

**PASİF NÖTRON DOZ ÖLÇÜM SİSTEMLERİNİN MONTE  
CARLO YÖNTEMİ İLE BENZEŞİMİ**

**SIMULATION OF PASSIVE NEUTRON DOSIMETER  
SYSTEMS WITH MONTE CARLO METHOD**

**UĞUR KARAKURT**

**PROF. DR. MEHMET TOMBAKOĞLU**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

## ÖZET

# PASİF NÖTRON DOZ ÖLÇÜM SİSTEMLERİNİN MONTE CARLO YÖNTEMİ İLE BENZEŞİMİ

**Uğur KARAKURT**

**Yüksek Lisans, Nükleer Enerji Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU**

**Ocak 2021, 77 sayfa**

Bu çalışmada, termal ve hızlı nötronlardan kaynaklanan kişisel eşdeğer nötron dozunun belirlenmesi için kullanılan iki farklı CR-39 pasif nötron doz ölçüm sisteminin, Monte Carlo yöntemi ile benzeşimlerinin yapılması amaçlanmıştır. Monte Carlo yöntemi kullanılarak bu dozimetre sistemlerinin akı ve eşdeğer doz tepkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Dozimetre sistemlerindeki nötron etkileşimlerinin benzeşimlerinde geliştirilen Monte Carlo kodu, nötron etkileşimleri sonucu oluşan ikincil yüklü parçacıkların etkileşimlerinin benzeşimlerinde ise SRIM yazılımı kullanılmıştır. İkincil yüklü parçacıkların dozimetre sistemindeki malzemelerle etkileşimleri sonucu oluşan izlerin kimyasal aşındırması literatürdeki modeller kullanılarak yapılmıştır. Termal nötron dozimetresinin eşdeğer doz tepkisi, Maxwell enerji dağılımına sahip nötronlar için belirlenmiştir. Hızlı nötron dozimetresinin eşdeğer doz tepkisi ise  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için belirlenmiştir. Hızlı nötronlardan kaynaklanan eşdeğer dozu belirlemek için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin uzunluklarının dağılımı kullanılmıştır. Bunlara ek olarak farklı kimyasal aşındırma süreleri için CR-39 hızlı nötron dozimetresinin akı tepkisi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Monte Carlo, CR-39, Termal Nötron Dozimetresi, Hızlı Nötron Dozimetresi.

## **ABSTRACT**

# **SIMULATION OF PASSIVE NEUTRON DOSIMETER SYSTEMS WITH MONTE CARLO METHOD**

**Uğur KARAKURT**

**Master of Science, Department of Nuclear Energy Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU**

**January 2021, 77 pages**

The aim of this work is to make Monte Carlo simulations of two different CR-39 passive neutron dosimeter systems used to measure of personal dose equivalents of thermal and fast neutrons. Determination of fluence response and equivalent dose response of these dosimeter systems by using Monte Carlo method were aimed. Neutron interactions within CR-39 dosimeter systems were simulated with the Monte Carlo code developed. Interactions of secondary charged particles with dosimeter materials were simulated by the aid of SRIM software. Chemical etching of tracks formed as a result of charged particle interactions within dosimeter materials were performed by using models present in literature. The equivalent dose response of thermal neutron dosimeter was determined for neutrons have Maxwellian energy distribution. Equivalent dose response of fast neutron dosimeter was determined for  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron source. The equivalent dose of fast neutrons was found by using track length distributions within CR-39 material. Moreover, the fluence response of fast neutron dosimeter was investigated as a function of chemical etching time.

**Keywords:** Monte Carlo, CR-39, Thermal Neutron Dosimeter, Fast Neutron Dosimeter.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, daima bana yol gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU'na,

Tez savunma jürimde yer alan Sayın Prof. Dr. Ayhan YILMAZER'e, Sayın Prof. Dr. Cemil KOCAR'a, Sayın Prof. Sıddık Sinan KESKİN'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Erol ÇUBUKÇU'ya,

Sonsuz teşekkürler...

Uğur KARAKURT

Ocak 2021, Ankara

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Katıhal Nükleer İz Dedektörleri .....	3
2.1.1 Katıhal Nükleer İz Dedektörlerinin Tarihçesi .....	3
2.1.2 Katıhal Nükleer İz Dedektörlerinin Çalışma Prensipleri.....	3
2.1.3 Nötron Dozimetrisinde Kullanılan Katıhal Nükleer İz Dedektörleri .....	4
2.2 CR-39 Dozimetresinde Gerçekleşen Önemli Nötron Etkileşimleri .....	4
2.2.1 Esnek Saçılma .....	4
2.2.2 Esnek Olmayan Saçılma.....	5
2.2.3 Yüklü Parçacık Tepkimeleri.....	5
2.3 İz Oluşumu .....	5
2.3.1 Durdurma Kuvveti ve Sınırlı Enerji Kaybı (SEK) .....	6
2.3.2 Kimyasal Aşındırma İşlemi.....	7
2.3.2.1 Yığın Aşındırma Hızı .....	7
2.3.2.2 İz Aşındırma Hızı .....	8
2.3.3 İz Oluşumunun Geometrisi .....	10
2.4 Görünür İzlerin Belirlenmesi .....	12
2.4.1 Kritik Aşındırma Açısı .....	12
2.4.2 Aynı Yönlü ve Zıt Yönlü Kimyasal Aşındırma .....	13
2.4.3 Görünür İz Uzunluğu .....	15
2.4.3.1 Aynı Yönlü Aşındırılan İzler.....	15
2.4.3.2 Zıt Yönlü Aşındırılan İzler .....	18
2.5 Benzeşimlerde Kullanılacak Nötron Kaynakları.....	21
2.6 Kişisel Eşdeğer Doz .....	22

2.7 Kişisel Nötron Dozimetrelerinin Akı ve Eşdeğer Doz Tepkileri.....	23
3. TERMAL NÖTRON DOZİMETRESİNİN BENZEŞİMİ .....	25
3.1 Termal Nötron Etkileşmelerinin Benzeşimi .....	26
3.2 Yüklü Parçacık Etkileşmelerinin Benzeşimi .....	29
3.3 Görünür İz Hesaplamaları.....	33
3.4 Termal Nötron Dozimetresinin Tepkisinin Hesaplanması .....	34
4. HIZLI NÖTRON DOZİMETRESİNİN BENZEŞİMİ .....	36
4.1 Hızlı Nötron Etkileşmelerinin Benzeşimi.....	37
4.2 Proton Etkileşmelerinin Benzeşimi .....	42
4.3 Görünür İzlerin Belirlenmesi .....	46
4.3.1 Aynı Yönlü Kimyasal İz Aşındırması .....	47
4.3.2 Zıt Yönlü Kimyasal İz Aşındırması.....	48
4.4 Hızlı Nötron Dozimetresinin Tepkisinin Hesaplanması.....	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
5.1 Sonuçlar .....	61
5.1.1 Termal Nötron Dozimetresinin Tepkisi.....	61
5.1.2 Hızlı Nötron Dozimetresinin Tepkisi .....	63
5.2 Öneriler .....	67
6. KAYNAKLAR .....	68
EKLER.....	70
EK 1 - Hızlı Nötron Dozimetresi için İz Uzunluklarının Dağılımları .....	70
EK 2 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu.....	76
ÖZGEÇMİŞ .....	77

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Dedektör yüzeyinden dik açıyla giren bir iyonun oluşturduğu izin kimyasal aşındırma sırasında gelişim aşamaları.....	10
Şekil 2.2.	Dedektör yüzeyinden eğik açıyla giren bir iyonun oluşturduğu izin kimyasal aşındırma işlemi sırasında gelişim aşamaları.....	11
Şekil 2.3.	Kritik aşındırma açısının belirlenmesi için iz aşındırmasının temsili.....	12
Şekil 2.4.	Katıhal nükleer iz dedektörlerinde aynı yönlü iz aşındırması.....	14
Şekil 2.5.	Katıhal nükleer iz dedektörlerinde zıt yönlü iz aşındırması. ....	15
Şekil 2.6.	Aynı yönlü aşındırma işleminde iz geometrisinin gelişimi. ....	16
Şekil 2.7.	Dedektör malzemesinin dışında duran bir yüklü parçacıktan kaynaklanan izin zıt yönlü aşındırılması.....	18
Şekil 2.8.	Dedektör malzemesinin içerisinde duran bir yüklü parçacıktan kaynaklanan izin zıt yönlü aşındırılması.....	20
Şekil 2.9.	<sup>241</sup> Am-Be nötron kaynağının spektrumu [13]. ....	21
Şekil 3.1.	Benzeşimlerde kullanılacak olan CR-39 termal nötron dozimetresinin geometrisi.....	25
Şekil 3.2.	Termal nötron dozimetresinin benzeşim aşamaları. ....	26
Şekil 3.3.	Küresel koordinat sisteminde birim yön vektörü.....	28
Şekil 3.4.	LiF malzemesinden CR-39 malzemesine geçen bir iyonun bıraktığı iz. ...	30
Şekil 3.5.	LiF ve CR-39 malzemelerinin yüzeyleri.....	32
Şekil 4.1.	Benzeşimlerde kullanılacak olan CR-39 hızlı nötron dozimetresinin geometrisi.....	36
Şekil 4.2.	Hızlı nötron dozimetresinin benzeşim aşamaları. ....	37
Şekil 4.3.	Polietilen ve CR-39 malzemelerinde protonların bıraktıkları izler.....	43
Şekil 4.4.	Polietilen ve CR-39 malzemelerinin yüzeyleri. ....	44
Şekil 4.5.	10 <sup>-6</sup> – 1,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı. ....	52
Şekil 4.6.	1,0 – 2,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı. ....	52
Şekil 4.7.	2,0 – 3,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı. ....	53
Şekil 4.8.	3,0 – 4,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı. ....	53
Şekil 4.9.	4,0 – 5,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı. ....	54

Şekil 4.10.	5,0 – 6,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.....	54
Şekil 4.11.	6,0 – 7,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.....	55
Şekil 4.12.	7,0 – 8,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.....	55
Şekil 4.13.	8,0 – 9,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.....	56
Şekil 4.14.	9,0 – 10,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.....	56
Şekil 4.15.	10,0 – 11,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.....	57
Şekil 4.16.	<sup>241</sup> Am-Be nötron kaynağı için iz uzunluklarının dağılımı.....	57
Şekil 5.1.	<sup>241</sup> Am-Be nötron kaynağının enerji dağılımı.....	64
Şekil 5.2.	Kimyasal aşındırma süresinin fonksiyonu olarak CR-39 hızlı nötron dozimetresinin akı tepkisi.....	66



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. CR-39 dedektörü için aşındırıcı çözelti sıcaklığına göre yığın aşındırma hızı [9].	8
Çizelge 2.2. CR-39 dedektörü için NaOH ve KOH aşındırıcı çözeltilerinin derişimine göre yığın aşındırma hızı [9].	8
Çizelge 2.3. Proton, döteron, triton ve alfa parçacığı için Eşitlik 2.1'deki parametrelerin değerleri [11].	9
Çizelge 2.4. Tek enerjili nötronlar için $h_{p\phi}(10,E,\alpha)$ katsayıları [14].	23
Çizelge 2.5. Çeşitli radyonüklit nötron kaynakları için $h_{p\phi}(10,E,\alpha)$ katsayıları [14].	23
Çizelge 3.1. Termal nötron dozimetre sisteminin geometrik ve malzeme özellikleri.	25
Çizelge 4.1. Hızlı nötron dozimetre sisteminin geometrik ve malzeme özellikleri.	36
Çizelge 4.2. Farklı nötron enerji grupları için CR-39 malzemesindeki maksimum iz uzunlukları ve nötron başına iz sayıları.	51
Çizelge 4.3. $^{241}\text{Am}$ -Be nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin uzunluklarının dağılımı.	58
Çizelge 4.4. Monte Carlo benzeşimleri sonucunda elde edilen $^{241}\text{Am}$ -Be nötron kaynağının enerji dağılımı.	59
Çizelge 5.1. Termal nötronlar için Monte Carlo benzeşimlerinin sonuçları.	61
Çizelge 5.2. Yüklü parçacık başına oluşan görünür iz sayıları	62
Çizelge 5.3. CR-39 termal nötron dozimetresinin benzeşim sonuçları.	62
Çizelge 5.4. $^{241}\text{Am}$ -Be nötron kaynağı için CR-39 hızlı nötron dozimetresinin benzeşim sonuçları.	64
Çizelge 5.5. Farklı kimyasal aşındırma sürelerine göre CR-39 dozimetresinin $^{241}\text{Am}$ -Be nötron kaynağı için akı ve eşdeğer doz tepkileri.	65
Çizelge E.1. $10^{-6} - 1,0$ MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.	70
Çizelge E.2. $1,0 - 2,0$ MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.	70
Çizelge E.3. $2,0 - 3,0$ MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.	71
Çizelge E.4. $3,0 - 4,0$ MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.	71
Çizelge E.5. $4,0 - 5,0$ MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.	72
Çizelge E.6. $5,0 - 6,0$ MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.	72

Çizelge E.7. 6,0 – 7,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı. ....	73
Çizelge E.8. 7,0 – 8,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı. ....	73
Çizelge E.9. 8,0 – 9,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı. ....	74
Çizelge E.10. 9,0 – 10,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı. ....	74
Çizelge E.11. 10,0 – 11,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı. ....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$R_L$	Aşındırılan yüzey kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
$R$	Yüklü parçacığın menzili ( $\mu\text{m}$ )
$R'$	Artakalan menzil ( $\mu\text{m}$ )
$V_b$	Yığın aşındırma hızı ( $\mu\text{m/saat}$ )
$V_t$	İz aşındırma hızı ( $\mu\text{m/saat}$ )
$\theta_c$	Kritik aşındırma açısı
$L$	Aşındırıcı çözeltinin iz boyunca nüfuz ettiği mesafe ( $\mu\text{m}$ )
$\rho$	Dozimetre yüzeyindeki görünür iz yoğunluğu ( $\text{iz}/\text{cm}^2$ )
$R_\phi$	Dozimetrenin akı tepkisi ( $\text{iz}/\text{nötron}$ )
$R_H$	Dozimetrenin eşdeğer doz tepkisi ( $\text{iz} / \text{cm}^2.\text{mSv}$ )
$H_p(10)$	Kişisel eşdeğer doz ( $\text{mSv}$ )
$h_{p\phi}(10)$	Nötron akısından kişisel eşdeğer doza dönüşüm katsayısı ( $\text{pSv}.\text{cm}^2$ )

### Kısaltmalar

CR-39	Columbia Resin #39
LiF	Lityum Florür
SEK	Sınırlı Enerji Kaybı
LET	Lineer Enerji Transferi
akb	atomik kütle birimi

# 1. GİRİŞ

Nükleer araştırma merkezleri, nükleer güç santralleri ve radyoterapi merkezleri vb. yerlerde çalışanların maruz kaldıkları radyasyon dozunun ölçümü, çalışanların anlık ve uzun vadede aldıkları radyasyon dozlarının insan sağlığı açısından olası risklerini belirlemede ve kontrol etmede büyük öneme sahiptir. Bu amaçla gama ışınlarının yanı sıra nötronlardan kaynaklı eşdeğer doz değerlerinin ölçümü de gereklidir.

Nötronlardan kaynaklanan kişisel doz eşdeğerinin belirlenmesinde katihal nükleer iz dedektörleri olarak bilinen pasif doz ölçüm sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler oldukça pratik ve ucuzdur, aynı zamanda nötron etkileşimlerinden ortaya çıkan geritepki çekirdekleri, proton, alfa, fisyon ürünleri gibi ağır yüklü parçacıklara karşı yüksek duyarlılığa sahipken beta parçacıkları, X-ışınları ve gama-ışınları için duyarsızdırlar. Ayrıca bu dozimetreler; sıcaklık, basınç, nem vb. atmosferik durumlardaki değişimlerden çok fazla etkilenmezler.

Nötronlar malzeme içerisinde doğrudan iyonizasyona yol açmadığı için nötron dozu, nötron etkileşimleri sonucu ortaya çıkan geritepki çekirdekleri ve ikincil yüklü parçacıklar aracılığıyla ölçülebilir. Katihal nükleer iz dedektörleri, bu ağır yüklü parçacıkların dedektör malzemesinde iyonizasyon ve uyarılma sonucu oluşturduğu hasarlı bölgelerin, izlerin, kimyasal olarak agresif (aşındırıcı) çözeltilere maruz bırakılması sonucu optik olarak görünür izlerin oluşturulması ilkesine dayalı olarak çalışmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, termal ve hızlı nötron eşdeğer doz değerlerini ölçen CR-39 dozimetrelerinin Monte Carlo benzeşiminin yapılmasıdır. Bu çalışmada kullanılacak olan yöntem, bu tip dozimetrelerin deneysel çalışma yapmadan geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca CR-39 malzemesinde oluşan izlerin uzunluklarının dağılımı kullanılarak hızlı nötronlardan kaynaklanan kişisel eşdeğer dozun belirlenmesinde kullanılacak bir yöntem de geliştirilecektir.

Termal nötronların enerjileri çok düşük olduğu için CR-39 malzemesine yeterli miktarda hasar bırakacak, iz oluşturacak, ikincil yüklü parçacıklar üretme olasılığı çok düşüktür. Bu yüzden termal nötron dozimetresinde bir  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$  veya  ${}^{14}_7\text{N}$  gibi izotoplardan birisini

içeren bir dönüştürücü malzeme kullanılarak izlerin oluşması sağlanmaktadır. Bu izotoplar, termal nötron enerjilerinde yüksek nötron soğurma tesir kesitine sahiptir ve soğurma reaksiyonu sonucunda ağır yüklü parçacıklar oluşur. Hızlı nötron enerjilerinde ise CR-39 malzemesinde esnek saçılma reaksiyonları sonucu oluşan yüklü geritepki çekirdekleri, özellikle protonlar, izlerin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Ayrıca hızlı nötron dozimetrelerinin tepkisini artırmak ve dedektörün açısal bağımlılığını azaltmak için CR-39 malzemesinin önüne polietilen gibi yüksek miktarda hidrojen içeren malzemeler eklenmektedir.

Bu çalışmada termal ve hızlı nötronlardan kaynaklanan eşdeğer nötron dozunu ölçen iki farklı CR-39 dozimetre sisteminin Monte Carlo benzeşimi yapılacaktır. Bu amaçla geliştirilen Monte Carlo kodu, dozimetre sistemindeki nötron etkileşimlerinin Monte Carlo benzeşimlerinde kullanılacaktır. Nötron etkileşimleri sonucunda oluşan yüklü parçacıkların dozimetre sisteminde bulunan malzemelerdeki etkileşimlerinin Monte Carlo benzeşiminde ise SRIM yazılımı kullanılacaktır. Yüklü parçacıkların dedektör sistemindeki etkileşimleri sonucunda CR-39 malzemesinde oluşan izler; NaOH, KOH gibi kimyasallar içeren çözeltiler kullanılarak aşındırılırlar. İz aşındırması için literatürde verilen modeller kullanılarak kimyasal aşındırma işlemi sanal ortamda modellenecektir.

Kimyasal aşındırma işlemi sonucunda CR-39 malzemesinin yüzeyinde oluşan görünür izlerin yoğunluğu kullanılarak CR-39 dozimetrelerinin tepkileri belirlenir. Bu çalışmada, CR-39 termal nötron dozimetresinin akı tepkisi ve eşdeğer doz tepkisi Maxwell enerji dağılımına sahip termal nötronlar için belirlenecektir. CR-39 hızlı nötron dozimetresinin akı ve eşdeğer doz tepkileri ise  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için hesaplanacaktır.

CR-39 hızlı nötron dozimetresinin eşdeğer doz tepkisinin belirlenmesi için kişisel eşdeğer nötron dozunun,  $H_p(10)$ , belirlenmesi gerekmektedir. Hızlı nötronlar için kalite çarpanı( $Q$ ) enerjiye bağlı olduğu için nötron akısından kişisel eşdeğer doza dönüşüm katsayıları,  $h_{p\phi}(10)$ , nötron enerjisinin fonksiyonudur. Dolayısıyla hızlı nötronlardan kaynaklanan kişisel eşdeğer dozun belirlenmesi için nötronların enerji dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağından çıkan nötronların enerji dağılımı, CR-39 malzemesinde oluşan izlerin uzunluklarının dağılımı kullanılarak elde edilecektir.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Katıhal Nükleer İz Dedektörleri

Bu bölümde katıhal nükleer iz dedektörlerinin tarihçesi, çalışma prensibi ve pasif nötron dozimetrisinde kullanımını incelenecektir.

#### 2.1.1 Katıhal Nükleer İz Dedektörlerinin Tarihçesi

Young [1], 1958 yılında,  $U_3O_8$  filmlerini termal nötron bombardımanına tuttuktan sonra 1 mm uzaklığa yerleştirdiği Lityum Florür kristallerinde fisyon ürünlerinin oluşturduğu izlerin kimyasal aşındırma işlemi uygulandıktan sonra optik mikroskop altında görünür hale getirilebileceğini göstermiştir. Daha sonra Silk ve Barnes [2], 1959 yılında, geçirimsiz elektron mikroskopu kullanarak ağır yüklü parçacıkların çok ince mika levhalarda bıraktıkları izleri doğrudan gözlemlediklerini rapor etmiştir. Fleischer ve ark. [3] farklı minerallerde, kristallerde, camlarda ve plastiklerde iz oluşumu ile katıhal nükleer iz dedektörlerin farklı alanlarda kullanımıyla ilgili kapsamlı araştırmalar yapmıştır.

Katıhal nükleer iz dedektörlerinin nötron dozimetrisinde kullanım potansiyeli ilk olarak 1974 yılında farkedilmiştir [4]. Cartwright ve ark. [5], yaygın olarak kullanılan bir plastik olan polyallyl diglycol carbonate (PADC) veya ticari adıyla Columbia Resin-39 (CR-39) malzemesinin proton dedeksiyonunda kullanılabileceğini ilk kez göstermiştir. Bu noktadan sonra farklı plastik malzemeler kullanan çeşitli katıhal nükleer iz dedektörleri pasif nötron dozimetrisinde kullanılmaya başlanmıştır.

#### 2.1.2 Katıhal Nükleer İz Dedektörlerinin Çalışma Prensibi

Ağır yüklü parçacıklar dedektör malzemesi içerisinde ilerledikleri yol boyunca iyonizasyona yol açarlar ve dedektör malzemesinde hasara neden olurlar. Bu hasarlı bölgeler, iz olarak adlandırılır. Oluşan izler, kimyasal olarak agresif (aşındırıcı) çözeltilere maruz bırakılarak kimyasal aşındırma işlemi uygulanması sonucu optik olarak görünür hale gelirler. Bu görünür izler optik mikroskop altında rahatlıkla gözlemlenebilir. Görünür izlerin dedektör malzemesinin yüzeyindeki yoğunluğu, çapları ve dedektör malzemesi içerisindeki uzunlukları vb. parametreleri ortamdaki radyasyon hakkındaki bilgiyi içerir.

Katıhal nükleer iz dedektörleri; radon ölçümü, nötron dozimetrisi, reaktör fiziği, kozmik radyasyon ölçümleri vb. alanlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada nötron dozimetrisinde kullanılan katıhal nükleer iz dedektörleri incelenecektir.

### **2.1.3 Nötron Dozimetrisinde Kullanılan Katıhal Nükleer İz Dedektörleri**

Bu çalışmada benzeşimleri yapılacak olan CR-39 dedektörleri; yaklaşık 100 keV hızlı nötron eşik değerine, yüksek hassasiyete ve yüksek optik kaliteye sahip olması nedeniyle pasif nötron dozimetrisinde yaygın olarak kullanılan katıhal nükleer iz dedektörleridir. CR-39 dedektörleri malzeme olarak polyallyl diglycol carbonate kullanılır. CR-39 monomerinin kimyasal formülü  $C_{12}H_{18}O_7$ 'dir.

Bisphenol-A polycarbonate malzeme kullanan Lexan ve Makrofol dedektörleri ile nitroselüloz kullanan LR-115 ve CN-85 dedektörleri de nötron dozimetrisinde sıkça kullanılmaktadır.

## **2.2 CR-39 Dozimetresinde Gerçekleşen Önemli Nötron Etkileşimleri**

Nötronlar yüksüz parçacıklar oldukları için atomların çekirdeklerinin pozitif yüklerinden ve elektronların negatif yüklerinden etkilenmezler. Dolayısıyla nötronlar doğrudan atom çekirdeğiyle etkileşirler [6]. Nötron radyasyonuna maruz kalan bir CR-39 dozimetresi için önemli nötron etkileşme türleri: esnek saçılma, esnek olmayan saçılma ve (n,p), (n, $\alpha$ ) gibi yüklü parçacık tepkimeleridir.

### **2.2.1 Esnek Saçılma**

Esnek saçılma reaksiyonunda, nötron hedef çekirdekle çarpıştıktan sonra kinetik enerjisinin bir kısmını hedef atom çekirdeğine aktarır ve farklı bir yönde hareketine devam eder. Bu çarpışmada, çarpışmadan önceki ve sonraki toplam kinetik enerji ve momentum korunur.

Hızlı nötron dozimetrisinde kullanılan CR-39 dozimetrelerinde oluşan görünür izlerin büyük çoğunluğu, nötronların hidrojen atomları ile esnek saçılmaları sonucu ortaya çıkan protonlardan kaynaklanmaktadır. Bu yüzden hızlı nötron dozimetrisinde kullanılan CR-39 dozimetrelerinde esnek saçılma en önemli nötron etkileşimi tipidir.

### 2.2.2 Esnek Olmayan Saçılma

Esnek olmayan saçılma reaksiyonunda, nötron hedef çekirdekle çarpıştıktan sonra hedef çekirdeğe kinetik enerjisinin büyük bir kısmını aktarır ve hedef çekirdeği uyarılmış bir düzeyde bırakır. Bu uyarılmış çekirdek daha sonra gama ışını yayarak bozunur. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için nötronun enerjisinin hedef çekirdeği ilk uyarılmış düzeyine çıkarmaya yetecek kadar büyük olması gerekir. İlk uyarılmış düzeyin bulunduğu enerji, hafif çekirdeklerde ağır çekirdeklere göre daha yüksektir [6].

### 2.2.3 Yüklü Parçacık Tepkimeleri

Nötronlar hedef atom çekirdeği ile etkileştiklerinde ortaya yüklü parçacıklar çıkabilir. Bu tepkimeler endotermiktir ve belirli bir eşik enerjisinin altında gerçekleşmezler. CR-39 dozimetre malzemesi için,  $^{16}_8\text{O}(n,\alpha)$  ve  $^{12}_6\text{C}(n,\alpha)$  önemli (n, $\alpha$ ) reaksiyonlarıdır.  $^{16}_8\text{O}(n,\alpha)$  reaksiyonu için 2,4 MeV eşik enerjisi gereklidir.  $^{12}_6\text{C}(n,\alpha)$  reaksiyonu için ise 6,2 MeV eşik enerjisi gereklidir [7]. Bir diğer yüklü parçacık tepkimesi olan  $^{12}_6\text{C}(n,p)$  reaksiyonu ise 10,24 MeV'dan büyük nötron enerjilerinde gerçekleşir [8].

Bazı hafif çekirdeklerde bu tepkimeler ekzotermiktirler. Termal nötron dozimetrisinde kullanılan bazı dönüştürücü malzemelerde gerçekleşen  $^{14}_7\text{N}(n,p)$ ,  $^{10}_5\text{B}(n,\alpha)$ ,  $^6_3\text{Li}(n,t)$  gibi tepkimeler bunlara örnektir. Bu izotoplar termal nötron enerjilerinde yüksek soğurma tesir kesitlerine sahiptirler ve tesir kesitleri,  $1/v$  davranışı gösterir. Bu özellikleri, onları termal nötron dozimetrelerinde kullanılmalrı için uygun kılmaktadır [7].

### 2.3 İz Oluşumu

Ağır yüklü bir parçacık dedektör malzemesinde geçtiği yol boyunca iyonizasyona neden olur. Bu parçacığın yolu üzerindeki moleküler zincirlerin kopması ve serbest radikallerin oluşması nedeniyle hasarlı bölgeler (izler) oluşur. Eğer bu tip izler barındıran bir malzeme kimyasal olarak agresif çözeltilere maruz bırakılırsa, hasarlı bölgelerde kimyasal reaksiyon hızı hasarsız bölgelere göre daha fazla olur. Dolayısıyla kimyasal çözelti malzemenin tüm yüzeyini aşındırırken hasarlı bölgeleri daha hızlı aşındırır. Uygun aşındırma koşulları uygulandığında optik mikroskop altında görünebilen izler oluşur. Bu işleme, “dedektör aşındırması” veya “iz görselleştirme”; dedektör aşındırmasından sonra oluşan izlere ise “görünür iz” denir. Etkinin kendisine ise “iz etkisi” denir. Bu iz etkisi çeşitli polikarbonatlar, nitroselüloz ve cam gibi dielektrik malzemelerde görülür. İletken



ve yarı-iletken malzemelerde moleküllerin yeniden birleşme sürecinden dolayı kalıcı izler oluşmaz [9].

### 2.3.1 Durdurma Kuvveti ve Sınırlı Enerji Kaybı (SEK)

Ağır yüklü parçacıkların dedektör malzemesiyle temel etkileşim yolları iyonizasyon ve uyarılmadır. Bu yüklü parçacıklar çekirdeğin ve elektronun Coulomb kuvveti ile etkileşirler. Etkileşimlerin çoğu elektronlarla gerçekleşir; sadece küçük bir kısmı çekirdekle gerçekleşir. Ağır yüklü parçacıkların kütleleri elektronlarınkinden çok daha fazla olduğu için bu parçacıklar malzeme içerisinde ilerlerken neredeyse düz bir yol izlerler. Fakat bu parçacıklar atom çekirdekleri ile etkileşirlerse başlangıçtaki ilerleme yönlerinden ciddi sapmalar gerçekleşir. Ayrıca bu parçacıkların enerjileri, menzillerinin sonunda çok düşük olduğu için parçacıklar bu bölgede de yollarından saparlar.

Yüklü parçacıkların madde ile etkileşirken sürekli enerjisini kaybederek yavaşlamaktadır. Bu parçacıkların enerjilerini ne ölçüde kayb ettiklerini ifade etmek için durdurma kuvveti kullanılır. Durdurma kuvveti, yüklü bir parçacık tarafından birim uzunluk başına kaybedilen enerjidir; başka bir deyişle parçacığın yolu boyunca enerjisindeki azalma hızıdır [6]. Genellikle  $dE/dx$  şeklinde gösterilir; burada  $dE$ ,  $dx$  mesafesindeki toplam enerji kaybıdır.

Parçacığın iyonizasyon ve uyarılma yoluyla malzemeye aktardığı enerji ise lineer enerji transferi (LET) ile ifade edilir. Bu terim radyasyonun biyolojik etkileri bakımından önemli bir anlama sahiptir. LET malzeme içerisinde hareket etmekte olan parçacığın yükü ve kütlesiyle doğru orantılıdır. Örneğin, aynı enerjiye sahip bir alfa parçacığı ve elektron ele alınırsa alfa parçacığı elektrona göre daha yüksek LET'e sahiptir. Yüksek LET'e sahip parçacıkların canlılara verdiği biyolojik hasar daha fazladır.

Yüklü bir parçacık, enerjisini malzemeye aktarırken serbest elektronlar oluşur. Bu oluşan serbest elektronlardan bazıları çok yüksek enerjiye sahiptir ve bunlar delta ışınları olarak adlandırılırlar. Başlangıçtaki ağır yüklü parçacığın ilerlediği yol üzerinden sapan delta ışınları iz oluşumuna katkıda bulunmaz. Bu yüzden sınırlı enerji kaybı (SEK) adında yeni bir nicelik tanımlamak gerekmektedir. SEK,  $(dE/dx)_{E_b}$  şeklinde gösterilir. Burada, sadece  $E_b$  enerjisinden küçük enerji aktarımları dikkate alınır; eğer herhangi bir elektrona  $E_b$  enerjisinden büyük bir enerji aktarımı varsa delta ışınının oluştuğu varsayılır ve bu enerji

aktarımı dikkate alınmaz. Son olarak, tüm malzemeler için kullanılacak belirli bir  $E_b$  değeri yoktur; bu değer malzemeye göre değişmektedir [9].

### **2.3.2 Kimyasal Aşındırma İşlemi**

Dedektör malzemesinde oluşan izlerin optik olarak görünür hale getirilmesi için kimyasal aşındırma işlemi uygulandığından bahsedilmiştir. İzler içeren bir dedektör malzemesi, uygun koşullarda aşındırıcı çözelti içerisinde belirli bir süre bekletildiğinde iz aşındırması gerçekleşir ve görünür izler oluşur. Kimyasal aşındırma işlemi sürecinde dedektör malzemesinin tüm yüzeyi aşınırken izlerin olduğu bölgeler dedektör yüzeyine göre daha hızlı aşınmaktadır.

Kimyasal aşındırma işlemi sürecinde dedektör malzemesinin hasarsız bölgelerindeki aşındırma hızına, yığın aşındırma hızı denir ve  $V_b$  ile gösterilir. Yığın aşındırmasının, polimer malzemeler için izotropik olduğunu kabul etmek iyi bir yaklaşımdır [10]. Dolayısıyla  $V_b$ , malzemenin hasarsız bölgelerinin her yerinde sabit kabul edilir.

Dedektör malzemesinin hasarlı bölgelerindeki, yani iz boyunca olan, aşındırma hızına ise iz aşındırma hızı denir ve  $V_t$  ile gösterilir. İz aşındırma hızı, iyonun malzemede bıraktığı iz boyunca değişkenlik göstermektedir. Bunun nedeni iyonların yolları boyunca malzemede bıraktıkları hasarın miktarının değişmesidir. Malzemedeki hasarın fazla olduğu bölgelerde  $V_t$ , daha az hasarlı bölgelere göre daha yüksektir. Dolayısıyla  $V_t$ , sınırlı enerji kaybının fonksiyonudur.

#### **2.3.2.1 Yığın Aşındırma Hızı**

Yığın aşındırma hızı; kullanılan polimerin moleküler yapısı, polimerleşme koşulları, çevresel koşullar, kimyasal aşındırma koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Kimyasal aşındırma koşullarının en önemlileri, aşındırıcı çözeltinin sıcaklığı ve derişimidir. Çizelge 2.1'de 6,25 M NaOH çözeltisi kullanılarak kimyasal aşındırma işlemine maruz bırakılan bir CR-39 dedektöründe  $V_b$ 'nın, aşındırıcı çözeltinin sıcaklığına göre değişimi verilmektedir.

Çizelge 2.1. CR-39 dedektörü için aşındırıcı çözelti sıcaklığına göre yığın aşındırma hızı [9].

Aşındırıcı Çözelti Sıcaklığı(°C)	$V_b$ ( $\mu\text{m/saat}$ )
26	0,036
40	0,125
54	0,46
70	1,59

Çizelge 2.2’de ise 70 °C ’de kimyasal aşındırma işlemine maruz bırakılan CR-39 dedektörlerinde  $V_b$ , farklı NaOH ve KOH çözeltilerinin derişimleri için verilmektedir.

Çizelge 2.2. CR-39 dedektörü için NaOH ve KOH aşındırıcı çözeltilerinin derişimine göre yığın aşındırma hızı [9].

NaOH molaritesi	$V_b$ ( $\mu\text{m/saat}$ )	KOH molaritesi	$V_b$ ( $\mu\text{m/saat}$ )
3,92	0,70	1,89	0,40
4,90	0,98	3,78	1,14
5,88	1,26	4,72	1,66
7,84	2,04	5,67	2,21
9,80	3,32	7,56	4,03
11,8	5,5	9,45	8,16
-	-	11,8	18

### 2.3.2.2 İz Aşındırma Hızı

İz aşındırma hızının ağır yüklü parçacıkların malzemede oluşturdukların iz boyunca değişkenlik gösterdiğinden daha önce belirtilmişti. Örneğin, yüklü parçacığın malzemedeki menzilin son bölümünde verdiği hasar daha fazla olduğu için bu bölgede iz aşındırma hızı daha yüksektir. Bu yüzden iz aşındırma hızı, SEK’nın veya artakalan menzilin fonksiyonu olarak verilir. Artakalan menzil ( $R'$ ), iyonun yolu üzerindeki bir noktadan iyonun menzilin ( $R$ ) sonuna olan uzaklık olarak tanımlanır. Eğer iyonun hareket ettiği yön  $x$  ekseninde alınırsa, herhangi bir  $x$  noktasında artakalan menzil

$R - x$  olarak alınır. Hermsdorf [11], bir CR-39 dedektörü için artakalan menzilin fonksiyonu olarak aşağıdaki görgül fonksiyonu türetmiştir.

$$V(R') = 1 + \frac{a_1}{(R' + a_2)^{b_1}} \ln(R' + a_3)(1 - e^{-R'/a_4}) + \frac{R'}{a_5} \quad 2.1$$

Burada  $V$ , iz aşındırma hızının yığın aşındırma hızına oranıdır.

$$V(R') = \frac{V_t(R')}{V_b} \quad 2.2$$

Bu durumda  $V_t(R')$  aşağıdaki gibi verilir.

$$V_t(R') = V_b \left[ 1 + \frac{a_1}{(R' + a_2)^{b_1}} \ln(R' + a_3)(1 - e^{-R'/a_4}) + \frac{R'}{a_5} \right] \quad 2.3$$

CR-39 dedektörleri için Eşitlik 2.3'deki parametreler, Çizelge 2.3'de farklı hidrojen izotopları ve alfa parçacıkları için verilmektedir. Bu fonksiyon,  $0 \mu m < R' < 120 \mu m$  aralığında geçerlidir. Bu çalışmadaki benzeşimlerde kullanılacak alfa parçacıkları ve tritonlar için bu fonksiyon yeterlidir, fakat protonların menzil değerleri çok daha yüksek olduğu için farklı bir  $V(R')$  fonksiyonu kullanmak gerekmektedir. Fromm ve ark. [12], CR-39 dedektörleri için aşağıdaki  $V(R')$  görgül fonksiyonunu türetmişlerdir.

$$V(R') = 1 + 2 a_1 \frac{R'(V_{max} - 1)}{a_1^2 + R'^2} \quad 2.4$$

Burada protonlar için  $a_1 = 3,2 \mu m$  ve  $V_{max} = 2,20$ 'dir [11]. Bu çalışmada yapılacak olan benzeşimlerde protonlar için bu fonksiyon kullanılacaktır. Eşitlik 2.2 kullanılarak bu fonksiyon,  $V_t(R')$  için aşağıdaki gibi verilir.

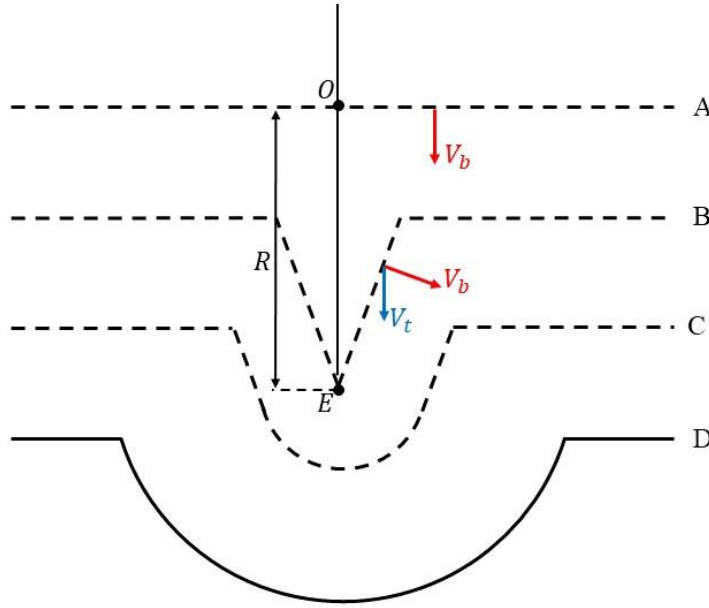
$$V_t(R') = V_b \left[ 1 + 2 a_1 \frac{R'(V_{max} - 1)}{a_1^2 + R'^2} \right] \quad 2.5$$

Çizelge 2.3. Proton, döteron, triton ve alfa parçacığı için Eşitlik 2.1'deki parametrelerin değerleri [11].

Parametreler	Proton	Döteron	Triton	Alfa parçacığı
$a_1$	3,4	4,5	3,8	390
$a_2$	1 $\mu m$	1 $\mu m$	1 $\mu m$	2 $\mu m$
$a_3$	1 $\mu m$	1 $\mu m$	1 $\mu m$	1 $\mu m$
$a_4$	0,4 $\mu m$	2 $\mu m$	1,8 $\mu m$	5 $\mu m$
$a_5$	1500 $\mu m$	1000 $\mu m$	900 $\mu m$	80 $\mu m$
$b_1$	1	1	1	2,35

### 2.3.3 İz Oluşumunun Geometrisi

Kathal nükleer iz dedektörlerinde oluşan görünür izlerin geometrisi; iz aşındırma hızı, yığın aşındırma hızı, dedektör kalınlığı, dedektörde iz oluşturan yüklü parçacığın hareket yönü, kimyasal aşındırma süresi gibi farklı parametrelere bağlıdır. Bu dedektörlerde iz oluşumunu açıklayan ve iz parametrelerinin hesaplanmasında kullanılacak tam bir teori henüz yoktur, fakat literatürde iz parametrelerinin hesaplanması için kullanılan modeller mevcuttur [9,10]. Bu bölümde iz oluşumunun geometrisini etkileyen bazı faktörler incelenecektir.

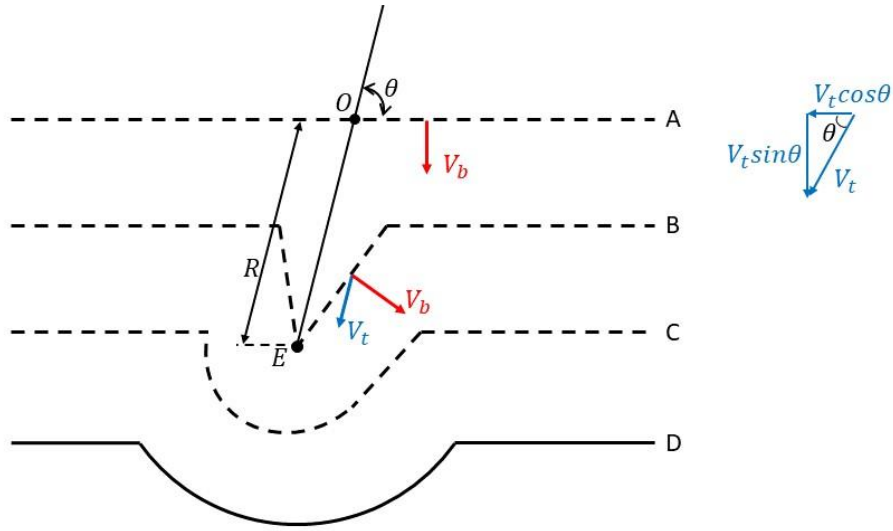


Şekil 2.1. Dedektör yüzeyinden dik açıyla giren bir iyonun oluşturduğu izin kimyasal aşındırma sırasında gelişim aşamaları.

İlk önce iz oluşumunun en basit durumu incelenecektir. Şekil 2.1'deki gibi iyonun dedektör yüzeyine dik bir açıyla dedektör malzemesine girdiğini ve  $V_t$ 'nin sabit olduğunu düşünelim. Bu şekilde; A, dedektörün kimyasal aşındırma işleminden önceki yüzeyini; D, kimyasal aşındırma işleminden sonraki dedektör yüzeyini; R ise parçacığın dedektör malzemesindeki menzilin göstermektedir. Eğer aşındırıcı çözelti, parçacığın menzilin sonu olan E noktasına veya bu noktadan önceki bir noktaya kadar nüfuz ederse oluşan iz tamamen konik biçimdedir ve bu durum B yüzeyi ile gösterilmektedir. Fakat E noktasından sonra aşındırma işlemi halen devam ederse iz duvarları her yönde  $V_b$  hızı ile aşınmaya başlayacaktır ve iz aşırı aşındırılmış olacaktır. Aşırı aşındırma başladığında, E noktası etrafında bir küre oluşmaya başlayacaktır. C yüzeyine bakılırsa aşırı aşındırılmış

izin şekli bir koni ve ucunda bir kürenin birleşimi şeklindedir. Bu durumda izin geçiş aşamasında olduğu söylenir. Bu noktadan sonra kimyasal aşındırma işlemi devam ederse iz son aşamaya geçecektir ve D yüzeyinde görüldüğü gibi küresel biçimde olacaktır.

Gerçekte ağır yüklü parçacıkların büyük bir bölümü, Şekil 2.2'deki gibi dedektör yüzeyine eğik bir açıyla gelirler. Eğer yine  $V_t$  sabit alınırsa, kimyasal aşındırma işlemi boyunca oluşan izin geometrisi, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi değişmektedir.



Şekil 2.2. Dedektör yüzeyinden eğik açıyla giren bir iyonun oluşturduğu izin kimyasal aşındırma işlemi sırasında gelişim aşamaları.

Şekil 2.2'de dedektör yüzeyine göre  $\theta$  açısıyla dedektöre giren bir yüklü parçacığın dedektör malzemesindeki menzili  $R$  kadardır. Eğer aşındırıcı çözelti yüklü parçacığın menzilin sonu olan E noktasına kadar nüfuz ederse oluşan iz, B yüzeyinde gösterildiği gibi eliptik koni şeklindedir. Bu noktadan sonra aşındırma devam eder ise iz aşırı aşındırılmış olacaktır. Aşırı aşındırılmaya başlayan iz, C yüzeyinde gösterildiği gibi geçiş aşamasına geçecektir. Geçiş aşamasında izin tabanının bir kısmı eliptik biçimdeyken diğer kısmı dairesel şekildedir. Son aşamada ise iz, D yüzeyinde gösterildiği gibi küresel şekildedir.

$V_t$ , yüksek enerjili iyonların oluşturduğu izlerin kısa süreli kimyasal aşındırmasında, yani aşındırılan yüzey kalınlığının küçük olduğu durumlarda, sabit kabul edilebilir. Değişken  $V_t$  kullanıldığında iz geometrisinin ve iz parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan modeller literatürde mevcuttur [9,10]. Bu çalışmada iz parametreleri içerisinde sadece

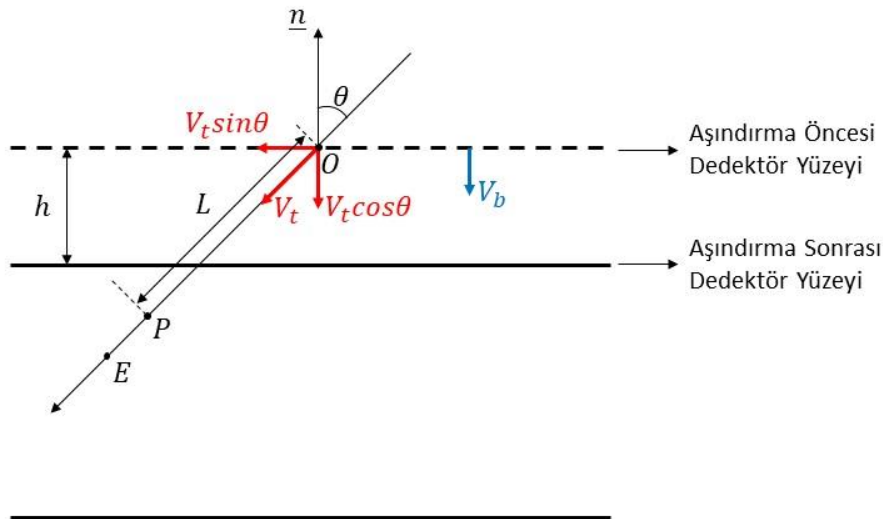
görünür iz uzunlukları hesaplamalarda kullanılacağı için bu modeller burada incelenmeyecektir. İlerleyen bölümde görünür iz uzunluğunun, değişken  $V_t$  için nasıl hesaplanacağı farklı durumlar için gösterilecektir.

## 2.4 Görünür İzlerin Belirlenmesi

Katıhal nükleer iz dedektörlerinin tepkisi, kimyasal aşındırma işleminden sonraki dedektör yüzeyinde oluşan görünür iz yoğunluğu cinsinden ifade edilmektedir. Dolayısıyla dedektör tepkisini bulmak için görünür iz yoğunluğunun hesaplanması gerekmektedir. Bu bölümde kimyasal aşındırma işleminden sonra bir izin görünür olup olmadığının nasıl belirleneceği gösterilecektir. Dedektöre giren veya dedektörde oluşan bir yüklü parçacığın enerjisi ve hareket yönü, kimyasal aşındırıcının izi aşındırma yönü, kimyasal aşındırma koşulları gibi parametreler bir izin görünür olup olmadığını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Ayrıca bu çalışmada en önemli iz parametresi görünür izlerin uzunluğu olduğu için bu bölümde farklı durumlarda görünür iz uzunluğunun nasıl hesaplanacağı anlatılacaktır.

### 2.4.1 Kritik Aşındırma Açısı

Kimyasal aşındırma işlemi sonrasında dedektör yüzeyinin normaline göre sadece belirli bir açının altında dedektör malzemesinde hareket eden ağır yüklü parçacıkların bıraktığı izler görünür hale gelebilir. Bu açı, kritik aşındırma açısı olarak adlandırılır. Kritik aşındırma açısı, yüklü parçacığın başlangıçtaki enerjisine ve kimyasal aşındırma koşullarına bağlıdır.



Şekil 2.3. Kritik aşındırma açısının belirlenmesi için iz aşındırmasının temsili.

Şekil 2.3’de O noktasından dedektör yüzeyinin normaline göre  $\theta$  açısı ile dedektöre giren ve dedektör içerisinde E noktasında duran bir yüklü parçacığın oluşturduğu iz,  $V_t$  hızı ile  $t$  süre boyunca aşındırılmaktadır. Eğer  $V_t$ , sabit alınır ise görünür iz oluşması için  $V_t \cos\theta > V_b$  olmalıdır. Dolayısıyla kritik aşındırma açısı( $\theta_c$ ),

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{V_b}{V_t}\right)$$

ifadesi kullanarak bulunur. Bu durumda  $\theta < \theta_c$  ise görünür iz oluşur.

Eğer  $V_t$ , değişken ise kritik aşındırma açısının bulunması daha karmaşıktır. Bu durumda, görünür iz oluşması için çözeltinin nüfuz ettiği derinlik bulunmalıdır. Şekil 2.3’de aşındırıcı çözelti  $T$  sürede  $P$  noktasına kadar nüfuz ederse çözeltinin nüfuz ettiği mesafe olan  $L$ ,  $|OP|$  uzunluğuna eşittir. Aşındırma işleminin sonunda iz görünür olması için çözeltinin nüfuz ettiği derinlik olan  $L \cos\theta$ ,  $T$  sürede toplam aşındırılan yüzey kalınlığı olan  $R_L$ ’den büyük olmalıdır. Dolayısıyla kritik aşındırma açısı ( $\theta_c$ ),

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{R_L}{L}\right)$$

ifadesi kullanılarak belirlenir. Burada  $R_L$ ,

$$R_L = V_b T$$

ifadesi ile hesaplanır.

$L$ , yüklü parçacığın başlangıçtaki enerjisine ve aşındırma süresine bağlıdır.  $L$ ’nin değişken  $V_t$  için nasıl hesaplanacağı ilerleyen bölümlerde anlatılacaktır. Bu bölümde kritik aşındırma açısının dedektöre dışarıdan giren bir yüklü parçacık için nasıl bulunacağı gösterilmiştir. Dedektörün içerisinde oluşan yüklü parçacıkların kimyasal aşındırma işlemi sonucunda görünür olup olmadığının nasıl belirleneceği ilerleyen bölümlerde anlatılacaktır.

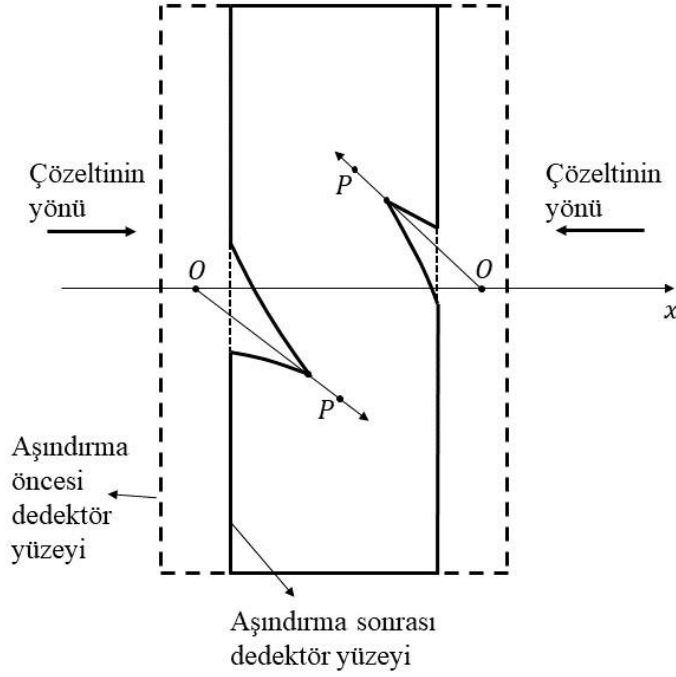
#### 2.4.2 Aynı Yönlü ve Zıt Yönlü Kimyasal Aşındırma

İz aşındırma hızının, SEK’nin fonksiyonu olduğundan daha önce bahsedilmişti. Bu yüzden iz aşındırmasının iz üzerindeki hangi noktadan başladığı görünür iz yoğunluğunun ve görünür izlerin uzunluğunun belirlenmesinde önemli bir faktördür.

Dedektör malzemesinde nötron etkileşimleri sonucu oluşan veya dışarıdan dedektör malzemesine giren yüklü parçacıklar malzeme içerisinde farklı yönlerde hareket ederler. Kimyasal aşındırma işlemi sürecinde izlerin bir kısmı yüklü parçacıkların oluştuğu

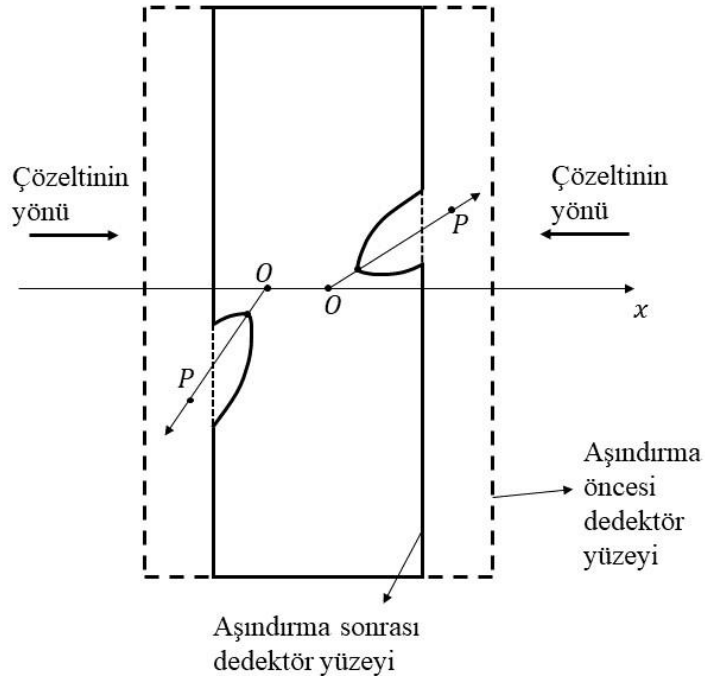


noktadan aşındırılmaya başlarken diğer bir kısmı ise yüklü parçacığın menziline sonundan aşındırılmaya başlar. Aşındırıcı çözeltinin Şekil 2.4'deki gibi ince levha şeklindeki dedektör malzemesinin iki yüzeyini aşındırdığını düşünelim. İz aşındırması, yüklü parçacıkların dedektör malzemesinde olduğu nokta olan  $O$  noktasından başlarsa bu işleme aynı yönlü aşındırma denir. Aynı yönlü iz aşındırmasında aşındırıcı çözelti, iz boyunca parçacığın hareket yönüyle aynı yönde ilerler.



Şekil 2.4. Katıhal nükleer iz dedektörlerinde aynı yönlü iz aşındırması.

Eğer aşındırıcı çözelti, iz boyunca parçacığın hareket yönüne göre zıt yönde hareket ediyor ise bu işleme, zıt yönlü aşındırma denir. Şekil 2.5'de izlerin aşındırılması, yüklü parçacıkların dedektör malzemesinde durduğu nokta olan  $P$  noktasından başlar.



Şekil 2.5. Katihal nükleer iz dedektörlerinde zıt yönlü iz aşındırması.

Dedektör malzemesine enerjilerinin bir kısmını aktararak dedektör yüzeyinden dışarıya çıkan yüklü parçacıkların bıraktıkları izler zıt yönlü aşındırılırken; dedektöre dışarıdan giren yüklü parçacıkların bıraktıkları izler ise aynı yönlü aşındırılır.

### 2.4.3 Görünür İz Uzunluğu

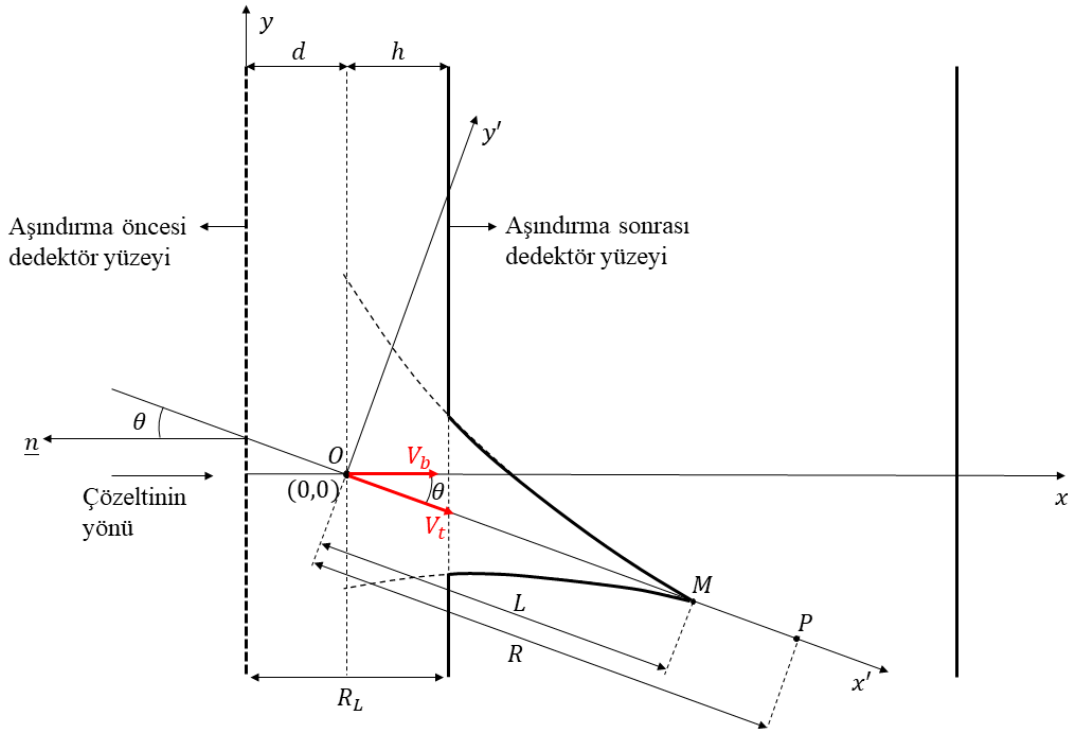
Bu bölümde dedektör yüzeyinin normaline göre eğik bir açıyla hareket eden yüklü parçacıklardan dolayı oluşan izlerin kimyasal aşındırma işleminden sonra görünür olup olmadığının nasıl belirleneceği anlatılacaktır. Bu amaçla, aynı yönlü ve zıt yönlü iz aşındırma işlemleri için görünür izlerin nasıl belirleneceği ve görünür iz uzunluğunun nasıl hesaplanacağı gösterilecektir.

Bundan sonraki bölümlerde bahsedilen katihal iz dedektörlerinin yeterince kalın olduğu varsayılacaktır. Bunun anlamı: dedektörün kalınlığı, dedektörde oluşan veya dedektöre dışarıdan giren en yüksek enerjili yüklü parçacığın menziline çok daha büyüktür.

#### 2.4.3.1 Aynı Yönlü Aşındırılan İzler

Bu bölümde, nötron etkileşimleri sonucu dedektör malzemesinde oluşan ve dedektör malzemesine tüm enerjisini aktardıktan sonra duran yüklü parçacıkların aynı yönlü kimyasal aşındırılması incelenecektir. Bu durumda dedektördeki izlerin kimyasal

aşındırma işlemi sonrasında görünür olup olmadığının nasıl belirleneceği ve görünür iz uzunlukların nasıl hesaplanacağı gösterilecektir.



Şekil 2.6. Aynı yönlü aşındırma işleminde iz geometrisinin gelişimi.

Şekil 2.6'da ince levha şeklinde bir CR-39 dedektöründe oluşan bir yüklü parçacığın bıraktığı izin aynı yönlü kimyasal aşındırılması gösterilmektedir. Dedektör koordinatları  $x$  ve  $y$  eksenleri ile gösterilmektedir. Nötron etkileşimi sonucunda oluşan yüklü parçacık,  $x$  ekseninde  $O$  noktasında oluşmakta ve bu eksene göre  $\theta$  açısıyla hareket etmektedir. Eğer dedektörün koordinat sistemi,  $x$  eksenine göre  $\theta$  açısı kadar döndürülürse parçacığın yolu,  $x'$  ekseninde olacaktır. Bu yüklü parçacık enerjisinin tamamını dedektör malzemesine aktarır  $P$  noktasında durmaktadır. Dolayısıyla bu parçacığın dedektör malzemesindeki menzili,  $R$  kadardır.

Eğer dedektör  $T$  süre kadar kimyasal aşındırma işlemine maruz bırakılırsa aşındırılan yüzey kalınlığı ( $R_L$ ),

$$R_L = V_b T \quad 2.6$$

ifadesi kullanılarak bulunur.

Eğer  $V \cos \theta > 1$  ise iz aşındırması başlar. Ayrıca  $R_L < d$  olur ise çözelti, yüklü parçacığın oluştuğu noktaya kadar nüfuz etmez. Bu durumda iz aşındırması başlamaz, dolayısıyla görünür iz oluşmaz.

Gerçekte  $V_t$  'nin konuma göre değiştiğinden bahsedilmişti.  $V_t$  , artakalan menzilin fonksiyonu olarak alınır ise aşırı aşındırılmamış izler için çözeltinin iz boyunca nüfuz ettiği mesafe ( $L$ ) aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunur.

$$T_e = \int_0^L \frac{1}{V_t(R - x')} dx' \quad 2.7$$

Burada  $T_e$ , izin toplam aşındırılma süresidir. Aşındırıcı çözelti, yüklü parçacığın oluştuğu  $O$  noktasına  $d/V_b$  sürede ulaşacağı için  $T_e$  aşağıdaki gibi bulunur.

$$T_e = T - \frac{d}{V_b}$$

Eğer iz aşırı aşındırılmış ise  $L$ 'yi bulmak için önce çözeltinin yüklü parçacığın menziline sonuna nüfuz etme süresini ( $T_R$ ) bulmak gerekir.  $T_R$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$T_R = \int_0^R \frac{1}{V_t(R - x')} dx' \quad 2.8$$

Bu durumda, geriye kalan süre kadar iz  $x$  eksenini boyunca yığın aşındırma hızı ile aşınır. Geriye kalan aşındırma süresi ( $T_b$ ),

$$T_b = T_e - T_R$$

şeklinde bulunur.

Sonuç olarak, aşırı aşındırılmış bir iz için  $L$ ,

$$L = R + V_b T_b \quad 2.9$$

ifadesi kullanılarak elde edilir.

İzin kimyasal aşındırma işlemi sonucunda görünür olması için  $L \cos \theta > h$  olması gerekir. Burada  $h$ , efektif aşındırılan yüzey kalınlığı olarak tanımlanır ve  $h = V_b T_e$  'dir. Eğer görünür iz oluşmuşsa görünür iz uzunluğu ( $L_t$ ),

$$L_t = L - \frac{h}{\cos \theta} \quad 2.10$$

ifadesi yardımıyla belirlenir.

Dedektöre dışarıdan giren yüklü parçacıkların bıraktığı izler de aynı yönlü aşınır. Bu durumda iz aşındırması hemen dedektör yüzeyinde başlar ve  $T_e = T'$  dir. Dolayısıyla bu durumda  $h = R_L$  olduğu rahatlıkla görülebilir.

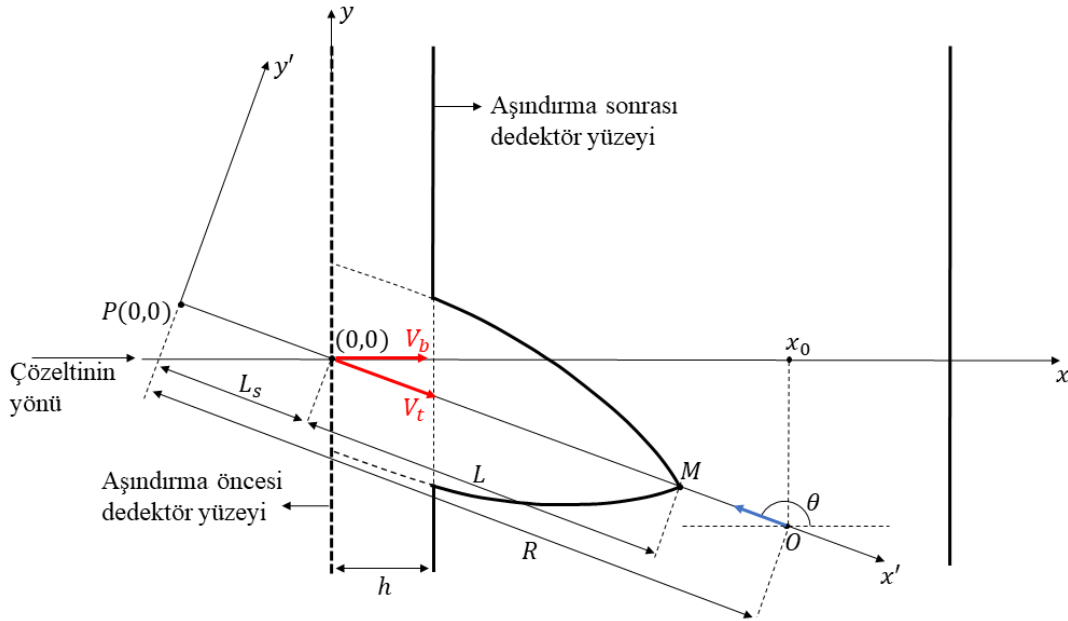
Aynı yönlü aşındırma işleminde görünür iz uzunluğu bulmak için kullanılan bu yöntem, dedektörün diğer yüzeyi için de benzer şekilde kullanılabilir. Bu bölgede, aynı yönlü iz aşındırması için yüklü parçacığın dedektörün  $x$  eksenine göre hareket açısı olan  $\theta$ ,  $(\pi/2, \pi]$  aralığında olması gerekmektedir. Dolayısıyla izin kimyasal aşındırma işlemi sonucunda görünür olması için  $L|\cos\theta| > h$  olması gerekir. Eğer görünür iz oluşmuş ise görünür iz uzunluğu ( $L_t$ ) ise

$$L_t = L - \frac{h}{|\cos\theta|} \quad 2.11$$

ifadesi kullanılarak bulunur.

#### 2.4.3.2 Zıt Yönlü Aşındırılan İzler

Nötron etkileşimleri sonucu dedektörün içerisinde oluşan bir yüklü parçacık enerjisinin hepsini dedektör malzemesine aktarıp dedektör içerisinde durabilir veya enerjisinin bir kısmını dedektör malzemesine aktardıktan sonra dedektörün dışarısına çıkabilir. Bu iki durumda da iz aşındırması zıt yönlüdür.



Şekil 2.7. Dedektör malzemesinin dışında duran bir yüklü parçacıktan kaynaklanan izin zıt yönlü aşındırılması.

Şekil 2.7’de ince levha şeklinde bir CR-39 dedektörünün içerisinde oluşup dedektörün dışarısında bir noktada duran bir yüklü parçacığın bıraktığı izin zıt yönlü kimyasal aşındırılması gösterilmektedir. Nötron etkileşimi sonucunda oluşan  $E$  enerjisine sahip ve  $x$  eksenine göre  $\theta$  açısıyla ilerleyen bir yüklü parçacık  $O$  noktasında oluşmaktadır. Burada yüklü parçacık şekilde gösterildiği enerjisinin bir kısmını dedektör malzemesine aktarır dedektörün dışarısında  $P$  noktasında durmaktadır. Bu yüklü parçacığın dedektör malzemesindeki menzili,  $R - L_s$  kadardır. Parçacığın toplam menzili ( $R$ ), dedektörün sonsuz kalınlıkta olduğu kabul edilerek belirlenir.

Zıt yönlü aşındırılan bir iz için  $V_t$ , artakalan menzilin fonksiyonu olarak alınır ise aşırı aşındırılmamış izler için aşındırıcı çözeltilinin iz boyunca nüfuz ettiği mesafe ( $L$ ) aşağıdaki eşitlikten bulunur.

$$T = \int_{L_s}^{L_s+L} \frac{1}{V_t(x')} dx' \quad 2.12$$

Burada  $L_s$ , yüklü parçacığın menzili üzerinde hangi noktada kimyasal aşındırmanın başladığını ifade etmektedir. Bu tip bir iz için iz aşındırması hemen dedektör yüzeyinden başlamaktadır, dolayısıyla toplam aşındırma süresi olan  $T$  süre boyunca iz aşınır.

Eğer iz aşırı aşındırılmış ise,  $L$ 'yi bulmak için çözeltilinin yüklü parçacığın olduğu noktaya nüfuz etme süresi olan  $T_R$ ,

$$T_R = \int_{L_s}^R \frac{1}{V_t(x')} dx' \quad 2.13$$

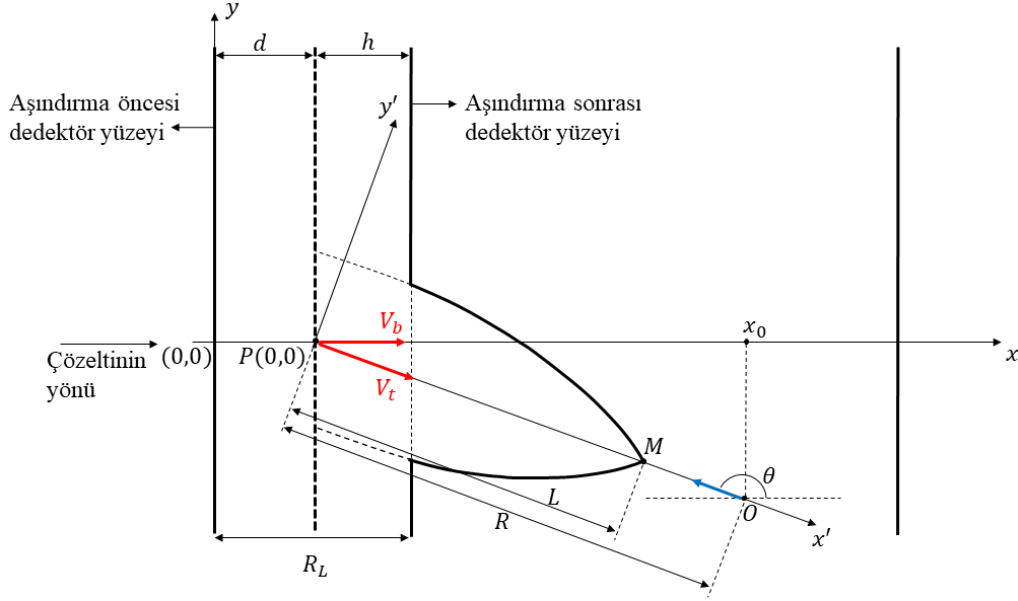
İz, geriye kalan süre kadar  $x'$  eksenini boyunca  $V_b$  hızıyla aşınır. Geriye kalan aşındırma süresi ( $T_b$ ),  $T - T_R$  kadardır. Sonuç olarak aşırı aşındırılmış bir iz için  $L$ ,

$$L = R + V_b T_b$$

eşitliği yardımıyla belirlenir.

İzin kimyasal aşındırma işlemi sonucunda görünür olması için  $L|\cos\theta| > h$  olması gerekir. Burada  $h = V_b T$ 'dir. Eğer görünür iz oluşmuşsa görünür iz uzunluğu ( $L_t$ ), Eşitlik 2.11 ile hesaplanır.

Şekil 2.8’de dedektör malzemesinin içerisinde oluşan ve duran bir yüklü parçacığın oluşturduğu izin zıt yönlü kimyasal aşındırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Dedektör malzemesinin içerisinde duran bir yüklü parçacıktan kaynaklanan izin zıt yönlü aşındırılması.

Şekil 2.8’de  $E$  enerjisine sahip ve dedektörün  $x$  eksenine göre  $\theta$  açısıyla ilerleyen bir yüklü parçacık,  $x$  ekseninde  $O$  noktasında oluşmaktadır. Burada yüklü parçacık enerjisinin tamamını dedektör malzemesine aktarır dedektörün içerisinde  $P$  noktasında durmaktadır. Bu parçacığın dedektör malzemesindeki menzili,  $|OP|$  uzunluğu yani  $R$  kadardır.

Aşırı aşındırılmamış izler için  $L$ , önceki durumdaki gibi bulunur. Fakat burada integralin sınırları  $0$ ’dan  $L$ ’ye kadardır.

$$T_e = \int_0^L \frac{1}{V_t(x')} dx' \quad 2.14$$

Aşındırıcı çözelti, iz aşındırmasının başladığı  $P$  noktasına  $d/V_b$  sürede ulaşacağı için iz aşındırma süresi olan  $T_e$ ,

$$T_e = T - \frac{d}{V_b}$$

eşitliği ile belirlenir.

Eğer iz aşırı aşındırılmış ise, aşındırıcı çözeltinin yüklü parçacığın oluştuğu noktaya nüfuz etme süresi ( $T_R$ ),

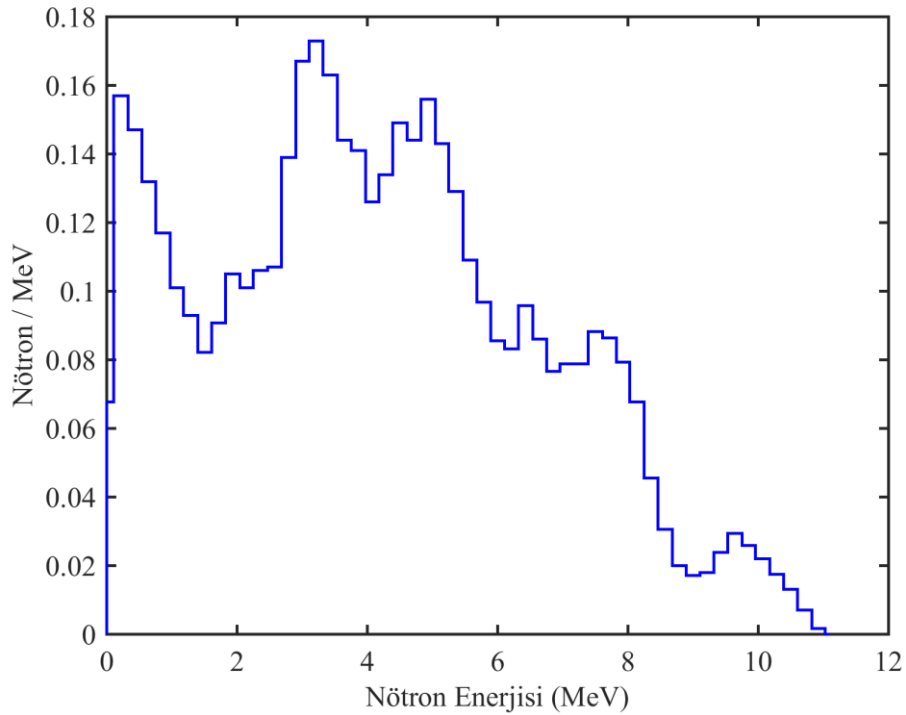
$$T_R = \int_0^R \frac{1}{V_t(x')} dx' \quad 2.15$$

ifadesi kullanılarak belirlenir. Bu durumda geriye kalan aşındırma süresi ( $T_b$ ),  $T_e - T_R$  kadardır.

Son olarak aşırı aşındırılmış bir iz için  $L$ , Eşitlik 2.9 kullanılarak hesaplanır. İzin, kimyasal aşındırma işlemi sonucunda görünür olması için  $L | \cos\theta | > h$  olması gerekir. Burada,  $h = V_b T_e$ 'dir. Eğer görünür iz oluşmuş ise  $L_t$ , Eşitlik 2.11'deki gibi hesaplanır.

### 2.5 Benzeşimlerde Kullanılacak Nötron Kaynakları

Kişisel nötron dozimetrelerinin tepkisi genellikle tek enerjili nötron kaynakları ve radyonüklit kaynaklar kullanılarak belirlenir. Bu çalışmada hızlı nötron dozimetresinin tepkisini belirlemek için Monte Carlo benzeşimlerinde  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı kullanılacaktır. Benzeşimlerde kullanılacak  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağının spektrumu ise Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9.  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağının spektrumu [13].



Termal nötron dozimetresinin tepkisini belirlemek için ise Monte Carlo benzeşimlerinde Maxwell enerji dağılımına sahip nötronlar kullanılacaktır. Maxwell nötron enerji dağılımı,

$$N(E) = \frac{2\pi N}{(\pi kT)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT} \quad 2.16$$

fonksiyonu ile verilir [6]. Burada  $N$ , birim hacimdeki toplam nötron sayısı;  $E$ , nötron enerjisi;  $T$ , ortamın Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı;  $k$  ise Boltzmann sabitidir. Boltzmann sabitinin değeri  $8,6170 \times 10^{-5} eV/K$ 'dir.

## 2.6 Kişisel Eşdeğer Doz

Kişisel eşdeğer doz,  $H_p(d)$ , bireylerin aldıkları eşdeğer nötron dozunun takibinde kullanılan bir niceliktir.  $H_p(d)$ , insan vücudunun belli bir noktasındaki yumuşak dokunun, veya ICRU küresinin,  $d$  derinliğindeki eşdeğer dozdur. Kişisel eşdeğer dozdan bahsedilirken bu  $d$  derinliği  $mm$  cinsinden belirtilmelidir. Örneğin, deri için  $d$  derinliği  $0,07 mm$  olarak alınır ve bu derinlik için kişisel eşdeğer doz,  $H_p(0,07)$  ile gösterilir. İnsan vücudunun daha derininde yer alan organlar için  $d = 10 mm$  olarak alınır ve kişisel eşdeğer doz,  $H_p(10)$  ile gösterilir.

$H_p(10)$ , nötron akısından kişisel eşdeğer doza dönüşüm katsayıları,  $h_{p\phi}(10)$ , kullanılarak hesaplanabilir. Bunun için belirli bir noktadaki nötron akısının ( $\phi$ ) biliniyor olması gerekmektedir. Tek enerjili ve tek yönlü nötronlar için

$$H_p(10) = h_{p\phi}(10) \times \phi \quad 2.17$$

ifadesi kullanılarak bu noktadaki kişisel eşdeğer doz hesaplanır.

Nötronlar için  $h_{p\phi}(10)$ , nötron enerjisinin ve yönünün fonksiyonudur. Farklı tek enerjili paralel nötron demetleri kullanılarak hesaplanmış olan  $h_{p\phi}(10)$  katsayıları, nötron demetinin geliş açısının fonksiyonu olarak Çizelge 2.4'de verilmektedir.

Çizelge 2.4. Tek enerjili nötronlar için  $h_{p\phi}(10,E,\alpha)$  katsayıları [14].

Nötron Enerjisi (keV)	Nötronun Geliş Açısı			
	0°	30°	45°	60°
Termal	11,4	9,11	6,61	4,04
2	8,72	7,27	5,43	3,46
24	20,2	17,2	13,6	7,85
144	134	121	102	69,9
250	215	201	173	125
565	355	347	313	245
1200	433	440	412	355
2500	437	454	441	410
2800	433	451	441	412
5000	420	437	435	409
14800	561	581	572	576
19000	600	621	614	620

Değerler, pSv.cm<sup>2</sup> cinsindedir.

Eşitlik 2.17, tek enerjili ve tek yönlü nötronlar için kullanılabilir. Eğer nötronlar bir enerji dağılımına sahipse ortalama  $h_{p\phi}(10)$  katsayıları, nötronların enerji dağılımları kullanılarak bulunur. Çizelge 2.5’de ise çeşitli radyonüklit nötron kaynakları için ortalama  $h_{p\phi}(10, E, \alpha)$  katsayıları verilmektedir.

Çizelge 2.5. Çeşitli radyonüklit nötron kaynakları için  $h_{p\phi}(10,E,\alpha)$  katsayıları [14].

Nötron Kaynağı	Nötronun Geliş Açısı			
	0°	30°	45°	60°
<sup>252</sup> Cf (D <sub>2</sub> O mod.)	110	109	102	87,4
<sup>252</sup> Cf (Çıplak)	400	409	389	346
<sup>241</sup> Am-B ( $\alpha,n$ )	426	443	431	399
<sup>241</sup> Am-Be ( $\alpha,n$ )	411	424	415	383

Değerler, pSv.cm<sup>2</sup> cinsindedir.

## 2.7 Kişisel Nötron Dozimetrelerinin Akı ve Eşdeğer Doz Tepkileri

Kimyasal aşındırma işleminden sonra nötron başına dedektör yüzeyinde oluşan görünür iz sayısı, akı tepkisi ( $R_\phi$ ) olarak adlandırılır.  $R_\phi$ ,

$$R_\phi = \frac{\rho}{\phi} \quad 2.18$$

ifadesi ile belirlenir. Burada,  $\rho$  dedektör yüzeyindeki görünür iz yoğunluğunu ifade eder ve birimi,  $\text{iz}/\text{cm}^2$ 'dir.  $\phi$  ise dedektör yüzeyindeki nötron akısını ifade eder ve birimi,  $\text{nötron}/\text{cm}^2$ 'dir.

Dozimetre tepkisi eşdeğer doz cinsinden de hesaplanabilir. Eşdeğer doz tepkisi ( $R_H$ ),

$$R_H = \frac{\rho}{H_p(10)} \quad 2.19$$

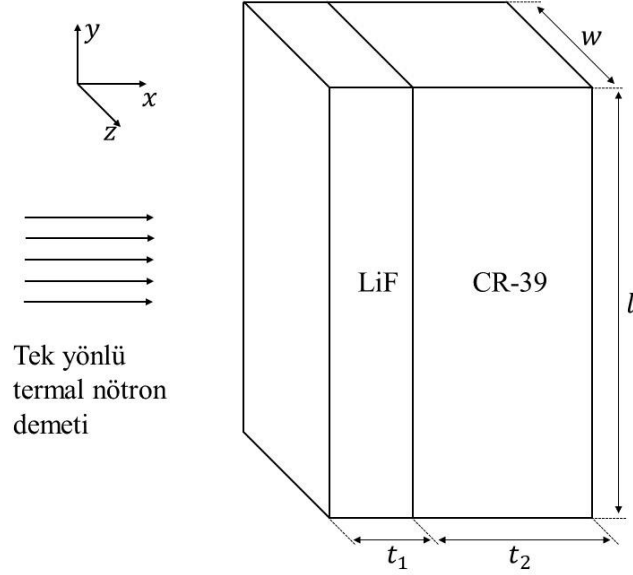
ifadesi yardımıyla hesaplanır. Burada  $H_p(10)$ , dedektör yüzeyindeki kişisel eşdeğer nötron dozudur.  $R_H$  yaygın olarak  $\text{iz}/(\text{cm}^2 \cdot \text{mSv})$  cinsinden ifade edilir.

Dozimetre tepkisi,  $R_H$  veya  $R_\phi$ , dedektör gelen nötronların yönlerinin ve enerjilerinin dağılımına göre değişmektedir. Hızlı nötronlardan kaynaklanan eşdeğer dozun belirlenmesi için kullanılan bir CR-39 dedektörü ele alınırsa izlerin büyük çoğunluğu hızlı nötronların esnek saçılmaları sonucu oluşan protonlardan kaynaklanır. Belirli bir enerjinin altındaki nötronların esnek saçılmaları sonucu oluşan protonlar, dedektör malzemesinde gözlemlenebilir izler oluşturamazlar. Ayrıca soğrulan dozdan eşdeğer doza geçerken kullanılan kalite çarpanı ( $Q$ ) nötron enerjisiyle değişmektedir. Dolayısıyla  $H_p(10)$ 'nin de nötron enerjisinin fonksiyonu olması da  $R_H$ 'nin enerji bağımlılığına katkı sağlamaktadır.

CR-39 dozimetreleri düzlemsel oldukları için bu dozimetrelerin eşdeğer doz tepkisi yüksek açısal bağımlılığa sahiptir. Dolayısıyla dedektör malzemesinde etkileşime giren bir hızlı nötronun algılanıp algılanmayacağına en önemli kriteri nötronun dedektöre giriş açısıdır. Nötronların dedektörün normaline göre dedektöre geliş açıları arttıkça, kritik aşındırma açısından daha büyük açılarla oluşan ikincil yüklü parçacıkların oranı da artar. Dolayısıyla nötronun dozimetre normaline geliş açısı arttıkça dozimetrenin akı tepkisi düşer. Ayrıca nötron akısından kişisel eşdeğer doza dönüşüm katsayısı  $h_{p\phi}(10, E, \alpha)$  da, nötronların geliş açısı arttıkça düşmektedir. Sonuç olarak nötronların dedektöre geliş açısının eşdeğer doz üzerindeki toplam etkisine bakılırsa: nötronun dedektöre geliş açısı arttıkça  $R_H$  düşmektedir.

### 3. TERMAL NÖTRON DOZİMETRESİNİN BENZEŞİMİ

Bu bölümde termal nötron dozimetrisinde kullanılacak bir CR-39 dozimetre sisteminin Monte Carlo benzeşiminin nasıl yapılacağı ve bu dozimetre sisteminin eşdeğer doz tepkisinin nasıl belirleneceği anlatılacaktır. Benzeşimi yapılacak CR-39 dozimetresi Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

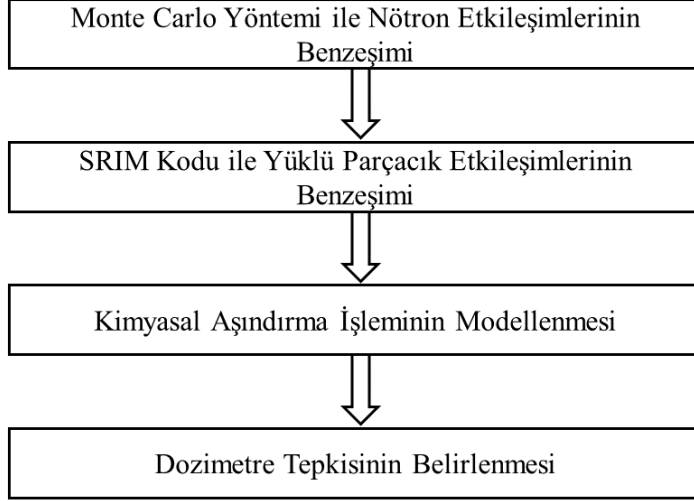


Şekil 3.1. Benzeşimlerde kullanılacak olan CR-39 termal nötron dozimetresinin geometrisi.

Şekil 3.1’deki CR-39 malzemesinin ve LiF dönüştürücü malzemesinin benzeşimlerde kullanılacak gerekli parametreleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Termal nötron dozimetre sisteminin geometrik ve malzeme özellikleri.

LiF Dönüştürücünün Boyutları ( $l \times w \times t_1$ )	25 mm $\times$ 25 mm $\times$ 1,5 $\mu$ m
LiF Yoğunluğu	2,635 g/cm <sup>3</sup>
Lityumun İzotopik Bolluk Oranları	7,59% <sup>6</sup> <sub>3</sub> Li; 92,41% <sup>7</sup> <sub>3</sub> Li
CR-39 Malzemesinin Boyutları ( $l \times w \times t_2$ )	25 mm $\times$ 25 mm $\times$ 1,5 mm
CR-39 Yoğunluğu	1,143 g/cm <sup>3</sup>



Şekil 3.2. Termal nötron dozimetresinin benzeşim aşamaları.

Termal nötron dozimetresinin benzeşiminde kullanılacak yöntemin akış şeması Şekil 3.2’de gösterilmektedir. İlk olarak geliştirilecek olan Monte Carlo kodu yardımıyla dedektör sistemindeki malzemelerdeki nötron etkileşimlerinin benzeşimi yapılacaktır. Bu nötron etkileşimleri sonucu açığa çıkan yüklü parçacıkların dedektör sistemindeki etkileşimlerinin benzeşimi SRIM yazılımı ile yapılacaktır. Bu sayede yüklü parçacıkların CR-39 malzemesinde bıraktıkları izler ile ilgili gerekli bilgiler elde edilecektir. Daha sonra, bu izleri içeren CR-39 dozimetresi için kimyasal aşındırma işlemi sanal ortamda modellenecek ve dedektör yüzeyinde oluşan görünür iz yoğunluğu belirlenecektir. Son olarak ise CR-39 dozimetresinin akı ve eşdeğer doz tepkileri hesaplanacaktır.

### 3.1 Termal Nötron Etkileşmelerinin Benzeşimi

Maxwell enerji dağılımına sahip termal nötronların oda sıcaklığında (293,61 K’de) en olası enerjisi yaklaşık olarak 0,0253 eV’dur. Dedektör sistemindeki malzemeler dikkate alındığında,  ${}^6_3\text{Li}(n,t)\alpha$  reaksiyonun 0,0253 eV enerji değerinde tesir kesiti yaklaşık olarak 940 barn olduğundan nötron etkileşimlerinin büyük çoğunluğu  ${}^6_3\text{Li}$  atomları ile gerçekleşir. Termal nötronlar, bu enerji bölgesinde dozimetre malzemelerindeki tüm izotoplar ile esnek saçılma da yapabilir. Fakat esnek saçılma reaksiyonlarında enerji aktarımı çok küçük olduğu için oluşan geritepki çekirdekleri iz oluşumuna katkıda bulunmazlar. Bu nedenle sadece  ${}^6_3\text{Li}(n,t)\alpha$  reaksiyonu sonucu oluşan alfa parçacıklarının ve tritonların kullanılması bu dozimetre sisteminin benzeşimi için yeterlidir.

Şekil 3.1'deki dozimetre sisteminin geometrisi ve Çizelge 3.1'deki dozimetre sistemi için verilen parametreler Monte Carlo benzeşimlerinde kullanılacaktır. Benzeşimlerde kullanılacak nötron kaynağı ise düzlemsel ve tek yönlüdür. Kaynaktan yayılan nötronlar, Maxwell enerji dağılımına sahiptir. Maxwell enerji dağılımı Eşitlik 2.16 ile verilmektedir, burada mutlak sıcaklık değeri 293,61 olarak alınırsa  $kT$  değeri 0,0253 eV olarak bulunur. Nötronların başlangıçtaki enerjileri bu eşitlik kullanılarak örneklenir.

Kaynağın yaydığı nötronlar  $+z$  yönünde hareket eder. Nötronlar, LiF malzemesine  $x_0 = 0$  noktasından girer. Nötronların LiF malzemesinin yüzeyinden geçtiği noktalar ise aşağıdaki gibi düzgün dağılıma sahip olacak şekilde örneklenir.

$$y_0 = -\frac{l}{2} + l\xi$$

$$z_0 = -\frac{w}{2} + w\xi$$

Burada  $\xi$ ,  $[0,1]$  aralığında düzgün dağılıma sahip bir rassal sayıdır. Aksi belirtilmedikçe eşitliklerde kullanılan  $\xi$  değerleri birbirinden farklıdır.

Daha sonra nötronların etkileşim yapmadan gidebilecekleri ortalama mesafe ( $\lambda$ ),

$$\lambda = -\frac{1}{\Sigma_t} \ln(\xi)$$

ifadesi kullanılarak örneklenir. Burada  $\Sigma_t$ , LiF malzemesinin toplam makroskopik tesir kesitidir. LiF malzemesinde gerçekleşen  ${}^6_3\text{Li}(n,t)\alpha$  reaksiyonları dışında diğer tüm nötron reaksiyonları ihmal edildiği için  $\Sigma_t$ ,  ${}^6\text{Li}$ 'nin makroskopik (n,t) tesir kesitine ( $\Sigma_{n,t}$ ) eşittir. Bu durumda  $\Sigma_{n,t}$ ,

$$\Sigma_{n,t}(E) = N\sigma_{n,t}(E)$$

olarak verilir. Burada;  $N$ ,  ${}^6\text{Li}$  izotopunun atom yoğunluğu;  $\sigma_{n,t}(E)$  ise  ${}^6\text{Li}$  izotopunun (n,t) tesir kesitidir.  $\sigma_{n,t}$ , nötron enerjisinin fonksiyonudur. ENDF/B-VIII.0 nötron tesir kesiti kütüphanesinde nötron enerjisine karşılık  $\sigma_{n,t}$  değerleri verilmektedir [15].

Nötronların LiF malzemesindeki tek etkileşim yolu (n,t) reaksiyonu olarak alındığı için nötronlar etkileşime girdiklerinde direkt olarak soğrulurlar. Dolayısıyla LiF malzemesine giren bir nötron ya soğrulur ya da hiçbir etkileşim yapmadan malzemeyi terkeder.

LiF malzemesine giren nötronların LiF malzemesinin arka yüzeyine olan mesafesi,  $t_1$  kadardır. Eğer  $\lambda > t_1$  ise nötronlar LiF bölgesini etkileşim yapmadan terkeder, eğer

değilse LiF malzemesinde (n,t) reaksiyonu yoluyla soğrulurlar. Bu soğrulma reaksiyonu sonucunda alfa parçacıkları ve tritonlar oluşur.

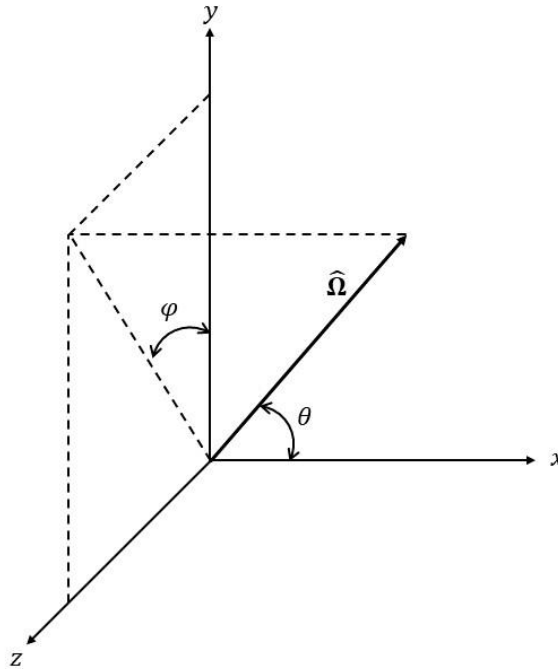
Yüklü parçacık etkileşmelerinin benzeşimi yapabilmek için  ${}^6_3\text{Li}(n,t)\alpha$  reaksiyonu sonucu oluşan alfa parçacıklarının ve tritonların; enerjilerinin, LiF malzemesinde oluştukları konumların ve hareket yönlerinin belirlenmesi gerekmektedir. İlk olarak yüklü parçacıkların enerjileri ele alınırsa  ${}^6_3\text{Li}(n,t)\alpha$  reaksiyonu sonucu oluşan alfa parçacığı yaklaşık 2,05 MeV, triton ise yaklaşık 2,73 MeV enerjiye sahiptir. Bu yüklü parçacıkların oluştukları konum  $(x, y, z)$  ise aşağıdaki gibi belirlenir.

$$x = x_0 + \lambda$$

$$y = y_0$$

$$z = z_0$$

Termal nötronların enerjileri ihmal edilecek kadar küçük olduğu için  ${}^6_3\text{Li}(n,t)\alpha$  reaksiyonu izotropik kabul edilebilir. Dolayısıyla oluşan yüklü parçacıkların hareket yönü gelen nötronun yönünden bağımsızdır. Bu reaksiyonda toplam momentum korunacağı için oluşan alfa parçacığı ve triton birbirine tam olarak zıt yönde hareket ederler.



Şekil 3.3. Küresel kordinat sisteminde birim yön vektörü.

Şekil 3.3’de  $\hat{\Omega}$ , alfa parçacığının hareket yönü olarak alınırsa tritonun yönü  $-\hat{\Omega}$  olarak alınır. Alfa parçacığının hareket yönü ( $\hat{\Omega}_a$ ),

$$\hat{\Omega}_a = \Omega_x \hat{i} + \Omega_y \hat{j} + \Omega_z \hat{k}$$

olarak ifade edilir. Küresel koordinat sisteminde  $\cos\theta = \mu$  olarak alınırsa doğrultu kosinüsleri ( $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ ),

$$\Omega_x = \mu$$

$$\Omega_y = \sqrt{1 - \mu^2} \cos\varphi$$

$$\Omega_z = \sqrt{1 - \mu^2} \sin\varphi$$

ifadeleri ile belirlenir. Yukarıdaki eşitliklerdeki  $\mu$  ve  $\varphi$  ise

$$\mu = 2\xi_1 - 1$$

$$\varphi = 2\pi\xi_2$$

eşitlikleri kullanılarak örneklenir. Burada  $\xi_1$  ve  $\xi_2$ ,  $[0,1]$  aralığında sürekli düzgün dağılıma sahip rassal sayılardır.

Tritonun hareket yönü( $\hat{\Omega}_t$ ) ise

$$\hat{\Omega}_t = -\Omega_x \hat{i} - \Omega_y \hat{j} - \Omega_z \hat{k}$$

şeklinde alınır.

Sonuç olarak LiF dönüştürücü malzemesinde  ${}^6_3\text{Li}(n,t)\alpha$  reaksiyonu sonucunda oluşan alfa parçacıklarının ve tritonların oluştukları konumları ve yönleri Monte Carlo yöntemi ile anlatıldığı şekilde belirlenecektir. Bunlara ek olarak, Monte Carlo benzeşimleri sonucunda termal nötron başına oluşan alfa parçacığı sayısı ve triton sayısı elde edilecektir.

### 3.2 Yüklü Parçacık Etkileşmelerinin Benzeşimi

Nötron etkileşimleri sonucu oluşan alfa parçacıklarının ve tritonların, LiF ve CR-39 malzemeleri ile etkileşimlerinin benzeşimi SRIM yazılımı ile yapılacaktır. SRIM benzeşimlerinin yapılması için oluşan alfa parçacıkları ve tritonlar için iki tane ayrı girdi dosyası oluşturulacaktır.

SRIM girdi dosyaları aşağıdaki iyon parametrelerini içermektedir:

- İyonun atom numarası ( $Z$ ),
- İyonun başlangıçtaki enerjisi ( $E_i$ ),
- İyonun başlangıç konumu ( $x_i, y_i, z_i$ ),

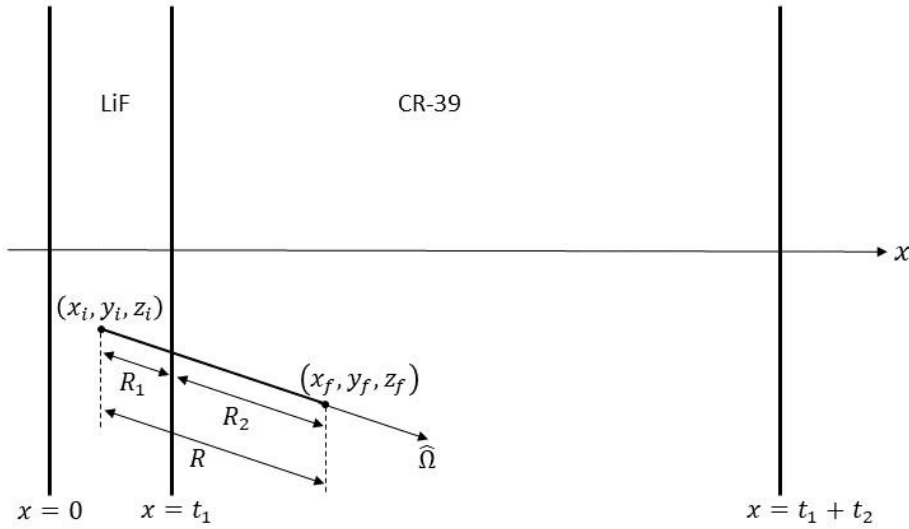


- İyonun doğrultu kosinüsleri ( $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ ).

$E_i$ : alfa parçacığı için 2,05 MeV, triton için ise 2,73 MeV'dur. Alfa parçacığının ve tritonun başlangıç konumları ve doğrultu kosinüslerinin nasıl elde edildiği ise önceki bölümde gösterilmiştir. Bunlara ek olarak, SRIM yazılımının arayüzünden iyonların kütlesi girilmedi. Alfa parçacığının kütlesi yaklaşık 4,003 akb; tritonun kütlesi ise yaklaşık 3,016 akb'dir.

SRIM yazılımına dedektör sisteminin geometrisi tek boyutlu olarak girilebilmektedir, fakat programın çıktı dosyaları üç boyut ( $x, y, z$ ) için gerekli konum bilgilerini içermektedir. Benzeşimlerin sonucunda elde edilen bu konum bilgilerini ve dedektör sisteminin yüzey denklemlerini kullanarak iz uzunluklarını elde etmek için gerekli geometrik düzeltmeler yapılacaktır.

Benzeşimler sonucunda alfa parçacıklarının ve tritonların LiF ve CR-39 malzemelerinde durdukları konumlar elde edilir. Sadece LiF malzemesinden CR-39 malzemesine geçen alfa parçacıkları ve tritonlar iz oluşturabilir.



Şekil 3.4. LiF malzemesinden CR-39 malzemesine geçen bir iyonun bıraktığı iz.

CR-39 malzemesindeki iz uzunluklarının belirlenmesi için CR-39 bölgesine geçen alfa parçacıklarının ve tritonların bu malzemedeki menzillerinin hesaplanması gerekmektedir. Şekil 3.4'de LiF malzemesinde oluşan ve  $\hat{\Omega}$  açısıyla hareket eden bir yüklü parçacığın toplam menzili  $R$  olarak gösterilmektedir. Bu durumda  $R$ ,

$$R = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2}$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır.

Ağır yüklü parçacıkların malzemede iyonizasyona yol açarken neredeyse düz bir yol izlediğinden bahsedilmişti, bu yüzden yüklü parçacığın yolundan sapmaları ihmal edilecektir ve yüklü parçacığın düz bir yol izlediği varsayılacaktır. Bu varsayımı kullanarak, yüklü parçacığın doğrultu kosinüsleri,

$$\Omega_x = \frac{x_f - x_i}{R}$$

$$\Omega_y = \frac{y_f - y_i}{R}$$

$$\Omega_z = \frac{z_f - z_i}{R}$$

eşitlikleri yardımıyla tekrar hesaplanır.

Bu yüklü parçacığın CR-39 malzemesindeki menzili ( $R_2$ ) bulmak için öncelikle yüklü parçacığın CR-39 bölgesine geçip geçmediğinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, Şekil 3.5’de gösterilen LiF malzemesinin yüzeyleri için aşağıdaki yüzey denklemleri yazılır.

$$x_i + \Omega_x S_1 = 0$$

$$x_i + \Omega_x S_2 = t_1$$

$$y_i + \Omega_y S_3 = -l/2$$

$$y_i + \Omega_y S_4 = +l/2$$

$$z_i + \Omega_z S_5 = -w/2$$

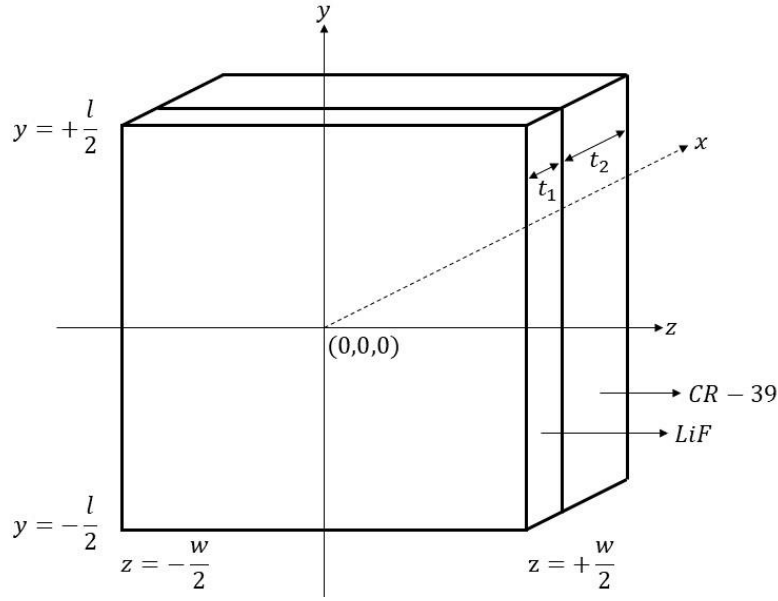
$$z_i + \Omega_z S_6 = +w/2$$

Burada  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  ve  $S_6$ , LiF malzemesinin yüzeylerine olan mesafelerdir. Bu mesafe değerlerinden en küçük pozitif olanı yüzeye en yakın mesafeyi verir. Eğer  $S_2$  yüzeye en yakın mesafe ise yüklü parçacık CR-39 bölgesine geçebilir. Bu durumda yüklü parçacığın CR-39 bölgesine geçmesi için  $R > S_2$  koşulunun sağlanması gerekmektedir, eğer bu koşul sağlanmazsa yüklü parçacık tüm enerjisini LiF malzemesine aktarır bu bölgede durur.

Yüklü parçacık CR-39 bölgesine geçmiş ise parçacığın bu malzemedeki menzili ( $R_2$ ),

$$R_2 = R - R_1$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Burada  $R_1$ , yüklü parçacığın LiF bölgesindeki menzildir ve  $S_2$ ’ye eşittir.



Şekil 3.5. LiF ve CR-39 malzemelerinin yüzeyleri.

Eğer yüklü parçacık LiF malzemesinden CR-39 malzemesine geçmiş ise yüklü parçacığın CR-39 malzemesine girdiği yüzey noktası  $(x_s, y_s, z_s)$ ,

$$x_s = x_i + \Omega_x R_1$$

$$y_s = y_i + \Omega_y R_1$$

$$z_s = z_i + \Omega_z R_1$$

eşitlikleri yardımıyla bulunur.

Enerjilerinin bir kısmını LiF malzemesine aktarıp CR-39 malzemesine geçen iyonların bir kısmı, CR-39 malzemesine de enerjilerinin bir kısmını aktarıp CR-39 yüzeylerinden dışarı çıkabilirler. Bu yüklü parçacıkların menzil değerlerinde düzeltme yapmak gerekmektedir. Bunun için Şekil 3.5'deki CR-39 dedektörünün yüzeyleri için aşağıdaki yüzey denklemleri yazılır.

$$x_s + \Omega_x s_1 = t_1 + t_2$$

$$y_s + \Omega_y s_2 = -l/2$$

$$y_s + \Omega_y s_3 = +l/2$$

$$z_s + \Omega_z s_4 = -w/2$$

$$z_s + \Omega_z s_5 = +w/2$$

Burada  $s_1, s_2, s_3, s_4$  ve  $s_5$ , CR-39 malzemesinin yüzeylerine olan mesafelerdir. Bu mesafe değerlerinden en küçük pozitif olanı CR-39 malzemesinin yüzeyine en yakın

mesafeyi ( $s$ ) verir. Eğer  $R_2 > s$  ise yüklü parçacık CR-39 malzemesinin dışına çıkmış demektir. Dolayısıyla yüklü parçacığın CR-39 bölgesindeki menzili,

$$R_2 = s$$

olarak düzeltilir.

Sonuç olarak, SRIM benzeşimleri sonucunda CR-39 malzemesinde izler oluşturan alfa parçacıklarının ve tritonların CR-39 malzemesindeki oluşturdukları iz uzunlukları ( $R_2$ ) elde edilir.

### 3.3 Görünür İz Hesaplamaları

Alfa parçacıklarının ve tritonların CR-39 dedektöründe oluşturdukları izlerin optik mikroskop altında görünür hale getirilmesi için kimyasal aşındırma işlemi uygulandığından bahsedilmiştir. Görünür izlerin hesaplanması için öncelikle kimyasal aşındırma koşulları belirlenir. CR-39 dedektörü, 70 °C'de 7,25 mol/L NaOH çözeltisine maruz bırakılırsa  $V_b$ , 1,73  $\mu\text{m/saat}$ 'dir [11]. Toplam kimyasal aşındırma süresi ( $T$ ) ise 9 saat olarak alınacaktır. Bu durumda toplam aşındırılan yüzey kalınlığı ( $R_L$ ), Eşitlik 2.6 kullanılarak 15,57  $\mu\text{m}$  olarak bulunur.  $V_t$  ise Eşitlik 2.3'de verildiği gibi artakalan menzilin ( $R - x'$ ) fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi alınacaktır.

$$V_t(R - x') = V_b \left[ 1 + \frac{a_1}{(R - x' + a_2)^{b_1}} \ln(R - x' + a_3) \left( 1 - e^{-\frac{(R-x')}{a_4}} \right) + \frac{R - x'}{a_5} \right]$$

Burada;  $R$  ve  $x'$ ,  $\mu\text{m}$  cinsinden olmalıdır.  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$  ve  $b_1$  parametrelerinin değerleri, alfa parçacıkları ve tritonlar için Çizelge 2.3'de verilmektedir.

CR-39 malzemesinde iz oluşturan alfa parçacıklarının ve tritonların, CR-39 dedektörünün  $x$  eksenine göre doğrultu kosinüsleri ( $\Omega_x = \mu$ ) hep pozitiftir. Aşındırıcı çözelti de dedektör yüzeyine pozitif  $x$  yönünde nüfuz ettiği için kimyasal aşındırma işlemi tüm izler için aynı yönlüdür. Dolayısıyla aşırı aşındırılmamış izler için aşındırıcı çözeltinin iz boyunca nüfuz ettiği mesafeyi ( $L$ ) bulmak için Eşitlik 2.7 kullanılır. İz aşındırması hemen dedektör yüzeyinde başladığı için Eşitlik 2.7'de  $T_e = T$  olarak alınır. Dolayısıyla  $L$ ,

$$T = \int_0^L \frac{1}{V_t(R - x')} dx'$$

ifadesi kullanılarak iterasyonla hesaplanır.

Eğer iz aşırı aşındırılmış ise çözeltinin yüklü parçacığın menziline sonuna nüfuz etme süresi ( $T_R$ ) Eşitlik 2.8 kullanılarak hesaplanır. Bu durumda, aşırı aşındırılmış izler için  $L$ ,

$$L = R + V_b T_b$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır. Burada;  $T_b = T - T_R$  'dir.

Eğer  $L\mu > R_L$  koşulu sağlanıyorsa iz, kimyasal aşındırma işleminden sonra görünür hale gelir. Bu yöntem, CR-39 malzemesinde oluşan tüm izler için uygulanarak alfa parçacığı başına oluşan görünür iz sayısı ve triton başına oluşan görünür iz sayısı hesaplanır.

### 3.4 Termal Nötron Dozimetrelerinin Tepkisinin Hesaplanması

CR-39 termal nötron dozimetresinin akı tepkisi ( $R_\phi$ ), bir termal nötron başına dedektörün ön yüzeyinde oluşan görünür iz sayısı, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R_\phi = P_t \times P_1 + P_\alpha \times P_2 \quad 3.1$$

Burada;

$P_t$ : bir termal nötron başına oluşan triton sayısı,

$P_\alpha$ : bir termal nötron başına oluşan alfa parçacığı sayısı,

$P_1$ : bir triton başına dozimetrenin yüzeyinde oluşan görünür iz sayısı,

$P_2$ : bir alfa parçacığı başına dozimetrenin yüzeyinde oluşan görünür iz sayısıdır.

CR-39 dozimetresinin eşdeğer doz tepkisini hesaplayabilmek için öncelikle kimyasal aşındırma işleminden sonra dozimetrenin ön yüzeyinde oluşan görünür izlerin yoğunluğu hesaplanır. Görünür iz yoğunluğu ( $\rho$ ),

$$\rho = \frac{N_t}{A_s} \quad 3.2$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $N_t$ , dozimetrenin ön yüzeyinde oluşan görünür izlerin toplam sayısı;  $A_s$  ise dozimetrenin ön yüzeyinin toplam alanıdır. Dolayısıyla  $\rho$  'nun birimi, görünür iz /  $\text{cm}^2$ 'dir.

CR-39 dozimetresine  $0^\circ$  açısı ile gelen termal nötronlardan kaynaklanan kişisel eşdeğer dozun,  $H_p(10, 0^\circ)$ , hesaplanması için dozimetrenin ön yüzeyindeki termal nötron akısı ve Çizelge 2.4'de termal nötronlar için verilen nötron akısından kişisel eşdeğer doza dönüşüm katsayısı kullanılır. Bu durumda  $H_p(10, 0^\circ)$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$H_p(10, 0^\circ) = \phi_{th} \times h_{p\phi}(10, 0^\circ) \quad 3.3$$

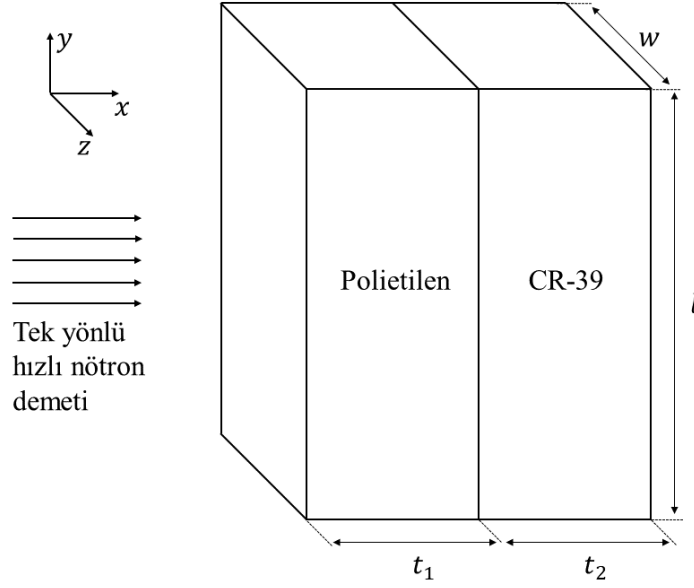
Burada  $\phi_{th}$ , birim yüzeyden dozimetreye giren nötron sayısıdır ve birimi nötron/cm<sup>2</sup>'dir.  $h_{p\phi}(10, 0^\circ)$  ise Çizelge 2.4'de termal nötronlar için 11,4 pSv.cm<sup>2</sup> olarak verilmektedir.  $H_p(10,0^\circ)$  belirlendikten sonra  $R_H(0^\circ)$ ,

$$R_H(0^\circ) = \frac{\rho}{H_p(10,0^\circ)} \quad 3.4$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır. Burada  $R_H(0^\circ)$ 'nin birimi, görünür iz / (cm<sup>2</sup>.mSv)'dir.

#### 4. HIZLI NÖTRON DOZİMETRESİNİN BENZEŞİMİ

Bu bölümde, hızlı nötron dozimetrisinde kullanılacak bir CR-39 dozimetre sisteminin Monte Carlo benzeşiminin nasıl yapılacağı ve eşdeğer doz tepkisinin nasıl hesaplanacağı anlatılacaktır. Şekil 4.1’de polietilen ve CR-39 malzemelerinden oluşan dozimetre sistemi gösterilmektedir.

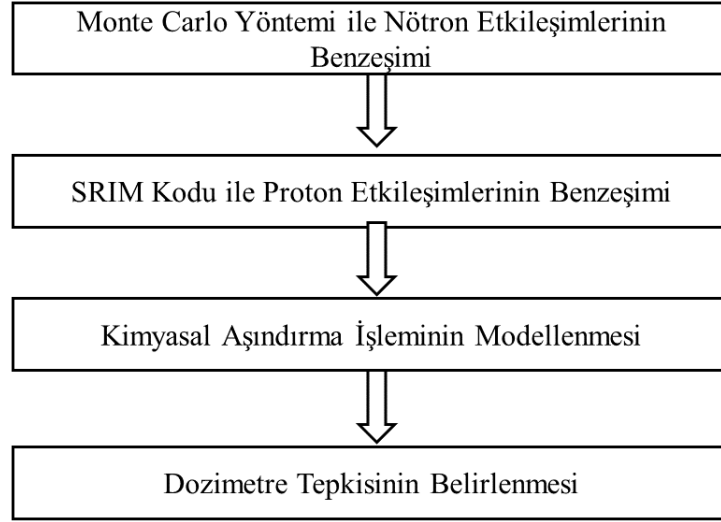


Şekil 4.1. Benzeşimlerde kullanılacak olan CR-39 hızlı nötron dozimetresinin geometrisi.

Şekil 4.1’de gösterilen benzeşimlerde kullanılacak olan hızlı nötron dozimetre sisteminin malzeme özellikleri ve boyutları Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Hızlı nötron dozimetre sisteminin geometrik ve malzeme özellikleri.

Polietilen Malzemenin Boyutları ( $l \times w \times t_1$ )	25 mm $\times$ 25 mm $\times$ 1,5 mm
Polietilenin Yoğunluğu	0,93 g/cm <sup>3</sup>
CR-39 Dedektörünün Boyutları ( $l \times w \times t_2$ )	25 mm $\times$ 25 mm $\times$ 1,5 mm
CR-39 Yoğunluğu	1,143 g/cm <sup>3</sup>



Şekil 4.2. Hızlı nötron dozimetresinin benzeşim aşamaları.

Şekil 4.2’de, hızlı nötron dozimetresinin benzeşiminde kullanılacak yöntemin adımları gösterilmektedir. İlk olarak, dozimetre sistemindeki malzemelerde gerçekleşen hızlı nötron etkileşimlerinin benzeşimi Monte Carlo yöntemi ile yapılacaktır. Hızlı nötronların esnek saçılması sonucu polietilen ve CR-39 malzemelerinde oluşan protonlarla ilgili gerekli bilgiler elde edilecektir. Protonların bu malzemelerdeki etkileşimlerinin benzeşimi ise SRIM yazılımı ile yapılacaktır. SRIM benzeşimleri sonucunda, protonların CR-39 malzemesinde bıraktıkları izler ile ilgili gerekli bilgiler elde edilecektir. Daha sonra bu izler için kimyasal aşındırma işlemi sanal ortamda modellenilecek ve dozimetre yüzeyindeki görünür iz yoğunluğu belirlenecektir. Son olarak ise iz uzunluklarının dağılımı kullanılarak kişisel eşdeğer doz hesaplanacak ve dozimetrenin eşdeğer doz tepkisi belirlenecektir.

#### 4.1 Hızlı Nötron Etkileşmelerinin Benzeşimi

Nötron etkileşimlerinin benzeşiminde Şekil 4.1’deki geometri ve Çizelge 4.1’de verilen değerler kullanılacaktır. Monte Carlo benzeşimlerinde kullanılacak nötron kaynağı, Şekil 4.1’de gösterildiği düzlemsel ve tek yönlüdür. Bu kaynaktan çıkan hızlı nötronlar, Şekil 2.9’da verilen <sup>241</sup>Am-Be nötron kaynağından yayılan hızlı nötronların enerji dağılımına sahiptir. Bu nötron kaynağının enerji dağılımı, termal enerji bölgesinden 11 MeV’e kadar olup, 3 MeV ve 5 MeV enerji değerlerinde iki geniş pike sahiptir. Ayrıca benzeşimlerde farklı enerji aralıklarında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynakları da kullanılacaktır.



Daha önce de belirtildiği gibi hızlı nötronlar, polietilen ve CR-39 malzemelerinde C, H ve O atomları ile farklı tiplerde etkileşimler gerçekleştirirler. Fakat hızlı nötron dozimetresinin benzeşiminde sadece esnek saçılma reaksiyonları sonucu ortaya çıkan protonlar kullanılacaktır. Bir nötronun tek bir esnek saçılma sonrası H atomuna aktarabileceği maksimum enerji, bu nötronun enerjisinin tamamıdır. Fakat bir nötron; C atomuna enerjisinin maksimum olarak yaklaşık %28,4'ünü, O atomuna ise enerjisinin maksimum olarak yaklaşık %22,1'ini tek bir esnek saçılma reaksiyonunda aktarabilir. Bu nedenle esnek saçılma sonucu açığa çıkan C ve O iyonlarının enerjileri protonlara göre daha düşüktür. Aynı zamanda C ve O iyonlarının kütleleri de protonlara göre fazla olduğu için dedektör sisteminde bulunan malzemelerdeki menzilleri protonlara göre çok kısadır. Bu yüzden bu iyonlarının iz oluşumuna katkıları ihmal edilecektir. Ayrıca hızlı nötronların C ve O atomları ile gerçekleştirdiği esnek olmayan saçılma ve yüklü parçacık reaksiyonlarının gerçekleşme olasılıkları düşük olduğu için bu reaksiyonlar sonucu oluşan yüklü parçacıkların da iz oluşumuna katkıları ihmal edilecektir.

Nötron etkileşimlerinin benzeşiminde Analog Monte Carlo tekniği kullanılacaktır. İlk olarak,  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağından yayılan nötronların başlangıçtaki enerjileri Şekil 2.9'da verilen enerji dağılımı kullanılarak örneklenir. Nötronların başlangıçtaki yönü ( $\hat{\Omega}$ ) için doğrultu kosinüsleri,

$$\Omega_x = 1.0$$

$$\Omega_y = 0$$

$$\Omega_z = 0$$

olarak alınır. Nötronların  $x_i = 0$  noktasında dozimetre sistemine girdikleri yüzey noktaları ( $y_i, z_i$ ),

$$y_i = -\frac{l}{2} + l\xi$$

$$z_i = -\frac{w}{2} + w\xi$$

eşitlikleri kullanılarak düzgün dağılıma sahip olacak şekilde örneklenir. Burada  $\xi$ ,  $[0,1]$  aralığında düzgün dağılıma sahip bir rassal sayıdır. Aksi belirtilmedikçe eşitliklerde kullanılan  $\xi$  değerleri birbirinden farklıdır.

Nötronların malzemedeki etkileşim yapmadan gidebilecekleri ortalama mesafe ( $\lambda$ ),

$$\lambda = -\frac{1}{\Sigma_t(E)} \ln(\xi)$$

ifadesi kullanılarak örneklenir. Burada  $\Sigma_t(E)$ , polietilenin veya CR-39 malzemesinin toplam makroskopik tesir kesitidir ve nötron hangi bölgede ise o bölge için hesaplanır. Polietilen ve CR-39 malzemelerinde gerçekleşen esnek saçılma reaksiyonları dışında diğer tüm nötron reaksiyonları ihmal edildiği için  $\Sigma_t$ , malzemenin toplam esnek saçılma makroskopik kesiti ( $\Sigma_e$ ) olarak alınır. Bu durumda  $\Sigma_e$ ,

$$\Sigma_e(E) = \sum_{i=1}^n N_i \sigma_e^i(E)$$

olarak verilir. Burada;  $N_i$ , izotop  $i$ 'nin atom yoğunluğu;  $\sigma_e^i(E)$ , izotop  $i$ 'nin esnek saçılma tesir kesitidir.  $\sigma_e^i$ , nötron enerjisinin fonksiyonudur. ENDF/B-VIII.0 nötron tesir kesiti kütüphanesinde H, C ve O izotopları için nötron enerjisine karşılık  $\sigma_e$  değerleri verilmektedir [15].

Nötronun bir yüzeye ulaşması için katetmesi gereken minimum mesafe ise aşağıdaki yüzey denklemleri kullanılarak belirlenir.

$$\begin{aligned} x_i + \Omega_x d_{S1} &= 0 \\ x_i + \Omega_x d_{S2} &= t_1 \\ x_i + \Omega_x d_{S3} &= t_1 + t_2 \\ y_i + \Omega_y d_{S4} &= l/2 \\ y_i + \Omega_y d_{S5} &= -l/2 \\ z_i + \Omega_z d_{S6} &= w/2 \\ z_i + \Omega_z d_{S7} &= -w/2 \end{aligned}$$

Burada  $d_{S1}$ ,  $d_{S2}$ ,  $d_{S3}$ ,  $d_{S4}$ ,  $d_{S5}$ ,  $d_{S6}$  ve  $d_{S7}$  uzunluklarından minimum pozitif olanı, yüzeye en yakın mesafeyi ( $d_S$ ) verir.

Polietilen veya CR-39 malzemesi için  $\lambda$  ve  $d_S$  hesaplandıktan sonra, eğer  $\lambda > d_S$  ise nötron etkileşim yapmadan bulunduğu malzeme bölgesini terkeder. Bu durumda nötron dozimetre sistemini ya tamamen terkeder ya da dozimetre sistemindeki malzemeler arasında geçiş yapar. Eğer  $\lambda < d_S$  ise nötron, bulunduğu malzemeye göre H, C veya O atomlarından birisiyle esnek saçılma yapar. Nötron, polietilen bölgesinde ise esnek saçılma yaptığı atom,

$$\begin{aligned} P_H &= \frac{\Sigma_e^H(E)}{\Sigma_e^H(E) + \Sigma_e^C(E)} \\ P_C &= \frac{\Sigma_e^C(E)}{\Sigma_e^H(E) + \Sigma_e^C(E)} \end{aligned}$$

olasılıkları yardımıyla belirlenir. Öncelikle  $[0,1]$  aralığında bir rassal sayı ( $\xi$ ) üretilir, eğer  $\xi < P_H$  ise nötron H ile;  $\xi \geq P_H$  ise C ile esnek saçılma yapar. Nötron, CR-39 bölgesinde ise nötronun esnek saçılma yaptığı atomu belirlemek için aşağıda verilen olasılıklar kullanılır.

$$P_H = \frac{\Sigma_e^H(E)}{\Sigma_e^H(E) + \Sigma_e^C(E) + \Sigma_e^O(E)}$$

$$P_C = \frac{\Sigma_e^C(E)}{\Sigma_e^H(E) + \Sigma_e^C(E) + \Sigma_e^O(E)}$$

$$P_O = \frac{\Sigma_e^O(E)}{\Sigma_e^H(E) + \Sigma_e^C(E) + \Sigma_e^O(E)}$$

Önceki durumdaki gibi  $[0,1]$  aralığında bir rassal sayı ( $\xi$ ) üretilir. Nötron;  $\xi < P_H$  ise H,  $P_H \leq \xi < (P_H + P_C)$  ise C,  $\xi \geq (P_H + P_C)$  ise O ile esnek saçılma yapar.

Nötronun esnek saçılma yaptığı nokta  $(x_f, y_f, z_f)$ ,

$$x_f = x_i + \lambda \Omega_x$$

$$y_f = y_i + \lambda \Omega_y$$

$$z_f = z_i + \lambda \Omega_z$$

eşitlikleri ile belirlenir.

Esnek saçılma kütle merkezi sisteminde izotropik kabul edilirse saçılma sonrasında nötron enerjisi ( $E'$ ),

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

eşitliği kullanılarak belirlenir. Burada;  $E$ , nötronun saçılmadan önceki enerjisi;  $A$ , hedef çekirdeğin kütlesi;  $\mu_{cm}$  ise kütle merkezi sisteminde saçılma açısının kosinüsüdür ve

$$\mu_{cm} = 2\xi - 1$$

ifadesi kullanılarak örneklenir.  $E'$  belirlendikten sonra ise laboratuvar sisteminde saçılma açısının ( $\theta$ ) kosinüsü,

$$\cos\theta = \hat{\Omega} \cdot \hat{\Omega}' = \frac{1}{2}(A + 1) \sqrt{\frac{E}{E'}} + \frac{1}{2}(A - 1) \sqrt{\frac{E'}{E}}$$

ile belirlenir. Azimut açısı ( $\varphi$ ), serbest değişken olduğu için aşağıdaki gibi örneklenir.

$$\varphi = 2\pi\xi$$

Sonuç olarak, nötronun saçılmadan sonraki doğrultu kosinüsleri,

$$\Omega'_x = \sin\theta \sqrt{1 - \Omega_x^2} \cos\varphi + \Omega_x \cos\theta$$

$$\Omega'_y = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1 - \Omega_x^2}} [-\Omega_z \sin\varphi - \Omega_x \Omega_y \cos\varphi] + \Omega_y \cos\theta$$

$$\Omega'_z = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1 - \Omega_x^2}} [\Omega_y \sin\varphi - \Omega_y \Omega_z \cos\varphi] + \Omega_z \cos\theta$$

ifadeleriyle belirlenir. Esnek saçılmadan sonra nötronun başlangıçtaki; konumu  $(x_i, y_i, z_i)$ , yönü ( $\hat{\Omega}$ ) ve enerjisi ( $E$ ) güncellenir ve nötron dozimetre sistemini terkedene kadar veya enerjisi belli bir değerin altına düşene kadar nötron takip edilir.

Hızlı nötronların H ile esnek saçılmaları sonucu oluşan protonların dozimetre sisteminde bulunan malzemelerdeki etkileşmelerinin benzeşimlerini yapabilmek için protonların enerjileri, oluştukları konumlar ve yönleri belirlenmelidir. Esnek saçılma sonucu toplam kinetik enerji korunur. Dolayısıyla protonun enerjisi ( $E_p$ ),

$$E_p = E - E'$$

ifadesi ile belirlenir. Esnek saçılma reaksiyonunda toplam momentum da korunur. Momentumun korunumu denklemi ise

$$\vec{P}_i = \vec{P}_f + \vec{P}_p$$

şeklinde yazılır. Burada;  $\vec{P}_i$ , nötronun çarpışmadan önceki momentumu;  $\vec{P}_f$ , nötronun çarpışmadan sonraki momentumu;  $\vec{P}_p$  ise protonun momentumudur. Bu eşitlik, birim yön vektörleri kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_i \hat{\Omega} = P_f \hat{\Omega}' + P_p \hat{\Omega}_p$$

Kütlesi  $m$  olan ve  $E$  enerjisine sahip bir parçacığın momentumunun büyüklüğü olan  $P$ ,

$$P = \sqrt{2mE}$$

ifadesiyle verilir. Bu eşitlik kullanılarak momentumun korunumu denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sqrt{2m_n E} \hat{\Omega} = \sqrt{2m_n E'} \hat{\Omega}' + \sqrt{2m_p E_p} \hat{\Omega}_p$$

Burada;  $m_n$ , nötronun kütlesi,  $m_p$  ise protonun kütlesidir. Bu eşitlik kullanılarak protonun yönünü bulmak için doğrultu kosinüsleri,

$$\Omega_{p,x} = \frac{\sqrt{2m_n E} \Omega_x - \sqrt{2m_n E'} \Omega'_x}{\sqrt{2m_p E_p}}$$

$$\Omega_{p,y} = \frac{\sqrt{2m_n E} \Omega_y - \sqrt{2m_n E'} \Omega'_y}{\sqrt{2m_p E_p}}$$

$$\Omega_{p,z} = \frac{\sqrt{2m_n E} \Omega_z - \sqrt{2m_n E'} \Omega'_z}{\sqrt{2m_p E_p}}$$

ifadeleri yardımıyla hesaplanır.

Monte Carlo benzeşimleri sonucunda hızlı nötronların H atomları ile esnek saçılmaları sonucu oluşan protonların;

- oluştukları konumlar  $(x, y, z)$ ,
- ilk enerjileri  $(E_p)$  ve
- hareket yönleri  $(\hat{\Omega}_p)$

elde edilmiş olur.

Esnek saçılma reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan protonların bazıları çok düşük enerjiye sahiptir. Bu düşük enerjili protonların malzemede bırakacakları hasarlar, iz oluşumu için yetersiz olacaktır. Dolayısıyla belli bir enerji değerinin altında enerjiye sahip olan protonlar SRIM benzeşimlerinde kullanılmayacaktır. Bu amaçla 10 keV'dan düşük enerjiye sahip protonlar hesaplamalardan çıkarılacaktır.

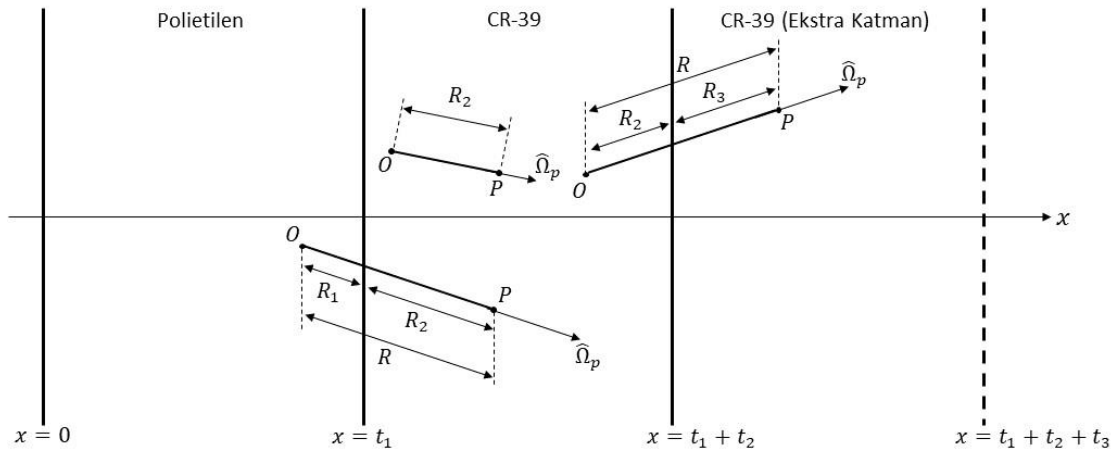
#### 4.2 Proton Etkileşmelerinin Benzeşimi

Hızlı nötronların esnek saçılması sonucu polietilen ve CR-39 malzemelerinde oluşan protonların bu malzemelerdeki etkileşimlerinin benzeşimi SRIM yazılımı ile yapılacaktır. SRIM benzeşimleri sonucunda, protonların CR-39 malzemesinde durduğu konumlar ve menzilleri gibi parametreler hesaplanacaktır. SRIM yazılımı ile protonların dozimetre sisteminde bulunan malzemelerdeki etkileşimlerinin benzeşiminin yapılabilmesi için hazırlanması gereken girdi dosyası aşağıdaki iyon parametrelerini içermektedir.

- Protonun atom numarası  $(Z)$ ,
- Protonun enerjisi  $(E_p)$ ,
- Protonun başlangıç konumu  $(x_i, y_i, z_i)$ ,
- Protonun doğrultu kosinüsleri  $(\Omega_{p,x}, \Omega_{p,y}, \Omega_{p,z})$ .

Protonun başlangıç konumu, esnek saçılmanın gerçekleştiği konumdur ve nasıl belirlendiği önceki bölümde anlatılmıştır. Ayrıca protonun enerjisinin ve doğrultu kosinüslerinin nasıl elde edildiği de önceki bölümde anlatılmıştır. Bunlara ek olarak, SRIM yazılımının arayüzünden protonun kütlesi girilmelidir. Protonun kütlesi yaklaşık olarak 1,008 akb'dir.

SRIM benzeşimleri sonucunda, dedektör sistemindeki malzemelerde protonların durdukları noktalar  $(x_f, y_f, z_f)$  elde edilecektir. SRIM benzeşimlerinde Şekil 4.3'de gösterilen geometri kullanılacaktır. Burada üç farklı protonun bıraktığı izler gösterilmektedir. O noktası protonun oluştuğu noktayı, P noktası ise protonun durduğu noktayı simgelemektedir.  $R_1$ , herhangi bir protonun polietilen malzemesindeki menzili;  $R_2$ , herhangi bir protonun CR-39 malzemesindeki menzillini;  $R_3$ , enerjisinin bir kısmını dozimetre sistemine aktarıp dozimetrenin dışına çıkan bir protonun eklenen ekstra CR-39 katmanındaki menzili;  $R$  ise protonun toplam menzili ifade etmektedir.



Şekil 4.3. Polietilen ve CR-39 malzemelerinde protonların bıraktıkları izler.

Protonların menzilleri boyunca düz bir yol izlediğini kabul edilirse  $O(x_i, y_i, z_i)$  noktasında oluşan ve  $P(x_f, y_f, z_f)$  noktasında duran bir protonun toplam menzili( $R$ ),

$$R = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2}$$

ifadesi kullanılarak belirlenir.

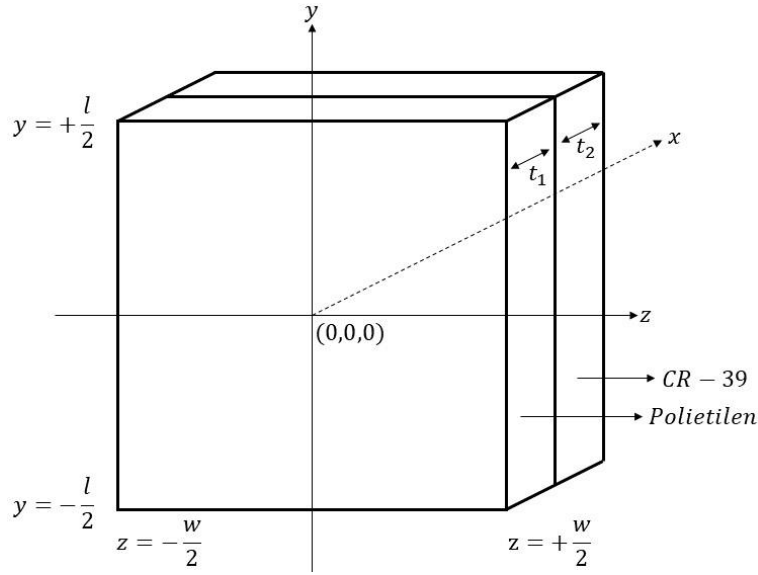
Protonun yönünün doğrultu kosinüsleri,

$$\Omega_{p,x} = \frac{x_f - x_i}{R}$$

$$\Omega_{p,y} = \frac{y_f - y_i}{R}$$

$$\Omega_{p,z} = \frac{z_f - z_i}{R}$$

eşitlikleri yardımıyla tekrar hesaplanır.



Şekil 4.4. Polietilen ve CR-39 malzemelerinin yüzeyleri.

Polietilen malzemesinde oluşup CR-39 malzemesine geçen protonların CR-39 malzemesindeki menzilin ( $R_2$ ) bulmak için öncelikle protonun CR-39 bölgesine geçip geçmediğini belirlemek gerekir. Bu amaçla, Şekil 4.4'deki polietilen yüzeyleri için aşağıdaki yüzey denklemleri yazılır.

$$\begin{aligned}
 x_i + \Omega_{p,x} S_1 &= 0 \\
 x_i + \Omega_{p,x} S_2 &= t_1 \\
 y_i + \Omega_{p,y} S_3 &= -l/2 \\
 y_i + \Omega_{p,y} S_4 &= +l/2 \\
 z_i + \Omega_{p,z} S_5 &= -w/2 \\
 z_i + \Omega_{p,z} S_6 &= +w/2
 \end{aligned}$$

Burada;  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  ve  $S_6$ , polietilen malzemesinin yüzeylerine olan mesafelerdir. Bu mesafe değerlerinden en küçük pozitif olanı polietilen malzemesinin yüzeyine en yakın mesafeyi verir. Eğer  $S_2$  yüzeye en yakın mesafe ise proton CR-39 bölgesine geçebilir. Protonun CR-39 bölgesine geçmesi için  $R > S_2$  koşulunun sağlanması gerekmektedir; eğer bu koşul sağlanmazsa proton enerjisini polietilen malzemesine aktarır bu bölgede durur. Proton, CR-39 bölgesine geçmiş ise protonun bu malzemedeki menzili ( $R_2$ ),

$$R_2 = R - R_1$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada  $R_1$ , protonun polietilen bölgesindeki menzildir ve  $S_2$ 'ye eşittir.

Eğer proton polietilen malzemesinden CR-39 malzemesine geçmiş ise protonun CR-39 malzemesine girdiği yüzey noktası  $(x_s, y_s, z_s)$ ,

$$x_s = x_i + \Omega_{p,x} R_1$$

$$y_s = y_i + \Omega_{p,y} R_1$$

$$z_s = z_i + \Omega_{p,z} R_1$$

denklemleri kullanılarak hesaplanır.

Enerjilerinin bir kısmını polietilen malzemesine aktarıp CR-39 malzemesine geçen protonların bazıları, CR-39 malzemesine de enerjilerinin bir kısmını aktarıp CR-39 malzemesinin yüzeylerinden bu malzemenin dışına çıkabilirler. Bu protonların menzil değerlerinde düzeltme yapmak gerekmektedir. Bunun için Şekil 4.4'deki CR-39 yüzeyleri için aşağıdaki yüzey denklemleri yazılır.

$$x_s + \Omega_{p,x} s_1 = t_1 + t_2$$

$$y_s + \Omega_{p,y} s_2 = -l/2$$

$$y_s + \Omega_{p,y} s_3 = +l/2$$

$$z_s + \Omega_{p,z} s_4 = -w/2$$

$$z_s + \Omega_{p,z} s_5 = +w/2$$

Burada;  $s_1, s_2, s_3, s_4$  ve  $s_5$ , CR-39 malzemesinin yüzeylerine olan mesafelerdir. Bu mesafe değerlerinden en küçük pozitif olanı CR-39 yüzeyine en yakın mesafeyi ( $s$ ) verir. Eğer  $R_2 > s$  ise proton CR-39 malzemesinin dışına çıkmış demektir. Dolayısıyla, protonun CR-39 bölgesindeki menzili,

$$R_2 = s$$

olarak düzeltilir.

Eğer proton CR-39 malzemesinde oluşup enerjisinin tamamını aktardıktan sonra CR-39 malzemesinde durursa  $R_2$ , protonun toplam menzili olan  $R$ 'a eşittir. Fakat CR-39 malzemesinde oluştuktan sonra enerjisinin bir kısmını CR-39 malzemesine aktarıp bu malzemenin dışına çıkan protonların menzillerinde düzeltme yapmak gerekmektedir. Bunun için tekrar aşağıdaki CR-39 malzemesinin yüzey denklemleri yazılır.

$$x_i + \Omega_{p,x} d_1 = t_1$$

$$x_i + \Omega_{p,x} d_2 = t_1 + t_2$$

$$y_i + \Omega_{p,y} d_3 = -l/2$$

$$y_i + \Omega_{p,y} d_4 = +l/2$$

$$z_i + \Omega_{p,z} d_5 = -w/2$$



$$z_i + \Omega_{p,z} d_6 = +w/2$$

Burada;  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  ve  $d_6$ , CR-39 malzemesinin yüzeylerine olan mesafelerdir. Bu mesafe değerlerinden pozitif ve en küçük olanı, CR-39 yüzeyine en yakın mesafeyi ( $d$ ) verir. Eğer  $R_2 > d$  ise proton, CR-39 malzemesinin dışına çıkmış demektir. Bu durumda  $R_2$ ,

$$R_2 = d$$

olarak düzeltilir.

Şekil 4.3'de gösterildiği gibi CR-39 malzemesinde oluşan ve bu malzemenin arka tarafından sistemi terkeden protonların CR-39 bölgesi içerisindeki ve dışarısındaki menzillerini hesaplayabilmek için  $t_3$  kalınlığında bir CR-39 katmanı daha eklenmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi bu protonların bıraktıkları izler zıt yönlü aşınmaktadır. Dolayısıyla bu protonlardan kaynaklanan izlerin kimyasal aşındırmasını modellemek için bu protonların dedektörün dışındaki menzilleri ( $R_3$ ) de hesaplanmalıdır. Eğer yukarıda  $R_2$  için yapılan düzeltmelerde hesaplanan  $d, d_2$ 'ye eşitse ve  $R_2 > d$  ise proton CR-39 dozimetresinin arka yüzeyinden dışarı çıkmış demektir. Bu durumda  $R_3$ ,

$$R_3 = R - R_2$$

olarak verilir. Burada  $R_2, d_2$ 'ye eşittir.

SRIM benzeşimleri ve yukarıda anlatılan hesaplamalar sonucunda, CR-39 malzemesinde protonlardan kaynaklanan izlerin:

- başlangıç konumları ( $x_i, y_i, z_i$ ),
- bitiş konumları ( $x_f, y_f, z_f$ ),
- uzunlukları ( $R_2$ ) ve
- doğrultu kosinüsleri ( $\Omega_{p,x}, \Omega_{p,y}, \Omega_{p,z}$ )

elde edilir. Ayrıca CR-39 dedektörünün arka yüzeyinden dedektörü terk eden protonların dedektör dışındaki menzilleri( $R_3$ ) de elde edilir.

### 4.3 Görünür İzlerin Belirlenmesi

CR-39 malzemesi, 70 °C'de 7,25 mol/L NaOH çözeltisine maruz bırakılırsa  $V_b$  'nın, 1,73  $\mu\text{m/saat}$  olduğundan daha önce bahsedilmişti. Toplam kimyasal aşındırma süresi ise 12 saat olarak alınacaktır. Bu durumda CR-39 malzemesinin ön ve arka yüzeyleri, 12 saat boyunca aşındırılacaktır. Bu durumda her bir yüzey için  $R_L$ , Eşitlik 2.6'dan 20,76  $\mu\text{m}$

olarak hesaplanır.  $V_t$  ise Eşitlik 2.5’de verildiği gibi artakalan menzilin ( $R'$ ) fonksiyonu olarak alınacaktır.

#### 4.3.1 Aynı Yönlü Kimyasal İz Aşındırması

Protonların oluşturduğu izlerin, CR-39 dedektörünün  $x$  eksenine göre doğrultu kosinüslerinin ( $\Omega_{p,x} = \cos\theta_p$ ) nasıl hesaplandığı önceki bölümde gösterilmiştir. CR-39 malzemesinin ön bölümünde  $\theta_p < \pi/2$  açısıyla ve arka bölümünde ise  $\theta_p > \pi/2$  açısıyla oluşan izler, aynı yönlü aşındırılırlar. Aynı yönlü aşındırılan izlerin görünür olması için aşındırıcı çözeltinin öncelikle izin başlangıç noktası olan  $x_i$ 'ye kadar nüfuz etmesi gerekmektedir. Eğer çözelti izin olduğu noktaya kadar nüfuz etmezse iz aşındırması başlamaz, dolayısıyla görünür iz oluşmaz. İz aşındırması;

- dedektörün ön bölümünde oluşan izler için  $t_1 \leq x_i \leq (t_1 + R_L)$ ,
- dedektörün arka bölümünde oluşan izler için  $(t_1 + t_2 - R_L) \leq x_i \leq (t_1 + t_2)$

olduğunda başlar. Polietilen bölgesinden CR-39 bölgesine geçen protonların bıraktıkları izlerin aşındırması hemen başlar çünkü bu izler için  $x_i = t_1$  olarak alınır.

Daha önce aynı yönlü aşındırılan izlerin görünür olup olmadığını nasıl belirlendiği ve görünür iz uzunluğunun nasıl hesaplandığı anlatılmıştı. Burada CR-39 dedektöründe  $x$  eksenine göre  $\theta_p$  açısıyla hareket eden bir protonun bıraktığı izin aynı yönlü aşınması ele alınacaktır. Eğer dedektörün koordinat sistemi,  $x$  eksenine göre  $\theta_p$  açısı kadar döndürülürse parçacığın yolu  $x'$  ekseninde olacaktır. Bu durumda aşırı aşındırılmamış izler için  $L$ ,

$$T_e = \int_0^L \frac{1}{V_t(R - x')} dx'$$

ifadesini kullanarak iterasyon ile hesaplanır. Burada iz aşındırma süresi olan  $T_e$  : dedektörün ön bölümünde oluşan izler için,

$$T_e = T - \frac{x_i - t_1}{V_b}$$

dedektörün arka bölümündeki izler için,

$$T_e = T - \frac{t_1 + t_2 - x_i}{V_b}$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır.

$V_t$ , artakalan menzilin  $(R - x')$  fonksiyonu olarak Eşitlik 2.5 kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$V_t(R - x') = V_b \left[ 1 + 2 a_1 \frac{(R - x')(V_{max} - 1)}{a_1^2 + (R - x')^2} \right]$$

Burada  $a_1 = 3,2 \mu\text{m}$  ve  $V_{max} = 2,20$ 'dir. Ayrıca bu fonksiyonda  $R$  ve  $x'$ ,  $\mu\text{m}$  cinsinden olmalıdır.

Eğer iz aşırı aşındırılmış ise  $L$ 'yi bulmak için önce çözeltinin protonun menziline sonuna nüfuz etme süresini ( $T_R$ ) bulmak gerekmektedir.  $T_R$ ,

$$T_R = \int_0^R \frac{1}{V_t(R - x')} dx'$$

integrali ile bulunur. Aşındırıcı çözelti protonun menziline sonuna  $T_R$  sürede nüfuz ederse iz, geriye kalan  $T_b$  süre boyunca  $V_b$  hızı ile aşınır. Bu durumda, aşırı aşındırılmış izler için çözeltinin iz boyunca nüfuz ettiği mesafe ( $L$ ),

$$L = R + V_b T_b$$

ifadesi kullanılarak elde edilir. Burada  $T_b = T_e - T_R$ 'dir.

Bir izin aynı yönlü kimyasal aşındırma işlemi sonucunda görünür olması için:

- CR-39 malzemesinin ön bölümünde aşındırılan izler için  $L \cos \theta_p > h$ ,
- CR-39 malzemesinin arka bölümünde aşındırılan izler için ise  $L |\cos \theta_p| > h$

olması gerekir. Burada efektif aşındırılan yüzey kalınlığı ( $h$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$h = V_b T_e$$

Eğer iz aynı yönlü kimyasal aşındırılması sonucu görünür iz oluşmuşsa oluşan görünür izin uzunluğu ( $L_t$ ),

$$L_t = L - \frac{h}{|\cos \theta_p|}$$

ifadesi yardımıyla hesaplanır.

#### 4.3.2 Zıt Yönlü Kimyasal İz Aşındırması

CR-39 malzemesinin ön bölümünde  $\theta_p > \pi/2$  açısıyla ve dedektörün arka bölümünde  $\theta_p < \pi/2$  açısıyla oluşan izler zıt yönlü aşındırılırlar. Zıt yönlü aşındırma işleminde iz aşındırması yüklü parçacığın malzemede durduğu noktadan başlar ve parçacığın oluştuğu noktaya doğru ilerler. Dolayısıyla iz aşındırmasının başlaması için aşındırıcı çözeltinin öncelikle izin bitiş noktasına ( $x_f$ ) kadar nüfuz etmesi gerekmektedir. Eğer çözelti izin

bitiş noktasına kadar nüfuz etmezse iz aşındırması başlamaz, dolayısıyla görünür iz oluşmaz. Zıt yönlü aşındırma işleminde iz aşındırması CR-39 malzemesinin:

- ön bölümündeki izler için  $t_1 \leq x_f \leq (t_1 + R_L)$ ,
- arka bölümündeki izler için  $(t_1 + t_2 - R_L) \leq x_f \leq (t_1 + t_2)$

olduğunda başlar. CR-39 malzemesinde oluştuktan sonra bu malzemeyi ön ve arka yüzeylerinden terkeden protonların bıraktıkları izlerin aşındırması hemen başlar çünkü bu izler için  $x_f$ , sırasıyla  $x_f = t_1$  ve  $x_f = t_1 + t_2$  olarak alınır.

Zıt yönlü aşındırılan izlerin görünür olup olmadığının nasıl belirlendiği ve görünür iz uzunluğunun nasıl hesaplandığından daha önce bahsedilmişti. Burada iki farklı durum vardır. İlk durumda, proton CR-39 malzemesinin içerisinde bir noktada oluştuktan sonra enerjisinin tamamını CR-39 malzemesine aktarır durmaktadır. İkinci durumda ise proton CR-39 malzemesinin içerisinde bir noktada oluştuktan sonra enerjisinin bir kısmını CR-39 malzemesine aktarır bu malzemenin dışında bir noktada durur. Bu iki durum için de aşırı aşındırılmamış izler için çözeltinin iz boyunca nüfuz ettiği mesafe( $L$ ),

$$T_e = \int_{L_s}^{L_s+L} \frac{1}{V_t(x')} dx'$$

ifadesini iterasyon yöntemi ile hesaplayarak elde edilir. Burada  $L_s$ , parçacığın yolu üzerinde hangi noktada kimyasal aşındırmanın başladığını ifade etmektedir. Eğer proton, CR-39 malzemesinin içerisinde bir noktada durmuşsa  $L_s = 0$  olarak alınır. Eğer proton CR-39 malzemesinin dışında bir noktada durmuşsa  $L_s$ , protonun malzemenin dışındaki menzili kadardır. Protonların CR-39 malzemesinin dışındaki menzillerinin nasıl hesaplandığı daha önce anlatılmıştı.

İz aşındırma süresi olan  $T_e$ , CR-39 malzemesinin ön bölümünde oluşan izler için

$$T_e = T - \frac{x_f - t_1}{V_b}$$

CR-39 malzemesinin arka bölümünde oluşan izler için ise

$$T_e = T - \frac{t_1 + t_2 - x_f}{V_b}$$

ifadesi kullanılarak bulunur.

$V_t$ , artakalan menzilin ( $x'$ ) fonksiyonu olarak Eşitlik 2.5 kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$V_t(x') = V_b \left[ 1 + 2 a_1 \frac{(V_{max} - 1) x'}{a_1^2 + (x')^2} \right]$$

Burada;  $a_1 = 3,2 \mu\text{m}$  ve  $V_{max} = 2,20$ 'dir. Ayrıca  $x'$ ,  $\mu\text{m}$  cinsinden olmalıdır. Zıt yönlü kimyasal aşındırma işleminde iz aşındırması yüklü parçacığın menziline sonundan başladığı için artakalan menzil  $x'$  olarak alınır. Bu durumda  $x'$ , 0'dan  $R$ 'a kadar değer alır.

Eğer iz aşırı aşındırılmış ise çözeltinin protonun oluştuğu noktaya nüfuz etme süresi ( $T_R$ ),

$$T_R = \int_{L_s}^R \frac{1}{V_t(x')} dx'$$

integrali ile belirlenir. Aşındırıcı çözelti, protonun oluştuğu noktaya  $T_R$  sürede nüfuz ederse iz, geriye kalan  $T_b$  süre boyunca  $V_b$  hızı ile aşınır. Bu durumda aşırı aşındırılmış izler için  $L$ ,

$$L = R + V_b T_b$$

ifadesi kullanılarak elde edilir. Burada  $T_b = T_e - T_R$ 'dir.

Bir izin zıt yönlü kimyasal aşındırma işlemi sonucunda görünür olması için:

- CR-39 malzemesinin ön bölümünde aşındırılan izler için  $L |\cos\theta_p| > h$ ,
- CR-39 malzemesinin arka bölümünde aşındırılan izler için ise  $L \cos\theta_p > h$

olması gerekir. Burada  $h = V_b T_e$ 'dir. Eğer zıt yönlü kimyasal aşındırması sonucunda görünür iz olmuş ise oluşan görünür iz uzunluğu ( $L_t$ ),

$$L_t = L - \frac{h}{|\cos\theta_p|}$$

ifadesi ile belirlenir.

#### 4.4 Hızlı Nötron Dozimetrelerinin Tepkisinin Hesaplanması

Hızlı nötronlar için kullanılan CR-39 dozimetresinin akı tepkisi ( $R_\phi$ ), bir nötron başına dozimetrenin ön ve arka yüzeyinde oluşan toplam görünür iz sayısıdır. Dozimetre ön ve arka yüzeyindeki toplam görünür iz yoğunluğu ( $\rho$ ) ise

$$\rho = \frac{N_t}{A_s} \quad 4.1$$

ifadesi kullanılarak belirlenir. Burada;  $N_t$ , dozimetrenin ön ve arka yüzeyindeki toplam görünür iz sayısı,  $A_s$  ise dozimetrenin ön ve arka yüzeyinin toplam alanıdır.

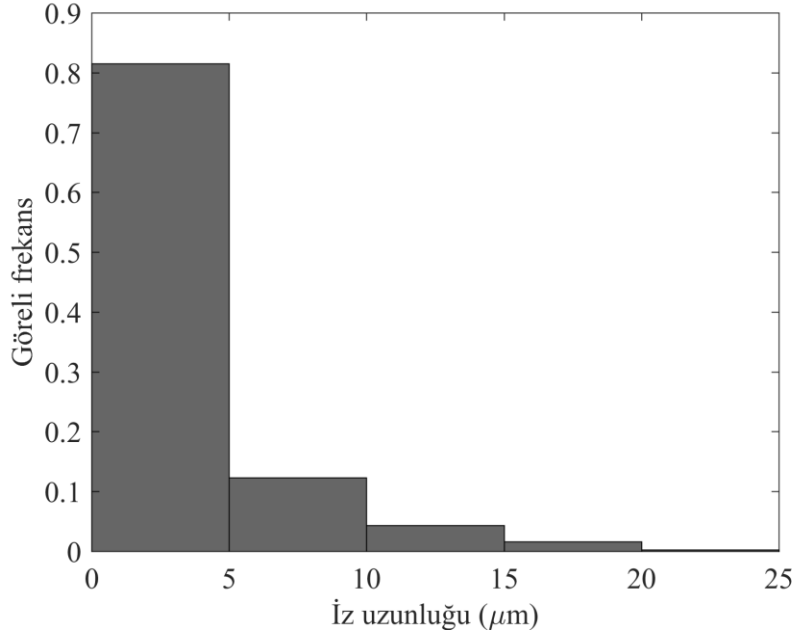
Kişisel eşdeğer nötron dozu,  $H_p(10)$ , hesaplanırken kullanılacak olan nötron akısından eşdeğere doza dönüşüm katsayıları,  $h_{p\phi}(10)$ , nötronun enerjisine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla  $H_p(10)$  hesaplanırken kaynaktan çıkan nötronların enerji dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Eğer kaynaktan çıkan nötronların enerji dağılımı bilinmiyor ise nötronların enerji dağılımını elde etmek için CR-39 malzemesinde protonların etkileşimleri sonucu oluşan izlerin uzunluklarının dağılımı kullanılabilir. Bunun için öncelikle farklı enerji aralıklarında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynaklarının benzeşimi yapılır. Bu nötron kaynaklarının her biri için iz uzunluklarının dağılımı Monte Carlo benzeşimleri ile belirlenir. Daha sonra, bu nötron kaynakları için elde edilen iz uzunluklarının dağılımları ve bilinmeyen enerji dağılımına sahip kaynaktan çıkan nötronların etkileşimleri sonucu oluşan izlerin uzunluklarının dağılımı kullanılarak bilinmeyen nötron kaynağının enerji dağılımı elde edilir.

Çizelge 4.2’de farklı enerji aralıklarında düzgün enerji dağılımına sahip nötronların, polietilen ve CR-39 malzemesinde hidrojen atomları ile esnek saçılmaları sonucu oluşturdukları protonların CR-39 malzemesine bıraktıkları izlerin maksimum değerleri ( $R_m$ ) verilmektedir. Ayrıca, bu nötron kaynakları için bir nötron başına CR-39 malzemesinde oluşan iz sayıları ( $S$ ) da verilmektedir. Bu çizelge,  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için kullanılacağı için maksimum nötron enerjisi 11,0 MeV olarak belirlenmiştir. Maksimum nötron enerjisi CR-39 malzemesinde gözlemlenen maksimum iz uzunluğu kullanılarak da belirlenebilir.

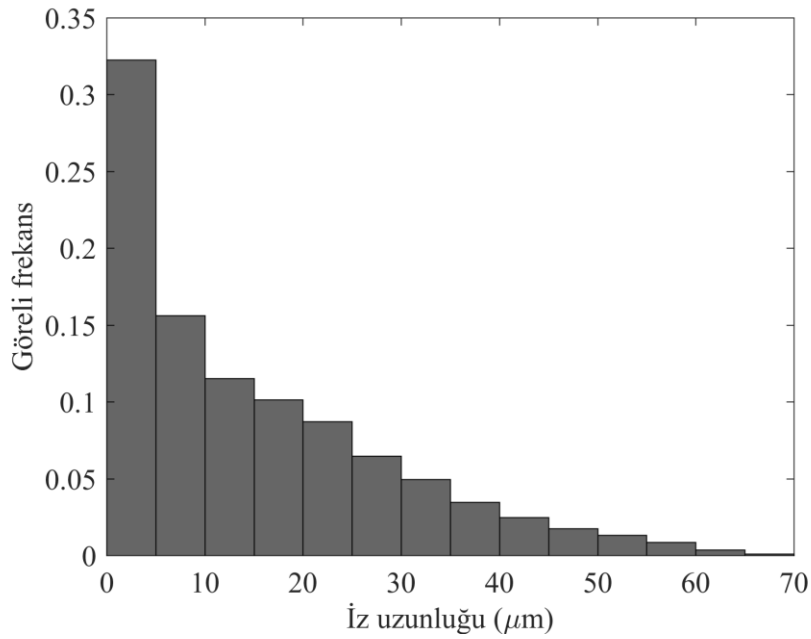
Çizelge 4.2. Farklı nötron enerji grupları için CR-39 malzemesindeki maksimum iz uzunlukları ve nötron başına iz sayıları.

Nötron Enerji Grubu ( $g$ )	Nötron Enerji Aralığı (MeV)	Maksimum İz Uzunluğu ( $R_{m,g}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Nötron Başına Oluşan İz Sayısı ( $S_g$ ) (iz/nötron)
1	$1,0 \times 10^{-6} - 1,0$	23,7	0,0502
2	1,0 – 2,0	68,5	0,0265
3	2,0 – 3,0	135,1	0,0197
4	3,0 – 4,0	224,2	0,0163
5	4,0 – 5,0	330,0	0,0143
6	5,0 – 6,0	448,4	0,0128
7	6,0 – 7,0	595,6	0,0117
8	7,0 – 8,0	761,3	0,0109
9	8,0 – 9,0	919,5	0,0103
10	9,0 – 10,0	1114,9	0,0098
11	10,0 – 11,0	1329,1	0,0095

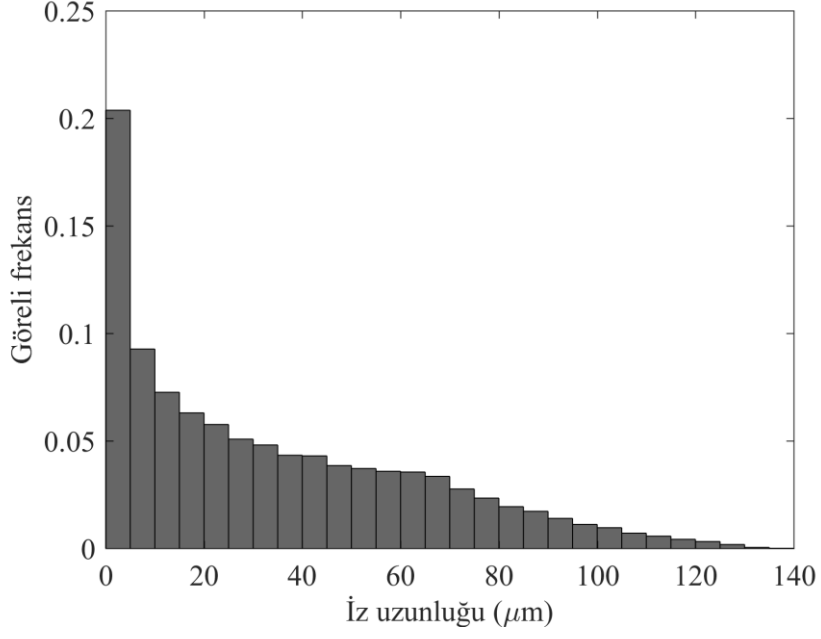
Monte Carlo benzeşimleri sonucu izelge 4.2’de verilen nötron enerji gruplarının her biri için iz uzunluklarının dağılımı ayrı ayrı elde edilmiştir. Bu elde edilen dağılımlar şekil 4.5 – 4.15 arasında gösterilmektedir.



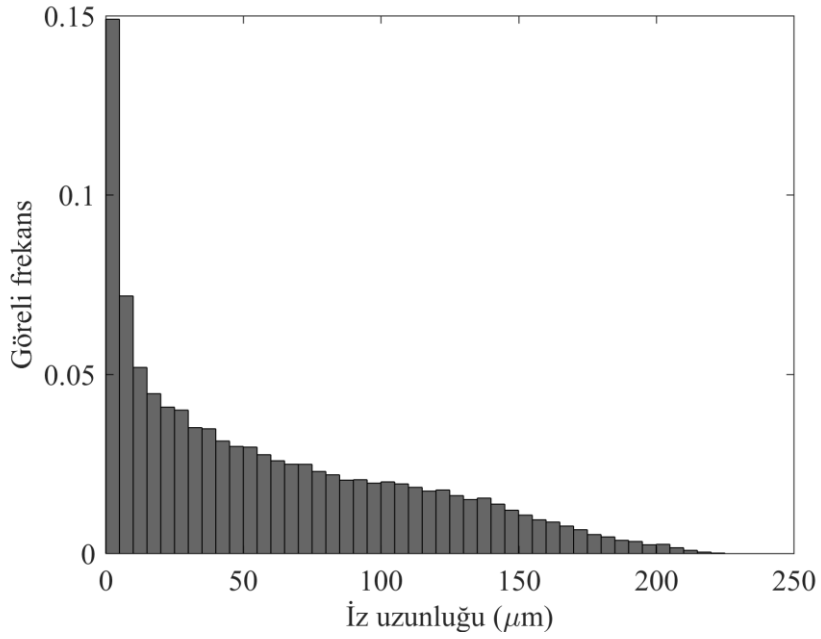
şekil 4.5.  $10^{-6}$  – 1,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.



şekil 4.6. 1,0 – 2,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.

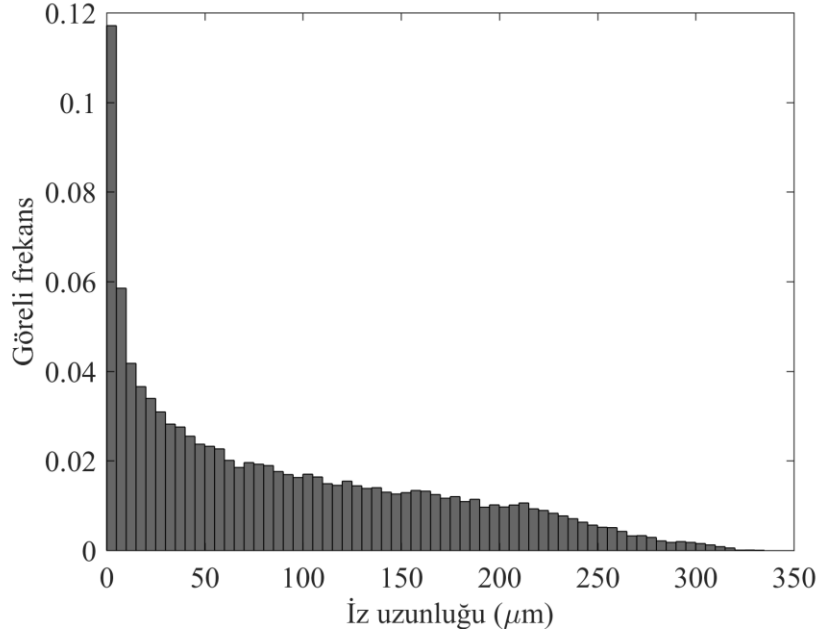


Şekil 4.7. 2,0 – 3,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.

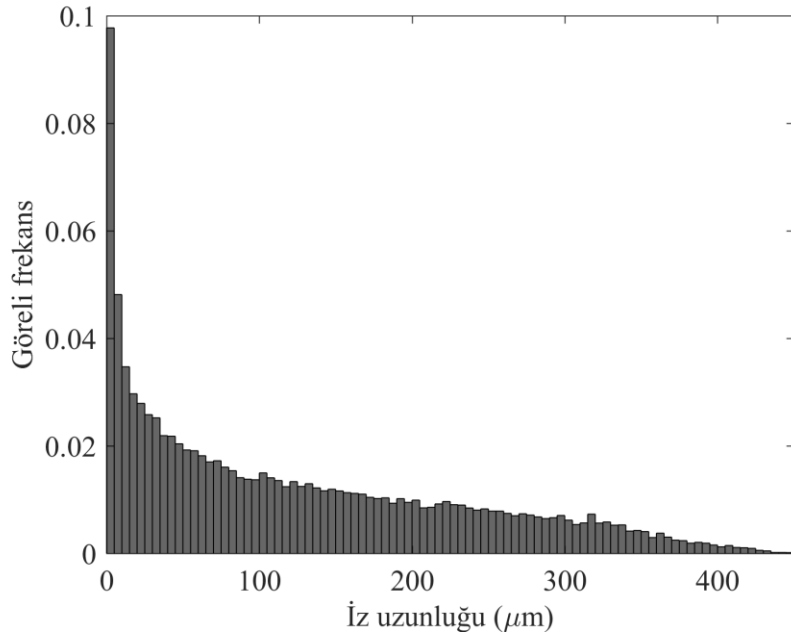


Şekil 4.8. 3,0 – 4,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.

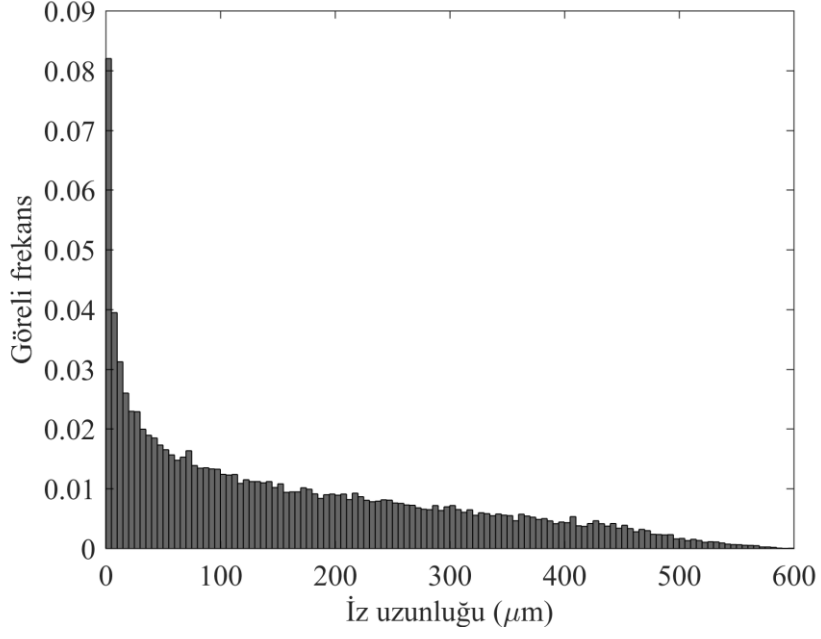




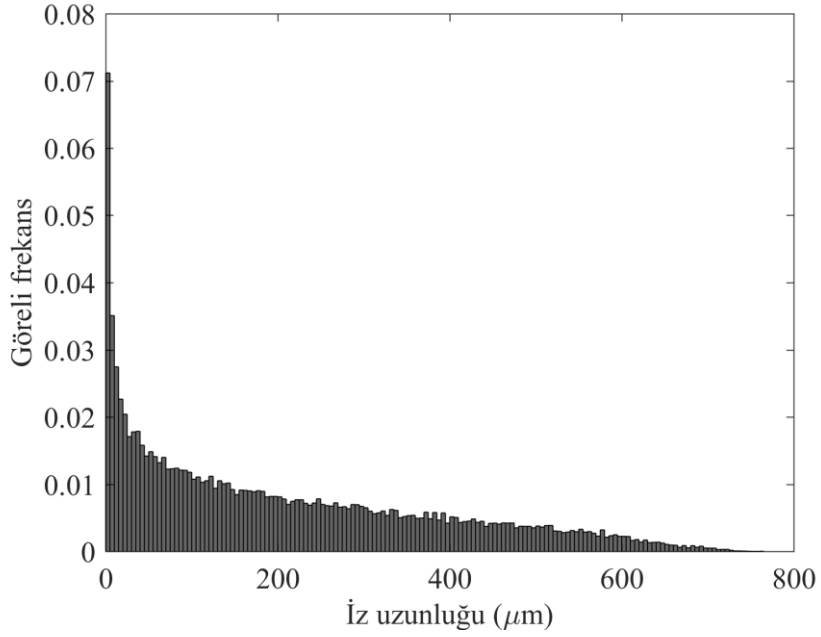
Şekil 4.9. 4,0 – 5,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.



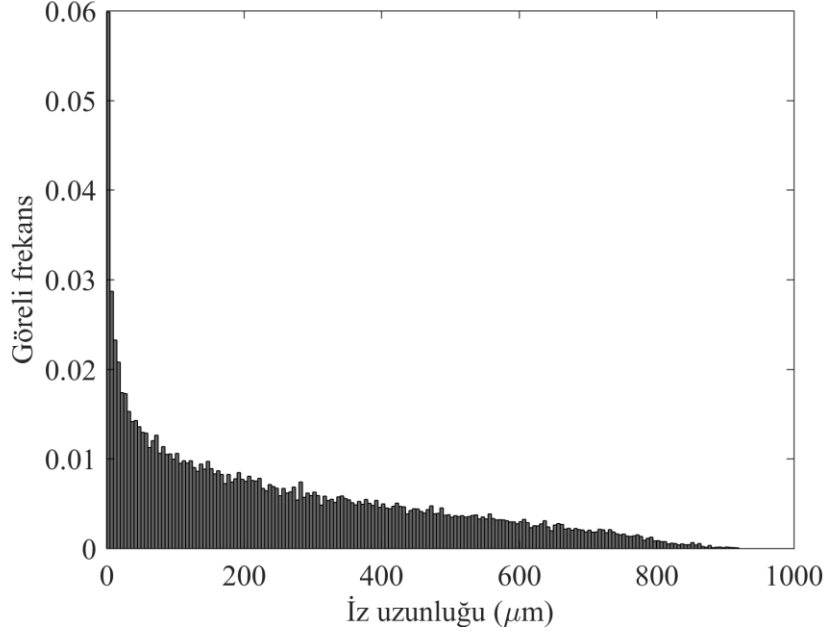
Şekil 4.10. 5,0 – 6,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.



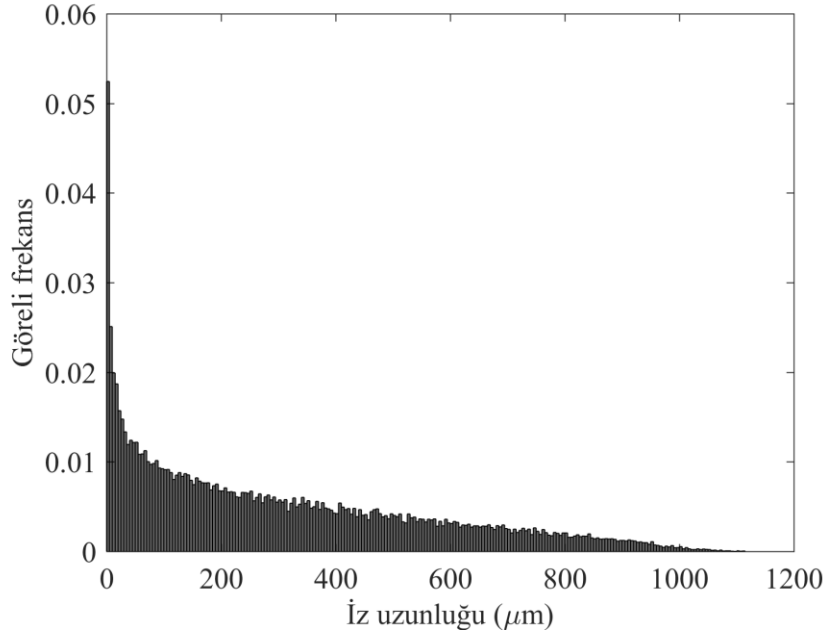
Şekil 4.11. 6,0 – 7,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.



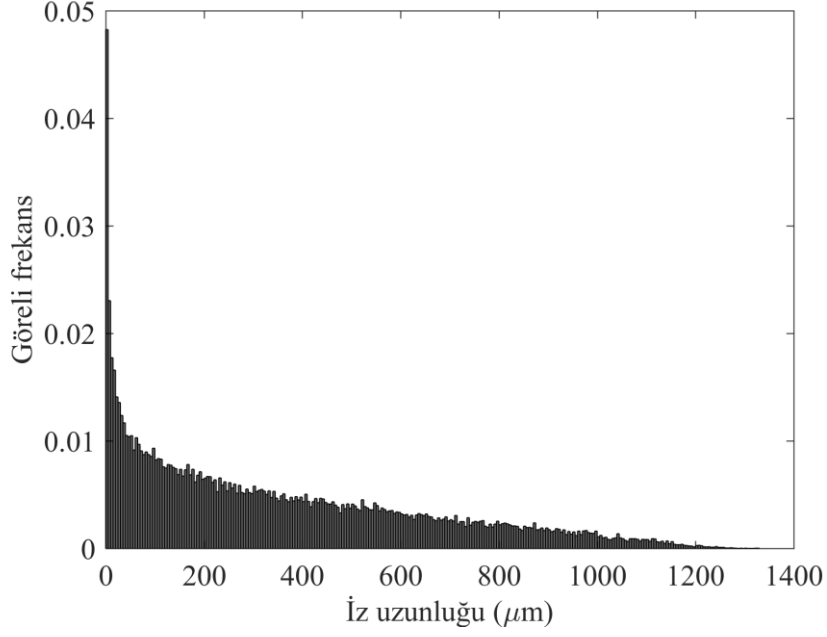
Şekil 4.12. 7,0 – 8,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.



Şekil 4.13. 8,0 – 9,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.

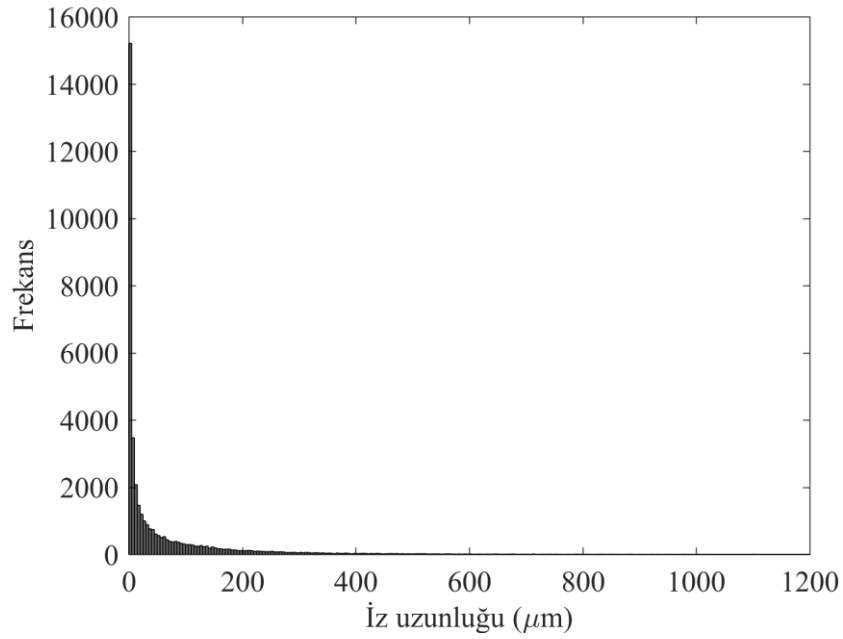


Şekil 4.14. 9,0 – 10,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.



Şekil 4.15. 10,0 – 11,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötronlar için iz uzunluklarının dağılımı.

Çizelge 4.2’de verilen nötron kaynaklarının her biri için maksimum iz uzunlukları ve Şekil 4.5 – 4.15 arasındaki şekillerde verilen iz uzunluğu dağılımları kullanılarak her bir uzunluk aralığında bir izin oluşma olasılığı hesaplanmıştır. Bu olasılık dağılımları, EK-1’de bulunan Çizelge E.1 –E.11 arasında bulunan çizelgelerde verilmektedir.



Şekil 4.16. <sup>241</sup>Am-Be nötron kaynağı için iz uzunluklarının dağılımı.

<sup>241</sup>Am-Be nötron kaynağının enerji dağılımını elde etmek için bu kaynaktan çıkan nötronların etkileşimleri sonucu oluşan protonların CR-39 malzemesine bıraktıkları izlerin uzunluklarının dağılımı Şekil 4.16’da gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Şekil 4.16’da Monte Carlo benzeşimleri sonucunda <sup>241</sup>Am-Be nötron kaynağı için elde edilen iz uzunluklarının dağılımı ve Çizelge 4.2’de verilen maksimum iz uzunlukları kullanılarak her bir iz uzunluğu aralığındaki izlerin sayısı Çizelge 4.3’deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. <sup>241</sup>Am-Be nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin uzunluklarının dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı (µm)	İz Sayısı
0 – 23,7	23138
23,7 – 68,5	6169
68,5 – 135,1	4090
135,1 – 224,2	2636
224,2 – 330,0	1409
330,0 – 448,4	692
448,4 – 595,6	425
595,6 – 761,3	171
761,3 – 919,5	45
919,5 – 1114,9	10
1114,9 – 1329,1	1
Toplam	38786

Çizelge 4.3’de en son iz uzunluğu aralığı olan 1114,9 – 1329,1 µm aralığında 1 adet iz oluşmaktadır bu iz en yüksek enerji grubundaki, 10,0 – 11,0 MeV enerji aralığındaki, nötronlardan kaynaklanmaktadır. Bu nötron kaynağından çıkan nötronların her bir uzunluk aralığında iz oluşturma olasılığı Çizelge E.11’de verilmektedir. Bu çizelgede verilen olasılıklar kullanılarak her bir uzunluk aralığında bu enerji grubundaki nötronlardan kaynaklanan izlerin sayısı bulunur. Daha sonra elde edilen bu iz sayıları Çizelge 4.3’de verilen dağılımdan çıkarılır. Geriye kalan dağılımda 919,5 – 1114,9 µm aralığındaki izler artık sadece 9,0 – 10,0 MeV enerji aralığındaki nötronlardan kaynaklanmaktadır. Bir önceki enerji grubu için yapılan işlemler, bu grup için de tekrar edilir. Böylelikle bu enerji grubundaki nötronlardan kaynaklanan izlerin sayısı da bulunur ve Çizelge 4.3’de verilen dağılımdan çıkarılır. Bu süreç en son enerji grubuna kadar

tekrarlanır ve  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için her bir enerji grubundaki nötronlardan kaynaklanan izlerin sayısı bulunur. Son olarak ise bu elde edilen iz sayıları kullanılarak her bir enerji grubundaki nötronların sayısı aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$N_g = \frac{N_{t,g}}{S_g} \quad 4.2$$

Burada;  $N_g$ ,  $g$ 'inci enerji grubundaki nötron sayısı,  $N_{t,g}$   $g$ 'inci enerji grubundaki nötronlardan dolayı oluşan izlerin sayısı,  $S_g$  ise  $g$ 'inci enerji grubundaki bir nötron başına oluşan iz sayısıdır.  $S_g$  değeri, farklı nötron enerji grupları için Monte Carlo benzeşimleri sonucunda hesaplanmıştır ve Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.4'de  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için her bir enerji grubundaki nötronlardan dolayı oluşan izlerin sayısı ( $N_{t,g}$ ) ve Eşitlik 4.2 kullanılarak hesaplanan her bir enerji grubundaki nötronların sayısı ( $N_g$ ) verilmektedir.

Çizelge 4.4. Monte Carlo benzeşimleri sonucunda elde edilen  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağının enerji dağılımı.

Nötron Enerji Grubu ( $g$ )	Nötron Enerji Aralığı (MeV)	İz Sayısı ( $N_{t,g}$ )	Nötron Sayısı ( $N_g$ )	Normalize Edilmiş Nötron Sayısı ( $w_g$ )
1	$1,0 \times 10^{-6} - 1,0$	13960	277851	0,146267
2	1,0 – 2,0	3089	116640	0,061402
3	2,0 – 3,0	6145	312019	0,164254
4	3,0 – 4,0	2759	169043	0,088988
5	4,0 – 5,0	6034	422425	0,222374
6	5,0 – 6,0	1434	112027	0,058974
7	6,0 – 7,0	2113	180678	0,095113
8	7,0 – 8,0	1645	150421	0,079185
9	8,0 – 9,0	1169	113569	0,059785
10	9,0 – 10,0	335	34132	0,017968
11	10,0 – 11,0	102	10806	0,005688
	Toplam	38786	1899613	1,0

$^{241}\text{Am-Be}$  kaynağından çıkan nötronların enerji dağılımını Çizelge 4.4'deki gibi elde edildikten sonra toplam kişisel eşdeğer nötron dozu,  $H_p(10,0^\circ)$ , aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$H_p(10,0^\circ) = \sum_{g=1}^N \phi_g \times h_{p\phi}(10,0^\circ)_g \quad 4.3$$

Burada;  $\phi_g$ ,  $g$ 'inci enerji grubundaki nötron akısı,  $h_{p\phi}(10,0^\circ)_g$  ise  $g$ 'inci enerji grubu için nötron akısından kişisel eşdeğer doza dönüşüm katsayısıdır ve ICRP-74 dokümanında verilen  $h_{p\phi}(10,0^\circ)$  doz dönüşüm katsayıları kullanılarak hesaplanabilir [16]. Benzeşimlerde nötronlar, dozimetre yüzeyine dik açıyla gönderildiğinden  $0^\circ$  için verilen  $h_{p\phi}(10,0^\circ)$  katsayıları kullanılmaktadır.

Eşitlik 4.3'deki grup akısı  $\phi_g$ ,

$$\phi_g = w_g \phi_T \quad 4.4$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $\phi_T$ , dedektör yüzeyine gelen toplam nötron akısı,  $w_g$  ise her bir enerji aralığındaki nötronların göreceli frekansdır. Dolayısıyla Eşitlik 4.4 kullanılarak Eşitlik 4.3,

$$H_p(10,0^\circ) = \phi_T \sum_{g=1}^N w_g \times h_{p\phi}(10,0^\circ)_g$$

şeklinde yazılır. Burada eşitliğin sağındaki toplam, ortalama nötron akısından kişisel eşdeğer doza dönüşüm katsayısı,  $\bar{h}_{p\phi}(10,0^\circ)$ ,

$$\bar{h}_{p\phi}(10,0^\circ) = \sum_{g=1}^N w_g \times h_{p\phi}(10,0^\circ)_g \quad 4.5$$

olarak tanımlanır. Bu durumda  $H_p(10,0^\circ)$ ,

$$H_p(10,0^\circ) = \phi_T \bar{h}_{p\phi}(10,0^\circ) \quad 4.6$$

ifadesi ile belirlenir.

CR-39 hızlı nötron dozimetresinin eşdeğer doz tepkisi,  $R_H(0^\circ)$ ,

$$R_H(0^\circ) = \frac{\rho}{H_p(10,0^\circ)} \quad 4.7$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 4.6'da  $H_p(10,0^\circ)$  için verilen ifade, bu eşitlikte yerine konursa  $R_H(0^\circ)$ ,

$$R_H(0^\circ) = \frac{\rho}{\phi_T \bar{h}_{p\phi}(10,0^\circ)} \quad 4.8$$

eşitliğiyle de hesaplanabilir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında termal ve hızlı nötron eşdeğer dozunun belirlenmesinde kullanılan iki farklı CR-39 nötron dozimetresinin Monte Carlo benzeşimleri yapılmıştır. Bu iki farklı dozimetre sisteminin akı tepkisi ve eşdeğer doz tepkisi belirlenmiştir. Termal nötron dozimetresinin akı ve eşdeğer doz tepkileri Maxwell enerji dağılımına sahip termal nötronlar için belirlenmiştir. Hızlı nötron dozimetresinin akı ve eşdeğer doz tepkileri ise  $^{241}\text{Am}$ -Be nötron kaynağı için belirlenmiştir.

#### 5.1.1 Termal Nötron Dozimetresinin Tepkisi

CR-39 termal nötron dozimetresinin akı ve eşdeğer doz tepkilerini bulmak için önce dozimetre sisteminde bulunan malzemelerdeki nötron etkileşimlerinin Monte Carlo benzeşimleri yapılmıştır. Benzeşimler sonucunda, termal nötron başına oluşan alfa parçacığı ve triton sayıları belirlenmiştir. Monte Carlo benzeşimlerinde  $1 \times 10^7$  nötron kullanılmıştır ve Çizelge 5.1'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.1. Termal nötronlar için Monte Carlo benzeşimlerinin sonuçları.

LiF malzemesinde oluşan alfa parçacığı sayısı ( $P_\alpha$ )	$8,67137 \times 10^{-4}$ alfa parçacığı / nötron
LiF malzemesinde oluşan triton sayısı ( $P_t$ )	$8,67137 \times 10^{-4}$ triton / nötron
Dedektörün ön yüzeyindeki termal nötron akısı ( $\phi_{th}$ )	$1,60 \times 10^6$ nötron / $\text{cm}^2$

Nötron etkileşimleri sonucunda LiF malzemesinde oluşan alfa parçacıklarının ve tritonların dozimetre sisteminde bulunan malzemelerdeki etkileşimlerinin benzeşimleri SRIM yazılımı ile yapılmıştır. SRIM yazılımıyla yapılan yüklü parçacık benzeşimlerinde 99999 alfa parçacığı ve 99999 triton kullanılmıştır. Bu yüklü parçacıkların CR-39 malzemesinde bıraktıkları izler ile ilgili gerekli bilgiler elde edildikten sonra kimyasal aşındırma işlemi modellenmiştir.

CR-39 malzemesi, 9 saat boyunca  $70^\circ\text{C}$ 'de  $7,25$  mol/L NaOH çözeltisine maruz bırakıldığında aşındırılan yüzey kalınlığı  $15,57$   $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Bu aşındırma koşulları kullanılarak aynı yönlü iz aşındırması sonucunda CR-39 malzemesinin ön



yüzeyinde alfa parçacığı ve triton başına oluşan görünür izlerin sayısı ayrı ayrı hesaplanmıştır ve Çizelge 5.2’de verilmektedir.

Çizelge 5.2. Yüklü parçacık başına oluşan görünür iz sayıları

Alfa parçacığı başına görünür iz sayısı ( $P_2$ )	0,14716 görünür iz / alfa parçacığı
Triton başına görünür iz sayısı ( $P_1$ )	0,13352 görünür iz / triton

Çizelge 5.1 ve 5.2’deki verilen sonuçlar ve Eşitlik 3.1 kullanılarak dozimetrenin akı tepkisi hesaplanmıştır. Dozimetrenin eşdeğer doz tepkisini belirlemek için  $H_p(10,0^\circ)$  ve  $\rho$  değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra Eşitlik 3.4 kullanılarak dozimetrenin eşdeğer doz tepkisi hesaplanmıştır. Çizelge 5.3’de CR-39 termal nötron dozimetresinin Monte Carlo benzeşimleri sonucu elde edilen akı ve eşdeğer doz tepkileri verilmektedir. Burada verilen dozimetre tepkileri, oda sıcaklığında Maxwell enerji dağılımına sahip nötronlar içindir.

Çizelge 5.3. CR-39 termal nötron dozimetresinin benzeşim sonuçları.

Aşındırılan yüzey kalınlığı ( $R_L$ )	15,57 $\mu\text{m}$
Toplam görünür iz sayısı ( $N_t$ )	2434
Görünür iz yoğunluğu ( $\rho$ )	389 görünür iz / $\text{cm}^2$
Toplam kişisel eşdeğer doz, $H_p(10,0^\circ)$	$1,82 \times 10^{-2}$ mSv
Dozimetrenin akı tepkisi, $R_\phi(0^\circ)$	$2,43 \times 10^{-4}$ görünür iz / nötron
Dozimetrenin eşdeğer doz tepkisi, $R_H(0^\circ)$	21374 görünür iz / $\text{cm}^2 \cdot \text{mSv}$

Bahsedilen termal nötron alanında kullanılan ve bu çalışmada uygulanan kimyasal aşındırma koşulları kullanılarak aşındırılan bir dozimetrenin yüzeyindeki görünür iz yoğunluğu  $M$  ise, bu kişisel dozimetreyi kullanan kişinin aldığı toplam kişisel eşdeğer nötron dozu olan  $H_p(10,0^\circ)$ ,

$$H_p(10,0^\circ) = \frac{M}{R_H(0^\circ)} \quad [\text{mSv}]$$

ifadesi belirlenir. Burada  $H_p(10,0^\circ)$  için hesaplandığı için aslında bu sonuç, bu kişinin almış olabileceği maksimum eşdeğer doz değeridir çünkü  $h_{p\phi}(10,\alpha)$ , nötronların dozimetre yüzeyinin normaline göre sisteme giriş açısı( $\alpha$ ) arttıkça azalmaktadır.

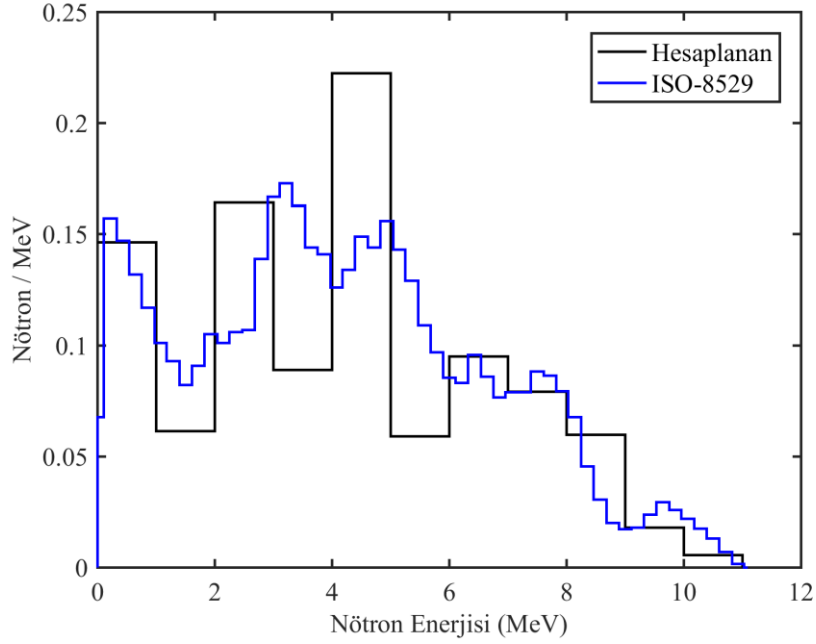
Bu çalışmada CR-39 termal nötron dozimetresinin tepkisi Maxwell enerji dağılımına sahip nötronlar için belirlenmiştir. Eğer termal nötronların enerji dağılımı farklı ise dozimetrenin akı ve eşdeğer doz tepkileri, bu çalışmadaki yöntem kullanılarak tekrar hesaplanabilir.

### 5.1.2 Hızlı Nötron Dozimetresinin Tepkisi

CR-39 hızlı nötron dozimetresinin akı ve eşdeğer doz tepkilerini belirlemek için öncelikle polietilen ve CR-39 malzemelerindeki nötron etkileşimlerinin Monte Carlo benzeşimi yapılmıştır. Daha sonra bu nötron etkileşimleri sonucunda ortaya çıkan protonların polietilen ve CR-39 malzemelerindeki etkileşimlerinin benzeşimi SRIM yazılımı ile yapılmıştır. Bu protonların CR-39 malzemesinde bıraktıkları izler ile ilgili gerekli bilgiler elde edilmiştir. Son olarak ise bu izleri içeren CR-39 dozimetresi için kimyasal aşındırma işlemi modellenmiştir. CR-39 dozimetresi, 12 saat boyunca 70 °C’de 7,25 mol/L NaOH çözeltisine maruz bırakıldığında aşındırılan yüzey kalınlığı 20,76 µm olarak hesaplanmıştır. Bu aşındırma koşulları kullanılarak aynı yönlü ve zıt yönlü kimyasal aşındırma işlemleri sonucunda CR-39 malzemesinin ön ve arka yüzeyindeki toplam görünür iz sayısı belirlenmiştir.

CR-39 dozimetresinin akı tepkisi, benzeşimlerde kullanılan nötron sayısı ve dozimetrenin ön ve arka yüzeyinde oluşan görünür izlerin toplam sayısı kullanılarak hesaplanmıştır. Akı tepkisinin hesaplanan değeri Çizelge 5.4’de verilmektedir.

CR-39 dozimetresinin eşdeğer doz tepkisini belirlenmesi için hızlı nötronlardan kaynaklanan kişisel eşdeğer doz değerinin belirlenmesi gerektiğinden daha önce bahsedilmişti.  $H_p(10,0^\circ)$  değerini belirlemek için öncelikle  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağından çıkan nötronların enerji dağılımı Şekil 5.1’deki gibi elde edilmiştir ve benzeşimde kullanılan  $^{241}\text{Am-Be}$  kaynağının enerji dağılımı ile karşılaştırılmıştır. Bu enerji dağılımını bulmak için protonların CR-39 malzemesinde bıraktıkları izlerin uzunluklarının dağılımları kullanılmıştır.  $^{241}\text{Am-Be}$  spektrumu elde edilirken kullanılan enerji grup sayısı arttırılırsa kaynağın gerçek spektrumuna daha yakın sonuçlar elde edilebilir. CR-39 malzemesi sonlu olduğu için yüksek enerjili protonlar enerjilerin bir kısmını bu malzemeye aktardıktan sonra dozimetre sisteminin dışına çıkmaktadır. Bu protonların oluşturdukları izler, nötronların enerji dağılımının elde edilmesi sürecindeki hataların temel sebebidir.



Şekil 5.1.  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağının enerji dağılımı.

$H_p(10,0^\circ)$  hesaplanırken kullanılan ortalama nötron akısından kişisel eşdeğer doza dönüşüm katsayısı,  $\bar{h}_{p\phi}(10,0^\circ)$ , Şekil 5.1'deki hesaplanan nötron enerji dağılımı kullanılarak yaklaşık  $400 \text{ pSv.cm}^2$  olarak belirlenmiştir.  $\bar{h}_{p\phi}(10,0^\circ)$ 'nin  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için literatürdeki değeri Çizelge 2.5'de  $411 \text{ pSv.cm}^2$  olarak verilmektedir. Hesaplanan  $\bar{h}_{p\phi}(10,0^\circ)$  değeri ve dozimetrenin ön yüzeyindeki akı değeri kullanılarak  $H_p(10,0^\circ)$  değeri hesaplanmıştır. CR-39 hızlı nötron dozimetresinin eşdeğer doz tepkisi, Eşitlik 4.8 kullanılarak hesaplanmıştır ve Çizelge 5.4'de verilmektedir.

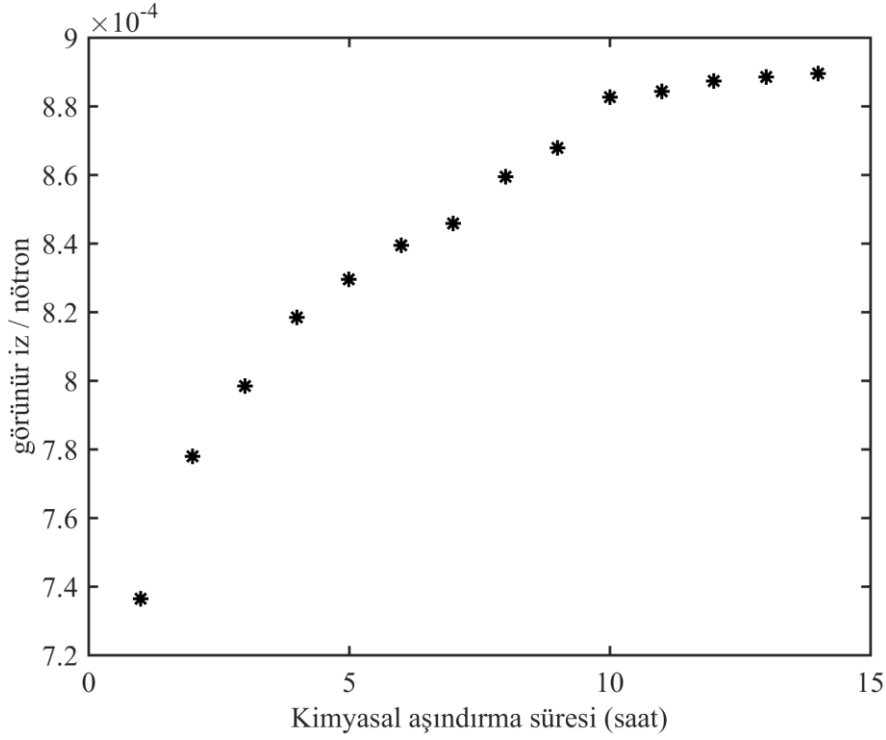
Çizelge 5.4.  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için CR-39 hızlı nötron dozimetresinin benzeşim sonuçları.

Aşındırılan yüzey kalınlığı ( $R_L$ )	20,76 $\mu\text{m}$
Toplam görünür iz sayısı ( $N_t$ )	1686
Görünür iz yoğunluğu ( $\rho$ )	135 görünür iz / $\text{cm}^2$
Nötron akısı ( $\phi_T$ )	$3,04 \times 10^5$ nötron / $\text{cm}^2$
Dozimetrenin akı tepkisi, $R_\phi(0^\circ)$	$8,8737 \times 10^{-4}$ görünür iz / nötron
Toplam kişisel eşdeğer doz, $H_p(10,0^\circ)$	0,1216 mSv
Dozimetrenin eşdeğer doz tepkisi, $R_H(0^\circ)$	1109 görünür iz / $\text{cm}^2 \cdot \text{mSv}$

CR-39 dozimetresinin tepkisi kimyasal aşındırma süresinin fonksiyonu olduğundan farklı kimyasal aşındırma süreleri için  $R_{\phi}(0^{\circ})$  ve  $R_H(0^{\circ})$  değerleri  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için hesaplanmıştır ve Çizelge 5.5’de verilmektedir.

Çizelge 5.5. Farklı kimyasal aşındırma sürelerine göre CR-39 dozimetresinin  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için akı ve eşdeğer doz tepkileri

Kimyasal aşındırma süresi (saat)	Aşındırılan Yüzey Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\phi}(0^{\circ})$ ( $\frac{\text{görünür iz}}{\text{nötron}}$ )	$R_H(0^{\circ})$ ( $\frac{\text{görünür iz}}{\text{cm}^2 \text{ mSv}}$ )
1	1,73	$7,3632 \times 10^{-4}$	920
2	3,46	$7,7789 \times 10^{-4}$	972
3	5,19	$7,9842 \times 10^{-4}$	998
4	6,92	$8,1842 \times 10^{-4}$	1023
5	8,65	$8,2947 \times 10^{-4}$	1037
6	10,38	$8,3947 \times 10^{-4}$	1049
7	12,11	$8,4579 \times 10^{-4}$	1057
8	13,84	$8,5947 \times 10^{-4}$	1074
9	15,57	$8,6789 \times 10^{-4}$	1085
10	17,3	$8,8263 \times 10^{-4}$	1103
11	19,03	$8,8421 \times 10^{-4}$	1105
12	20,76	$8,8737 \times 10^{-4}$	1109
13	22,49	$8,8842 \times 10^{-4}$	1111
14	24,22	$8,8947 \times 10^{-4}$	1112



Şekil 5.2. Kimyasal aşındırma süresinin fonksiyonu olarak CR-39 hızlı nötron dozimetresinin akı tepkisi.

Şekil 5.2’de farklı kimyasal aşındırma süresinin fonksiyonu olarak CR-39 dozimetresinin  $^{241}\text{Am-Be}$  nötron kaynağı için akı tepkisi verilmektedir. Şekilde görülebileceği gibi aşındırma süresinin aşırı artırılması dozimetrenin akı tepkisini çok fazla arttırmamaktadır.

ISO 21909-1 dokümanında dozimetrenin enerji ve açısal bağımlılığının bulunması için  $^{241}\text{Am-Be}$  ve  $^{252}\text{Cf}$  nötron kaynaklarının yanı sıra tek enerjili nötron kaynaklarının da kullanılması gerektiği belirtilmektedir [14]. Bu amaçla 144 keV, 250 keV, 565 keV, 1200 keV ve 14800 keV enerji değerlerine sahip nötron kaynakları kullanılmaktadır. Bu tek enerjili nötron kaynakları için de bu çalışmadaki yöntem kullanılarak CR-39 hızlı nötron dozimetresinin akı ve eşdeğer doz tepkileri belirlenebilir.

Bu çalışmada dozimetre yüzeyindeki görünür izlerin sayısı hesaplanırken kimyasal aşındırma işlemi sonrasında elde edilen görünür iz uzunlukları kullanılmıştır. Gerçekte optik görüntüleme sistemi belirli bir çözünürlük değerine sahiptir. Bu yüzden izlerin görünür olup olmadığı belirlenirken dozimetre yüzeyindeki izin çapı, büyük çapı veya küçük çapı gibi parametreler de kullanılmalıdır. Fakat görünür izlerin hesaplanmasında

bu kriter kullanılmamıştır. Bu nedenle elde edilen dedektör tepkilerinin değerleri gerçek durumdaki değerlerden daha yüksektir.

## 5.2 Öneriler

Bu çalışmada, CR-39 hızlı nötron dozimetresinin akı ve eşdeğer doz tepkileri belirlenirken nötronların H atomları ile esnek saçılmaları sonucu oluşan protonlar kullanılmıştır. Nötronların esnek olmayan saçılmaları ve yüklü parçacık tepkimeleri yoluyla soğrulmaları sonucu ortaya çıkan yüklü parçacıkların iz oluşumuna katkısı ihmal edilmiştir. Ayrıca esnek saçılmalar sonucu oluşan C ve O iyonlarının iz oluşumuna katkıları da ihmal edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda bu nötron etkileşimleri sonucunda oluşan yüklü parçacıkların iz oluşumuna katkıları incelenebilir.

Kimyasal aşındırma işlemi sonucunda oluşan görünür izlerin belirlenmesinde görünür iz uzunlukları kullanıldığından daha önce bahsedilmişti. Görünür izlerin belirlenmesinde kullanılan optik görüntüleme sistemlerinin belirli bir çözünürlüğe sahip olduğu için görünür izlerin dozimetre yüzeyindeki çapları da belirlenmelidir. Bu amaçla, kimyasal aşındırma işlemi sonucunda oluşan görünür izlerin geometrisi üç boyutlu olarak elde edilebilir. Bu üç boyutlu iz geometrileri kullanılarak görünür izlerin belirlenmesinde optik görüntüleme sisteminin çözünürlük değeri hesaba katılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] D.A. Young, Etching of Radiation Damage in Lithium Fluoride, *Nature*, 182 (1958) 375–377.
- [2] E.C.H. Silk, R.S. Barnes, Examination of fission fragment tracks with an electron microscope, *Philos. Mag.*, 4 (1959) 970–972.
- [3] R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker, Solid-State Track Detectors: Applications to Nuclear Science and Geophysics, *Annu. Rev. Nucl. Sci.*, 15 (1965) 1–28.
- [4] A.L. Frank, E. V Benton, J.C. Albergotti, A passive neutron spectrometer using a nuclear track detector, *Nucl. Instruments Methods.*, 122 (1974) 433–441.
- [5] B.G. Cartwright, E.K. Shirk, P.B. Price, A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution, *Nucl. Instruments Methods.*, 153 (1978) 457–460.
- [6] J.R. Lamarsh, A.J. Baratta, *Introduction to Nuclear Engineering*, 3rd Edition, Prentice Hall, 2011.
- [7] R.J. Tanner, D.T. Bartlett, L.G. Hager, Operational and dosimetric characteristics of etched-track neutron detectors in routine neutron radiation protection dosimetry, *Radiat. Meas.*, 40 (2005) 549–559.
- [8] B. Milenkovic, N. Stevanovic, D. Nikezic, M. Ivanovic, Computer program Neutron-CR-39 for simulation of neutrons from an Am-Be source and calculation of proton track profiles, *Comput. Phys. Commun.*, 182 (2011) 1536–1542.
- [9] D. Nikezic, K.N. Yu, Formation and growth of tracks in nuclear track materials, *Mater. Sci. Eng. R Reports.*, 46 (2004) 51–123.
- [10] G. Somogyi, Development of etched nuclear tracks, *Nucl. Instruments Methods.*, 173 (1980) 21–42.
- [11] D. Hermsdorf, Measurement and comparative evaluation of the sensitivity V for protons and hydrogen isotopes registration in PADC detectors of type CR-39, *Radiat. Meas.*, 44 (2009) 806–812.
- [12] M. Fromm, F. Membrey, A. El Rahamany, A. Chambaudet, Principle of light ions micromapping and dosimetry using a CR-39 polymeric detector: Modelized and experimental uncertainties, *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 21 (1993) 357–365.
- [13] ISO, Reference neutron radiations - Part 1: Characteristics and methods of production, ISO 8529-1:2001, Geneva, 2001.
- [14] ISO, Passive neutron dosimetry systems - Part 1: Performance and test requirements for personal dosimetry, ISO 21909-1:2015, Geneva, 2015.
- [15] KAERI, <http://atom.kaeri.re.kr:8080/nuchart/> (Eriřim tarihi : 5 Ocak 2021).

- [16] ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26 (3-4), **1996**.



## EKLER

### EK 1 - Hızlı Nötron Dozimetresi için İz Uzunluklarının Dağılımları

Çizelge E.1.  $10^{-6}$  – 1,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	35170	1,0000
23,7 – 68,5	0	0
68,5 – 135,1	0	0
135,1 – 224,2	0	0
224,2 – 330,0	0	0
330,0 – 448,4	0	0
448,4 – 595,6	0	0
595,6 – 761,3	0	0
761,3 – 919,5	0	0
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	35170	1,0000

Çizelge E.2. 1,0 – 2,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	26271	0,7631
23,7 – 68,5	8154	0,2369
68,5 – 135,1	0	0
135,1 – 224,2	0	0
224,2 – 330,0	0	0
330,0 – 448,4	0	0
448,4 – 595,6	0	0
595,6 – 761,3	0	0
761,3 – 919,5	0	0
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	34425	1,0000

Çizelge E.3. 2,0 – 3,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	16835	0,4749
23,7 – 68,5	13152	0,3710
68,5 – 135,1	5463	0,1541
135,1 – 224,2	0	0
224,2 – 330,0	0	0
330,0 – 448,4	0	0
448,4 – 595,6	0	0
595,6 – 761,3	0	0
761,3 – 919,5	0	0
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	35450	1,0000

Çizelge E.4. 3,0 – 4,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	13059	0,3479
23,7 – 68,5	10584	0,2819
68,5 – 135,1	9818	0,2615
135,1 – 224,2	4079	0,1087
224,2 – 330,0	0	0
330,0 – 448,4	0	0
448,4 – 595,6	0	0
595,6 – 761,3	0	0
761,3 – 919,5	0	0
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	37540	1,0000

Çizelge E.5. 4,0 – 5,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	10787	0,2797
23,7 – 68,5	8600	0,2230
68,5 – 135,1	8512	0,2207
135,1 – 224,2	7880	0,2043
224,2 – 330,0	2790	0,0723
330,0 – 448,4	0	0
448,4 – 595,6	0	0
595,6 – 761,3	0	0
761,3 – 919,5	0	0
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	38569	1,0000

Çizelge E.6. 5,0 – 6,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	9490	0,2317
23,7 – 68,5	7794	0,1903
68,5 – 135,1	7739	0,1889
135,1 – 224,2	7566	0,1847
224,2 – 330,0	6235	0,1522
330,0 – 448,4	2142	0,0523
448,4 – 595,6	0	0
595,6 – 761,3	0	0
761,3 – 919,5	0	0
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	40966	1,0000

Çizelge E.7. 6,0 – 7,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	8258	0,1962
23,7 – 68,5	6766	0,1607
68,5 – 135,1	7159	0,1701
135,1 – 224,2	7147	0,1698
224,2 – 330,0	6266	0,1489
330,0 – 448,4	4722	0,1122
448,4 – 595,6	1775	0,0422
595,6 – 761,3	0	0
761,3 – 919,5	0	0
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	42093	1,0000

Çizelge E.8. 7,0 – 8,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	7533	0,1722
23,7 – 68,5	6107	0,1396
68,5 – 135,1	6587	0,1505
135,1 – 224,2	6695	0,1530
224,2 – 330,0	6178	0,1412
330,0 – 448,4	5144	0,1176
448,4 – 595,6	4288	0,0980
595,6 – 761,3	1222	0,0279
761,3 – 919,5	0	0
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	43754	1,0000

Çizelge E.9. 8,0 – 9,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	6750	0,1457
23,7 – 68,5	5748	0,1241
68,5 – 135,1	6310	0,1362
135,1 – 224,2	6773	0,1462
224,2 – 330,0	6073	0,1311
330,0 – 448,4	5416	0,1169
448,4 – 595,6	4995	0,1078
595,6 – 761,3	3411	0,0736
761,3 – 919,5	844	0,0182
919,5 – 1114,9	0	0
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	46320	1,0000

Çizelge E.10. 9,0 – 10,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	6287	0,1280
23,7 – 68,5	5405	0,1101
68,5 – 135,1	6013	0,1224
135,1 – 224,2	6518	0,1327
224,2 – 330,0	6164	0,1255
330,0 – 448,4	5664	0,1153
448,4 – 595,6	5436	0,1107
595,6 – 761,3	4323	0,0880
761,3 – 919,5	2507	0,0511
919,5 – 1114,9	790	0,0161
1114,9 – 1329,1	0	0
Toplam	49107	1,0000

Çizelge E.11. 10,0 – 11,0 MeV enerji aralığında düzgün enerji dağılımına sahip nötron kaynağı için CR-39 malzemesinde oluşan izlerin dağılımı.

İz Uzunluğu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	İz Sayısı	İz Oluşma Olasılığı
0 – 23,7	6054	0,1160
23,7 – 68,5	5156	0,0988
68,5 – 135,1	5833	0,1118
135,1 – 224,2	6404	0,1228
224,2 – 330,0	6140	0,1177
330,0 – 448,4	5715	0,1095
448,4 – 595,6	5850	0,1121
595,6 – 761,3	4810	0,0922
761,3 – 919,5	3352	0,0643
919,5 – 1114,9	2345	0,0450
1114,9 – 1329,1	509	0,0098
Toplam	52168	1,0000