterilmektedir. Tüm simülasyon çalışmalarında  $10 \mu\text{g } ^{252}\text{Cf}$  ( $\sim 2,306 \times 10^7 \text{ n/s}$ ) kullanılmıştır.

### 4.3 Gama Işını Detektör Seçimi

Sistemdeki diğer bir önemli unsur gama ışını detektörüdür. Gama ışını detektörlerinin seçiminde detektör verimi, çözünürlüğü, açık alanda kullanıma uygun olup olmadığı ve fiyatı dikkate alınmalıdır.



Nötron sorgulama sistemlerinde çoğunlukla kullanılan 3 detektör vardır. Bunlar, Talyum katkılı sodyum iyodür (NaI), bizmut germanate (BGO) ve yüksek saflıklı germanyum (HPGe) detektörlerdir.

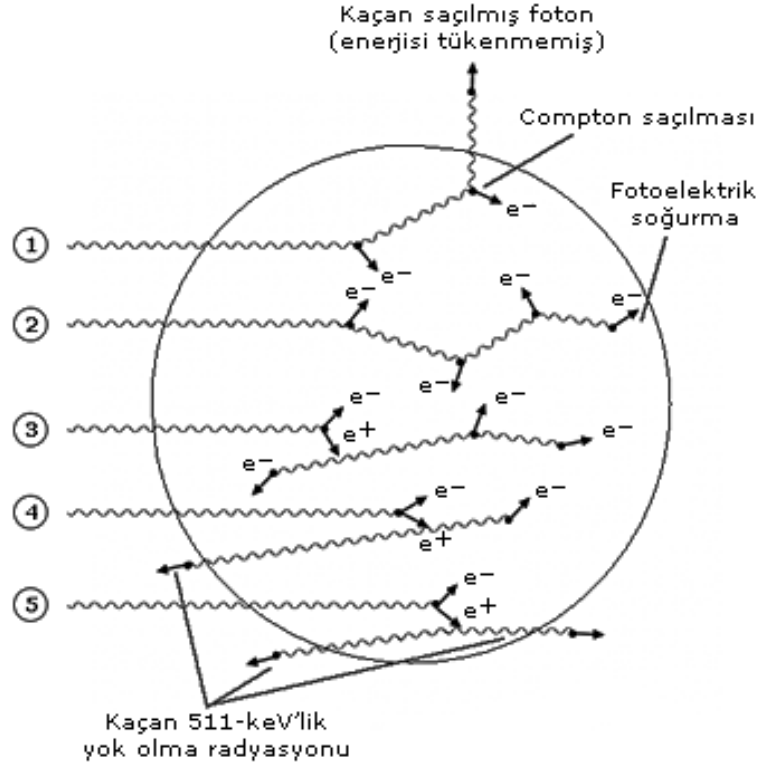
#### 4.3.1 Sintilatör detektörleri

NaI ve BGO sintilatör detektörleri sınıfındadır. Sintilatör detektörleri, sintilatör malzeme ve foto-çoğaltıcı tüp olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Gama ışın detektörü olarak kullanılan sintilatörler gama ışınını doğrudan algılamaz. Bunun yerine, gama ışınları detektöre girerek atomları uyarılmış düzeylere çıkararak pek çok sayıda etkileşme yapar. Uyarılmış durumda kalan atom hızla görünür bölgede foton yayınlamaya başlar. Yayınlanan ışık foto duyarlı yüzeye çarparak foton başına en çok bir fotoelektron salınmasına neden olur. Bu ikincil elektronlar fotoçoğaltıcı tüplerde çoğaltılır, hızlandırılır ve gelen gama ışını ile orantılı çıkış darbeleri (pulsları) şekline dönüştürülür.

Şekil 4.2 de detektöre giren  $\gamma$ -ışınının detektör kristali ile yaptığı etkileşmelerden bazıları gösterilmiştir. Şekilde numaralandırılan etkileşmelerde foton;

- (1) Birkaç kez Compton saçılması yapar ve enerjisinin tamamını kaybetmeden önce detektörü terk eder.
  - (2) Pekçok Compton saçılmasından sonra fotoelektrik soğurma yapar ve enerjisinin tamamını kaybeder.
  - (3) Çift oluşumunu, pozitron yok olması, Compton saçılması ve fotoelektrik soğurma takip eder ve enerjisinin tamamını kaybeder.
  - (4) Yokolma fotonlarından biri detektörü terk eder ve gama ışınları 511 keV'lik enerjisinin tamamını kaybeder.
  - (5) Yokolma fotonlarının her ikisi de detektörü terk ederken 1022 keV'lik enerjiyi detektör malzemesine aktarır.
- (4) ve (5) deki işlemler sadece gama ışınının enerjisinin 1022 keV'den fazla olduğu durumlarda meydana gelir. (Krane, 1987)

Eğer ilk foton, sonunda fotoelektrik soğurmaya maruz kalıyorsa, detektör kristaline aktarılan enerji gama ışınının toplam enerjisine eşit olur. Yani, detektöre giren gama ışını enerjisinde bir pik.(foto-pik) elde ederiz.



Şekil 4.2 Detektöre giren  $\gamma$ -ışınının detektör kristali ile yapabileceği etkileşmelerden bazıları

NaI detektörler 1 MeV ve daha yüksek enerjili gama ışınları deteksiyonu için üretilmişlerdir.

NaI(Tl) detektörler, yüksek yoğunlukları ve  $\gamma$ -ışını etkileşmesi sonucunda tüm  $\gamma$ -ışını enerjisinin soğurulmasına olanak sağlayan yüksek atomik kütleye ( $Z=53$ ) sahip olmaları nedeniyle yüksek verime sahiptirler ancak enerji çözünürlükleri zayıftır. Genel olarak 50 keV enerji çözünürlüğüne sahiptir. Bu nedenle,  $\gamma$ -ışınları için enerji çözünürlüğü gerektirmeyen veya yüksek verim gerektiren çalışmalarda NaI detektörler iyi bir seçimdir. 3 x 3 inç' lik bir NaI detektörün ortalama fiyatı 1.400 \$ dır.

BGO detektörlerde, NaI detektörler gibi oda şartlarında çalışabilen soğutulmaları gerekmeyen detektörlerdir. Yüksek yoğunluğa ve daha yüksek atomik kütleye ( $Z=83$ ) sahip olması nedeniyle daha yüksek verime de sahiptir. Ancak, enerji çözünürlüğü NaI detektörlere göre daha düşük ( 75 keV) ve fiyat olarak daha pahalıdır. BGO detektörün ortalama fiyatı 5.500 \$ dır.

### 4.3.2 Yarı iletken detektörler

HPGe detektörler yarı iletken detektörleri sınıfındadır. Bu detektörlerde, detektöre giren gama ışını detektör kristalinin Ge atomlarıyla etkileşirse, burada bir elektron – boşluk çifti meydana getirir. Ters kutuplama voltajının uygulanmasıyla elektronlar bir yönde hareket ederken boşluklar diğer yönde hareket ederler ve biriken elektronların toplam sayısı, genliği gelen gama enerjisi ile orantılı bir elektronik pulsu oluşturur.

Enerji çözünürlüğüne önem verilen uygulamalarda tek spektral çizgiler kesin olarak tanımlanmalı ve birbirine bitişik olan spektral çizgilerde kesin olarak ayrılmalıdır. HPGe detektörler yüksek çözünürlüğe sahip oldukları için enerji çözünürlüğüne önem verilen çalışmalarda öncelikle tercih edilirler. Bu detektörler genellikle 2 keV enerji çözünürlüğüne (FWHM) sahiptir. Bu da çözünürlüğün önemli olduğu deneylerde, NaI detektörlere göre 25-30 kez daha iyi olmasından dolayı HPGe detektörlerin tercih edilmesine neden olur.

HPGe detektörler, çok pahalı olmaları, enerjinin artmasıyla detektör verimin hızla düşmesi ve özellikle mayın deteksiyonu için azotun 10,8 MeV enerjili ısıl nötron yakalama gama ışını çizgisinde verimin çok düşük olması nedeniyle ve bunlara ek olarak da sıvı azot kullanarak veya elektromekaniksel olarak düşük sıcaklık ortamlarında çalıştırılmalarının gerekmesi gibi dezavantajlara sahiptir.

Çizelge 4.1 Gama ışını detektörleri için boyut, yoğunluk , çözünürlük, hız kapasitesi ve fiyat karşılaştırılması (Knoll, 2000)

Detektör	Çap x Uzunluk (inç)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Enerji Çözünürlüğü (keV)	Hız Kapasitesi (kHz)	Fiyat (\$)
NaI (Tl)	3x3	3,67	50	100-200	1,4 k
BGO	3x3	7,13	75	100-200	5,5 k
HPGe	4x4	5,23	2	40	50 k

Bu çalışmada, yüksek verimli olması, mayın deteksiyonu için yeterli çözünürlüğe sahip olması ve düşük fiyatlı olması nedeniyle, NaI detektör kullanımı tercih edilmiştir. Bu detektörlerin özellikleri 4.4.2 kısmında anlatılmıştır.

#### 4.4 Nötron Detektörü Seçimi

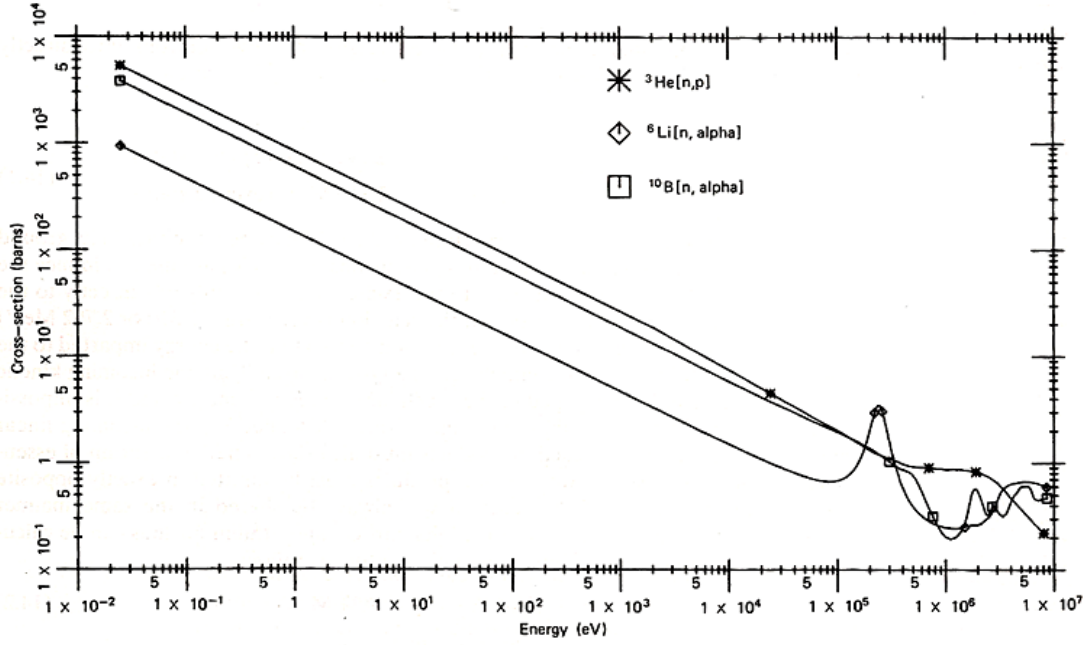
Nötron deteksiyonu, yüklü parçacıkların ya da fotonların deteksiyonundan çok daha karmaşık ve zordur. Bunun nedenini iki maddeyle açıklayabiliriz. Birincisi, nötronlar yüksüz parçacıklardır ve sadece ürettikleri yüklü parçacıklar veya fotonlar aracılığıyla dolaylı olarak detekte edilirler. İkinci olarak, nötron enerji aralığı nötron reaksiyonlarının tipi ve tesir kesitlerinin büyük ölçüde değişiklik gösterdiği  $10^{-3} \text{ eV} < E < 10^8$  enerji aralığına yayılır.

Nötron deteksiyonu için kullanılan pekçok (n, yüklü parçacık) tipi reaksiyon vardır. Genellikle, hızlı nötronlar için endotermik reaksiyonlar ve ısıl nötronlar için de ekzotermik reaksiyonlar kullanılır. Isıl nötronlar için en çok kullanılan reaksiyonlar Çizelge 4.2 de listelenmiştir (Tsoulfanidis, 1995).

Çizelge 4.2 Nötron deteksiyonu için kullanılan ekzotermik reaksiyonlar (Tsoulfanidis, 1995)

Reaksiyon	üretilen yüklü parçacıklar	Q (MeV)	$E_n=0,025\text{eV}$ $\sigma$ (b)
$^{10}_5\text{B}(n, \alpha)^7_3\text{Li}$	$\alpha, ^7_3\text{Li}$	2,78	3840
$^7_3\text{Li}(n, \alpha)^3_1\text{H}$	$\alpha, ^3_1\text{H}$	4,78	937
$^3_2\text{He}(n, \alpha)^3_1\text{H}$	$\alpha, ^3_1\text{H}$	0,765	5400

Listelenen bu reaksiyonlar için tesir kesitlerinin enerjiye bağlı değişimi Şekil 4.3 de gösterilmiştir. Isıl nötron tesir kesitleri büyük olan bu reaksiyonlar için tesir kesitlerinin nötron enerjisinin artışıyla  $1/v$  şeklinde hızla azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.3 Nötron deteksiyonu ile ilgili bazı reaksiyonların enerjiye bağlı tesir kesitleri (Knoll, 2000)

$^3\text{He}$ ' un  $(n,\alpha)$  reaksiyonu bor'un reaksiyonundan daha büyük ısıl nötron tesir kesitine sahip olduğu için yavaş nötron deteksiyonu için kullanımı çekici bir alternatiftir. Ancak,  $^3\text{He}$  soygaz olduğu için, hiç bir katı bileşeni imal edilememekte ve mutlaka gaz formunda kullanılması gerekmektedir. Malesef,  $\text{BF}_3$  detektörlere göre çok pahalıdır.  $^6\text{Li}$  reaksiyonunun ısıl nötron tesir kesiti ise 940 barn dır ve rezonans bölgesine kadar  $^{10}\text{B}$  reaksiyonu için tesir kesitinin altında kalmaktadır (Şekil 4.3). Bu nedenle  $\text{BF}_3$  detektörlerin kullanımı daha uygundur.

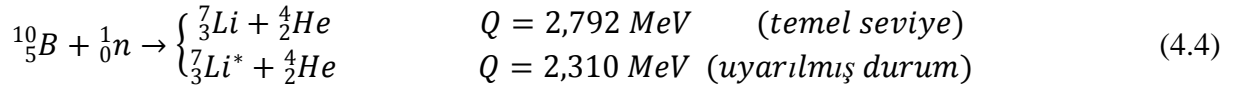
Çizelge 4.3 de nötron deteksiyonunda kullanılan yöntemler listelenmiştir.  $\text{BF}_3$  detektörlerin  $^3\text{He}$  detektörlere göre daha geniş bir enerji aralığı için kullanılabileceği görülmektedir.

Çizelge 4.3 Nötron deteksiyonunda kullanılan yöntemler (Tsoufanidis, 1995)

Nötron Enerjisi	sadece nötron sayısının ölçümü
$0 < E < 1\text{keV}$	$\text{BF}_3$ , $^6\text{Li}$ , $^3\text{He}$ , foil aktivasyon
$1\text{ keV} < E \leq 2\text{ MeV}$	$\text{BF}_3$ , $^6\text{Li}$ , foil aktivasyon
$E > 1\text{ MeV}$	foil aktivasyon

#### 4.4.1 BF<sub>3</sub> orantılı sayacı

<sup>10</sup>B' un (n,α) reaksiyonu ısı nötron deteksiyonu için kullanılan en faydalı reaksiyondur.



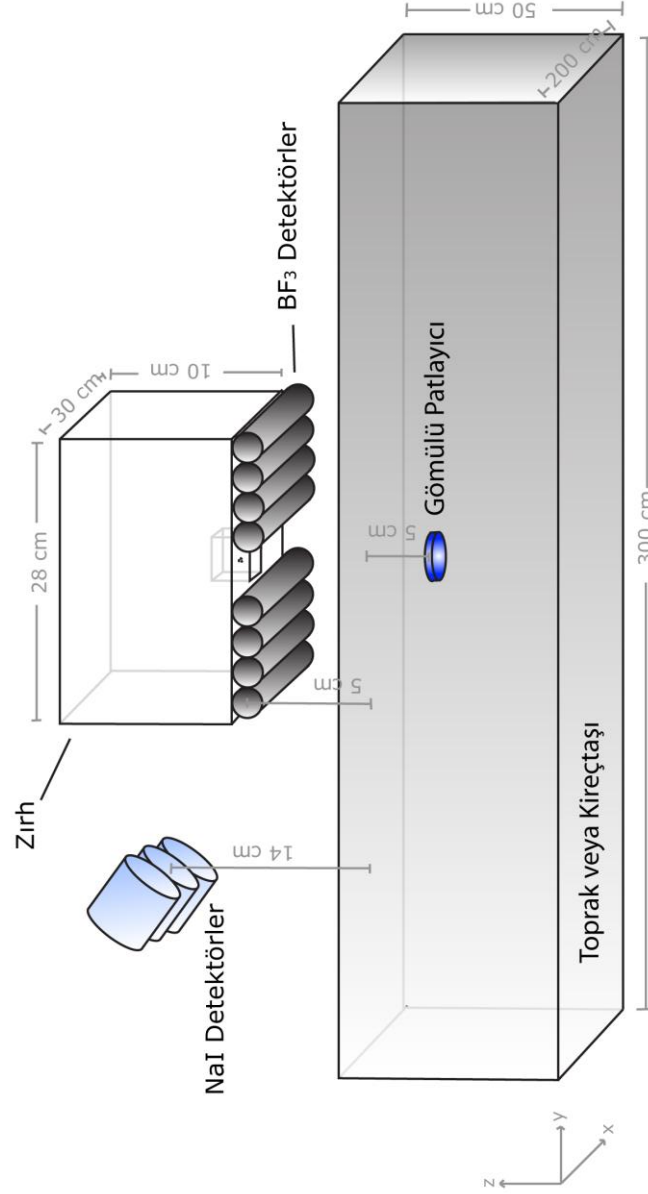
Isıl nötron reaksiyonu gerçekleştiğinde, reaksiyonların %94' ünde <sup>7</sup>Li çekirdeğinin ilk uyarılmış seviyede ve sadece %6' sı temel seviye de olmasına neden olur. Uyarılmış durumda kalan <sup>7</sup>Li çekirdeği için reaksiyonun Q değeri 2,310 MeV dir ve <sup>7</sup>Li çekirdeği 2,792-2,310=0,482MeV' e eşit enerjide gama ışını yayınlarak temel seviyeye geçer. Bu foton aynı zamanda nötron deteksiyonu için kullanılabilir.

BF<sub>3</sub> sayıcıları, BF<sub>3</sub> gaz ile doldurulmuş orantılı sayaçlardır. Tipik bir BF<sub>3</sub> detektörü, 0,5 - 1,0 atm basınçlı BF<sub>3</sub> gaz ile doldurulmuş silindirik bir alüminyum tüpten (katot) ve çok küçük çaplı telden (anot) oluşur (Korff ve Danforth, 1939). Bor triflorür detektörler, yavaş nötronları ikincil parçacıklara çeviren bir hedef ve orantılı gaz olarak iki amaca hizmet ederler.

Doğal bor' un %20 si <sup>10</sup>B ve geri kalanı da <sup>11</sup>B dir. BF<sub>3</sub> sayıcılarının verimliliğini arttırmak için, genellikle, %90 dan fazla <sup>10</sup>B ile zenginleştirilirler ve bu da verimliliğini en az beş kez artırır. Verimliliği arttırmak için, tüpün boyutları ve gaz basıncı da arttırılabilir. Fowler (1963), BF<sub>3</sub> tüplerinin 100-600 torr basınç aralığında, 15 cm çap'a, 180 cm uzunluğa kadar iyi çalıştığını ve 200-300 torr gaz basıncında en iyi çözünürlüğü sağladığını söylemiştir. Alüminyum düşük nötron etkileşme tesir kesitine sahip olduğu için, genellikle katot olarak kullanılır. Alüminyum düşük seviyede de olsa alfa aktivitesi gösterdiği için düşük arka-plan uygulamalarında paslanmaz çelik gibi farklı malzemeler tercih edilebilir. Anotun çapı 1 mm den küçük ve uygulama voltajı da 2000-3000 V civarındadır. BF<sub>3</sub> tüpleri için çalışma sıcaklığı 100 °C ile sınırlıdır ama özel tasarım tüpler ile bu sıcaklık 150 °C ye kadar çıkartılabilir (Knoll, 2000).

30 cm uzunluğunda %96 zenginleştirilmiş BF<sub>3</sub> tüp için 600 torr basınçta ısı nötron enerjisinde detektörün verimi % 91,5 dur ve bu değer 100 eV enerjide %3,8 e düşer. Böylece, BF<sub>3</sub> tüp çoklu enerjili nötronlara maruz kaldığında çoğunlukla yavaş nötron enerjileri için tepki gösterecektir (Knoll, 2000).

#### 4.4.2 Nötron sorgulama sisteminin geometrisi



Şekil 4.4 MCNP hesaplamalarda kullanılan sistemin geometrisinin şematik çizimi

Bu çalışmada, MCNP4C2 kodu kullanılarak yeraltında gizlenmiş kara-mayınlarının gerçek geometrisine çok yakın bir geometride simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Nötronlarla indüklenen gama ışınlarının incelenmesi için gerçekleştirilen sanal deneylerde (simülasyonlarda) üç adet 3x3 inç' lik NaI detektörü kullanılmıştır. Ayrıca, NaI kristalin çevresinde ve arka yüzünde 0,1752 cm kalınlığında silindirik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reflektör ve 0,0508 cm alüminyum muhafaza da simülasyonlara dahil edilmiştir. Bu detektörler için, Monte Carlo hesaplamalarda kullanılan yoğunluk ve geometrik özellikleri Çizelge 4.4 den görülebilir.

Çizelge 4.4 Hesaplamalarda kullanılan detektör ve karamayınının yoğunluk ve geometrik özellikleri

Element	Materyal	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Yarıçap (cm)	Yükseklik (cm)
karamayını	TNT	1,65	3,50	2
n-detektör	BF <sub>3</sub>	0,0009	1,50	30
γ-detektör	NaI	3,67	3,81	7,62

Geri saçılan ısıl nötronları detekte etmek için ise, 30 cm uzunluğunda ve 3 cm genişliğinde <sup>10</sup>B ile %97 zenginleştirilmiş sekiz adet 250 torr basınçta BF<sub>3</sub> gaz dolgulu nötron detektörü kullanılmıştır. Detektörler, merkezleri nötron kaynağından 2,6 cm aşağıda ve yer yüzeyinden 5 cm yukarıda olacak şekilde dörderli iki grup halinde yerleştirilmişlerdir. Detektörlerin yerleştirilmesi sırasında, birbirlerinden eşit uzaklıkta olmalarına dikkat edilmiştir. Bu detektörlerin konumu Şekil 4.4 de, yoğunluk ve geometrik özellikleri ise Çizelge 4.4 de görülebilir.

Deteksiyon sisteminde, anti-personel mayın olarak, kara-mayınlarında en çok kullanılan TNT (2, 4, 6-trinitrotoluen) patlayıcısını içeren, 7 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde disk biçiminde bir mayın yüzeyden 5 cm aşağıya yerleştirilmiştir. Şekil 4.4 den bu mayının konumu ve Çizelge 4.4 den yoğunluk ve geometrik özellikleri görülebilir.

Patlayıcının gömülü olduğu sahanın boyutları 200x300x50 cm dir. Hesaplamalarda kireçtaşı ve toprak olarak iki farklı ortam kullanılmıştır. Bu ortamlar içerisinde, anti-personel mayının deteksiyonunda ki limitler araştırılmış ve karşılaştırılması yapılmıştır. Hesaplamalarda



kullanılan formasyonların geometri özellikleri, yoğunluk ve içerdikleri elementlere ait kütle oranları Çizelge 4.5 de listelenmiştir.

Çizelge 4.5 Alt ve üst ortamın geometrik özellikleri ve elementlere ait kütle oranları

Elementlere ait kütle oranları											
Element	Materyal	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Boyut (cm)	C	O	Ca	N	Ar	H	Al	Si
alt ortam	kireçtaşı CaCO <sub>3</sub>	2,71	200 x 300 x	0,1200	0,4800	0,4000					
	toprak	1,12	50		0,5520				0,0146	0,0731	0,3607
üst ortam	hava	0,0013	200 x 300 x 60		0,2318		0,75532	0,01288			

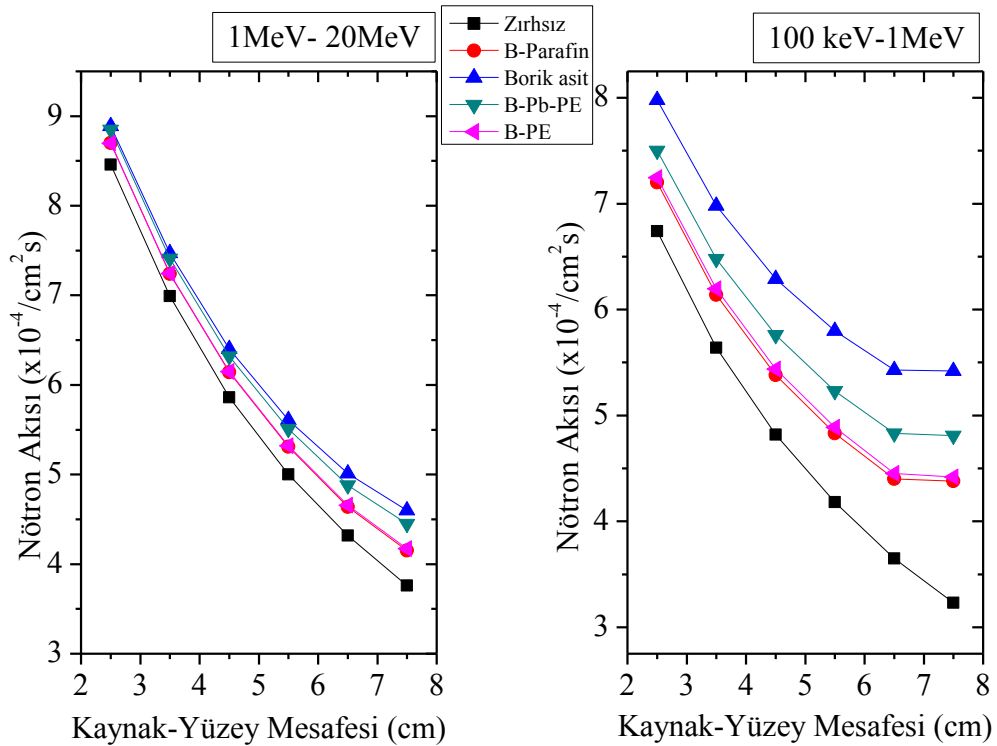
## 5. SİMULASYON ÇALIŞMALARI

### 5.1 MCNP Hesaplamaları ile Modelin Optimizasyonu

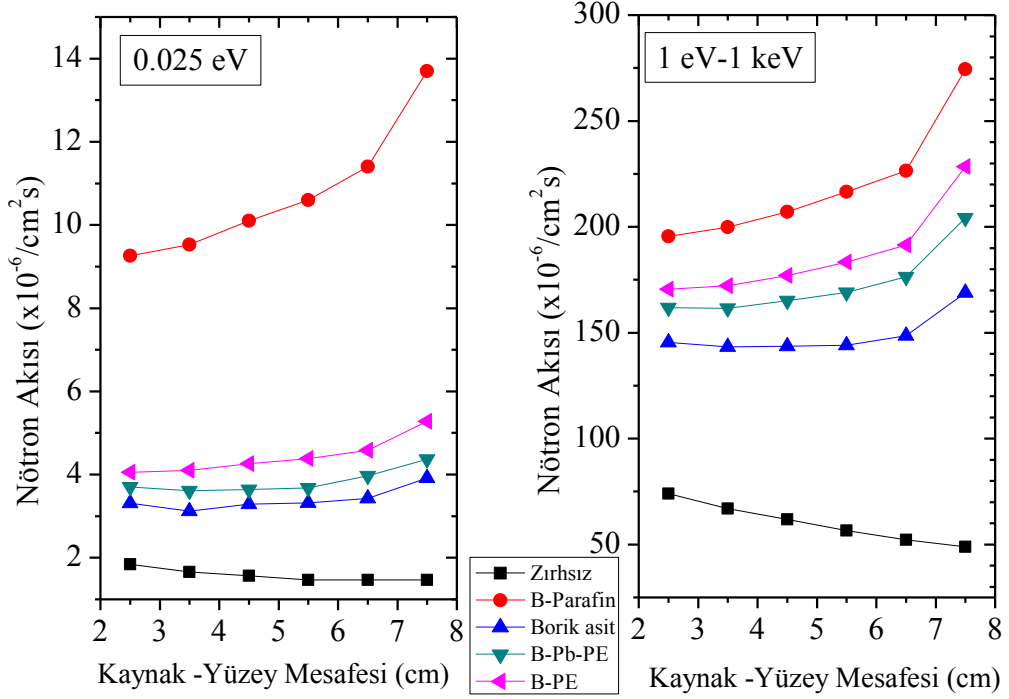
#### 5.1.1 Nötron kaynağı konumunun belirlenmesi

Mayın deteksiyonu için tasarlanan sistemde (model), öncelikle,  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağının, formasyon (kireçtaşı) yüzeyine olan uzaklığının, 5 cm derinlikte olduğu varsayılan bir plastik mayına (TNT) ulaşan hızlı nötron akısını ve moderatör bloğu altına yatay düzlemde yerleştirilmiş  $\text{BF}_3$  nötron detektörlerinin algılayacağı mayından saçılarak geri gelecek ısı nötron sayısını nasıl etkileyeceği araştırılmıştır. Nötron kaynağı-formasyon(kireçtaşı) yüzeyi mesafesi 0,5 cm aralıklarla yüzeyden uzaklaştırılarak MCNP kodu (F4 nötron akısı hesap kartı kullanılarak) ile TNT deki nötron akısının değişimi belirlenmiştir. Şekil 5.1 ve 5.2 de kaynak yüzeyden uzaklaştırılarak farklı moderatör malzemeler içine sokulduğunda, TNT ye ulaşan hızlı nötronların epıısı ve ısı nötronlara dönüştüğü gözlenmektedir.

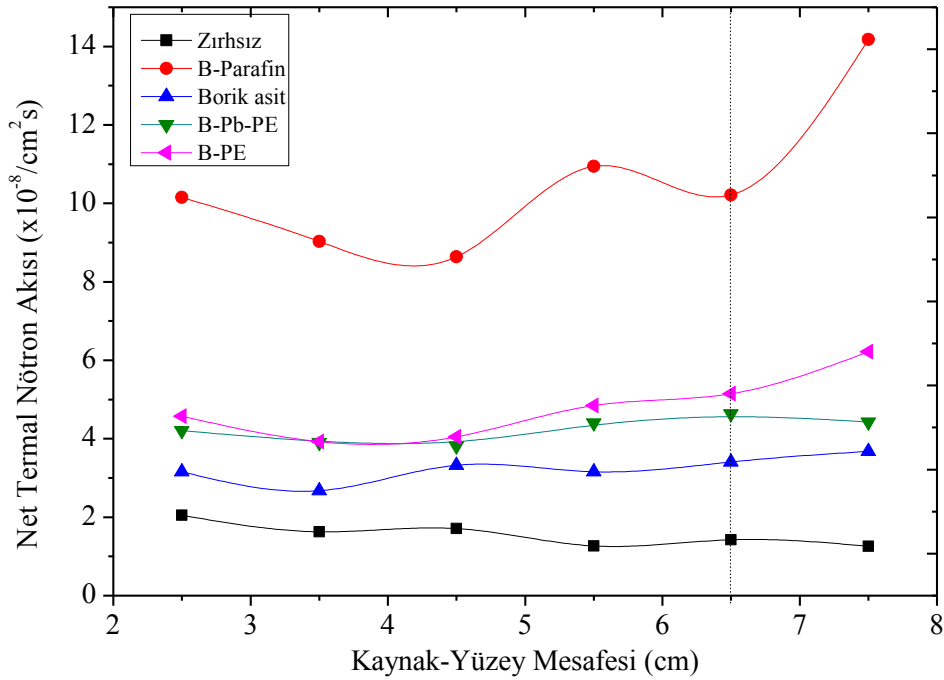
MCNP kodu ile  $10^7$  nötron/s için yapılan hesaplamalarda, her bir nötron, Watt fisyon spektrum dağılımındaki 2,306 nötron'a karşılık gelmekte olup, simülasyon sonuçları MCNP kodu tarafından başlangıçtaki nötron sayısına bölünerek normalize edilmiştir.



Şekil 5.1 TNT içerisindeki hızlı nötron akısının kaynağın konumuna göre değişimi



Şekil 5.2 TNT içerisindeki ısıl ve epizıl nötron akısının kaynağın konumuna göre değışimi



Şekil 5.3  $\text{BF}_3$  detektörlerinde net ısıl nötron akısının kaynağın konumuna göre değışimi

TNT kireçtaşı içinde iken  $\text{BF}_3$  detektörlerinde ölçülecek net ısıl nötron akısı, kaynağın

kireçtaşı yüzeyinden olan yüksekliğinin değişimine bağlı olarak hesaplanmış ve Şekil 5.3 de verilmiştir. Kaynak - yüzey mesafesi 6,5 cm olduğu konumdan itibaren nötron kaynağı modaratör malzemenin (zırhın) içerisinde ve mesafe 5,5 cm olduğunda ise kaynak zırhın 1 cm dışarısında ve BF<sub>3</sub> detektörleri arasında bulunmaktadır.

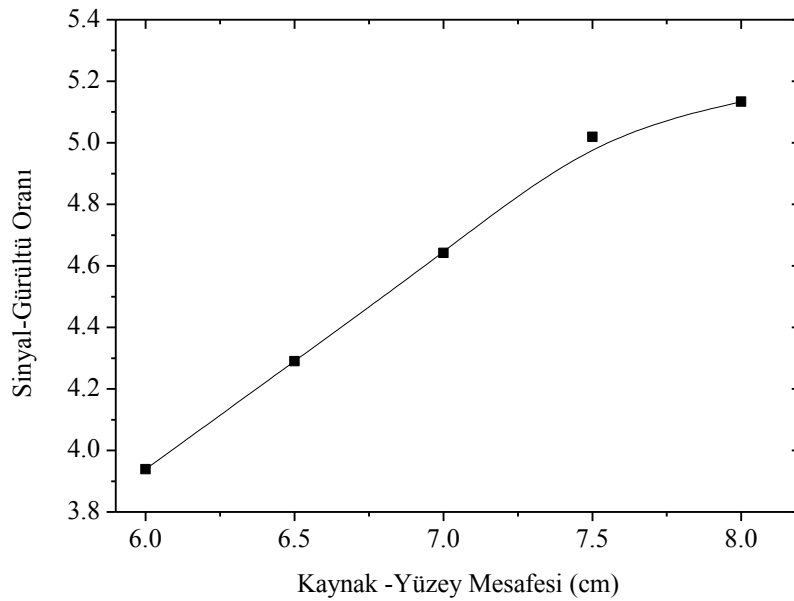
Kaynak zırhın içerisine doğru kaydırıldığında, BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akısı artarken TNT' içindeki hızlı nötron akısı biraz azalmaktadır. Ancak, bu durumda nötronların indüklediği gama ışınlarının ölçüldüğü NaI detektörlerindeki sayımların artıyor olması nedeniyle nötron kaynağının zırhın içerisine yerleştirilerek patlayıcı deteksiyonunun yapılmasının daha uygun olacağını göstermektedir.

Bu hesaplamalara ek olarak, kaynak mesafesine göre BF<sub>3</sub> ve NaI detektörlerindeki sinyal-gürültü oranlarının hesaplamaları da yapılmıştır. Sinyal gürültü oranı,

$$\text{sinyal} - \text{gürültü oranı} = (N - N_0)/N_0 \quad (5.1)$$

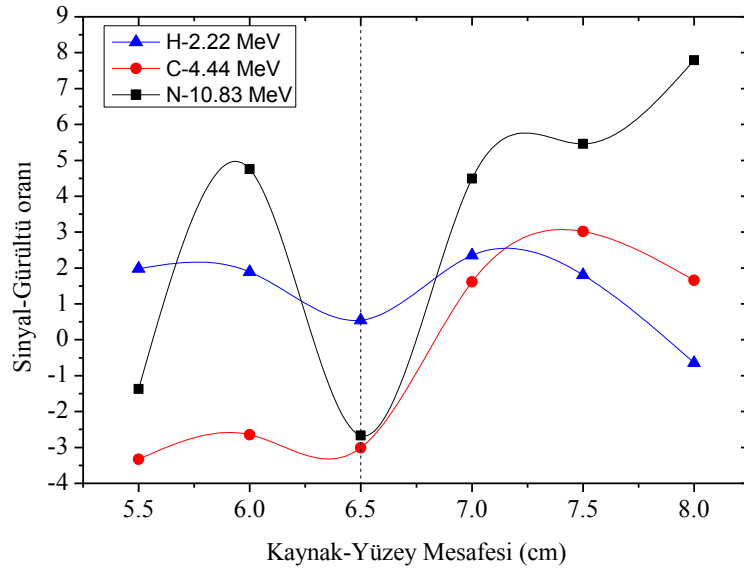
şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, N, kireçtaşı içerisinde gömülü TNT var iken, N<sub>0</sub> ise TNT olmadığı durumlardaki nötron veya gama ışını sayısını ifade etmektedirler.

BF<sub>3</sub> detektörleri için kaynağın konumunun değişimine göre hesaplanan sinyal-gürültü oranları Şekil 5.4 te gösterilmiştir. En yüksek sinyal-gürültü oranları kaynağın zırhın içerisinde olduğu konumda gözlenmiştir.



Şekil 5.4 Kaynağın konumuna bağlı olarak BF<sub>3</sub> detektörlerinde sinyal- gürültü oranının değişimi

NaI detektörlerinde kaynağın konumunun değişimine göre hesaplanan sinyal-gürültü oranlarının, kaynağın zırhın içerisinde formasyon yüzeyinden 7,5 cm yukarıda ve kaynak odası tavanının 2 cm altında bulunduğu durumda C, H ve N için 1'den büyük değer verdiği görülmüştür. Kaynağın yüzeyden 8 cm yukarıda olduğu durumda, N için en yüksek sinyal-gürültü oranı elde edildiği halde diğerleri için bu oran düşmektedir. (Şekil5.5). Kaynağın 7,5 cm yükseklikte bulunduğu konumda hem BF<sub>3</sub> ve NaI detektörlerinde sinyal-gürültü oranı yüksektir hem de 10,83 MeV enerjili gama ışını gözlemek mümkündür.



Şekil 5.5 Kaynağın konumuna bağlı olarak NaI detektörlerinde sinyal- gürültü oranının değişimi

Bu sonuçlar doğrultusunda, kaynağın zırhın içerisinde ve formasyon yüzeyinin 7,5 cm yukarısına yerleştirilmesine karar verilmiştir.

## 5.1.2 Nötron kaynağına uygun zırhın tasarımı

### 5.1.2.1 Moderatör (zırh) malzemesinin seçimi

Mayın deteksiyon sisteminin performansını etkileyen önemli faktörlerden biri de deteksiyon sistemine uygun moderatör seçimidir. Kaynağın etrafında kullanılan bir bloğun, hem topraktan geri saçılan nötronları absorbe ederek arka-plan gürültüsünü azaltacağı hem de mayın deteksiyonuna katılan nötronların sayısını artıracacağı düşünülebilir. Ayrıca böyle bir bloğun operatör' ün radyasyon tehlikesinden korunmasını da sağlayabilir. Ancak, yine de kullanılan kaynağın gücü operatör için izin verilen düzeyde daha düşük olmalıdır. Radyoaktif

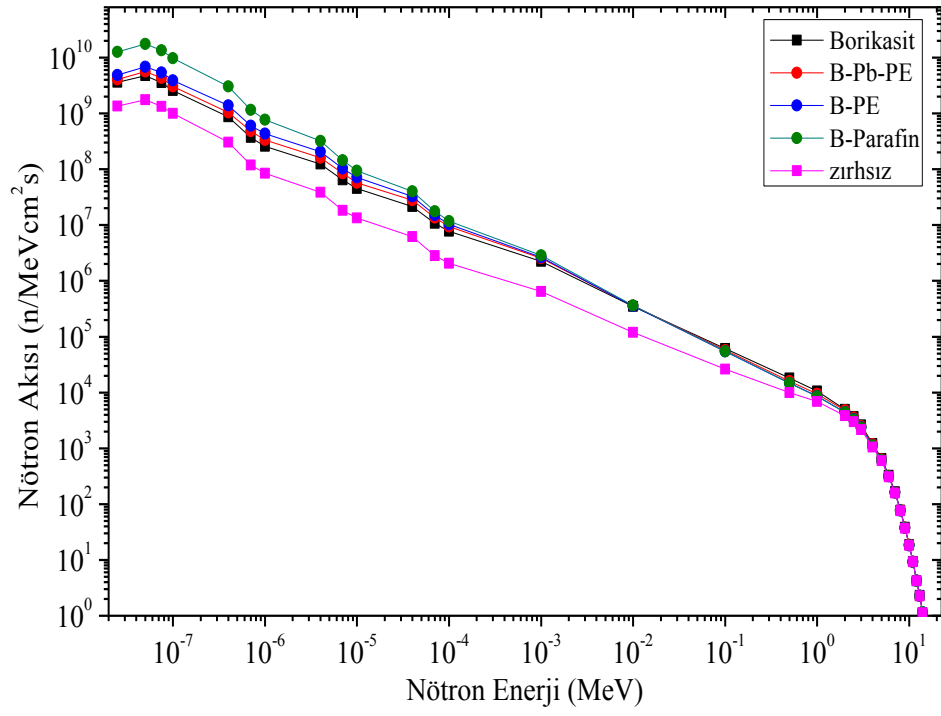
malzeme veya radyasyon meydana getiren cihazların kullanılması sırasında, operatör' e yılda 1000 saatlik ışınlama süresi için izin verilen yıllık doz değeri 20 mSv tir (Datema, 2002). Öte yandan, düşük kaynak gücü deteksiyon sisteminin verimliliğini olumsuz yönde etkiler. Bu nedenlerle, bu tez çalışmasında deteksiyon sistemi için öncelikle uygun zırh malzemesi ve daha sonra da bu zırh malzemesi için uygun zırhlama kalınlığı araştırılmıştır.

Zırh malzemeleri olarak, borik asit, %5 bor katkılı polietilen (B- PE), %3 bor katkılı parafin (B- parafin) ve bor-kurşun katkılı polietilen (B- Pb- PE) malzemeleri incelenmiştir. Bu zırh malzemeleri için yapılan hesaplamalarda kullanılan elementlere ait yoğunluk ve kütle oranları Çizelge 5.1 de listelenmiştir. Hesaplamalarda, BF<sub>3</sub> detektörlerinin boyutlarına ve yerleştiriliş geometrisine göre üst yüzeyini tamamen örtecek biçimde 28x30x10 cm boyutlarında bir zırh kullanılmıştır.

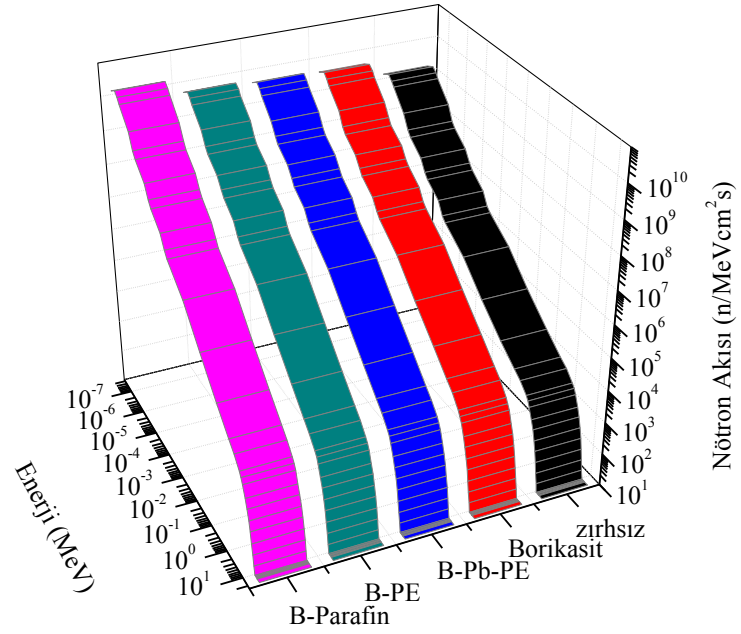
Çizelge 5.1 Hesaplamalarda kullanılan elementlere ait kütle oranları ve malzeme yoğunlukları

Elementlere ait kütle oranları									
Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	H	<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> B	C	O	Si	Ca	Pb
Borik asit	1,465	0,018	0,035	0,155		0,792			
B - PE	0,940	0,625	0,025		0,275	0,075			
B-parafin	0,947	0,144	0,005	0,025	0,826				
B- Pb- PE	3,800	0,018	0,016		0,107	0,042	0,005	0,012	0,800

Her bir zırh malzemesi ve zırhın kullanılmadığı beş ayrı durum için kireçtaşı içerisine 5 cm derinliğe, 7 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde TNT yerleştirilerek, sırasıyla TNT de, BF<sub>3</sub> detektörlerinde ve NaI detektörlerindeki nötron akılarını belirlemek için MCNP4C2 kodu kullanılarak simülasyonlar yapıldı. Şekil 5.6 da her bir zırh malzemesi için TNT deki nötron akısının enerjiye bağlı değişimi gösterilmiştir. Kaynak şiddeti 2,306x10<sup>7</sup> nötron/s alınarak gerçekleştirilen simülasyonlarda 10<sup>-8</sup>-10<sup>-3</sup> MeV enerji aralığında bor katkılı parafin malzemenin en yüksek nötron akısı değerlerini sağladığı gözlenmiştir.



(a)



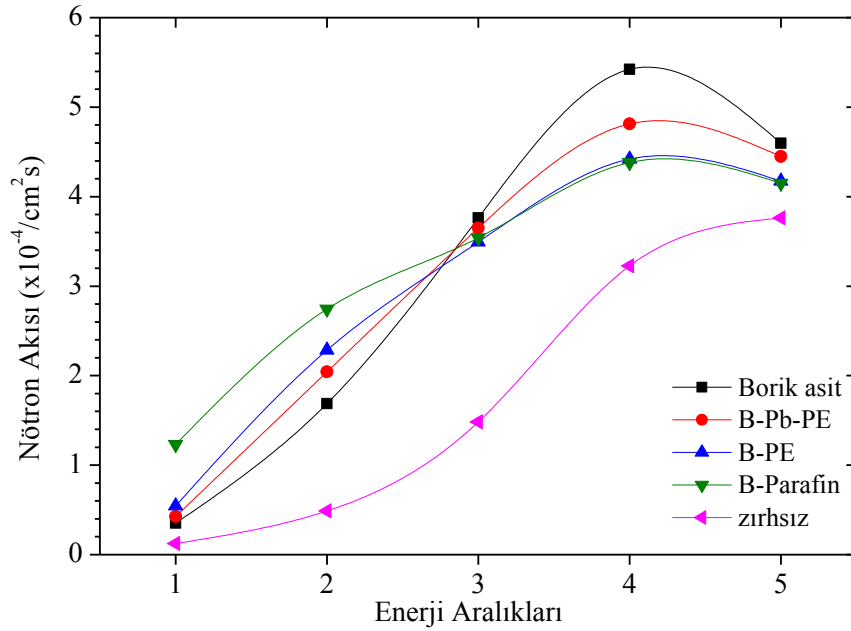
(b)

Şekil 5.6 TNT'deki nötron akısının farklı zırh malzemeleri için enerjiye bağlı değişimi

Simülasyon sonuçları kullanılarak, TNT için beş farklı enerji bölgesinde hesaplanan toplam nötron akıları Şekil 5.7 de gösterilmiştir. Enerji aralıkları,

- 1) 0-1 eV,
- 2) 1 eV-1 keV,
- 3) 1 keV-100 keV,
- 4) 100 keV-1 MeV,
- 5) 1 MeV-20 MeV

olarak numaralandırılmıştır. 0-100 keV enerji bölgesindeki nötronların sayısını en çok arttıran malzemenin bor katkılı parafin olduğu görülmektedir.



Şekil 5.7 Farklı zırh malzemeleri için enerji aralıklarında nötron akısı

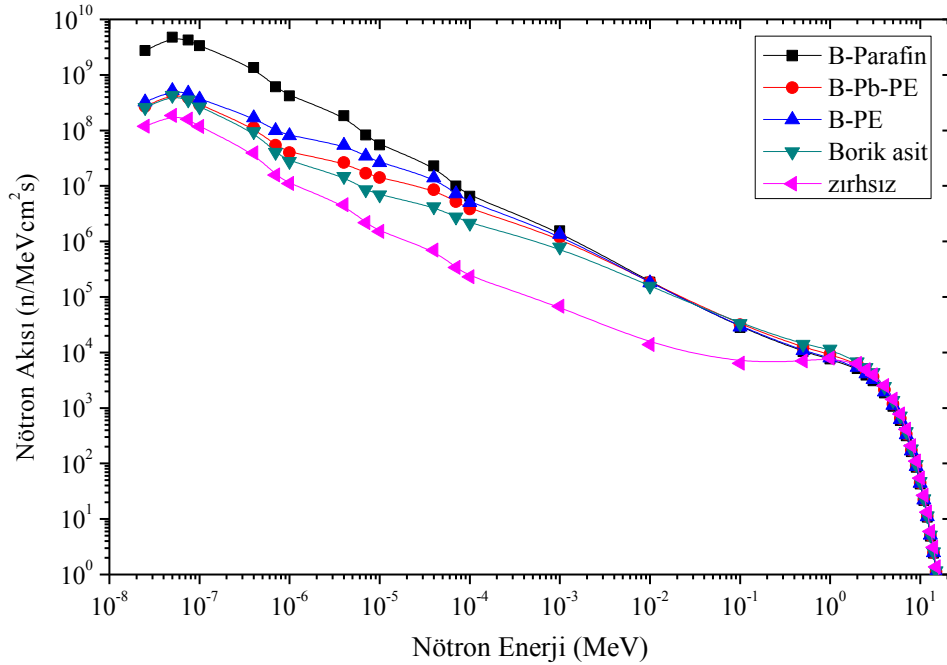
Çizelge 5.2 de ise TNT deki toplam nötron akısının her bir zırh malzemesi için karşılaştırılması verilmiştir. Toplam nötron akısının da bor katkılı parafin için en yüksek değeri verdiği ve sistemde zırh kullanılmadığı duruma göre %76'lık bir artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu nedenle bor katkılı parafin malzemenin, TNT de nötronlarla gerçekleşebilecek reaksiyonların sayısını arttırması beklenmektedir.

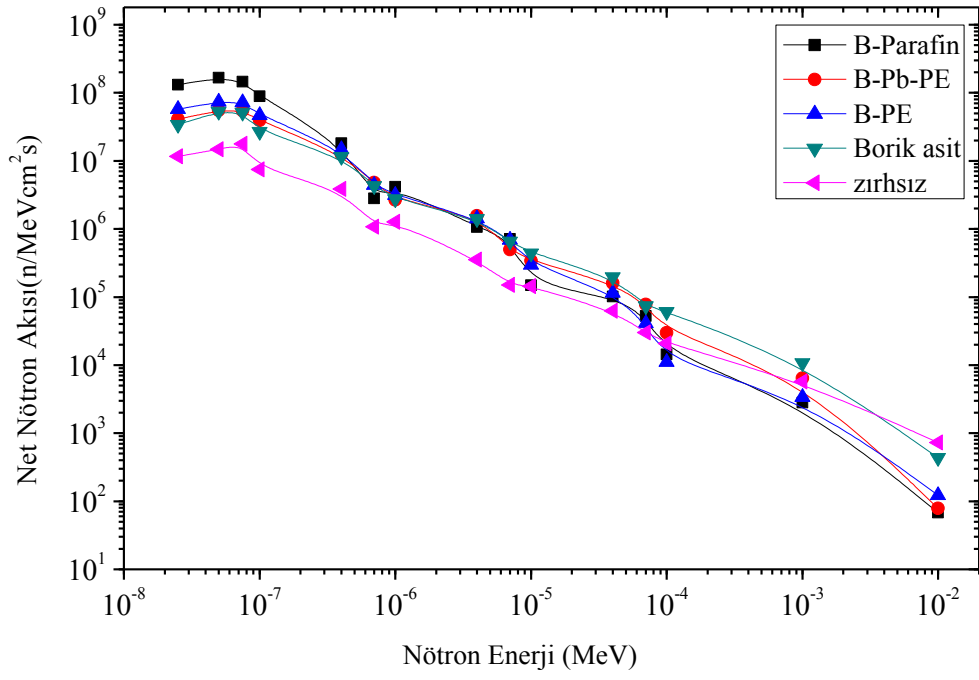


Çizelge 5.2 TNT deki toplam nötron akısı

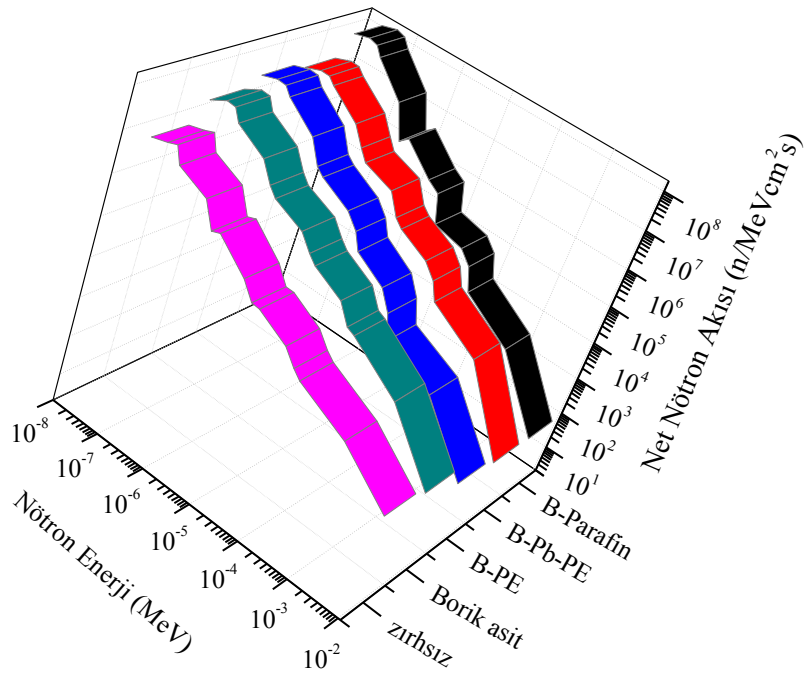
Zırh Malzemeleri	Nötron Akısı (n/cm <sup>2</sup> s)
Zırhsız	20949
B-Parafin	36896
Borik asit	36435
B-Pb-Polietilen	35512
B-Polietilen	34359

Geri saçılan nötron akısının belirlenmesi amacıyla, kireçtaşı içerisinde TNT mayınının bulunduğu durumda BF<sub>3</sub> detektörlerinde 0- 20 MeV nötron enerji aralığındaki nötron akısı, farklı zırh malzemeleri için incelendi (Şekil 5.8). Ayrıca, her bir zırh malzemesi için TNT siz ortamda BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akıları da hesaplanarak net nötron akıları belirlendi (Şekil 5.9 a,b). 10<sup>-8</sup> – 10<sup>-3</sup> MeV nötron enerji aralığında ve özellikle ısı nötronları için nötron akısındaki değişimde en çok artış gösteren malzemenin bor katkılı parafin olduğu görülmüştür.

Şekil 5.8 BF<sub>3</sub> detektörlerinde TNT li ortamda farklı zırhlar için nötron akıları



(a)



(b)

Şekil 5.9  $BF_3$  detektörlerde net nötron akıları

NaI detektörler için hesaplanan nötron akısı değerlerinin zırh malzemelerine göre karşılaştırılması Çizelge 5.3 de verilmiştir. Yine, Bor katkılı parafin NaI detektörlerin hasar verici nötronlardan korunmasını sağlayacak en iyi malzeme olarak gözükmektedir.

Çizelge 5.3 NaI detektöre gelen toplam nötron akısı

Zırh Malzemeleri	Nötron Akısı (n/cm <sup>2</sup> s)
Zırhsız	5149
Borik asit	4267
B-Pb-Polietilen	3254
B-Polietilen	2708
B-Parafin	2605

Kullanılan zırh malzemesine göre NaI detektörlerindeki gama enerji spektrumu MCNP kodu F8 hesap kartı kullanılarak hesaplandı. Her bir malzeme için, TNT li ve TNT siz kireçtaşı ortamlarında hesaplanan gama spektrumlarında karakteristik gama ışını enerji değerlerine karşılık gelen gama ışını sayım değerleri Çizelge 5.4 de listelenmiştir. Çizelge de, ortamda TNT bulunuyor iken artış görülen değerler kırmızı renk ile gösterilmiştir. Çizelge 5.5 ise, zırh kullanılmadığı durum için, özel gama enerjilerine karşılık gelen gama ışını sayımlarını verilmektedir. Değerler MCNP kodu tarafından başlangıçtaki nötron sayısına göre normalize edilmiştir.

Çizelge 5.4 NaI detektörlerdeki gama sayımlarının zırh malzemelerine göre karşılaştırılması

Enerji (MeV)	Borik asit	Borik asit TNT siz	B-Pb-Pe	B-Pb-PE TNT siz	B-PE	B-PE TNT siz	B-Parafin	B-Parafin TNT siz
2,22	3,70x10 <sup>-6</sup>	3,30x10 <sup>-6</sup>	3,50x10 <sup>-6</sup>	3,40x10 <sup>-6</sup>	6,50x10 <sup>-6</sup>	6,20x10 <sup>-6</sup>	3,18x10 <sup>-5</sup>	3,15 x 10 <sup>-5</sup>
2,30	3,90x10 <sup>-6</sup>	3,70x10 <sup>-6</sup>	2,40x10 <sup>-6</sup>	2,40x10 <sup>-6</sup>	2,30x10 <sup>-6</sup>	2,10x10 <sup>-6</sup>	3,80x10 <sup>-6</sup>	3,50x10 <sup>-6</sup>
4,43	1,00x10 <sup>-6</sup>	1,20x10 <sup>-6</sup>	1,30x10 <sup>-6</sup>	1,40x10 <sup>-6</sup>	1,30x10 <sup>-6</sup>	1,30x10 <sup>-6</sup>	1,60x10 <sup>-6</sup>	1,50x10 <sup>-6</sup>
4,95	9,00x10 <sup>-7</sup>	1,00x10 <sup>-6</sup>	1,00x10 <sup>-6</sup>	8,00x10 <sup>-7</sup>	1,00x10 <sup>-6</sup>	1,00x10 <sup>-6</sup>	1,10x10 <sup>-6</sup>	1,00x10 <sup>-6</sup>
5,10	1,10x10 <sup>-6</sup>	1,20x10 <sup>-6</sup>	8,00x10 <sup>-7</sup>	8,00x10 <sup>-7</sup>	9,00x10 <sup>-7</sup>	9,00x10 <sup>-7</sup>	9,00x10 <sup>-7</sup>	9,00x10 <sup>-7</sup>
10,83	0	0	0	0	0	0	1,00x10 <sup>-7</sup>	0

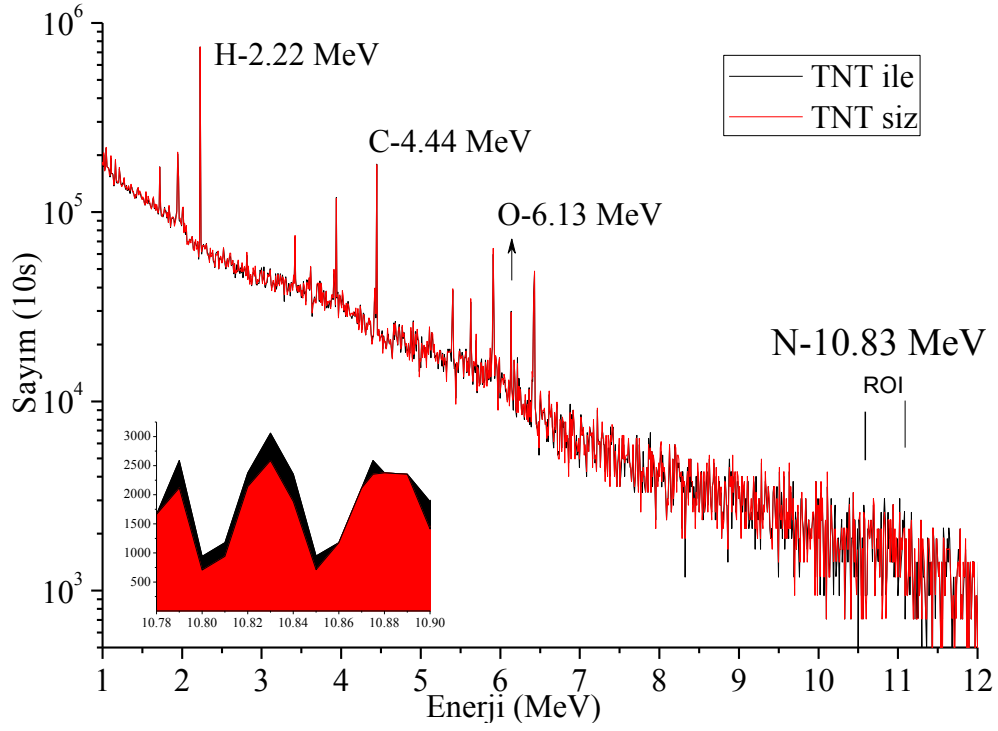
Çizelge 5.5 NaI detektörlerdeki gama sayımlarının zırh kullanılmadığı durum için karşılaştırılması

Enerji (MeV)	Zırhsız	Zırhsız TNT siz
2,22	$3,40 \times 10^{-6}$	$3,40 \times 10^{-6}$
2,30	$3,60 \times 10^{-6}$	$3,60 \times 10^{-6}$
4,43	$6,00 \times 10^{-7}$	$7,00 \times 10^{-7}$
4,95	$6,00 \times 10^{-7}$	$5,00 \times 10^{-7}$
5,10	$6,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-7}$
10,83	0	0

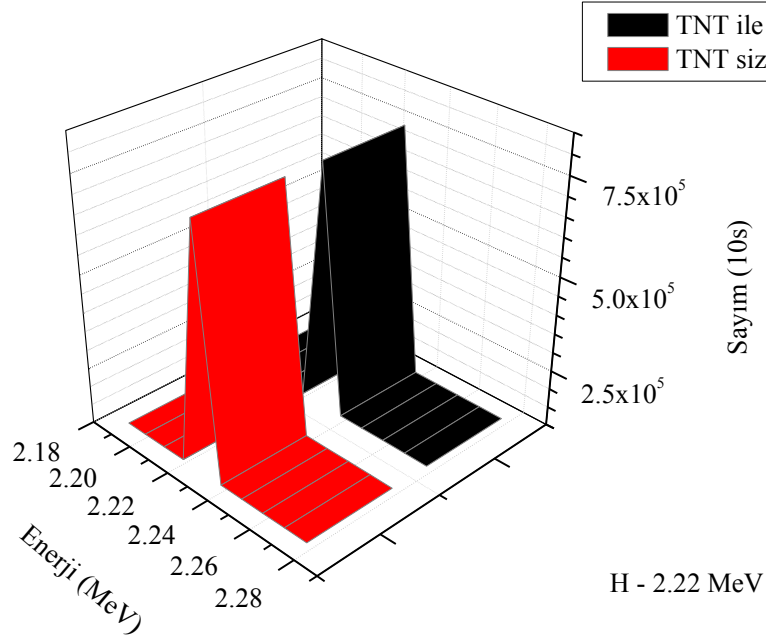
Çizelgelerden de görüldüğü gibi karakteristik gama ışınlarının sayısındaki artış en çok bor katkılı parafinde görülmüştür. Özellikle, patlayıcının belirlenmesini kolaylaştıracak olan 10,829 MeV enerjili ısıl nötron yakalama gama ışını,  $2,306 \times 10^7$  nötron için sadece bu zırh malzemesinde gözlenebilmiştir.  $2,306 \times 10^7$  nötron/s den daha zayıf kaynak için yapılan hesaplamalarda bu enerjideki gamalar gözlenememektedir.

Şekil 5.10 da bor katkılı parafin zırh için kireçtaşı içerisinde 5 cm derinlikte gömülü TNT olduğu ve olmadığı durumlarda 10 saniye ışınlama süresince ( $10^8$  nötron) hesaplanan gama spektrumu verilmiştir. Bu spektrumda, özellikle, yüksek enerji bölgelerindeki sayımın artış gösterdiği görülmüştür. 10,829 MeV enerjili gamalar, TNT olmadığı durumda da çok az sayıda gözlenmiştir. Bu gamaların gözlenme sebebi havada bulunan az miktardaki azot olabilir.

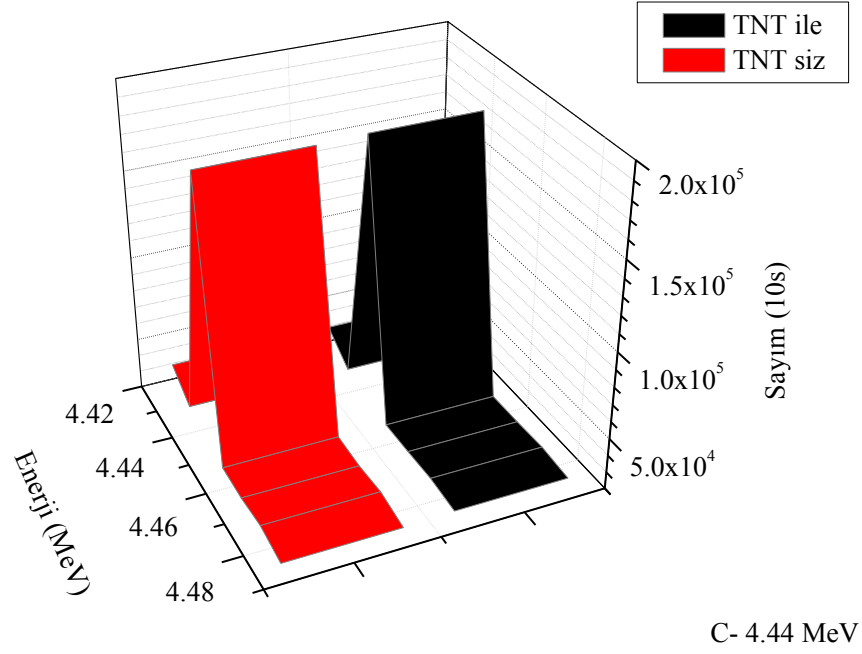
Şekil 5.11 de mayın deteksiyonunda belirleyici olabilecek karakteristik gamalar için spektrumdan alınan kesitler görülmektedir. Mayın deteksiyonunda, genellikle, hidrojen den gelen 2,22 MeV enerjili gamaların sayısında bir artış gözlemlendiğinde azotun 10,83 MeV enerjili gamaları da gözlenebiliyorsa formasyon içerisinde mayın olduğu düşünülmektedir. Bu spektrum kesitlerinden de görülebileceği gibi 10 sn'lik bir ölçümde bile H, C, O ve N için TNT li ve TNT siz spektrumlar karşılaştırıldığında gamaların sayısında artış gözlenebilmiştir.



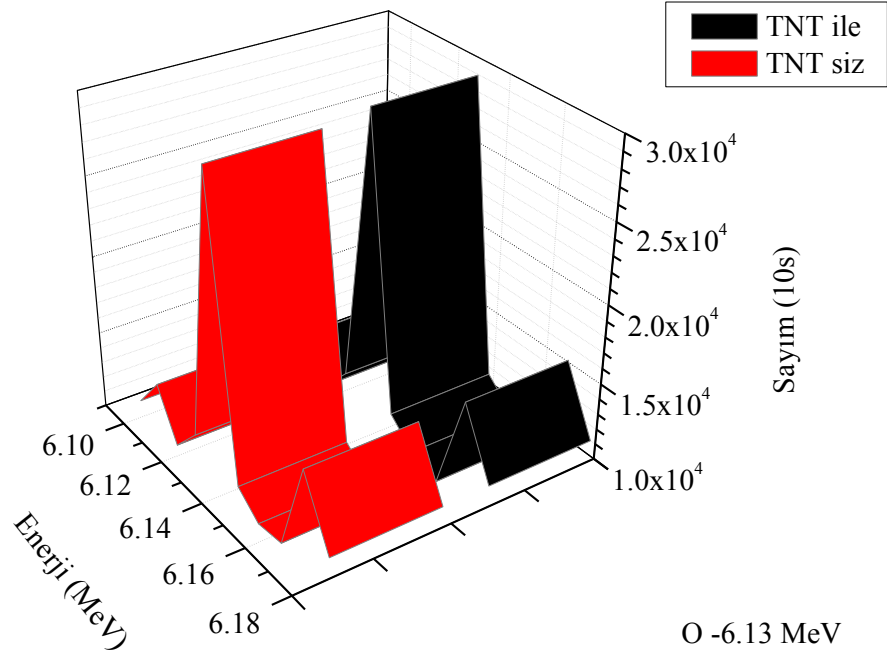
Şekil 5.10 NaI detektörlerde TNT' nin gömülü olduğu ve olmadığı durumlar için gama spektrumu



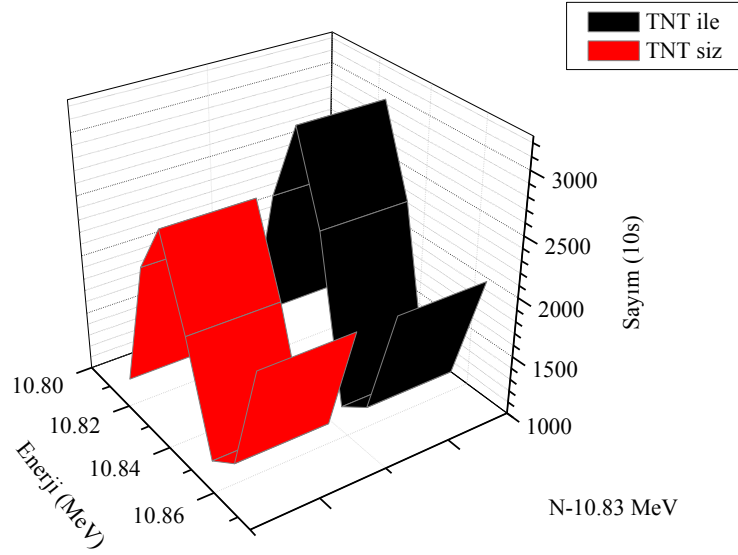
Şekil 5.11 a)  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  reaksiyonu için spektrum kesiti



Şekil 5.11 b)  $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$  reaksiyonu için spektrum kesiti



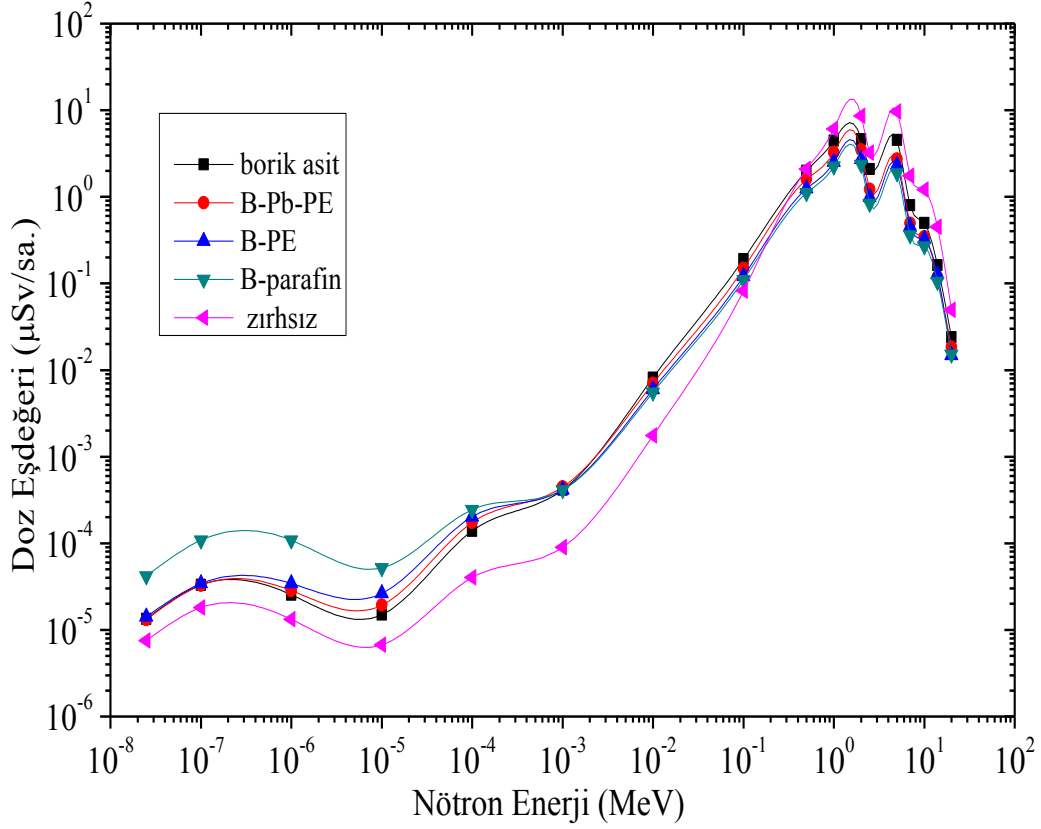
Şekil 5.11 c)  $^{16}\text{O}(n,n'\gamma)^{16}\text{O}$  reaksiyonu için spektrum kesiti



Şekil 5.11 d)  $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$  reaksiyonu için spektrum kesiti

Kaynağın zırhlanmasında kullanılacak malzemenin seçimi için, NaI detektörleri üzerindeki doz birikimi de hesaplanmıştır. Bunun için, MCNP Monte Carlo kodunda bulunan F6 hesap kartıyla, önce NaI detektörlerinde biriken enerji miktarı (MeV/g) hesaplandı ve sonra da elde edilen sonuçlar kullanılarak doz eşdeğerleri hesaplandı. Bu hesaplamalarda, soğurulan nötronlar için kullanılan kalite faktörleri Ek 1 de listelenmiştir. Gama ışınları için ise kalite faktörü birdir. Malzemeler için hesaplanan doz eşdeğerleri, nötron enerjilerine göre incelendiğinde, yüksek enerji bölgesindeki en düşük nötron doz değerine sahip malzeme bor katkılı parafin olmuştur (Şekil 5.12) .

Çizelge 5.6 dan görülebileceği gibi, NaI detektörlerindeki nötron dozunu düşürme bakımından en çok bor katkılı parafin başarılı olmuştur. Bu sistemde, nötronlar için NaI detektörlerdeki doz miktarı, kaliforniyum kaynak için zırh kullanılmadığındaki  $33\mu\text{Sv/sa.}$  değerinden, kullanılan bor katkılı parafin zırh sayesinde  $9\mu\text{Sv/sa.}$  değerine düşürülmüştür. Aynı zamanda,  $\gamma$  ve nötronlar için toplam doz miktarı da,  $49\mu\text{Sv/sa.}$  den  $37\mu\text{Sv/sa.}$  değerine düşürülmüştür. Böylece nötronların NaI detektörlere verebileceği zarar önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda bundan sonraki simülasyonlarda, zırh malzemesi olarak, bor katkılı parafinin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.12 Zırh malzemeleri için NaI detektörlerde doz eşdeğerlerinin enerjiyle değişimi

Çizelge 5.6 NaI detektörler için nötron, gama ve toplam doz eşdeğerlerinin karşılaştırılması

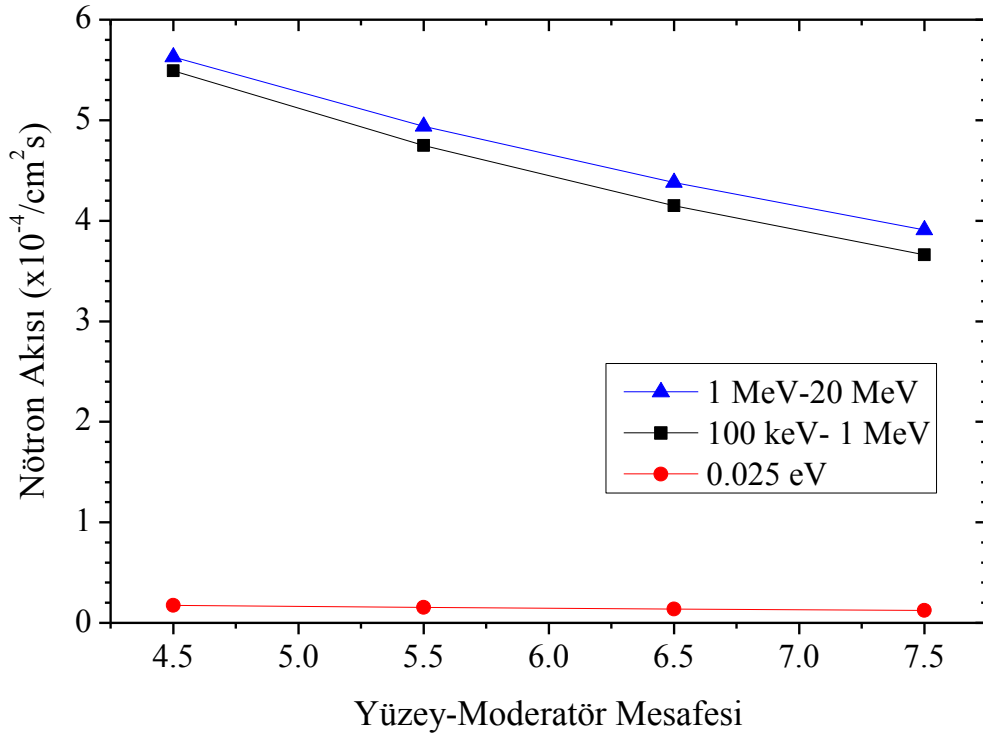
Zırh Malzemeleri	Doz Eşdeğeri (µSv/sa.)		
	nötron	gama	toplam
Borik asit	19	22	41
B-Pb-Polietilen	13	18	31
B-Polietilen.	11	25	36
B-Parafin	9	28	37
Zırhsız.	33	16	49

Ayrıca, 10 µg kütleli kaliforniyum kaynağın bor katkılı parafin zırhın içerisinde bulunduğu yükseklik ile aynı hizada ve 1 m uzaklıkta havada ki doz eşdeğerleri hesaplandı. 1 m uzaklıkta gama ışını için doz miktarı 0,547 µSv/sa. ve nötronlar için de 0,006 µSv/sa. olarak belirlendi. Buna göre, 1000 saatlik ışınlama için yıllık doz miktarı 0,553 mSv (55,3 mRem) dir. Bu değer operatöre 1000 saatlik ışınlama için izin verilen yıllık doz miktarının (20 mSv) oldukça altındadır.

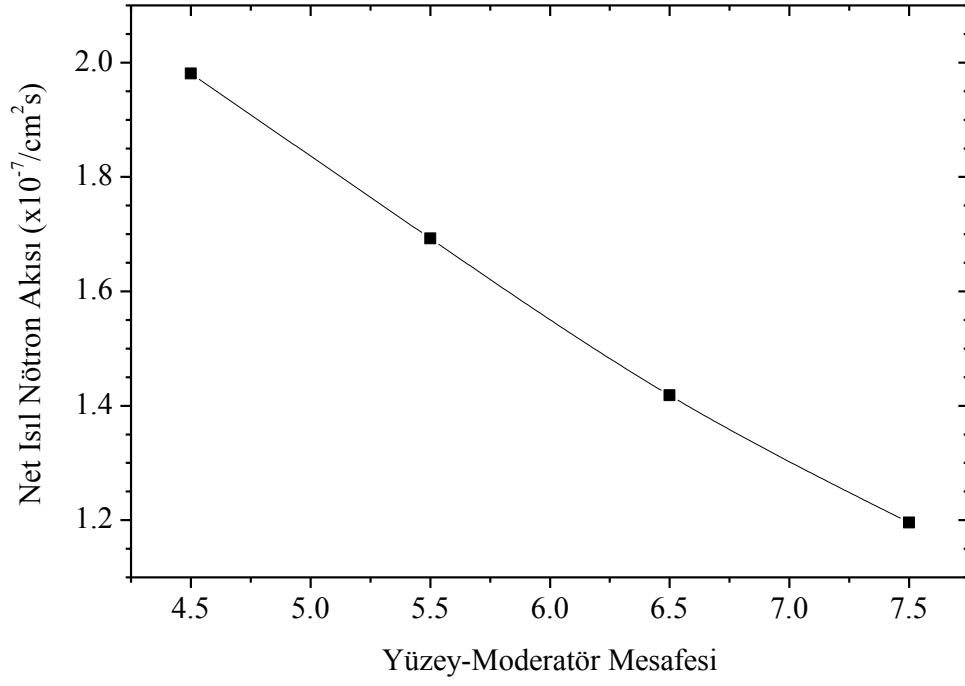


### 5.1.2.2 Deteksiyon sisteminin konumunun belirlenmesi

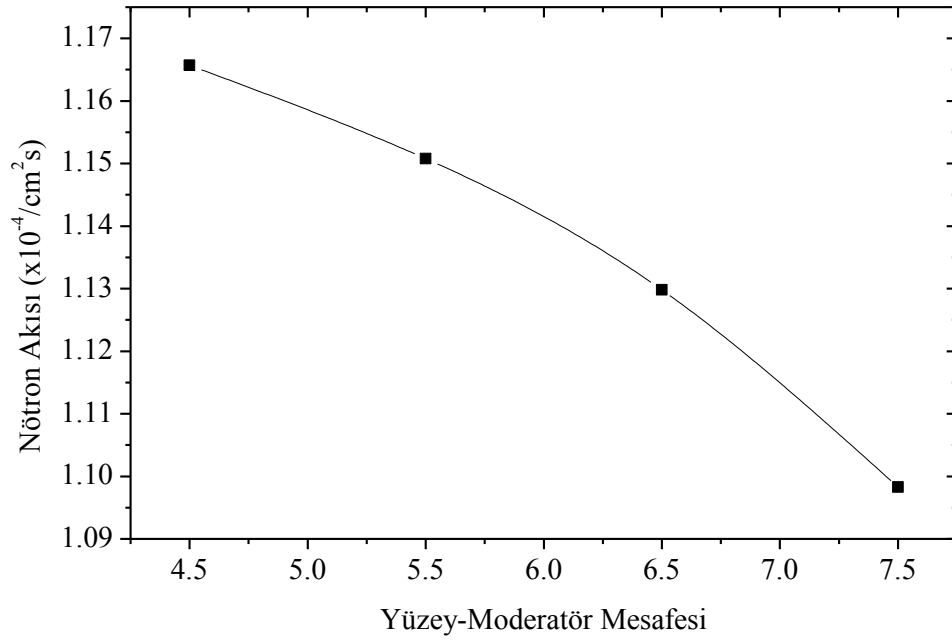
Zırh malzemesi olarak kullanılmasına karar verilen bor katkılı parafin zırh ile bütünleştirilmiş deteksiyon sisteminin kireçtaşı yüzeyinden ne kadar yukarıya yerleştirilmesinin uygun olacağı araştırıldı. Bu amaçla, deteksiyon sistemi kireçtaşından 0,5 cm aralıklarla uzaklaştırılarak TNT, BF<sub>3</sub> detektörleri ve NaI detektörlerindeki nötron akısı değişimleri incelendi. Kireçtaşı içerisinde 5 cm derinlikte bulunan TNT deki hızlı ve ısıl nötron akısının moderatörün kireçtaşından olan uzaklığına bağlı değişimi Şekil 5.13 de gösterilmiştir. Şekil 5.14 ve 5.15 de sırasıyla BF<sub>3</sub> detektörlerindeki net ısıl nötron akısı ve NaI detektörlerindeki nötron akısı değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.13 Moderatörün kireçtaşından yüksekliğine göre TNT deki hızlı ve ısıl nötron akısının değişimi



Şekil 5.14 Moderatörün kireçtaşından yüksekliğine göre  $\text{BF}_3$  detektörlerinde ısıl nötron akısının değişimi



Şekil 5.15 Moderatörün yerden yüksekliğine göre NaI detektörlerine gelen nötron akısı

Deteksiyon sistemi kireçtaşı yüzeyinden uzaklaştırıldıkça, TNT deki hızlı nötronların ve  $\text{BF}_3$

detektörlerinde de ısıl nötronların azaldığı görülmüştür. NaI detektörlerinde ise, 10,83 MeV enerjili gama ışını deteksiyon sisteminin 4,5 ve 6,5 cm yükseklikte olduğu konumlarda gözlenebilmiştir. Ancak, nötron akısının TNT ve BF<sub>3</sub> detektörlerinde yüksek olduğu 4,5 cm yüksekliğinde, moderatörün altına yatay olarak yerleştirilmiş olan BF<sub>3</sub> detektörleri yüzeye çok yakın ve NaI detektörlerindeki nötron akısı da yüksek olmaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda, deteksiyon sisteminin moderatörün yerden 6,5 cm yukarıda olduğu konuma yerleştirilmesi uygun bulunmuştur.

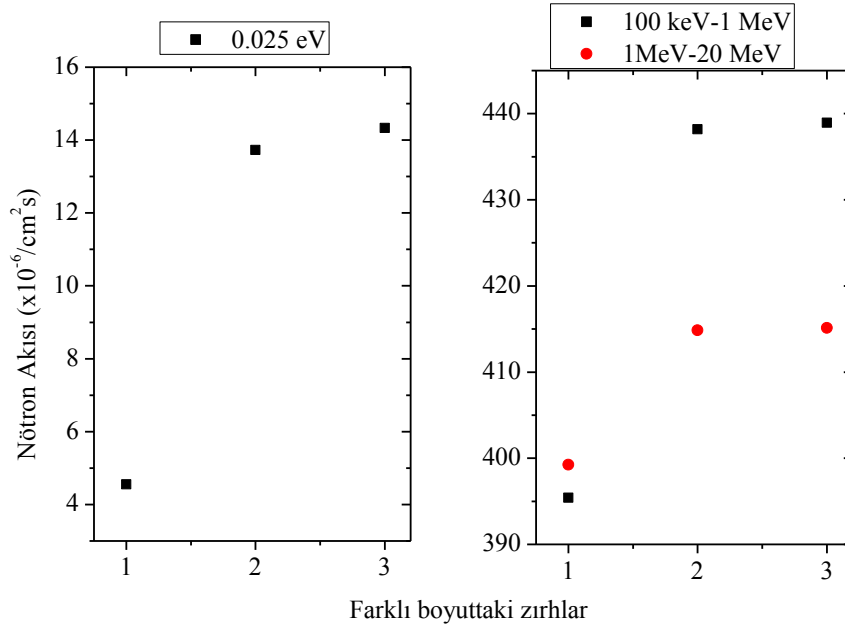
### 5.1.2.3 Bor katkılı parafin zırh genişliğinin belirlenmesi

Bor katkılı parafin zırhın genişliğinin deteksiyon sistemine etkisinin belirlenerek uygun genişlikte zırhın seçilmesi amacıyla, üç farklı geometriye sahip zırh, önceki simülasyonların sonuçlarında belirlenen konuma yerleştirilerek Monte Carlo simülasyonları yapılmıştır. Çizelge 5.7 de bu simülasyonlarda kullanılan zırh geometrisi ile birlikte BF<sub>3</sub> detektörlerinde belirlenen net ısıl nötron ile 0-1 keV enerji aralığındaki nötron akısı sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.7 Farklı boyutlardaki zırhlar için BF<sub>3</sub> detektörlerindeki ısıl nötron akısı

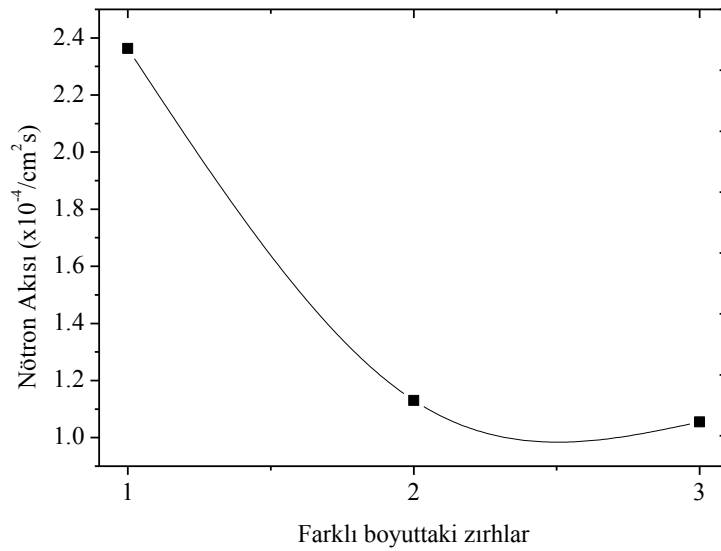
	Boyut (cm)	Net Nötron Akısı (1/cm <sup>2</sup> s)	
		Isıl	0-1 keV
1	6x6x10	4,98x10 <sup>-8</sup>	1,01x10 <sup>-6</sup>
2	28x30x10	1,42x10 <sup>-7</sup>	1,48x10 <sup>-6</sup>
3	40x40x10	1,31x10 <sup>-7</sup>	1,47x10 <sup>-6</sup>

Yapılan simülasyonların sonucunda, kullanılan zırhın boyutları büyütüldüğünde kireçtaşı ortamından geri saçılan nötronların sayısında artış gözlenmiştir. Yani, zırhın boyutları büyütüldüğünde mayın deteksiyonuna katılan nötronların sayısı da artmaktadır. BF<sub>3</sub> detektörlerinde belirlenen net nötron akısında büyük bir değişiklik görülme de, zırhın BF<sub>3</sub> detektörlerinin üstünü örtecek kadar genişlikte olduğu durumda net ısıl nötronların sayısının diğerlerine göre daha fazla olduğu görülmüştür. BF<sub>3</sub> detektörlerinin veriminin ısıl nötronlar için yüksek olduğu gözönüne alınırsa 28x30x10 cm büyüklüğündeki zırhın seçimi doğru gözükmektedir. Ayrıca, Şekil 5.16 da kireçtaşı içerisinde gömülü TNT deki ısı ve hızlı nötron akısı, Şekil 5.17 de ise NaI detektörlerindeki nötron akısı sonuçları bu çizelgedeki gibi numaralandırılarak gösterilmiştir.



Şekil 5.16 Zırh genişliğine göre TNT'deki ısı ve hızlı nötron akısının değişimi

Zırh genişletildikçe TNT'deki ısı ve hızlı nötron akısının arttığı görülmektedir. Zırhın genişletilmesiyle, zırhtan geri saçılarak mayın deteksiyonuna katılan nötronların sayısının arttığı ve bu nedenle de BF<sub>3</sub> detektörlerinde belirlenen net ısı nötron sayısında artışın gözlemlendiği söylenebilir. Aynı zamanda, NaI detektörlerine gelen nötronların sayısı da zırh genişletildikçe azalmaktadır.

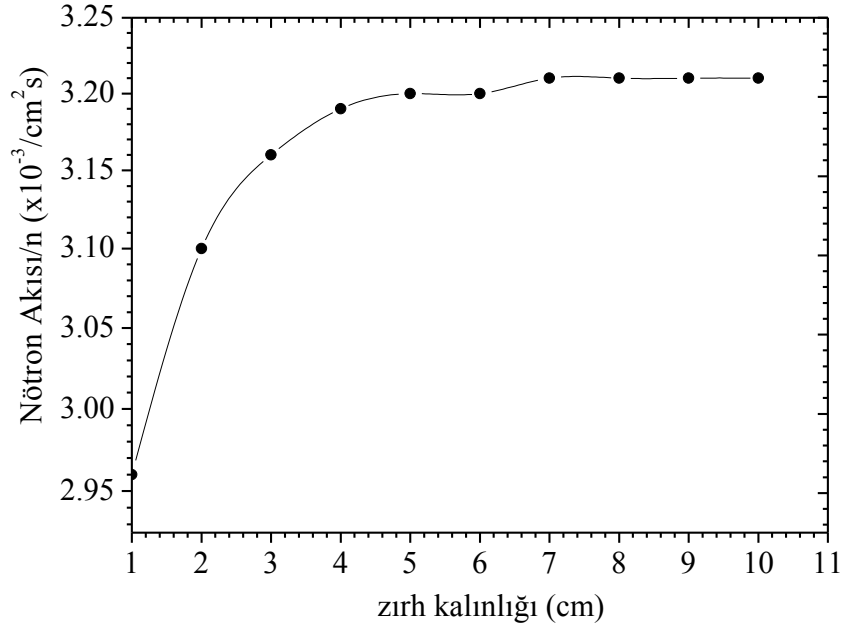


Şekil 5.17 Zırh genişliğine göre NaI detektörlerine gelen nötron akısı

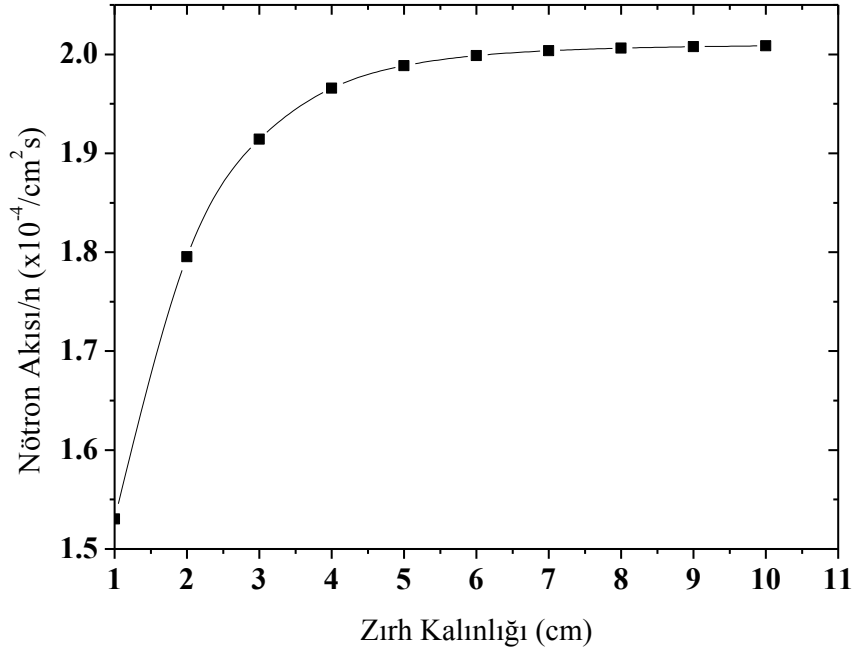
Bu sonuçlar doğrultusunda, 28x30 cm genişliğindeki zırhın kullanımına karar verilmiştir.

#### 5.1.2.4 Bor katkılı parafin zırh yüksekliğinin belirlenmesi

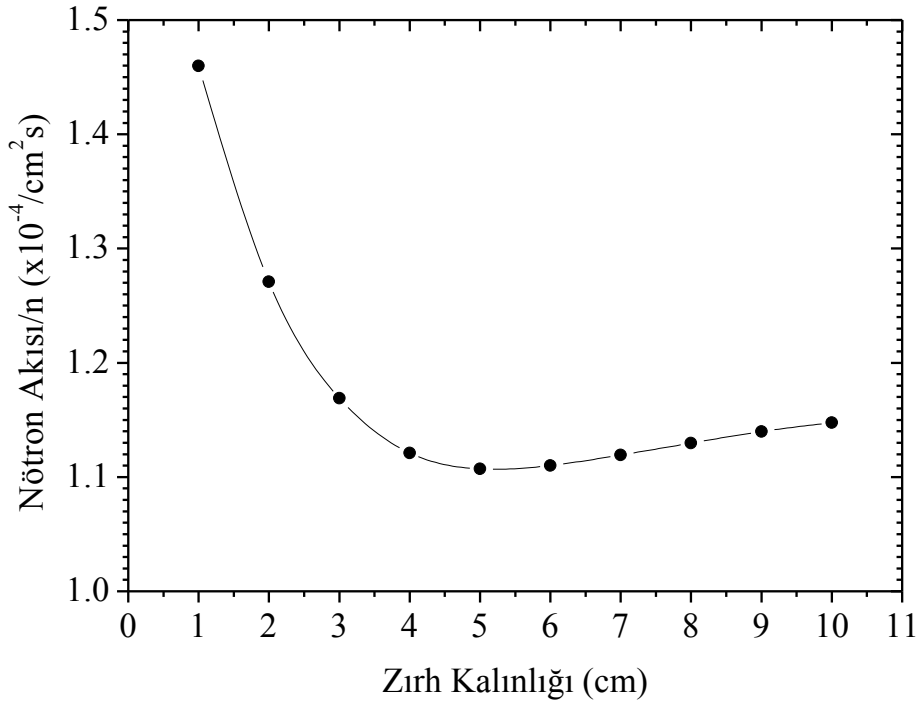
Önceki simülasyonların sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda, zırh malzemesi olarak kullanılmasına karar verilen bor katkılı parafin zırh için, deteksiyon sistemine uygun zırh kalınlığı araştırılmıştır. Bunun için, zırh malzemesinin kalınlığı, nötron kaynağının yerleştirildiği 2 cm yüksekliğindeki kübik odanın tavanından itibaren 1 cm arttırılarak TNT, BF<sub>3</sub> detektörleri ve NaI detektörlerindeki nötron akısı değişimleri incelenmiştir. Kireçtaşı içerisinde gömülü plastik patlayıcıdaki ısıl nötron akısının değişimi Şekil 5.18 de ve NaI detektörleri ile BF<sub>3</sub> detektörlerinde belirlenen nötron akısı sonuçları da sırasıyla Şekil 5.19 ve 5.20 de gösterilmiştir.



Şekil 5.18 Zırh kalınlığına göre TNT deki ısıl nötron akısının değişimi



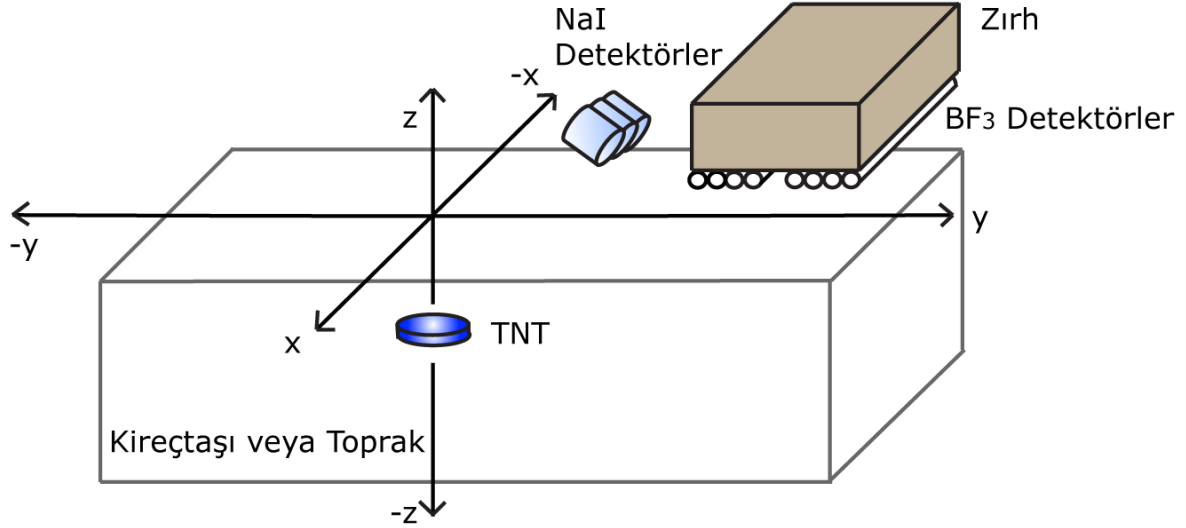
Şekil 5.19 Zırh kalınlığına göre  $\text{BF}_3$  detektörlerde 0 – 1 keV enerji aralığında akı değişimi



Şekil 5.20 Zırh kalınlığına göre NaI detektörlerine gelen nötron akısı

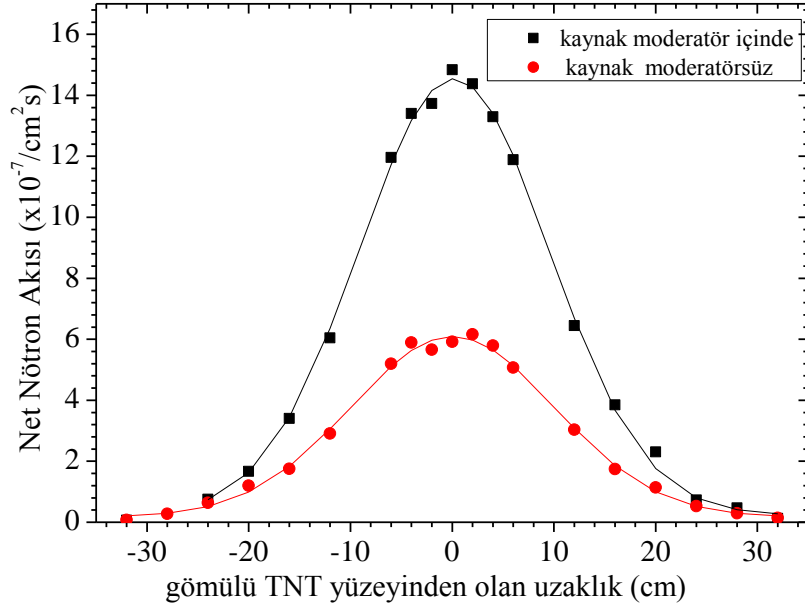
Grafiklerden de görülebileceği gibi, TNT ve  $\text{BF}_3$  detektörlerinde nötron akısı 7 cm ye kadar

bir artış göstermekte ve sonra da neredeyse sabit kalmaktadır. NaI detektörlerde ise önce bir düşüş ve sonrada 6 cm' den itibaren çok küçük de olsa bir artış görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda 8 cm yüksekliğinde bir zırhın kullanımına karar verilmiştir. Buna göre, kaynak odasınının tavanına kadar olan yükseklikte dahil olmak üzere net zırh yüksekliği 10 cm olacaktır.



Şekil 5.21 Deteksiyon sisteminin geometrisi

Son olarak, bor katkılı parafin moderatör bloğunun sistemin mayın tespitine etkileri incelendi. Simülasyonlarla, öncelikle, modelde moderatör bloğu varken ve yokken TNT li ve TNT siz formasyonda  $\text{BF}_3$  detektörlerindeki nötron akıları belirlendi. Böylece her iki durum için net nötron akısı hesaplanabildi. Deteksiyon sisteminin, yatay eksen boyunca (y-ekseni) konumuna bağlı olarak 16 farklı konumu için simülasyonlar tekrarlandı ve herbir konumu için net nötron akıları hesaplandı (Şekil 5.21). Her iki deteksiyon sisteminde de (moderatörlü ve moderatörsüz) TNT de yavaşlayarak kireçtaşı ortamından geri saçılan nötronların sayısının  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağının TNT nin merkez eksenini üzerinde olduğu durumda maksimum olduğu görüldü (Şekil 5.22). Moderatörün kullanımı ile geri saçılan nötronların sayısındaki artışın moderatörsüz sistemden 2,5 kat daha fazla olduğu belirlendi.



Şekil 5.22 TNT merkez ekseninden uzaklığın fonksiyonu olarak BF<sub>3</sub> detektörlerindeki net nötron akısı

Tasarlanan deteksiyon sisteminin çalışmasını çeşitli koşullarda incelemek amacıyla, patlayıcının bulunduğu derinlik, mayının boyutları, topraktaki rutubet seviyesi ve ortamdaki çeşitli kirlilikler göz önüne alınarak simülasyonlar yapıldı. Kireçtaşı ile ilgili simülasyon sonuçları Bölüm 5.2 de, toprak ortamı ile ilgili simülasyon sonuçları ise Bölüm 5.3 verilmiştir.

## 5.2 Kireçtaşı içerisinde plastik patlayıcı ve mayınların deteksiyonu ile ilgili MCNP hesaplama sonuçları

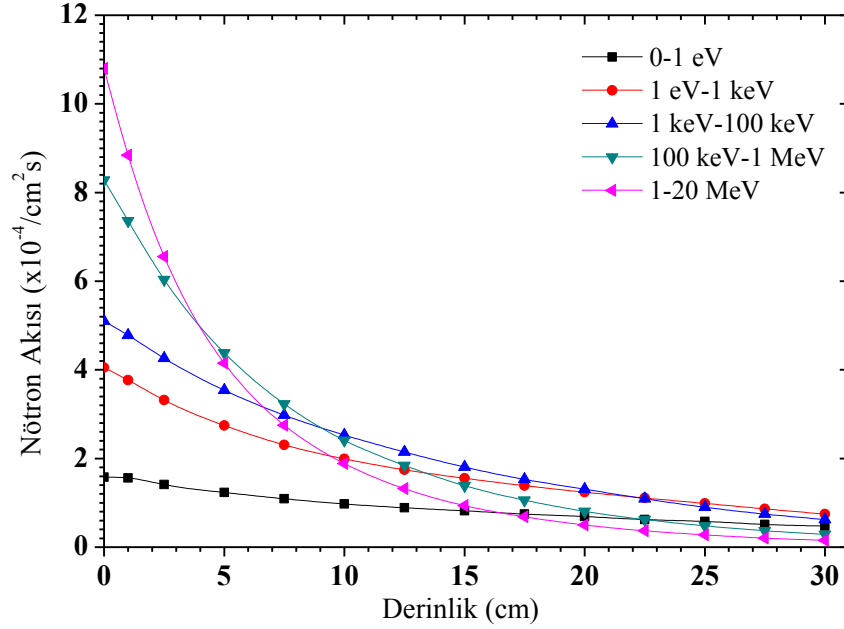
Monte Carlo hesaplamalarında, kireçtaşı ortamı içerisinde, 7 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde 1,65 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip TNT (C<sub>7</sub>H<sub>5</sub>N<sub>3</sub>O<sub>6</sub>) plastik patlayıcının bulunduğu ve kaynak şiddetinin 2,306x10<sup>7</sup> nötron/s olduğu varsayılmıştır.

### 5.2.1 Deteksiyon sisteminin derinlik hassasiyetinin belirlenmesi

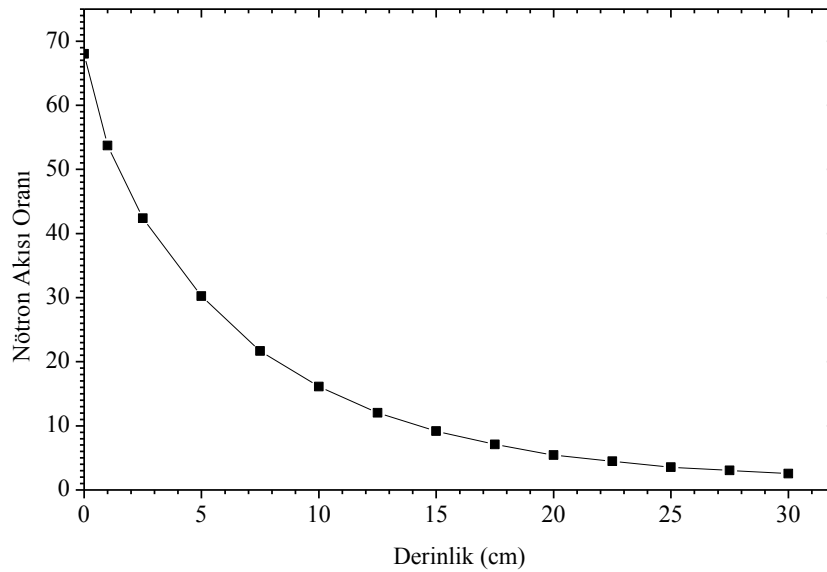
TNT mayını kireçtaşı ortamında farklı derinliklere yerleştirilerek, bulunduğu derinliğin değişimine bağlı olarak üzerindeki nötron akısı beş ayrı enerji bölgesinde incelenmiştir. TNT nin derinliği, TNT nin üst yüzeyinden kireçtaşı yüzeyine olan mesafe olarak kabul edilmiştir. Derinliğin artmasıyla birlikte nötron akısındaki hızlı düşüş en çok 100 keV üzerindeki nötronlarda gözlenmiştir (Şekil 5.23). Ayrıca, derinlik değişimine bağlı olarak TNT de ısıtılmış nötronlara yavaşlatılan hızlı nötronlar hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak için 1-20 MeV



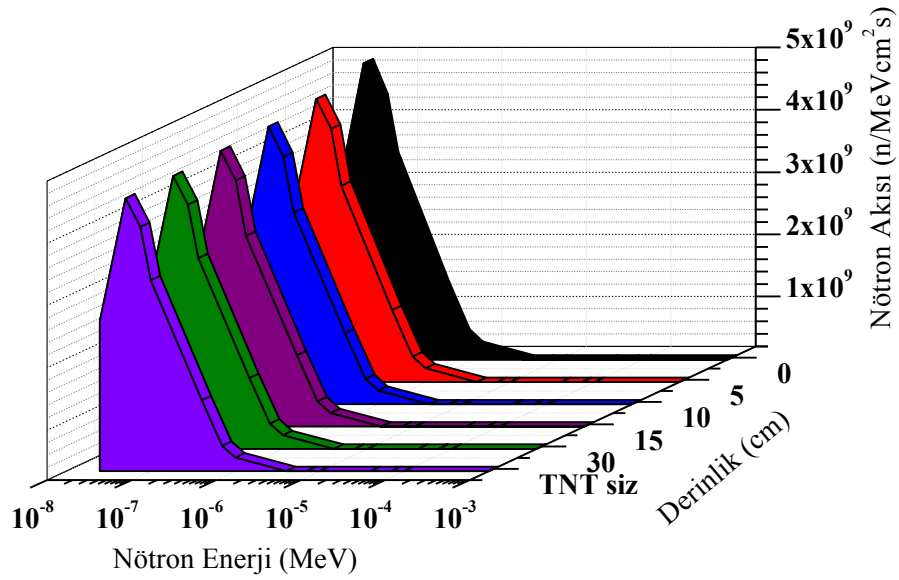
enerji aralığında bulunan nötronların sayısının ısıl nötron sayına oranı belirlenmiştir (Şekil 5.24). Buna göre, 0-5 cm aralığında nötron akısı oranı 2,25 kat değişirken, 0-30 cm aralığında bu oran 26,82 kat değişmiştir. TNT ye ulaşan yüksek enerjili nötronların sayısının azalması, TNT de yavaşlayarak ortam içerisinde geri saçılacak olan nötronların sayısının azalmasına neden olmaktadır. Bu da derinlik arttıkça TNT nin deteksiyonunu güçleştirecektir.



Şekil 5.23 Kireçtaşı içinde TNT' nin derinliğine bağlı olarak TNT de değişen nötron akısı

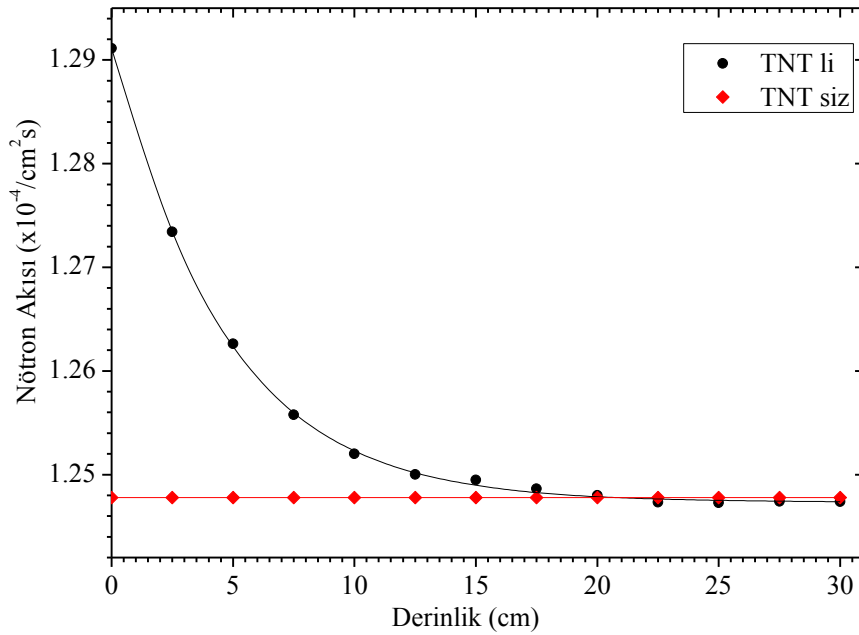


Şekil 5.24 TNT de 1-20MeV/0,025eV nötron akısı oranının değişimi



Şekil 5.25 BF<sub>3</sub> detektörlerde farklı TNT derinlikleri için nötron akısının değişimi

Şekil 5.25 de BF<sub>3</sub> detektörlerde mayının gömülü olduğu farklı derinlikler için nötron akısının enerjiye bağlı değişimi verilmiştir. Özellikle, ısıl nötronlar için (0,025eV) derinlik sıfır iken yani kireçtaşı yüzeyi ile TNT yüzeyi aynı hizada olduğu durumdaki fark açıkça görülebilir.



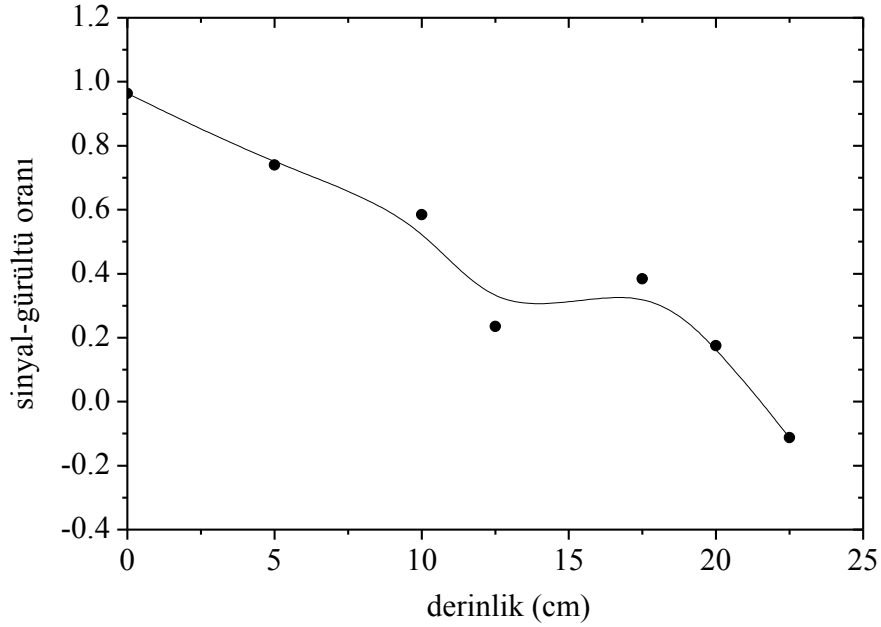
Şekil 5.26 BF<sub>3</sub> detektörlerinde TNT' nin gömülü olduğu farklı derinlikler için nötron akısının değişimi

BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akısının, TNT nin gömülme derinliğine bağlı olarak değişimini incelemek amacıyla 2,5 cm aralıklarla 0-30 cm gömülme derinliği bölgesi için MCNP hesaplamaları yapılmıştır. Bulunan nötron akısı değerlerinden, detektör sisteminin sadece hava ortamı içerisinde bulunduğu durum için MCNP kodu ile hesaplanan arka-plan gürültü değeri çıkartılmıştır. Şekil 5.26 dan, 15 cm derinliğe kadar 7 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde 1,65 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğuna sahip TNT patlayıcısının deteksiyonunun mümkün olduğu görülmektedir. Anti-personel patlayıcıların aktif olabilmeleri için maksimum gömülme derinliği 5 cm dir ve genelde 3-4 cm derinlikte yüzeye yakın yerleştirilmektedirler. Simulasyon sonuçları, derinliğin 5 cm den daha az olduğu durumlarda oldukça net biçimde ayırt edildiğini göstermektedir.

Ayrıca, F8 hesap kartı kullanılarak 5 cm aralıklarla 20 cm TNT gömülme derinliğine kadar NaI detektörlerinde 0- 20 MeV enerji aralığında 2046 kanal için darbe-yükseklik spektrumu belirlenmiştir. Patlayıcı malzemedan gelen karakteristik gamaların sayısının belirlenmesi amacıyla kireçtaşı içerisinde TNT nin olmadığı durum içinde gama spektrumu simüle edilmiş ve net sayım değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.8 de listelenen değerlere göre azotun ısıl nötron yakalama reaksiyonundan gelen 10,83 MeV enerjili gama ışını 10 cm ye kadar nötron kaynağı  $2,306 \times 10^7$  nötron/s alınarak yapılan simulasyon sonuçlarına göre farkedilmektedir. Hidrojenden gelen 2,22 MeV enerjili ısıl nötron yakalama gama ışını sayımındaki artış ve azottan gelen gamalardaki artışa bakılarak ortamda şüpheli bir cisim olduğu kanısına varılabilir.

Çizelge 5.8 Farklı derinliklerde gömülü TNT için gama ışını sayım değerleri

Derinlik (cm)	E <sub>γ</sub> (MeV)				
	O-1,087	H-2,223	C-4,439	N-5,269	N-10,829
	Net Sayım				
0	$7 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$
5	$4 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$
10	$4 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$
15	$1 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	0	0
20	$1 \times 10^{-7}$	0	0	0	$1 \times 10^{-7}$



Şekil 5.27 Patlayıcının gömülü olduğu farklı derinlikler için NaI detektörlerinde sinyal-gürültü oranının değişimi

Şekil 5.27 de NaI detektörleri için patlayıcının derinliğine bağlı olarak sinyal-gürültü oranı değişimi verilmiştir. Sinyal-gürültü oranı hesaplanmadan önce, deteksiyon sisteminin kendine has arka-plan gürültüsü hesaplanmış ve kireçtaşı içerisinde TNT' nin bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için belirlenen sayım değerlerinden çıkarılmıştır. Arka-plan gürültü değeri, deteksiyon sisteminin sadece hava ortamı içerisinde bulunduğu durum için MCNP kodu kullanılarak aynı sayıda nötron ve aynı sayıda kanal (2046) için hesaplanmıştır. 1-14 MeV enerji aralığında hesaplanan sinyal-gürültü oranının derinlik artışına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Sinyal-gürültü oranının bir değerinin üstüne çıkartılması için daha uzun süreli ışınlama yapılması gerekmektedir. Sinyal-gürültü oranı, ışınlama süresine ve patlayıcının kütlesine bağlı olarak artabilecek bir büyüklüktür.

### 5.2.2 Deteksiyon sisteminde patlayıcının ortamda bulunması olası diğer malzemelerden ayırt edilmesi

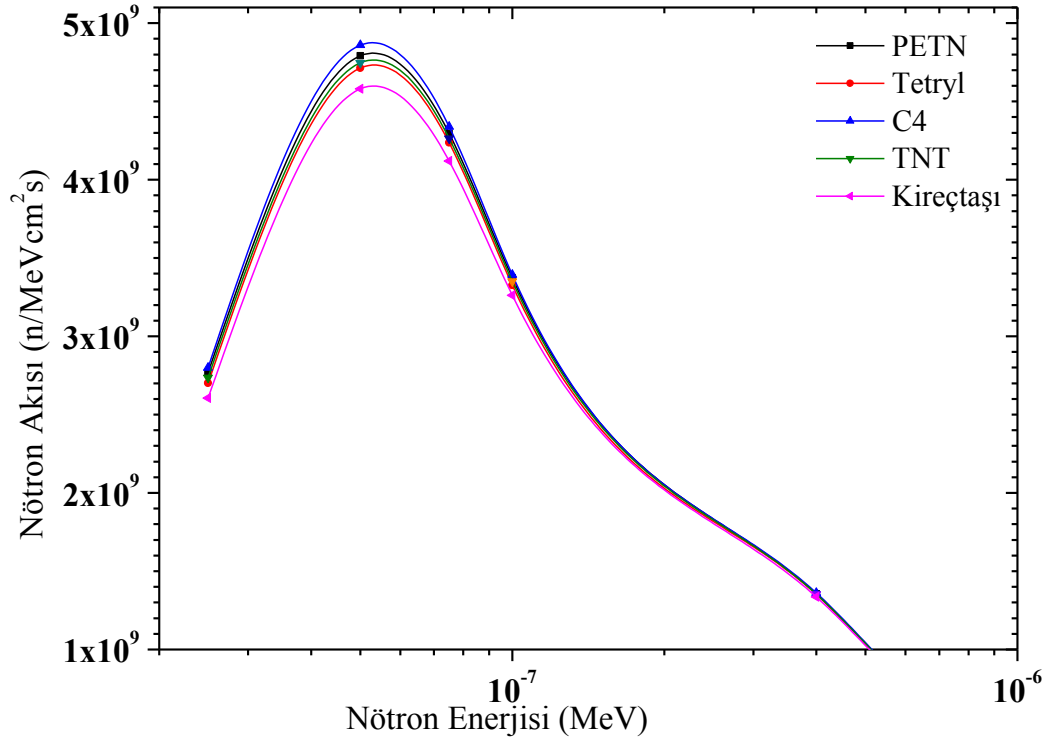
Tasarlanan deteksiyon sistemi ile TNT nin, ortamda bulunması olası diğer şüpheli cisimlerden ayırt edilip edilemeyeceğinin test edilmesi amacıyla da simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlar, mayınlarda kullanılan diğer patlayıcıların ve formasyon içerisinde bulunabilecek zararsız malzemelerin, kireçtaşı içinde 7 cm çapında, 2 cm yüksekliğinde ve 5

cm derinlikte bulunan hacim içine teker teker yerleştirilmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan malzemelerin yüzdesel kütle oranları ve yoğunlukları Çizelge 5.9 da listelenmiştir.

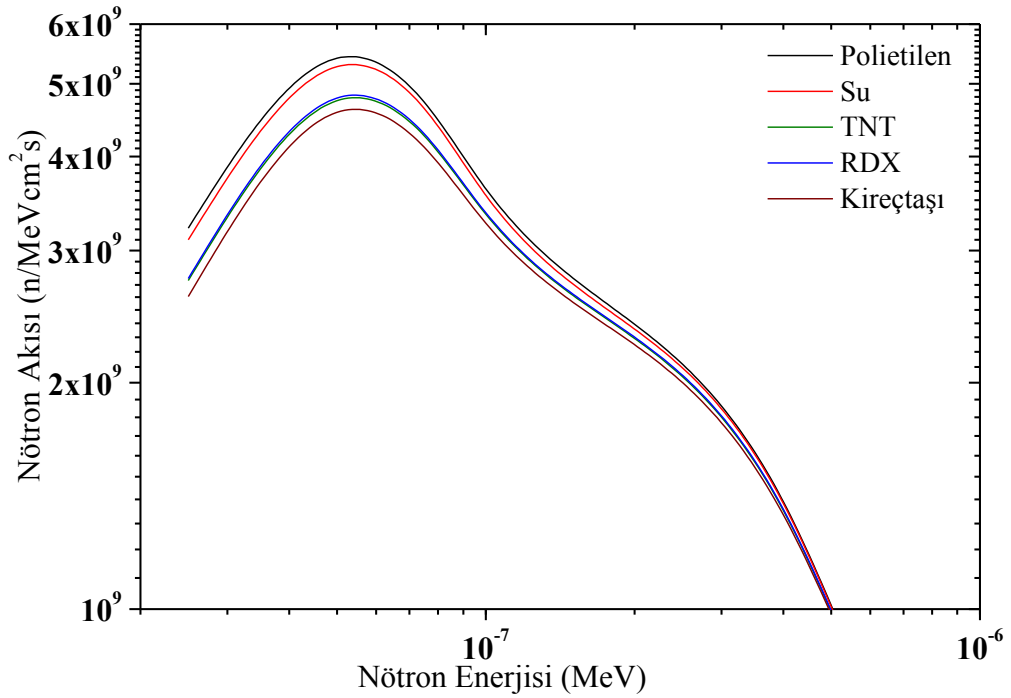
Çizelge 5.9 Elementlere ait kütle oranları ve malzeme yoğunlukları

Malzeme (yoğunluk g/cm <sup>3</sup> )	Elementlere ait Kütle Oranları									
	H	C	O	N	Na	Al	Si	K	Ca	Fe
Kireçtaşı (2,71)		0,12	0,48						0,4	
TNT (1,65)	0,0217	0,37	0,18529	0,42294						
RDX (1,83)	0,03	0,16	0,43	0,38						
PETN (1,78)	0,03	0,19	0,61	0,18						
Tetryl (1,73)	0,02	0,29	0,45	0,24						
C4 (1,64)	0,036	0,219	0,401	0,344						
Polietilen (0,92)	0,1479	0,8571								
Su (1)	0,1111		0,8889							
Tahta (0,5)	0,06	0,55	0,35	0,04						
Granit kaya (2,5)	0,0068	0,0007	0,5628	0,011	0,0014	0,0384	0,3154	0,0242	0,0299	0,0095

Şekil 5.28 ve 5.29 da bu malzemeler için BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akısının enerjiye bağlı değişimleri gösterilmiştir. Şekil 5.28 de farklı patlayıcı malzemelerin düşük nötron enerjilerinde ortamda herhangi bir patlayıcı olmadığı durumdan ve birbirlerinden ayırıldığı görülmektedir. Şekil 5.29 dan ise, mayınlarda çoğunlukla kullanılan iki patlayıcının (TNT, RDX) hidrojen zengin olan diğer malzemelerden ayırt edilebildiği görülmüştür.



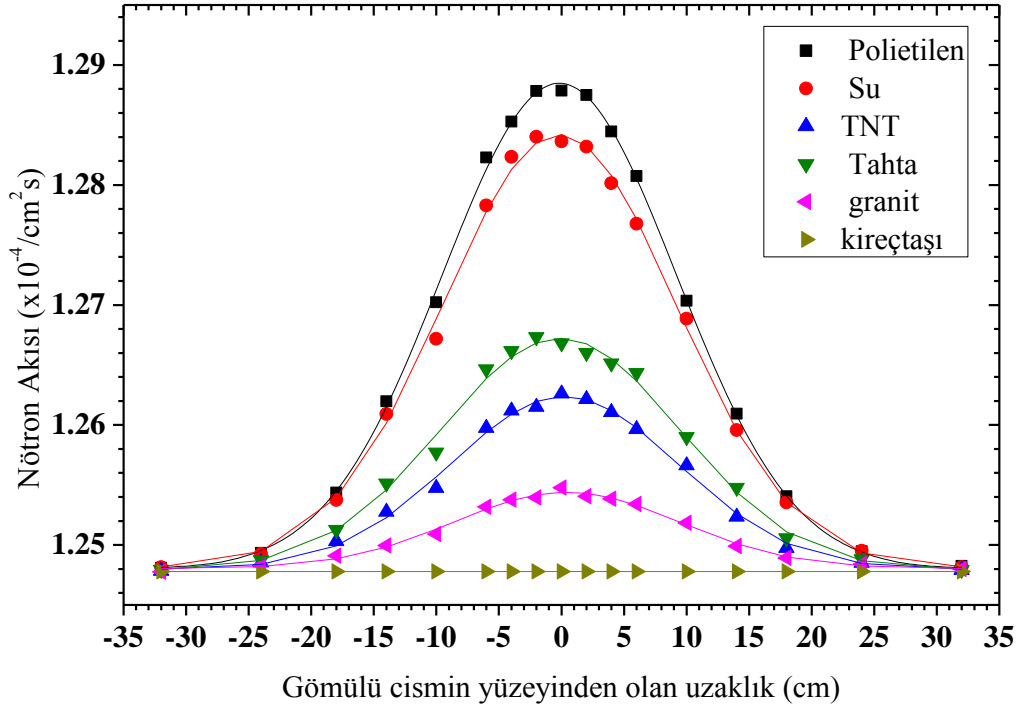
Şekil 5.28 Kireçtaşı içerisinde gömülü farklı tipte patlayıcıların karşılaştırılması



Şekil 5.29 Kireçtaşı içerisinde gömülü patlayıcıların diğer malzemeler ile karşılaştırılması

Deteksiyon sistemi yatay eksen boyunca hareket ettirilerek TNT ve ortamda bulunabilecek diğer zararsız malzemeler için  $\text{BF}_3$  detektörlerinde nötron akı değişimi belirlendi. Malzemeler

7 cm çapında ve iki cm yüksekliğinde silindirik hacim içerisinde kireçtaşı ortamında 5 cm derinliğe teker teker yerleştirilerek nötron kaynağının gömülü cismin merkez ekseninden uzaklığının değişimine göre MCNP kodu kullanılarak akı hesaplandı. Nötron kaynağının, gömülü cisim merkezi ile aynı eksen üzerinde olduğu konumda maksimum nötron akısını verdiği belirlendi ve hesaplanan değerler gauss eğrisi ile fit edilebildi (Şekil 5.30). Aynı zamanda, TNT nin merkez eksenindeki veriler kullanılarak net nötron akıları belirlendi ve TNT ye göre normalize edilerek literatür değerleri ile karşılaştırıldı (Maucec ve Meijer,2002). Çizelge 5.10 da listelenen bu değerlere göre TNT nin diğer zararsız malzemelerden ayırtedilebildiği açıkça görülmektedir. Karşılaştırma yapabilmek için PETN, Tetryl, RDX ve C4 patlayıcılar içinde hesaplanan değerler verilmiştir. Bu patlayıcılarında polietilen, su, tahta ve granit kaya dan ayırtedilebildiği görülmüştür. Su ve polietilen için TNT den iki kattan daha fazla değerler elde edilmiş olması onların kolaylıkla TNT den ayırt edilebildiğini göstermektedir. Tahta için ise, yoğunluğu TNT nin yoğunluğunun neredeyse üç te biri kadar az ve hidrojen miktarı da neredeyse üç kat daha fazla bir ağaç türü seçilmiş olmasına rağmen, ki bu da TNT den ayırt edilmesini zorlaştırmaktadır, tasarlanan deteksiyon sistemi ile aradaki fark gözlenebilmiştir.

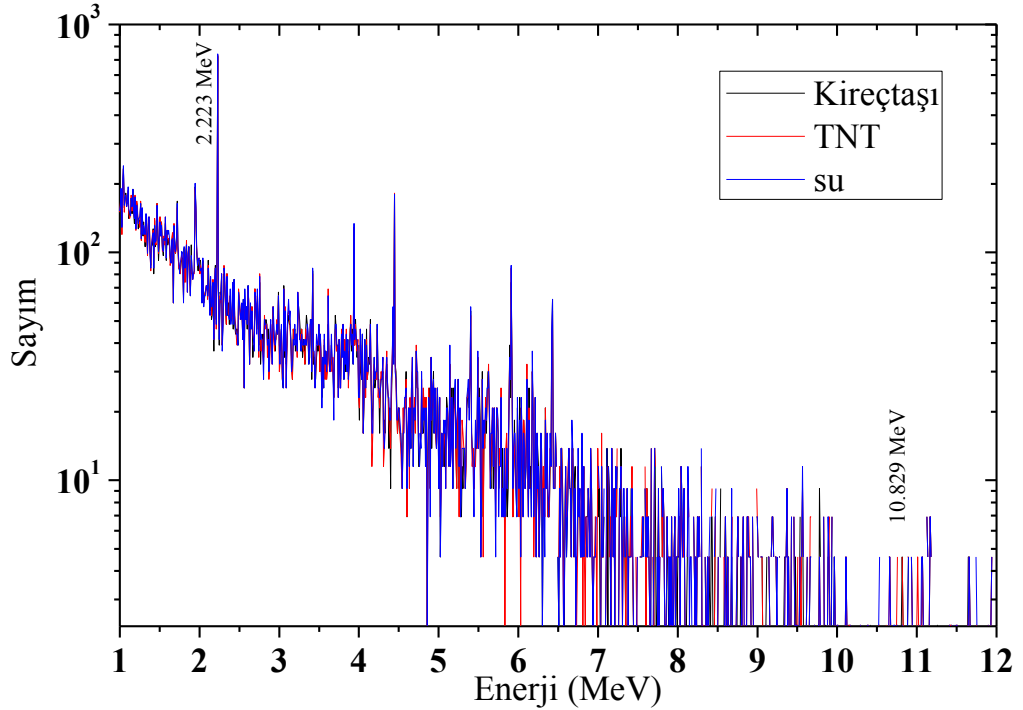


Şekil 5.30 Farklı malzemelerin BF<sub>3</sub> detektörlerde karşılaştırılması

Çizelge 5.10 Malzemelerin nötron akıları ve kıyaslamaları

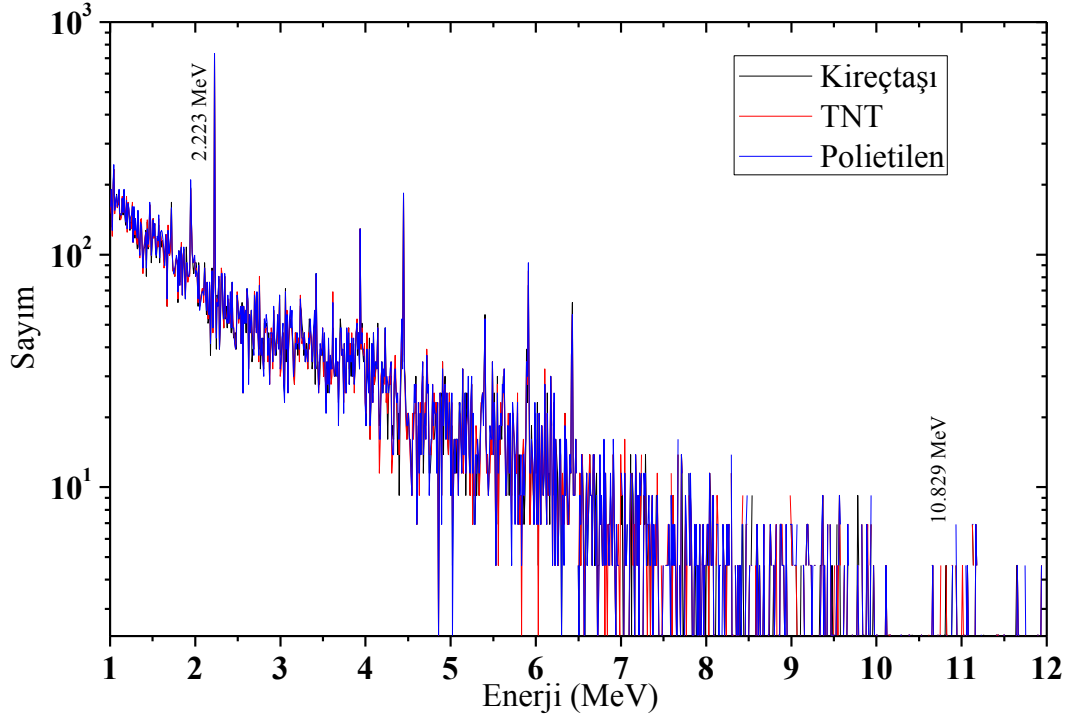
Gömülü Cisim	Net Nötron Akısı (n/cm <sup>2</sup> s)	Normalize Nötron Akısı	Maucec ve Meijer (2002)
TNT	34	1,00	1,00
Polietilen	92	2,70	2,53
Su	82	2,42	2,20
Tahta	44	1,28	1,07
Granit kaya	16	0,47	0,40
PETN	39	1,15	---
RDX	40	1,18	---
Tetryl	28	0,82	---
C4	47	1,38	---

MCNP kodu F8 hesap kartı kullanılarak gama spektrumları, kireçtaşı içerisinde 5 cm derinliğe TNT haznesi yerine teker teker yerleştirilen polietilen, su ve diğer patlayıcılar için hesaplandı. Bu spektrumlar Şekil 5.31, 5.32 ve 5.33 de verilmiştir. Bu spektrumlarda, 10,83 MeV enerjili gamalar sadece patlayıcılar da görülmektedir.

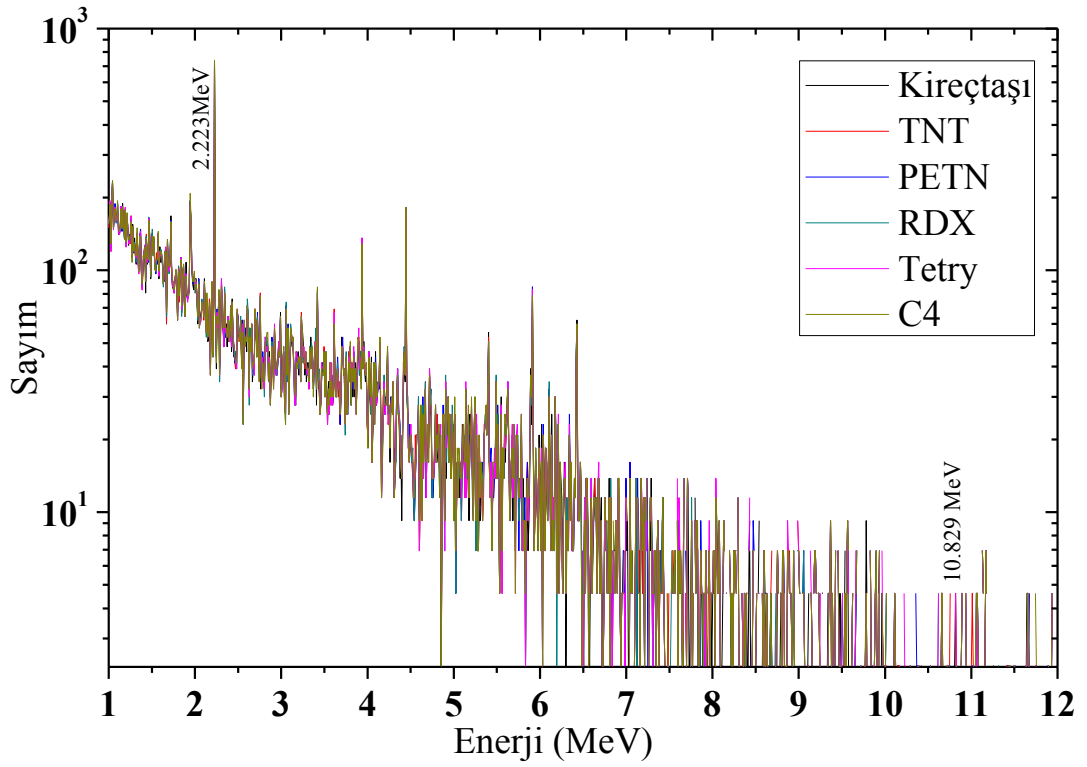


Şekil 5.31 Kireçtaşı, TNT ve su için gama spektrumu

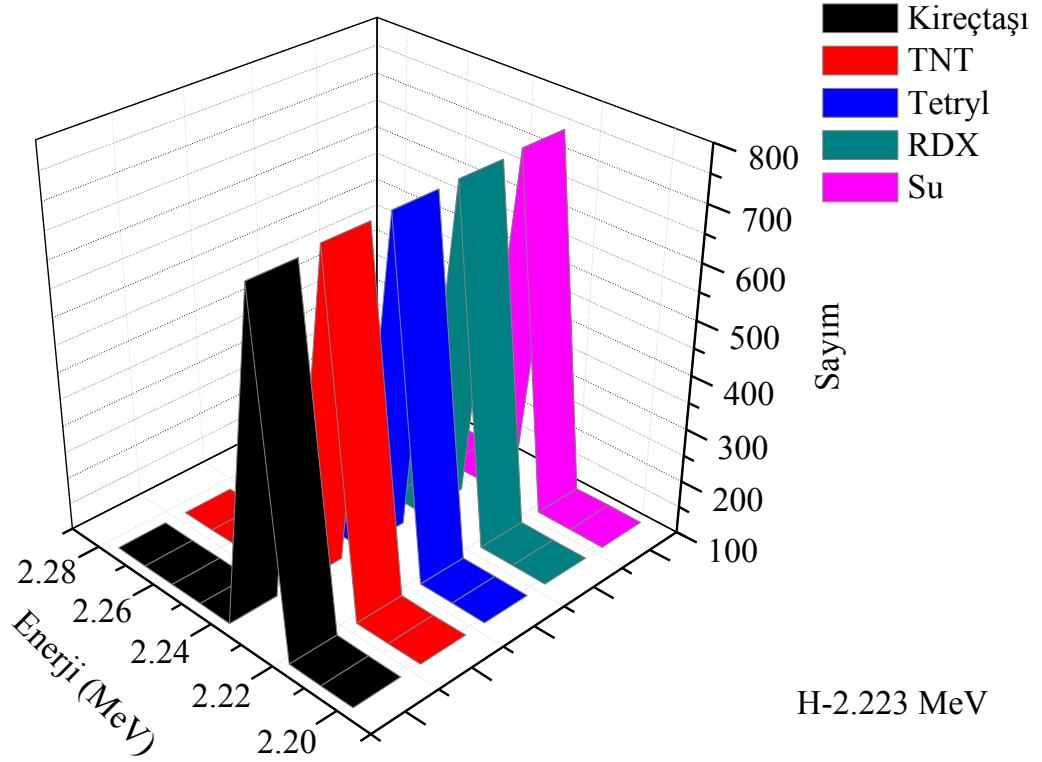




Şekil 5.32 Kireçtaşı, TNT ve polietilen için gama spektrumu



Şekil 5.33 Kireçtaşı ve patlayıcılar için gama spektrumu



Şekil 5.34  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  reaksiyonu için gama spektrum kesiti

Hidrojenin 2,223 MeV enerjili ısıl nötron yakalama gama ışını için, gama spektrumlarından alınan kesitler incelendiğinde en çok sayımın su dan geldiği görüldü (Şekil 5.34). Suyun spektrumda RDX den daha yukarıda çıkmasının nedeni, yoğunluğunun RDX in yoğunluğunun yarısından biraz fazla iken hidrojen yüzdesel atomik oranının iki katı olmasıdır. RDX ve Tetryl karşılaştırıldığında ise, yüzdesel atomik oranları eşit olmalarına rağmen RDX in yoğunluğu daha büyüktür. TNT ve Tetryl karşılaştırıldığında, TNT nin yoğunluğu ve yüzdesel atomik oranı Tetryl den küçüktür. Nötron kaynağı  $2,306 \times 10^7$  nötron/s alınarak hesaplanan bir saniyelik gama spektrumunda, polietilen ve TNT için 2,22 MeV enerjili gama sayıları eşit çıkmıştır. Ancak, azottan gelen 10,83 MeV enerjili ısıl nötron yakalama gama ışını karşılaştırması yapılarak polietilen ile TNT yi ayırt etmek mümkün olabilecektir. İncelenen malzemelerin karakteristik özellikleri Çizelge 5.11 de ve sadece patlayıcılar içinde bulunan azottan gelen 10,83 MeV enerjili gama ışını sayım değerleri de Çizelge 5.12 de listelenmiştir.

Çizelge 5.11 İncelenen malzemelere ait yoğunluk ve H oranı

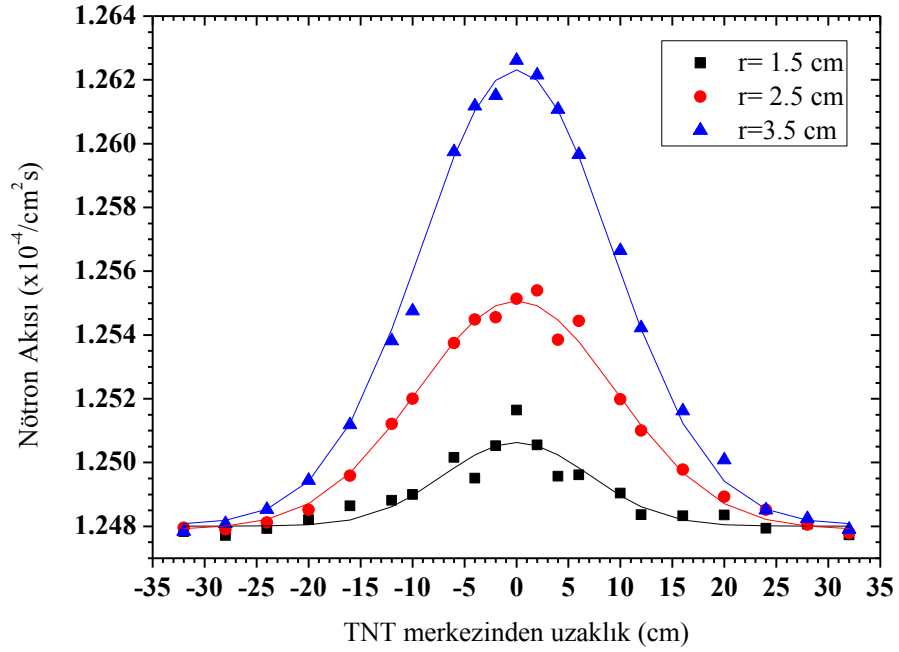
Gömülü Cisim	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Atomik Oran (%)
RDX	1,83	0,333
Su	1	0,666
TNT	1,65	0,238
Polietilen	0,92	0,666
Tetryl	1,73	0,333

Çizelge 5.12 Azotun 10,83 MeV enerjili gama ışını için sayım değerleri

E <sub>γ</sub> (MeV)	Tetryl	Kireçtaşı	TNT	Polietilen	Su	RDX
10,83	10 <sup>-7</sup>	0	10 <sup>-7</sup>	0	0	10 <sup>-7</sup>

### 5.2.3 Farklı çapa sahip mayınların deteksiyonunun incelenmesi

Deteksiyon sisteminin patlayıcının büyüklüğüne bağlı duyarlılığının incelenmesi amacıyla farklı yarıçapa sahip mayınlar için simülasyonlar yapıldı. Yarıçapları 1,5, 2,5 ve 3,5 cm olan 2 cm yüksekliğinde 1,65 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip üç farklı boyutta TNT mayını teker teker kireçtaşı içerisine 5 cm derinliğe yerleştirildi ve deteksiyon sistemi yatay eksen boyunca hareket ettirilerek BF<sub>3</sub> detektörleri üzerindeki nötron akısı değerleri hesaplandı. TNT merkez ekseninden uzaklığa bağlı olarak belirlenen değerler gauss eğrisi ile fit edildi ve yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değerleri belirlendi (Şekil 5.35). Çizelge 5.13 de verilen FWHM değerlerine bakıldığında, bu değerlerin TNT nin yarıçapı 1,5 cm olduğunda 16,5 cm ye düştüğü görülmektedir. Bu da böyle bir yarıçapa sahip bir patlayıcının fark edilebilmesi için yeterli bir genişliktir. Ayrıca, bu deteksiyon sistemi ile ±20 cm sınır aralığı içerisinde bulunan bir mayının deteksiyonu mümkün gözükmemektedir.



Şekil 5.35 Farklı yarıçaplara sahip TNT mayınları için nötron akısı değerleri

Çizelge 5.13 Farklı yarıçaplara sahip TNT mayınları için FWHM değerleri

Yarıçap (cm)	1,5	2,5	3,5
Kütle (g)	23,33	64,80	126,99
FWHM	16,54	22,53	21,74

#### 5.2.4 Kireçtaşı içerisindeki farklı nem miktarlarının plastik patlayıcı ve mayın deteksiyonu üzerine etkilerinin incelenmesi

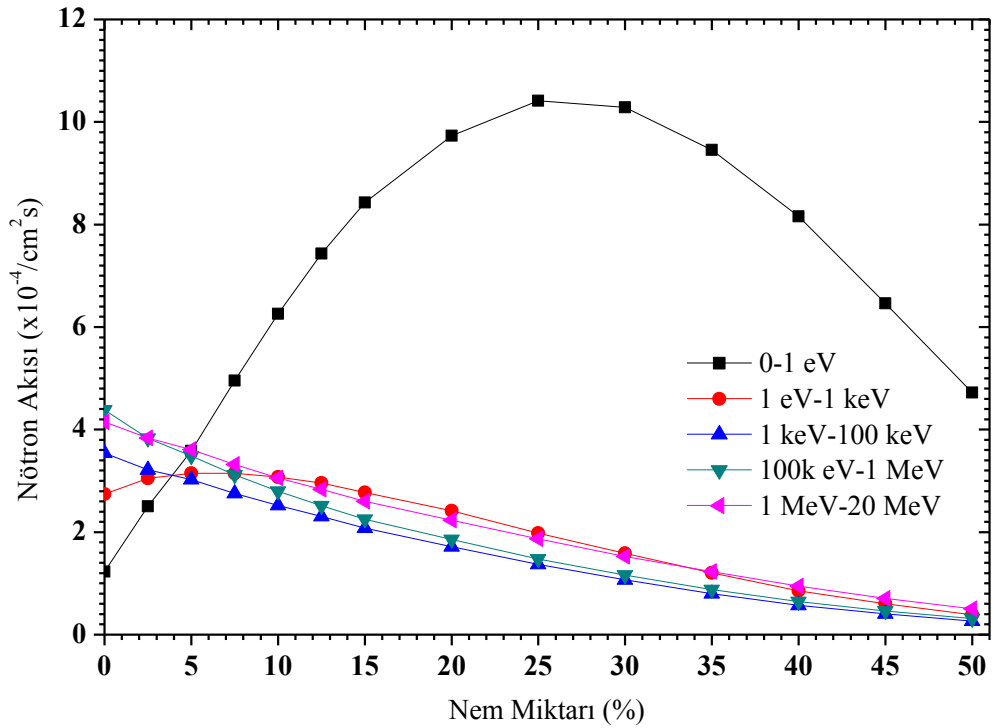
Patlayıcının gömülü bulunduğu formasyon belli bir nem değerine sahip ise bu onun deteksiyonuna bazı sınırlamalar getirmektedir. Özellikle, nötron geri saçılma tekniğinin uygulanması, hidrojenen geri saçılan nötronların sayımına dayalı olduğundan, ortam içerisinde bulunan hidrojen miktarının patlayıcıda bulunan hidrojen miktarına eşit olduğu durumlarda patlayıcının detekte edilmesi mümkün olmaz. Bu tez çalışmasında, formasyon içerisindeki nem miktarının değişimine bağlı olarak mayın deteksiyonunun tasarlanan deteksiyon sistemi ile hangi sınırlar içerisinde mümkün olabileceği araştırılmıştır. MCNP kodu ile yapılan hesaplamalarda, farklı nem miktarlarına sahip kireçtaşı için kullanılan

yoğunluk değerleri Çizelge 5.14 de verilmiştir. Yoğunluk değerleri, suyun formasyon içerisine homojen dağıldığı ve toplam hacimin sabit kaldığı durum için hesaplanmıştır.

Çizelge 5.14 Farklı nem miktarlarına sahip kireçtaşı için yoğunluk değerleri

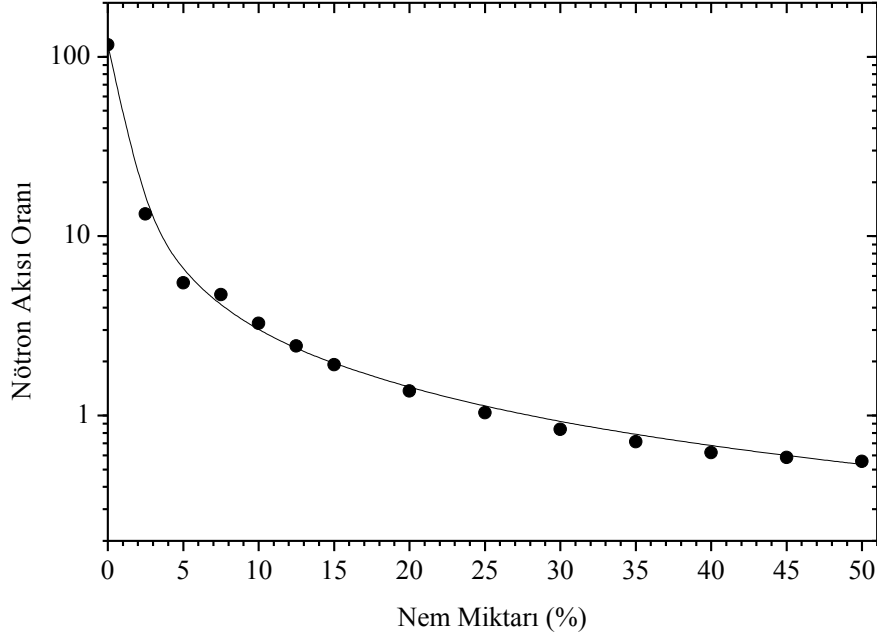
Nem miktarı (%)	0	5	10	15	20	30	40	50
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,710	2,853	3,010	3,188	3,388	3,871	4,517	5,420

Yapılan simülasyonlarda, öncelikle, nem miktarının kireçtaşı içerisindeki 5 cm derinliğe gömülü TNT üzerindeki nötron akısına etkisi incelendi. Buna göre kireçtaşıdaki nem miktarı artırıldığında TNT ye ulaşan ısıl ve episisil nötronların sayısının belli bir nem değerine kadar arttığı görüldü (Şekil 5.36). Yüksek enerjili nötronlar kireçtaşı elementlerinden ve su moleküllerinden saçılırken yavaşlamaktadırlar. Ayrıca, nem, yüksek enerjili nötronları yavaşlatırken ısıl nötronlarında absorblanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, nem miktarı artırıldıkça düşük enerjili nötronların sayısının %25 nem değerinden sonra düştüğü görülmüştür.



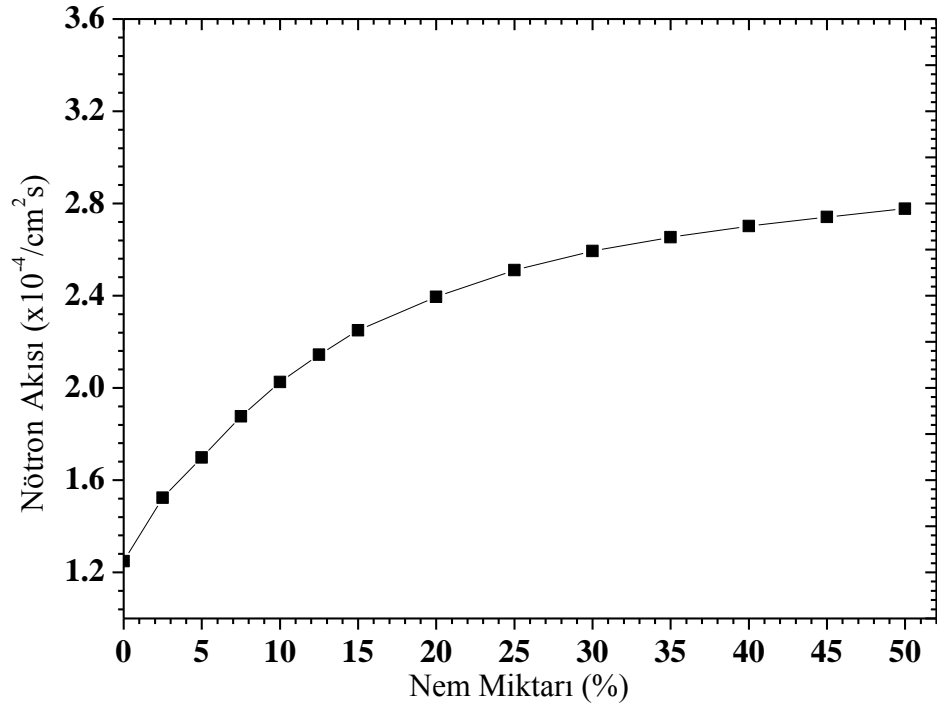
Şekil. 5.36 TNT de nötron akısının nem miktarıyla değişimi

1-20 MeV enerji aralığında bulunan nötron akısının, ısıl nötron akısına oranı incelendiğinde ise kuru kireçtaşının, % 50 nem miktarı içeriği için bu oranın 210 kat ve % 25 nem miktarı için ise 113 kat düşüş gösterdiği görüldü (Şekil5.37).

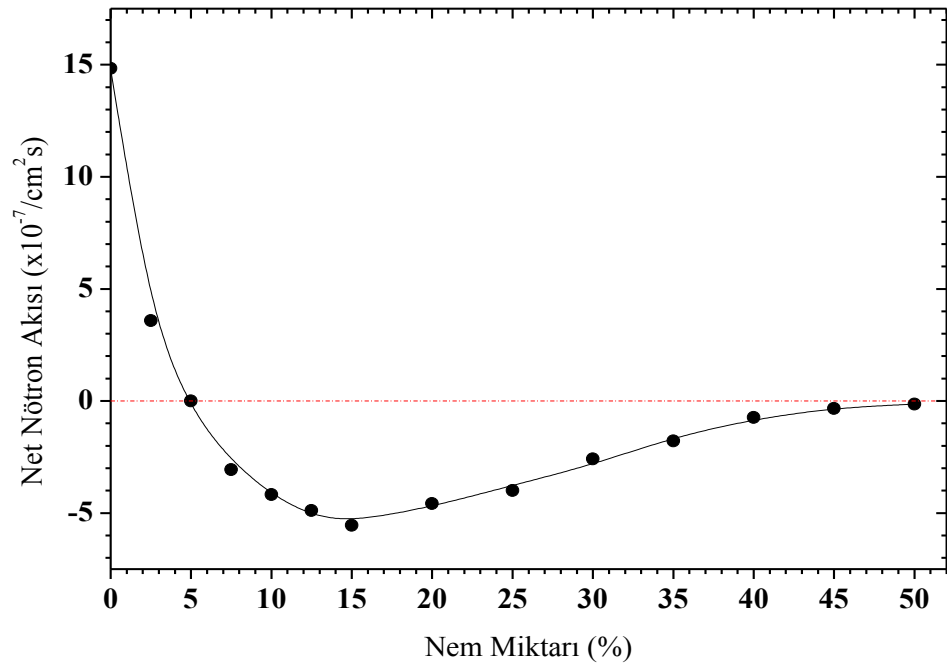


Şekil 5.37 1-20 MeV/0,025 eV enerjili nötron akısı oranının nem miktarı ile değişimi

Nem miktarının değişimi ile  $\text{BF}_3$  detektörlerindeki nötron akısının değişimi incelendiğinde ise artan nem miktarına bağlı olarak kireçtaşından geri saçılan nötronların sayısının arttığı görüldü (Şekil 5.38). Aynı zamanda, 5 cm derinliğe gömülü TNT nin formasyon içerisinde bulunduğu durumda  $\text{BF}_3$  detektörlerindeki nötron akıları belirlendi ve arka -plan nötron akısı (kireçtaşından gelen) çıkartılarak net nötron akısı hesaplandı. Şekil 5.39 da artan nem miktarına bağlı olarak kireçtaşı ortamından geri saçılan nötronların sayısı artarken, net nötron akısının azaldığı ve % 5 nem içeriği için mayının deteksiyonunun mümkün olamayacağı görülmüştür. Ayrıca, nem miktarı daha da arttırıldığında geri saçılan nötronların sayısının arka plan gürültü (kireçtaşından gelen) değerinin altına düştüğü görüldü. %5 ve daha yüksek nem miktarlarında, nötron akısının kireçtaşından gelen nötron akısının altına düştüğü bu değerler, kireçtaşının içerisinde bir anomalinin varlığının göstergesi olarak düşünülebilir. Özetle, nötron akısındaki bu düşüş, nemli kireçtaşının o bölgedeki yokluğunun ve başka bir malzemenin o hacim içerisinde bulunduğunun göstergesidir.



Şekil 5.38 Kireçtaşı içinde değişen nem oranlarına göre BF<sub>3</sub> detektörlerinde kaydedilen nötron akısı



Şekil 5.39 BF<sub>3</sub> detektörlerinde net nötron akısının kireçtaşı ortamının nem oranı ile değişimi

Çizelge 5.15 de net nötron akısı değerleri verilmiştir. %5 nem değerinden sonraki değerler negatif değerlerdir. Nem içeren ortamlarda ışınlama süresinin bir saniyeden daha fazla süreli

olması halinde bu fark daha net biçimde görülebilecektir. Işınlama süresi on katına çıkarıldığında bu sayım değerleri ortalama olarak on kattan biraz daha fazla artmaktadır.

Çizelge 5.15 Farklı nem miktarları için BF<sub>3</sub> detektörlerindeki net nötron akısı değerleri

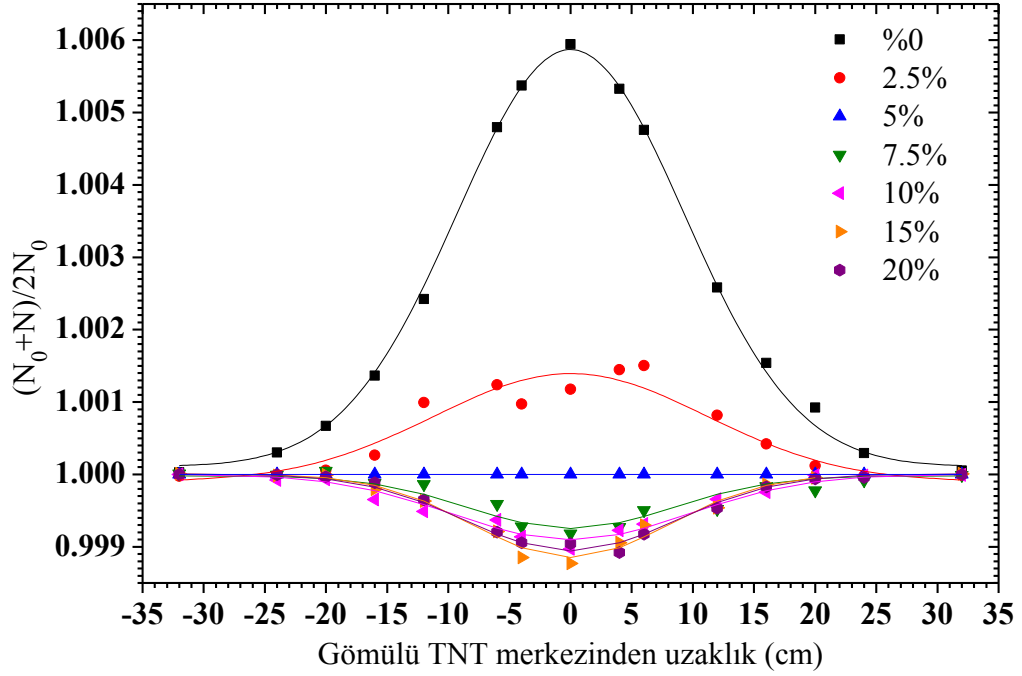
Nem Miktarı (%)	Net Nötron Akısı (n/cm <sup>2</sup> s)
0	34
5	0
10	10
15	12
20	11
25	9
30	6

Deteksiyon sisteminin farklı nem değeri içeren formasyonlardaki etkililiğini incelemek amacıyla, deteksiyon sistemi yatay eksen boyunca hareket ettirilerek farklı nem miktarlarına sahip kireçtaşı ortamında 5 cm derinliğe gömülü TNT için BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akısı MCNP kodu ile belirlendi. Tüm nem seviyelerindeki nötron akılarının grafiksel olarak karşılaştırılmalarının yapılabilmesi için

$$\frac{(N+N_0)}{2N_0} \quad (5.1)$$

oranına bakıldı. Bu ifade de, N formasyon içerisinde TNT olduğu durum için ve N<sub>0</sub> da olmadığı durum için MCNP kullanılarak hesaplanan nötron akılarını göstermektedir. Farklı nem miktarlarına sahip formasyon ortamlarında, deteksiyon sisteminin konumuna bağlı olarak hesaplanan bu oranlar Şekil 5.40 da gösterilmiştir. Nötron kaynağının gömülü cisim merkezi ile aynı eksen üzerinde olduğu konumda, %5 nem değeri hariç, maksimum ya da minimum nötron akısı değerleri gözlenmiştir. Bu da, tasarlanan deteksiyon sistemi ile %5 nem değerinden daha yüksek değerde nem içeren formasyonlar için bu yöntem kullanılarak 5 cm derinlikte bile küçük bir mayının belirlenebileceğinin göstergesi olabilir.

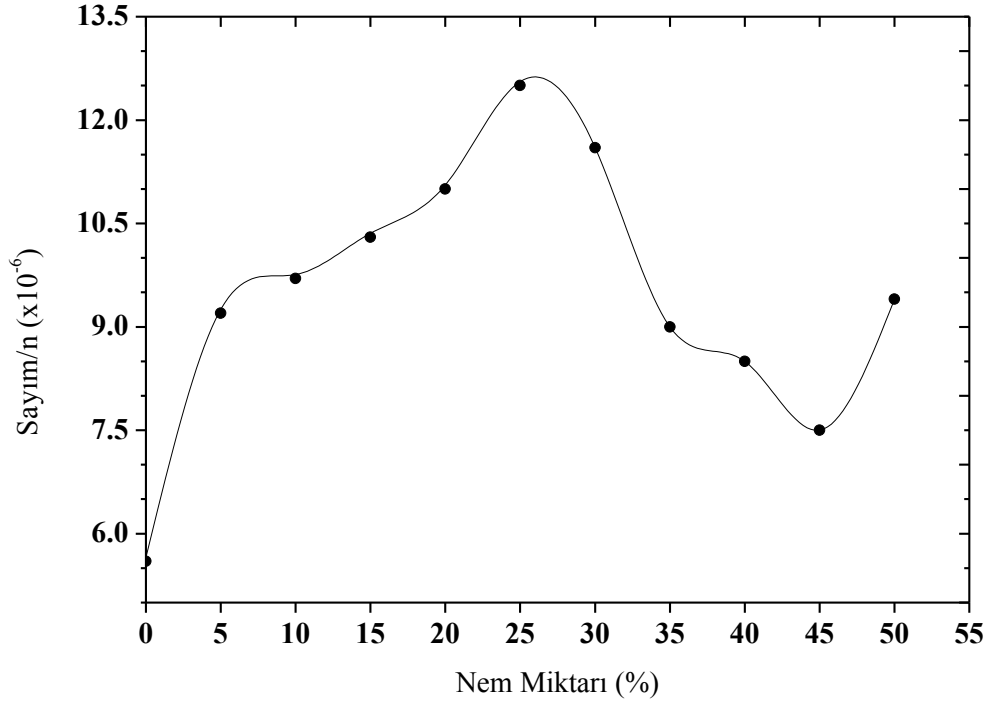




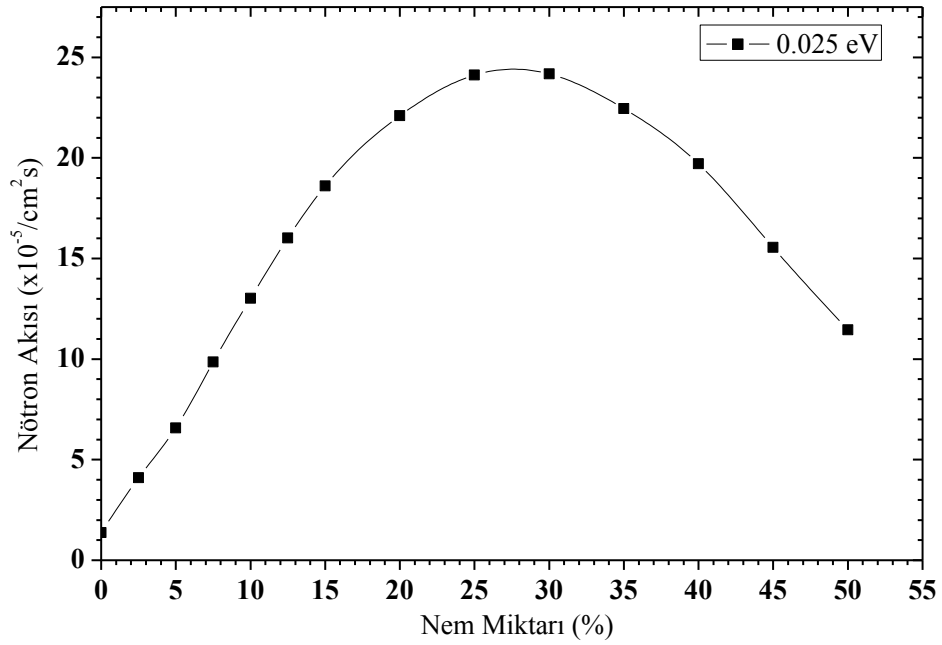
Şekil 5.40 Farklı nem içeriklerinin mayın deteksiyonuna etkileri

Farklı nem değerlerine sahip formasyonlar içerisinde yerleştirilen TNT den gelen 10,83 MeV enerjili karakteristik gama ışınlarının değişiminin gözlenmesi amacıyla  $10 \mu\text{g } ^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağı için bir saniyelik gama spektrumları MCNP kodu ile hesaplandı ve bu spektrumlardan 10-11 MeV enerji aralığındaki gama sayım değerleri belirlendi.

Şekil 5.41 de kireçtaşı ortamı içinde artan nem miktarına bağlı olarak, %25 nem miktarına kadar ısı nötron yakalama gama ışınlarının sayısında da artış görülmektedir. Şekil 5.36 ve 5.42 ile karşılaştırıldığında, %25 nem değerinden sonra TNT ye ulaşan düşük enerjili nötronların azaldığı ve bu nedenle de ısı nötron yakalama ışınlarının sayısında da azalma görüldüğü anlaşılmaktadır. Özellikle, kireçtaşı içerisindeki %20-%30 aralığındaki nem değerleri NaI detektörlerine gelen gama ışını sayımını arttırarak mayın deteksiyonunu kolaylaştırmaktadır.



Şekil 5.41 NaI detektörlerinde 10-11 MeV enerjili aralığındaki gamaların sayısı



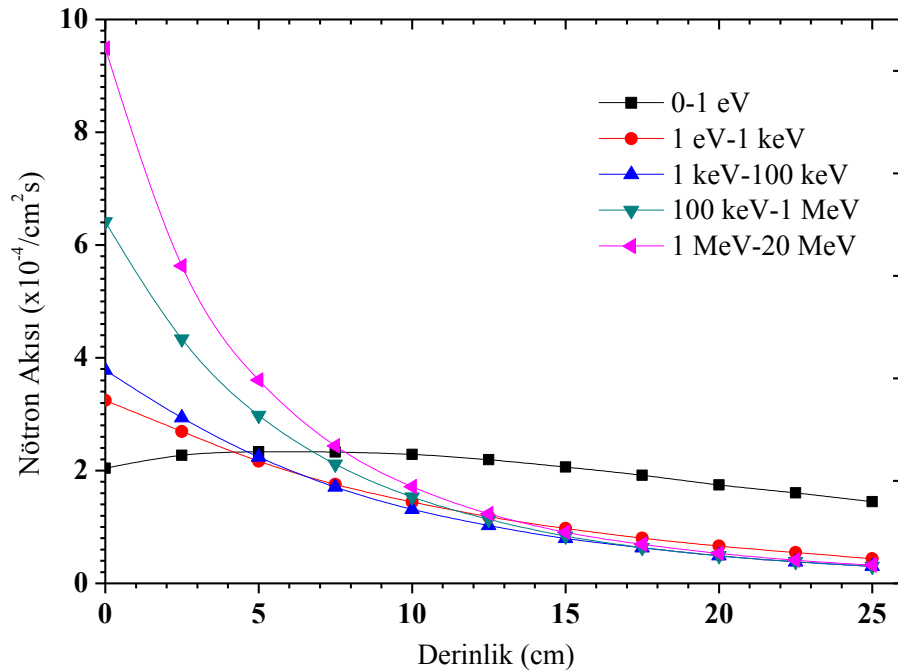
Şekil 5.42 TNT de ısıf nötron akısının nem miktarıyla değışimi

### 5.3 Toprak içerisinde plastik patlayıcı ve mayınların deteksiyonu ile ilgili MCNP hesaplama sonuçları

Bu kısımda, patlayıcının bulunduğu kireçtaşı ortamı için yapılan simülasyonlar, toprak ortamı içinde tekrarlanarak mayın deteksiyonundaki sınırlamaların karşılaştırılması yapıldı. Toprak ortamı içerisinde, 7 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde  $1,65 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip TNT ( $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$ ) plastik patlayıcı kullanılmış ve Monte Carlo hesaplamaları  $2,306 \times 10^7$  nötron kullanılarak yapılmıştır.

#### 5.3.1 Deteksiyon sisteminin derinlik hassasiyetinin belirlenmesi

TNT mayın, toprak içerisine farklı derinliklere yerleştirilerek bulunduğu derinliğin değişimine bağlı olarak üzerindeki nötron akısı beş ayrı enerji aralığı için incelendi. TNT nin derinliği, TNT nin üst yüzeyinden toprak yüzeyine olan mesafe olarak kabul edildi.

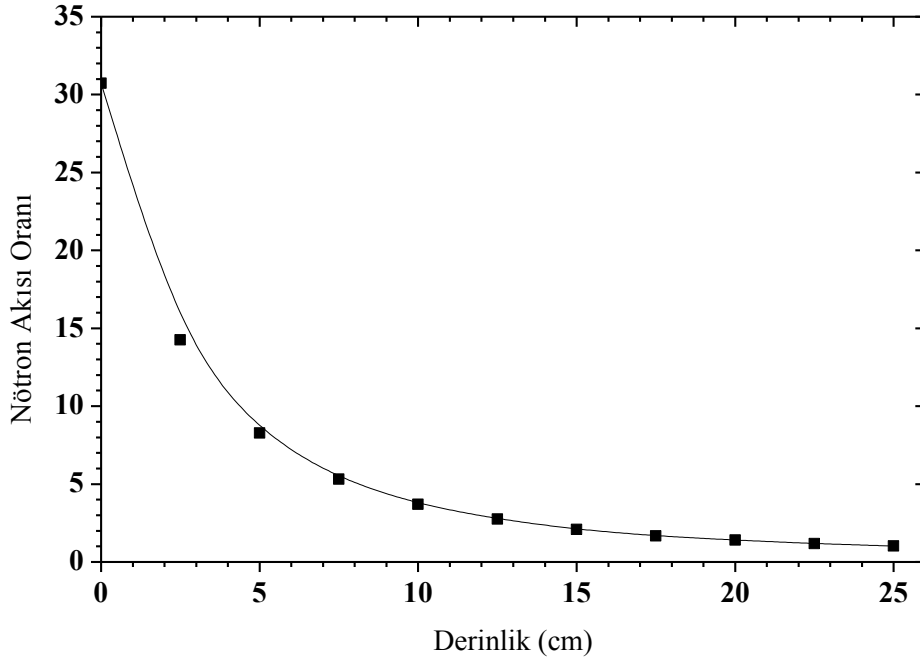


Şekil 5.43 Toprak içerisinde TNT' nin derinliğine bağlı olarak TNT de değişen nötron akısı

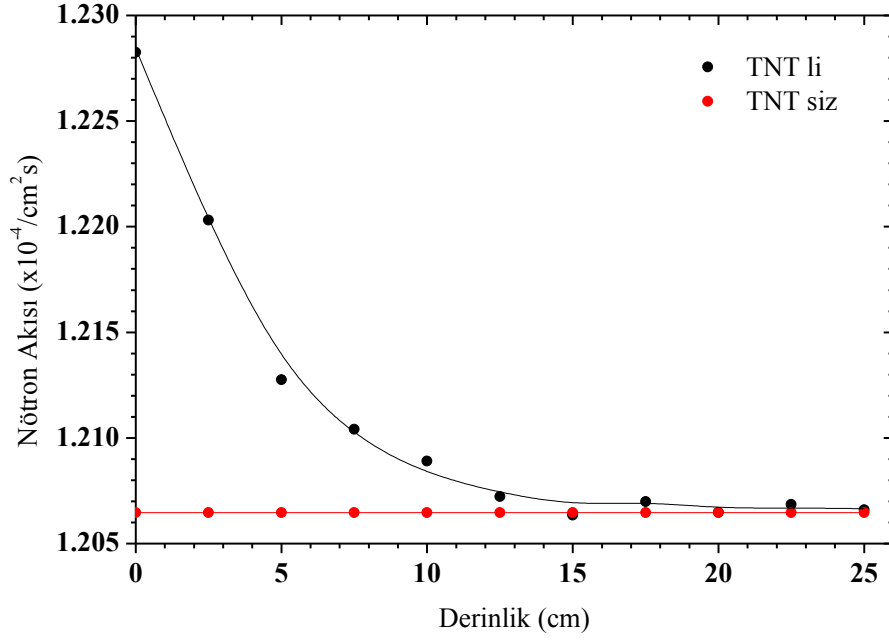
TNT nin bulunduğu derinliğin artırılması ile birlikte nötron akısındaki hızlı düşüş kireçtaşı ortamında olduğu gibi en çok 100 keV üzerindeki nötronlarda gözlemlendi (Şekil 5.43). TNT ye ulaşan 100 keV-1 MeV enerji aralığı içindeki nötronların sayısının daha az olması nedeniyle de TNT de yavaşlayarak toprak ortamı içerisinden geri saçılacak olan ısıl nötronların sayısının azalabileceği görüldü.

Şekil 5.44 de 1-20 MeV enerji aralığında bulunan nötron akısının ısıl nötron akısına oranı gösterildi. Buna göre, 0-5 cm aralığında bu oran 3,71 kat değişirken, 0-25 cm aralığında 30 kattan daha fazla değişmiştir. Toprak ortamının daha fazla element ve az miktarda hidrojen içermesi nedeniyle yüksek enerjili nötronlar için kireçtaşına göre daha yüksek yavaşlatma özelliği görülmüştür. Toprak ve kireçtaşının elementlerine ait kütle oranları ve yoğunluk değerleri Çizelge 4.5 den görülebilir.

$BF_3$  detektörlerinde nötron akısının TNT mayının toprak içerisinde gömülme derinliğine bağlı olarak incelenmesi amacıyla 0-25 cm gömülme derinliği aralığında 2,5 cm aralıklarla Monte Carlo simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarından deteksiyon sisteminin kendine has arka-plan gürültüsü çıkartılarak hesaplanan nötron akısı değerleri TNT li ve TNT siz ortam için Şekil 5.45 de verilmiştir. 12,5 cm derinliğe kadar 7 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde  $1,65 \text{ g/cm}^3$  düşük yoğunluğa sahip TNT mayının deteksiyonunun mümkün olabileceği görülmüştür.



Şekil 5.44 TNT de 1-20 MeV/0.025 eV nötron akısı oranı



Şekil 5.45 Toprak içerisinde TNT' nin gömülü olduğu farklı derinlikler için BF<sub>3</sub> detektörlerinde nötron akısının değişimi

Çizelge 5.16 da toprak içerisine 5 cm derinliğe gömülü TNT için farklı nötron sayıları kullanılarak yapılan simülasyonların sonucunda BF<sub>3</sub> detektörleri için hesaplanan net nötron akısı değerleri verilmiştir. Bir, on ve yüz saniye ışınlama ve eş zamanlı ölçüm süre değerlerine karşılık gelen bu nötron sayıları için elde edilen nötron akısı değerlerinin süreyle orantılı olarak artışı gösterilmiştir.

Çizelge 5.16 Farklı kaynak nötron sayıları için BF<sub>3</sub> detektörlerinde net nötron akısı

Kaynak nötron sayısı	Net Nötron Akısı (n/cm <sup>2</sup> )
2,306x10 <sup>7</sup>	14,5
2,306x10 <sup>8</sup>	141
2,306x10 <sup>9</sup>	1460

MCNP kodu ile F8 hesap kartı kullanılarak NaI detektörlerinde 5 cm aralıklarla 20 cm derinliğe kadar darbe yükseklik spektrumları elde edilmiştir. Ancak, 10.83 MeV enerjili

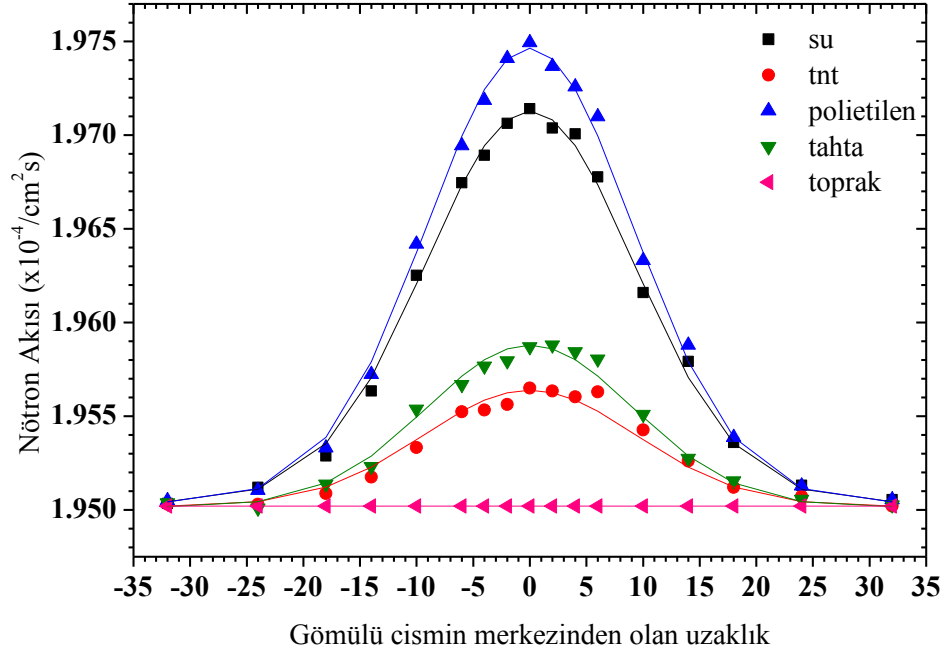
karakteristik gama ışını  $10^7$  nötron (nps) değeri için 0-25 cm derinlik aralığında 2,5 cm aralıklarla yapılan simülasyonların hiç birinde gözlenememiştir. Bu nedenle, ısıl nötron yakalama yöntemiyle bir saniye ışınlama süresi için ortam içerisinde sadece TNT de bulunan azotun varlığı ile ilgili herhangi bir bilgi sağlamamaktadır. Bu enerjideki azotun gama ışını ancak  $10^9$  nötron değerinde gözlenebilmiştir. Tasarlanan deteksiyon sisteminde öncelikli olarak, deteksiyon sistemi hareket halinde iken, NaI detektörlerinde azotun bu enerjideki gama ışınından sayım alınıp alınmadığına bakıldığı için, bu durumda mayının tesbiti öncelikli olarak nötron geri saçılma yöntemine dayalıdır. Deteksiyon sisteminde nötron geri saçılma yöntemi kullanılarak tesbit edilen cismin mayın olduğunun kesin olarak söylenebilmesi için gama detektörlerinde minimum 100 saniyelik ölçüm alınması gerekmektedir. Çizelge 5.17 de 5 cm derinliğe gömülü TNT için farklı nötron sayıları kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarından karakteristik gama ışınlarına karşılık gelen net sayım değerleri verilmiştir. Oksijen, hidrojen ve karbondan gelen gama ışınlarının sayısındaki artış gözlenerek o bölgede azotun varlığının anlaşılabilmesi için daha uzun süreli sayım yapılabilir.

Çizelge 5.17 5 cm derinlikte gömülü TNT için gama ışını sayım değerleri

Kaynak nötronlarının sayısı	E $\gamma$ (MeV)				
	O-1,087	H-2,223	C-4,439 MeV	N-5,269	N-10,83 MeV
	Net Sayım				
$2,306 \times 10^7$	4,6	2,3	2,3	0	0
$2,306 \times 10^8$	13,8	9,2	9,2	9,2	0
$2,306 \times 10^9$	43,8	29,97	41,5	13,8	4,6

### 5.3.2 Deteksiyon sisteminde patlayıcının diğer olası cisimlerden ayırt edilmesi

Nötron geri saçılma yöntemi ile toprak içerisinde bulunması olası farklı malzemelerden yapılmış cisimlerin ayırt edilip edilemeyeceğinin tesbit edilmesi amacıyla, deteksiyon sistemi yatay eksen boyunca hareket ettirilerek BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akısı, 5 cm derinlikte bulunan 3.5 cm yarıçapında ve 2 cm yüksekliğinde kavite içerisine yerleştirilen TNT ve diğer hidrojen içerikli malzemeler için belirlendi. Bu malzemelere ait yüzdesel kütle oranları ve yoğunlukları Çizelge 5.9 da verilmiştir. Nötron akılarının gömülü cismin merkez ekseninden olan uzaklığına bağlı değişimi Şekil 5.46 da gösterilmiştir. Nötron kaynağının gömülü cismin merkezi ile aynı eksen üzerinde olduğu konumda maksimum nötron akısını sağladığı belirlendi ve hesaplanan değerler Gauss eğrisi ile fit edilebildi. Ayrıca, TNT merkez eksenini



Şekil 5.46 Farklı malzemelerin BF<sub>3</sub> detektörlerinde karşılaştırılması

üzerindeki veriler kullanılarak net nötron akıları hesaplandı ve TNT ye göre normalize edilerek Çizelge 5.18 de listelendi. Normalize nötron akısı değerlerine bakıldığında, polietilen için yaklaşık dört kata ve su için yaklaşık 3,5 kata yakın değer elde edilmesi, onların oldukça net bir biçimde TNT den ayırt edilebildiğini göstermektedir.

Bu değerler, su ve polietilenin yoğunluk ile kütle oranlarının TNT ninkilerle kıyaslaması yapıldığında elde edilen değerlere çok yakındır. Ayrıca, tahtanın toprak ortamında TNT den kireçtaşı ortamına göre daha net biçimde ayırt edilebildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçların, kireçtaşı ortamı için verilen sonuçlar ile karşılaştırılması yapıldığında daha yüksek değerler elde edilmiş olması (Çizelge 5.10), bu deteksiyon sisteminin toprak ortamındaki ayırt ediciliğinin kireçtaşı ortamına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.19 da bu oranların ve MCNP kodu ile 10<sup>8</sup> nötron değeri için BF<sub>3</sub> detektörlerinde belirlenen net nötron akılarının aynı koşullar doğrultusunda hesaplanan değerleri verilmiştir. Her iki çizelgedeki değerler karşılaştırıldığında kaynak nötron sayısının arttırılması ile deteksiyon sisteminin ayırt ediciliğinin de arttığı görülmektedir.

Çizelge 5.18 Malzemelerin nötron akıları ve kıyaslamaları ( $10^7$  nötron için)

Gömülü Cisim	Net Nötron Akısı (n/cm <sup>2</sup> s)	Normalize Nötron Akısı
TNT	14,49	1
Polietilen	56,99	3,93
Su	48,85	3,37
Tahta	19,56	1,35
RDX	16,23	1,12

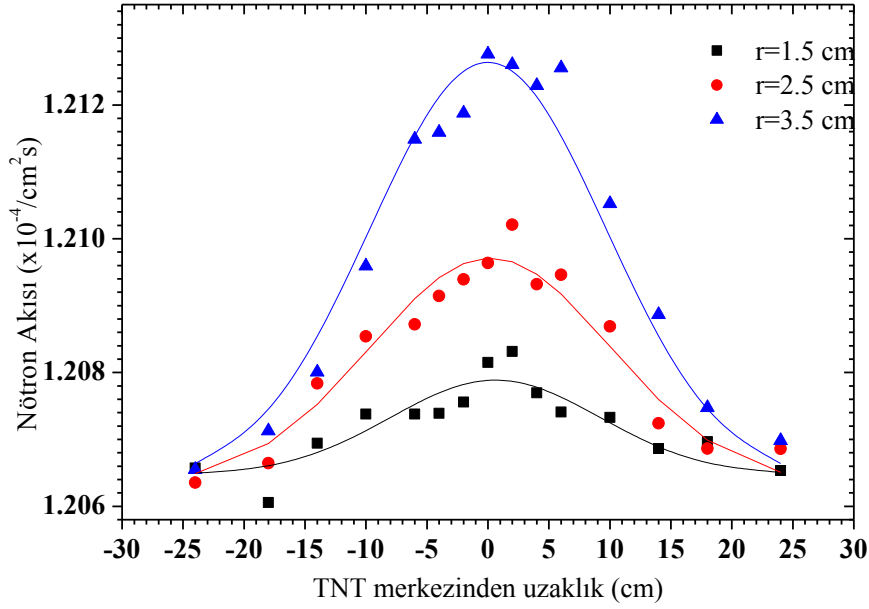
Çizelge 5.19 Malzemelerin nötron akıları ve kıyaslamaları ( $10^8$  nötron için)

Gömülü Cisim	Net Nötron Akısı (n/cm <sup>2</sup> s)	Normalize Nötron Akısı
TNT	140,84	1
Polietilen	562,77	4
Su	495,02	3,51
Tahta	193,51	1,37
RDX	159,74	1,13

### 5.3.3 Farklı çapa sahip mayınların deteksiyonunun incelenmesi

Deteksiyon sisteminin, toprak ortamına yerleştirilen patlayıcının büyüklüğüne bağlı duyarlılığının incelenmesi amacıyla farklı yarıçapa sahip mayınlar için simülasyonlar yapıldı. Yarıçapları 1,5, 2,5 ve 3,5 cm olan 2 cm yüksekliğinde  $1,65 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip üç farklı boyutta TNT mayını teker teker kireçtaşı içerisinde 5 cm derinliğe yerleştirildi ve deteksiyon sistemi yatay eksen boyunca hareket ettirilerek  $\text{BF}_3$  detektörler üzerindeki nötron akısı değerleri hesaplandı. Deteksiyon sisteminin kendine has geri- plan gürültüsü çıkartılarak, TNT merkez ekseninden uzaklığa bağlı olarak belirlenen değerler Gauss eğrisi ile fit edildi ve yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değerleri belirlendi (Şekil 5.47).





Şekil 5.47 Farklı yarıçaplı TNT mayınları için nötron akısı değerleri

Burada, 1,5 cm yarıçaplı TNT mayın için olan Gauss eğrisinin tepe noktası 0,6 cm lik bir kayma göstermektedir. Ancak bu değer halen mayının sınırları içerisinde olduğundan mayının tesbit edilmesi mümkün olmaktadır.

Çizelge 5.20 de verilen FWHM değerlerine bakıldığında, bu değerlerin TNT nin yarıçapı 1,5 cm olduğunda 20 cm ye düştüğü görülmektedir. Bu da böyle bir yarıçapa sahip bir patlayıcının fark edilebilmesi için yeterli bir genişliktir. Ayrıca, deteksiyon sistemi ile  $\pm 20$  cm sınır aralığı içerisinde bulunan bir mayının deteksiyonu mümkün gözükmemektedir.

Çizelge 5.20 Farklı yarıçaplara sahip TNT mayınları için FWHM değerleri

Yarıçap (cm)	1,5	2,5	3,5
Kütle (g)	23,33	64,80	126,99
FWHM	20,22	23,22	22,67

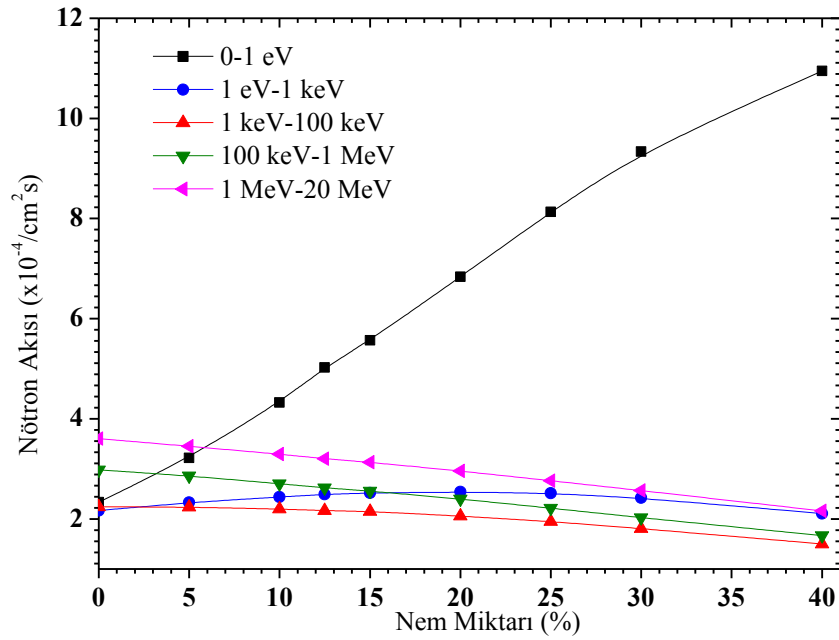
### 5.3.4 Toprak içerisindeki farklı nem miktarlarının plastik patlayıcı ve mayın deteksiyonuna etkilerinin incelenmesi

Farklı nem miktarlarına sahip toprak için MCNP kodu ile yapılan hesaplamalarda kullanılan

yoğunluk değerleri Çizelge 5.21 de verilmiştir. Yoğunluk değerleri, suyun formasyon içerisine homojen dağıldığı ve toplam hacimin sabit kaldığı durum için hesaplanmıştır.

Çizelge 5.21 Farklı nem miktarlarına sahip toprak için yoğunluk değerleri

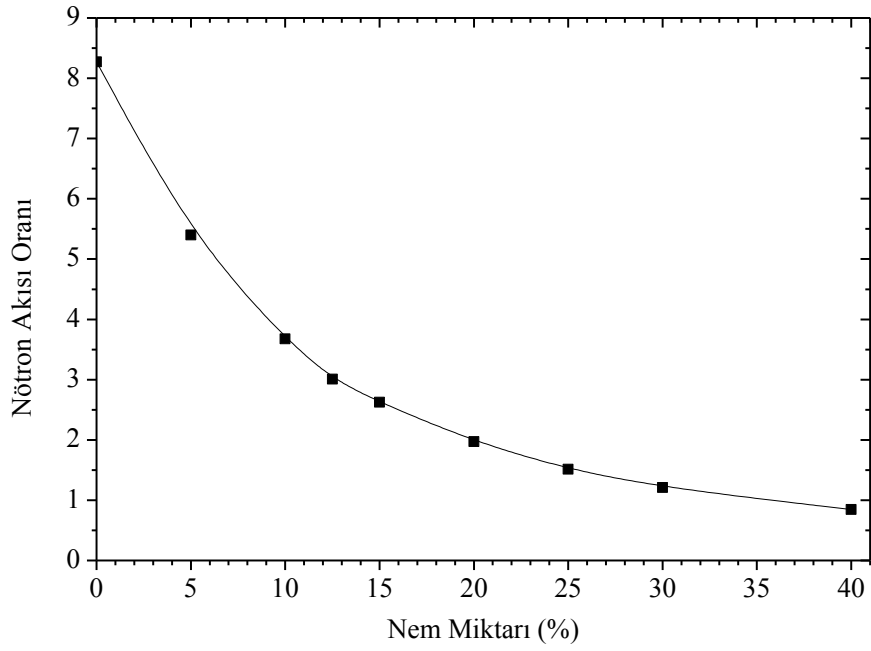
Nem miktarı (%)	0	5	10	15	20	25	30	40
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,120	1,170	1,235	1,308	1,390	1,482	1,588	1,853



Şekil 5.48 TNT de nötron akısının nem miktarıyla değişimi

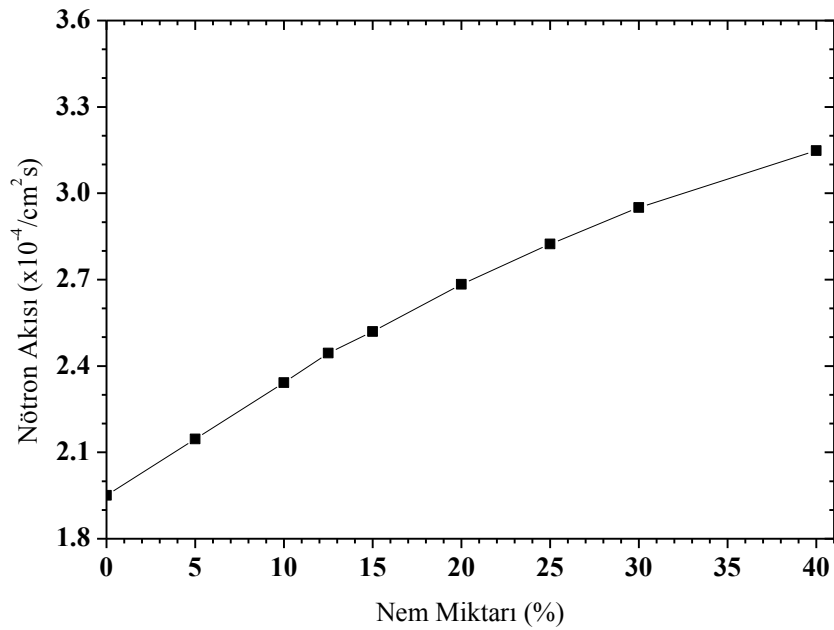
Yapılan simülasyonlarda, kireçtaşı ve toprak içerisindeki nem miktarının formasyon içindeki nötron akısına etkilerinin karşılaştırılmasının yapılabilmesi amacıyla, 5 cm derinliğe gömülü TNT deki nötron akısının artan nem ile değişimi incelendi. Buna göre topraktaki nem miktarı arttırıldığında TNT ye ulaşan ısıl ve episiil nötronların sayısının arttığı görüldü (Şekil 5.48). Kireçtaşı ortamında olduğu gibi, yüksek enerjili nötronların toprak elementlerinden ve su moleküllerinden saçılırken yavaşladıkları belirlendi. Kireçtaşı ortamında düşük enerjili nötronların sayısının %25 nem değerinden itibaren düştüğü gözlenmişti, ancak toprak ortamında %40 nem değerine kadar artış görülmektedir. 1-20 MeV enerji aralığındaki nötron akısının ısıl nötron akısına oranına bakıldığında, kireçtaşı ortamında % 40 nem değeri için oran 188 kat düşerken, toprak ortamında yaklaşık 10 kat düşmektedir (Şekil 5.49). Bu sonuçlar doğrultusunda, kireçtaşındaki nem içeriği toprak ortamına göre yüksek enerjili

nötronların yavaşlatılmasında ve ısıl nötronlarında absorblanmasında daha etkili olmaktadır.

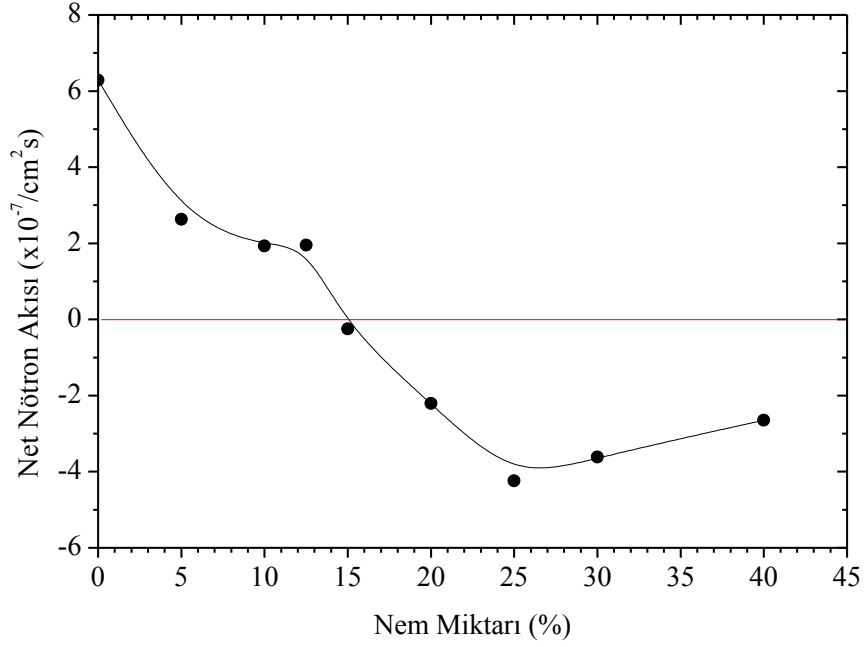


Şekil 5.49 1-20MeV/0,025eV enerjili nötron akısı oranının nem miktarı ile değişimi

Topraktaki nem miktarının artışı ile topraktan geri saçılan nötronların sayısının arttığı ,  $\text{BF}_3$  detektörlerindeki nötron akısının belirlenmesi için yapılan simülasyonlarda görülmüştür (Şekil 5.50).



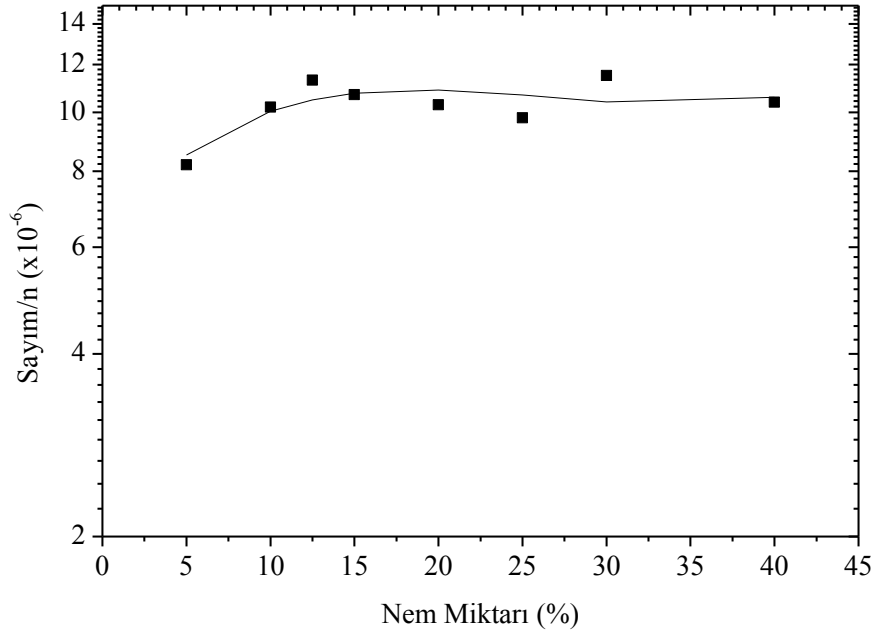
Şekil 5.50  $\text{BF}_3$  detektörlerinde toprak ortamından geri saçılan nötron akısı



Şekil 5.51 BF<sub>3</sub> detektörlerinde net nötron akısının değişimi

Toprak içerisine 5 cm derinliğe TNT mayın yerleştirilerek, BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akısı sekiz farklı nem oranı için belirlenmiştir. Daha sonra, BF<sub>3</sub> detektörlerinde TNT li ve TNT siz ortamlar için tesbit edilen nötron akılarından net nötron akıları hesaplanmıştır. Şekil 5.51 de %15 nem değerine kadar nötron akısının arka-plan gürültüsü (topraktan gelen) üstünde kaldığı ve mayının tesbit edilebileceği görülmüştür. Nötron akısının arka-plan gürültüsü (topraktan gelen) altında kaldığı durumda ise, kireçtaşı ortamında olduğu gibi, toprak içerisindeki nemli ortamın yokluğu orada şüpheli bir cismin varlığının göstergesi olabilir.

NaI detektörlerinde farklı nem ortamları için alınan spektrumlar incelendiğinde, topraktaki nem miktarının artması halinde nötronların su molekülleri tarafından absorblanmasının yanı sıra azotun  $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$  ısıl nötron yakalama reaksiyonundan gelen gamaların da arttığı gözlenmiştir (Şekil 5.52).



Şekil 5.52 NaI detektörlerinde 10,7- 11 MeV enerji aralığındaki gamaların sayımı

#### 5.4 Kütlesel ve elementsel oran hesaplamaları

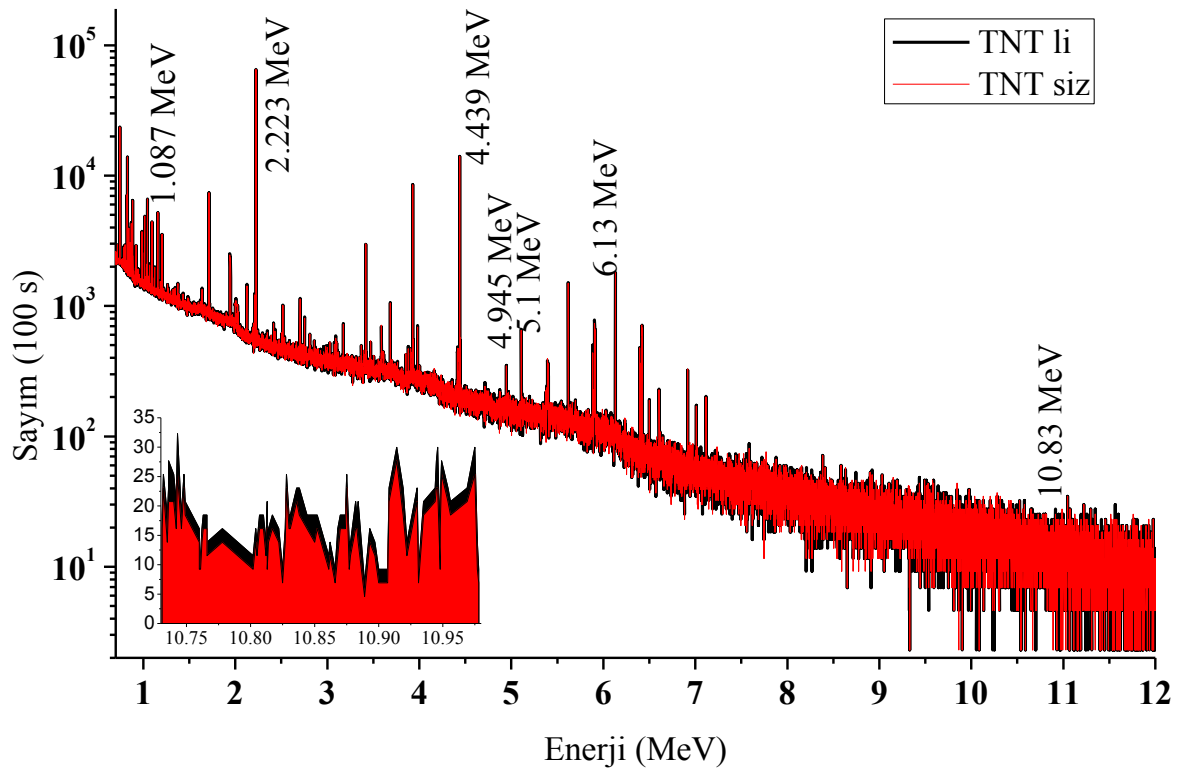
Öncelikle nötron geri saçılma yöntemiyle, toprak veya kireçtaşı içerisinde belirlenen şüpheli cismin TNT olup olmadığının NaI detektörleri ile tesbit edilerek diğerlerinden ayırt edilebileceğinin doğrulanması için, TNT yi oluşturan elementlere ait kütleli ve elementsel oranlar hesaplanmıştır. Bu oranların belirlenebilmesi amacıyla, TNT ve onun içerdiği elementler (H,C,O,N) için teker teker NaI detektörlerindeki gama spektrumları MCNP kodunun F8 hesap kartı kullanılarak belirlenmiştir. TNT içindeki elementlerin kütlelerinin nötron aktivasyon karşılaştırma yöntemi ile belirlenebilmesi için simülasyonların hepsi aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. TNT ve kütleleri bilinen saf haldeki elementler, iki ayrı formasyon (toprak ve kireçtaşı) içerisine 5 cm derinliğe, 3,5 cm yarıçapında ve 2 cm yüksekliğindeki silindirik kavite içerisine yerleştirilmiş, yapılan simülasyonlarda, bu elementler için hesaplanan TNT içerisindeki fiziki yoğunlukları kullanılmıştır. Bu yoğunluk değerleri Çizelge 5.22 de verilmiştir. Tüm gama spektrumları  $10^{-8}$  – 14 MeV enerji aralığında 16384 kanal için yapılmıştır. Simülasyonlarda  $10^9$  nötron kullanılması, 10  $\mu\text{g}$  kütleli kaliforniyum kaynağı ile 100 s lik ışınlamaya karşılık gelmektedir. Bu durumda, her bir simülasyon, ortalama 50 saat sürede tamamlanmıştır.

Çizelge 5.22 MCNP hesaplamalarında kullanılan elementlere ait yoğunluklar

	TNT	H	C	O	N
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,65	0,036	0,61	0,306	0,698

Elde edilen spektrumlardan karakteristik gama ışını sayımları alınarak TNT yi oluşturan elementlerin kütleleri belirlenmiştir. Böylece, elementsel ve kütle oranlar hesaplanmıştır. Sonuçlarda verilen değerlerdeki belirsizlik değerleri MCNP kodu tarafından her bir karakteristik gama ışını için ayrı ayrı gösterilen belirsizlik değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. TNT ye ait, toprak ve kireçtaşı ortamları için bulunan sonuçlar ve hesaplamalarda kullanılan gama spektrumları, kısım 5.4.1 ve 5.4.2 de verilmiştir.

#### 5.4.1 Kireçtaşı ortamı içerisine yerleştirilen TNT için bulunan kütle oranlar



Şekil 5.53 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş TNT için gama spektrumu

Çizelge 5.23 ve 5.24 de, MCNP simülasyonlarının sonuçları kullanılarak kireçtaşı ortamı içindeki TNT için hesaplanan kütle miktarları ve kütle oranların bilinen değerleri ile

kıyaslamaları verilmiştir. Hesaplamalarda, oksijen için 1,087 MeV, hidrojen için 2,223 MeV, azot için 10,829 MeV enerjili ısıl nötron yakalama gama ışınları ve karbon için de 4,439 MeV nötron inelastik saçılma gama ışını sayımları kullanılmıştır (Şekil 5.53). Çizelgelerde, özellikle, hidrojen ve karbon değerlerinin oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Azot için belirlenen belirsizlik değeri yüksek olsada O/N ve N/H oranlarının gerçek değerlerine yakın çıkması ve azotun sadece patlayıcılarda bulunması patlayıcının deteksiyonunu mümkün kılmaktadır. Ayrıca TNT nin, 5 cm derinliğe gömülü ve çok düşük yoğunluklu olmasına rağmen bu oranların elde edilmesi umut vericidir. Çünkü, daha yüksek yoğunluğa sahip (1,65-1,8 g/cm<sup>3</sup>) ve daha az derinlikte bulunan mayınların deteksiyonu daha kolay yapılabilecektir.

Çizelge 5.23 Kütle miktarlarının karşılaştırılmaları

Element	Kütle (g)		Belirsizlik
	Teorik	MCNP	
H	2,756	2,829	0,108
C	46,998	46,974	0,139
O	53,713	62,807	0,935
N	23,532	26,862	11,352

Çizelge 5.24 Kütlesel oranların karşılaştırılmaları

Oran	Kütlesel Oran		Belirsizlik
	Teorik	MCNP	
C/H	17,054	16,603	0,636
O/H	19,490	22,198	0,910
N/H	8,539	9,494	4,029
O/N	2,283	2,338	0,989

Çizelge 5.25 ve 5.26 de simülasyonların sonuçları kullanılarak hesaplanan atom sayıları ve oranlarının bilinen değerleri ile kıyaslamaları verilmiştir. Değerler belirsizlik sınırları içinde oldukça uyumlu gözükmektedir.

Çizelge 5.25 Atom değerlerinin karşılaştırılması

Element	Atom Sayıları		Belirsizlik
	Teorik	MCNP	
H	2,729	2,807	0,107
C	3,916	3,914	0,012
O	3,358	3,927	0,058
N	1,680	1,918	0,811

Çizelge 5.26 Elementsel oran değerlerinin karşılaştırılması

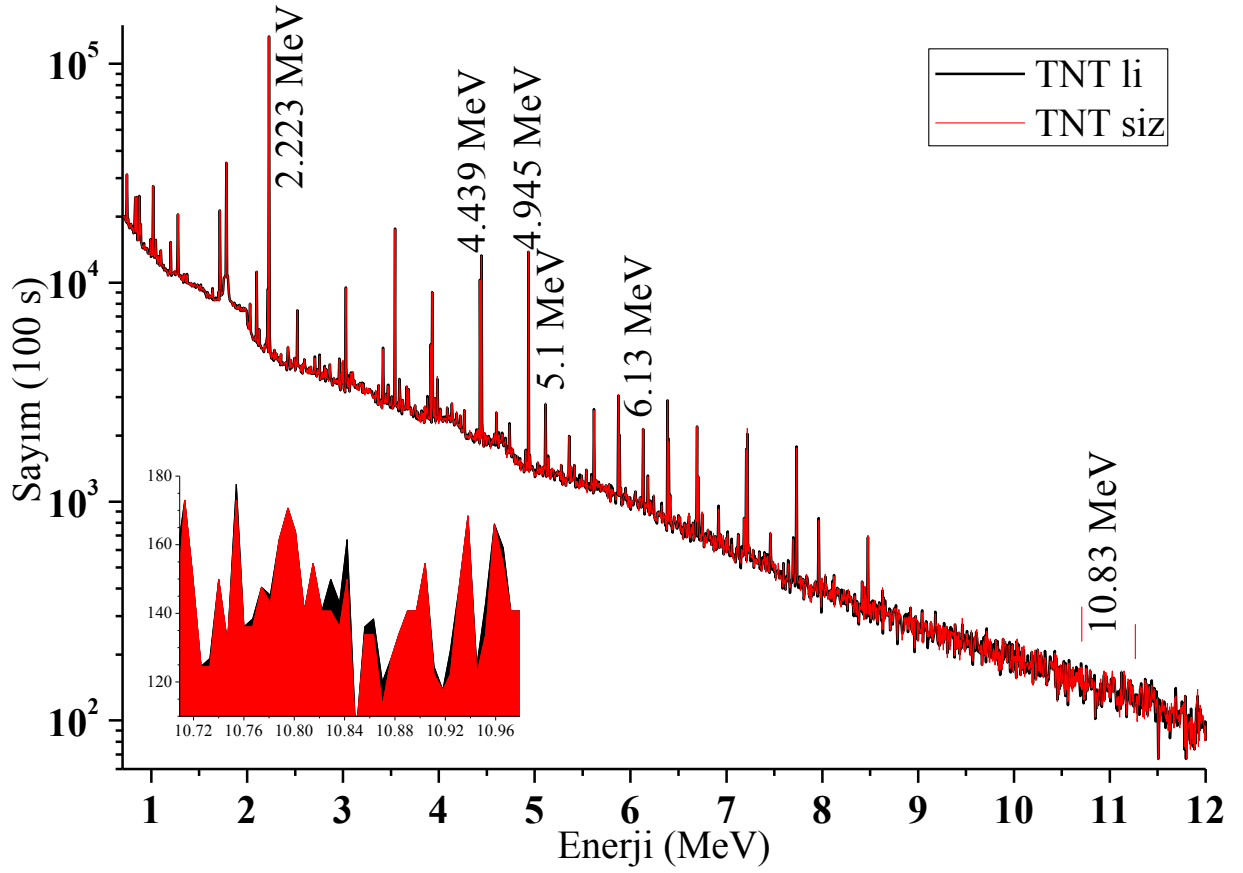
Oran	Elementsel Oran		
	Teorik	MCNP	Belirsizlik
C/H	1,435	1,394	0,053
N/H	0,616	0,683	0,290
O/N	1,998	2,047	0,866
O/H	1,231	1,399	0,057

Kireçtaşı içerisine 5 cm derinlikte gömülü oksijen, hidrojen, karbon ve azot için NaI detektörlerinde MCNP kodu ile hesaplanan ve bu oranların belirlenmesinde kullanılan gama spektrumları Ek 2 de verilmiştir.

#### 5.4.2 Toprak içerisine yerleştirilen TNT için bulunan kütle ve elementsel oranlar

Çizelge 5.27 ve 5.28 de, MCNP simülasyonlarının sonuçları kullanılarak toprak ortamı içindeki TNT için hesaplanan kütle miktarları ve kütle oranlarının bilinen değerleri ile kıyaslanmıştır. Hesaplamalarda, oksijen için 1,087 MeV, hidrojen için 2,223 MeV, azot için 10,829 MeV enerjili ısıl nötron yakalama gama ışınları ve karbon için de 4,439 MeV nötron inelastik saçılma gama ışını sayımları kullanılmıştır (Şekil 5.54). Oranları yine oldukça uyumlu görülmektedir.





Şekil 5.54 Toprak içerisine yerleştirilmiş TNT için NaI detektörlerindeki gama spektrumu

Çizelge 5.27 Kütle miktarlarının karşılaştırılmaları

Element	Kütle (g)		Belirsizlik
	Teorik	MCNP	
H	2,756	2,849	0,101
C	46,998	48,255	5,958
O	53,713	55,937	0,301
N	23,532	35,816	6,710

Çizelge 5.29 ve 5.30 da simülasyonların sonuçları kullanılarak hesaplanan atom sayıları ve oranlarının bilinen değerleri ile kıyaslamaları verilmiştir. C/H ve O/H değerleri oldukça uyumlu gözükmetedir. Hesaplamalarda kullanılan gama spektrumları Ek 3 de verilmiştir.

Çizelge 5.28 Kütlesel oranların karşılaştırılmaları

Oran	Kütlesel Oran		
	Teorik	MCNP	Belirsizlik
C/H	17,054	16,937	2,175
O/H	19,490	19,633	0,704
N/H	8,539	12,571	2,40
O/N	2,282	1,562	0,293
N/C	0,500	0,742	0,167

Çizelge 5.29 Atom değerlerinin karşılaştırılması

Element	Atom Sayıları		
	Teorik	MCNP	Belirsizlik
H	2,734	2,827	0,100
C	3,917	4,021	0,496
O	3,358	3,497	0,019
N	1,680	2,558	0,479

Çizelge 5.30 Elementsel oran değerlerinin karşılaştırılması

Oran	Elementsel Oran		
	Teorik	MCNP	Belirsizlik
C/H	1,432	1,422	0,183
O/H	1,228	1,237	0,044
N/H	0,615	0,905	0,173
O/N	1,998	1,367	0,256
N/C	0,429	0,636	0,619

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tezde, plastik patlayıcı içeren anti-personel mayınların deteksiyonu için taşınabilir bir deteksiyon sistemi tasarlanmış ve bu sistemin verimliliği incelenmiştir. Tasarlanan deteksiyon sistemi, nötron soğulama yöntemlerinden ikisine, yani, nötron geri-saçılma ve nötronlarla indüklenen gamaların sayımına dayanmaktadır. Bu nedenle deteksiyon sisteminde iki farklı türde detektör kullanılmıştır. NaI detektör kullanılarak, ısı nötron yakalama ve nötron inelastik saçılma yoluyla hedeften yayılan gama ışınları ölçülmüştür. BF<sub>3</sub> detektör kullanılarak da nötronlarla ışınlanan formasyondan (toprak, kireçtaşı vd.) geri saçılan yavaş nötronların deteksiyonu gerçekleştirilmiştir.

10 µg kütleli <sup>252</sup>Cf fisyon kaynağı ile bütünleştirilmiş deteksiyon sisteminde, kaynaktan saçılan nötronların NaI detektörlerine etkilerini engellemek ve deteksiyon sisteminin verimini arttırmak için, moderatör ve zırh malzemesi olarak borik asit, %5 bor katkı polietilen, %3 bor katkı parafin ile birlikte bor ve kurşun katkı polietilen denenmiştir. Nötron kaynağının bu malzemelerle zırhlanması halinde, ışınlanan hacim içerisindeki patlayıcıda nötron akısının arttığı görülmüştür. Bu da deteksiyon sisteminde sayım istatistiğini arttırmaktadır. Zırh malzemeleri içerisinde kaynağın çevresinde zırh kullanılmadığı duruma göre patlayıcıdaki toplam nötron akısında %74 lük artış gösteren bor katkı parafin en uygun malzeme olarak görülmüştür. Bu malzeme, TNT ye ulaşan ısı nötronların sayısını arttırarak ısı nötron yakalama reaksiyonunun artmasını sağlamış ve böylece, NaI detektörlerinde 10,83 MeV enerjili gamalar 1s lik ölçüm süresinde gözlenebilmiştir. Aynı zamanda, bu malzeme BF<sub>3</sub> detektörlerinde en çok net nötron sayısının (sadece TNTden gelen) elde edilmesini sağlayan malzemedir. Kireçtaşı ortamında, 10 µg kütleli <sup>252</sup>Cf nötron kaynağı (2,306x10<sup>7</sup> nötron/s) kullanılarak yapılan Monte Carlo simülasyonlarında, deteksiyon sistemi yatay eksen boyunca hareket ettirilerek mayın bölgesi tarandığında, nötron kaynağı 5 cm derinlikteki TNT nin üzerine geldiğinde TNT den geri-saçılan nötronların sayısındaki artışın zırh kullanılmadığı durumdan 2,5 kat fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, BF<sub>3</sub> detektörlerinde, deteksiyon sisteminin mayının merkezi üzerinde olduğu konumundaki nötronların sayısı, mayının belirlenme sınırları dışında olduğu (stand-off) konumdaki (y=24) nötronların sayısından yaklaşık 32 kat fazladır. 1 s lik ışınlama süresinde, mayının varlığının hem nötron geri saçılma yoluyla belirlenmesi hem de azotun 10,83 MeV enerjili ısı nötron yakalama gamalarının sayımı ile belirlebilmesi bu zırh malzemesinin kullanılmasının patlayıcının tespit edilmesini çok daha kolaylaştırdığını göstermiştir.

Bor katkı parafin zırhın kullanılması ile, NaI detektörlerde biriken nötron doz değerini

33 $\mu$ Sv/s ten 9  $\mu$ Sv/s değerine dűşürölerek, detektörün nötronların etkisinden korunmasını sağlanmıştır. Clifford vd. (2007) de yaptıkları çalışmada, 100  $\mu$ g kűtleli <sup>252</sup>Cf (2,306x10<sup>8</sup> n/s) gűçlü nötron kaynağı polietilen bir zırh ile evrelemiřler ve detektörlerde 55 mRem/sa. (550  $\mu$ Sv/sa.) nötron eşdeğer doz ve kaynaktan 1m uzaklıkta ise 1,8 mRem/sa. (18  $\mu$ Sv/sa.) nötron eşdeğer dozu ve 0,8 mRem/sa. (8  $\mu$ Sv/sa.)  $\gamma$  dozu belirlemişlerdir. Bu çalışmada ise, kaynaktan bir metre uzaklıkta hava daki toplam doz miktarı 0,553  $\mu$ Sv/sa. olarak bulunmuştur. Bulunan doz miktarı, hava taşımacılığında, örneğin San Francisco- New York arası yolculukta alınan doz miktarı (25,4  $\mu$ Sv) ile kıyaslanırsa yaklaşık 46 saat ışınlama süresine, askeri operasyonlarda, fakirleştirilmiş uranyum (Depleted Uranium) cephanesi ile yüklü bir tank sürücüsünün aldığı doz miktarı (3,3  $\mu$ Sv/s) ile kıyaslanırsa operasyon saati başına yaklaşık 6 saat ışınlama süresine karşılık gelmektedir. (Bamberger vd, 2004; Drucker, 2002)

Bu sonuçlar doğrultusunda böyle bir deteksiyon sistemi için %3 bor katkılı parafin zırhın kullanımı iyi bir seçim olmaktadır. Zırh malzemesi seçildikten sonra, zırh yüksekliğinin belirlenmesi için de hesaplamalar yapılmıştır. MCNP simulasyon sonuçlarına göre zırhın 28x30x10 cm boyutlarında kullanımının uygun olacağı saptanmıştır.

Tasarlanan deteksiyon sisteminin patlayıcının bulunduğu ortama, patlayıcının derinliğine, boyutuna ve diğer malzemelerden ayırt edilip edilmediğine göre duyarlılığıda araştırılmıştır. Ayrıca, patlayıcının bulunduğu ortamdaki nem miktarının patlayıcının deteksiyonuna ne gibi sınırlamalar getirdiği de incelenmiştir.

Patlayıcının bulunduğu derinlikle ilgili yapılan siműlasyonlar sonucunda, NBS tekniği ile, 7 cm çapında 2 cm yüksekliğinde 1,65 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğuna sahip TNT mayının kireçtaşı içerisinde 15 cm ye kadar net bir şekilde belirlenebileği, ayrıca, 15-20 cm aralığında güvenilir olmasa da fark edilebileceği tesbit edilmiştir. Aynı mayın için, toprak ortamında yapılan siműlasyonların sonucuna göre ise; patlayıcının 12,5 cm derinliğe kadar net bir şekilde belirlenebileceği ve 12,5 -20 cm derinlik aralığı içinde güvenilir olmasada fark edilebileceği tesbit edilmiştir. yani, her iki ortam içindeki TNT nin operatör ve deteksiyon sistemine zararlı olabileceği 5 cm derinliğe kadar oldukça net bir biçimde fark edilebileceği de bulunmuştur. NBS tekniği ile mayın deteksiyonu ancak nötron akısındaki değişimin fark edilebilir olması ile mümkün olduğundan, mayının belirlenebileceği maksimum derinlik, onun boyutuna ve nötron kaynağının şiddetine bağlıdır. Yapılan simulasyonlarda kaynak şiddeti sabit tutularak, dűřük yoğunluğa sahip küçük kűtleli ve boyutlu TNT mayını için

maksimum derinlik araştırılmıştır. Bu nedenle daha büyük boyutlu patlayıcıların daha derinlerde de gözlenebilmesi mümkün olacaktır. Ayrıca, çok çok küçük kütleli ve 1,5 cm yarıçapına sahip mayınların dahi 5 cm derinlikte gözlenebildiği görülmüştür.

Nötron geri saçılma yöntemi ile mayın deteksiyonu tekniğinin ortamdaki nem miktarına bağlı olması nedeniyle şimdiye kadar yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu Mısır ve Orta Doğu ülkeleri gibi kurak bölgeler baz alınarak kum ortamında gerçekleştirilmiştir.

Son zamanlardaki literatürden sağlanan verilerle karşılaştırıldığında, bu tez çalışmasında kullanılan kireçtaşı ve toprak içerisine yerleştirilen minimum boyutlara sahip bir plastik mayının NBS yöntemiyle belirlenen maksimum derinlik değerleri oldukça iyi gözükmektedir.

NaI detektörlerinde, kireç taşı içerisinde gömülü TNT den gelen, azota ait 10,83 MeV enerjili gamalarının 1 saniyelik sayım süresinde 10 cm ye kadar fark edilebileceği de görülmüştür. Dolayısıyla, kireçtaşı ortamında, 1 saniyelik alan taramasında, BF<sub>3</sub> detektörlerinde ve NaI detektörlerinde eşzamanlı olarak 10 cm derinliğe kadar TNT nin varlığının tesbit edilmesi mümkün gözükmektedir.

Toprak ortamında ise 1 s ölçüm süresinde azotun 10,83 MeV enerjili gamalarının gözlenmesi mümkün olmamıştır. Azotun bu enerjideki gamaları ancak 100 s lik ölçüm sonunda gözlenebilmiştir. Bu nedenle, kuru toprak ortamında, NaI detektörleri ile uzun süreli ölçüm alınması yoluyla, daha önceden NBS tekniği kullanılarak BF<sub>3</sub> detektörleri ile tesbit edilmiş olan mayının varlığının doğrulanması yapılabilir.

Bu çalışmada, 10 µg kütleli <sup>252</sup>Cf nötron kaynağı kullanılarak, 5cm derinlikteki 23,53 g azot kütleli mayının deteksiyonu 100 s de mümkün olmuştur. Bu sonuçlar doğrultusunda, ölçüm süresinin daha da arttırılması ile daha derinlerdeki bir mayının deteksiyonu mümkün gözükmektedir.

Patlayıcının diğer malzemelerden ayırt edilip edilemediğiyle ilgili yapılan simülasyonların sonucunda, NBS tekniği ile, TNT nin bulunduğu kireçtaşı ortamından geri saçılan nötronların BF<sub>3</sub> detektörlerinde enerjiye bağlı değişimi incelendiğinde, düşük enerjili nötron bölgesinde ortamda mayın olmadığı duruma ve birbirlerine göre fark edilir bir akı değişimi gösterdikleri belirlenmiştir. Deteksiyon sisteminin ayırt ediciliğinin doğrulanması için, kireçtaşı ve toprak ortamlarında deteksiyon sisteminin hareket ettirilmesi ile BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akısının, mayının merkezinden olan uzaklığına bağlı değişimi 1s lik sayım süresi içerisinde incelenmiş ve deteksiyon sisteminin 5 cm derinlikte bulunan malzemeleri bile ayırt edebildiği

görülmüştür. Deteksiyon sisteminin, şüpheli cismin merkez ekseninde olduğu konumunda elde edilen sonuçların TNT için elde edilen nötron akısına oranları, bu malzemelerin yoğunluk ve içerdikleri hidrojen miktarı ile orantılı olduğu bulunmuştur. Literatür değerleri ile karşılaştırıldığında kireçtaşı ortamında daha önce ayırt edilemediği bildirilen tahta örneğinin, bu tez çalışmasında TNT den ayırt edilmesi mümkün olmuştur (Maucec vd., 2002). Toprak ortamında da bu malzemeler gayet net ayırt edilebildiği gibi, ayrıca, elde edilen oranlar kireçtaşı ortamından daha iyi ve gerçek değerlerine çok daha yakın olarak belirlenmiştir.

NaI detektörleri ile 1 saniyelik sayım süresinde elde edilen spektrumlara bakıldığında ise, kireçtaşı ortamında 2,223 MeV enerjili gama sayımlarının malzemelerin içerdikleri hidrojen miktarları ile orantılı olarak değiştiği ve sadece patlayıcılarda bulunan azotun detekte edilebilmesi ile de zararsız cisimlerden ayırt edilebildiği görülmüştür. Böylece kireçtaşı ortamında mayının varlığının BF<sub>3</sub> detektörleri ve NaI detektörleri ile aynı anda belirlenebileceği ve diğer cisimlerden ayırt edilebileceği bulunmuştur.

10 µg kütleli <sup>252</sup>Cf kaynağı ile bütünleştirilmiş deteksiyon sisteminde, kaynak- TNT merkezi arası uzaklık ± 20 cm aralığı içerisinde bulunan mayınların deteksiyonu mümkün olmaktadır. Bu değer önemi, mayın deteksiyon sisteminde aynı anda 40 cm nin taranabilmesidir. Yani sistemin mayın tarama hızı 1,4 km/saat tir.

Kireçtaşı ortamında, mayının BF<sub>3</sub> ve NaI detektörlerindeki sayımlardaki artışın gözlenmesi ile eş zamanlı olarak detekte edilebileceği bulunmuştur. Ancak, ortamdaki nem miktarı arttırıldığında, NBS yöntemiyle mayının deteksiyonu %5 nem miktarında mümkün gözüküyorken, artan nem miktarıyla birlikte TNT ye ulaşan ısıl nötron sayısının artması nedeniyle ısıl nötron yakalama reaksiyonundan gelen yüksek enerjili gamaların sayısının arttığı belirlenmiştir. Böylece bu kritik nem değerinde NaI detektörlerinin mayın deteksiyonundaki verimliliğinin artması ile mayının detekte edilmesi mümkün olmaktadır. Özellikle %20 - 30 nem değeri arasında TNT den gelen gamaların sayısı oldukça artmaktadır. %5 nem değerinden sonra ise, kireçtaşı ortamındaki şüpheli cismin varlığı BF<sub>3</sub> detektörlerindeki nötron akısının geri-plan gürültüsü altına düşmesi ile belirlenirken aynı zamanda yüksek enerjili gamaların artışının gözlenmesi ile de belirlenmektedir.

Toprak ortamında da artan nem nedeniyle, yüksek enerjili gamaların sayısının %40 nem değerinde dahi artmaya devam ettiği gözlenmiştir. NBS yöntemiyle belirlenen %15 kritik nem değerinde, NaI detektörlerinde gözlenen yüksek enerjili gamaların sayısındaki artış ile

ortamda şüpheli cismin varlığı fark edilebilir.

NBS tekniğiyle bulunan kritik nem oranları için bu çalışmada bulunan literatürde verilenlerle karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Kireçtaşı ortamı için Maucec vd. (2002), bir  $^3\text{He}$  detektörü ve  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynağı kullanarak yaptıkları çalışmada %5 nem miktarında mayın deteksiyonun neredeyse imkansız olduğunu belirtirken, Ochbelagh vd. (2009), de Am-Be nötron kaynağı ve  $\text{BF}_3$  detektör kullanarak yaptıkları çalışmada toprak ortamı için bu kritik nem değerini %14 olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, Pazirandeh vd. (2006), Tahran daki toprak bileşimi için Am-Be nötron kaynağı ve  $\text{NaI(Tl)}$  detektörü kullanarak MCNP kodu ile yaptıkları simülasyonların sonucunda toprak ortamındaki %20-%22 nem miktarının mayın deteksiyonunu iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Son olarak, ısı nötron analizi (TNA) ve hızlı nötron analizi (FNA) yapılarak her iki ortam içerisinde 5 cm derinliğe gömülü bulunan TNT mayını için kütle analizi yapılmış ve stokiometrik oranlar hesaplanmıştır. 100 s ölçüm süresi için yapılan simülasyonların sonucunda elde edilen gama spektrumlarındaki karakteristik gama ışınlarına karşılık gelen sayım değerleri kullanılarak belirlenen oranların gerçek değerlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, ortam içerisinde bulunan ve mayın gibi algılanabilecek diğer cisimler azot içermediklerinden, elde edilen bu oran değerleri şüpheli cismin patlayıcı olduğunun kesin olarak söylenmesine yeterlidir. Bu nedenle, malzemenin kimyasal formülünün kesin olarak belirlenmesi gerekli görülmemektedir.

Sonuç olarak, iki ayrı ölçüm sistemini içerecek şekilde tasarlanan böyle bir mayın detektör sisteminin, “topuk mayını” denilen yerin ancak 5 cm altına kadar aktive olan patlayıcıların (APM) tespitinde yeterince hızlı ve belirleyici olabileceği, gerçeğe yakın koşullarda yapılan simülasyonlarla bu tezde gösterilmiştir. Böyle bir sistemin, bir operatörün kullandığı veya uzaktan kumanda edilebilen operatörsüz uygun tasarlanmış bir taşıyıcı araca yerleştirilmesi halinde bir saat içerisinde yaklaşık 1,44 km lik bir yolu tarayabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, bu sistemin, daha derine gömülmüş büyük kütleli patlayıcıların (tank mayını vd.) tespitinde de, gömülü oldukları ortamdaki nem yüksek olsa bile, ortamda nötronlarla indüklenmiş gama ışınlarını ölçerek başarılı olabileceği gösterilmiştir.

**KAYNAKLAR**

- Bamberger, J.A., Craig, R.A., Colgan, T.Y., Peurrung, A.J., Schmitt, B.E. ve Stromswold, D.C., (2003), "Timed-neutron detection for land mines", Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE ; 2:1336-1340
- Barbui, M., Giangrandi S., Fioretto, E., Cinausero M., Prete G., Nebbia G. ve Viesti G., "Development of a neutron back-scattering sensor for the detection of land mines", (2001), LNL- Annual Report, LNL-INFN(Rep), 178: 164-165.
- Briesmeister, J.F., (2000), "MCNP—A general monte carlo n-particle transport code, version 4C" , LA-13079-M , Los Alamos, USA.
- Bom, V.R., van Eijk, W.E. ve Ali, A.M., (2006), "Landmine detection with neutron back scattering imaging using neutron generator", IEEE Trans. Nucl. Sci.,53(1):356-360.
- Bom, V.R., van Eijk, W.E., Ali, A.M., Osman, A:M., El-Monem,A.M.A., Kansouh, W.A. ve Megahid, R. M., (2006), "A feasibility test of land mine dedection in a desert environment using neutron back scattering imaging", IEEE Trans. Nucl. Sci., 53(4):2247-2251.
- Bom,V.R., Osman, A:M. ve Monem, A.M.A. (2008), "A novel scanning land mine detector based on the technique neutron back scattering imaging", IEEE Trans. Nucl. Sci.,55(2):741-747.
- Brooks, F.D., Buffler, A. ve Allie, M.S., (2001), "Landmine detectors based on neutron–hydrogen signatures" 2nd RCM on Nuclear Demining Techniques, 11-14 September 2001, St Petersburg.
- Brooks, F.D., Buffler, A. ve Allie, M.S.,(2004), "Detection of anti-personnel landmines using neutrons and gamma-rays", Radiation Physics and Chemistry, 71:749–757.
- Bruschini, C., (2001), "Commercial systems for the direct detection of explosives (for explosive ordnance disposal tasks)", ExploStudy, Final Report.
- Buffler, A., (2001), "Contraband detection by fast neutron scattering", 2nd National Nuclear Technology Conference, NAC, 13-15 May 2001, South Africa.
- Choi, H.D., Firestone, R.B., Lindstrom, R.M., Molnar, G.L., Mughabghab, S.F., Corcuera, R. P., Revay, Z., Trkov, A. ve Zhou, C.M., (2006) "Database of Prompt Gamma Rays from Slow Neutron Capture for Elemental Analysis", Final Report of a Coordinated Research Project, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Clifford, E.T.H., McFee, J.E., Ing, H., Andrews, H.R., Tennant, D., Harper, E. ve Faust, A.A., (2007), "A militarily fielded thermal neutron activation sensor for landmine detection", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 579 :418–425.
- Datema, C., Bom, V.R. ve van Eijk, W.E., (2002), "Experimental results and Monte Carlo simulations of a landmine localization device using the neutron backscattering method", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A , 488: 441–450.
- Datema,C.P., Bom, V.R. ve van Eijk, W.E., "Landmine detection with the neutron backscattering method", (2001a), IEEE Trans. Nucl. Sci., 48(4):1087-1091.
- Datema, C.P., van der Schoor, L.A., Bom, V.R. ve van Eijk, C.W.E., (2001b), "A portable landmine detector based on the combination of electromagnetic induction and neutron backscattering" Proceedings of the IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging



Conference, November 2001, San Diego, USA

Davis, T.L., (1972), "The Chemistry of Powder and Explosives", Angrif Press, California.

Debertin, K. ve Helmer, R.G., (1988), "Gamma and x-ray spectrometry with semiconductor detectors" Elsevier Science Publishers B.V., Netherlands

Drucker, J., (2002), "Radiation in the skies", Wall Street Journal, March, 29

Fowler, I. L. , (1963), "Very large boron trifluoride proportional counters" The Review of Scientific Instruments, 34: 731.

Garroway, A.N.; Buess, M.L., Miller, J.B.; Suits, B.H., Hibbs, A.D., Barrall, G.A., Matthews, R. ve Burnett, L.J., (2001), "Remote sensing by nuclear quadrupole resonance" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(6):1108 – 1118.

Hussein, EM.A. ve Waller, E.J., (2000), "Landmine detection: the problem and the challenge" , Applied Radiation and isotopes, 53:557-563.

Hussein, E.M.A., Desrosiers, M. ve Waller E.J., (2005), "On the use of radiation scattering for the detection of landmines", Radiation Physics and Chemistry 73 :7–19.

Kiraly, B., Olah, L. ve Csikai, J., (2001), "Neutron-based techniques for detection of explosives and drugs", Radiation Physics and Chemistry 61:781–784

Knoll, G. F. , (2000), " Radiation detection and measurement", 3rd ed., Wiley, New York.

Korff, S. A. ve Danforth, W. E., (1939), "Neutron measurements with boron trifluoride counters," Physical Review, 55: 980.

Krane S.K., (1987), "Introductory nuclear physics", John Willey&Sons, USA.

Kuznetsov, A.V., Averianov, V.P., Evsenin, A.V., Gorshkov, I.Yu., Osetrov, O.I. ve Vakhtin, D.N., (2003), "Portable multisensor for detection and identification of explosive substances", EUDEM2-SCOT-2003, International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, 15-18 September 2003, Brussels, Belgium.

Kuznetsov, A.V., Evsenin, A.V., Gorshkov, I.Yu., Osetrov, O.I. ve Vakhtin, D.N., (2004), "Detection of buried explosives using portable neutron sources with nanosecond timing" , Applied Radiation and Isotopes, 61 : 51–57

MacDonald, J., Lockwood, J.R., McFee, J.E., Altschuler, T., Broach, T., Carin, L., Harmon, R., Rappaport, C., Scott, W. ve Weaver, R., (2003), " Alternatives for landmine detection", (Technical Report MR-1608-OSTP (ISBN 0-8330-3301-8)), RAND Science and Technology Policy Institute for White House Office of Science and Technology Policy (OSTP).

Maucec, M. ve Meijer, R.J., (2002), "Monte Carlo simulations as a feasibility tool for non-metallic land-mine detection by thermal-neutron backscattering", Applied Radiation and Isotopes, 56:837–846.

Monin, L. ve Gallimore, A., (2002), "The Devil's Gardens—A History of Landmines", Pimlico, London.

Obhodas, J. , Sudac, D. Nad, K., Valkovic, V. Nebbia, G. ve Viesti, G., (2004) "The soil

moisture and its relevance to the landmine detection by neutron backscattering technique”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 213: 445–451.

Ochbelagh, D.R., Hakimabad, H.M. ve Najafabadi, R.I., (2007) “The investigation of Am–Be neutron source shield effect used on landmine detection”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 577:756–761.

Ochbelagh, D.R., Hakimabad, H.M. ve Najafabadi, R.I., (2009), “ The soil moisture and its effect on the detection of buried hydrogenous material by neutron backscattering technique”, Radiation Physics and Chemistry, 78:303-306.

Pazirandeh, A., Azizi, M. ve Masoudi, S.F.,(2006), “Monte Carlo assessment of soil moisture effect on high-energythermal neutron capture gamma-rayby  $^{14}\text{N}$ ”, Applied Radiation and Isotopes, 64:1–6.

Takahashi, Y., Misawa, T., ho Pyeon, C., Shiroya, S., Yoshikawa,K., Masuda, K. ve Takamatsu, T., (2006), “ Development of landmine detection system using scintillators by measuring radiations from landmine”, IEEE Nuclear Science Symposium Conference record, 29 October – 4 November 2006, San Diego, USA

Tsoufanidis, N., (1995), “ Measurements and detection of radiation”, Taylor&Frances, USA.

Watt,B.E., (1952), “Energy spectrum of neutrons from thermal fission of  $\text{U}^{235}$ ”, Phys. Rev., 87: 1037–1041

Yoshikawa,K., Masuda, K., Takamatsu, T., Shiroya, S., Misawa, T., Hotta, E., Ohnishi, M., Yamauchi, K., Osawa, H. ve Takahashi, Y., (2007), “Research and development of a compact discharge-driven D–D fusion neutron source for explosive detection”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 261:299–302.

## **İNTERNET KAYNAKLARI**

[1] <http://www.nndc.bnl.gov/capgam/>

**EKLER**

- Ek 1 Soğurulan nötronlar için kalite faktörü
- Ek 2 Kireçtaşı ortamı içerisine yerleştirilmiş TNT için stokiyometrik hesaplamalarda kullanılan gama spektrumları
- Ek 3 Toprak ortamı içerisine yerleştirilmiş TNT için stokiyometrik hesaplamalarda kullanılan gama spektrumları

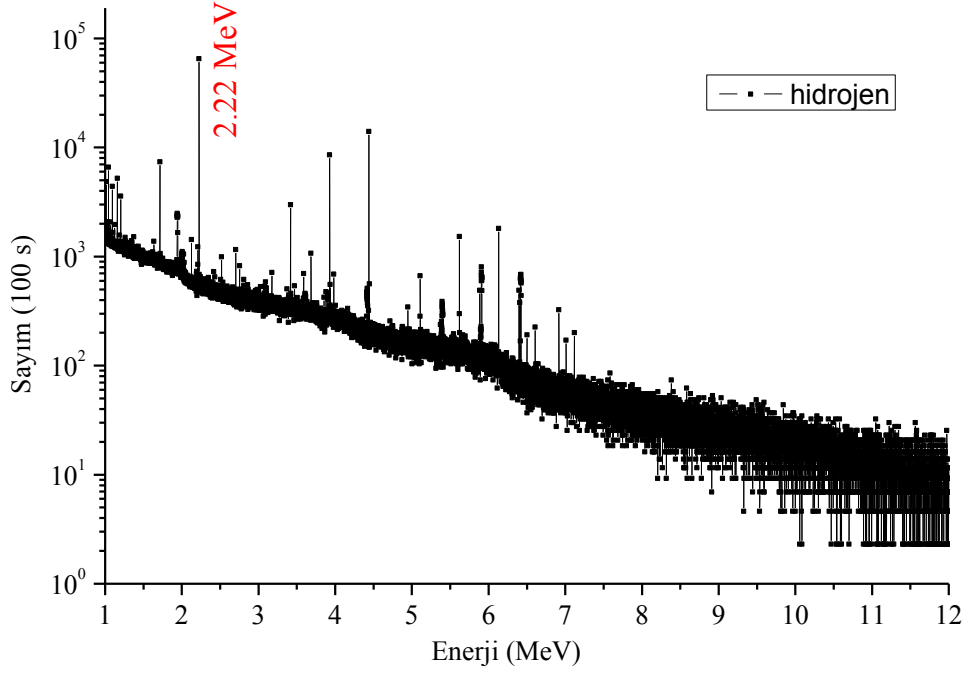
### Ek 1 Soğurulan Nötronlar için Kalite Faktörü

NCRP-38,ANSI/ANS-6.1.1-1977 ve \*ICRP-21 den elde edilen soğurulan nötronlar için kalite faktörleri aşağıdaki çizelgede listelenmiştir (Briesmeister, (2000)).

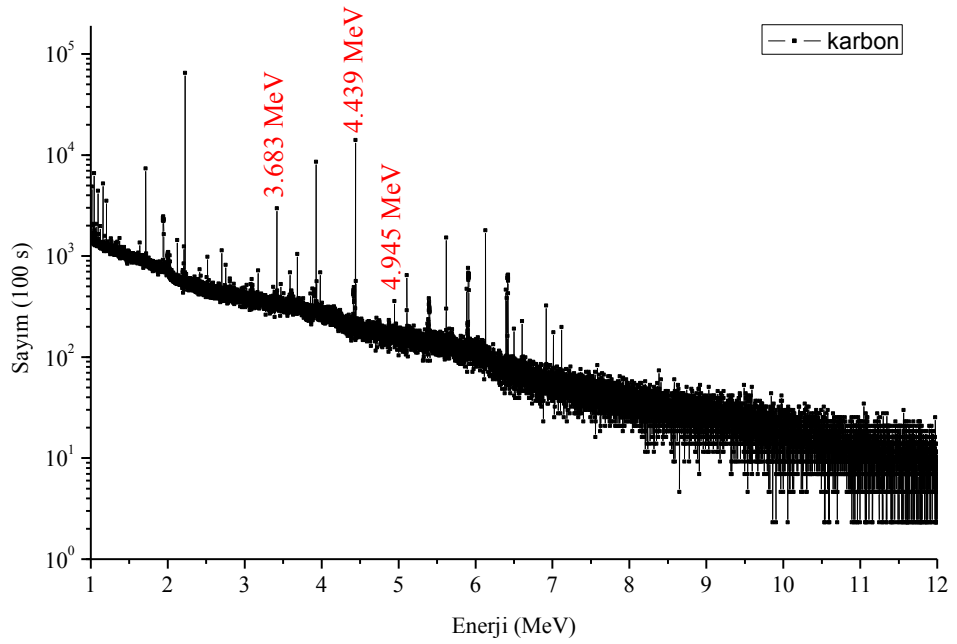
Çizelge Ek.1.1 Soğurulan nötronlar için kalite faktörü

Nötron Enerji (MeV)	Kalite Faktörü
2.5E-08	2
1.0E-07	2
1.0E-06	2
1.0E-05	2
1.0E-04	2
1.0E-03	2
1.0E-02	2.5
1.0E-01	7.5
5.0E-01	11
1.0	11
2.0	9.3*
2.5	9
5.0	8
7.0	7
10.0	6.5
14.0	7.5
20.0	8

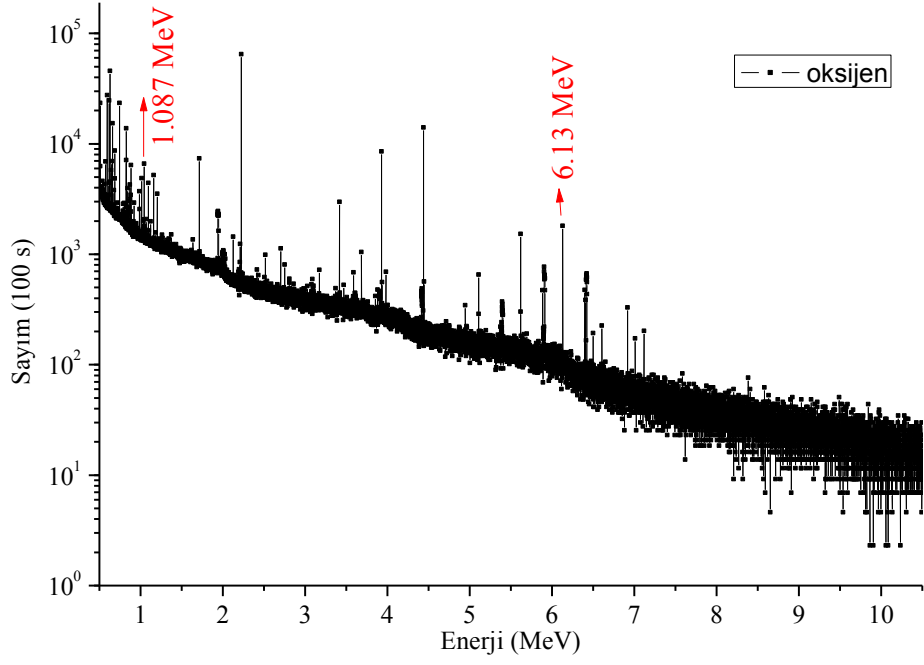
**Ek 2 Kireçtaşı ortamı içerisine yerleştirilmiş TNT için stokiyometrik hesaplamalarda kullanılan gama spektrumları**



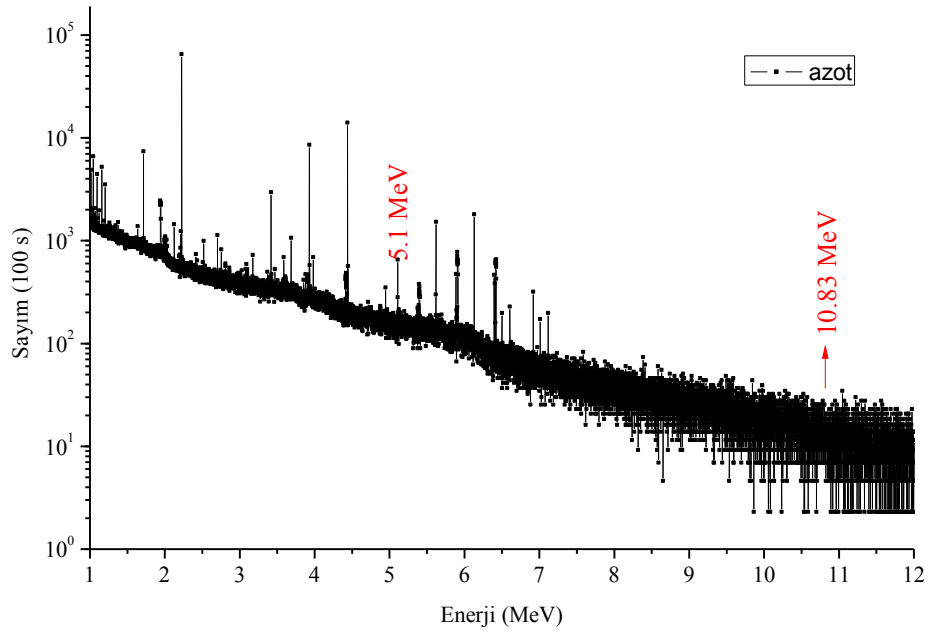
Şekil Ek 2.1 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş hidrojen için gama spektrumu



Şekil Ek 2.2 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş karbon için gama spektrumu

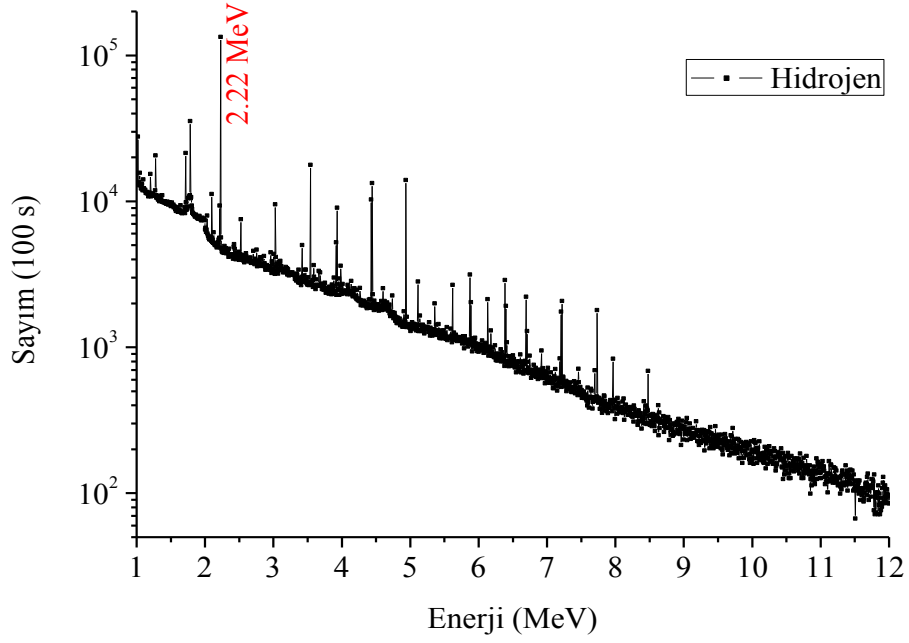


Şekil Ek 2.3 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş oksijen için gama spektrumu

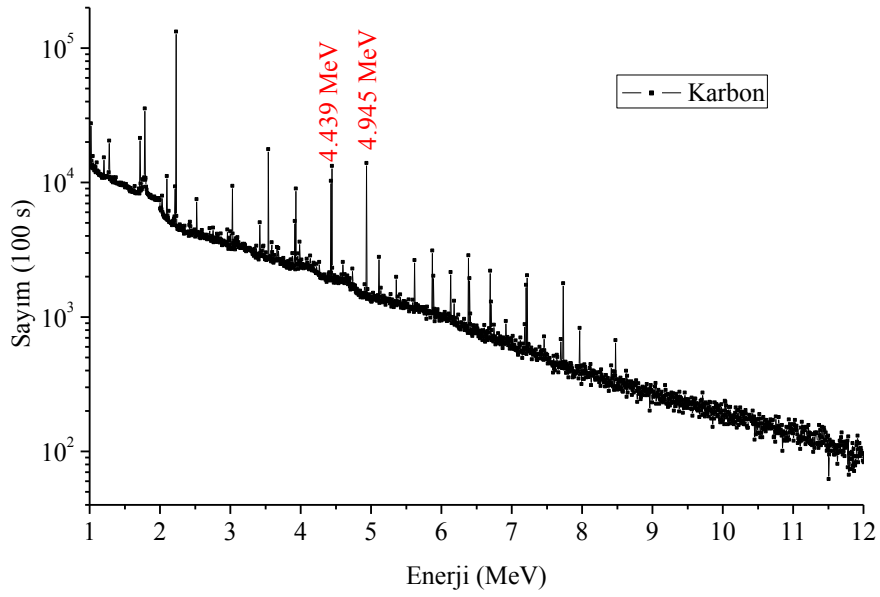


Şekil Ek 2.4 Kireçtaşı ortamına yerleştirilmiş azot için gama spektrumu

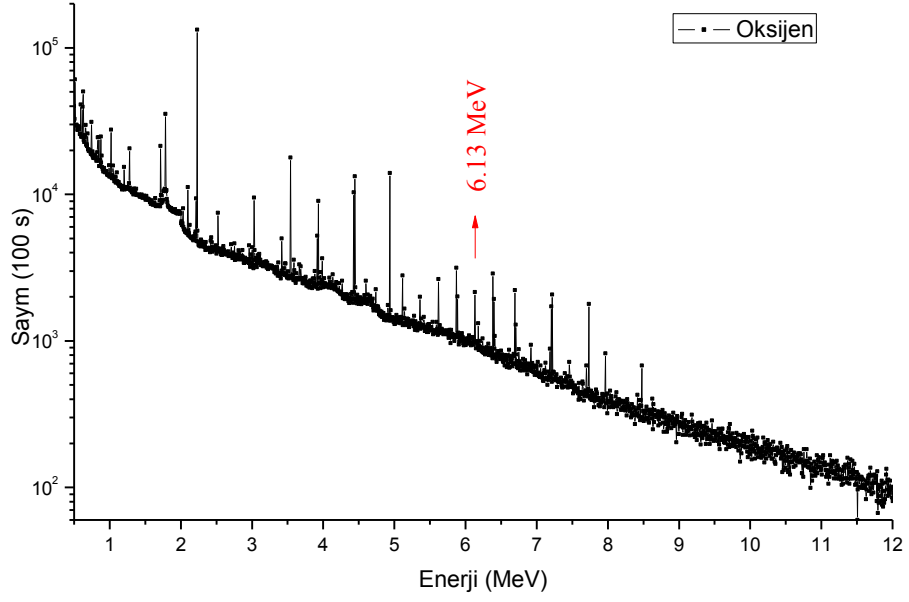
**Ek 3 Toprak ortamı içerisinde yerleştirilmiş TNT için stokiyometrik hesaplamalarda kullanılan gama spektrumları**



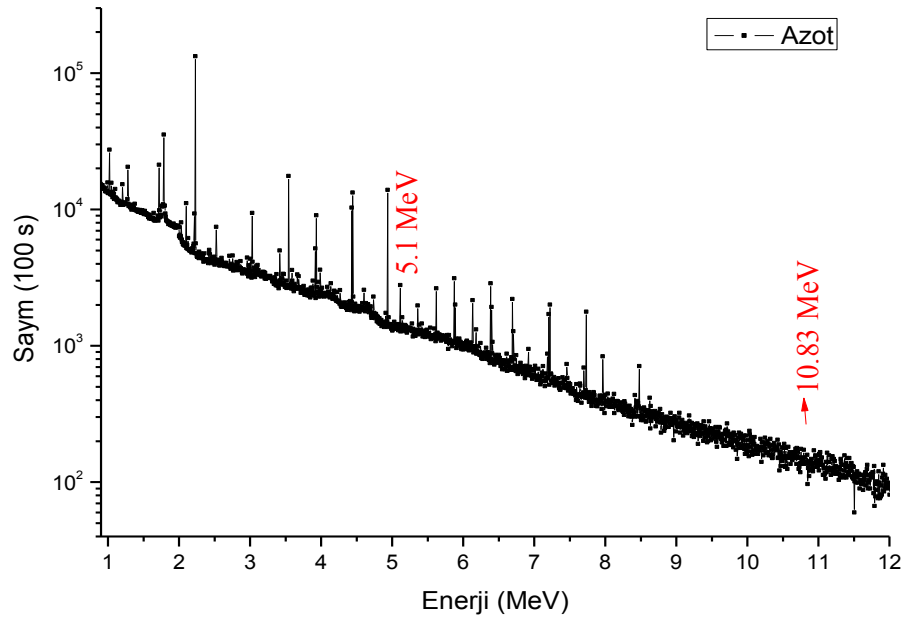
Şekil Ek 3.1 Toprak ortamına yerleştirilmiş hidrojen için gama spektrumu



Şekil Ek 3.2 Toprak ortamına yerleştirilmiş karbon için gama spektrumu



Şekil Ek 3.3 Toprak ortamına yerleştirilmiş oksijen için gama spektrumu



Şekil Ek 3.4 Toprak ortamına yerleştirilmiş azot için gama spektrumu



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 04.03.1975

Doğum yeri İstanbul

Lise 1989-1992 Yeşilköy 50. Yıl Lisesi

Lisans 1993-1999 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı

Yüksek Lisans 2000-2003 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı

Doktora 2003-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı

**Çalıştığı kurum**

2000-Devam ediyor YTÜ Fen-Ed Fak. Fizik Bölümü Araştırma Görevlisi