

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BİR NÖTRON JENERATÖRÜNÜN ÇOKLU FOLYO ANALİZİ İLE  
NÖTRONİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ayşe KARAKAYA**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

**HAZİRAN 2023**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BİR NÖTRON JENERATÖRÜNÜN ÇOKLU FOLYO ANALİZİ İLE  
NÖTRONİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ayşe KARAKAYA  
(302201002)**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN**

**HAZİRAN 2023**



**ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL**

**DETERMINATION OF THE NEUTRONIC PROPERTIES OF A NEUTRON  
GENERATOR BY MULTIPLE FOIL ANALYSIS METHOD**



**M.Sc. THESIS**

**Ayşe KARAKAYA  
(302201002)**

**Nuclear Researches Division**

**Radiation Science and Technology Programme**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN**

**JUNE 2023**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 302201002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ayşe KARAKAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİR NÖTRON JENERATÖRÜNÜN ÇOKLU FOLYO ANALİZİ İLE NÖTRONİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Cenap Ş. ÖZBEN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Özgür DELİCE** .....  
Marmara Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **05 Haziran 2023**  
**Savunma Tarihi** : **16 Haziran 2023**





*Anneme...*



## ÖNSÖZ

Zaman zaman çok zorlandığım ancak daha çok keyif aldığım yüksek lisans tezimi bitirmenin heyecanını ve gururunu taşıyorum. Bu bölümde benden desteklerini ve yardımlarını esirgememiş kişilere teşekkür etmek istiyorum.

İlk olarak tez danışmanım sayın Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN'a programa ilk başladığım günden tezimin sonuna kadar verdiği bütün desteklerden, her zaman anlayış gösterdiği için çok teşekkür ederim.

Ayrıca Nükleer araştırmalar anabilim dalı Arş. Gör. Onur ERBAY'a yine tezimin en başından bitirme aşamasına kadar her zaman yardımcı olduğu, bu süreçte motivasyonumun düştüğü dönemlerde de hep destek olduğu, ve emekleri için teşekkür etmek istiyorum.

Merakımın peşinden giderek bu programı bitirebildiğim için kendimi de tebrik etmek istiyorum.

Son olarak hayatımın her anında her zaman ve her koşulda yanımda olan ve beni hep cesaretlendiren canım annem Aysun YALÇIN'a, bu yolda yürürken kolaylık sağlayıp, destek veren yöneticilerim ve çalışma arkadaşlarıma, yanımda olan arkadaşlarıma, benimle beraber olan herkese teşekkür ederim, sizsiz olmazdı.

Mayıs 2023

Ayşe KARAKAYA  
(Makine Mühendisi)



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|  |          |
|--|----------|
| ÖNSÖZ.....                                       | ix       |
| İÇİNDEKİLER .....                                | xi       |
| SEMBOLLER .....                                  | xiii     |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                             | xv       |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                               | xvii     |
| ÖZET.....  | xix      |
| SUMMARY .....                                    | xxi      |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                            | <b>1</b> |
| 1.1 Tezin Amacı .....                            | 2        |
| 1.2 Literatür Araştırması .....                  | 2        |
| <b>2. TEORİ.....</b>                             | <b>5</b> |
| 2.1 Radyasyon .....                              | 5        |
| 2.1.1 İyonize eden radyasyon.....                | 5        |
| 2.1.1.1 Alfa parçacığı .....                     | 6        |
| 2.1.1.2 Beta parçacığı.....                      | 6        |
| 2.1.1.3 X ve Gama ışınları .....                 | 6        |
| 2.2 Fotonların Madde ile Etkileşimi.....         | 6        |
| 2.2.1 Fotoelektrik olay .....                    | 6        |
| 2.2.2 Compton saçılması.....                     | 7        |
| 2.2.3 Çift oluşum.....                           | 8        |
| 2.3 Nötron Parçacığı.....                        | 8        |
| 2.4 Nötron Reaksiyonları .....                   | 8        |
| 2.4.1 Filyon reaksiyonu .....                    | 9        |
| 2.4.2 Elastik saçılma .....                      | 9        |
| 2.4.3 İnelastik saçılma.....                     | 10       |
| 2.4.4 Nötron yakalama (Nötron soğurulması) ..... | 10       |
| 2.4.4.1 Işımalı kapma .....                      | 11       |
| 2.4.4.2 Yüklü parçacık emisyonu.....             | 11       |
| 2.4.4.3 Nötron çoğalması (n,2n) .....            | 11       |
| 2.4.5 Nükleer parçalanma .....                   | 12       |
| 2.4.6 İkincil reaksiyonlar .....                 | 12       |
| 2.5 Reaksiyon Q Değeri .....                     | 12       |
| 2.6 Reaksiyon Tesir Kesiti .....                 | 13       |
| 2.7 Nötron Aktivasyon Analizi .....              | 13       |
| 2.8 Nötron Kaynakları.....                       | 15       |
| 2.8.1 Kendiliğinden filyon.....                  | 15       |
| 2.8.2 Foto nötron kaynakları .....               | 15       |
| 2.8.3 Nükleer reaktörler .....                   | 16       |
| 2.8.4 Nötron jeneratörleri.....                  | 16       |
| 2.9 Radyasyon Dedektörleri .....                 | 17       |
| 2.9.1 Gaz dolgulu dedektörler .....              | 17       |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.9.1.1 İyon odaları .....                 | 17        |
| 2.9.1.2 Orantılı sayıcılar .....           | 17        |
| 2.9.1.3 Geiger-Müller .....                | 18        |
| 2.9.2 Sintilatör detektörleri.....         | 18        |
| 2.9.3 Yarı iletken detektörler.....        | 18        |
| <b>3. DENEY .....</b>                      | <b>19</b> |
| 3.1 Deney Metodolojisi ve Ekipmanlar ..... | 19        |
| 3.2 Data Analizi.....                      | 26        |
| 3.3 Gamma Işını Spektrum Analizi .....     | 29        |
| 3.3.1 Alüminyum.....                       | 29        |
| 3.3.2 Zirkonyum.....                       | 30        |
| 3.3.3 Neobyum .....                        | 30        |
| 3.4 Ortalama Nötron Enerjisi Hesabı .....  | 31        |
| 3.5 Ortalama Nötron Akısı Hesabı .....     | 32        |
| <b>4. SONUÇ VE TARTIŞMA.....</b>           | <b>33</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                      | <b>35</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                       | <b>37</b> |

## SEMBOLLER

|                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| <b>A</b>               | : aktivite (Bq),              |
| <b>A</b>               | : atomik ağırlık (g/mol),     |
| <b>C</b>               | : konsantrasyonu,             |
| <b>F</b>               | : gama ışını şiddeti,         |
| <b>G</b>               | : elementin kütlesi (gr),     |
| <b>H</b>               | : bolluğu,                    |
| <b>H</b>               | : izotopik bolluk,            |
| <b>LT</b>              | : canlı süre (sn),            |
| <b>M<sub>a</sub></b>   | : Gelen Parçacık kütlesi,     |
| <b>M<sub>b</sub></b>   | : Çıkan parçacık kütlesini    |
| <b>M<sub>x</sub></b>   | : Hedef çekirdek kütlesi,     |
| <b>M<sub>y</sub></b>   | : Çıkan ürün çekirdek kütlesi |
| <b>N</b>               | : Avogadro sayısı,            |
| <b>N, P</b>            | : pik altındaki net alan,     |
| <b>T<sub>1/2</sub></b> | : yarı Ömür,                  |
| <b>T<sub>c</sub></b>   | : soğuma süresi,              |
| <b>T<sub>i</sub></b>   | : ışınlanma süresi,           |
| <b>T<sub>m</sub></b>   | : ölçüm süresi.               |
| <b>TT</b>              | : gerçek süre (sn),           |
| <b>V</b>               | : frekans                     |
| <b>ε</b>               | : verim,                      |
| <b>Φ</b>               | : bağlanma enerjisi           |
| <b>σ</b>               | : tesir kesiti,               |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Çizelge 2.1 : Nötron ve diğer parçacıkların ağırlıkları . . . . .  | 8  |
| Çizelge 2.2 : U-235 elementinin fisyonun ortalama enerji dağılımı . . . . .  | 9  |
| Çizelge 2.3 : Nötron jeneratöründe kullanılan reaksiyonlar . . . . .   | 16 |
| Çizelge 3.1 : D-T reaksiyonunun bazı özellikleri. . . . .  | 19 |
| Çizelge 3.2 : Al, Zr ve Nb elementlerinin hızlı nötronlar ile reaksiyonları. . . . .                               | 20 |
| Çizelge 3.3 : Işınlanan numunelerin özellikleri. . . . .   | 21 |
| Çizelge 3.4 : $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89}\text{Zr}$ nötron enerjisi ve nötron reaksiyonu tesir kesiti. . . . .      | 21 |
| Çizelge 3.5 : $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ nötron enerjisi-nötron reaksiyonu tesir kesiti. . . . .        | 22 |
| Çizelge 3.6 : $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ nötron enerjisi ve nötron reaksiyonu tesir kesiti. . . . . | 23 |
| Çizelge 3.7 : Numunelerin sayım ve ışınlanma süreleri. . . . .   | 26 |
| Çizelge 3.8 : Canberra dedektörü verim eğrisi parametreleri. . . . .   | 27 |
| Çizelge 3.9 : Ortec dedektörü verim eğrisi parametreleri. . . . .  | 27 |
| Çizelge 3.10 : Işınlanma reaksiyonlarının pik altındaki alanları. . . . .  | 29 |
| Çizelge 3.11 : R denklemi parametreleri. . . . .   | 31 |
| Çizelge 3.12 : Nötron akısı denklemi parametreleri. . . . .  | 32 |



## ŞEKİL LİSTESİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 2.1 : Fotoelektrik olay.....  | 7            |
| Şekil 2.2 : Compton saçılması.....  | 7            |
| Şekil 2.3 : Elastik saçılma.....  | 10           |
| Şekil 2.4 : İnelastik saçılma.....  | 10           |
| Şekil 2.5 : Nötron reaksiyonları.....   | 14           |
| Şekil 2.6 : Sintilatör dedektörü.....   | 18           |
| Şekil 3.1 : Işınlanan numune kitleri.....   | 20           |
| Şekil 3.2 : Nötron enerjisi $^{90}\text{Zr}$ (n,2n) $^{89}\text{Zr}$ tesir kesiti grafiği.....  | 21           |
| Şekil 3.3 : Nötron enerjisi $^{93}\text{Nb}$ (n,2n) $^{92\text{m}}\text{Nb}$ tesir kesiti grafiği.....  | 22           |
| Şekil 3.4 : $^{90}\text{Zr}$ (n,2n) $^{89}\text{Zr}$ ve $^{93}\text{Nb}$ (n,2n) $^{92\text{m}}\text{Nb}$ reaksiyonları tesir kesitleri oranı. ... | 23           |
| Şekil 3.5 : $^{27}\text{Al}$ (n, a) $^{24}\text{Na}$ tesir kesiti grafiği.....  | 24           |
| Şekil 3.6 : Numunelerin jeneratördeki konumu.....   | 24           |
| Şekil 3.7 : Deney düzeneği.....   | 25           |
| Şekil 3.8 : Saate bağlı nötron jeneratörü çıkış değerleri.....  | 25           |
| Şekil 3.9 : Canberra detektörü.....   | 26           |
| Şekil 3.10 : Ortec detektörü.....   | 27           |
| Şekil 3.11 : Canberra dedektörü verim eğrisi.....   | 28           |
| Şekil 3.12 : Ortec dedektörü verim eğrisi.....  | 28           |
| Şekil 3.13 : Alüminyum folyosu gama ışını spektrumu (Ortec dedektörü).....  | 29           |
| Şekil 3.14 : Nb ve Zr spektrumu (Canberra dedektörü).....   | 30           |



## BİR NÖTRON JENERATÖRÜNÜN NÖTRONİK ÖZELLİKLERİNİN ÇOKLU FOLYO ANALİZİ İLE BELİRLENMESİ

### ÖZET

Nötron parçacığı 1932 yılında James Chadwick tarafından bulunmuştur. Daha sonrasında 1934 yılında ise Frédéric Joliot ve Irène Curie tarafından, alüminyumun alfa parçacıklarıyla ışınlanması ile yapay radyoaktivite bulunmuştur. 1935 yılında nötron parçacığı ilk kez Enrico Fermi tarafından radyonüklit üretebilmek için kullanılmıştır. Aynı yıl içerisinde George de Hevesy ve Hilder Levy nadir toprak elementleri üzerinde nötronlar ile çalışmalar yapmış ve nötron aktivasyon analizinin temellerini oluşturmuştur. Bu gelişmelerle beraber nötronlar uzun yıllardır birçok alanda ve yöntemlerde kullanılmaktadır. Bu alanlardan başlıcaları tıp, jeoloji, tarım, endüstriyel uygulamalardır. Nötron uygulamalarında ki en önemli kısıt, ölçüm düzeneği, spektrum analizi veya numune hazırlanmasından ziyade doğru nötron kaynağına ulaşımıdır. Günümüzde nötronlar, nükleer reaktörler, nötron jeneratörleri, yüksek enerjili fotonlar veya radyoizotoplar kullanılarak elde edilebilmektedir. ThermoFisher MP320 nötron jeneratörü cihazı da hızlı nötron kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada İTÜ TRIGA Mark II reaktörü sınırlandırılmış sahasında kurulan deney düzeneğinde ThermoFisher marka MP320 model nötron jeneratörü cihazının ortalama nötron enerjisi ve nötron akısı deneysel olarak çoklu folyo analiz yöntemi ile belirlenmiş ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Nötron aktivasyon analizi, maddelerin içindeki elementleri tayin etmekte kullanılan analitik bir yöntemdir. Element çekirdeklerinin nötronu absorbe etmesi sonucu karakteristik gama ışını yayınlanmasını kullanarak element analizi yapılır. Nötron bombardımanına maruz bırakılan numune içindeki elementlerin çekirdekleri, nötron parçacığı ile reaksiyona girerek radyoaktif hale gelir ve yarılanma süreleri boyunca gama ışını radyasyonu yayınlamaya başlar. Bu yöntemin avantajları olarak; aynı anda birçok folyoya uygulanabilmesi, analiz edilen madde de tahribat meydana getirmemesi, teorik olarak basitliği, güvenilir sonuçlar vermesi, hızlı bir yöntem olması sayılabilir. Folyo tercihi yaparken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar mevcuttur. Bunlar, oluşacak nötron reaksiyonunu belirlemek, ürün elementin yarılanma ömrü, nötron reaksiyonu tesir kesiti değerinin yüksek hassasiyetle bilinmesi ve buna uygun deney düzeneğinin hazırlanması ve kullanılacak dedeksiyon sistemini belirlemektir. Ek olarak, çoklu folyo analizinde öncelikle folyolar nötronla ışınlanıp sonrasında gama ışını sayımı için dedektöre koyulup ölçüm alındığı için dolaylı bir metoddur.

Yapılan deneyde 3 adet folyo seti kullanılmıştır. Bu folyolar; Alüminyum, Neobyum ve Zirkonyum folyolarıdır. Folyolar 0,5” çaplı disk formundadır. Deney düzeneğinde nötron jeneratörü zeminden 1 m yukarıda konumlandırılmıştır. Folyolar jeneratörün içindeki Tritiyum katkılı Titanyum levhasının olduğu çizgiye konumlandırılmıştır. Üç folyoda aynı anda, 3 saat boyunca ışınlanmıştır. Nötron jeneratörü 70 kV-90  $\mu$ A akım şiddetine ayarlanmış ve ışınlama gerçekleştirilmiştir. Işınlama sırasında nötron

akısındaki dalgalanmayı izlemek için bir nötron dedektörü de jeneratörden 1 m uzaklıkta konumlandırılmıştır.

Işınlama bittikten sonra aktiflenmiş folyolar gama ışını radyasyonunu saymak için yüksek saflıklı germanyum dedektörlerin bulunduğu lablara götürülmüşlerdir. Zr ve Nb folyoları Canberra markalı gama ışını dedektöründe, Al folyosu ise Ortec markalı gama ışını dedektöründe sayılmışlardır.

Zr, Al ve Nb folyoları ışınlanırken  $^{90}\text{Zr}$  folyosu için  $^{90}\text{Zr} (n,2n) ^{89}\text{Zr}$  reaksiyonu,  $^{93}\text{Nb}$  folyosu için  $^{93}\text{Nb} (n,2n) ^{92m}\text{Nb}$  reaksiyonu,  $^{27}\text{Al}$  folyosu için  $^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$  reaksiyonu kullanılmıştır.

Folyolar sayım esnasında dedektörlerin merkezine aralık bırakmadan yerleştirilmiştir. Kullanılan dedektörlerin enerji kalibrasyonu ve verim kalibrasyon hesabı standart kaynaklar ile yapılmıştır. Kullanılan standart kaynaklar; Ba-133, Co-60, Cs-137, Am-241, Eu-152'dir.

Verim kalibrasyon hesaplamaları sonrası elde edilen datalar bir verim eğrisi oluşturulmak için kullanılmıştır. Verim eğrisi için OriginPro programı kullanılmıştır.

5 farklı radyoizotoptan toplamda 16 farklı enerjide gama ışını sayılmıştır. Verim hesaplaması sonrası çıkan sonuçlar kullanılarak bir verim eğrisi bulunmuş ve bu eğri kullanarak hesaplamalar yapılmıştır.

Alüminyum folyoları 3 saat boyunca ışınlanmış ve 26,57 saat boyunca sayılmışlardır. Alüminyum doğada %100 olarak  $^{27}\text{Al}$  formunda bulunur.  $^{27}\text{Al} (n,p) ^{27}\text{Mg}$  ( $T_{1/2} = 9.458$  dakika) reaksiyonundan 843,76/1014,52 keV pikleri ve  $^{27}\text{Al} (n,\alpha) ^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 14.997$  saat) reaksiyonundan 1368,626 keV pikleri yayınlanmış ve kullanılmıştır.

Zirkonyum folyoları 3 saat boyunca ışınlanmış ve 48 saat boyunca sayılmışlardır. 909,15 keV piki  $^{90}\text{Zr} (n,2n) ^{89}\text{Zr}$  ( $T_{1/2} = 78,41$  saat) reaksiyonundan yayınlanmış ve kullanılmıştır.  $^{90}\text{Zr} (n,2n)$  reaksiyonu ve 9 MeV üstünde yüksek tesir kesiti ve %51,45'lik doğal bolluğu ile D-T nötron aktivasyon analizi için uygun bir elementtir.

Neobyum folyoları 3 saat boyunca ışınlanmış ve 48 saat boyunca sayılmışlardır. 934,44 keV piki  $^{93}\text{Nb} (n,2n) ^{92m}\text{Nb}$  ( $T_{1/2} = 10,15$  gün) reaksiyonundan yayınlanmış ve kullanılmıştır.  $^{93}\text{Nb} (n,2n)$  reaksiyonu ve 9 MeV üstünde yüksek tesir kesiti ve %100'lük doğal bolluğu ile D-T nötron aktivasyon analizi için uygun bir elementtir.

Ortalama nötron enerjisini bulmak için kullanılacak denklemde bir R parametresi bulunmaktadır. R parametresi Zr ve Nb spektrum dataları R-denkleminde yerine konulduğunda 1,3629 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan R değeri, ortalama nötron enerjisini bulmak için kullanılan denkleme yerleştirildiğinde sonuç beklenen 14,20 MeV ile uyumlu şekilde 14,22 MeV olarak bulunmuştur.

Ortalama nötron akısını belirlemek için Alüminyum folyolarının gama ışını spektrumu kullanılmıştır. Bu datalar nötron akısını hesaplamak için kullanılacak denkleme yerleştirildiğinde ortalama nötron akısı  $6,7 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup> sn olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın en önemli özelliği ise bu jeneratör için ilk defa nötron akısı ve nötron enerjisi hesabının deneysel olarak yapılıyor olmasıdır. Ayrıca MP320 model endüstride de sıklıkla kullanılmasına rağmen literatürde hakkında çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma simülasyon verileri eklenerek daha da genişletilebilir. MeV bulunmuştur.

## **DETERMINATION OF THE NEUTRONIC PROPERTIES OF A NEUTRON GENERATOR BY MULTIPLE FOIL ANALYSIS METHOD**

### **SUMMARY**

Radiation is an energy form that can be explain as a flow in material or space as form of wave or particle of atomic or subatomic particles. Radiation can be divided into groups as ionization radiation or non-ionization radiation. Ionization radiation plucks an electron from atom. Gamma rays, X-rays are examples for ionization radiation. The energy of non-ionization radiation is not enough to pluck an electron from atom. Neutrons can go until nucleus but they cannot ionize the atom directly. They interact with the material and ionize the atom by alpha, beta or gamma rays.

Photons can react with material in three ways which are photoelectric effect, Compton scattering or pair production. In photoelectric effect; incoming photon collides to an electron and transfers all its energy to the electron and electron is seperated from orbit. Because of this energy change, atom emits characteristic X-rays. In Compton scattering; incoming photon collides to an electron, and electron and photon are scattered. There is no absorption in Compton scattering. Energy and momentum are not change. In pair production; if incoming photon's energy is more than 1,02 MeV, photon reacts with nucleus and makes pair production (electron-positron pair). The energy of incoming photon is shared equally by electron and positron. Pair production is an example for energy transform from material to energy.

Neutron particle is found in 1932, by James Chadwick. In 1934, Frédéric Joliot and Irène Curie found the unnatural radioactivity by irradiating the aluminum with alpha particles. Enrico Fermi used neutrons for the first time in 1935 for producing radionuclides in the same year George de Hevesy and Hilder Levi used neutron activation analysis firstly on rare earth elements. By this experiment, George De Hevesy and Hilde Levy found neutron activation analysis. The main importance of neutron activation analysis is seen in 1950-1960. The main restriction for neutron application is neutron production. Neutron production can be done by nuclear reactors, neutron generators, and high energy photons. Neutron generators have widely been used for neutron generation. They are most famous sources for fast neutrons. Thermofisher MP320 is also widely used for neutron production in industry. In this study, neutron activation analysis used to determine the average neutron flux and neutron yield of generator in İTÜ.

Neutron activation analysis is an analytical method for determining amount of the elements. It is based on activating the sample elements by bombarding with neutrons. The stable elements' nucleus absorbs the neutron and becomes unstable. As a result of this reaction element starts to emitting radiation. Neutron activation analysis can be divided into two groups as radiochemical neutron activation analysis and instrumental neutron activation analysis. In radiochemical activation analysis, sample has chemical changes and damage occurs. Instrumental activation analysis is a non-destructive analysis method. Multi-foil activation analysis' main advantages are easiness to

application to many samples, being non-destructive, being simple as theoretically, satisfying results and its fastness. Additionally there some points that must be considered while selecting foils such as determining neutron reaction and cross section of the reaction with high sensitivity, preparing proper experiment setup and determining proper detection system. Also, in multi foil activation analysis, foils firstly being irradiating with neutrons and then being counted for their gamma rays so this makes it an indirect method.

There are many types of radiation detectors. They can be divided into three groups as gas filled detectors, scintillation detectors and semi conductive detectors. Gas filled detectors' principle depends on determining radiation by measuring the ionization current. Gas filled detectors also can be divided into three groups as ionization rooms, Geiger-Müller and proportional counters, by their voltage difference between anode and cathode. Scintillation detectors are transmits visible light in accordance with the radiation they perceived. They can make energy separation and scintillators are widely used for gamma rays. Work principle of semi conductive detector is similar to gas filled detectors. One of the difference between them is using a solid fill material instead of gas for semi conductive detectors. The most efficient detector for energy separation is semi conductive detectors. Mainly used semi conductive detectors are Germanium and Silicon.

In this study, the average neutron energy and neutron flux of Thermo-Fisher™ brand MP320 model neutron generator, was determined by the multi-foil activation analysis. 3 foil kits used to determine the average flux and energy, which are Al, Nb, and Zr. The foils are in the form of thin 0.5" diameter discs. The MP320 model neutron generator was set up in the İstanbul Technical University TRIGA MARK-II Reactor area. Generator was located 1 m above the floor. The foils were attached to the surface of the generator centered on the generator's target plane. Each foils were irradiated during 3 hours at the same time. An independent neutron detector was placed 1 m away from the generator and 1 m above from the floor to monitor the neutron waving.

After irradiation was complete, the foils were transferred to a counting area, where HPGe detectors collected gamma-ray spectrum from foils. Zr and Nb foils were counted in Canberra HPGe detector and Al foil was counted in an ORTEC HPGe detector. 3 foils were irradiated at maximum setting of the neutron, 70 kV-90  $\mu$ A, emitting neutrons order of  $1,63 \times 10^8$  n/s.

For Zr-90 element the Zr-90 (n,2n) Zr-89 reaction was used, for Nb-93 element Nb-93 (n,2n) Nb-92m reaction was used and for Al-27 element Al-27 (n,  $\alpha$ ) Na-24 reaction was used.

After irradiation, foils transferred to detectors. foils were attached to the center of detectors. Firstly, energy calibration of detectors was done with standart foil sources which are Ba-133, Co-60, Cs-137, Am-241, Eu-152.

The efficiency calibration calculations of both detectors also done with same standart foil kits. Datas that were gathered from efficiency calibration calculation and used for making an efficiency curve. OriginPro program was used for preparing the fitting curve.

16 different gamma rays from 5 different radioisotopes, was counted. After this calculation for each peak, these values are conducted to an equation to make an efficiency curve.

Aluminum foil was irradiated for 3 hours and then counted for 26,57 hours. Zirconium foil was irradiated for 3 hours and then counted for 48 hours. Niobium foil was irradiated for 3 hours and then counted for 48 hours.

In average neutron energy equation, there is a R parameter. R parameter is calculated as 1,3629 depending on spectrum of Zr and Nb foils. With 1,3629 R value, average neutron energy calculated as 14,22 MeV as expected for ThermoFisher MP320 Neutron Generator.

For average neutron flux calculation Al spectrum was used, when Al foil datas put in the equation the average neutron flux calculated as  $6,7 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>sn

Study was done to determine the D-T neutron yield and energy from MP320 but it can be also expanded with simulation and can provide more detailed information about it. It is interesting that there are not many studies about this generator besides it is a commonly used one. This study can be developed with the data obtained from studies to be carried out using the monte carlo method.





## 1. GİRİŞ

1932 yılında James Chadwick'in nötronu keşfi ile, 1934 yılında Frédéric Joliot ve Irène Curie alüminyum alfa parçacıklarıyla ışınlayarak yapay radyoaktiviteyi bulmuştur. 1935 yılında Enrico Fermi radyonüklit üretebilmek için ilk kez nötronu kullanmıştır. Aynı yıl, George de Hevesy ve Hilde Levi nadir toprak elementleri üzerinde nötron ile çalışmalar yaparak nötron aktivasyon analizinin temellerini atmıştır. NAA yönteminin asıl önemi 1950 ve 1960'lı yıllarda anlaşılmış ve özellikle 1960'larda dedektörlerin kullanımı bu yöntemin hassasiyetini büyük oranda etkilemiştir [1]. NAA yöntemi öncesinde X-ışını floresansı yöntemi kullanılmaktaydı ancak bu yöntemin bazı sınırlayıcı özellikleri bulunmaktaydı. Örneğin numunenin homojenliği, saçılma, hafif elementlerin seçiciliğinin düşük olması, malzemeye giriciliğinin düşük olması bu kısıtlara örnektir. NAA radyokimyasal ve enstrümental NAA olarak ikiye ayrılır. Radyokimyasal NAA numunede kimyasal değişim meydana getirerek hasar bırakır, enstrümental NAA ise tahribatsız bir analiz yöntemidir. Ayrıca bu yöntem oldukça hassas bir analiz metodu olarak tercih edilmektedir. NAA yönteminde prensip bilinmeyen numune nötron bombardımanına tutularak radyoaktif hale getirilmesi sonucu oluşan radyasyonu analiz etmektir. Işınlama sonucu uyarılmış hale gelen izotop çoğunlukla alfa, beta, gama ışınları yayar. Yayınlanan bu ışınlar analiz edilerek numune hakkında bilgi edinilir. Hassasiyet ışınlama süresine, sayım süresine, yarı ömre, reaksiyon tesir kesitine, reaksiyona giren elementin doğal bolluğuna, sistemin hassasiyetine bağlıdır. Yayınlanabilecek radyasyonların arasında en ölçülebilir ve ayırt edici olanı gama ışınıdır. Uyarılmış izotop ışınlama bittikten hemen sonra sayımın yapılacağı dedektör sistemine götürülür ve sayılır. Günümüzde NAA arkeoloji, biyomedikal, gıda, tarım, jeoloji, endüstriyel uygulamalar gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. NAA yönteminin en öne çıkan özelliklerinden biri de öncesinde ve sonrasında herhangi bir kimyasal işlem gerektirmemesidir. Yöntemin avantajları olarak hassas, hızlı, bir numuneden bir çok madde analiz edebilme sayılabilir. En önemli dezavantajı ise nötron kaynağı gereksinimidir. Nötron kaynağı olarak nükleer reaktörler, nötron jeneratörleri, fotonötron kaynakları ve izotop kaynaklar kullanılabilir. Ayrıca ışınlanan numunenin analizi için bir dedektör

sistemine ihtiyaç bulunmaktadır, bunun içinde reaksiyona girecek ilgili elementin yapacağı reaksiyon tesir kesiti hassasiyetle bilinmeli ve oluşacak radyasyona göre sistem kurulmalıdır. Gama ışını spektroskopisi için en uygun dedektör yüksek saflıkta germanyum dedektörüdür. Bu tarz dedektörlerde kristal olarak germanyum kristali kullanılır ve prensip olarak oluşan iyonizasyonun dedektörde elektriksel darbeler üretmesine dayanır. Bu çalışmada ThermoFisher markalı MP320 model nötron jeneratörünün nötronik özelliklerinin (ortalama nötron enerjisi ve akısı) İTÜ Triga Mark II reaktörünün sınırlandırılmış sahasında deneysel olarak ölçülmüştür. Bu çalışmanın önemi ise bu jeneratör için bu deneyin ilk kez yapılıyor olmasıdır. Alüminyum, Neobyum ve Zirkonyum numuneleri 3 saat boyunca ışılandıktan sonra sayım için yüksek saflıkta Germanium dedektörleri ile sayılmışlardır. Sayımları tamamlanan numunelerin spektrum analizleri yapılırken OriginPRO program kullanılmıştır.

### **1.1 Tezin Amacı**

Nötron aktivasyon analizi (NAA) avantajları sayesinde endüstride ve akademide yaygınlıkla kullanılan bir analitik yöntemdir. Buna ek olarak ThermoFisher MP320 nötron jeneratörü cihazı da bu yöntem için tercih edilen nötron kaynaklarından biridir. NAA sıklıkla kullanılmasına rağmen ilgili cihazın nötron enerjisi ve akısı için çok fazla çalışma bulunmamaktadır.

İTÜ TRIGA MARK II reaktöründe de MP320 cihazı bulunmaktadır fakat cihazın enerjisi ve akısı bu tezdin öncesinde deneysel olarak belirlenmemiştir.

Bu tezin amacı İTÜ TRIGA MARK II reaktör sahasında bulunan ThermoFisher markalı MP320 model nötron jeneratörü cihazının ortalama nötron enerjisi ve ortalama nötron akısını deneysel olarak bulmaktır. Çıkan sonuçlar cihazın bildirilen teknik özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

### **1.2 Literatür Araştırması**

Bir maddenin nitel ve nicel analizi için kullanılan birden çok yöntem mevcuttur. X-ışını floresansı, spektrometrelerin kullanıldığı analizler ve nötron aktivasyon analizi (NAA) de bu yöntemlerden biridir. NAA numune analizinde kullanılan en güvenilir analitik yöntemlerdendir. Bu yöntem ilk olarak jeofizik çalışmalarında kullanılmıştır

[5]. Günümüzde NAA madencilik, petrol, jeoloji, tıp, tarım, vb bir çok alanda kullanılmaktadır [3]. NAA diğer yöntemlere nazaran daha yüksek maliyetli, ve deney düzeneği açısından kısıtlı imkan olmasına rağmen daha az madde ile daha yüksek hassasiyetli sonuçlar verdiği için en çok tercih edilen yöntemlerdendir. En önemli kısıtı ise ışınlama için gerekli malzemedir. Nötron bombardımanı yaratmak için nükleer reaktor veya nötron jeneratörü gibi nötron kaynakları kullanılması gereklidir. Ek olarak radyoaktif hale gelen elementi analiz edebilmek için radyasyon dedektörü sistemi ihtiyacı mevcuttur. Nötron aktivasyon analizi prensip olarak, analiz edilecek numunenin nötron bombardımanına tutularak radyoaktif hale gelmesine dayanmaktadır. Radyoaktif hale gelen çekirdek reaksiyon ürünü olarak radyasyon üretir ve bu üretilen bu radyasyonun analizi yapılarak element hakkında yorum yapılır. Üretilen ve analizde kullanılan radyasyonlara alfa, beta parçacıkları atılması, gama ışını yayılması örnekleri verilebilir [4]. Bu seçeneklerin içerisinde ölçülebilme açısından en tercih edileni gama ışınıdır, mevcut deneyde de gama ışını analizi yapılmıştır. Bu metodu etkileyen en önemli unsurların başında nötron reaksiyon tesir kesiti gelmektedir. Tesir kesiti bir elementin reaksiyona girme olasılığı olarak tanımlanabilir. Elementin tesir kesiti ne kadar yüksek ise, nötron ile reaksiyona girme olasılığı da o kadar yüksektir. Ayrıca sonuçların hassasiyeti açısından ışınlama süresi, sayım süresi, sistematik hatalar, ışınlanan elementin analize yeterli miktarda radyasyon salabilmesi ve salınacak radyasyonun bilinerek düzeneğin ona göre ayarlanması, ürün çekirdeğin yarı ömrü de önemli etkenler arasındadır. Işınlama süresi ne kadar yüksek tutulur ise radyoaktivite ve uyarılma o kadar yüksek olacaktır, sayım süresi uzatıldıkça oluşturulan gama ışını spektrumu daha sağlıklı sonuçlar verecektir. Yöntemin avantajları olarak hızlı, güvenilir, hassas sonuçlar vermesi, bir numuneden birden fazla elementin tespit edilebilmesi ve tahribatsız bir yöntem olması sayılabilir. Oluşan gama ışını spektrumu analizinde çeşitli türde dedektörler kullanılır. Bu çalışmada yarı iletken dedektörler sınıfından olan yüksek saflıklı Germanyum dedektörleri kullanılmıştır.

NAA yönteminin kullanılabilmesi için bütün nötron kaynaklarının (reaktör, nötron jeneratörü vs.) ürettiği nötronların enerjilerinin ve akılarının yüksek hassasiyetle ve doğrulukla bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada İTÜ Triga Mark II reaktörü sınırlandırılmış sahasında bulunan ThermoFisher markalı MP320 model nötron jeneratörü cihazının ortalama nötron

enerjisi ve akısı deneysel olarak NAA yöntemi ile belirlenmiştir. Bu deneysel çalışma İTÜ’de bulunan bu jeneratör için ilk kez yapılmıştır ayrıca çok yaygınlıkla kullanılan bu jeneratör için literatürde jeneratörün enerjisi ve akısı ile ilgili çok fazla çalışma bulunmamaktadır.



## 2. TEORİ

### 2.1 Radyasyon

Radyasyon, atom ve atom altı parçacıkların dalga ve parçacık formunda boşlukta veya madde içinde akışı olarak tanımlanabilir. Eğer bir elementin çekirdeğindeki proton ve elektron sayısı farklı ise bu çekirdek kararsız çekirdek olarak adlandırılır. Kararsız çekirdek kararlı hale geçmek için enerjisini radyasyon şeklinde atabilir. Bu şekilde kararlı hale geçen maddelere radyoaktif madde denir. Etrafa yayılan alfa, beta, gamma veya parçacıklara ise radyasyon denir. Radyasyon iyonize eden ve iyonize etmeyen radyasyon olarak ikiye ayrılır.

İyonize eden radyasyon; radyasyon atomdan elektron koparmış ise iyonize eden radyasyon olarak adlandırılır. Atom elektron kaybederek iyon haline gelmiştir. Gama ışınları, X ışınları gibi elektromanyetik radyasyonlar iyonize eden radyasyon türlerine örnektir. Nötronlar ise yüksüz parçacıklardır, çekirdeğe kadar ilerler ancak doğrudan iyonize edemezler. İlerledikleri maddede etkileşime girerek alfa, beta veya gama ışınları yaparak iyonize ederler. İyonize eden radyasyon; doğrudan iyonize eden radyasyon ve doğrudan iyonize etmeyen radyasyon olarak ikiye ayrılır.

İyonize etmeyen radyasyon; enerjisi atomdan elektron koparmaya yetmeyen ve atomu iyonize edemeyen radyasyondur. Ultraviyole ışınlar (Güneş ışınları) ve lazer ışıkları bu tarz radyasyona örnektir.

#### 2.1.1 İyonize eden radyasyon

İyonize eden radyasyon doğrudan iyonize eden radyasyon ve indirekt (dolaylı) iyonize eden radyasyon olarak ikiye ayrılır.

Doğrudan iyonize eden radyasyon; yüklü hafif, orta ve ağır parçacıklarla oluşur. Örnek olarak elektron, pozitron, proton, alfa parçacığı, C-12 iyonu, Ne-20 iyonu verilebilir. “Soğurucu içinde tek adımda enerji depolanan yüklü parçacıklardır.” Bu etkileşimde iyonizasyon tek adımda gerçekleşir. Soğurucu ve iyonize eden parçacık arasında Coulomb etkileşimi vardır [5].

Endirekt iyonize eden radyasyon; fotonlar (X ve Gama ışınları) ve nötronlar gibi yüksüz parçacıklardır ve iki adımda iyonizasyon yaparlar [5].

1. adım; yüksüz parçacık ile çarpışma sonucu, yüklü parçacık soğurucu atom içerisinde salınır. Fotonlar ürün olarak elektron ya da elektron-pozitron çifti, nötronlar ise proton veya ağır iyonlar salarlar [5].

2. adım; Salınan yüklü parçacıklar, yörüngede bulunan bir elektronla doğrudan Coulomb etkileşimi yaparak soğurucuya enerji verir [5]. Bu şekilde iyonizasyon gerçekleşmiş olur.

### **2.1.1.1 Alfa parçacığı**

Alfa parçacığı, 2 proton ve 2 nötrondan oluşan “He” atomudur. Sembolü “ $\alpha$ ” şeklindedir. Pozitif yüklüdürler ve ağır yüklerinden dolayı madde ile çabuk etkileşime girerek enerjilerini çabuk kaybederler. Giricilikleri düşüktür, zırhlanmaları ise diğer radyasyonlara kıyasla daha kolaydır [6,7].

### **2.1.1.2 Beta parçacığı**

Beta parçacıkları çekirdeğin enerji fazlalığının radyasyon olarak dışarı atılması sonucu oluşurlar. Sembollerini “ $\beta$ ” şeklindedir. Eğer enerji proton fazlalığından kaynaklanırsa “+” yüklü olan pozitron, nötron fazlalığından kaynaklanıyor ise “-” yüklü olan Betalar (negatron) oluşur. Alfa parçacığından daha hafif yüklü olduklarından dolayı giricilikleri daha yüksektir.

### **2.1.1.3 X ve Gama ışınları**

Elektromanyetik radyasyonlar arasında en yüksek frekans ve dalga boyutuna sahip radyasyon gama ışınlarıdır. Çekirdek reaksiyonları sonucu oluşurlar. Giricilikleri Alfa ve Beta parçacığından daha yüksektir. Gama ışını çekirdek reaksiyonlarından, X ışını ise yörüngedeki elektronların enerji seviye değişikliğinden kaynaklanır [6,7].

## **2.2 Fotonların Madde ile Etkileşimi**

### **2.2.1 Fotoelektrik olay**

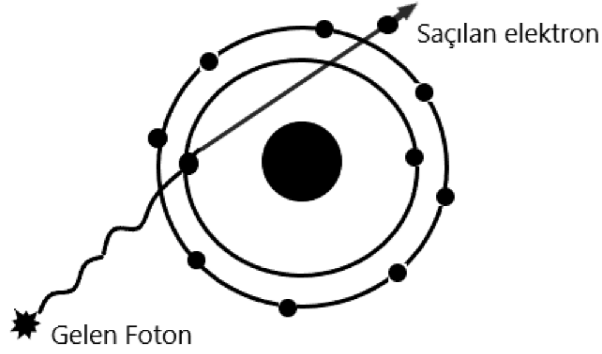
Fotonların atomdan elektron koparması olayıdır. Gelen foton yörüngedeki elektrona çarpar ve tüm enerjisini elektrona aktararak bu elektronu koparır. Oluşan boşluk başka bir enerji yörüngesindeki elektron tarafından doldurulur. Bu enerji seviye

değişikliğinden dolayı karakteristik X-ışını yayınlanır. Saçılan elektronun kinetik enerjisi ise denklem 2.1 ile bulunabilir;

$$E_k = h \cdot \nu - \phi \quad (2.1)$$

$\Phi$  bağlanma enerjisi ve  $\nu$  frekansı sembolize etmektedir. [5,6,8]

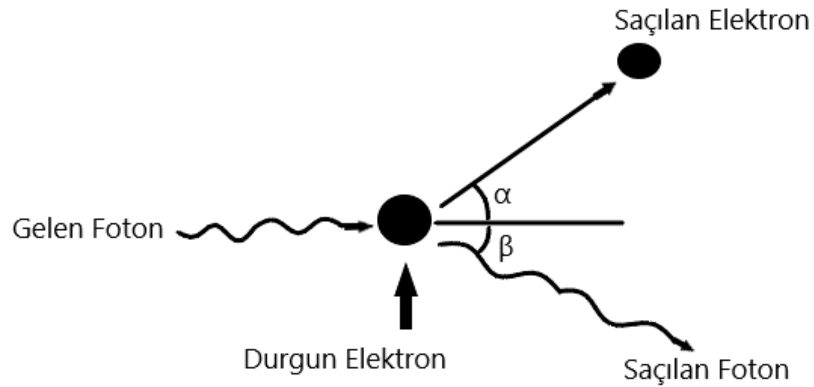
Fotoelektrik olayın şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Fotoelektrik olay.

### 2.2.2 Compton saçılması

Parçacık gibi davranan fotonlar ile zayıf bağlı elektron arasında oluşur. Elektronla etkileşime giren foton ve elektron açılı olarak saçılırlar. Saçılma açısı ve aktarılan enerji orantılıdır. 180 derecede saçılan foton enerjisi en küçük değerdedir. Bu reaksiyonda enerji ve momentum korunur. Fotoelektrik etki de olduğu gibi absorpsiyon, Compton olayında yoktur. Compton olayı 0,1-10 MeV enerji aralığında görülür. Elementin atom numarası ne kadar büyük ise Compton olayının oluşma olasılığı da o kadar büyüktür [5,8,6]. Compton saçılmasının şematik gösterimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Compton saçılması.

### 2.2.3 Çift oluşum

Gelen fotonun enerjisi eğer 1,02 MeV enerji seviyesinden yüksek ise bu enerji atomun çekirdeği ile etkileşerek çift oluşumu (elektron-pozitron çifti) yapabilir. Bu olay enerjinin maddeye dönüşümüne de örnektir. Oluşan pozitron atomdaki başka bir elektronla birleşerek zıt yönlü 2 adet foton yayınlara ve yok olur. Bu reaksiyonda maddenin enerjiye dönüşümüne örnektir. Gelen fotonun 1,02 MeV'lik enerjisi ise 0,511 MeV olarak pozitron ve elektron tarafından eşit olarak paylaşılır [6,8].

### 2.3 Nötron Parçacığı

Nötronlar elektriksel olarak yüksüz parçacıklardır. Nötron parçacığını 1932 yılında Chadwick bulmuştur. Nötron ve diğer parçacıkların kütlelerinin karşılaştırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1** : Nötron ve diğer parçacıkların ağırlıkları [14].

| Parçacık     | Kütle (g)                 | Enerji eşdeğeri (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|--------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Nötron (n)   | 1,6746x 10 <sup>-24</sup> | 8,071-939.56                          |
| Proton (p)   | 1,6723x10 <sup>-24</sup>  | 6,778-938.27                          |
| Elektron (e) | 9,1081x 10 <sup>-28</sup> | 0,511                                 |

Nötronlar enerjilerine göre sınıflandırılabilir.

- Soğuk Nötronlar; E<0,003eV
- Termal Nötronlar; 0,025 eV
- Epitermal Nötronlar; 0,1-100 eV
- Orta enerjili nötronlar; 100 eV-200 keV
- Hızlı nötronlar; 200 keV-20 MeV

### 2.4 Nötron Reaksiyonları

Nötronların çekirdek ile etkileşimi aşağıdaki şekillerde oluşabilir [10];

- Elastik Saçılma
- İnelastik Saçılma

- Nötron Yakalama
- Nötron Kapma
- Yüklü Parçacık Emisyonu
- Nötron Çoğalması (n,2n, n,3n)
- Nükleer parçalanma
- Filyon

#### 2.4.1 Filyon reaksiyonu

Gelen nötron hedef çekirdeğe çarpar ve hedef çekirdek daha hafif 2 ayrı çekirdeğe bölünür. Bölünme esnasında enerji ve ortalama 3 hızlı nötron açığa çıkar. Bu reaksiyon nükleer güç reaktörlerinde kullanılan reaksiyondur. Bu reaksiyon için kullanılan 3 adet filyon yapabilir çekirdek mevcuttur, bunlar; U-235(doğal), U-233, Pu-239(yapay)'dur [10].

Filyon reaksiyonu egzotermik bir reaksiyondur. U-235 elementinin filyonunun ortalama enerji dağılımı Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

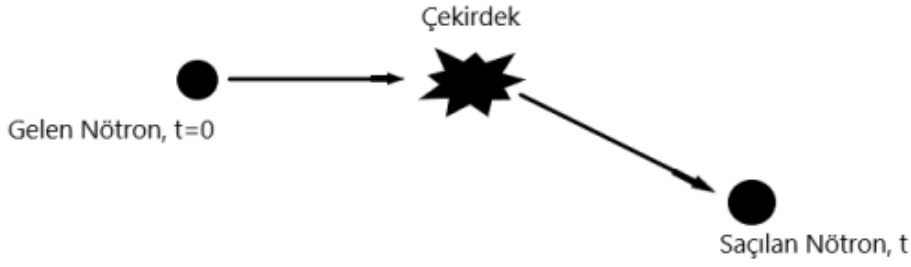
**Çizelge 2.2** : U-235 elementinin filyonun ortalama enerji dağılımı [9].

|   |         |
|---|---------|
| Yüklü filyon ürünlerinin kinetik enerjisi | 162 MeV |
| Filyon nötronları                         | 6 MeV   |
| Filyon gama ışınları                      | 6 MeV   |
| Sonraki beta bozunumu                     | 5 MeV   |
| Sonraki gama bozunumu                     | 5 MeV   |
| Nötrino                                   | 11MeV   |
| Toplam                                    | 195 MeV |

#### 2.4.2 Elastik saçılma

Elastik saçılma nötronların yavaşlatılması konusunda en önemli reaksiyondur. Kafa kafaya bir çarpışma sonucu nötron bütün enerjisini kaybedebilir. Nötron çekirdeğe çarptıktan sonra enerjisinin ve hızının bir kısmını çekirdeğe aktararak kaybeder ve yoluna devam eder. Çarpılan çekirdeğin kütlesi ne kadar hafif ise nötronun kaybedeceği enerji o kadar çok olur. Bu açıdan bakıldığında en iyi çekirdekler; H, He, Li, Be, C ve O'dur, bu elementler yüksek enerji düşürme özelliklerinden dolayı

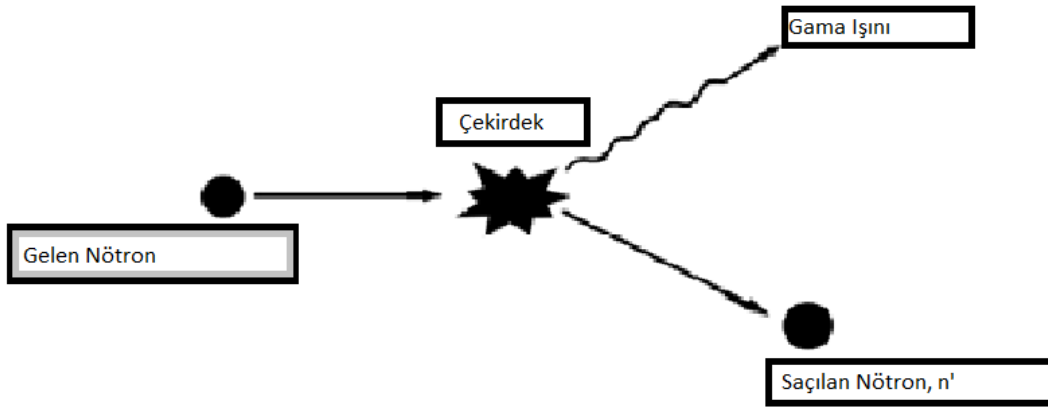
“moderatör elementler” olarak adlandırılırlar. Elastik saçılmada momentum ve enerji korunur. Şekil 2.3’te elastik saçılmanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3 : Elastik saçılma.

### 2.4.3 İnelastik saçılma

Gelen nötron hedef çekirdeğe çarpar ve hedef çekirdek nötronu yakalar. Yakalanan nötron daha düşük enerjili bir  $n'$  olarak yoluna devam eder. Hedef çekirdek ise uyarılmış olur. Uyarılma sonucu olarak yüksek enerjili gama ışınları veya başka radyasyon türleri ile bozunur. Nötronun çekirdeği uyarabilmesi için bir eşik enerjisi mevcuttur. Eğer nötron enerjisi bu eşik altında kalıyor ise çekirdek uyarılamaz. Bu durumda sadece inelastik saçılma oluşur. Eşik enerjisi  $>1$  MeV olmalıdır. Şekil 2.4’te inelastik saçılmanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4 : İnelastik saçılma.

### 2.4.4 Nötron yakalama (Nötron soğurulması)

Nötron yakalama reaksiyonu 3 şekilde gerçekleşebilir.

- Işımalı Kapma
- Yüklü Parçacık Emisyonu
- Nötron Çoğalması

#### 2.4.4.1 Işımalı kapma

En yaygın etkileşim türündendir. Hedef çekirdek gelen nötronu kapar. Atom ağırlığı 1 birim artar ve yeni çekirdek gama ışını yayarak enerjisini atar. Reaksiyonun Q değeri pozitifdir. Bu reaksiyon sonucu atom numarası değişmez ancak çekirdek radyoaktif hale gelir. Örnek reaksiyon denklem 2.2’de verilmiştir.

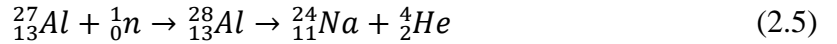
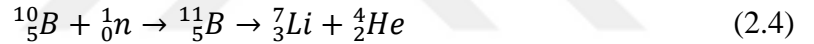


#### 2.4.4.2 Yüklü parçacık emisyonu

Yüklü parçacık emisyonu, ürün çekirdeğin proton (n, p) veya alfa parçacığı (n, a) gibi yüklü bir parçacığın emisyonuyla parçalandığı reaksiyonlardır.

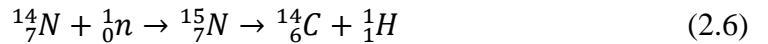
(n,  $\alpha$ ) reaksiyonları;

Bu reaksiyon birçok elementle gerçekleşebilir. Reaksiyon tesir kesiti yüksektir ve genelde nötronları tespit etmekte kullanılır. Örnek (n,  $\alpha$ ) reaksiyonları denklem 2.3, 2.4 ve 2.5’de verilmiştir.



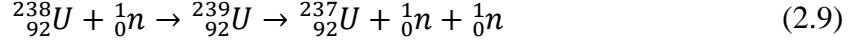
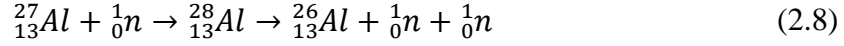
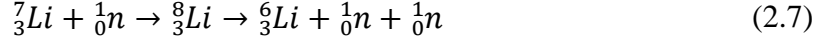
(n,p) reaksiyonları;

Çekirdekdeki bir proton, nötrona dönüşür. Atomun kütle numarası değişmez, ancak yükü bir birim azalır. Genelde (n, p) reaksiyonları, düşük enerjili nötronlar ile oluşur. Yüklü bir parçacığın atılması önemli miktarda enerji gerektirir. Örnek (n,p) reaksiyonu denklem 2.6’da verilmiştir.



#### 2.4.4.3 Nötron çoğalması (n,2n)

Bazen hedef çekirdek gelen nötronu kapar ve 2 veya daha fazla nötron yayar. Bu reaksiyon hızlı nötronlarla oluşabilir ve reaksiyon Q değeri negatiftir. Çok yüksek enerjili nötronlar, 3,4 veya daha fazla nötron üretebilir. Nötron çoğalması sonrası çekirdeğin yükü değişmez, oluşan ürün hedef çekirdeğin daha az kütleli bir izotopudur. Örnek reaksiyonlar denklem 2.7, 2.8 ve 2.9’da verilmiştir.



#### 2.4.5 Nükleer parçalanma

Hedef çekirdeğin, gelen nötronun çarpması veya stres sebebiyle birçok küçük bileşene bölünmesi reaksiyonudur. Alfa parçacıkları, nötronlar ve protonlar üretilebilir.

#### 2.4.6 İkincil reaksiyonlar

Nötron ile aktivite edilmiş veya uyarılmış çekirdek düşük enerjili gama ışınları sebebiyle X-ışınları yayabilir. Compton saçılması da sonrasında Bremsstrahlung radyasyonu yaratabilir.

Çift oluşum reaksiyonu sonrası oluşan elektron ve pozitron çifti enerjisinin 0,511 MeV'den düşük olması durumunda birbirlerinden ayrılamazlar ve yok olarak anihilasyon radyasyonu oluşturup enerjiye dönüşürler.

Bu durumlar ikincil reaksiyonlara örnektir.

#### 2.5 Reaksiyon Q Değeri

Reaksiyon Q değeri, atomların bağ durumlarını değiştirmek için elde edilen veya onları belirli bir şekilde parçalamak için alınması gereken enerji miktarıdır. Enerji dengesi olarak da adlandırılabilir. Hedef parçacık ve oluşan ürünler arasında meydana gelen kütle değişiminden kaynaklanan net enerji değişimidir. Örneğin;  ${}^2_1\text{H}$  atomunu bir proton ve bir nötrona bölmek için 2,225 MeV'lik bir enerjinin reaksiyona eklenmesi gerekmektedir. Reaksiyonun Q değeri 2,225 MeV'dur. Denklem 2.10'da şematik gösterimi verilmiştir.



Eğer Q değeri 2,225 MeV'dan daha büyük ise proton ve nötron arasında kinetik enerji olarak paylaşılır. Egzotermik reaksiyonlarda Q enerji değeri pozitiftir. Endotermik reaksiyonlarda Q enerji değeri negatiftir ve başlatma enerjisi, Q değerinden büyüktür. Reaksiyon Q değeri denklem 2.11 ile bulunabilir;

$$Q = ((M_x + M_a) \cdot c^2) - ((M_y + M_b) \cdot c^2) \quad (2.11)$$

Burada  $M_x$  : Hedef çekirdek kütlesi,  $M_a$  : Gelen Parçacık kütlesi,  $M_y$  : Çıkan ürün çekirdek kütlesi ve  $M_b$  : Çıkan parçacık kütlesini sembolize etmektedir.

## 2.6 Reaksiyon Tesir Kesiti

Reaksiyon tesir kesiti, bir reaksiyonun oluşma olasılığıdır. Yük, kütle, gelen parçacığın enerjisi, hedef atomla etkileşme olasılığını etkiler. Belirli bir hedef çekirdek ve bombardıman parçacığının etkileşime girme garantisi yoktur, tesir kesiti sadece etkileşime girme olasılığı ölçüsüdür. Tesir kesiti, hedef maddeye ve gelen maddeye bağlıdır. Bu bağlılık enerji, kütle ve yük değerlerini kapsamaktadır.

Gelen parçacığın hedef çekirdekten geçtikten sonra azalması, oluşan etkileşimin doğrudan bir ölçüsüdür.  $\Phi$  etkileşim olasılığı ( $\sigma$ ) ve hedef atom ( $N$ ) içeren bir fonksiyondur. Denklem 2.12’de gösterilmiştir.

$$-\frac{d\phi}{dx} = \sigma \cdot N \cdot \phi \quad (2.12)$$

İntegralinin alınmış hali denklem 2.13’de verilmiştir;

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{(-\sigma \cdot N \cdot x)} \quad (2.13)$$

$\sigma$ ; birimi hedef atom başına alandır ( $m^2$  veya  $cm^2$ ). Birimi “Barn”dır.  $1 b = 10^{-24} cm^2$  veya  $10^{-28} m^2$  dir. Tesir kesiti, gelen parçacık, enerji, hedef çekirdek ve etkileşim tipine bağlı olarak değişir. Nötronlar için, tesir kesiti nötronun hızına da bağlıdır ve hız ile ters orantılıdır.

Elastik saçılma tesir kesiti  $\sigma_E$ , inelastik saçılma tesir kesiti  $\sigma_I$ , radyatif kapma  $\sigma_Y$ , fizyon tesir kesiti  $\sigma_f$  ise nötron için herhangi bir reaksiyon oluşturma total kesir kesiti hepsinin toplamıdır.

Absorbsiyon reaksiyonlarının toplam tesir kesiti  $\sigma_A$ , saçılmalar ise  $\sigma_S$  ise tesir kesiti toplamı  $\sigma_S + \sigma_A$  dır [11].

## 2.7 Nötron Aktivasyon Analizi

Nötron aktivasyon analizi, malzemeyi nötron bombardımanına tutarak malzemenin radyoaktif emisyonunu analiz eden analitik bir tekniktir. Nötron bombardımanı ile

aktifleşen kararlı çekirdeğin, yaydığı karakteristik radyasyonu ölçerek çekirdek hakkında bilgi edinilebilir.

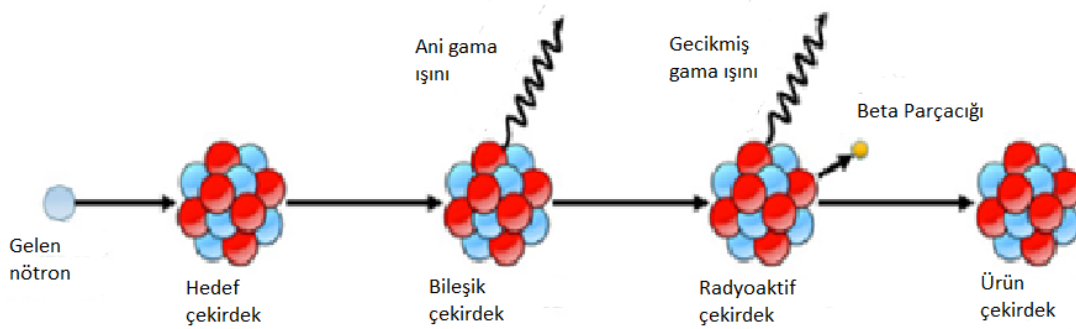
Nötron aktivasyon analizi için termal nötronlar tercih edilir. Bunun başlıca sebepleri;

- Düşük girişim reaksiyonları
- Birçok elementle yüksek tesir kesiti değeri
- Aynı anda birden fazla örneği aktifleyebilme özellikleridir.

Girişim; Farklı örneklerden aynı ürünün oluşması veya farklı örneklerden aynı enerjide radyasyon yayılmasıdır. Başka bir deyişle farklı başlangıç elementlerinden, aynı ürünü elde etmektir.

Öz zırlama; Malzemenin konsantrasyonu yoğunluğu sebebiyle, nötronun arkadaki çekirdeğe ulaşamamasıdır, malzeme bu şekilde kendi kendini zırlayabilir [1].

Bu teknikte hedef çekirdek nötronla bombardıman edilir ve nötronu yutar. Sonrasında oluşan radyoaktif bileşik çekirdek ani gama ışınları yayar, bu aşamada ölçülen gama ışınlarından yola çıkılarak analiz yapılan tekniğe “Ani Gama Aktivasyon Analizi” denir. Ayrıca moleküler nötron aktivasyon analizi, radyo kimyasal nötron aktivasyon analizi, vs gibi çeşitleri de bulunmaktadır. Şekil 2.5’de nötron aktivasyon analizi reaksiyonları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Nötron reaksiyonları [4].

Nötron aktivasyon analizi için, nötron bombardımanı yapmak amacıyla bir nükleer reaktör veya nötron jeneratörüne, malzemeleri analiz edebilmek detektör ve uygun yazılımlı bilgisayar sistemine ihtiyaç vardır.

Nötron aktivasyon analizinin avantajları olarak;

- Farklı örneklere uygulanabilme,

- Matris ve girişimden bağımsız olma,
- Tahribatsız olarak analiz edebilme,
- Her açıda ışınlayabilme
- Aktivite ölçümü basitliği
- Teorik olarak kolay ve anlaşılabilir olması sayılabilir.

Dezavantajları olarak;

- Nötron kaynağı (nükleer reaktör, radyoaktif kaynak, nötron jeneratörü) ihtiyacı,
- Radyoaktif malzemelerle çalışma,
- Analiz süresinin uzunluğu,
- Girişim olasılığı
- Öz zırhlama olasılığı verilebilir.

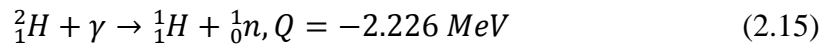
## 2.8 Nötron Kaynakları

### 2.8.1 Kendiliğinden fisyon

Birçok ağır element kendiliğinden bozunma ihtimaline sahiptir. Kendiliğinden bozunarak nötron yayan yaklaşık 100 radyonüklit bulunmaktadır. Örneğin; Cf-252 kendiliğinden bozunuma uğrayan bir radyonüklittir ve nötron kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bozunum başına ortalama 4 adet nötron üretilir ve enerjileri ortalama 1-3 MeV'dir [12,13].

### 2.8.2 Foto nötron kaynakları

Bu tarz reaksiyonlarda Be-9 elementi gama ışını veya alfa parçacığı ile ışınlanır. Reaksiyonun oluşması için reaksiyonun Q değeri, gelen fotonun enerjisinden küçük olmalıdır. Sb-124 en yaygın kullanılan foto nötron kaynağıdır [12,13]. Denklem 2.14 ve denklem 2.15'de Be-9 elementinin reaksiyonları verilmiştir.



### 2.8.3 Nükleer reaktörler

Nükleer reaktörlerdeki fisyon reaksiyonu sonucu reaksiyon başına ortalama nötron sayısı 2,5 adet ve reaksiyonun ortaya çıkan Q değeri enerjisi 200 MeV'dir. Yayınlanan nötronlar hızlı nötronlardır ve kolaylıkla yavaşlatılabilirler. Akımları ortalama  $10^{12}$ - $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s'dir [3].

### 2.8.4 Nötron jeneratörleri

Nötron jeneratörlerinin çalışma prensibi füzyon reaksiyonuna dayanmaktadır ve çoğunlukla detayları Çizelge 2.3'te verilen 4 reaksiyon kullanılır.

**Çizelge 2.3 :** Nötron jeneratöründe kullanılan reaksiyonlar [14].

| Reaksiyon                        | Q Değeri | Nötron Enerji Aralığı (MeV) |
|----------------------------------|----------|-----------------------------|
| $^2\text{H} (d, n) ^1\text{He}$  | +3,270   | 1,65-7,75                   |
| $^3\text{H} (d, n) ^4\text{He}$  | +17,590  | 11,75-20,5                  |
| $^3\text{H} (d, n) ^3\text{He}$  | -0,763   | 0,3-7,6                     |
| $^7\text{Li} (p, n) ^7\text{Be}$ | -1,644   | 0,12-0,6                    |

Döteryum gazı iyon kaynağı olarak kullanılmaktadır. Döteronlar, elektronlarından ayrılarak pozitif bir yüke sahip olur. İyon kaynağı ile hedef arasındaki gerilim farkı da ivmelenmeye yol açar. İvmelenmiş Döteronlar hedefle çarpıştığında füzyon reaksiyonu gerçekleşir [12].

Yüksek Q değeri ve düşük atom numarasıyla, düşük başlangıç enerjisinde bile yüksek akımlı hızlı nötronlar üretilebilir. Bu da D-D ve D-T jeneratörlerin avantajlarından biridir [14].

D-T reaksiyonunda gaz ve trityum demetleri bütün hızlandırıcıyı kontamine ettiğinden dolayı çok tercih edilmemektedir. Bunun yerine nötron üretmek için Zr ya da Titanyum-Trityum katı hedefler kullanılmaktadır [14].

Neobyum, Tantal ve Altın folyoları Nb-93(n,2n) Nb-92m, Ta-181(n,2n) Ta-180m, Au-197(n,2n) Au-196 reaksiyonlarıyla genellikle nötron akı ölçümü için yaygın olarak kullanılan elementlerdir.

Nötron enerji dağılımını etkileyen 4 faktör mevcuttur;

1. Hedefteki atomların sayısı,

2. Atomik ve moleküler iyonların oranı,
3. İyonların maksimum kinetik enerjilerinin farkı,
4. Döteronların hedefte birikmesinden kaynaklanan yavaşlama

Ortalama nötron enerjisi, nötron aktivasyon analizi metodu ile bulunabilir. Bu çalışmada ortalama nötron enerjisinin bulunması için  $^{90}\text{Zr}$  (n,2n)  $^{89}\text{Zr}$  ve  $^{93}\text{Nb}$  (n,2n)  $^{92\text{m}}\text{Nb}$  reaksiyonlarının tesir kesitinden faydalanılmıştır. Reaksiyonların olma olasılığı nötron enerjisine bağlıdır [14].

## **2.9 Radyasyon Dedektörleri**

### **2.9.1 Gaz dolgulu dedektörler**

Gaz dolgulu dedektörlerin çalışma prensibi oluşan iyonizasyon akımını ölçerek radyasyonu belirlemeye dayanır. Bu tip dedektörlerde dolgu maddesi olarak yüksek basınçta Argon, Helyum ya da hava kullanılabilir. İyonlaştırıcı radyasyon, gaz içerisinde elektrik yüklü haldedir. Dolgu maddesi katot ve anot arasında sıkıştırılır. Radyasyon dolgu maddesi ile etkileşerek onu iyonlarına ayırır ve katot ve anot ile etkileştirir. Bu iki uç arasındaki gerilim farkına dayanarak gaz dolgulu dedektörler iyon odaları, Geiger-Müller dedektörü ve orantılı sayaç olarak 3'e ayrılır.

#### **2.9.1.1 İyon odaları**

Radyasyonun oluşturduğu iyonizasyonu algırlar ve radyasyonun oluşturduğu ortalama iyonizasyonu ölçerler. Oluşturulan akım çok küçük olduğundan dolayı kesin ölçüm yapılamaz. Bu tip dedektörlerde dolgu maddesi olarak genellikle hava kullanılır. Çoğunlukla radyoaktif kirlenme hakkında bilgi edinmek için kullanılırlar. Eğer Geiger-Müller dedektörü zırhlanıp Beta çıkışı önlenirse, Gama ışınları da sayılabilir.

#### **2.9.1.2 Orantılı sayıcılar**

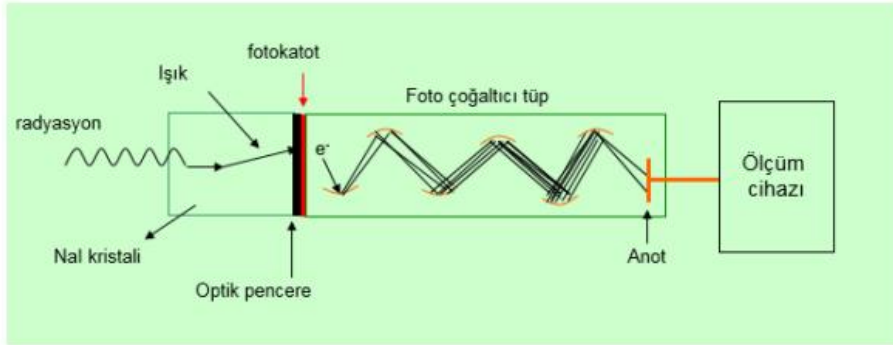
Orantılı sayıcılar gaz dolgulu dedektörlerin bir türüdür. Bu tip dedektörlerde çoğunlukla yükseltici kullanılması gerekmektedir. Orantılı sayıcı dedektörler X-ışını belirlemede yaygınlıkla kullanılmaktadır.

### 2.9.1.3 Geiger-Müller

İyon odalarının yüksek gerilimle çalışan türüdür. Bu tip dedektörlerde az iyonlaşan yüklü parçacıklar, X ve Gama ışınları ölçülebilir. Geiger-Müller dedektörlerin parçacıkları birbirinden ayırt etme özellikleri bulunmamaktadır.

### 2.9.2 Sintilatör dedektörleri

Sintilatörler, algıladığı radyasyon enerjisi ile doğru orantılı olarak görünür ışık yayarlar. Sintilatörlerde enerji ayırımı yapılabilir. Gama ışınları için yaygınlıkla kullanılan bir dedektör çeşididir. Örnek bir sintilatör dedektörü Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Sintilatör dedektörü. [15].

Sintilasyon dedektörlerinin kristalleri değiştirilerek Alfa ve Beta parçacıkları, X ve Gama ışınları belirlenebilir.

### 2.9.3 Yarı iletken dedektörler

Yarı iletken dedektörlerin çalışma prensipleri gaz dolgulu dedektörler ile benzerdir. Aralarındaki farklardan biri yarı iletken dedektörlerde dolgu maddesi olarak gaz yerine katı madde kullanılır. En çok kullanılan yarı iletken dedektörler silikon ve germanyum dedektörlerdir. Yarı iletken dedektörler, enerji ayırma gücü en yüksek olan dedektör tipidir. Hem elektromanyetik ışınlar hemde alfa ve beta parçacıklarının belirlenmesinde kullanılırlar. Gelen radyasyon, dedektörün kristali ile etkileşime girer ve bu etkileşim sonucunda enerjisini kaybeder. Bu olayın sonucu olarak kristalden kopan yüksek enerjiye sahip elektronlar, yörüngedeki diğer elektronlar ile etkileşir. Bu etkileşimden elektron-boşluk çifti meydana gelir [6].

### 3. DENEY

#### 3.1 Deney Metodolojisi ve Ekipmanlar

Bu çalışmada ThermoFisher markalı MP320 model nötron jeneratörü cihazının ortalama nötron enerjisi ve nötron akısı nötron aktivasyon analizi metodu ile deneysel olarak belirlenmiştir. Bu deneyde nötron enerjisini belirlemek için Neobyum ve Zirkonyum, nötron akısını belirlemek için Alüminyum folyolar kullanılmıştır. Deneyde belirtilen nötron jeneratörü ile ışınlanan elementler gama ışını dedektörlerinde sayılarak, oluşan radyasyondan yola çıkılmış ve nötron jeneratörünün ortalama nötron enerjisi ve akısı belirlenmiştir. Deneyde iki farklı gama ışını dedektörü kullanılmıştır. Kullanılan detektörlerin markaları Ortec ve Canberra'dır. Reaksiyonların sonucunda çıkan aktif ürün çekirdeklerin yarılanma ömürleri kısa olduğu için aktivasyon ürünü sayısını kaybetmemek amacıyla aynı anda sayımların yapılması gerekmektedir, bu nedenle sayım için iki farklı dedektör kullanılmıştır. Bu detektörlerin enerji ve verim kalibrasyonları için Co-60, Am-241, Cs-137, Ba-133 ve Eu-152 standart kaynakları kullanılmıştır.

MP320 nötron jeneratörü, ThermoFisher markasına ait portatif ve laboratuvar şartlarında kullanılan bir jeneratördür. Üretici firmanın vermiş olduğu teknik özelliklere göre akım değeri  $10^8$  n/s olarak ve nötron enerjisi 14 MeV'dir. Tipik kullanım ömrü ise 1200 saattir. Bu jeneratörde Döteron-Trityum reaksiyonu kullanılarak nötron üretilmektedir. D-T reaksiyonunun bazı özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1 : D-T reaksiyonunun bazı özellikleri.**

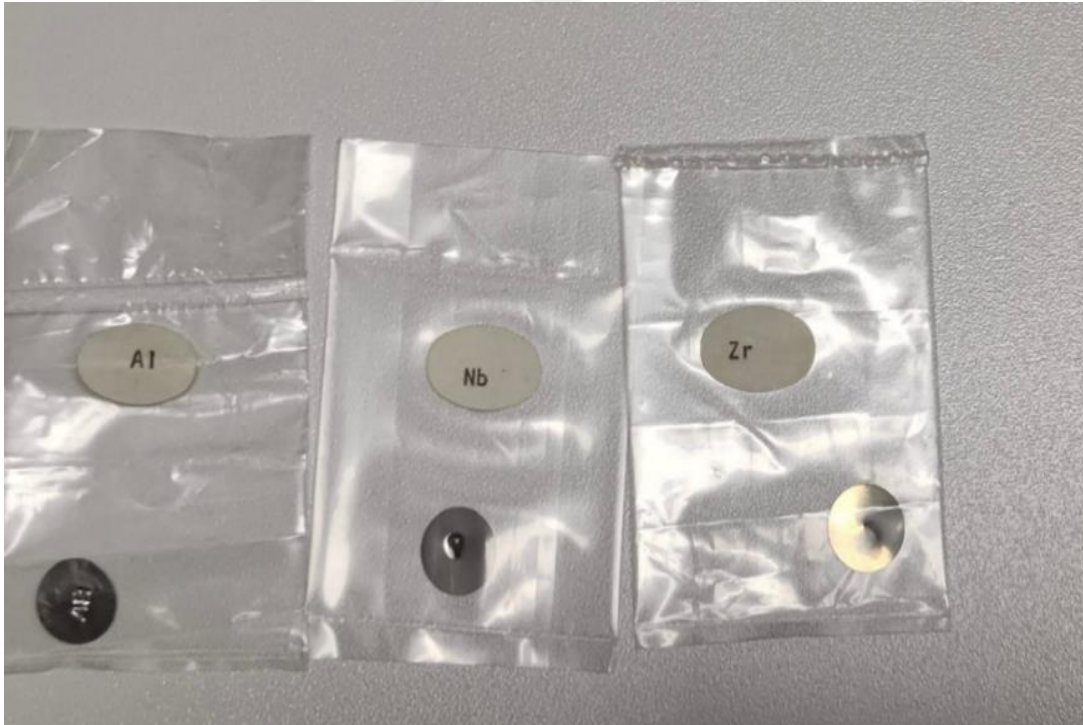
| Reaksiyon                       | Q Değeri | Nötron Enerji Aralığı (MeV) |
|---------------------------------|----------|-----------------------------|
| $^3\text{H} (d, n) ^4\text{He}$ | +17,59   | 11,75-20,5                  |

Çizelge 3.2'de Al, Zr ve Nb elementlerinin hızlı nötronlar ile yaptıkları reaksiyonlar gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2 :** Al, Zr ve Nb elementlerinin hızlı nötronlar ile reaksiyonları.

| İzotop           | Bolluk (%) | Reaksiyon                                  | Yarı Ömür (sn) | E $\gamma$ (keV) |
|------------------|------------|--|----------------|------------------|
| $^{27}\text{Al}$ | 100.00     | $^{27}\text{Al} (n,p) ^{27}\text{Mg}$      | 567.48         | 843.76           |
| $^{27}\text{Al}$ | 100.00     | $^{27}\text{Al} (n,p) ^{27}\text{Mg}$      | 567.48         | 1014.52          |
| $^{27}\text{Al}$ | 100.00     | $^{27}\text{Al} (n,\alpha) ^{24}\text{Na}$ | 53989.2        | 1368.62          |
| $^{27}\text{Al}$ | 100.00     | $^{27}\text{Al} (n,\alpha) ^{24}\text{Na}$ | 53989.2        | 2754             |
| $^{90}\text{Zr}$ | 51.45      | $^{90}\text{Zr} (n,2n) ^{89}\text{Zr}$     | 282276         | 909.15           |
| $^{90}\text{Zr}$ | 51.45      | $^{90}\text{Zr} (n,p) ^{90m}\text{Y}$      | 11484          | 479.51           |
| $^{90}\text{Zr}$ | 51.45      | $^{90}\text{Zr} (n,p) ^{90m}\text{Y}$      | 11484          | 202.53           |
| $^{93}\text{Nb}$ | 100.00     | $^{93}\text{Nb} (n,2n) ^{92m}\text{Nb}$    | 876960         | 934.44           |
| $^{93}\text{Nb}$ | 100.00     | $^{93}\text{Nb} (n,\alpha) ^{90m}\text{Y}$ | 11484          | 202.53           |
| $^{93}\text{Nb}$ | 100.00     | $^{93}\text{Nb} (n,\alpha) ^{90m}\text{Y}$ | 11484          | 479.51           |

Işınlanan numune kitleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1 :** Işınlanan numune kitleri.

Çizelge 3.3’de ışınlanan numunelerin ağırlık ve çapları verilmiştir.

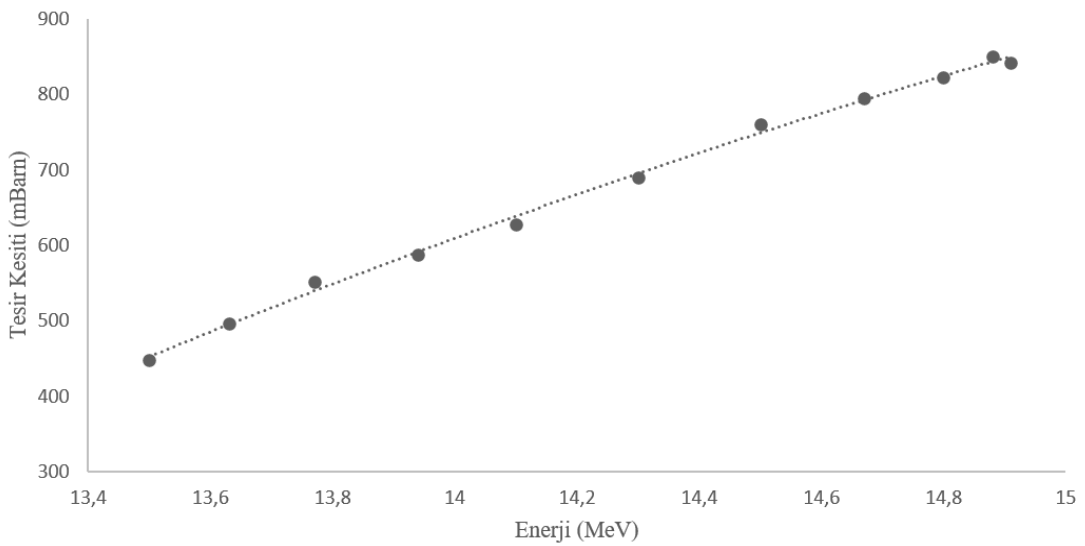
**Çizelge 3.3 :** Işınlanan numunelerin özellikleri.

| Folyo | Ağırlık (g) | Kalınlık (inç) |
|-------|-------------|----------------|
| Al-27 | 0,016       | 0,02”          |
| Zr-90 | 0,111       | 0,0051”        |
| Nb-92 | 0,140       | 0,005”         |

Işınlanan folyoların nötron reaksiyonları tesir kesitleri Çizelge 3.4,3.5,3.6 ve grafikleri Şekil 3.2,3.3,3.4’de verilmiştir.

**Çizelge 3.4 :**  $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89}\text{Zr}$  nötron enerjisi ve nötron reaksiyonu tesir kesiti.

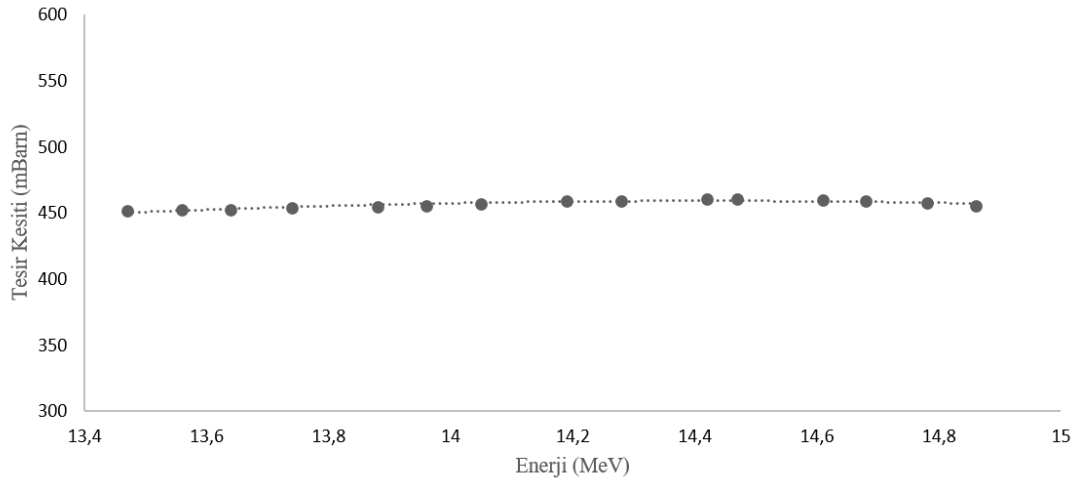
| Enerji (MeV) | Tesir Kesiti (mbarn) |
|--------------|----------------------|
| 13,5         | 448                  |
| 13,63        | 497                  |
| 13,77        | 552                  |
| 13,94        | 587                  |
| 14,1         | 628                  |
| 14,3         | 690                  |
| 14,5         | 761                  |
| 14,67        | 795                  |
| 14,8         | 623                  |
| 14,88        | 850                  |
| 14,91        | 842                  |



**Şekil 3.2 :** Nötron enerjisi  $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89}\text{Zr}$  tesir kesiti grafiği.

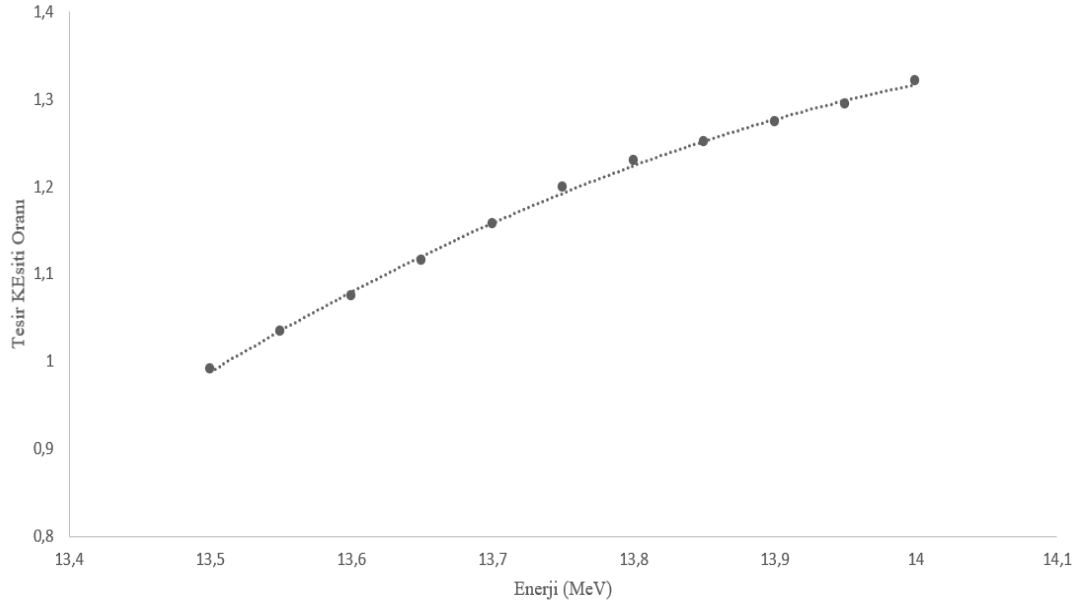
**Çizelge 3.5 :**  $^{93}\text{Nb}$  (n,2n) $^{92\text{m}}\text{Nb}$  nötron enerjisi-nötron reaksiyonu tesir kesiti.

| Enerji (MeV) | Tesir Kesiti (mbarn) |
|--------------|----------------------|
| 13,47        | 451,7                |
| 13,56        | 452,4                |
| 13,64        | 452,4                |
| 13,74        | 453,6                |
| 13,88        | 454,9                |
| 13,96        | 455,6                |
| 14,05        | 457,1                |
| 14,19        | 459,1                |
| 14,28        | 459,2                |
| 14,42        | 460,2                |
| 14,47        | 460,4                |
| 14,61        | 459,9                |
| 14,68        | 458,9                |
| 14,78        | 457,3                |
| 14,86        | 455,3                |



**Şekil 3.3 :** Nötron enerjisi  $^{93}\text{Nb}$  (n,2n) $^{92\text{m}}\text{Nb}$  tesir kesiti grafiği.

Şekil 3.4'de  $^{90}\text{Zr}$  (n,2n) $^{89}\text{Zr}$  ve  $^{93}\text{Nb}$  (n,2n) $^{92\text{m}}\text{Nb}$  reaksiyonları tesir kesitleri oranı gösterilmiştir.

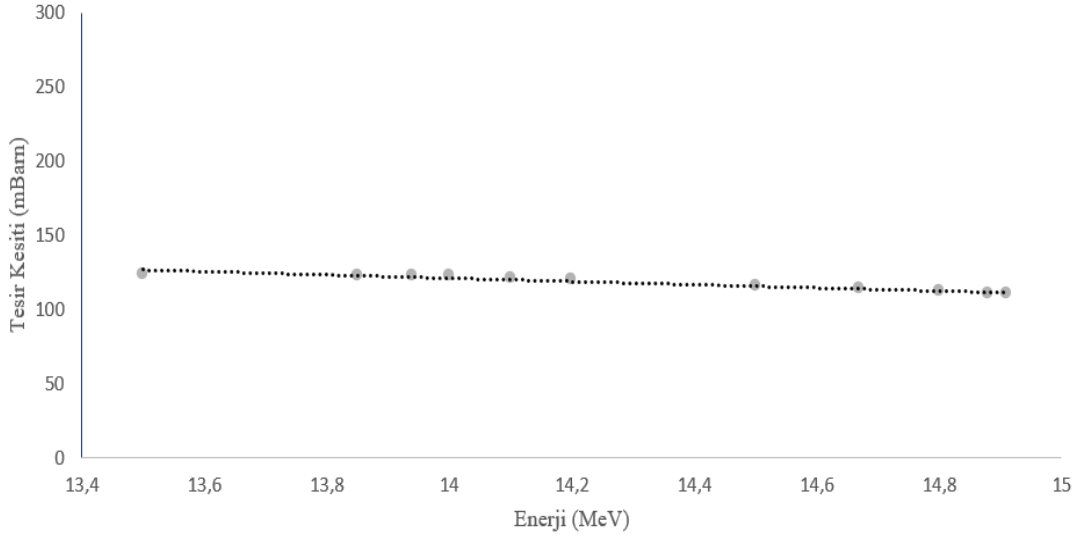


**Şekil 3.4 :**  $^{90}\text{Zr} (n,2n)^{89}\text{Zr}$  ve  $^{93}\text{Nb} (n,2n)^{92m}\text{Nb}$  reaksiyonları tesir kesitleri oranı.

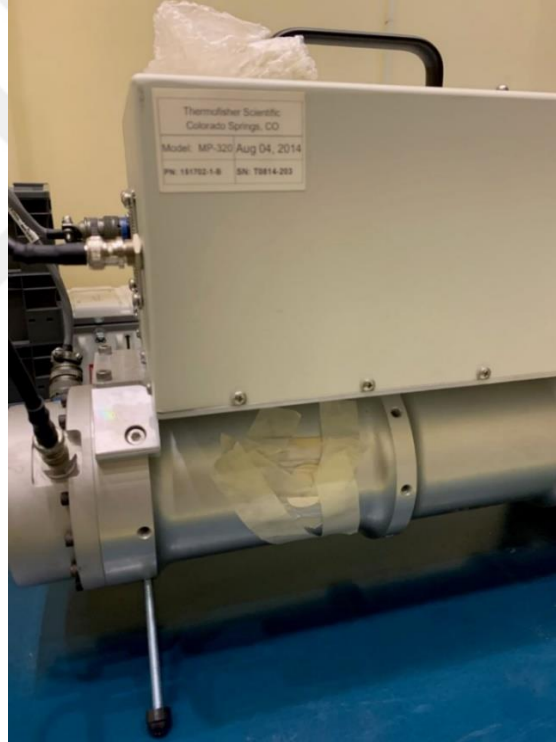
**Çizelge 3.6 :**  $^{27}\text{Al} (n, a)^{24}\text{Na}$  nötron enerjisi ve nötron reaksiyonu tesir kesiti.

| Enerji (MeV) | Tesir Kesiti (mbarn) |
|--------------|----------------------|
| 13,5         | 123,75               |
| 13,85        | 122,88               |
| 13,94        | 122,66               |
| 14,0         | 122,51               |
| 14,1         | 121,2                |
| 14,2         | 119,9                |
| 14,5         | 115,99               |
| 14,67        | 113,77               |
| 14,8         | 112,07               |
| 14,88        | 111,03               |
| 14,91        | 110,64               |

Deney düzeneği İTÜ Triga Mark II reaktörü sınırlandırılmış sahasında ayarlanmıştır. MP320 Nötron jeneratörü yerden 1 metre yükseklikte konumlandırılmış ve numuneler jeneratörün hedef yüzeyine yapıştırılmıştır. Tritiyum hedef ve numunelerin uzaklığı jeneratörün çapı kadardır. Şekil 3.6 folyoların jeneratöre yapıştırılmış hali gösterilmektedir.



Şekil 3.5 :  $^{27}\text{Al}(n, a)^{24}\text{Na}$  tesisir kesiti grafiği.



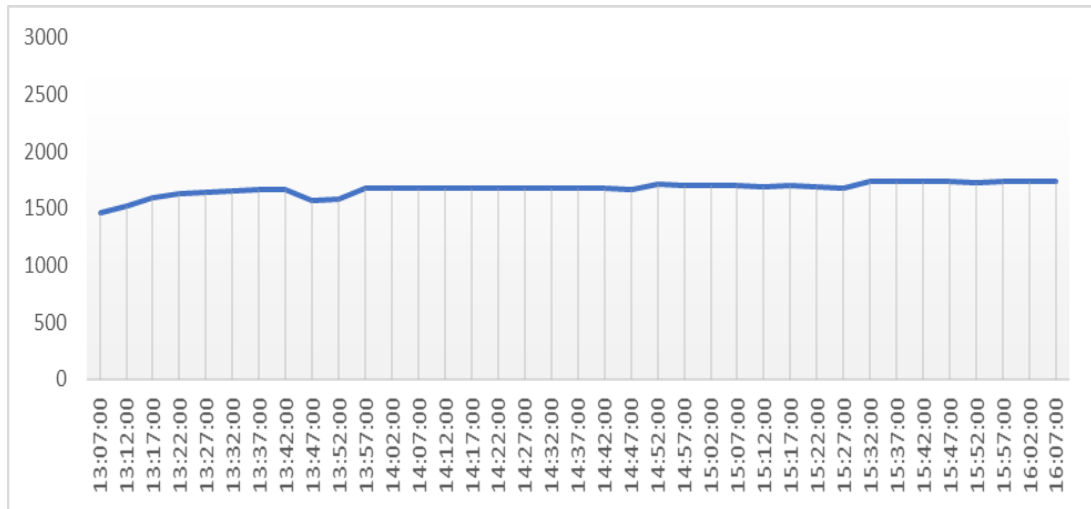
Şekil 3.6 : Numunelerin jeneratördeki konumu.

3 folyoda aynı anda jeneratöre yapıştırılarak, 3 saat boyunca jeneratörün maksimum ayarı olan 90 kV, 70  $\mu\text{A}$  değerinde ışınlanmıştır. Jeneratörün 1 m uzaklığına bir polietilen blok konularak üretilen hızlı nötronların yavaşlayıp termal nötrona dönüştürülmesi sağlanmıştır. Düzenekte polietilen bloğun önüne bağımsız bir nötron dedektörü konularak jeneratörün ürettiği nötronların dalgalanması izlenmiştir. Şekil 3.7’de deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Deney düzeneği.

Her 5 dakikada bir üretilen nötron değeri kayıt altına alınmıştır. Saate bağlı oluşan grafik Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Saate bağlı nötron jeneratörü çıkış değerleri.

Işınlama bittikten hemen sonra folyolar sayılmak üzere Gama ışını detektörlerine götürülmüştür. Zr ve Nb folyoları Canberra detektöründe, Al folyosu ise Ortec detektöründe sayılmıştır. Zr ve Nb folyoları 48 saat, Al folyosu ise 26,5 saat sayılmıştır. Folyoların sayım ve ışınlanma süreleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

**Çizelge 3.7 :** Numunelerin sayım ve ışınlanma süreleri.

| Folyo | Işınlanma Süresi (s) | Sayım Süresi (s) |
|-------|----------------------|------------------|
| Al    | 10800                | 95675            |
| Zr    | 10800                | 172825           |
| Nb    | 10800                | 172825           |

### 3.2 Data Analizi

Işınlanmanın tamamlanmasından hemen sonra folyolar, Canberra ve Ortec markalı HpGe gama ışını dedektörlerine sayılmak üzere götürülmüştür. Folyoların sayımlarından önce ise iki detektöründe verim ve enerji kalibrasyonları standart folyo kaynaklar ile yapılmıştır. Kalibrasyon için kullanılan standart folyo kaynaklar; Ba-133, Co-60, Eu-152, Cs-137 ve Am-241'dir. 5 adet radyoizotoptan 16 adet farklı gama ışını yayınlanmıştır.

Dedektörlerin verim kalibrasyonları için denklem 3.1 kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{(N \cdot \frac{LT}{TT})}{A \cdot I \cdot TT} \quad (3.1)$$

Bu denklemde  $\varepsilon$  verimi, N pik altındaki net alanı, LT canlı süreyi (sn), TT gerçek süreyi (sn), A aktiviteyi (Bq), ve I şiddeti sembolize etmektedir.

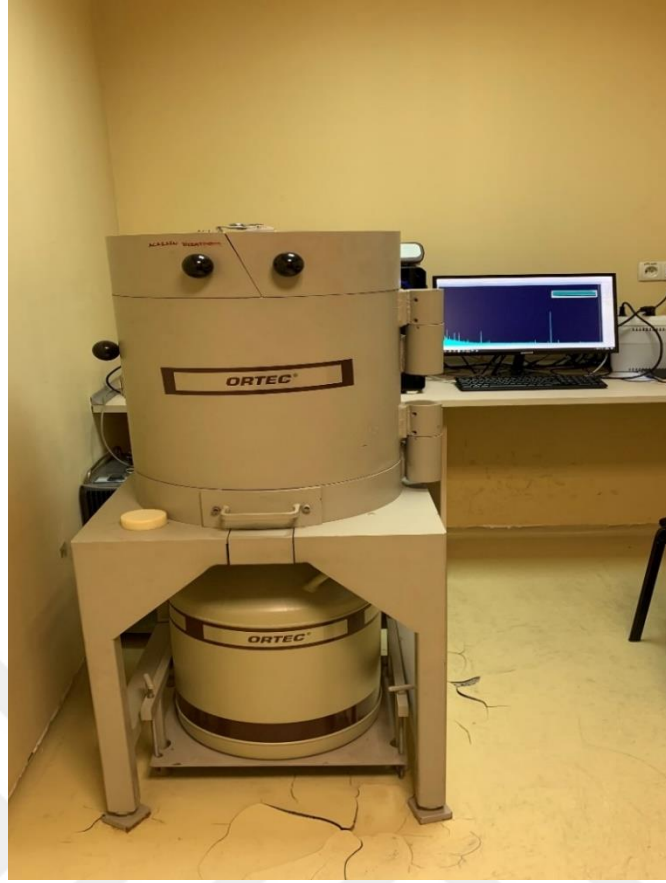
Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da Canberra ve Ortec detektörleri gösterilmiştir.

Her bir pik için verim değeri hesaplanmıştır. Sonrasında, bulunan verim değerleri ile bir verim eğrisi oluşturulmak için denklem 3.2'de belirtilen fonksiyon kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \exp(\sum_{l=0}^4 (a_l (\ln(E))^l)) \quad (3.2)$$



**Şekil 3.9 :** Canberra detektörü.



**Şekil 3.10 :** Ortec dedektörü.

Çizelge 3.8 ve 3.9’da 2 dedektör içinde çözüm parametreleri verilmiştir.

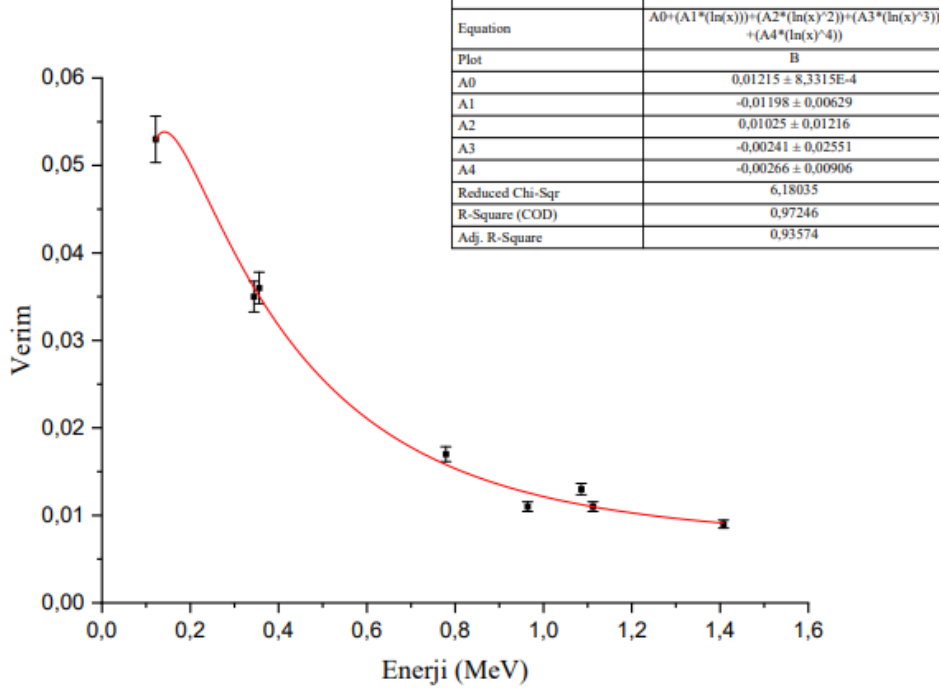
**Çizelge 3.8 :** Canberra dedektörü verim eğrisi parametreleri.

| Dedektör | Parametre | Değer    |
|----------|-----------|----------|
| Canberra | A0        | 0,01215  |
|          | A1        | -0,01198 |
|          | A2        | 0,010257 |
|          | A3        | 0,00241  |
|          | A4        | -,00266  |

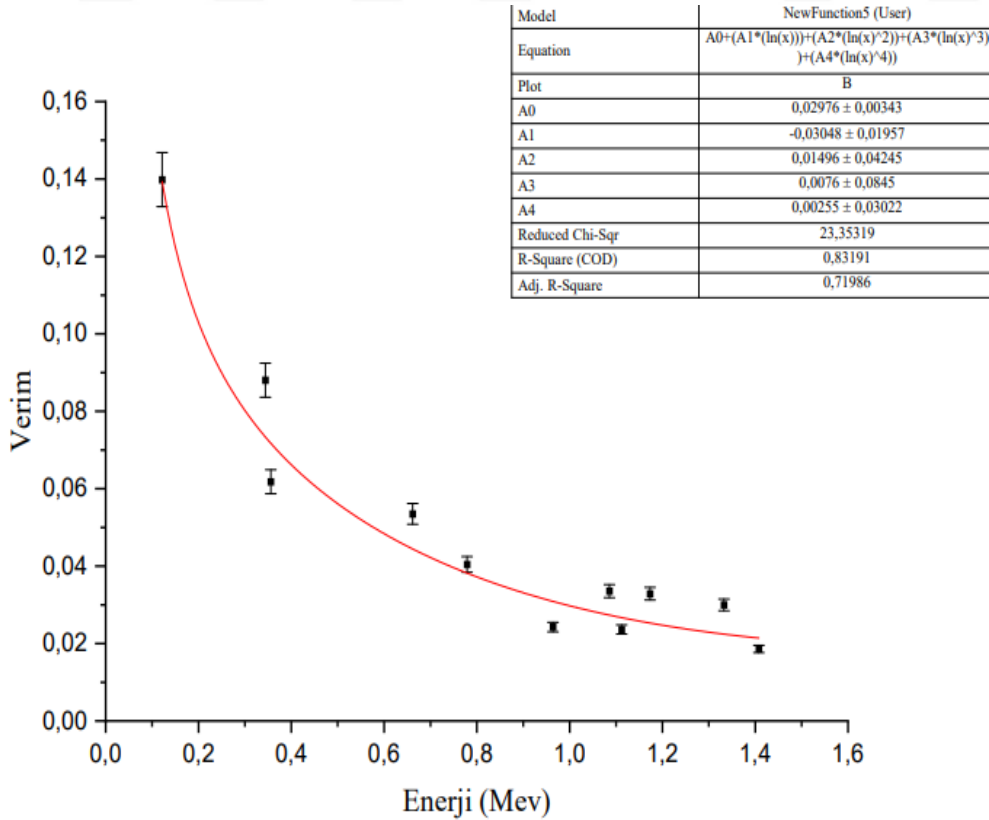
**Çizelge 3.9 :** Ortec dedektörü verim eğrisi parametreleri.

| Dedektör | Parametre | Değer    |
|----------|-----------|----------|
| Ortec    | A0        | 0,029764 |
|          | A1        | -0,03048 |
|          | A2        | 0,01496  |
|          | A3        | 0,0076   |
|          | A4        | 0,00255  |

Gama ışını enerjisine bağlı verim değerleri, denklem 3.2 deki fonksiyona göre uyum eğrisinin oluşturulması için OriginPRO programı ile hesaplanmıştır. Şekil 3.11 ve 3.12’de iki dedektör içinde verim eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.11 : Canberra dedektörü verim eğrisi.



Şekil 3.12 : Ortec dedektörü verim eğrisi.

### 3.3 Gamma Işını Spektrum Analizi

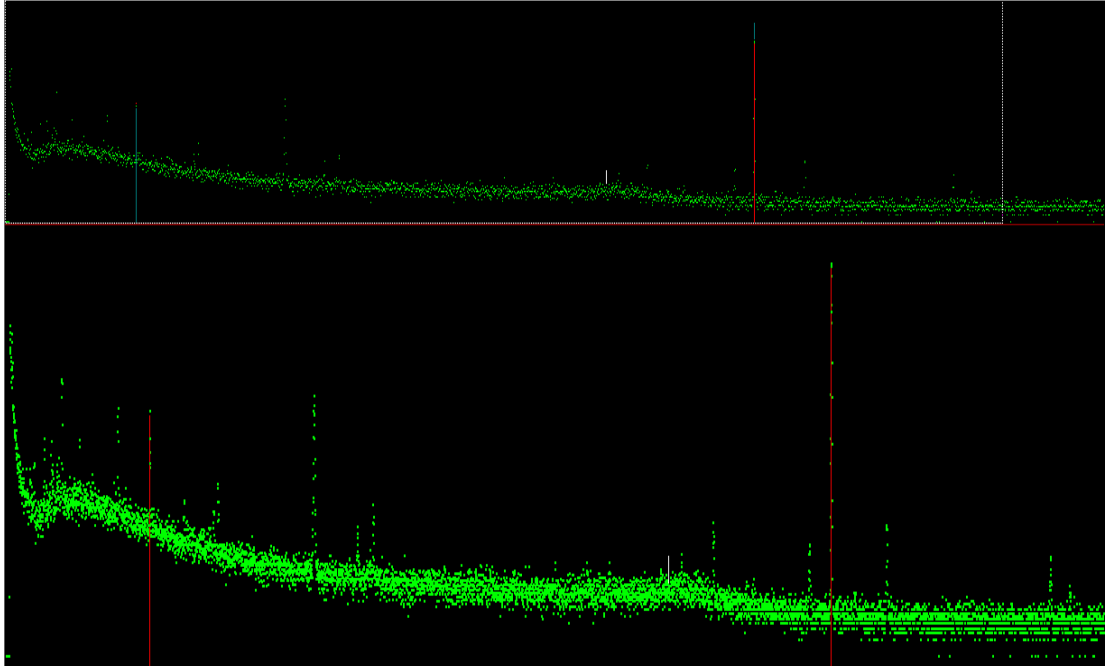
Her folyo seti için gama spektrum analizi yapılmıştır, 3 folyoda jeneratörün maksimum ayarında (70  $\mu$ A, 90 kV) 3 saat boyunca ışınlanmıştır. Çizelge 3.10'da reaksiyonların pik altındaki alanları listelenmiştir.

**Çizelge 3.10** : Işınlanma reaksiyonlarının pik altındaki alanları.

| Reaksiyon                                   | $E_{\gamma}$ (keV) | Pik altındaki alan |
|---|--------------------|--------------------|
| $^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$ | 1369               | 4480               |
| $^{90}\text{Zr} (n,2n) ^{89}\text{Zr}$      | 909                | 22982              |
| $^{93}\text{Nb} (n,2n) ^{92m}\text{Nb}$     | 934                | 14634              |

#### 3.3.1 Alüminyum

Alüminyum folyoları 3 saat boyunca ışınlanmıştır. Folyolar nötron jeneratörünün merkezine konumlandırılmıştır. Folyolar ışınlama bittikten hemen sonra Ortec dedektörüne alınmış ve 26,57 saat boyunca sayılmışlardır. Alüminyum, doğada %100 oranda Al-27 olarak bulunmaktadır. [13] Bu deneyde Al-27 (n,  $\alpha$ ) Na-24 reaksiyonundan oluşan ( $T_{1/2}=14.997$  saat) 1368,626 keV piki ortalama nötron akısını bulmak için kullanılmıştır. Şekil 3.13'de Alüminyum folyosu gama ışını spektrumunu gösterilmiştir.



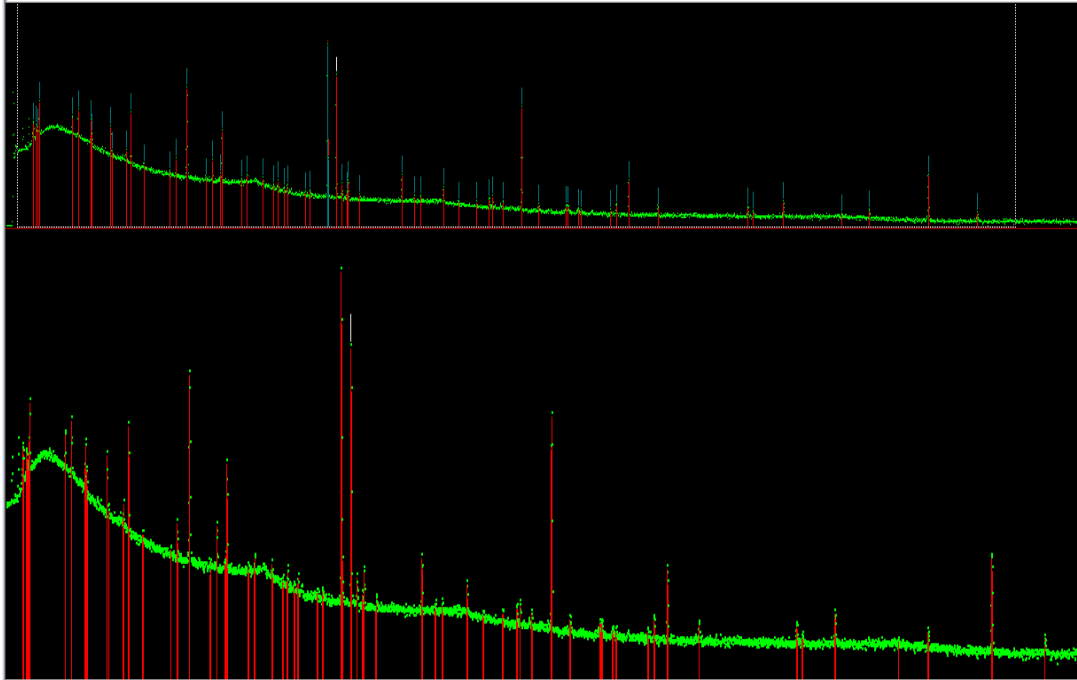
**Şekil 3.13** : Alüminyum folyosu gama ışını spektrumu (Ortec dedektörü).

### 3.3.2 Zirkonyum

Zirkonyum folyoları 3 saat boyunca ışınlanmıştır. Folyolar nötron jeneratörünün merkezine konumlandırılmıştır. Folyolar ışınlama bittikten hemen sonra Canberra dedektörüne alınmış ve 48 saat boyunca sayılmışlardır. Bu deneyde Zr-90 (n,2n) Zr-89 ( $T_{1/2}=78,41$  saat) reaksiyonundan oluşan 909,15 keV piki kullanılmıştır. Zr-90 elementinin doğal bolluk oranı %51,45'dir. 9 MeV'den yüksek enerjilerdeki (n,2n) reaksiyonu için tesir kesiti yüksektir. Bu özelliği ile D-T nötron aktivasyon analizi için çok uygun bir elementtir. [13]

### 3.3.3 Neobyum

Neobyum folyoları 3 saat boyunca ışınlanmıştır. Folyolar nötron jeneratörünün merkezine konumlandırılmıştır. Folyolar ışınlama bittikten hemen sonra Canberra dedektörüne alınmış ve 48 saat boyunca sayılmışlardır. Bu deneyde Nb-93 (n,2n) Nb-92m ( $T_{1/2}=10,15$  gün) reaksiyonundan oluşan 934 keV piki kullanılmıştır. Nb-93 elementinin doğal bolluğu %100'dür. 9 MeV'den yüksek enerjilerdeki (n,2n) reaksiyonu için tesir kesiti yüksektir. Bu özelliği ile D-T nötron aktivasyon analizi için çok uygun bir elementtir. Şekil 3.14'de Nb ve Zr folyolarının Canberra dedektör spektrumları gösterilmiştir. [13]



Şekil 3.14 : Nb ve Zr spektrumu (Canberra dedektörü).

### 3.4 Ortalama Nötron Enerjisi Hesabı

Spektrum analizleri yapıldıktan sonra, bulunan değerler denklem 3.3'de gösterilen R denklemine yerleştirilerek deneyin R değeri hesaplanmıştır.

$$R = \frac{[P(909 \text{ keV}).G(\text{Nb}).A(\text{Zr}).h(\text{Nb}_{93}).Z(\text{Nb}_{92m}).f(934 \text{ keV}).\varepsilon(934 \text{ keV})]}{[P(934 \text{ keV}).G(\text{Zr}).A(\text{Nb}).h(\text{Zr}_{90}).Z(\text{Zr}_{89}).f(909 \text{ keV}).\varepsilon(909 \text{ keV})]} \quad (3.3)$$

Bu denklemde P pik altındaki net alanı, G elementin kütlesini (gr), A atomik ağırlığı (g/mol), H bolluğu, F gama ışını şiddetini,  $\varepsilon$  verimi, ve Z parametresi denklem 3.4'ü temsil etmektedir.

$$Z = \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - e^{(-\lambda t_i)}) \cdot e^{(-\lambda t_c)} \cdot (1 - e^{(-\lambda t_m)}), \quad (3.4)$$

Çizelge 3.11'de R denklemine yerleştirilen parametrelerin değerleri denklem 3.2 için gösterilmektedir. R denklemi Zr ve Nb spektrumunu kullanılarak denklem 3.4 ile  $1,3629 \pm \%4.44$  olarak hesaplanmıştır. Ortalama nötron enerjisi ise denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_n = 0,34562R^2 + 0,752R + 12,55 \quad (3.5)$$

1,3629 olarak hesaplanan **R** değeri denklem 3.5'e yerleştirildiğinde ortalama nötron enerjisi ThermoFisher MP320 için beklendiği gibi 14,22 MeV olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.11 : R denklemi parametreleri.**

| Parametre                  | Değer   | Belirsizlik (%) |
|----------------------------|---------|-----------------|
| P (909 keV)                | 22982   | 0,66            |
| P (934 keV)                | 14634   | 0,83            |
| G (Nb)(gr)                 | 0,1408  | 0,1             |
| G (Zr)(gr)                 | 0,111   | 0,1             |
| A (Zr)(g/mol)              | 91,224  |                 |
| A (Nb)(g/mol)              | 92,9    |                 |
| h (Nb)                     | 1       |                 |
| h (Zr)                     | 0,52    | 0,77            |
| Z (Nb)                     | 1372    | 0,1             |
| Z (Zr)                     | 3684    | 0,1             |
| f (Nb)                     | 0,99    |                 |
| f (Zr)                     | 1       |                 |
| $\varepsilon$ (Nb 934 keV) | 0,01301 | 3               |
| $\varepsilon$ (Zr 909 keV) | 0,01338 | 3               |

### 3.5 Ortalama Nötron Akısı Hesabı

Jeneratörün ortalama nötron akısını hesaplamak için denklem 3.6 kullanılmıştır.

$$\phi = \frac{\left(P \cdot \frac{TT}{LT}\right)}{\sigma(14,22 \text{ MeV}) \cdot C \cdot \frac{N}{A} \cdot h \cdot \varepsilon \cdot Z \cdot f \cdot G} \quad (3.6)$$

Denklemdaki P pik altındaki net alanı, TT gerçek süreyi (sn), LT yaşam süresini (sn),  $\sigma$  14,22 MeV'deki tesir kesitini, C konsantrasyonu, N Avogadro sayısını, A atomik ağırlığı (gr), H izotopik bolluğu,  $\varepsilon$  verimi, F gama ışını şiddeti, G kütleyi (gr),  $T_{1/2}$  yarı Ömürü,  $T_i$  ışınlanma süresini,  $T_c$  soğuma süresini,  $T_m$  ölçüm süresini ve Z parametresi denklem 3.4'ü sembolize etmektedir.

Çizelge 3.12'de nötron akısını hesaplamak için kullanılan parametrelerin değerleri gösterilmiştir.

**Çizelge 3.12 : Nötron akısı denklemi parametreleri.**

| Parametre        | Değer     |
|------------------|-----------|
| P (1369 keV)     | 4480      |
| TT               | 95675 s   |
| LT               | 95632 s   |
| $\sigma$         | 1,20E-25  |
| C                | 1         |
| Na               | 6,22E+23  |
| A                | 26,981 gr |
| G                | 0,016 gr  |
| h                | 1         |
| Verim (1369 keV) | 0,02192   |
| Z                | 7128,6926 |
| F                | 1         |

MP320 nötron jeneratörünün ortalama nötron akısını hesaplamak için Alüminyum folyolarının oluşturduğu spektrum kullanılmıştır. Nötron akısı 670525,58 n/cm<sup>2</sup>.s olarak hesaplanmıştır.

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ThermoFisher markalı MP320 model nötron jeneratörünün ortalama nötron enerjisi ve ortalama nötron akısı çoklu folyo aktivasyon analizi ile deneysel olarak hesaplanmıştır. Al-27, Zr-89, Nb-93 elementlerinin folyoları İTÜ Triga Mark II reaktörü sınırlandırılmış sahasında, 3 saat boyunca nötron jeneratörünün hedef merkezine yapıştırılarak beraber olarak ışınlanmıştır. Nötron jeneratörü ışınlamayı yaparken maksimum ayarında çalıştırılmıştır (70  $\mu$ A, 90 kV). Işınlamasını biten folyolar Canberra ve Ortec markalı gamma ışını detektörlerine götürülerek, sayılmışlardır. Al-27 folyosu 26,57 saat boyunca Ortec markalı detektörde sayılmıştır. Nb-93 ve Zr-89 folyoları ise Canberra markalı detektörde 48 saat boyunca sayılmışlardır. Deneyin analizinde Zr-89 elementinden oluşan 909 keV, Nb-93 elementinden oluşan 934 keV ve Al-27 elementinden oluşan 1369 keV pikleri kullanılmıştır.

İki detektörün de verim kalibrasyonları için Ba-133, Co-60, Cs-137, Eu-152, Am-241 standart folyo kaynaklar kullanılmıştır. Ayrıca iki detektörün verim eğrisini oluşturmak için de OriginPRO programı kullanılmıştır.

Detektörlerin verim eğrileri oluşturulup, verilen piklerdeki verim değerleri bulunmuştur. Sonrasında ortalama nötron enerjisini bulmak için denklem 3.3 kullanılarak R değerleri hesaplanmıştır. Çıkan R değeri denklem 3.4 kullanılarak, ortalama nötron enerjisi hesaplanmıştır. Bulunan ortalama nötron enerji değeri 14,22 MeV'dir.

Ortalama nötron akısı ise denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmış ve  $6,70 \times 10^5$  (n/cm<sup>2</sup>sn) olarak bulunmuştur.

Bu çalışma İTÜ Triga Mark II reaktörü sınırlandırılmış sahasında bulunan ThermoFisher marka MP320 model nötron jeneratörü cihazı için ilk defa yapılmıştır. Ayrıca, bu çalışmaya ortalama nötron akı hesabı da katılarak diğer çalışmalara nazaran genişletilmiştir. Ek olarak bu çalışmaya simülasyon verileride eklenerek, çalışmanın kapsamı daha genişletilebilir. ThermoFisher MP320 jeneratörü endüstride sıklıkla

kullanılan bir model olsa dahi literatürde jeneratörü açıklayıcı çok fazla çalışma mevcut değildir. Yapılan diğer çalışmalarda olduğu gibi, ışınlanan folyo sayısı, ışınlama süresi ve sayım süreleri artırılarak bulunan verilerin hassasiyeti artırılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Esen A. N.** (2015). *İTÜ TRIGA Mark II araştırma reaktöründe enstrümental nötron aktivasyon analizi bağıl ve k0 standardizasyon yöntemlerinin çevresel örneklerle uygulanması.* (Doktora tezi, tez no:418945).
- [2] **Doğan, C.** (2015). *Nötron aktivasyon analizi ile Meriç Havzası örnekleri incelenmesi* (yüksek lisans tezi). (tez.yok.gov.tr, tez no:382471)
- [3] **Knoll, G. F.** (2000). *Radiation detection and measurement* (3rd ed). Wiley.
- [4] **Saheli, F., Shahabinejad, H., Vosoughi, N.** (2020). *Energy, Matrix effects corrections in prompt gamma-ray spectra of a PGNAA online analyzer system using artificial neural network*, Progress in Nuclear, 118, 10.1016/j.pnucene.2019.103146
- [5] **Reyhancan, İ. A.** *Radyasyon fiziği* [PDF Belgesi]. Ders notu. (2021).
- [6] **Kurtar, N.** (2018). *Bir yüksek saflıklı germanyum detektörünün Monte Carlo metodu ile simülasyonu ve verim kalibrasyonu.* (Yüksek lisans tezi). (tez.yok.gov.tr, tez no:518976)
- [7] **Aykaç, A.** *Radyasyon* [PDF Belgesi]. Ders notu online website: 23.04.2023 tarihinde [http://docs.neu.edu.tr/staff/asli.aykac/Radyasyon-1\\_36.pdf](http://docs.neu.edu.tr/staff/asli.aykac/Radyasyon-1_36.pdf) adresinden erişildi.
- [8] **Baytaş A. F.** *Radyasyon algılama ve ölçme* [PDF belgesi]. Ders notu (2021)
- [9] **Yücel, H.** *Nötron ve reaktör fiziğine giriş* [PDF Belgesi]. Ders notu online web site: 06.05.2020 tarihinde ANKARA ÜNİVERSİTESİ NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ NÖTRON VE REAKTÖR FİZİĞİNE GİRİŞ 101513 NÖTRON VE REAKTÖR FİZİĞİNE GİRİŞ PROF. DR. HALUK YÜCEL (9lib.net) adresinden erişildi.
- [10] **Turner, J.E.,** (2007). *Atoms, radiation and radiation protection* (3rd ed. Completely rev. And enl.). Wiley-VCH
- [11] **Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J.** (2001). *Introduction to nuclear engineering* (3rd ed). Prentice Hall.
- [12] **Erbay O.** (2021). *Determination of Boron in Tinkal Ore by prompt gamma neutron activation analysis method* (yüksek lisans tezi).(tez.yok.gov.tr,tez no: 705323).
- [13] **Lee D., Bucher B., Krebs K., Seabury E., Wharton J.** (2019). *Determination of the Deuterium-Tritium (D-T) generator neutron flux using multi-foil neutron activation analysis method*, Idaho National Laboratory. INL/EXT-19-53812
- [14] **Csikai J.** (1988) *Handbook fast neutron generators (volume I)*. CRC Press

[15] **Yüksel B.** (2018).*Yüksek çözünürlüklü fosfor ekran temelli X-ışınları radyografi detektörünün geliştirilmesi*, Proje raporu, Tübitak (Proje no:113E985)



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Ayşe KARAKAYA

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Piri Reis üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019, İstanbul Tersanesi, pazarlama ve planlama mühendisi
- 2021-2022, DB Schenker Arkas, Operasyon mühendisi
- 2022-Halen, Borusan CAT, ürün mühendisi

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLMİŞ YAYINLAR:

- International Graduate Student Research Symposium, 1-3 Haziran 2022, Online.