

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**POZİTRON YAYICI RADYOİZOTOP ÜRETİMİNDE  
YÜKLÜ PARÇACIK AKTİVASYONUNUN  
ÖZGÜN BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa RABUŞ**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim Ve Teknoloji Programı**

**Temmuz 2020**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**POZİTRON YAYICI RADYOİZOTOP ÜRETİMİNDE  
YÜKLÜ PARÇACIK AKTİVASYONUNUN  
ÖZGÜN BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa RABUŞ  
302001024**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim Ve Teknoloji Programı**

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

**Temmuz 2020**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 302001024 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa RABUŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “POZİTRON YAYICI RADYOİZOTOP ÜRETİMİNDE YÜKLÜ PARÇACIK AKTİVASYONUNUN ÖZGÜN BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ İLE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Ayşe Filiz BAYTAŞ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç.Dr. Ayşe DURUSOY** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 01 Haziran 2020  
**Savunma Tarihi** : 14 Temmuz 2020





**Hasbi YAVUZ Hoca'nın Anısına Saygıyla,**





## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasına resmi başlangıç tarihi olan 2019-2020 güz döneminden aylar önce 2019 yaz tatilinde başladım. Bu konudaki talebimi memnuniyetle kabul ederek yaz aylarında başlayıp bir yıl boyunca herbiri saatleri bulan birçok toplantıya harcadığı mesai için tez danışmanım Prof.Dr. İskender A. REYHANCAN'a minnet duygularımı ifade etmem bir borçtur.

Tezi, enerjistik iyonların ve radyasyonun madde ile etkileşimi üzerine inşa etmek üzere danışman hocamla hemfikir olduktan sonra “Bu konuda özgün nasıl bir şey yapabilirim?” arayışı içerisine girdim. Bu sırada İTÜ Fizik Mühendisliğinden Doç.Dr. Tolga BİRKANDAN'ın 2019 yazokulunda verdiği “Symbolic & Numeric Techniques in Physics” ve “Computational Methods in Physics” derslerini takip etmem konusundaki teklifi ile karşılaştım ve hevesle kabul ettim. Üç hafta boyunca bu dersleri aksatmadan takip ederek tezim için önemli bir araç olacak olan “benzetim programı oluşturma” konusunda oldukça ilerledim. Bu konudaki katkısı nedeni ile sayın Doç.Dr. Tolga BİRKANDAN'a müteşekkir olduğumu birkez daha ifade etmeliyim.

Bu arayışlarım sırasında “Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü (HTE-TARLA)” bünyesinde gerçekleştirilen “TFD XIII. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu”na yaptığım başvuru kabul edildi. Bir hafta boyunca içerisinde bulunduğum bu yoğun ders ve çalışma temposu sırasında konusunun uzmanı birçok bilim insanı ile görüş alışverişinde bulunma olanağı yakaladım. Bu yaz okulunun tez çalışmamda özgün bir şeyler ortaya koyma konusunda bana yön veren ikinci dönemeç olduğunu belirtmeliyim. Burada herbirinin adını anmak istemekle beraber buna olanak olmadığını da görerek, böylesi bir organizasyonu yaparak bana ufuk açıcı bu şansı tanıyan HTE-TARLA ve “Türk Fizik Derneği” özelinde katkı sunan tüm bilim insanlarına teşekkür ederim.

Bu tez lisansüstü öğrenimde alınan derslerin önemini gösteren kanıtlardan birisidir. Bu tezin olgusal ve matematiksel altyapısı aldığım dört yüksek lisans dersi üzerine inşa edilmiştir. Sayın hocalarımız Prof. Dr. A. Filiz BAYTAŞ ve Doç. Dr. Sevilay HACIYAKUPOĞLU'nun vermiş olduğu “Radyasyon Algılama ve Ölçme” dersi, ayrıca sayın hocamız Dr. Coşkun FIRAT'ın vermiş olduğu “Engineering Mathematics” dersi ve son olarak aynı zamanda tez danışmanım olan sayın hocam Prof. Dr. İskender A. REYHANCAN'ın verdiği “Radyasyon Fiziği” ile “Mikro Nükleer Bataryalar” dersleri tez çalışmamın temelini oluşturmuş ve tez çalışmam süresince ders notları bana kılavuzluk yapmıştır. Kendilerine olan şükranlarımı bu satırlardan yinelemek isterim.

Tüm bunlara karşın bu tezin alacağı olumlu eleştirilerde yukarıda adı geçen veya geçmeyen hocalarımızın payı büyükken olumsuz olabilecek eleştirilerin hepsinin sorumluluğu tabiidir ki tarafıma aittir. Ülkemiz ve insanlığa bu tezin yaptığı katkı sorgulanabilir ancak şahsıma yaptığı katkı yadsınamaz büyüklüktedir. Saygılarımla.

Haziran 2020

Mustafa RABUŞ  
(Fizikçi)



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>SEMBOLLER</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xix</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	4
1.2 Tezin İkincil Amacı.....	4
1.3 Literatür Araştırması .....	5
1.3.1 <sup>110m</sup> In pozitron kaynağı üretimine yönelik çalışmalar .....	5
1.3.2 Bethe Denklemi ve erim hesaplamalarına yönelik çalışmalar .....	6
1.3.3 Pozitron üretiminde aktivitenin optimizasyonuna yönelik çalışmalar .....	6
1.3.4 Siklotronlar ve karakteristik özellikleri.....	7
1.4 Hipotez .....	9
<b>2. OLGUSAL ALTYAPI</b> .....	<b>11</b>
2.1 Radyasyon Kaynakları .....	11
2.1.1 Hızlı elektron kaynakları.....	11
2.1.2 Yüklü ağır parçacık kaynakları .....	12
2.1.3 Elektromanyetik radyasyon kaynakları.....	13
2.1.4 Nötron kaynakları .....	14
2.2 Radyasyonun Madde İle Etkileşimi .....	15
2.2.1 Hızlı elektronların madde ile etkileşmesi.....	15
2.2.2 Yüklü ağır parçacıkların madde ile etkileşmesi .....	16
2.2.3 Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesi .....	16
2.2.4 Nötronun madde ile etkileşmesi.....	17
2.3 Nükleer Etkileşimler .....	18
2.3.1 Saçılma reaksiyonları .....	18
2.3.2 Vur çıkar reaksiyonları.....	18
2.3.3 Transfer reaksiyonları .....	19
2.3.4 Absorbsiyon reaksiyonları .....	20
2.4 Radyoaktif Dönüşüm.....	20
<b>3. MATEMATİKSEL ALTYAPI</b> .....	<b>23</b>
3.1 Nükleer Etkileşim Reaksiyonu Ve Reaksiyon Eşik Enerjisi.....	23
3.2 Durdurma Gücü Ve Erim .....	24
3.3 Reaksiyon Tesir Kesiti Ve Demet Akı Değişimi .....	27
3.4 Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon.....	28
<b>4. ÇALIŞMA VE BULGULAR</b> .....	<b>33</b>
4.1 Seçili Reaksiyonlarda Reaksiyon Q Değeri Ve Asgari Demet Enerjisi .....	34
4.2 Seçili Reaksiyonlarda Makul Enerji Ve Hedef Materyal Kalınlık Hesabı.....	35

4.2.1 $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon enerji aralığı ve hedef kalınlığı .....	36
4.2.2 $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon enerji aralığı ve hedef kalınlığı.....	38
4.2.3 $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon enerji aralığı ve hedef kalınlığı.....	40
4.3 Seçili Reaksiyonlarda Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon.....	42
4.3.1 $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonunda ürün miktarı ve aktivitesi .....	43
4.3.2 $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonunda ürün miktarı ve aktivitesi.....	46
4.3.3 $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonunda ürün miktarı ve aktivitesi.....	49
<b>5. SONUÇLARIN MUKAYESESİ VE DEĞERLENDİRMELER.....</b>	<b>53</b>
5.1 Parçacık Demeti Asgari Enerji Büyüklüğü .....	53
5.2 Parçacık Demeti Erim Büyüklüğü Ve Asgari Hedef Materyal Kalınlığı.....	54
5.3 Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon.....	56
5.4 Sonuç ve Tartışma .....	57
5.4.1 Tezin birincil ereği .....	57
5.4.2 Tezin ikincil ereği.....	58
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>61</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>65</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>81</b>

## KISALTMALAR

<b>CSDA</b>	: Continuous slowing down approximation.
<b>GEANT4</b>	: for GEometry ANd Tracking.
<b>GNU</b>	: GNU's Not Unix.
<b>IAEA - NDS</b>	: International Atomic Energy Agency - Nuclear Data Section.
<b>IAEA</b>	: International Atomic Energy Agency.
<b>ICRU</b>	: International Commission on Radiation Units & Measurements
<b>JANIS</b>	: Java-based nuclear information software.
<b>MATLAB</b>	: Matrix Laboratory.
<b>MCS</b>	: Monte Carlo Simulation.
<b>NIST</b>	: National Institute of Standards and Technology (US).
<b>OECD-NAE</b>	: Organisation for Economic Co-operation and Development.
<b>PET</b>	: Pozitron Emission Tomography.
<b>SRIM</b>	: The Stopping and Range of Ions in Matter.
<b>TAEK</b>	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.
<b>TALYS</b>	: Nuclear Reaction Simulator.
<b>TENDL</b>	: The TALYS-generated Evaluated Nuclear Data Libraries. The Nuclear Energy Agency.
<b>TRIM</b>	: TRansport of Ions in Matter.
<b>TTY</b>	: Thick Target Yield.



## SEMBOLLER

<b>@sat</b>	: Saturasyonda
<b>Ag</b>	: Gümüş
<b>Bq</b>	: Bekerel
<b>Cd</b>	: Kadmiyum
<b>d</b>	: Döteron
<b>D</b>	: Döteryum
<b>e</b>	: Elemanter yük
<b>eV</b>	: Elektronvolt
<b>G</b>	: Giga
<b>H</b>	: Hidrojen
<b>He</b>	: Helyum
<b>In</b>	: İndiyum
<b>M</b>	: Mega
<b>p</b>	: Proton
<b>Sn</b>	: Kalay
<b><math>\alpha</math></b>	: Alfa parçacığı
<b><math>\beta^-</math></b>	: Beta eksi, betatron
<b><math>\beta^+</math></b>	: Beta artı, pozitron
<b><math>\mu</math></b>	: Mikro
<b><math>\mu A</math></b>	: Mikro Amper





## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : Tezde kullanılan araçlar.....	3
Çizelge 1.2 : Ticari siklotronların işlevsel sınıflandırması.....	8
Çizelge 1.3 : Türkiye’de faal siklotronlar.....	9
Çizelge 2.1 : Nükleer etkileşimde “Absorbsiyon Reaksiyonlarına” örnekler.....	20
Çizelge 2.2 : Radyoaktif dönüşüm olasılıkları.....	21
Çizelge 4.1 : Seçili reaksiyonlar için “Q” değeri ve “Eşik Enerjisi” değerleri.....	34
Çizelge 4.2 : $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$ reaksiyonu için Bethe formülünde kullanılan değerler.....	36
Çizelge 4.3 : $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$ reaksiyonu için Bethe formülünde kullanılan değerler.....	38
Çizelge 4.4 : $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$ reaksiyonu için Bethe formülünde kullanılan değerler.....	40
Çizelge 4.5 : $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$ reaksiyonu veri eldesi için kullanılan değerler.....	45
Çizelge 4.6 : $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$ reaksiyonu veri eldesi için kullanılan değerler.....	48
Çizelge 4.7 : $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$ reaksiyonu veri eldesi için kullanılan değerler.....	51
Çizelge 5.1 : Parçacık demeti asgari enerji büyüklükleri.....	53
Çizelge 5.2 : Mermi parçacık demetlerinin erimi ve asgari hedef kalınlıkları.....	54
Çizelge 5.3 : Farklı hedeflerde SRIM erim raporları.....	55
Çizelge 5.4 : Kalın hedefde birim akımda ışınlama süresine bağlı aktivite.....	56



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Tezin şematik özeti.....	2
Şekil 1.2 : Veri üretiminde izlenen algoritma.....	4
Şekil 2.1 : Nükleer Etkileşimde “Saçılma Reaksiyon Modeli”.....	18
Şekil 2.2 : Nükleer Etkileşimde “Vur Çıkar Reaksiyon Modeli”.....	19
Şekil 2.3 : Nükleer Etkileşimde “Transfer Reaksiyon Modeli”.....	19
Şekil 2.4 : Nükleer etkileşimde “Absorbsiyon Reaksiyon Modeli”.....	20
Şekil 2.5 : “Nüklid Tablo” modeli.....	21
Şekil 3.1 : Nükleer etkileşim modellemesi.....	27
Şekil 3.2 : Parçacık ile hedef materyal etkileşim modellemesi.....	28
Şekil 4.1 : Ürün radyonüklid bozunum şeması. ....	33
Şekil 4.2 : $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesit grafiği.....	37
Şekil 4.3 : $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu etkin tesir kesiti için erim ve asgari kalınlık.....	37
Şekil 4.4 : $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesit grafiği.....	39
Şekil 4.5 : $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu etkin tesir kesiti için erim ve asgari kalınlık.....	39
Şekil 4.6 : $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesit grafiği.....	41
Şekil 4.7 : $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu etkin tesir kesiti için erim ve asgari kalınlık.....	41
Şekil 4.8 : $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon ürün dağılımı.....	44
Şekil 4.9 : $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu zamana bağlı ürün aktivite grafiği.....	44
Şekil 4.10 : $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu zamana ve derinliğe bağlı ürün sayısı.....	45
Şekil 4.11 : $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon ürün dağılımı.....	47
Şekil 4.12 : $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu zamana bağlı ürün aktivite grafiği.....	47
Şekil 4.13 : $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu zamana ve derinliğe bağlı ürün sayısı.....	48
Şekil 4.14 : $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon ürün dağılımı. ....	50
Şekil 4.15 : $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu zamana bağlı ürün aktivite grafiği.....	50
Şekil 4.16 : $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonu zamana ve derinliğe bağlı ürün sayısı.....	51



# POZİTRON YAYICI RADYOİZOTOP ÜRETİMİNDE YÜKLÜ PARÇACIK AKTİVASYONUNUN ÖZGÜN BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ İLE ANALİZİ

## ÖZET

Pozitron yayıcısı olan radyonüklidler medikal teşhis teknolojilerinde halihazırda kullanılmaktadır. “Pozitron Emisyon Tomografi” (PET) denilen bu teknolojinin gereksinim duyduğu radyonüklidlerin bazı özellikleri bir arada bulundurması gerekmektedir. Bunlardan bazıları; doğru uzunlukta yarıömür, pozitron yayımı yanında farklı parçacık yayımı olup olmaması, doğru enerji aralığında üretilebilmesi ve üretim kolaylığıdır. Bu radyonüklidler, siklotron, reaktörler veya parçacık jeneratörleri kullanılarak nükleer aktivasyon sürecinin sonunda üretilmektedirler. Bu çalışmada siklotron kaynaklı pozitron yayıcı radyonüklid üretim süreci incelendi.

Enerjistik parçacıkların ve radyasyonun madde ile etkileşimini ele alan Monte Carlo benzetim programlarından elde edilebilecek veri türlerinin sınırlı bir kısmı bu çalışmanın özgün araçları ile elde edildi. Parçacık demetinin hedef içerisindeki erimi, makul ışınlama enerjisi ile ışınlanan ana nüklid hedef için asgari kalınlık değerleri ve de “Yüklü Parçacıklar ile Nükleer Aktivasyon” sonucunda ürün radyonüklid miktar ve aktiviteleri bu çalışma kapsamında GNU-Octave kodları ile yazılmış olan özgün “Deterministik Benzetim Programları” ile elde edildi.

Siklotron kaynaklı yüklü parçacık bombardımanı ile bir hedef nüklidin nükleer dönüşüm reaksiyonu sonucu pozitron yayıcı radyonüklid üretim sürecinin seçili reaksiyonlarda analizi üç aşamada kurgulandı.

(I) Reaksiyon eşik enerjisi ile mermi parçacık için asgari enerji tayini:  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonları için sırası ile “7,8672 MeV”, “7,0108 MeV”, “4,7030 MeV” eşik enerjileri hesaplandı. Bu değerler mermi parçacık demeti için asgari demet enerjilerini belirlemektedir.

(II) Parçacık demeti makul enerji aralıklarına ve durdurma gücüne bağlı hedef materyal için asgari kalınlık tayini:  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonlarında mermi parçacık demetleri için makul enerji aralığı olarak sırası ile “30→8”, “15→8,7”, “18→5,8” MeV enerji aralıklarında ışınlama öngörüldü. Bu enerjilerde nükleer reaksiyon sonucu ürün radyonüklit eldesi için hedef materyalin asgari kalınlığı yine sırası ile “128,5  $\mu\text{m}$ ”, “208,5  $\mu\text{m}$ ”, “659,05  $\mu\text{m}$ ” olarak elde edildi.

(III) Parçacık demeti akım büyüklüğü ve ışınlama süresine bağlı aktivite tayini:  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonlarında yukarıda belirtilen değerlerin kullanılması koşulu ile elde edilebilecek ürün radyonüklid saturasyon aktivite değerleri sırası ile; “0,264”, “1,98”, “1,35” GBq/ $\mu\text{A}$ @sat olarak hesaplandı.

Elde edilen tüm bu veriler “OECD NEA Janis Book” veritabanları, SRIM benzetim programı, “IAEA Yüklü Parçacık Tesir Kesitleri Veritabanı” ile mukayese edildi ve sonuçların %0,2-%5 aralığında sapma ile uyumlu olduğu görülmüştür.

GNU-Octave dilinde yazılmış olan “Deterministik Benzetim Programının” hesaplamaları oldukça tutarlı sonuçlar vermiştir. Tez için birincil erek olarak seçilmiş olan özgün benzetim programları ile hesaplama altyapısı oluşturma hedefinde başarılı olduğu söylenebilir.

Tezin İkincil Ereği:

Pozitron kaynağı olarak  $^{110m}\text{In}$  eldesine yönelik dolaylı üretim rotaları olan  $^{nat}\text{In}(p,xn)^{110}\text{Sn}$  ve  $^{108}\text{Cd}(\alpha,2n)^{110}\text{Sn}$  dışarıda bırakıldı, doğrudan üretim rotası olan;  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$ ,  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$  üç reaksiyon seçildi. Dolaylı üretim rotaları görece yüksek eşik enerjisi (30 ve 17,76 MeV) nedeniyle yaygın kullanımda olan siklotronların büyük çoğunluğunda üretime uygun değildir. Ayrıca  $^{nat}\text{In}(p,xn)^{110}\text{Sn}$  reaksiyonu nükleer etkileşim tesir kesitleri oldukça düşük olduğu için demet enerjisi ve/veya demet akısı görece yüksek değerlerde ışınlama gerektirecektir.

Şu anda yaygın kullanımda olan pozitron kaynağı üretim tesislerinin aktivite değerlerine bakıldığında  $\sim 6,7 \text{ GBq}/\mu\text{A@sat}$  ile  $\sim 3,7 \text{ MBq}/\mu\text{A@sat}$  aralığında ürün radyoniklidlerle çalışılmakta. Bu çalışmada bulunan değerler ise  $0,264 \text{ GBq}/\mu\text{A@sat}$ ,  $1,98 \text{ GBq}/\mu\text{A@sat}$  ve  $1,35 \text{ GBq}/\mu\text{A@sat}$  ile yaygın kullanımda olan pozitron kaynaklarına ciddi bir alternatif oluşturmaktadırlar.

Tesir kesiti yüksek bir tepe yapsada (343,9 milibarn) ortalamada düşük bir etkileşim tesir kesiti ortaya koyması nedeni ile en düşük  $^{110m}\text{In}$  saturasyon aktivitesi  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonunda gözlenmiştir.  $^{110m}\text{In}$  saturasyon aktivitesi açısından  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu en verimli seçenektir. Döteronla ışınlama seçeneği yaygınlık açısından proton hızlandırıcılardan geridedir. Ancak  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonunu takip eden  $^{110m}\text{In}$  aktivitesi de kabul edilebilir ve uygulanabilir bir seçenek olarak durmaktadır. Bu reaksiyonlar için %99 izotopik zenginlikte hedef nüklid temini birçok firma tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca oluşan ürün  $^{110m}\text{In}$  çekirdeklerinin hızlı bir şekilde kimyasal olarak hedef materyalden ayrıştırılmasına yönelik teknikler halihazırda uygulanmaktadır.

Tüm bu sonuçlar;  $^{110m}\text{In}$  pozitron kaynağının üretim rotası olarak  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  ve  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonlarını önemli bir alternatif yapmaktadır. Yeterli yarıömür uzunluğu, aktivite verimliliği ve ulaşılabilirlik açısından bu reaksiyonlar halihazırda yaygın kullanıma sahip alternatiflerinden daha geride değildirlere.

Burada soru işaretleri doğuran tek taraf  $^{110m}\text{In}$  kaynaklı pozitronların görece yüksek olan 2260 keV son nokta enerjileri ve 1015 keV ortalama enerjileri ile yokoluş ışınmasını hedef bölgenin dışında da gerçekleştirilebilme olasılıklarıdır. Bu olasılık görüntülenmek istenilen bölgenin olduğundan daha hacimli görünmesine yol açabilir. Ancak bu konuda belirleyici görüş radyasyon onkolojisi profesyonellerine aittir.

# ANALYSIS OF CHARGED PARTICLE ACTIVATION USED IN POSITRON EMITTER RADIOISOTOPE PRODUCTION WITH UNIQUE COMPUTER SIMULATIONS

## SUMMARY

Radionuclides, a positron emitter, are currently used in medical diagnostic technologies. The radionuclides required by this technology, called "Positron Emission Tomography" (PET), should have some features together. Some of those; the correct length of semi-life, besides positron emission there is different particle emission, it can be produced in the right energy range and ease of production. These radionuclides are produced at the end of the nuclear activation process using cyclotron, reactors or particle generators. In this study, the production process of cyclotron-induced positron emitter radionuclide was examined.

A limited number of data types that can be obtained from Monte Carlo simulation programs that deal with the interaction of energetic particles and radiation with matter have been obtained with the unique tools of this study. With the unique "Deterministic Simulation Programs" written in GNU-Octave codes within the scope of this study, the minimum thickness of the target, the reasonable irradiation energy and the activities of "Nuclear Activation with Charged Particles" was obtained.

Analysis of the positron emitting radionuclide production process in selected reactions was designed in three stages as a result of nuclear transformation reaction of a target nuclide with cyclotron-induced charged particle bombardment.

(I) Minimum energy determination for the projectile particle threshold energy:  $^{107}\text{Ag}(\alpha, n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d, 2n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(p, n)^{110\text{m}}\text{In}$  for the reactions, the threshold energies were calculated as "7.8672 MeV", "7.0108 MeV" and "4.7030 MeV". These values determine minimum beam energies for the bullet particle beam.

(II) Determination of minimum thickness for the target material relative to the particle beam reasonable energy ranges and stopping power:  $^{107}\text{Ag}(\alpha, n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d, 2n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(p, n)^{110\text{m}}\text{In}$  Irradiation was envisaged in the "30→8", "15→8.7", "18→5.8" MeV energy ranges, respectively, as the reasonable energy range for the particle beam. As a result of nuclear reaction in these energies, the minimum thickness of the target material for obtaining product radionuclide was obtained as "128.5  $\mu\text{m}$ ", "208.5  $\mu\text{m}$ " and "659.05  $\mu\text{m}$ ", respectively.

(III) Determination of the relative activity of particle beam current value and irradiation time: Provided that the above values are used in the reactions of  $^{107}\text{Ag}(\alpha, n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d, 2n)^{110\text{m}}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(p, n)^{110\text{m}}\text{In}$  the product radionuclide saturation activity calculated values was "0.264", "1.98", "1.35" as GBq /  $\mu\text{A}$  @ sat respectively.

All these data were compared with “OECD NEA Janis Book” databases, SRIM simulation program, “IAEA Charged Particle Cross Sections Database” and the results were found to be compatible with a deviation in the range of 0.2% to 5%.

The calculations of the "Deterministic Simulation Program" written in the GNU-Octave language have yielded very consistent results. It can be said that it is successful in the goal of creating a computing infrastructure with the unique simulation programs chosen as the primary aim for the thesis.

In the computer program written in the study, advantageous particle beam energy range and target thickness can be determined for ion-matter interactions based on the energy-related cross section data. Users can access the target material thickness data that they need to use depending on their preferred energy range for the ion beam when they run the computer program from the printed txt file.

After obtaining ion beam energies and target thicknesses, they can obtain the product activity values that will occur when they enter the data into the computer program depending on the time. When the program is run, they can reach the product activity values that can occur for all irradiation options from beginning to saturation time in the txt file printed.

Secondary aim of The Thesis:

$^{nat}\text{In}(p,xn)^{110}\text{Sn}$  and  $^{108}\text{Cd}(\alpha,2n)^{110}\text{Sn}$ , which are indirect production routes for obtaining  $^{110m}\text{In}$  as positron source, are excluded. Three reactions were selected,  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$ . Indirect production routes are not suitable for production in the vast majority of cyclotrons, due to their relatively high threshold energy (30 and 17.76 MeV). In addition, since the  $^{nat}\text{In}(p, xn)^{110}\text{Sn}$  reaction is very low in nuclear interaction cross sections, relatively high beam energy and / or high beam flux irradiation will required.

Considering the activity values of positron source production facilities, which are currently in use, product radionuclides are used in the range of  $\sim 6.7 \text{ GBq} / \mu\text{A} @ \text{sat}$  to  $\sim 3.7 \text{ MBq} / \mu\text{A} @ \text{sat}$ . The values found in this study constitute a serious alternative to positron sources which are widely used with  $0.264 \text{ GBq} / \mu\text{A} @ \text{sat}$ ,  $1.98 \text{ GBq} / \mu\text{A} @ \text{sat}$  and  $1.35 \text{ GBq} / \mu\text{A} @ \text{sat}$ .

Although the cross section makes a high cross section (343.9 millibars), the lowest  $^{110m}\text{In}$  saturation activity was observed in the reaction of  $^{107}\text{Ag}(\alpha, n)^{110m}\text{In}$  since it showed a low interaction cross section on average.  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaction is the most efficient option in terms of saturation activity of  $^{110m}\text{In}$ . Deuteron irradiation option is behind proton accelerators in terms of prevalence. However,  $^{110m}\text{In}$  activity following the  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$  reaction also remains an acceptable and feasible option. For these reactions, 99% isotopic rich target nuclide supply is provided by many companies. In addition, techniques for the rapid chemical separation of  $^{110m}\text{In}$  nuclides from the target material are currently being implemented.

All these results; It makes  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  and  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$  reactions an important alternative as the production route of  $^{110m}\text{In}$  positron source. In terms of adequate half-life length, activity efficiency and accessibility, these reactions are not far behind their currently widely used alternatives.



The only side that raises question marks here is the probability of  $^{110\text{m}}\text{In}$ -derived positrons, with their relatively high 2260 keV endpoint energies and 1015 keV average energies, to perform extinction radiation outside the target region. This possibility may cause the region to be displayed to appear more voluminous than it is. However, the determining opinion on this matter belongs to radiation oncology professionals.





## 1. GİRİŞ

Pozitron emisyon kaynağı olan radyonüklidler medikal teşhis teknolojilerinde halihazırda kullanılmaktadır. “Pozitron Emisyon Tomografi” (PET) denilen bu teknolojinin gereksinim duyduğu radyonüklidlerin bazı özellikleri bir arada bulundurması gerekmektedir. Bunlardan bazıları; doğru uzunlukta yarıömür, pozitron emisyonu yanında farklı parçacık yayımı olup olmaması, doğru enerji aralığında üretilebilmesi ve üretim kolaylığıdır. Bu radyonüklidler, siklotron, reaktörler veya parçacık jeneratörleri kullanılarak nükleer etkileşim sürecinin sonunda üretilmektedirler [1]. Bu çalışmada siklotronlarda üretilen pozitron yayıcı radyonüklid üretim süreci incelendi.

Bu çalışmada öncelikle, nükleer etkileşim reaksiyonlarının tetikleyicisi olan parçacıkların, madde ve nükleer yapı ile etkileşimleri nihayetinde gerçekleşen, “Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon” süreçlerinin olgusal ve matematiksel altyapısı ele alınmıştır. Varolan matematiksel modellerde özgün düzenlemeler yapılmış ve matematiksel modellerin “benzetim programları” oluşturabilecek şekilde kodlanabilmesi için bazı özgün yaklaşımların denenmesi gerekmiştir. Bu çalışma kapsamında yazılmış GNU-Octave bilgisayar kodlarına dayanan “Deterministik Benzetim Programları” ile hızlandırıcı kaynaklı enerjistik iyonlar, alfa, dötron, proton demetlerinin hedef materyallerde “Yüklü Parçacıklar İle Nükleer Aktivasyon” süreçlerinin girdileri, çıktıları ve sonuçlarının öngörülmesi sağlanmıştır.

Enerjistik iyonların ve radyasyonun madde ile etkileşimini ele alan birçok benzetim programı mevcuttur. Nükleer bilimlerde kullanılan benzetim programlarının önemli bir kısmı “Monte Carlo Metod” algoritmasını kullanır. “Monte Carlo” yöntemi, “random-rassal” yani olasılıksal sayısal hesaplamalar üzerinden reaksiyon sonuçlarını öngörmeye çalışır [2]. Ancak bu çalışma kapsamında GNU-Octave dilinde yazılan bilgisayar kodları “random-rassal” modeller kullanmaksızın “tesir kesiti” ve diğer temel fiziksel büyüklükleri girdi olarak alıp, çıktı olarak “Yüklü Parçacıklar İle Nükleer Aktivasyon Reaksiyonlarının” sonuçlarını öngörmeyi hedeflemiştir. Diferansiyel denklemlere dayalı matematiksel modellerin ortama ve/veya zamana

bağlı parçacık etkileşimlerini yöneten bir algoritmaya dönüştürülerek çalıştırılması yönüyle, bu çalışmada “Deterministik Benzetim Programları” yazılmış ve kullanılmıştır [3]. Bu çalışma özel bir pozitron kaynağı ile ilgilenmekten çok kendine özgü bir algoritma ve kod altyapısı geliştirerek enerjistik iyonların madde ile nükleer etkileşim süreçlerinin çoğu için kullanımı mümkün olan bir analiz altyapısı oluşturmuştur. Şekil 1.1’de çalışma şematik olarak özetlenmiştir.



Şekil 1.1 : Tezin şematik özeti.

Şekil 1.1’de görüldüğü üzere çalışma üç nükleer reaksiyonu kendisine hedef almıştır. Bu üç reaksiyonun seçilme nedeni; üzerinde yapılan çalışmanın nispeten az olmasının yanında veri tabanlarında mukayese sağlanabilecek derecede veri bulunabilmesidir. Ayrıca bu üç reaksiyon aynı pozitron yayıcı radyonüklidi vermesine karşın “Yüklü Parçacık Aktivasyonu” için üç farklı enerjistik iyonu temsil etmektedir.

Çalışma hesaplamalar için kendi özgün “Deterministik Benzetim Programları”nı kullanmış olsa da elde ettiği verilerin tutarlılığını göstermesi için farklı araçlardan referans değerler sunması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan kodlama dili GNU-Octave hakkında ve de sonuçların değerlendirilmesi için kullanılan 3 mukayese aracı yani referans değerler hakkında temel bilgiler tablo olarak Çizelge 1.1’de sunulmuştur.

## Çizelge 1.1 : Tezde kullanılan araçlar.

### DETERMİNİSTİK BENZETİM PROGRAMININ YAZIMINDA GNU-OCTAVE

GNU-Octave kod dili; John W. Eaton ve diğerleri tarafından yazıldı. Çoğunlukla Matlab ile uyumlu bir dil kullanan üst düzey bir programlama dilidir. Octave doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin nümerik çözümlerine, sıradan fonksiyonların ve diferansiyel denklemlerin entegre edilmesine olanak sağlayan kapsamlı araçlara sahiptir. Deterministik ve olasılıksal simülasyonlar için bir ortam sağlar. Octave'ın kendi dilinde veya C ++, C, Fortran veya diğer dillerde yazılmış modüller kullanılarak genişletilebilir ve özelleştirilebilir. Özgür Yazılım Vakfı tarafından yayınlanan GNU Genel Kamu Lisansı ile GNU Octave serbestçe yeniden dağıtılabılır bir yazılımdır [4].

1

### REAKSİYON EŞİK ENERJİLERİ KIYAS ARACI OECD-NEA JANIS BOOK

JANIS, OECD “Nükleer Enerji Ajansı” ve “Aquitaine Electronique Informatique” tarafından geliştirilmiştir. JANIS (Java tabanlı nükleer bilgi yazılımı) nükleer verilerin görüntülenmesini ve manipülasyonunu kolaylaştırmak için tasarlanmış bir görüntüleme programıdır. Amacı, nükleer veri kullanıcısının sayısal değerlere ve grafiksel gösterimlere erişmesini sağlamaktır. Farklı nükleer veri setlerinin karşılaştırılması için azami esneklik sunar [5].

2

### PARÇACIK DEMETİ HEDEF ERİM DEĞERLERİ KIYAS ARACI SRIM

İyon-atom çarpışmaları ve iyonların madde içerisinden geçişini kuantum mekanik yapısını kullanarak iyon madde etkileşimlerini hesaplayan istatistiksel “Monte Carlo” algoritmaları kullanır. İyonların madde içerisinde ilerlemesi sırasında “durdurma gücü” nispetince enerji yitimlerine maruz kalırken herbir çarpışma parametresi “rassal” oluşturulur. SRIM, J. P. Biersack'in erim algoritmaları üzerindeki orijinal çalışmasına ve J. F. Ziegler'in durdurma teorisi üzerine çalışmalarına dayanır [6].

3

### YÜKLÜ PARÇACIK İLE AKTİVASYON DEĞERLERİ KIYAS ARACI IAEA YÜKLÜ PARÇACIK TESİR KESİTLERİ VERİTABANI

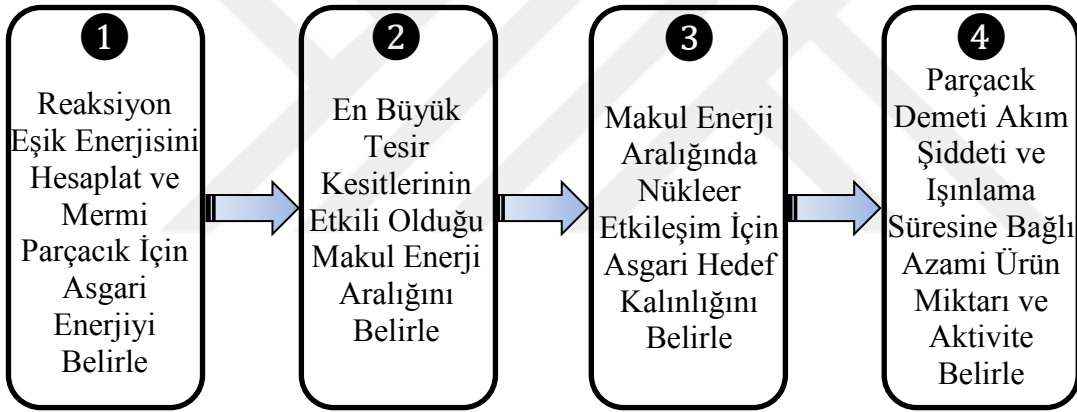
Tıbbi radyoizotop, tanısal radyoizotop üretim reaksiyonları ve monitör reaksiyonları için tasarlanmıştır. Saturasyon ve saatlik aktivite değerleri, tavsiye edilen tesir kesiti verileri, ürün bozunum şeması sunulmaktadır. Veri tabanı, enerjileri birkaç MeV'den en fazla 100 MeV'e kadar hafif yüklü parçacıklar tarafından indüklenen 48 reaksiyon için bu değerleri içerir. Gama yayıcı 16 reaksiyon, pozitron yayıcı 10 reaksiyon, ve monitör reaksiyonları için 22 reaksiyona ait veriler bulunmaktadır [7].

## 1.1 Tezin Amacı

Hızlandırıcı kaynaklı, yüklü parçacık bombardımanı ile bir hedef materyalin nükleer aktivasyonu sonucu pozitron yayıcı radyonüklid üretim sürecinin sayısal analizine yönelik özgün benzetim programları ile hesaplama altyapısı oluşturmaktır. Hedeflenen verilerin dört aşamalı bir süreç sonunda eldesi kurgulandı.

- I. Reaksiyon eşik enerjisi ile mermi parçacık için asgari enerji tayini.
- II. Aktivasyon verimi için parçacık demeti makul enerji aralığının tayini.
- III. Demet makul enerji aralıklarına ve durdurma gücüne bağlı hedef materyal için asgari kalınlık tayini.
- IV. Parçacık demeti akım şiddeti ve ışınlama süresine bağlı aktivite tayini.

Bu çalışmada veri üretiminde kullanılan algoritma şeması Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Veri üretiminde izlenen algoritma.

## 1.2 Tezin İkincil Amacı

Pozitron kaynağı olarak  $^{110m}\text{In}$  eldesine yönelik dolaylı üretim rotaları olan  $^{nat}\text{In}(p,xn)^{110}\text{Sn}$  ve  $^{108}\text{Cd}(\alpha,2n)^{110}\text{Sn}$  dışarıda bırakıldı. Doğrudan üretim rotası olan;  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$ ,  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$  üç reaksiyon seçildi. Dolaylı üretim rotaları görece yüksek eşik enerjisi (30 ve 17,76 MeV) [8] nedeniyle yaygın kullanımda olan siklotronların büyük çoğunluğunda üretime uygun değildir.  $^{110m}\text{In}$  eldesine yönelik doğrudan üretim rotaları ise bu tez kapsamında teknik olasılıklar, beklenen verim, beklenen ürün aktiviteleri açısından analiz edilmiştir. En uygun üretim rotaları gerekçeleri ile belirlenmiştir

### 1.3 Literatür Araştırması

Dört başlık altında incelenmiştir.

“Yüklü Parçacık Aktivasyonu” ile “ $^{110m}\text{In}$  Üretim Rotaları” üzerine çalışmalar, “Bethe Denklemi” kullanarak erim hesaplamaları hakkındaki çalışmalar, “Yüklü Parçacık Aktivasyonu”unda optimizasyona yönelik yapılmış dikkat çeken çalışmalar ve son olarak yüklü parçacıkların hızlandırılması için kullanılan “Siklotronlar”ın teknik özellikleri hakkında ulusal ve uluslararası kurumların yayınlarından bir derleme yapıldı.

#### 1.3.1 $^{110m}\text{In}$ pozitron kaynağı üretimine yönelik çalışmalar

▲ Tarkanyi ve diğ. (2019) çalışmalarında olası pozitron yayıcı radionüklidlerin dolaylı (jeneratör kaynaklı) ve doğrudan (siklotron kaynaklı) üretim süreçleri incelenmiştir. Burada pozitron kaynakları üzerine literatüre girmiş eşik enerjileri, üretim rotaları ve deneysel ve kuramsal tesir kesit çalışmaları derlenmiştir. Tesir kesit grafik uyumluluk teknikleri (Padé fits to Padé least-squares method with 4% systematic uncertainty) kullanılarak belirli enerji aralıkları için önerilen tesir kesiti veri altyapısına katkı sağlamıştır [8].

▲ Tarkanyi ve diğ. (2016) çalışmalarında  $^{110m}\text{In}$ ,  $^{111g}\text{In}$ ,  $^{113m}\text{In}$  ve  $^{114m}\text{In}$  için yeni deneysel veriler ile TENDL-2014 (Talys 1.6 tabanlı) mukayese edilmiştir.  $^{110}\text{Sn}$ ( $^{110m}\text{In}$ ) aracılığı ile  $^{110m}\text{In}$  dolaylı üretimi yüksek enerjili parçacık gereksinimi ile eleştirilirken yüksek saflıkta  $^{110m}\text{In}$  üretim avantajına dikkat çekilmiştir [9].

▲ Tarkanyi ve diğ. (2015) çalışmalarında doğrudan ve dolaylı reaksiyonlar sonucu oluşan  $^{110m}\text{In}$  ürün radyonüklid miktarları için deneysel veriler sunulmuştur. Çalışmada ideal üretim rotası belirlenmeye çalışılmış ve TTY aktivite değerleri farklı rotalar için karşılaştırılmıştır. Dolaylı üretim rotasının yüksek kimyasal saflıkta radyonüklid elde edilebilmesi ile avantaj oluşturmaya karşın yüksek enerjili mermi parçacık gereksinimi dolayısı ile dezavantaj oluşturduğu belirtilmiştir [10].

▲ Kakavand ve diğ. (2015) çalışmalarında doğal kadmiyumun tercih edilen 15-5 MeV optimum enerji aralığında proton bombardımanı sonrası oluşan ürün aktiviteleri deney verileri ve Monte Carlo benzetim sonuçlarının karşılaştırması sunulmuştur [11].

▲ Schmor ve diğ (2010) çalışmalarında yaygın kullanımda olan radyonüklidlerin üretim süreçlerinde beklenen ışınlanma enerjisi ve ürün aktivitelerine dair genel

parametreleri değerlendirmiştir. Buradaki veriler, yeni bir radyonüklid üretim rotası sonucunda aktivite değerlerinin karşılaştırılması açısında iyi bir kıyas kaynağı olmuştur [12].

▲Holland ve diğ. (2010) çalışmalarında  $^{110m}\text{In}$  kullanım olasılığına dikkat çekmişlerdir. Hedef parametreleri olan kompozisyon, kalınlık ve geometri optimizasyonunun etkileri incelenmiştir. Ayrıca ışınlama parametreleri olan, demet enerjisi, akım şiddeti, ışınlama süresi ve açının etkileri çalışılmıştır [13].

▲ Lundqvist ve diğ. (2010) çalışmalarında  $^{110}\text{Cd}$ 'un proton ve döteronla ışınlanması sonrası  $^{110m}\text{In}$ 'un,  $^{110}\text{Cd}$ 'dan hızlı ayırıştırma için ısıl işlem önermektedir [14].

▲ Lundqvist ve diğ. (1991) çalışmalarında  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu için kullanışlı olan enerji aralığını 10-20 MeV olarak ifade etmektedir [15].

### **1.3.2 Bethe Denklemi ve erim hesaplamalarına yönelik çalışmalar**

▲Artun (2018) çalışmasında C# dilinde kendi yazdıkları X-PMSP adlı özgün programı kullanarak insan vücut doku bileşenlerinde ve bazı endüstriyel materyallerde proton ve alfa parçacıkları için durdurma gücü (stopping power) hesaplamaları yapılmıştır. Buldukları değerler ile PStar ve AStar değerlerinin karşılaştırması sunulmuştur [16].

▲Grimes ve diğ. (2017) bilimsel raporlarında Bethe denklemi ile yapılan erim hesaplamalarını PStar veritabanı ve MCS hesaplamaları ile karşılaştırmıştır. Bu yönüyle bu tezin erim hesaplamaları çalışmalarına yakınlık arz etmektedir [17].

▲Ghossain (2017) makalesinde Bethe Denklemi Matlab'da kodlayarak alfaların CSDA erim verilerini su, alüminyum ve bazı insan dokuları için elde etmiş ve bu verileri SRIM benzetimleri ile karşılaştırmıştır [18].

▲Sarsam ve diğ. (2013) çalışmalarında Bethe, Ziegler denklemlerinin Matlab kodlamaları ile çalıştırarak elde ettikleri erim mesafelerinin sonuçlarını SRIM benzetimleri ve PStar veritabanları ile karşılaştırmalarını yapmışlardır [19].

### **1.3.3 Pozitron üretiminde aktivitenin optimizasyonuna yönelik çalışmalar**

▲Sharifian ve diğ. (2017) çalışmalarında GEANT4 ile ürün miktarı simüle edilirken, SRIM kodları ile parçacığın hedef içerisinde erimi hesaplanmış. TALYS-1.8 kodları ile ürün tesir kesiti hesaplanmıştır. Burada GEANT4, SRIM ve TALYS-1.8 olmak



üzere üç farklı program kullanılmıştır. Sharifian ve diğ. (2017) çalışmalarında elde edilen veri grubunun bu tezin özgün yöntemleri ile elde edilebilirliği bu tez için motivasyon kaynağı olmuştur [20].

▲Mun ve diğ. (2016) makalelerinde 13 MeV enerjili siklotronda üretilen enerjistik parçacık demetleri ile ışınlanmış 11C, 13N, 15O ve 18F çekirdeklerinin kalınlıklarına bağlı ürün pozitron kaynağı aktiviteleri GEANT4 ile hesaplamışlar. Burada tesir kesiti verileri TENDL veritabanı ile elde edilmiştir [21].

Sharifian ve diğ. (2017) ve Mun ve diğ. (2016) çalışmalarından bu çalışmada ilham alınmış olmakla beraber kullandıkları benzetim programlarına gereksinim bırakmayan bir rota izlenerek özgün bilgisayar kodlamaları ile veri üretimi hedeflenmiştir. Bu tezin hedeflediği özgün kodlamalar ve benzetimler için en yakın ve kapsamlı çalışma Artun (2018) projesi ve çalışması olmuştur. Ancak söz konusu projede hazırlanan bilgisayar benzetimi sadece durdurma gücü (stopping power) hesaplamaları yapabilmektedir. Bu tez ise durdurma gücü hesaplamalarından yola çıkarak önce mermi parçacık demetinin materyalde erimini daha sonra ise asgari hedef materyal kalınlıklarını ve bunlara bağlı makul ürün aktivitelerini hesaplamayı hedefleyen program altyapısı oluşturmuştur.

#### **1.3.4 Siklotronlar ve karakteristik özellikleri**

▲Yuksel D. (2019) “Hızlandırıcıya Dayalı Radyoizotop Üretimi ve Ülkemizde Nükleer Tıp : Güncel Durum Çalıştayı.” sonuç raporunda Türkiye’deki özel sektöre ait siklotron haritası ve performansları ele alınmıştır. Siklotronlar için hedef üretimine dair teknolojiler değerlendirilmiştir [22].

▲IAEA (2006) Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı’na üye ülkeler için hazırlanmış rehber kitapçıkta Dünya genelindeki siklotronlar hakkında teknik detaylar verilmektedir [23].

▲IAEA (2008) Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı yayınladığı teknik rapor, siklotron kaynaklı radyonüklidler için kullanılan parçacık demet enerjileri ve hedef geometrisi hakkında teknik bilgiler detaylı olarak sunulmuştur [24].

▲IAEA (2020) “Dünya Siklotron Rehberi” güncel verileri içeren etkileşimli ve çevrimiçi bir genel ağ sitesidir. Dünya genelinde ve Türkiye özelinde halihazırda faaliyet gösteren siklotronların teknik yapıları ve konumları hakkında bilgiler sunulmaktadır [25].

▲ Braccini S. (2016) kompakt medikal siklotronlar üzerine yaptığı çalışmasında ticari siklotronların teknik özellikleri incelenmiştir [26].

Bu çalışmadan derlenen Çizelge 1.2’de yaygın kullanımda bulunan ticari siklotronlar kullanıcı türü ve kullanım alanına göre sınıflandırması yapılarak demet enerjileri ve akım değerleri derlenmiştir.

**Çizelge 1.2 : Ticari siklotronların işlevsel sınıflandırması [26].**

Ana Kullanım Alanı	Tipik Kullanıcı	Proton En Fazla Enerji Büyüklüğü (MeV)	Demet En Fazla Akım Büyüklüğü ( $\mu$ A)
Proton Terapi	Hastane	200-250	10-3
Radyonüklid Üretimi ve Araştırma	Araştırma Lab.	70	500-700
SPECT Radyonüklid Üretimi	Araştırma Lab. ve Endüstri	30	500-1000
PET Radyonüklid Üretimi	Hastane ve Endüstri	15-25	100-400
PET Radyonüklid Üretimi	Hastane	10-12	50

Çizelge 1.2’de görüldüğü üzere PET teknolojilerinde kullanılan radyonüklidlerin üretimini yapan yaygın üretim tesisleri olarak sınıflandırılabilir hastane ve endüstriyel tesisler 30 MeV altı enerjilerde çalışmaktadır.

Yukarıda belirtilen TAEK, IAEA kaynaklarından ve Braccini S. (2016) çalışmasından alınan teknik bilgilerle derlenen Türkiye’de faal siklotronlar ve temel özellikleri Çizelge 1.3 ile verilmiştir.

Çizelge 1.2, Çizelge 1.3 ve siklotronlar doğrudan bu tezin konusu olmamakla beraber  $^{110m}$ In üretimi için araştırılan üretim rotalarının sonuçta ortaya koyacakları aktivite performanslarının kıyas edilmesi ve Türkiye’de ulaşılabilirliği açısından önemli ölçütler sunmuştur.

**Çizelge 1.3 : Türkiye’de faal siklotronlar. [23,24,25,26]**

Yer → Adet	Marka-Model	Demet Tepe Enerji Ve Akım Değeri
Ankara →1	IBA-Cyclone 30	30 MeV H @ 400µA 15 MeV D @ opsiyonel
Gebze→1	ACSI-TR 19	19 MeV H @ 300µA 9 MeV D @ 100µA
Ankara→1 İstanbul→2 Kocaeli/Gebze→3	IBA-Cyclone 18	18 MeV H @ 80µA 9 MeV D @ 65µA
Adana→1 Ankara→1 İstanbul→3	GE-PET Trace 890	16,5 MeV H @ 160 µA 8,4 MeV D @ 60 µA
İstanbul→3 İzmir→2	Siemens-Eclipse	11 MeV H @ 120-80 µA
Ankara→1	GE-Mini Trace	10 MeV H @ 50µA

#### 1.4 Hipotez

Enerjiye bağlı tesir kesiti verilerinden yola çıkarak, “Bethe Denklemi” ve “Yüklü Parçacık İle Aktivasyon Denklemlerinin” GNU-Octave kodlama dilinde yazılan bu çalışmaya özgü “Deterministik Bilgisayar Benzetim Programları” aracılığı ile “hedef materyal asgari kalınlığına bağlı makul ürün miktarı ve aktivite” değerlerinin yüksek tutarlılıkla belirlenmesi öngörülmektedir.



## 2. OLGUSAL ALTYAPI

### 2.1 Radyasyon Kaynakları

Radyasyon kaynakları hakkında bu genel bilgi radyonüklid üretim süreçlerinde kullanılan indükleyici kaynaklar ve ürünün özelliklerini açıklamaya yöneliktir.

Radyasyon kaynakları dört ana başlık altında toplanabilir [27].

(I) Hızlı Elektron Kaynakları (II) Yüklü Ağır Parçacık Kaynakları

(III) Elektromanyetik Radyasyon Kaynakları (IV) Nötron Kaynakları

#### 2.1.1 Hızlı elektron kaynakları

Üç grupta toplanır.

(I) Beta Bozunum Elektronları (II) İç Dönüşüm Betaları (III) Auger Elektronları

(I) Beta Bozunum Elektronları: Beta bozunumu yapan izotoplar hızlı elektron kaynağı olarak kullanılabilir. Çekirdek içerisinde bir nötronun bir protona bozunumu sırasında yüksek enerjili elektron salınır. Çekirdek içerisinde bir protonun bir nötrona bozunumu sırasında yüksek enerjili anti elektron parçacığı salınır. Kütlesi elektronla aynı olan bu hızlı parçacıklar sırasıyla “Beta Eksi Parçacığı” ( $\beta^-$ ) ve “Beta Artı Parçacığı” ( $\beta^+$ ) olarak adlandırılır.

(II) İç Dönüşüm Betaları: Çekirdek kararlı proton nötron kombinasyonuna sahip olmasına karşın uyarılmış bir enerji seviyesinde ise bu enerji fazlalığını iki olası şekilde atabilir.

Ya bir gama fotonu salacaktır ya da çekirdeğe yakın elektron kabuklarından bir elektrona bu enerjiyi transfer ederek elektron atomdan atılacaktır. İşte bu elektronlara iç dönüşüm elektronları (conversion electron - ce) denir.

İç dönüşüm elektronlarının enerjileri aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\text{Dönüşüm Elektron Enerjisi} = (\text{Çekirdek uyarılma Enerjisi}) - (\text{Elektron Kabuk Bağı Enerjisi}) \quad (2.1)$$

İç dönüşüm elektronlarına nötrino eşlik etmediği için sürekli bir enerji spektrumu göstermezler. Bu sayede karakteristik değerler alırlar.

(III) Auger Elektronu: Beta parçacıklarından ve dönüşüm elektronlarından daha düşük enerjili keV mertebesinde bir elektron ışınım formudur. Bu olgu daha çok küçük proton sayılı ve zayıf bağlanma enerjili atomlarda gözlemlenir.

Bir benzetme yapılırsa içten kaynaklanan bir tür fotoelektrik olay da denebilir.

K kabuğunda bir elektron boşluğu oluşmuş ise (mesela elektron yakalama veya dönüşüm elektronu atılmış ise süreci takiben) L kabuğundan bir başka elektron bu boşluğu doldurmak üzere inebilir. Burada beklenen olay L kabuğundan K kabuğuna inen elektronun fazla enerjisini foton olarak salmasıdır. Ancak bazen bu enerji farkını L kabuğundan bir diğer elektrona aktararak onu atomdan dışarı fırlatır. İşte bu elektrona “Auger Elektronu” denir. Hatta bazen bu süreç bir zincirleme olay dizisi şeklinde gerçekleşebilir. Yani; her bir alt kabuğa geçen elektron bir diğer elektrona enerjisini transfer ederek “Auger Elektronu”nun daha üst kabuklardan atılmasına neden olabilir.

### 2.1.2 Yüklü ağır parçacık kaynakları

İki grupta toplanır:

(I) Alfa Kaynakları (II) Kendiliğinden Filyon Kaynaklı Ağır Parçacıklar

(I) Alfa Kaynakları:  $Z=83$  Bizmutdan,  $Z=92$  Uranyuma kadar olan kararsız izotoplarda radyoaktif dönüşüm alfa parçacığı salınımı ile gerçekleşebilir. Özellikle doğal radyoaktif çekirdekler olan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve dönüşüm ürünleri ile insan yapımı radyoaktif çekirdek olan  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  kararlı Pb izotoplarına dönüşürken alfa ve beta ışınları gerçekleştirirler. Alfa parçacıklarının çekirdek potansiyel bariyerini aşması klasik fizik açısından olası görülmemektedir. Çünkü alfa parçacıklarının enerjisi 10 MeV altında iken alfa kaynağı çekirdeklerin potansiyel bariyerleri 30-40 MeV kadardır. Ancak alfalar  $10^{22}$  hertzlik frekanslarla çekirdek potansiyel bariyerini zorlarlar ve de Broglie Dalga Modeli uyarınca sonunda tünelleme gerçekleşir. Böylece bazı alfa parçacıkları çekirdek potansiyel bariyerini aşmış olur [28].

(II) Kendiliğinden Filyon Kaynaklı Ağır Parçacıklar: Herhangi bir ek enerji veya bir mermi parçacık tetiklemesine gereksinim olmadan gerçekleşen filyona kendiliğinden filyon denir. Bu olguda alfa ve beta yayınlayarak bozunum reaksiyonu kendiliğinden

fisyon ile istatistiksel bir yarış içerisinde. Kendiliğinden fisyon genelde iki ürün çekirdek ve 2 ila 4 nötron emisyonu ile gerçekleşir. Nötron kaynağı olarak kullanıma uygundur. Oluşan ürün çekirdeklerden birisi hafif diğeri ağır olacak şekilde asimetrik bölünme olasılığı diğeri olasılıklara baskındır.

### 2.1.3 Elektromanyetik radyasyon kaynakları

Altı yolla elektromanyetik radyasyon üretilebilir.

(I) Beta Bozunumunu Takip Eden Gamalar

(II) Nükleer Reaksiyonları Takip Eden Gamalar

(III) Yokuluş (Annihilation) Radyasyonu

(IV) Frenleme (Bremsstrahlung) Radyasyonu

(V) Karakteristik X Işını

(VI) Eşzamanlayıcı Hızlandırıcılarda Elektromanyetik Radyasyon Üretimi

(I) Beta Bozunumunu Takip Eden Gamalar: Çekirdek kararlı nötron ve proton sayısı kombinasyonuna sahip olduğu halde kararsız bir enerji düzeyinde olabilir. Bu durumda fazla enerjisini gama fotonu olarak yayınlayıp kararlı bir enerji seviyesine inebilir. Bu olgu daha çok bir ana radyonüklidin beta bozunumu ile bir ürün radyonüklidin uyarılmış enerji düzeyine bozunmasını takip eder.

(II) Nükleer Reaksiyonları Takip Eden Gamalar: Betaları takip eden gamalardan daha enerjistik gamalar elde etmenin bir yolu da nükleer reaksiyonları takip eden gama üretimi gerçekleştirmektir. Ayrıca ( $n, \gamma$ ) yani nötron yakalama reaksiyonları ile 9 MeV düzeyine kadar gama elde edilebilir.

(III) Yokuluş (Annihilation) Radyasyonu: Doğal koşullarda ölçülenme olasılığı yüksek olan yokuluş reaksiyonu elektron ve onun anti parçacığı pozitronun çarpışması sonucu oluşur. Bir parçacık ve o parçacığın anti parçacığı etkileşime girerse kütlelerinin tamamı enerjiye ve dolayısı ile gama fotonuna dönüşecektir.

Eğer bu parçacıklar elektron ve onun anti parçacığı pozitron ise reaksiyon denklemi ve yayımlanan gamaların asgari enerjisi; " $\beta^- + \beta^+ \rightarrow 2\gamma \Rightarrow E_\gamma = 0,511 \text{ MeV}$ " olacaktır.

(IV) Frenleme (Bremsstrahlung) Radyasyonu: Elektromanyetik teoriye uygun olarak ivmeli hareket yapan elektriksel yüklü parçacıklar elektromanyetik ışımaya yaparlar. Bu olgu sıklıkla elektronların frenlenmeleri sırasında kazandıkları negatif ivmelenmede

gözlemlendiği için frenleme (Bremsstrahlung) radyasyonu denmektedir. Frenleme radyasyonunu elde etmenin en kolay yolu bir elektron tabancasından elde edilen elektronların elektriksel potansiyel fark altında hızlandırılarak yoğun bir metale çarptırılmasıdır. Bu durumda metal yüzeyinde X ışını fotonları yayımlanacaktır. Elektronlar bir çekirdeğin yakınından geçerken en azından hız vektörlerinin yönü değişeceğinden yine bir ivmeli hareket yapmış olurlar ve yine elektromanyetik radyasyon yayarlar.

(V) Karakteristik X Işını: Atomda K kabuğu gibi alt kabuklardan bir elektronun yüksek seviyelere uyarılması veya iyonize olması sonucu kabukta boşluk oluşur. Bu boşluk üst seviyelerden inen elektronlarla doldurulurken ( $10^{-9}$  saniye sonra) kabuklar arasındaki enerji farkı X ışını fotonu olarak yayınlanır.

(VI) Eş Zamanlayıcı Hızlandırıcılarda Elektromanyetik Radyasyon Üretimi: Birkaç eV dan  $10^4$  eV mertebesine kadar elektromanyetik radyasyon üretimi gerçekleştirilebilir. Manyetik alanlar ve elektriksel alanların kombinasyonu ile parçacıkların kapalı yörüngede ivmeli hareket yapması sağlanırken neredeyse tek enerjili elektromanyetik ışınlar elde edilir. Burada elektronların 500 MeV mertebesinde hızlandırılmaları gerekmektedir.

#### 2.1.4 Nötron kaynakları

Dört yolla nötron üretilebilir; (I) Kendiliğinden Filyon Nötronları, (II) Radyo İzotop ( $\alpha,n$ ) Nötronları, (III) Foto Nötron ( $\gamma,n$ ) Kaynakları, (IV) Hızlandırılmış Yüklü Parçacıklarla Nötron Üretimi

(I) Kendiliğinden Filyon Nötronları: Çoğu transuranik element nötron kaynağı olarak kullanılabilir. En yaygın nötron kaynaklarından birisi  $^{252}_{98}\text{Cf}$  dur.

(II) Radyo İzotop ( $\alpha,n$ ) Nötronları: Alfa kaynağı izotopların kolay erişilebilir olması ( $\alpha,n$ ) kaynaklarını cazip hale getirmekte. Yüksek verimi ile tipik örnek alfa-berilyum ikilisidir. Bir berilyum hedef ile alfa kaynağı sıkı bir şekilde bir araya getirilerek verimli bir nötron üretici tasarlanabilir. Alfa parçacıklarının çoğunluğu hedefte enerjisini yitirir. 10000 de 1 alfa berilyum ile reaksiyon vererek nötron yayımına katkı sağlar.

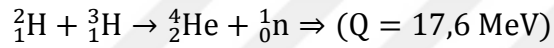
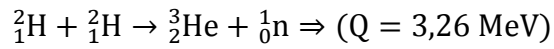
(III) Foto Nötron ( $\gamma,n$ ) Kaynakları: Foto nötron kaynaklarında hedef materyal olarak sadece  $^9_4\text{Be}$  ve  $^2_1\text{H}$  çekirdekleri pratikte kullanımdadır. Gamalar tek enerjili elde



edilebildiği için neredeyse tek enerjili nötronlar üretilebilmekte. Sapmalar sadece kinematik belirsizliklerden gelmektedir.

(IV) Hızlandırılmış Yüklü Parçacıklarla Nötron Üretimi: Hızlandırılmış proton, döteron, alfa, helion gibi parçacıklar hedef materyale çaptırılarak nötron eldesi olasıdır. Coulomb bariyerini aşmanın kolay olması için küçük  $Z$ 'li mermi çekirdek ve hedef çekirdek seçimi kullanılan enerji açısından avantaj sağlayacaktır.

En çok kullanılan çekirdek çiftlerinin nötron üretim reaksiyon denklemleri aşağıda verilmiştir. Döteronun aşağıdaki reaksiyonları gerçekleştirmesi için 100-300kV potansiyel yeterlidir.



## 2.2 Radyasyonun Madde İle Etkileşimi

Radyasyon, kütleli parçacıklar ve kütesiz fotonlardan oluşabilir. Radyasyonun insan hayatı için önem taşıyan özellikleri açısından bir ayırım; “İyonize Etmeyen Radyasyon” ve “İyonize Eden Radyasyon” olacaktır.

Biz burada “İyonize Eden Radyasyon” ile ilgilenmekteyiz. İyonize eden radyasyon bu çalışma için iki açıdan önemli. Birincisi; radyonüklid üretiminde enerjistik parçacıklarla hedef bombalanırken, öngörülerimiz radyasyon madde etkileşim süreçlerine olan hakimiyetimiz ölçüsünde tutarlı olacaktır. İkincisi; ürün radyonüklit kullanımı sırasında madde içerisine nüfuz eden radyasyon kaynağı olarak işlev kazanacağı için burada da öngörülebilir bir süreç yürütülmelidir.

Radyasyonun madde ile etkileşimi dört ana başlık altında incelenecek; (I) Hızlı Elektronların Madde İle Etkileşmesi, (II) Yüklü Ağır Parçacıkların Madde İle Etkileşmesi, (III) Elektromanyetik Radyasyonun Madde İle Etkileşmesi, (IV) Nötronun Madde İle Etkileşmesi [29].

### 2.2.1 Hızlı elektronların madde ile etkileşmesi

Elektronlar küçük kütleli oldukları için daha sık saçılmalara uğrayarak enerjilerini daha uzun ve karmaşık bir rotada yitirirler. Elektronlar diğer elektronlarla elektromanyetik etkileşime girerek esnek ve esnek olmayan saçılımlar yapar.  $\beta$  lar enerjilerinin büyük kısmını materyal içerisinde termal enerji olarak bırakırlar.

Pozitronlar ise bir elektronla karşılaştıklarında yok olarak 0,511 MeV ve üzerinde enerjide gama fotonlarına dönüşürler.

### 2.2.2 Yüklü ağır parçacıkların madde ile etkileşmesi

Yüklü ağır parçacıklar öncelikle atomun çekirdek çevresindeki enerji seviyelerinde bulunan elektronlarla Coulomb etkileşimi gerçekleştirir. Sık olmamakla beraber çekirdekle ve çekirdek yükleriyle de etkileşime girer. Bazı etkileşimlerde iyonizasyon gerçekleşmeyip elektronlar sadece üst enerji seviyelerine uyarılır.

### 2.2.3 Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesi

Dört olası etkileşim sözkonusudur; (I) Esnek saçılma, (II) Fotoelektrik absorpsiyon, (III) Compton saçılması, (IV) Çift Oluşumu

(I) Esnek Saçılma: Yüklü parçacık yaymaksızın gelen fotonla aynı enerjide bir foton maddeden salınır. Esnek saçılma olasılığı düşük enerjili fotonlar ve büyük Z'li atomlarda artar. Foton enerjisinin artması saçılma açısının küçülmesine neden olur.

(II) Fotoelektrik Absorpsiyon: Foton enerjisi atom kabuklarından bir elektronu uyarıp üst enerji seviyelerine taşıyabileceği gibi elektronu atomdan atabilir de. Her iki olası durumda da foton absorblanıp tüm enerjisini elektrona aktarır. İyonlaştırma durumunda; Eüger elektronu yayınlanma veya üst kabuklardan inen elektronlar tarafından X ışını yayınlanmasına neden olabilir. Bu ikincil radyasyonlar diğer elektronlarla etkileşim gerçekleştirebilir.

(III) Compton Saçılması: Hedeflenen foton ile absorblayıcı materyalin elektronları Compton etkileşimine girebilir. Compton elektron ve fotonu momentum ve enerji korunum yasalarına uygun açılarla saçılırlar. Gelen foton enerjisi çoğunlukla keV mertebelerinde ve üzerinde olacağı için eV mertebesindeki bağlanma enerjileri Compton saçılımında ihmal edilir. Z ile orantılı olarak elektron sayısı da arttığı için Compton saçılım olasılığı Z ile doğru orantılıdır.

(IV) Çift Oluşumu: En azından 1,022 MeV enerjili fotonların atom çekirdeği ile elektromanyetik etkileşimi sonucu fotonun tüm enerjisi elektron ve pozitron kütesinin yaratılmasına ve bu parçacıkların kinetik enerjisine dönüşecektir. Elektron ve pozitron eşit kütleli de olsalar bu süreçte pozitron ufak bir farkla elektrondan daha fazla kinetik enerji kazanır. Bu olgu çekirdek itkisi ile açıklanır. Basit reaksiyon denklemi aşağıdaki gibi modellenenir.  $\gamma \rightarrow e^- + e^+ \Rightarrow E_\gamma = mc^2(e^-) + mc^2(e^+)$

#### 2.2.4 Nötronun madde ile etkileşmesi

Yüksüz oldukları için Coulomb etkileşimine girmezler. Sadece çekirdek ile etkileşim olasılıkları vardır. İkincil radyasyonları hemen her daim yüklü ağır parçacık radyasyonudur. Etkileşim olasılığı nötron enerjisine ve hedef materyalin özelliklerine bağlıdır. Nötronlar enerjilerine göre Termal Nötron ( $E_n \approx 0,025$  eV), Epitermal Nötron ( $1\text{eV} < E_n < 1$  keV), Hızlı Nötronlar ( $E_n > 0,1$  MeV) olarak üç ana sınıfa ayrılırken etkileşimleri enerjilerine göre iki kategoride incelenebilir.

(I) Yavaş (termal-epitermal) Nötronların Madde İle Etkileşimi: En olası etkileşim esnek çarpışmadır. Çekirdek ile etkileşime girdikçe kinetik enerji yitirir.  $(n,\gamma)$ ,  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$ ,  $(n,\text{fisyon})$ ,  $(n,n)$  reaksiyonlarını gerçekleştirebilir. Bunlar içerisinde sık görülen reaksiyon ışınal nötron kapma (*radiative neutron-capture*)  $(n,\gamma)$  dir.

(II) Hızlı Nötronların Madde İle Etkileşimi: Hızlı nötronların çekirdek ile etkileşim olasılığı daha düşüktür. Ancak küçük Z'li atomlarda etkileşime girme olasılığı daha fazla olabilmektedir. Hızlı nötronların çekirdek ile esnek olmayan etkileşiminde çekirdek uyarılmış enerji düzeyine çıkacaktır.

Parçacık etkileşimi dikkate alınarak nötron madde etkileşimleri aşağıdaki gibi beş kategoride incelenebilir [30].

(I) Elastik Saçılma: Nötron çekirdek ile etkileşimi sonucu kinetik enerjisinin belirli bir kesrini çekirdeğe aktararak belirli açılarda saçılır ve yön değiştirir. Burada çekirdek enerji seviyesi değişmezken atom termal enerji kazanır, toplam enerji korunur.

(II) Elastik Olmayan Saçılma: Nötron çekirdek tarafından yutulduktan kısa bir süre sonra çekirdek daha düşük enerjide bir diğer nötron salar. Ancak çekirdek artık uyarılmış bir enerji seviyesinde bulunduğu için akabinde bir de gama salarak eski kararlı seviyeye döner. [Genel Form:  $n + \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A+1}{Z}X^* \rightarrow (\frac{A}{Z}X + \gamma) + n'$ ]

(III) Nötron Kapma: Nötron çekirdek tarafından yutulur ve yeni çekirdek gama ışınımı ile kararlı enerji seviyesine iner. [Genel Form:  $n + \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A+1}{Z}X + \gamma$ ]

(IV) Nükleer Parçalanma: Nötron çekirdek tarafından yutulduğunda çekirdek kararsızlaşır ve birçok küçük bileşene dağılır. [Örnek Reaksiyon:  $n + {}^{16}\text{O} \rightarrow 3\alpha + 2p + 3n$ ]

(V) Nükleer Fisyon:  $Z \geq 92$  olan çekirdeklerde yavaş veya hızlı nötron bombardımanı ile çekirdek bölünmesi tetiklenebilmektedir. [Örnek reaksiyon:  ${}^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow {}^{89}_{36}\text{K} + {}^{144}_{56}\text{Ba} + 3n + (E \sim 180 \text{ MeV})$  ]

## 2.3 Nükleer Etkileşimler

Yeterince kinetik enerjisi olan alfa, proton, döteron, nötron gibi mermi parçacıklar (incident particle, projectile) veya gama fotonlarının hedef madde (target) çekirdekleri ile etkileşime girmesi sonucu oluşan reaksiyonlara “Nükleer Etkileşimler“ denir.

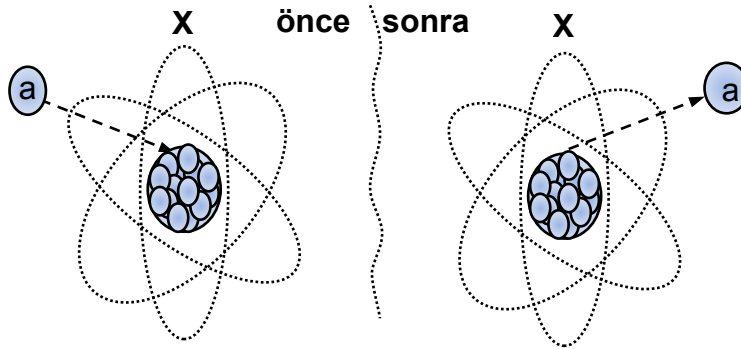
Dört tür nükleer etkileşim tanımlayabiliriz [31];

(I) Saçılma Reaksiyonları, (II) Vur çıkar Reaksiyonları

(III) Transfer Reaksiyonları, (IV) Absorbsiyon Reaksiyonları

### 2.3.1 Saçılma reaksiyonları

Belirli kinetik enerjilerle hedefe yönlendirilen parçacık çekirdekle elastik saçılma etkileşimi yaparsa enerjisinin bir kısmını çekirdeğe kinetik enerji olarak aktarır ve yön değiştirerek yoluna devam eder. Reaksiyona girmez, çekirdeği uyarılmış seviyeye taşımaz. Eğer inelastik saçılma etkileşimi yapar ancak çekirdek yapısını değiştirmeden saçılırsa enerjisinin bir kısmını çekirdeğe transfer ederek çekirdeği uyarılmış bir enerji düzeyine çıkarabilir. Bu durumda çekirdek yeniden kararlı hale dönerken sahip olduğu fazla enerjiyi gama radyasyonu olarak dışarı salar. Nükleer etkileşimlerde saçılma reaksiyonlarını temsil eden bir model Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



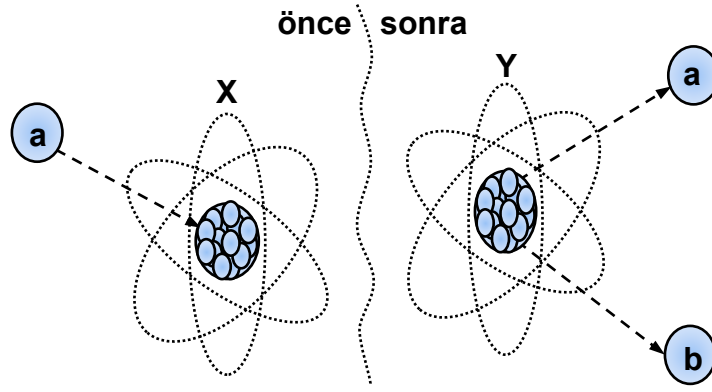
Şekil 2.1 : Nükleer Etkileşimde “Saçılma Reaksiyon Modeli”.

Elastik saçılma genel formu;  $a+X \rightarrow a+X$  veya  $X(a,a)X$  ile modellenebilir.

İnelastik saçılma genel formu;  $a+X \rightarrow a+X^*$  veya  $X(a,a)X^*$  ile modellenebilir.

### 2.3.2 Vur çıkar reaksiyonları

Yüksek enerjili bazı parçacıklar direkt çekirdekle etkileşip içerden bir nükleonu da kendisi ile birlikte çekirdekten atabilir. Nükleer etkileşimlerde vur çıkar reaksiyonlarını temsil eden bir model Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.2 :** Nükleer Etkileşimde “Vur Çıkar Reaksiyon Modeli”.

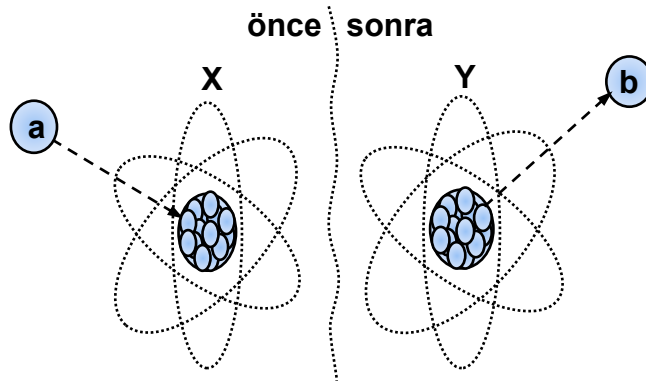
Mermi parçacık hedef çekirdekten nötron çıkardıysa çekirdek başka bir izotopa dönüşmüştür:  $a+X \rightarrow a+n+X'$

Mermi parçacık hedef çekirdekten proton çıkardıysa çekirdek başka elemente dönüşmüştür:  $a+X \rightarrow a+p+Y$

### 2.3.3 Transfer reaksiyonları

Gelen parçacık veya parçacıklar çekirdekte kalıp dışarı farklı bir nükleon atıldıysa bu reaksiyonlara transfer reaksiyonu denir. Burada gelen parçacık çekirdeğe transfer olmuştur.

Nükleer etkileşimlerde transfer reaksiyonlarını temsil eden bir model Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



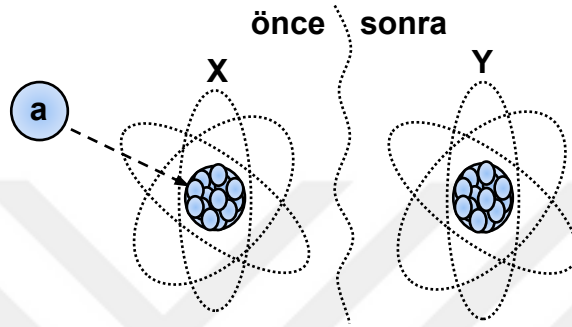
**Şekil 2.3 :** Nükleer Etkileşimde “Transfer Reaksiyon Modeli.”

Mermi parçacık hedef çekirdekte sadece nötron sayısını değiştirirse çekirdek başka bir izotopa dönüşmüştür:  $a+X \rightarrow n+X'$

Mermi parçacık hedef çekirdekte sadece proton sayısını değiştirirse çekirdek başka elemente dönüşmüştür:  $a+X \rightarrow p+Y$

### 2.3.4 Absorbsiyon reaksiyonları

Gelen parçacık çekirdek tarafından yutulabilir. Bu durumda bir “bileşik çekirdek” oluşur. Bileşik çekirdek büyük olasılıkla kararsız olacağı için kısa bir süre sonra içerisinde bir veya birkaç nükleon atarak kararlı başka çekirdeklere dönüşür. Nükleer etkileşimlerde absorpsiyon reaksiyonlarını temsil eden bir model Şekil 2.4’de gösterilmektedir. Nükleer fisyon, nükleer parçalanma gibi reaksiyonların başlangıç evreleri bu gruptadır.



Şekil 2.4 : Nükleer etkileşimde “Absorpsiyon Reaksiyon Modeli”.

Bilindik birkaç örnek reaksiyon Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Nükleer etkileşimde “Absorpsiyon Reaksiyonlarına” örnekler.

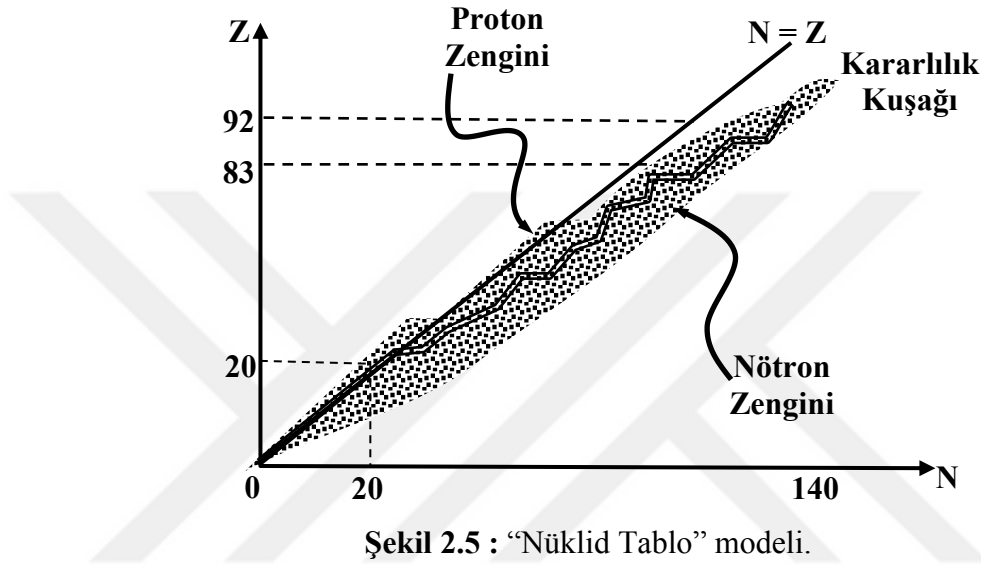
$^{63}\text{Cu} + ^1\text{H} \rightarrow ^{64}\text{Zn}^* \rightarrow ^{63}\text{Zn} + \text{n}$	$^{60}\text{Ni} + ^4\text{He} \rightarrow ^{64}\text{Zn}^* \rightarrow ^{63}\text{Zn} + \text{n}$
$^{63}\text{Cu} + ^1\text{H} \rightarrow ^{64}\text{Zn}^* \rightarrow ^{62}\text{Cu} + \text{n} + \text{p}$	$^{60}\text{Ni} + ^4\text{He} \rightarrow ^{64}\text{Zn}^* \rightarrow ^{62}\text{Cu} + \text{n} + \text{p}$
$^{63}\text{Cu} + ^1\text{H} \rightarrow ^{64}\text{Zn}^* \rightarrow ^{62}\text{Zn} + 2\text{n}$	$^{60}\text{Ni} + ^4\text{He} \rightarrow ^{64}\text{Zn}^* \rightarrow ^{62}\text{Zn} + 2\text{n}$

### 2.4 Radyoaktif Dönüşüm

Kozmolojik süreçlerin sonucu oluşan doğal elementlerin kararlı yapıları belirli proton (Z) ve nötron (N) sayısının kombinasyonlarının bir arada varolması ile sağlanır. Z=1 hidrojen Z=20 kalsiyuma kadar olan kararlı elementlerde proton sayısı nötron sayısına eşittir. Z=20 kalsiyumdan Z=83 Bizmuta kadar devam eden elementlerin kararlı izotoplarında nötron sayısı proton sayısından fazladır. Nötron sayıları proton sayılarından daha fazla olmasına rağmen Z=83 Bizmutdan, Z=92 Uranyuma kadar olan elementlerin çoğu radyoaktivite gösterirler.

Kararlı (stabil) 280 çekirdeğin %60’ında Z ve N:çift sayıdadır, %20’si çift-Z, tek-N çekirdek olup diğer %20’si ise tek-Z, çift-N çekirdekten oluşmaktadır. Yani çift sayıda

proton veya çift sayıdaki nötron olan doğal çekirdekler daha kararlıdır. Nötron Sayısının (N), Proton Sayısına (Z) değişiminin bir çizelgesi olan “Nüklid Çizelgede” doğal elementlerin kararlı izotoplarının bulunduğu noktaların oluşturduğu hat kararlılık kuşağı olarak adlandırılır. Kararlılık kuşağının dışında bulunan izotoplar farklı aktivite ve yarı ömür değerleri ile bozunarak kararlı izotoplara dönüşme sürecini gerçekleştirirler. “Nüklid Tablo” için basitleştirilmiş bir model çizim Şekil 2.5’de verilmiştir [32].



Şekil 2.5 : “Nüklid Tablo” modeli.

Kararlı hale dönüşüm bir radyoaktif süreçle mümkün olduğu için bu süreç “Radyoaktif Dönüşüm” denmektedir. Radyoaktif dönüşüm 10 ana yolla olabilmektedir. Çizelge 2.2’de radyoaktif dönüşüm olasılıkları özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 : Radyoaktif dönüşüm olasılıkları.

Radyoaktif Dönüşüm Türü	Örnek Reaksiyon Denklemi
1 Beta (-) Bozunumu	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta^- + \bar{\nu}_e$
2 Beta (+) Bozunumu	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \beta^+ + \nu_e$
3 Elektron Yakalama (EC)	$e^- + {}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \gamma + \nu_e$
4 Gama Bozunumu	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$
5 İç Geçiş	${}^{203}_{80}\text{Hg} \rightarrow \beta^- + ({}^{203m}_{81}\text{Tl} \rightarrow {}^{203}_{81}\text{Tl} + \gamma)$
6 İç Dönüşüm (CE)	${}^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow \beta^- + ({}^{137m}_{56}\text{Ba} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + e^- (\text{kabuk elektronu}))$
7 Alfa Bozunumu	${}^A_ZX \rightarrow {}^A-4_{Z-2}Y + {}^4_2\alpha$
8 Kendiliğinden Fisyon	${}^{252}_{98}\text{Cf} \rightarrow {}^{108}_{44}\text{Ru} + {}^{140}_{54}\text{Xe} + 4({}^1_0n)$
9 Nötron Işınması	${}^A_ZX \rightarrow {}^A-1_ZY + {}^1_0n$
10 Proton Işınması	${}^A_ZX \rightarrow {}^A-1_{Z-1}Y + {}^1_1p$





### 3. MATEMATİKSEL ALTYAPI

#### 3.1 Nükleer Etkileşim Reaksiyonu Ve Reaksiyon Eşik Enerjisi

Bir nükleer etkileşimin gerçekleşebilmesi için reaksiyon eşik enerjisinin üzerindeki parçacıklarla hedef materyal ışınlanmalıdır. Dolayısı ile öncelikle “mermi” parçacıkların asgari enerji düzeyini belirlemek için bir yöntem gereksinim vardır. Reaksiyonda alınan veya verilen enerji miktarı  $Q$  ile gösterilmektedir ve bu büyüklüğe reaksiyon  $Q$  değeri denmektedir.  $Q$  pozitif ise ekzotermik reaksiyon,  $Q$  negatif ise endotermik reaksiyon olacaktır [33].

“ $X$ ” hedef çekirdek, “ $Y$ ” ürün çekirdek, “ $a$ ” ve “ $b$ ” ise sisteme giren ve çıkan parçacıkları temsil etmek üzere nükleer etkileşim reaksiyonu genel olarak  $X + a \rightarrow Y + b + Q$  ile ifade edilirse, reaksiyon  $Q$  değeri iki yol ile hesaplanabilir.

Birinci yol denklem (3.1)’de olduğu gibi; reaksiyona giren, çıkan, parçacık ve atomların kütle enerji eşdeğerleri arasındaki farka bakılabilir.

$$Q = (M_X + M_a)c^2 - (M_Y + M_b)c^2 \quad (3.1)$$

İkinci yol denklem (3.2)’de olduğu gibi; reaksiyona giren, çıkan, parçacık ve atomların kinetik enerjileri arasındaki farka bakılabilir.

$$Q = (K_Y + K_b) - (K_X + K_a) \quad (3.2)$$

$Q$  değerinin hesaplanması için gereken değişkenler altta tanımlandı.

$M_X$  = hedef çekirdeğin kütle enerji eşdeğeri ( $\text{MeV}/c^2$ )

$M_a$  = gelen mermi parçacığının kütle enerji eşdeğeri ( $\text{MeV}/c^2$ )

$M_Y$  = çıkan ürün çekirdeğin kütle enerji eşdeğeri ( $\text{MeV}/c^2$ )

$M_b$  = çıkan parçacığının kütle enerji eşdeğeri ( $\text{MeV}/c^2$ )

$K_X$  = hedef çekirdeğin kinetik enerjisi ( $\text{MeV}$ )

$K_a$  = gelen mermi parçacığının kinetik enerjisi ( $\text{MeV}$ )

$K_Y =$  çıkan ürün çekirdeğin kinetik enerjisi (MeV)

$K_b =$  çıkan parçacığın kinetik enerjisi (MeV)

Eğer reaksiyon Q değeri negatif ise bu endotermik reaksiyonun gerçekleşebilmesi için gelen mermi parçacığın (a) enerjisinin en küçük değeri için bir hesap yapılması gerekir. Bu en küçük enerji, reaksiyon eşik (threshold) enerjisi olarak adlandırılmakta ve  $E_{Th}$  ile gösterilmektedir. Reaksiyon eşik enerjisi üstte açıklanan değişkenler kullanılarak denklem (3.3) ile hesaplanabilir.

$$E_{Th} = -Q \left( \frac{M_X + M_a}{M_X} \right) \quad (3.3)$$

### 3.2 Durdurma Gücü Ve Erim

Yüklü parçacıklar materyal içerisinde enerjisini dört yolla yitirir [33];

- I) Coulomb Etkileşimi.
- II) Frenleme (Bremsstrahlung) Radyasyonu.
- III) Chrenkov Radyasyonu.
- IV) Nükleer Etkileşime Girerek.

Parçacık ışığın ortam hızına ulaşmadığı sürece Chrenkov Radyasyonu gerçekleşmeyecektir. Burada nükleer etkileşimler ile Coulomb Etkileşimi arasında bir kıyas yapılması gerekir.

Atom içerisinde elektronlar çekirdeği saran kabuklarda bulunurlar. Dolayısı ile elektronlarla etkileşim olasılığı atomun kesiti ile ilişkilendirilirken nükleer etkileşim olasılığı çekirdek kesiti ile ilişkilendirilebilir. Bu yaklaşım yüklü parçacığın, çekirdekle nükleer etkileşim olasılığı ile elektronlarla Coulomb etkileşim olasılığı arasında bir kıyas yapılmasını sağlar. Bu oran denklem (3.4)'de hesaplanmıştır.

$$\frac{\text{elektronlarla etkileşim olasılığı}}{\text{çekirdekle etkileşim olasılığı}} \approx \frac{\text{atom kesiti}}{\text{çekirdek kesiti}} = \frac{R_{atom}^2}{R_{çekirdek}^2} = \frac{(10^{-10} \text{ m})^2}{(10^{-14} \text{ m})^2} = 10^8 \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'de görüldüğü üzere yüklü bir parçacığın elektronlarla etkileşim olasılığı, çekirdek ile etkileşim olasılığından yüz milyon kat daha olası. Bu durum aynı zamanda çekirdek kaynaklı frenleme (Bremsstrahlung) radyasyonu olasılığının da

elektron bulutu ile etkileşim olasılığının yanında düşük kalacağını göstermektedir. Elektronlarla etkileşim iyonizasyon veya uyarma yoluyla yüklü parçacığın hedef materyalde enerji yitimi ve sonunda durması ile sonuçlanacaktır.

İyonizasyon, uyarma ve elektromanyetik etkileşim ile enerji kaybına bağlı durdurma gücü hesabı “Bethe Formülü” ile yapılabilir. “Bethe Formülü” materyal içerisinde birim mesafe (dx) başına yitirilen ortalama enerji (dE) büyüklüğünü verir [33].

Proton, döteron, trityum ve alfalar için durdurma gücü formülü denklem (3.5)’de gösterilmektedir.

$$\frac{dE}{dx} \left( \frac{\text{MeV}}{\text{m}} \right) = 4\pi r_0^2 Z^2 \frac{m_e c^2}{\beta^2} N_V Z \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right] \quad (3.5)$$

Elektronlar için durdurma gücü formülü; denklem (3.6)’de gösterilmektedir.

$$\frac{dE}{dx} \left( \frac{\text{MeV}}{\text{m}} \right) = 4\pi r_0^2 \frac{m_e c^2}{\beta^2} N_V Z \left\{ \ln \left( \frac{\beta \gamma \sqrt{\gamma - 1}}{I} m_e c^2 \right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left[ \frac{(\gamma - 1)^2}{8} + 1 - (\gamma^2 + 2\gamma - 1) \ln 2 \right] \right\} \quad (3.6)$$

Pozitronlar için durdurma gücü formülü; denklem (3.7)’de gösterilmektedir.

$$\frac{dE}{dx} \left( \frac{\text{MeV}}{\text{m}} \right) = 4\pi r_0^2 \frac{m_e c^2}{\beta^2} N_V Z \left\{ \ln \left( \frac{\beta \gamma \sqrt{\gamma - 1}}{I} m_e c^2 \right) - \frac{\beta^2}{24} \left[ 23 + \frac{14}{\gamma + 1} + \frac{10}{(\gamma + 1)^2} + \frac{4}{(\gamma + 1)^3} \right] + \frac{\ln 2}{2} \right\} \quad (3.7)$$

Denklem (3.5), (3.6), (3.7)’de kullanılan değişkenlerin açıklamaları altta sıralanmıştır.

$\pi = 3,14$  : Pi Sayısı.

$r_0 = e^2/m_e c^2 = 2,818 \times 10^{-15} \text{m}$  : klasik elektron yarıçapı. (e = elektron yükü.)

$m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$  : elektron durgun kütle enerjisi.

$\gamma = (E_K + m_p c^2) / m_p c^2 = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$  : Lorentz dönüşüm katsayısı.

$E_K = (\gamma - 1) m_p c^2$  : mermi parçacık kinetik enerjisi (MeV).

$m_p =$  mermi parçacık durgun kütle enerjisi (MeV).

$\beta = v/c$  : Parçacık hızının ışık hızına oranı.

$c = 2,997930 \times 10^8$  m/s : Vakumda ışık hızı.

$N_V = \rho \cdot N_A / A = \text{atom/m}^3$  : Parçacığın yol aldığı materyalin birim hacimde atom sayısı.

$A =$  Hedef materyal bağlı atomik kütle (akb).

$Z =$  Hedef materyal atom numarası.  $z =$  Mermi parçacık proton sayısı (yükü).

$I =$  Materyalin ortalama uyarılma potansiyeli (eV).

$Z \geq 13 \Rightarrow I \text{ (eV)} \approx (9,76 + 58,8 \cdot Z^{-1,19}) \cdot Z$

$Z < 13 \Rightarrow I \text{ (eV)} \approx 12 \cdot Z + 7$

Bileşiklerde Bethe için etkin değerler denklem (3.8)'deki gibi alınabilir [34].

$$A_{\text{etkin}} = \sum n_i \cdot A_i \Rightarrow \ln(I_{\text{etkin}}) = \frac{\sum n_i \cdot Z_i \cdot \ln(I_i)}{Z_{\text{etkin}} = \sum n_i \cdot Z_i} \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de bileşikteki elementlerin bağlı sayısı “n” ile gösterilmiştir.

Yüklü parçacıklar bir materyal içerisinde yol alırken çekirdek ve baskın olarak elektronlarla etkileşerek enerjisini belirli sayıda etkileşimin sonunda tamamen yitirir. “E” enerjisine sahip bir parçacığın bir materyal içerisinde birim mesafede yitirdiği enerji fonksiyonu “S” denklem (3.9)'daki diferansiyel denklemle ifade edilebilir [35].

$$S(E) = - \frac{dE}{dx} \quad (3.9)$$

Materyale doğru ivmelendirilen parçacıkların en büyük enerji değeri “ $E_{\text{MAX}}$ ” ise parçacığın materyal içerisinde tüm enerjisini yitirdiği toplam yol enerji fonksiyonu denklem (3.10)'daki integrasyon ile ifade edilebilir. Parçacığın tüm enerjisini kaybetmeden materyal içerisinde alabileceği yolun en büyük değerine o parçacığın o materyaldeki “CSDA Erim”i (CSDA Range) denir.  $R_{\text{CSDA}}$  ile gösterilir.

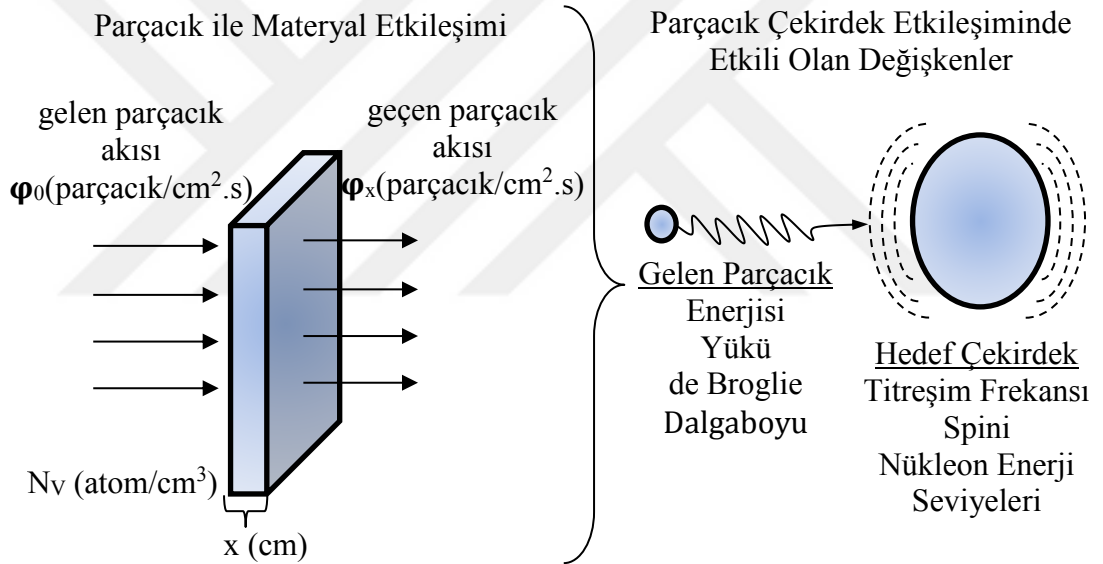
$$R_{\text{CSDA}} = \int_0^{E_{\text{MAX}}} \frac{1}{S(E)} dE \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'daki integralin bilgisayarda kodlayarak sayısal çözümü mümkündür. Buradaki “dE” birim enerji yitimini ifade eder. “Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı” kaynaklarında önerildiği üzere bu çalışmada birim adımda enerji yitimi  $dE = 0.1$  MeV olarak alınmıştır [35].

### 3.3 Reaksiyon Tesir Kesiti Ve Demet Akı Değişimi

Yüklü parçacıkların hızlandırılarak hedef materyalin bombardımanı sonucu çekirdek etkileşimi gerçekleşmesi olasılıksal bir olgudur. Çekirdekle etkileşim olasılığı mermi parçacığın yükü, kütlesi, enerjisi ve parçacığa eşlik eden “de Broglie Dalgaboyu” ile bağlantılıdır. Ayrıca hedefteki çekirdeklerin titreşim frekansı, spini ve çekirdek nükleonlarının enerji seviyeleri ile bağlantılıdır. Tüm bu etkilerin sonucunda doğan etkileşim olasılığına “Reaksiyon Tesir Kesiti” denmektedir.

Şekil 3.1’de  $\phi_0$  (parçacık/cm<sup>2</sup>.s) akısı ile parçacık bombardımanına maruz bırakılan atom yoğunluğu  $N_V$  (atom/cm<sup>3</sup>) olan ve  $x$  (cm) kalınlığındaki bir hedef materyalin etkileşim süreci modellenmiştir [36]. Burada hedef materyalle etkileşime girmeden sistemi terk eden mermi parçacık akısı  $\phi_x$  (parçacık/cm<sup>2</sup>.s) ifade edildi.



Şekil 3.1 : Nükleer etkileşim modellemesi.

Reaksiyon tesir kesiti sembolü  $\sigma$  ile gösterilerek ve birimi m<sup>2</sup> veya barn (10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>) olarak kullanılır. Denklem (3.11) ile tesir kesitinin deneysel yollarla eldesi için bir çözümleme yapılmıştır. Birim mesafede akının azalışı, dolayısı ile toplam etkileşim oranı bize etkileşim olasılığı yani toplam tesir kesiti hakkında veri sağlayacaktır. Birim mesafede akı değişimini veren diferansiyel denklem (3.11)’deki gibi olacaktır.

$$-\frac{d\phi}{dx} = \phi \cdot \sigma \cdot N_V \quad (3.11)$$

Denklem (3.11) çözüm için düzenlenirse çözüm bize denklem (3.12)’yi verir.

$$\sigma = \frac{-1}{N_V \cdot x} \ln \frac{\varphi_x}{\varphi_0} \quad (3.12)$$

Deneyisel verilerden sistemi terk eden parçacık akı verisi alınabilirse toplam tesir kesiti bilgisi denklem (3.12) ile elde edilebilir. Denklem (3.11)'in bir diğer çözümü denklem (3.13) ile x kalınlıklı hedeften geçen parçacık demetinin çıkış akısı hesaplanabilir.

$$\varphi_x = \varphi_0 e^{-\sigma \cdot x \cdot N_V} \quad (3.13)$$

### 3.4 Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon

X hedef atomları ile etkileşen a parçacıkları Y ürün çekirdeğini ve b parçacığını üretiyor olsun. Eğer Y ürün çekirdeği kararsız ise Z çekirdeğine ve c parçacığına bozunuyor olsun.

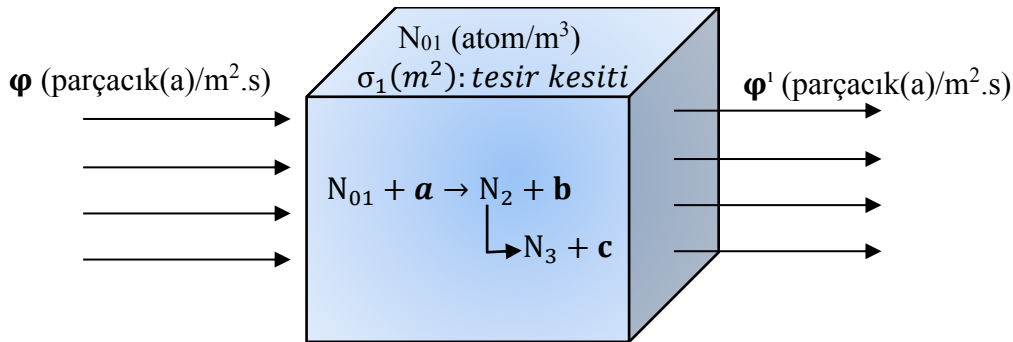
Gelen parçacıkların (a) hedef atoma (X) birim zamanda birim yüzeye ulaşan miktarı  $\varphi$  akısı ile gösterilecek. Gelen parçacıkların (a) hedef atomla (X) nükleer etkileşim tesir kesiti  $\sigma_1$  ile gösterilirken, gelen parçacıkların (a) ürün atomla (Y) nükleer etkileşim tesir kesiti  $\sigma_2$  ile gösterilmiştir.

Hedef atom X'in başlangıçtaki sayısı  $N_{01}$ , X'ten geriye kalan sayısı  $N_1$ , oluşan Y ürün çekirdeklerinin sayısı  $N_2$  ve eğer Y de kararsız ise Y'nin bozunduğu ikincil ürün çekirdek Z'nin sayısı  $N_3$  ile ifade edilirken. Y'nin bozunum sabiti  $\lambda_2$  ile gösterilmiştir.

Bu durumda reaksiyon denklemi denklem (3.14)'deki gibi ifade edilebilir;



Etkileşim sürecini modelleyen gösterim Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Parçacık ile hedef materyal etkileşim modellemesi.

Hedef materyal yeterince ince ise akının materyal içerisinde sabit büyüklükte olduğu varsayılabilir. Ancak bu çalışmada akı değişimi de hesaplamalarda dikkate alınmıştır.  $N_1$ 'in zamana bağlı tükenimi “t” zamanı “N” atom sayısına bağlı olarak denklem (3.15)'deki gibi ifade edilebilir [37].

$$-\frac{dN}{dt} = \varphi\sigma_1 N \quad (3.15)$$

Denklem (3.15) “t” süre sonra hedef materyalin atom miktarını veren  $N_1(t)$  fonksiyonunu elde etmek üzere çözüldüğünde denklem (3.16) elde edilir.

$$N_1(t) = N_{01} e^{-\varphi\sigma_1 t} \quad (3.16)$$

Bu durumda  $N_2$  üretim fonksiyonu denklem (3.17)'deki gibi ifade edilebilir.

$$N_2(t) = \varphi\sigma_1 N_1(t) \quad (3.17)$$

$N_2$  tüketim hızı fonksiyonu ise denklem (3.18)'deki gibi ifade edilebilir.

$$N_2 = \lambda_2 N_2 + \varphi\sigma_2 N_2 \quad (3.18)$$

Denklem (3.17) ve denklem (3.18)'in farkı, yani üretim ve tükenim fonksiyonlarının farkı  $N_2$ 'nin zamana bağlı değişimini denklem (3.19) verecektir.

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \varphi\sigma_1 N_1(t) - (\lambda_2 N_2 + \varphi\sigma_2 N_2) \quad (3.19)$$

Bu diferansiyelin integrallenecek çözülmesi için her iki tarafında integrasyon çarpanı ile çarpılması gerekiyor. Bu çarpım denklem (3.20)'de gösterilmiştir.

$$\left[ \frac{dN_2(t)}{dt} = \varphi\sigma_1 (N_{01} e^{-\varphi\sigma_1 t}) - (\lambda_2 + \varphi\sigma_2) N_2 \right] e^{(\lambda_2 + \varphi\sigma_2)t} \quad (3.20)$$

$$\int (\lambda_2 + \varphi\sigma_2) e^{(\lambda_2 + \varphi\sigma_2)t} N_2(t) dt + e^{(\lambda_2 + \varphi\sigma_2)t} dN_2(t) = \int_0^t \varphi\sigma_1 N_{01} e^{(\lambda_2 + \varphi(\sigma_2 - \sigma_1))t} dt$$

Denklem (3.20)'nin çözümü denklem (3.21)'de son halini almıştır.

$$N_2(t) = \frac{\varphi\sigma_1 N_{01}}{\lambda_2 + \varphi(\sigma_2 - \sigma_1)} (e^{-\varphi\sigma_1 t} - e^{-(\lambda_2 + \varphi\sigma_2)t}) \quad (3.21)$$

$N_2$ 'nin zamana bağılı değişim fonksiyonu nihai formu, denklem (3.21)'de elde edilmiştir. Ürün yarı ömrü ana materyalin ışınlanma süresinden en az 10 kat büyükse  $N_2$ 'nin bozunarak tükenimi ihmal edilebilir ( $\lambda_2=0$ ). Bu koşulla  $N_2$ 'nin zamana bağılı değişimi denklem (3.22)'deki gibi elde edilir.

$$N_2(t) = \frac{\sigma_1 N_{01}}{\sigma_2 - \sigma_1} (e^{-\varphi\sigma_1 t} - e^{-\varphi\sigma_2 t}) \quad (3.22)$$

Mermi parçacık ürün etkileşim tesir kesiti ana materyale nazaran çok küçükse  $N_2$ 'nin nükleer aktivitesi sonucu dönüşerek tükenimi ihmal edilebilir ( $\sigma_2=0$ ). Bu iki koşul ( $\sigma_2=0$ ,  $\lambda_2=0$ ) birlikte etkili olursa  $N_2$ 'nin zamana bağılı değişimi denklem (3.23) gibi elde edilir.

$$N_2(t) = N_{01}(1 - e^{-\varphi\sigma_1 t}) \quad (3.23)$$

Hedef materyal miktarı sabit ve ürün radyonüklidin nükleer etkileşim yoluyla tükenimi ihmal edildiği özel koşullar ( $N_{01}=sbt$  ve  $\sigma_2=0$ ) altında %3'den az hata ile denklem (3.24) doğru değer verir.

$$N_2(t) = \frac{\varphi\sigma_1 N_{01}}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.24)$$

Bu çalışmada kullanılan hedef ve ürün çiftinde ürün yarı ömrü ışınlanma süresinden kısa olup ortaya çıkan ürün miktarı ana çekirdeğe nazaran oldukça küçük bir kesirdir.

Dolayısı ile; mermi parçacık ile ürünün nükleer etkileşimi sonucu dönüşerek tükenimi ihmal edilebilir ( $\sigma_2=0$ ). Hedef materyal miktarı  $N_{01}$  zamana bağılı değişimi, ana radyonüklidin nükleer etkileşim yoluyla tükenimi nedeniyle dikkate alındı. Sonuç olarak bu çalışmaya özgü  $N_2$ 'nin zamana bağılı değişimi denklem (3.25)'deki gibi elde edildi.

$$N_2(t) = \frac{\varphi\sigma_1 N_{01}}{\lambda_2 - \varphi\sigma_1} (e^{-\varphi\sigma_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.25)$$

Bu çalışmaya özgü ürün aktivitesi ise; denklem (3.26)'da ifade edildi.

$$A_2(t) = \lambda_2 \left[ \frac{\varphi\sigma_1 N_{01}}{\lambda_2 - \varphi\sigma_1} (e^{-\varphi\sigma_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \right] \quad (3.26)$$



Burada; " $\frac{dx \cdot N_{01}}{x}$ " ifadesi ile parçacık demetinin hedef materyal içerisinde "dx" adımları ve "dE" enerji yitimleri ile ilerlediği varsayıldı. Bu ifade ile herbir "dx" adımında üretilen radyonüklid miktarı elde edilebilecektir. Bu yaklaşım denklem (3.25) ve denklem (3.26) denklemlerinde kullanılarak denklem (3.27) ve denklem (3.28) elde edildi.

$$N_2(E, t) = \int_0^E \left[ \int_0^t \frac{\varphi(x) \sigma_1(x) \frac{dx \cdot N_{01}}{x}}{\lambda_2 - \varphi(x) \sigma_1(x)} (e^{-\varphi(x) \sigma_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \cdot \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} \cdot dt \right] dE \quad (3.27)$$

$$A_2(E, t) = \int_0^E \left[ \int_0^t \lambda_2 \frac{\varphi(x) \sigma_1(x) \frac{dx \cdot N_{01}}{x}}{\lambda_2 - \varphi(x) \sigma_1(x)} (e^{-\varphi(x) \sigma_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \cdot \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} \cdot dt \right] dE \quad (3.28)$$

Burada " $\varphi(x)$ " ifadesi "dx" adımlarının herbirinde gerçekleşen nükleer etkileşimler sonucu mermi parçacık demet akısındaki son değeri ifade etmektedir. Demet, hedef materyalde ilerlerken akısındaki değişimin de hesaba katılabilmesi için denklem (3.13)'deki ifade burada denklemlere dahil edilmiştir.

Böylece parçacık demetinin, herbir enerji değerine karşılık gelen bir hedef çekirdek grubu ve dolayısı ile birim adımda üretilen parçacık miktarı hesaplanabilmekte. Denklem (3.27), denklem (3.28) ve denklem (3.13)'ün GNU-Octave'da kodlanması yoluyla benzetim programı oluşturulması için denklemler denklem (3.29), (3.30) ve (3.31)'de olduğu gibi yeniden düzenlendi.

$$N_2(x, t) = \sum_{i=0}^{\frac{E}{dE}} \left[ \sum_{dt=0}^t \frac{\varphi(x_i) \cdot \sigma_1(dx_i) \cdot \frac{dx_i \cdot N_{01}}{x}}{\lambda_2 - \varphi(x_i) \cdot \sigma_1(dx_i)} (e^{-\varphi(x_i) \sigma_1 dt} - e^{-\lambda_2 dt}) \right] \quad (3.29)$$

Denklem (3.29) "dt" ışınlanma süresinde, materyaldeki "dx" adımlarının toplamı sonunda üretilen radyonüklid sayısını vermektedir.

$$A_2(x, t) = \sum_{i=0}^{\frac{E}{dE}} \left[ \sum_{dt=0}^t \lambda_2 \frac{\varphi(x_i) \cdot \sigma_1(dx_i) \cdot \frac{dx_i \cdot N_{01}}{x}}{\lambda_2 - \varphi(x_i) \cdot \sigma_1(dx_i)} (e^{-\varphi(x_i) \sigma_1 dt} - e^{-\lambda_2 dt}) \right] \quad (3.30)$$

Denklem (3.30) “dt” ışınlama süresinde, materyaldeki “dx” adımlarının toplamı sonunda oluşan aktivite büyüklüğünü vermektedir.

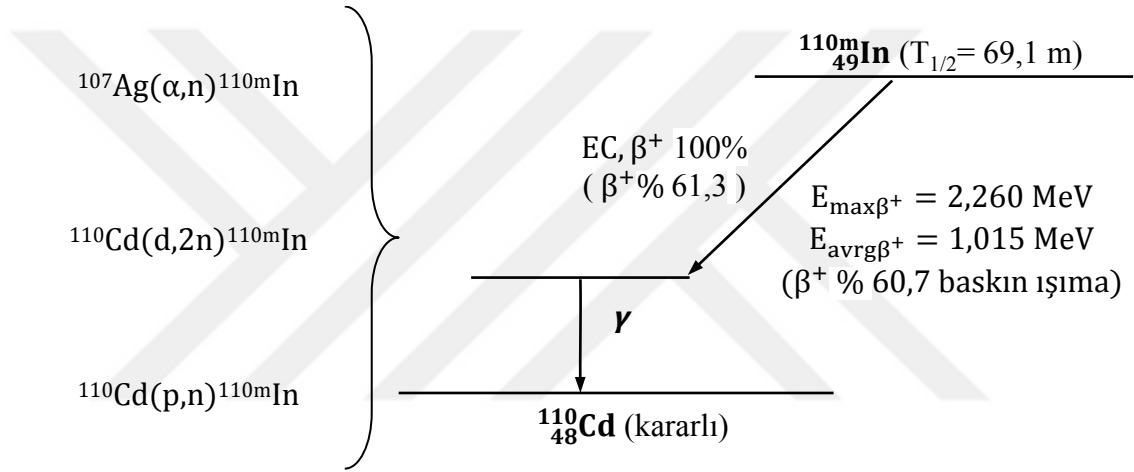
$$\varphi(x) = \varphi_0 \cdot \exp \left[ - \sum_{i=1}^{i=\frac{E}{dE}} \sigma(x_i) \cdot dx_i \cdot N_V \right] \quad (3.31)$$

Denklem (3.31) “ $\varphi_0$ ” başlangıç akısı ile hedefe gönderilen parçacık demetinin, hedef materyaldeki “dx” adımlarının toplamında geriye kalan parçacık demet akısının büyüklüğünü vermektedir.



#### 4. ÇALIŞMA VE BULGULAR

Alfa, döteron ve protonların hızlandırılarak hedef materyal atom ve çekirdek yapısı ile etkileşim gerçekleştirilmesi sonucu “Hızlandırılmış Yüklü Parçacıklar İle Nükleer Aktivasyon” hedeflenmektedir. Bu çalışmada pozitron kaynağı radyonüklid üretimine yönelik üç doğrudan reaksiyon seçildi. Bu reaksiyonlar ve sonunda elde edilebilecek pozitron emisyonuna dair bozunum şeması Şekil 4.1’de modellendi.



Şekil 4.1 : Ürün radyonüklid bozunum şeması [38].

$^{110m}\text{In}$ 'un elde edilme süreci bu çalışmanın ilgili olduğu reaksiyonlar çerçevesinde  $^{107}\text{Ag}$  ve  $^{110}\text{Cd}$ 'un iyon bombardımanına maruz bırakılması ile başlıyor. Ancak bu etkileşimin gerçekleşebilmesi için bazı ön koşulların sağlanması gerekiyor.

Bölüm 4.1’de bu konu üzerinde çalışıldı ve nükleer reaksiyon için “Reaksiyon Eşik Enerjisi” (Threshold Energy) tayin edildi.

Bölüm 4.2’de makul aktivite verimini hedefleyen, makul demet enerjileri kullanılarak azami ürün radyonüklid eldesini mümkün kılan asgari hedef materyal kalınlıkları tayin edildi.

Bölüm 4.3’de ilk bölümlerde elde edilmiş olan demet enerjileri ve hedef kalınlıklarının kullanılması durumunda ürün radyonüklidin aktivasyonu incelendi. Burada farklı ışınlanma sürelerine ve birim demet akımına bağlı elde edilebilecek ürün çekirdek sayısı ve aktivite büyüklükleri hesaplandı.

#### 4.1 Seçili Reaksiyonlarda Reaksiyon Q Değeri Ve Asgari Demet Enerjisi

Nükleer etkileşim reaksiyonlarının gerçekleşebilmesi için gereken nicel koşullar Bölüm 3.1’de açıklandı. Endotermik “Nükleer Etkileşim” reaksiyonlarının gerçekleşebilmesi için reaksiyon enerjisinin mutlak değerinin belirli bir miktar üzerinde kinetik enerjiye sahip parçacıklarla bombardıman edilmesi gerekmektedir. Bu enerji “Reaksiyon Eşik Enerjisi” olarak adlandırılmaktaydı. Adı geçen değerlerin nasıl hesaplanacağı Bölüm 3.1’de matematiksel modeller ve ilgili değişkenler açıklandığı için burada seçili reaksiyonların “GNU-Octave Kodlamaları” üzerinden yapılan hesaplamaların sonuçları verildi ve değerlendirildi. Seçili reaksiyonlarımızda “Reaksiyon Q Değeri” için denklem (3.1) kullanıldı. “Reaksiyon Eşik Enerjisi” değerlerine ulaşmak için denklem (3.3) kullanıldı. Yapılan hesaplamaların sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan değerler [39,40] ve “GNU-Octave Kodları” ise Ek.A’da bulunmaktadır.

**Çizelge 4.1 :** Seçili reaksiyonlar için “Q” değeri ve “Eşik Enerjisi” değerleri.

$^{110m}\text{In}$ Eldesi İçin Olası Nükleer Reaksiyonlar	Hesaplanan Reaksiyon Q Değeri (MeV)	Hesaplanan Reaksiyon Eşik Enerjisi (MeV)
$^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$	$Q_{\alpha} = -7,5833$	$E_{\text{Th}(\alpha)} = 7,8672$
$^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$	$Q_d = -6,8847$	$E_{\text{Th}(d)} = 7,0108$
$^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$	$Q_p = -4,6603$	$E_{\text{Th}(p)} = 4,7030$

Çizelge 4.1’de “Reaksiyon Q Değer”leri göstermektedir ki reaksiyonlar endotermiktir ve asgari 5 ila 8 MeV aralığında enerjili mermi parçacıklara gereksinim duymaktadır. “Nükleer Etkileşim” ve “Nükleer Aktivasyon” nun sağlanması için parçacık demetinin enerjisi “Reaksiyon Eşik Enerjisi” değerlerinin yeterince üzerinde olmalıdır. Enerjistik iyon demeti hedef içerisinde elektromanyetik etkileşimler sonucu enerjisini yitirerek ilerlemektedir. Bu nedenle asgari demet enerjisinin üzerinde makul demet enerji değerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Makul demet enerjileri nükleer etkileşim olasılıklarının en fazla olduğu enerjilere bakılarak Bölüm 4.2’de araştırılmıştır.

## 4.2 Seçili Reaksiyonlarda Makul Enerji Ve Hedef Materyal Kalınlık Hesabı

Siklotronlar (Cyclotron) çeşitli radyofarmasötiklerin üretimi amacıyla ve/veya araştırma amacıyla kullanılmaktadırlar. IAEA verilerine göre Türkiye’de kullanımda olan siklotronlar sadece döteron ve proton hızlandırmada kullanılabilirler. Bu hızlandırıcıların demet enerjileri 8→30 MeV enerji aralığında değişiklik göstermektedir (Çizelge 1.3). İşte bu hızlandırıcıların demet enerjileri kullanılacak nükleer reaksiyon rotasını ve üst enerji sınırlarını belirlemektedir.

Nükleer etkileşim reaksiyonlarının alt enerji sınırları ise reaksiyon eşik enerjisi tarafından belirlenmektedir. Bu çalışmada olası bir pozitron kaynağı olan <sup>110m</sup>In için doğrudan üretime olanak tanıyan üç nükleer etkileşim reaksiyonu seçildi. Bu reaksiyonlara ait eşik enerjisi hesaplamaları Bölüm 4.1’de yapılarak Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Bu reaksiyon rotalarının uygulanabilirliğinin gösterilebilmesi için parçacık demet enerji aralığına bağlı asgari kalınlık değerlerinin belirlenmesi bu bölümün konusu olmuştur. Bu bölümde seçili reaksiyonlar için iki aşamalı bir analiz süreci takip edildi.

Birincil olarak; enerjiye bağlı tesir kesiti verileri “IAEA Yüklü Parçacık Tesir Kesitleri Veritabanı”ndan temin edildi [41]. Enerjiye bağlı tesir kesiti değerleri GNU-Octave ile grafiğe dönüştürüldü. Burada tesir kesitinin tepe yaptığı enerji değeri tespit edildi ve tepe noktasının, öncesi ve sonrasındaki enerji bölgesi radyonüklid üretiminde en yüksek ürün verimliliği sağlayan bölgeler olarak değerlendirildi. Burada parçacık demet enerjisinin alt sınırı “reaksiyon eşik enerjisi” ve “etkileşim olasılıkları” dikkate alınarak belirlenirken, üst sınırı teknik olanaklarla ilgili makul bir değer alındı.

İkincil olarak; denklem (3.5) ve denklem (3.10)’da verilmiş olan “Bethe Formülü” ve “Erim Denklemi” seçili reaksiyonlar için GNU-Octave’da kodlanarak yazılan “Deterministik Benzetim Programı” ile belirlenen enerji aralığında sözkonusu reaksiyona ait mermi parçacığın ne kadarlık “enerji bırakım erimi” yani “CSDA Erim”e sahip olduğu hesaplatıldı. “Bethe Formülü” ve “Erim Denklemi” için yazılan benzetimin GNU-Octave kodları Ek.B’de mevcuttur.

Hedef materyal içerisinde mermi parçacık demetinin en fazla nükleer etkileşim olasılığının bulunduğu, enerji aralığı ve etkili tesir kesitlerinin sınırlamaları altında hesaplanan erim değerleri hedef materyal asgari kalınlığını hesaplamada kullanıldı.

#### 4.2.1 $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon enerji aralığı ve hedef kalınlığı

$^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu için başlangıç veri grubu olan enerjiye bağlı tesir kesiti verileri kullanılarak çizdirilen grafik Şekil 4.2’de gösterildi.

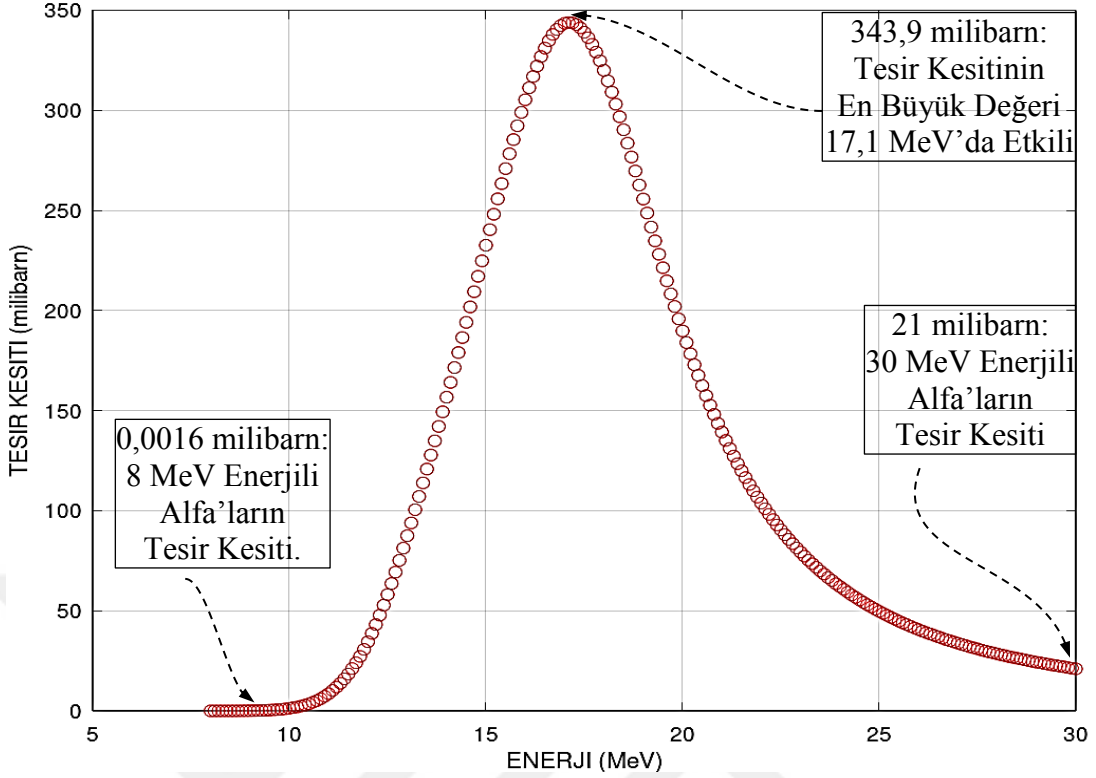
Şekil 4.2’de alfa mermi parçacık demetinin alt ve üst enerji limitleri belirtildi. Endüstriyel veya araştırma amaçlı kullanımda bulunan siklotronların, alfa için enerji çalışma aralıklarına bakıldı, tesir kesitinin etkili değerleri göz önünde bulunduruldu ve enerji üst sınırı 30 MeV olarak tercih edildi (Çizelge 1.3). Alfa parçacıklarının nükleer etkileşim reaksiyonu verebildikleri ve dolayısı ile ürün radyonüklid  $^{110\text{m}}\text{In}$  üretimi gerçekleştirebildikleri alt sınır olan reaksiyon eşik enerjisi  $E_{\text{Th}(\alpha)} = 7,8672 \text{ MeV}$  olarak Bölüm 4.1’de belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Şekil 4.3’de öncelikle 30 MeV enerjili alfa demetinin  $^{107}\text{Ag}$  içerisinde “CSDA Erim”i 155,2 mikrometre olarak elde edildi.  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonunda 30 MeV enerjili hızlandırılmış alfa demetinin erim grafiği üzerinde 30→8 MeV aralığında enerji yitimi sonucu hedef materyal içerisinde alabileceği yol ve dolayısı ile asgari hedef kalınlığı hesaplandı. 30→8 MeV enerji aralığında alfa demetinin  $^{107}\text{Ag}$  içerisinde ilerleyerek nükleer etkileşime devam edebilmesi için gereken asgari hedef kalınlığı  $x = 128,5 \mu\text{m}$  olmalıdır. Şekil 4.3’de sunulan verilerin eldesi için “Bethe Formülü” ve “Erim Denklemi” kodlanarak yazılan benzetim programında kullanılan değişkenlerin değerleri Çizelge 4.2’de bulunmaktadır.

**Çizelge 4.2 :**  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu için Bethe formülünde kullanılan değerler [39, 40].

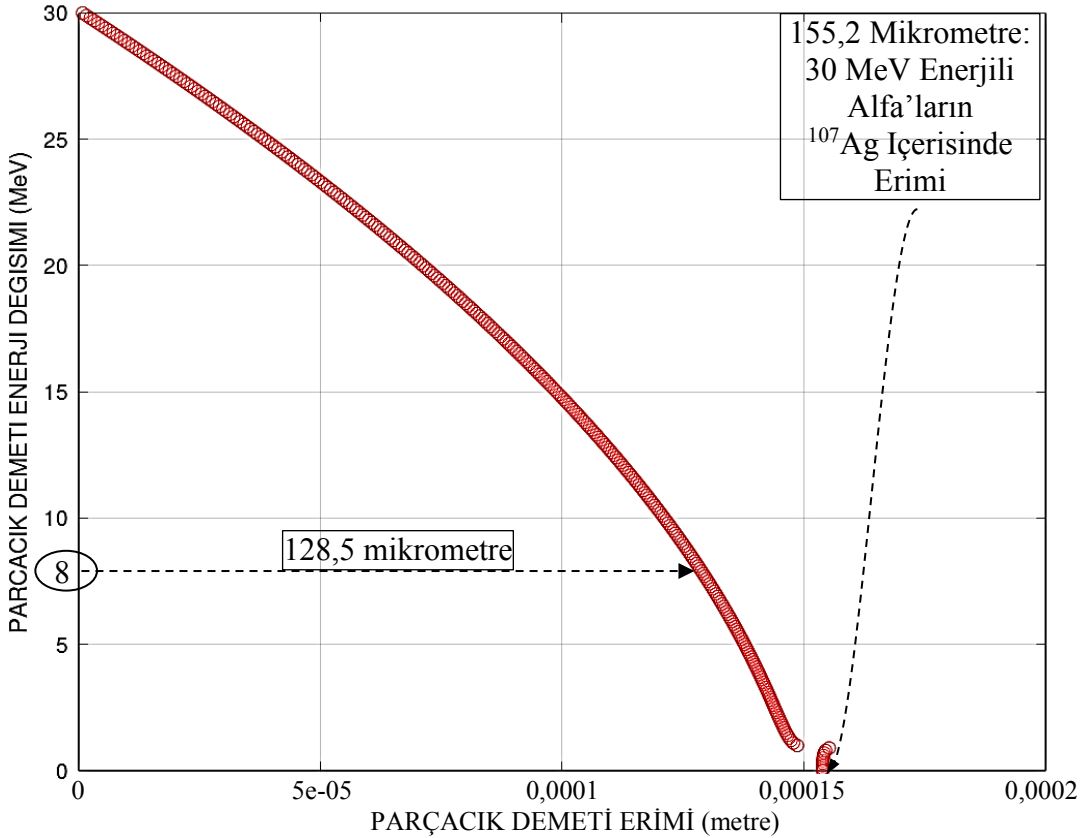
İlgili değişken (sembol)	Kullanılan değer	Kullanılan birim
Işık hızı (c)	$3,10^8$	m/s
Elektron kutlesi enerji esdegeri ( $m_e$ )	0,511	MeV
Avagadro sayısı ( $N_a$ )	$6,022.10^{26}$	Nükleon(akb)/kg
Klasik elektron yarıçapı ( $r_e$ )	$2,818.10^{-15}$	metre
Mermi parçacık “ $\alpha$ ” yükü (z)	2	Elementer yük
Mermi parçacık “ $\alpha$ ” kütle enerji degeri ( $m_p$ )	3727,3794066	MeV
Hedef materyal $^{107}\text{Ag}$ atom numarası (Z)	47	---
Hedef materyal $^{107}\text{Ag}$ atomik ağırlık (A)	106,905091	akb
Hedef materyal $^{107}\text{Ag}$ yoğunluğu ( $\rho$ )	10473	kg/m <sup>3</sup>

### 107Ag(4He,n)110In REAKSIYONU



Şekil 4.2 :  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesit grafiği.

### 107Ag(4He,n)110In REAKSIYONU



Şekil 4.3 :  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu etkin tesir kesiti için erim ve asgari kalınlık.

#### 4.2.2 $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon enerji aralığı ve hedef kalınlığı

$^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu için başlangıç veri grubu olan enerjiye bağlı tesir kesiti verileri kullanılarak çizdirilen grafik Şekil 4.4’de gösterildi.

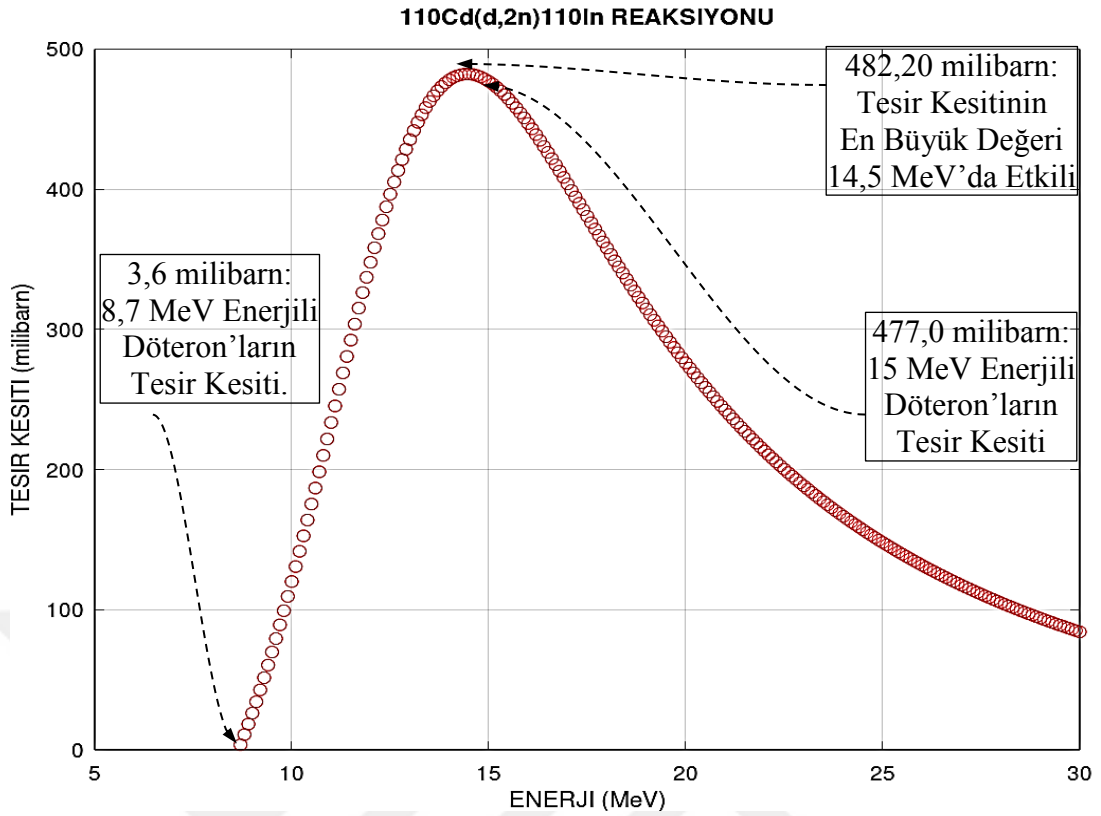
Şekil 4.4’de döteron mermi parçacık demetinin alt ve üst enerji limitleri belirtildi. Endüstriyel veya araştırma amaçlı kullanımda bulunan siklotronların, döteronlar için enerji çalışma aralıklarına bakıldı, tesir kesitinin etkili değerleri göz önünde bulunduruldu ve enerji üst sınırı 15 MeV olarak tercih edildi (Çizelge 1.3). Döteron parçacıklarının nükleer etkileşim reaksiyonu verebildikleri ve dolayısı ile ürün radyonüklid  $^{110\text{m}}\text{In}$  üretimi gerçekleştirebildikleri alt sınır olan reaksiyon eşik enerjisi  $E_{\text{Th}(d)} = 7,0108$  MeV olarak Bölüm 4.1’de belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Şekil 4.5’de öncelikle 30 MeV enerjili döteronların  $^{110}\text{Cd}$  içerisinde 1152,2 mikrometre olarak hesaplanan “CSDA Erim” gösterildi.  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonunda 30 MeV enerjili hızlandırılmış döteron demetinin erim grafiği üzerinde  $15 \rightarrow 8,7$  MeV aralığında enerji yitimi sonucu hedef materyal içerisinde alabileceği yol ve dolayısı ile asgari hedef kalınlığı hesaplandı. Bu enerji aralığında döteron demetinin  $^{110}\text{Cd}$  içerisinde ilerleyerek nükleer etkileşime devam edebilmesi için gereken asgari hedef kalınlığı  $x = 997,26 - 788,76 = 208,5$   $\mu\text{m}$  olmalıdır. Şekil 4.5’de sunulan verilerin eldesi için “Bethe Formülü” ve “Erim Denklemi” kodlanarak yazılan benzetim programında kullanılan değişkenlerin değerleri Çizelge 4.3’de bulunmaktadır.

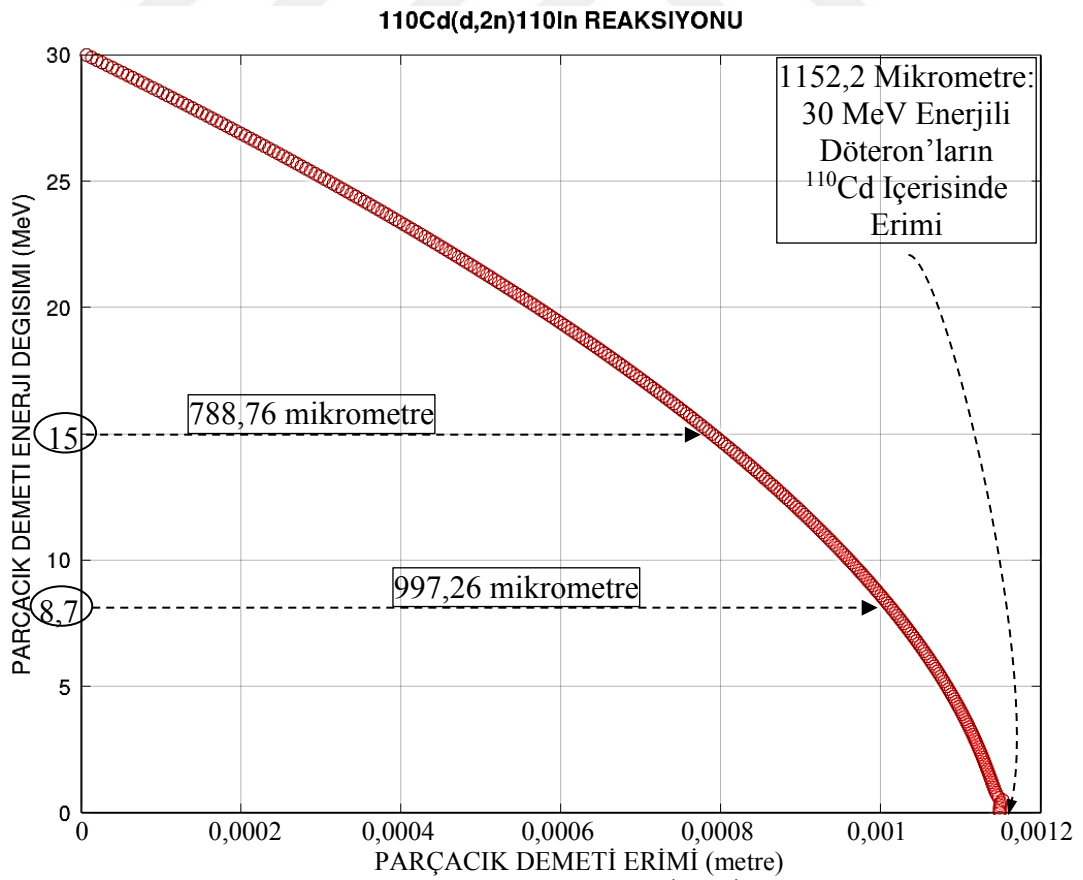
**Çizelge 4.3 :**  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu için Bethe formülünde kullanılan değerler [39,40].

İlgili değişken (sembol)	Kullanılan değer	Kullanılan birim
Işık hızı (c)	$3 \cdot 10^8$	m/s
Elektron kütlesi enerji eşdeğeri ( $m_e$ )	0,511	MeV
Avagadro sayısı ( $N_a$ )	$6,022 \cdot 10^{26}$	Nükleon(akb)/kg
Klasik elektron yarıçapı ( $r_e$ )	$2,818 \cdot 10^{-15}$	metre
Mermi “d” parçacık yükü (z)	1	Elementer yük
Mermi parçacık “d” kütle enerji değeri ( $m_p$ )	1875,612942	MeV
Hedef materyal $^{110}\text{Cd}$ atom numarası (Z)	48	---
Hedef materyal $^{110}\text{Cd}$ atomik ağırlık (A)	109,903007	akb
Hedef materyal $^{110}\text{Cd}$ yoğunluğu ( $\rho$ )	8642	$\text{kg/m}^3$





Şekil 4.4 :  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesit grafiği.



Şekil 4.5 :  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu etkin tesir kesiti için erim ve asgari kalınlık.

### 4.2.3 $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyon enerji aralığı ve hedef kalınlığı

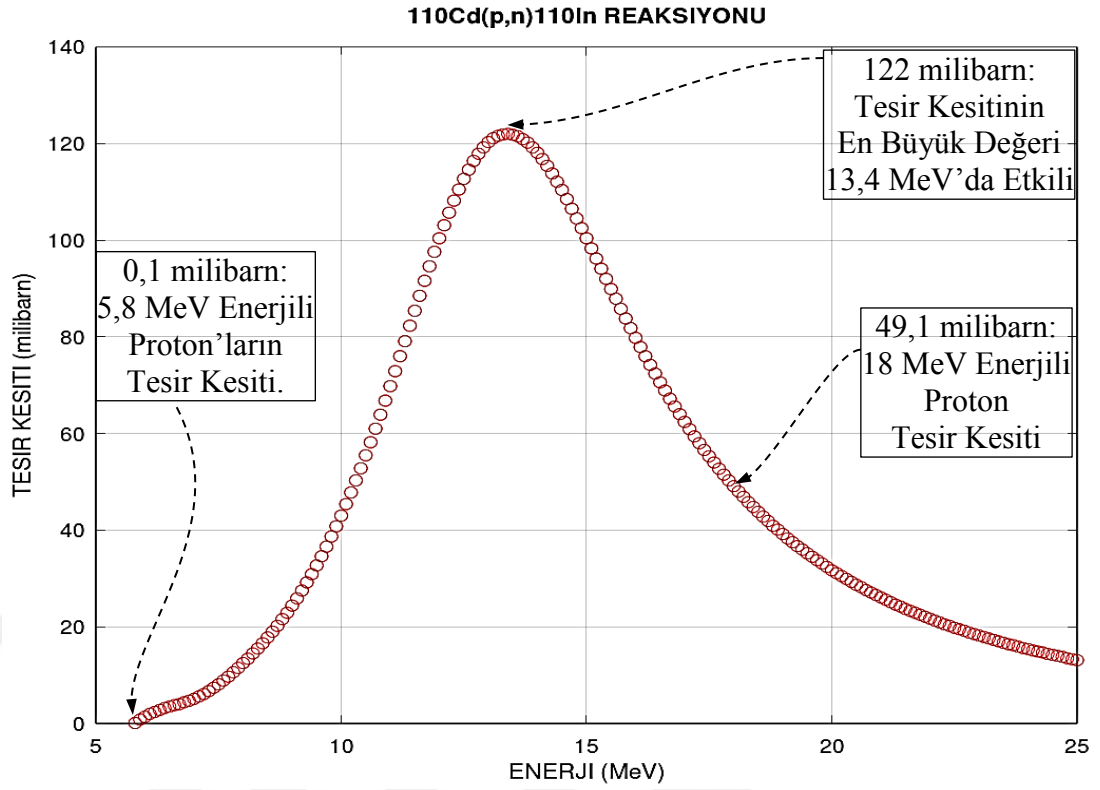
$^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu için başlangıç veri grubu olan enerjiye bağlı tesir kesiti verileri kullanılarak çizdirilen grafik Şekil 4.6’da gösterildi.

Şekil 4.6’da proton mermi parçacık demetinin alt ve üst enerji limitleri belirtildi. Endüstriyel veya araştırma amaçlı kullanımda bulunan siklotronların, protonlar için enerji çalışma aralıklarına bakıldı, tesir kesitinin etkili değerleri göz önünde bulunduruldu ve enerji üst sınırı 18 MeV olarak tercih edildi (Çizelge 1.3). Proton parçacıklarının nükleer etkileşim reaksiyonu verebildikleri ve dolayısı ile ürün radyonüklid  $^{110\text{m}}\text{In}$  üretimi gerçekleştirebildikleri alt sınır olan reaksiyon eşik enerjisi  $E_{\text{Th}(p)} = 4,7030$  MeV olarak Bölüm 4.1’de belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

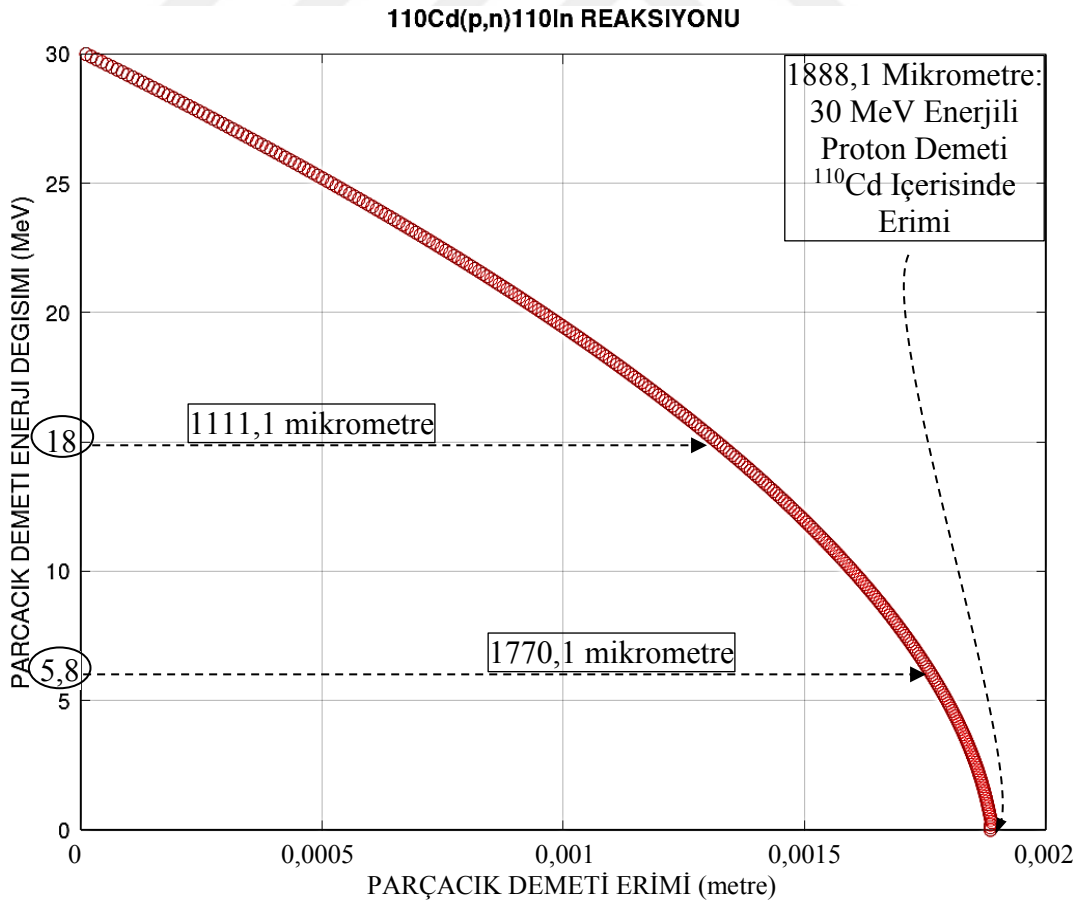
Şekil 4.7’de öncelikle 30 MeV enerjili proton  $^{110}\text{Cd}$  içerisinde “CSDA Erim”i 1888,1 mikrometre olarak elde edildi.  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonunda 30 MeV enerjili hızlandırılmış proton demetinin erim grafiği üzerinde  $18 \rightarrow 5,8$  MeV aralığında enerji yitimi sonucu hedef materyal içerisinde alabileceği yol ve dolayısı ile asgari hedef kalınlığı hesaplandı. Bu enerji aralığında proton demetinin  $^{110}\text{Cd}$  içerisinde ilerleyerek nükleer etkileşime devam edebilmesi için gereken asgari hedef kalınlığı  $x = 1770,1 - 1111,1 = 659,05 \mu\text{m}$  olmalıdır. Şekil 4.7’de sunulan verilerin eldesi için “Bethe Formülü” ve “Erim Denklemi” kodlanarak yazılan benzetim programında kullanılan değişkenlerin değerleri Çizelge 4.4’de bulunmaktadır.

**Çizelge 4.4 :**  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu için Bethe formülünde kullanılan değerler [39,40].

İlgili değişken (sembol)	Kullanılan değer	Kullanılan birim
Işık hızı (c)	$3.10^8$	m/s
Elektron kütlesi enerji eşdeğeri ( $m_e$ )	0,511	MeV
Avagadro sayısı ( $N_a$ )	$6,022.10^{26}$	Nükleon(akb)/kg
Klasik elektron yarıçapı ( $r_e$ )	$2,818.10^{-15}$	metre
Mermi parçacık “p” yükü (z)	1	Elementer yük
Mermi parçacık “p” kütle enerji değeri ( $m_p$ )	938,272088	MeV
Hedef materyal $^{110}\text{Cd}$ atom numarası (Z)	48	---
Hedef materyal $^{110}\text{Cd}$ atomik ağırlık (A)	109,903007	akb
Hedef materyal $^{110}\text{Cd}$ yoğunluğu ( $\rho$ )	8642	kg/m <sup>3</sup>



Şekil 4.6 :  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110}\text{In}$  Reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesiti grafiği.



Şekil 4.7 :  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110}\text{In}$  Reaksiyonu etkin tesir kesiti için erim ve asgari kalınlık.

### 4.3 Seçili Reaksiyonlarda Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon

Bölüm 4.2’de elde edilen, hedef içerisinde parçacığın birim enerji yitimi “dE”ye karşılık “dx” ilerleme adımları “Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon” denklemlerine entegre edilerek, oluşan  $^{110m}\text{In}$  çekirdeklerinin hedef içerisinde derinliğe bağlı dağılımı hesaplatıldı. Işınlanma süresine bağlı elde edilebilecek  $^{110m}\text{In}$  miktarı ve aktivite değerlerinin hesaplanması için denklem (3.29), (3.30), (3.31) kullanıldı. Diferansiyel formdaki bu denklemler “Deterministik Benzetim Programı” oluşturmak üzere GNU-Octave ile kodlandı. Kodlar Ek.C’de verildi.

Mermi parçacık demetinin makul enerji değerleri ve hedef asgari kalınlığı bölüm 4.2’de belirlenen büyüklüklerde kullanıldı. Böylece bir önceki bölümde öngörülen enerji büyüklükleri ve asgari kalınlık sayesinde makul sürede, makul miktar ve aktivitede ürün radyonüklid çekirdeği elde edilmesi hedeflendi. Bu bölümde veriler iki grup olarak sunuldu.

Birinci veri grubu: Mermi parçacık demetinin geliş doğrultusu boyunca hedef materyal içerisinde derinliğe bağlı olarak oluşan ürün radyonüklid  $^{110m}\text{In}$  çekirdeklerinin miktarı hesaplandı ve grafik üzerinde görselleştirildi. Bu veri grubu sayesinde hedef materyalin hangi kesitlerinde daha fazla aktivite tespit edilebileceği öngörülebilmektedir.

İkinci veri grubu: “GBq/ $\mu\text{A}$ ” birimi ile verilen “Kalın Hedef Ürün” (TTY) değerlerini elde etmek üzere hedef materyalin 10 yarıömür ışınlanması durumunda  $^{110m}\text{In}$  aktiviteleri GNU-Octave ile kodlanan benzetim programı ile hesaplandı. Aynı program ile elde edilen verilerin bir “txt” dosyasına aktarılması yoluyla bir saatlik ışınlama sonrası aktivite (MBq/ $\mu\text{A.h}$ ) değerleri de okundu. Işınlanma süresine bağlı, saturasyon ve saatlik ışınlama aktivite değerleri grafikler üzerinde görselleştirildi. Ayrıca oluşan ürün radyonüklid miktarının hem zaman, hem de materyal içerisindeki derinliğine bağlı olarak üç boyutlu grafikler ile özetlendi. Oluşan ürün radyonüklid miktarının hedef materyal içerisinde geliş doğrultusundaki derinlik boyunca nerelerde birikim yaptığı belirgin bir şekilde gösterildi.

Benzetim programı çalıştırıldığında yazdırılan txt dosyada, ışınlanma süresinin yanında erişilebilecek aktivite değerleri okunabilmekte. Yani kullanıcı istediği ışınlanma süresini tercih ederek bu süre zarfında elde edebileceği aktivite değerlerine ulaşabilecektir.

### 4.3.1 $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$ reaksiyonunda ürün miktarı ve aktivitesi

$^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu sonucunda elde edebileceğimiz  $^{110\text{m}}\text{In}$  miktarı ve aktivite büyüklükleri için hesaplamalarda kullanılan değişkenler ve değerler Çizelge 4.5’de verildi.

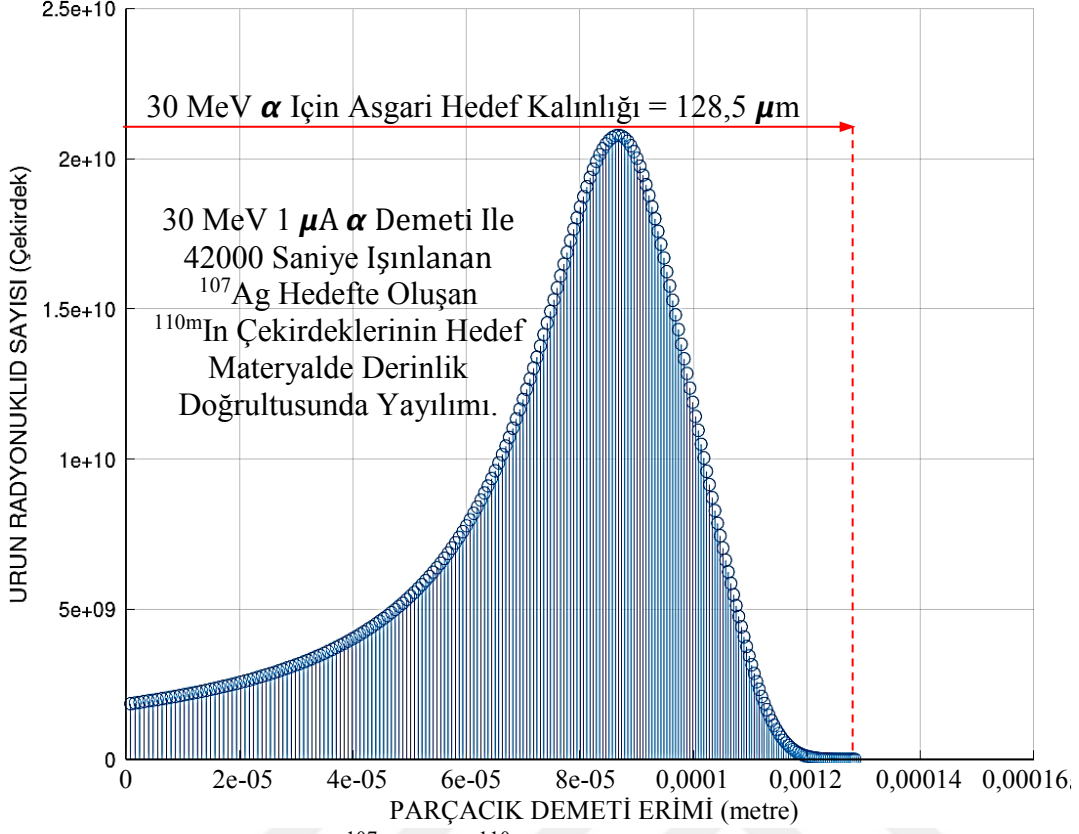
Şekil 4.8’de kalınlığı “128,5  $\mu\text{m}$ ” olan  $^{107}\text{Ag}$  hedefin 30 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  alfa demeti ile 42000 saniye (yaklaşık 10 yarıömür) ışınlanması sonucunda oluşan ürün radyonüklid  $^{110\text{m}}\text{In}$  sayısı derinliğe bağlı görselleştirilmiştir. Görsel aynı zamanda  $^{110\text{m}}\text{In}$  çekirdeklerinin hedef  $^{107}\text{Ag}$  içerisinde derinlik doğrultusunda yayılımını gösterir. Burada görüleceği üzere alfa parçacık demetinin hedef ile çarpıştığı ilk 100  $\mu\text{m}$  lik bölgede  $^{110\text{m}}\text{In}$  sayısı toplam ürün miktarının yaklaşık %90’ı kadardır. 30 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  alfa demeti hedef  $^{107}\text{Ag}$  içerisinde yol alırken “ $dE = 0,1 \text{ MeV}$ ” enerji yitimleri ile “ $dx$ ” adımlarında ilerlemektedir. Herbir adımda azalan enerji ile birlikte tesir kesiti değerleri de değişir. Şekil 4.2’de  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesiti grafiğine bakıldığında görülecektir ki 17,1 MeV altında tesir kesiti keskin bir şekilde düşmektedir. Dolayısı ile etkileşim olasılığı ve ürün radyonüklid oluşum miktarı da sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil 4.9’de kalınlığı “128,5  $\mu\text{m}$ ” olan  $^{107}\text{Ag}$  hedefin 30 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  alfa demeti ile 42000 saniye (yaklaşık 10 yarıömür) ışınlanması sonucunda oluşan ürün radyonüklid  $^{110\text{m}}\text{In}$  aktivite değerleri zamana bağlı görselleştirilmiştir. Burada önemli iki değer olan 3600 saniye (bir saatlik) ışınlanma sonrası aktivite değeri ( $\text{MBq}/\mu\text{A.h}$ ) ve ışınlanma süresi sonsuza giderken (yaklaşık 10 yarıömür) saturasyon aktivite değeri ( $\text{GBq}/\mu\text{A}$ ) verilmiştir. Bu değerler kullanımda olan radyonüklidler açısından  $^{110\text{m}}\text{In}$ ’un bir avantaj oluşturup oluşturmadığını göstermek üzere bir ölçüt olarak kullanıldı. “3600 saniye = 1saat” ışınlanma sonrası  $^{110\text{m}}\text{In}$  aktivitesi “119,4  $\text{MBq}/\mu\text{A.h}$ ”, “10 yarıömür  $\approx$  42000 saniye” ışınlanma sonrası  $^{110\text{m}}\text{In}$  aktivitesi “0,264  $\text{GBq}/\mu\text{A}$ ” olarak hesaplanmıştır.

Olası diğer ışınlama süreleri için oluşan aktivite değerleri ise program çalıştırıldığında yazdırılan txt dosyadan okunabilmektedir.

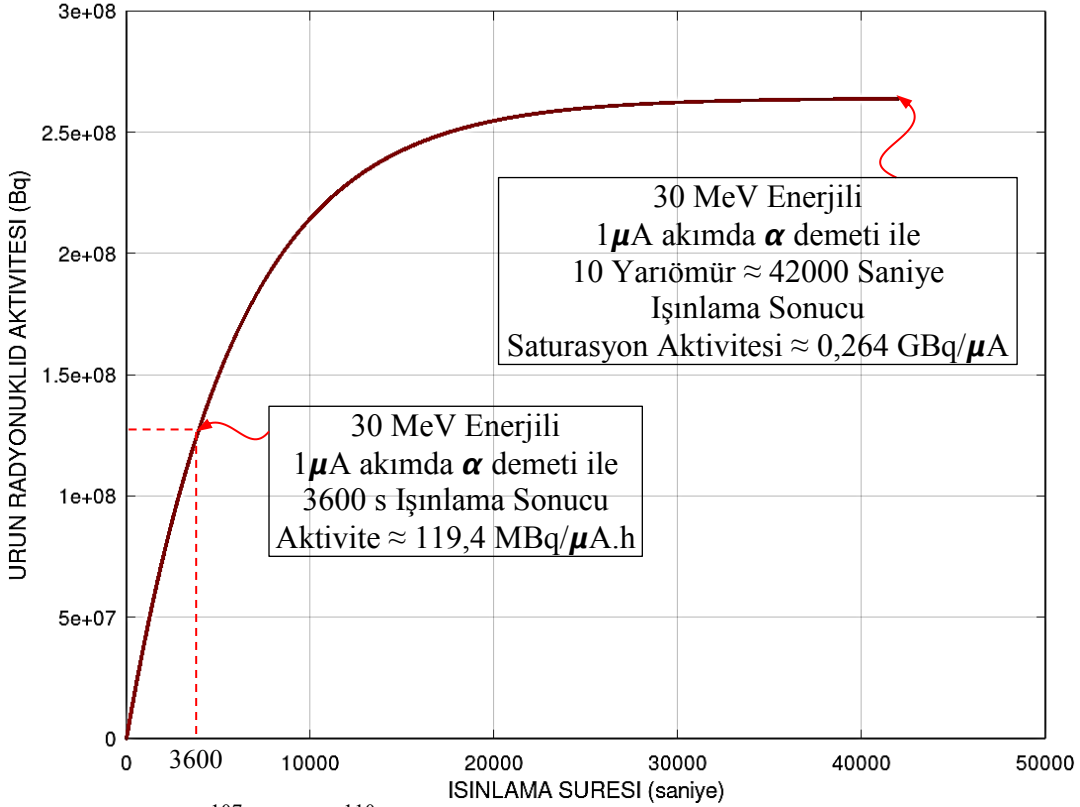
Şekil 4.10’de oluşan  $^{110\text{m}}\text{In}$  çekirdeklerinin sayısı, zamana ve hedef içerisindeki derinliğine bağlı olarak bu bölümde elde edilen sonuçların üç boyutlu bir özeti sunulmuştur. Oluşan ürün radyonüklidin hedef içerisinde hangi bölgelerde yoğunlaştığı burada çarpıcı bir şekilde görülebilmektedir.

### Ag107(He4,n)In110 REAKSIYONU

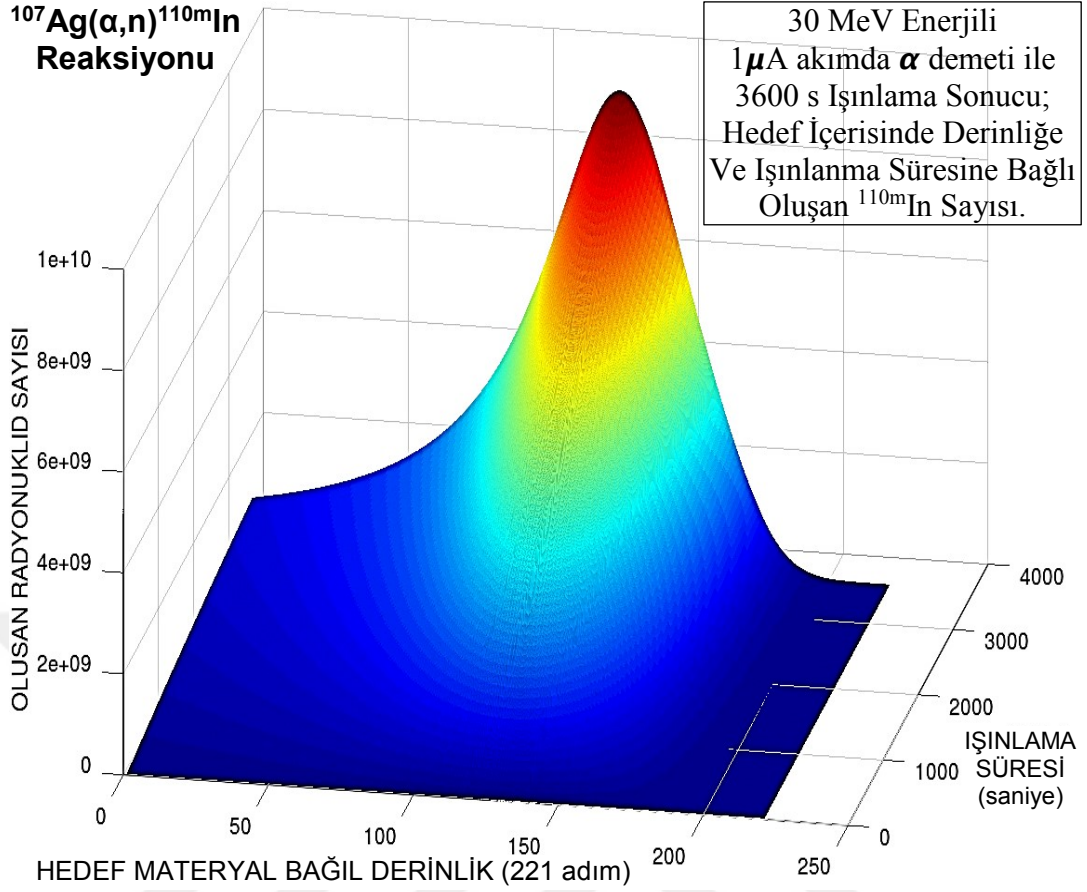


Şekil 4.8 :  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyon ürün dağılımı.

### Ag107(He4,n)In110 REAKSIYONU



Şekil 4.9 :  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu zamana bağlı ürün aktivite grafiği.



**Şekil 4.10 :**  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu zamana ve derinliğe bağlı ürün sayısı.

**Çizelge 4.5:**  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu veri eldesi için kullanılan değerler. [39,40]

İlgili Değişken (sembol)	Kullanılan değer	Kullanılan birim
Hedef $^{107}\text{Ag}$ atomik ağırlık (A)	106,905091	gr/mol.
Mermi Parçacık (Alfa) Yüğü (z)	2	(elemanter yük)
Hedef Materyal Yoğunluğu (d)	10473	kg/m <sup>3</sup>
Ürün Yarıömrü (T)	4146	Saniye (= 69.1 dakika)
Hedef Işınlama Süresi (t)	42000	Saniye (~10 yarıömür)
Hedef Materyal Kalınlık (x)	128,5.10 <sup>-6</sup>	m
Akıma Maruz Kalan Kesit	1	m <sup>2</sup>
Akım (I)	1.10 <sup>-6</sup>	Amper=Coulomb/saniye
Akı (φ)	I.(5/8).10 <sup>19</sup> /z.Kesit	Parçacık sayısı/m <sup>2</sup> .saniye
Hedef Materyal Atom Sayısı (N <sub>01</sub> )	d.V.Na/A	-
Tesir Kesiti (σ)	[41]	m <sup>2</sup>

#### 4.3.2 $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$ reaksiyonunda ürün miktarı ve aktivitesi

$^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu sonucunda elde edebileceğimiz  $^{110m}\text{In}$  miktarı ve aktivite büyüklükleri için hesaplarda kullanılan değişkenler ve değerler Çizelge 4.6'da verildi.

Şekil 4.11'de kalınlığı "208,5  $\mu\text{m}$ " olan  $^{110}\text{Cd}$  hedefin 15 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  döteron demeti ile 42000 saniye (yaklaşık 10 yarıömür) ışınlanması sonucunda oluşan ürün radyonüklid  $^{110m}\text{In}$  sayısı derinliğe bağlı görselleştirilmiştir.  $^{110m}\text{In}$  çekirdeklerinin hedef  $^{110}\text{Cd}$  içerisinde derinlik doğrultusunda yayılımı görülmektedir. Döteron demetinin hedef ile çarpıştığı ilk 125  $\mu\text{m}$ 'lik bölgede  $^{110m}\text{In}$  sayısı toplam ürün miktarının yaklaşık %80'inin yığıldığı görülmekte. 15 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  döteron demeti hedef  $^{110}\text{Cd}$  içerisinde yol alırken "dE= 0,1 MeV" enerji yitimleri ile "dx" adımlarında ilerlemektedir. Herbir adımda azalan enerji ile birlikte tesir kesiti de değişir. Şekil 4.4'de  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesiti grafiğine bakıldığında görülecektir ki 14,5 MeV altında tesir kesiti keskin bir şekilde düşmektedir. Dolayısı ile etkileşim olasılığı ve ürün radyonüklid oluşum miktarı da bu nedenle azalmaktadır.

Şekil 4.12'de kalınlığı "208,5  $\mu\text{m}$ " olan  $^{110}\text{Cd}$  hedefin 15 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  döteron demeti ile 42000 saniye (yaklaşık 10 yarıömür) ışınlanması sonucunda oluşan ürün radyonüklid  $^{110m}\text{In}$  aktivite değerleri zamana bağlı görselleştirilmiştir. Burada önemli iki değer olan 3600 saniye ışınlanma sonrası aktivite değeri (MBq/ $\mu\text{A.h}$ ) ve ışınlanma süresi sonsuza giderken (yaklaşık 10 yarıömür) saturasyon aktivite değeri (GBq/ $\mu\text{A}$ ) verilmiştir. Bu değerler kullanımda olan radyonüklidler açısından  $^{110m}\text{In}$ 'un bir avantaj oluşturup oluşturmadığını göstermek üzere bir ölçüt olarak kullanıldı.

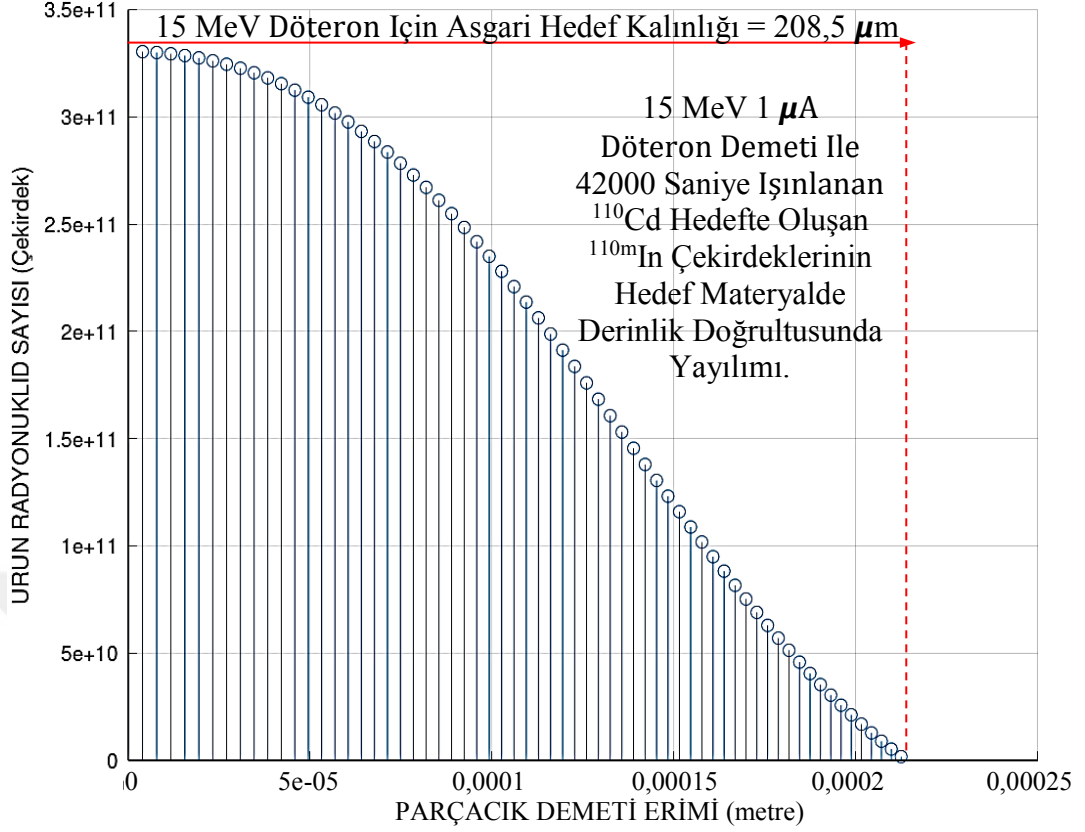
Bir saat (3600 saniye) ışınlanma sonrası  $^{110m}\text{In}$  aktivitesi "894 MBq/ $\mu\text{A.h}$ " ve yaklaşık on yarıömür (42000 saniye) ışınlanma sonrası  $^{110m}\text{In}$  aktivitesi "1,98 GBq/ $\mu\text{A}$ " olarak hesaplandı.

Olası diğer ışınlanma süreleri için oluşan aktivite değerleri ise program tarafından yazdırılan txt dosyadan okunabilmektedir.

Şekil 4.13'de oluşan  $^{110m}\text{In}$  çekirdeklerinin sayısı, zamana ve hedef içerisindeki derinliğine bağlı olarak bu bölümde elde edilen sonuçların üç boyutlu bir özeti sunulmuştur. Oluşan ürün radyonüklidin hedef içerisinde hangi bölgelerde yoğunlaştığı burada çarpıcı bir şekilde görülebilmektedir.

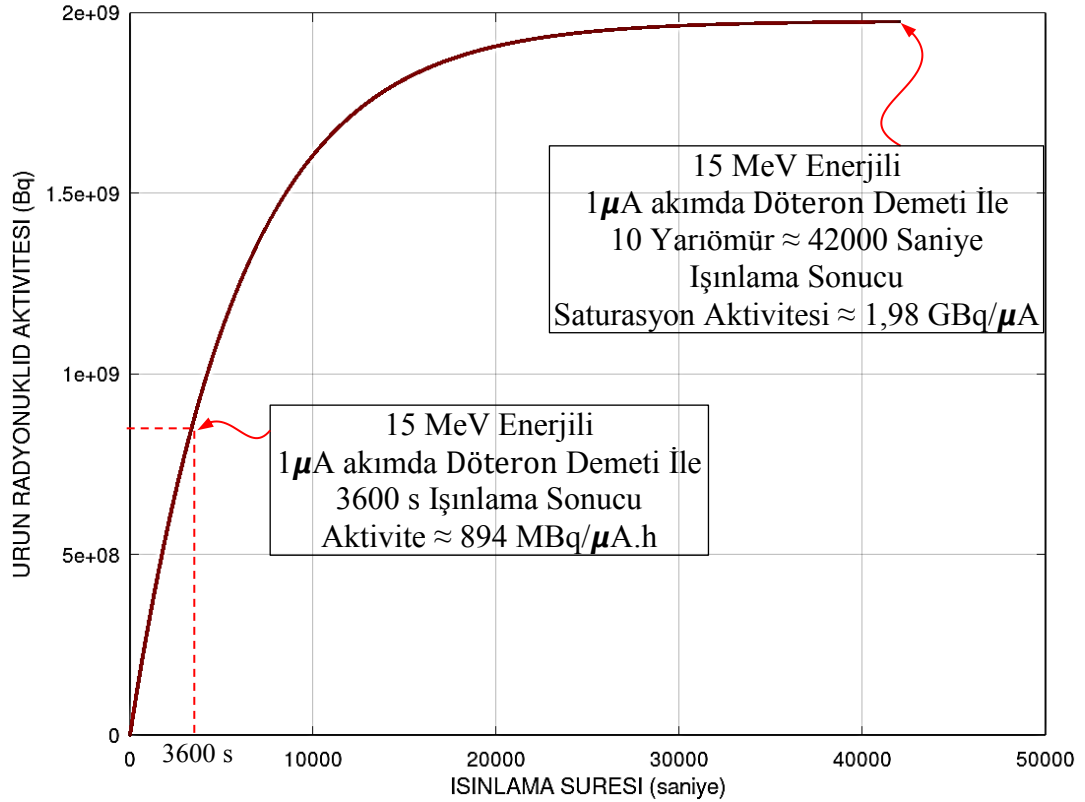


### Cd110(d,2n)In110 REAKSIYONU

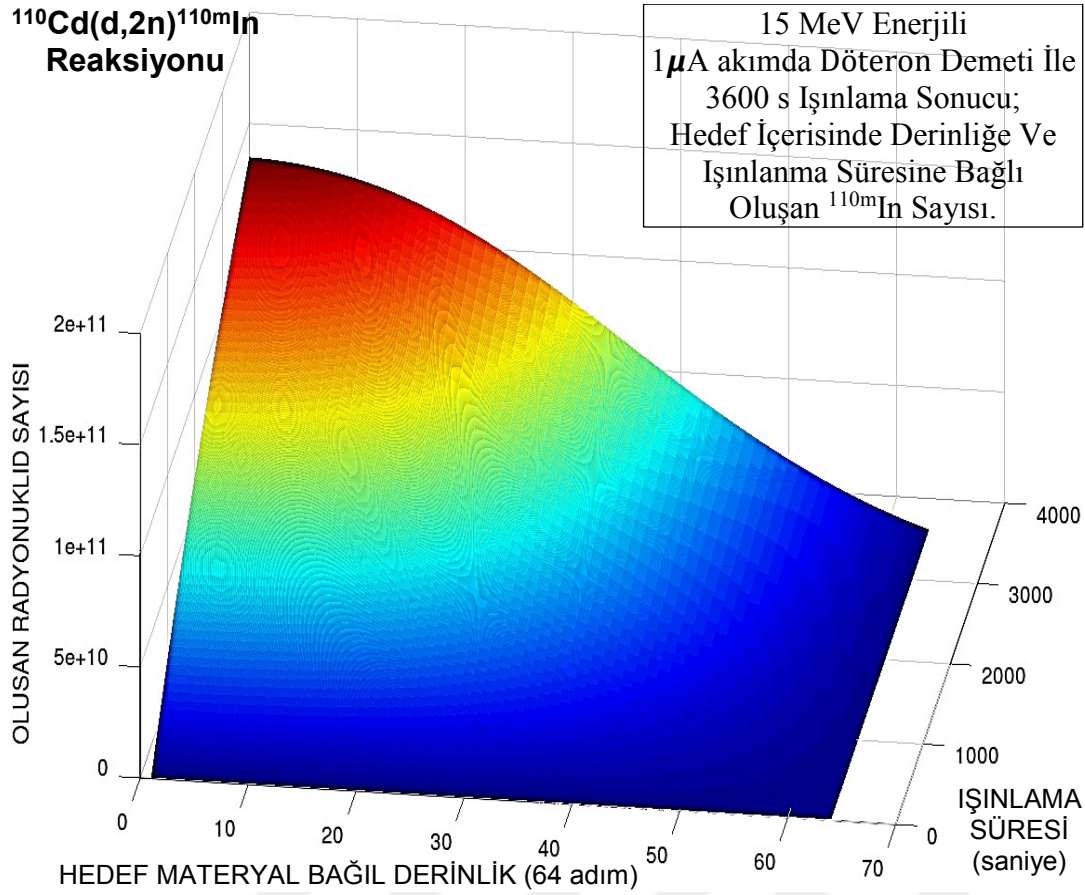


Şekil 4.11 : <sup>110</sup>Cd(d,2n)<sup>110m</sup>In reaksiyon ürün dağılımı.

### Cd110(d,2n)In110 REAKSIYONU



Şekil 4.12 : <sup>110</sup>Cd(d,2n)<sup>110m</sup>In reaksiyonu zamana bağlı ürün aktivite grafiği.



**Şekil 4.13 :**  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu zamana ve derinliğe bağlı ürün sayısı.

**Çizelge 4.6 :**  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu veri eldesi için kullanılan değerler.  
[39,40]

İlgili Değişken (sembol)	Kullanılan değer	Kullanılan birim
Hedef $^{110}\text{Cd}$ atomik ağırlık (A)	109,903007	gr/mol.
Mermi Parçacık (döteron) Yüğü (z)	1	(elementer yük)
Hedef Materyal Yoğunluğu (d)	8642	kg/m <sup>3</sup>
Ürün Yarıömrü (T)	4146	Saniye (= 69.1 dakika)
Hedef Işınlama Süresi (t)	42000	Saniye (~10 yarıömür)
Hedef Materyal Kalınlık (x)	208,5.10 <sup>-6</sup>	m
Akıma Maruz Kalan Kesit	1	m <sup>2</sup>
Akım (I)	1.10 <sup>-6</sup>	Amper=Coulomb/saniye
Akı (φ)	I.(5/8).10 <sup>19</sup> /z.Kesit	Parçacık sayısı/m <sup>2</sup> .saniye
Hedef Materyal Atom Sayısı (N <sub>01</sub> )	d.V.Na/A	-
Tesir Kesiti (σ)	[41]	m <sup>2</sup>

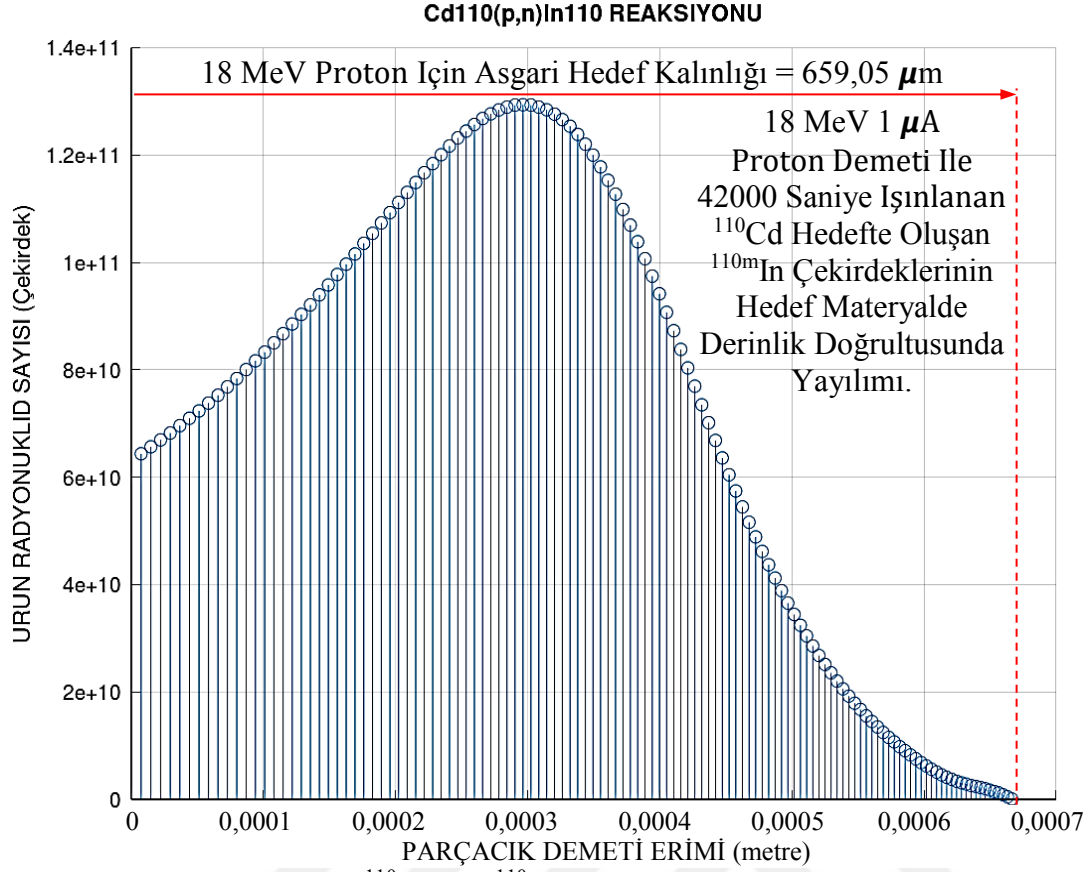
### 4.3.3 $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$ reaksiyonunda ürün miktarı ve aktivitesi

$^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu sonucunda elde edebileceğimiz  $^{110m}\text{In}$  miktarı ve aktivite büyüklükleri için hesaplarda kullanılan değişkenler ve değerler Çizelge 4.7’de verildi. Şekil 4.14’de kalınlığı “659,05  $\mu\text{m}$ ” olan  $^{110}\text{Cd}$  hedefin 18 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  proton parçacık demeti ile 42000 saniye (yaklaşık 10 yarıömür) ışınlanması sonucunda oluşan ürün radyonüklid  $^{110m}\text{In}$  sayısı derinliğe bağlı görselleştirilmiştir. Görsel aynı zamanda  $^{110m}\text{In}$  çekirdeklerinin hedef  $^{110}\text{Cd}$  içerisinde derinlik doğrultusunda yayılımını gösterir. Burada görüleceği üzere proton parçacık demetinin hedef ile çarpıştığı ilk 400  $\mu\text{m}$ ’lik bölgede  $^{110m}\text{In}$  sayısı toplam ürün miktarının yaklaşık %80’i kadardır. 18 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  alfa parçacıkları hedef  $^{110}\text{Cd}$  içerisinde yol alırken “ $dE = 0,1 \text{ MeV}$ ” enerji yitimleri ile “ $dx$ ” adımlarında ilerlemektedir. Herbir adımda azalan enerji ile birlikte tesir kesiti değerleri de değişir. Şekil 4.6’da  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu için enerjiye bağlı tesir kesiti grafiğine bakıldığında görülecektir ki 13,4 MeV altında tesir kesiti keskin bir şekilde düşmektedir. Dolayısı ile etkileşim olasılığı ve ürün radyonüklid oluşum miktarı da azalır.

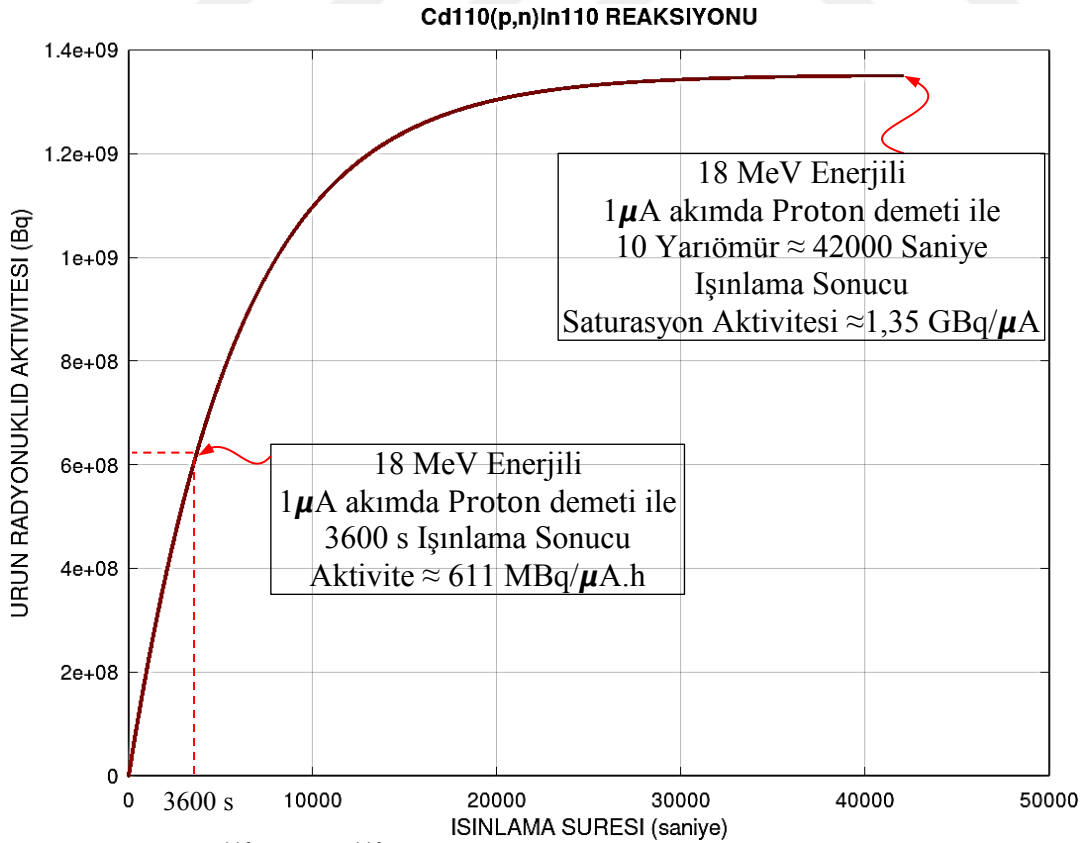
Şekil 4.15’de kalınlığı “659,05  $\mu\text{m}$ ” olan  $^{110}\text{Cd}$  hedefin 18 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  proton parçacık demeti ile 42000 saniye (yaklaşık 10 yarıömür) ışınlanması sonucunda oluşan ürün radyonüklid  $^{110m}\text{In}$  aktivite değerleri zamana bağlı görselleştirilmiştir. Burada önemli iki değer olan 3600 saniye (bir saatlik) ışınlanma sonrası aktivite değeri ( $\text{MBq}/\mu\text{A.h}$ ) ve ışınlanma süresi sonsuza giderken (yaklaşık 10 yarıömür) saturasyon aktivite değeri ( $\text{GBq}/\mu\text{A}$ ) verilmiştir. Bu değerler kullanımda olan radyonüklidler açısından  $^{110m}\text{In}$ ’un bir avantaj oluşturup oluşturmadığını göstermek üzere bir ölçüt olarak kullanıldı. Bir saatlik (3600 saniye) ışınlanma sonrası  $^{110m}\text{In}$  aktivitesi yaklaşık “611  $\text{MBq}/\mu\text{A.h}$ ” olarak elde edildi. On yarıömür (42000 saniye) ışınlanma sonrası  $^{110m}\text{In}$  aktivitesi yaklaşık “1,35  $\text{GBq}/\mu\text{A}$ ” olarak elde edildi.

Olası diğer ışınlama süreleri için oluşan aktivite değerleri ise program çalıştırıldığında program tarafından yazdırılan txt dosyadan okunabilmektedir. Kullanıcılar tercih ettiği herhangi bir ışınlanma süresinde elde edilen aktivite değerine buradan ulaşabilmektedir.

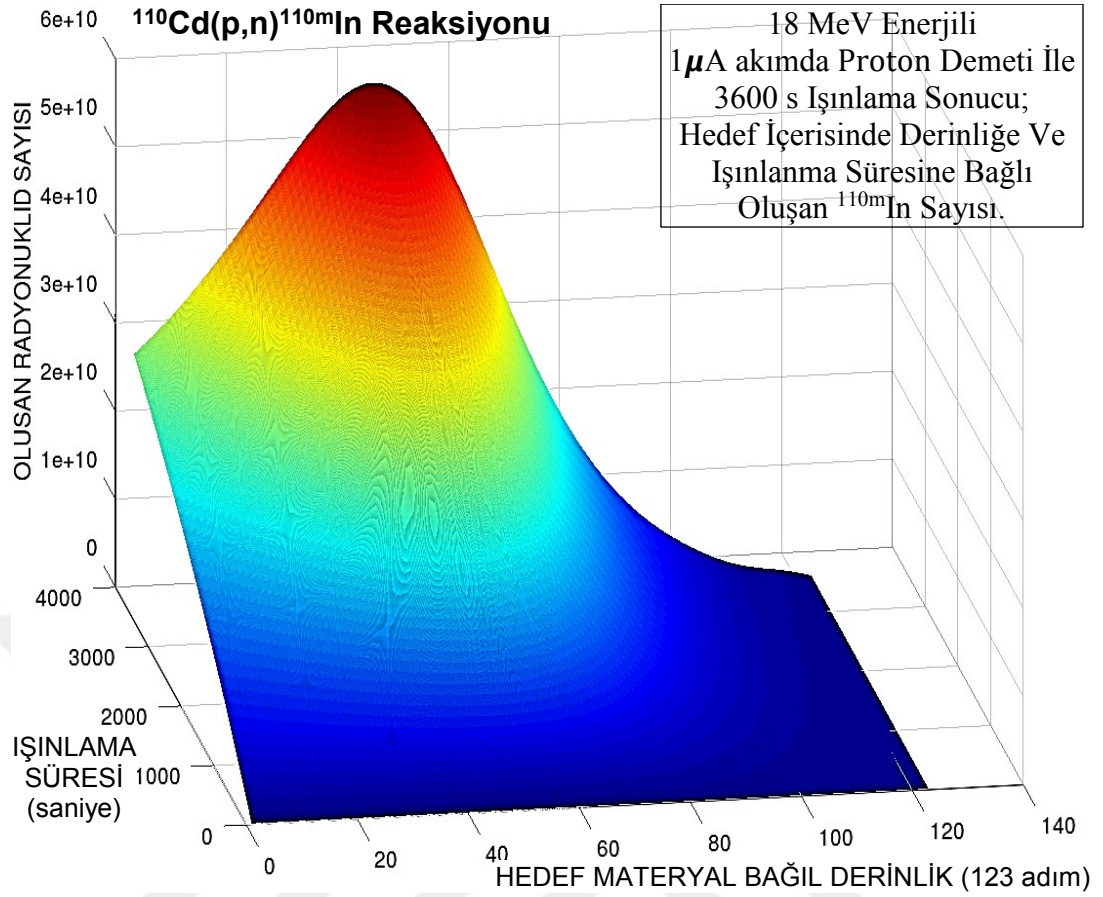
Şekil 4.16’de 18 MeV enerjili 1  $\mu\text{A}$  akımda proton demeti ile 1 saatlik ışınlanma sonucu oluşan  $^{110m}\text{In}$  çekirdeklerinin sayısı, zamana ve hedefdeki derinliğine bağlı olarak elde edilen sonuçların üç boyutlu bir özeti sunulmuştur. Oluşan  $^{110m}\text{In}$  çekirdeklerinin, hedefin ön tarafında yoğunlaştıkları daha net olarak görülmektedir.



**Şekil 4.14 :**  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyon ürün dağılımı.



**Şekil 4.15 :**  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu zamana bağlı ürün aktivite grafiği.



Şekil 4.16 :  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu zamana ve derinliğe bağlı ürün sayısı.

Çizelge 4.7 :  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonu veri eldesi için kullanılan değerler [39,40].

İlgili Değişken (sembol)	Kullanılan değer	Kullanılan birim
Hedef $^{110}\text{Cd}$ atomik ağırlık (A)	109,903007	gr/mol.
Mermi Parçacık (proton) Yüğü (z)	1	(elemantar yük)
Hedef Materyal Yoğunluğu (d)	8642	kg/m <sup>3</sup>
Ürün Yarıömrü (T)	4146	Saniye (= 69.1 dakika)
Hedef Işınlama Süresi (t)	42000	Saniye (~10 yarıömür)
Hedef Materyal Kalınlık (x)	659,05.10 <sup>-6</sup>	m
Akıma Maruz Kalan Kesit	1	m <sup>2</sup>
Akım (I)	1.10 <sup>-6</sup>	Amper=Coulomb/saniye
Akı (φ)	I.(5/8).10 <sup>19</sup> /z.Kesit	Parçacık sayısı/m <sup>2</sup> .saniye
Hedef Materyal Atom Sayısı (N <sub>01</sub> )	d.V.Na/A	-
Tesir Kesiti (σ)	[41]	m <sup>2</sup>



## 5. SONUÇLARIN MUKAYESESİ VE DEĞERLENDİRMELER

Burada “Bölüm 4. Çalışma Ve Bulgular” kısmında elde edilen veriler, çizelgeler üzerinden özetlendi. Aynı çizelgelerde bu çalışma kapsamında elde edilen verilerin başka benzetim programları veya uluslararası veri bankalarındaki verilerle bir karşılaştırması sunularak elde edilen sonuçların tutarlılıkları gösterildi. Sonuçta ise pozitron emisyon kaynağı olarak seçilen  $^{110m}\text{In}$  üretim sürecine dair ideal bir üretim rotası elde edilmeye çalışıldı.

### 5.1 Parçacık Demeti Asgari Enerji Büyüklüğü

Bu çalışmanın konusu olan algoritmanın ilk adımı; radyonüklid üretim sürecinde hızlandırılmış parçacık demetinin, etkili nükleer reaksiyon vermeleri için asgari enerjilerinin belirlenmesidir. Çizelge 5.1’de  $^{110m}\text{In}$  üretim sürecinde mermi parçacık demeti için tespit edilen asgari enerji değerlerine dair veriler listelenmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Parçacık demeti asgari enerji büyüklükleri.

$^{110m}\text{In}$ Eldesi İçin Olası Nükleer Reaksiyonlar	“OECD NEA Janis Book” Verilerinde Reaksiyon Q Değeri (MeV) [42]	Hesaplanan Reaksiyon Q Değeri (MeV) (Bölüm 4.1)	Hesaplanan Reaksiyon Eşik Enerjisi (MeV) (Bölüm 4.1)	Tezde Kullanılan Parçacık Asgari Enerjisi (MeV) [41]
$^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$	-7,582	-7,5833	7,8672	8
$^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$	-6,88471	-6,8847	7,0108	8,7
$^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$	-4,66035	-4,6603	4,7030	5,8

Çizelge 5.1’de hesaplanan “Q Değerleri” ile “OECD NEA Janis Book” verilerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. “Hesaplanan Reaksiyon Eşik Enerjileri” altında bir parçacık enerjisi ile yapılacak ışınlamadan ürün eldesi beklenmemelidir. Demet asgari enerji büyüklüklerinin belirlenmesinde IAEA tesir kesiti verilerine göre etkileşim olasılıklarının ürün eldesine olanak tanınması dikkate alınmıştır.

## 5.2 Parçacık Demeti Erim Büyüklüğü Ve Asgari Hedef Materyal Kalınlığı

Çizelge 5.2’de “Bethe Formülü” ve “Erim Denklemi” (3.5) ve (3.10) kullanılarak yazılan benzetimin hesaplamalarına (Bölüm 4.2) göre seçili reaksiyonlarda mermi parçacık demetinin “CSDA Erim” değerleri ile aynı başlangıç koşullarında SRIM benzetim programı verileri karşılaştırılmıştır.

Kullanımda olan siklotronlar ile 10-50 MeV aralığında alfalar hızlandırılıyor [25]. Bu kapsamda  $^{107}\text{Ag}$  hedef için 30 MeV enerjili alfalarla ışınlanması öngörüldü. Türkiye’de sadece bir tesiste Cyclone30 (IBA) modeli ile en fazla 15 MeV döteron hızlandırılıyor (Çizelge 1.3).  $^{110}\text{Cd}$  hedef için 15 MeV enerjili döteronlarla ışınlanması makul görüldü. Türkiye’de birden fazla tesiste mevcut olan Cyclone18 (IBA) modeli ile en fazla 18 MeV proton hızlandırılabilen (Çizelge 1.3).  $^{110}\text{Cd}$  hedef için 18 MeV enerjili protonlarla ışınlanması hem istenilen aktivitelerin eldesini olası kılarken hem de Türkiye sınırları içerisinde ulaşılabilir olması bu enerji değerini makul ve uygulanabilir kılmaktadır.

**Çizelge 5.2 :** Mermi parçacık demetlerinin erimi ve asgari hedef kalınlıkları.

$^{110\text{m}}\text{In}$ Eldesi İçin Olası Nükleer Reaksiyonlar	30 MeV Enerjili Parçacık Demeti Hedef Materyal Erim ( $\mu\text{m}$ )		Makul Saturasyon Aktivitesi İçin Enerji Aralığı (MeV)	Belirlenen Enerji Aralığı İçin Asgari Hedef Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	
	“Bethe” GNU-Octave Kodları CSDA Erim	SRIM Benzetim Programı [43]		“Bethe” GNU-Octave Kodları	SRIM Benzetim Programı [43]
$^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$	155,2	154,93	30→8	128,5	154,93-19,85 $\approx$ 135
$^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$	1152,2	1157,1	15→8,7	208,5	368,39-154,1 $\approx$ 214
$^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$	1888,1	1872,3	18→5,8	659,05	784,14-121,2 $\approx$ 663

Çizelge 5.3’de SRIM programında girdiler ve çıktıların birarada bulunduğu raporlar sunulmuştur. Bu çalışmanın erim değerlerinin SRIM değerlerinden küçük farklarla farklı olması bu çalışma kapsamında yazılan kodların olasılıksal (random) durumları ve saçılmaları dikkate alınmaksızın sadece durdurma gücünü (stopping power) esas alan hesaplamalar kullanması ile açıklanabilir [17].



**Çizelge 5.3:** Farklı hedeflerde SRIM erim raporları [43].

Reaksiyon	SRIM Girdi Ve Çıktıları	Büyüklik Ve Birim	
$^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110\text{m}}\text{In}$	Girdi	Demet iyon sayısı	2000
		Mermi “ $\alpha$ ” parçacık yükü (z)	+2 e
		Mermi parçacık “d” kütlesi ( $m_p$ )	4.0015 akb
		Hedef $^{107}\text{Ag}$ atom numarası (Z)	47
		Hedef $^{107}\text{Ag}$ atomik ağırlık (A)	106,905 akb
		Hedef materyal $^{107}\text{Ag}$ yoğunluğu ( $\rho$ )	10,473 g/cm <sup>3</sup>
	Çıktı	30 MeV Alfa Erimi	154,93 $\mu\text{m}$
		8 MeV Alfa Erimi	19,847 $\mu\text{m}$
		30→8 MeV Aralığı Alfa Erimi	135,083 $\mu\text{m}$
$^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$	Girdi	Demet iyon sayısı	2000
		Mermi “d” parçacık yükü (z)	+1 e
		Mermi parçacık “d” kütlesi ( $m_p$ )	2.0136 akb
		Hedef $^{110}\text{Cd}$ atom numarası (Z)	48
		Hedef $^{110}\text{Cd}$ atomik ağırlık (A)	109,903 akb
	Hedef materyal $^{110}\text{Cd}$ yoğunluğu ( $\rho$ )	8,642 g/cm <sup>3</sup>	
	Çıktı	30 MeV Döteron Erimi	1157,1 $\mu\text{m}$
		15 MeV Döteron Erimi	368,39 $\mu\text{m}$
		8,7 MeV Döteron Erimi	154,05 $\mu\text{m}$
		15→8,7 MeV Aralığı Döteron Erimi	214,34 $\mu\text{m}$
$^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$	Girdi	Demet iyon sayısı	2000
		Mermi “p” parçacık yükü (z)	+1 e
		Mermi parçacık “p” kütlesi ( $m_p$ )	1.0073 akb
		Hedef $^{110}\text{Cd}$ atom numarası (Z)	48
		Hedef $^{110}\text{Cd}$ atomik ağırlık (A)	109,903 akb
	Hedef materyal $^{110}\text{Cd}$ yoğunluğu ( $\rho$ )	8,642 g/cm <sup>3</sup>	
	Çıktı	30 MeV Proton Erimi	1872,3 $\mu\text{m}$
		18 MeV Proton Erimi	784,14 $\mu\text{m}$
		5,8 MeV Proton Erimi	121,16 $\mu\text{m}$
		18→5,8 MeV Aralığı Proton Erimi	662,98 $\mu\text{m}$

### 5.3 Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon

Çizelge 5.4’de hedeflerin belirlenen enerjilerde bir saatlik ve saturasyon süresince ışınlanması sonucu açığa çıkan ürün radyonüklid  $^{110m}\text{In}$  için TTY (MBq/ $\mu\text{A.h}$  ve GBq/ $\mu\text{A}$ ) değerleri elde etmeye yönelik yazılan benzetimin hesapları (Bölüm 4.3) ile “IAEA Yüklü Parçacık Tesir Kesitleri Veritabanı” ile karşılaştırılmıştır.

**Çizelge 5.4 :** Kalın hedefde birim akımda ışınlanma süresine bağlı aktivite.

$^{110m}\text{In}$ Eldesi İçin Olası Nükleer Reaksiyonlar	Bu Çalışmada Önerilen Parçacık Demet Enerjisi (MeV)	Bu Çalışmada Önerilen Asgari Hedef Materyal Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Ürün Rayonüklid Bir Saat Işınlanma Sonrası Aktivite (TTY) (MBq/ $\mu\text{A.h}$ )		Ürün Rayonüklid Saturasyon ( $10T_{1/2}$ ) Aktivitesi (TTY) (GBq/ $\mu\text{A@sat}$ )	
			GNU-Octave Benzetim Hesapları (Bölüm4.3)	IAEA Verileri [41]	GNU-Octave Benzetim Hesapları (Bölüm4.3)	IAEA Verileri [41]
$^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$	30→8	128,5	119,43	126	0,264	0,278
$^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$	15→8,7	208,5	894	906	1,98	2
$^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$	18→5,8	659,05	611,3	604	1,35	1,34

$^{107}\text{Ag}$  hedefin 30 MeV enerjili  $1\mu\text{A}$  alfa demeti ile ışınlanması sonucu oluşan aktivite değerlerinde, bu çalışma ile IAEA veritabanları arasında  $\sim\%5$  sapma görülmektedir.

$^{110}\text{Cd}$  hedefin 15 MeV enerjili  $1\mu\text{A}$  döteron demeti ile ışınlanmasıyla oluşan aktivite değerlerinde, bu çalışma ile IAEA veritabanları arasında  $\sim\%1$  sapma görülmektedir.

$^{110}\text{Cd}$  hedef için 18 MeV enerjili  $1\mu\text{A}$  proton demeti ile ışınlanmasıyla oluşan aktivite değerlerinde, bu çalışma ile IAEA veritabanları arasında  $\sim\%0,8$  sapma görülmektedir.

Çizelge 5.4’de bu çalışma kapsamında hesaplanan TTY değerlerinin, “IAEA Yüklü Parçacık Tesir Kesitleri Veritabanı” ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. Dolayısı ile bu çalışmaya ait algoritma ve matematiksel ifadelerin GNU-Octave ile yazılan benzetim programı tutarlı ve başarılı sonuçlar vermiştir.

## 5.4 Sonuç ve Tartışma

### 5.4.1 Tezin birincil ereği

“Hızlandırıcı Kaynaklı Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon” sonucu  $^{110m}\text{In}$  eldesi için dolaysız olan bu üç reaksiyonun tercih edilme nedenlerinden birisi; alfa, dötron ve proton demetleri ile gerçekleştirilebilecek ışınlama senaryolarının üçünden de aynı radyonüklitin üretilmesidir. Böylece çalışmaya özgü algoritma ve “Deterministik Benzetim Program” hesaplamaları için kıyaslanabilir örneklem grubu oluşturmuştur.

Bu tez kapsamında GNU-Octave kodları ile yazılmış olan programın hesaplamaları üç gruptan oluşmaktadır.

**Çizelge 5.1:** Parçacık demeti asgari enerji büyüklükleri için hesaplamalar “OECD-NEA Janis Book” ile hemen hemen aynı değerlerde elde edilmiştir.

**Çizelge 5.2:** Mermi parçacık demetlerinin erimi ve asgari hedef kalınlıkları bu tez kapsamında GNU-Octave kod dilinde yazılmış olan “Deterministik Benzetim Programı”nın hesaplamaları ile SRIM benzetim programı arasında %5, %0,2 aralığında sapmalar ile elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 5.4:** Kalın hedefde “Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon” sonucu birim akımda ışınlanma süresine bağlı aktivite bu tez kapsamında yazılmış olan GNU-Octave benzetim programının hesaplamaları ile IAEA veritabanları arasında %5, %1, %0,8 büyüklüğünde sapmalar ile elde edildiği görülmektedir.

“OECD NEA Janis Book” verileri, SRIM benzetim programı ve “IAEA Yüklü Parçacık Tesir Kesitleri Veritabanı” ile yapılan tüm bu karşılaştırmalar göstermektedir ki çalışmaya ait olan “Deterministik Benzetim Programının”, “Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon” verileri oldukça tutarlı ve başarılı sonuçlar vermektedir. Bu durumda tez için birincil erek olarak seçilmiş olan özgün benzetim programları ile hesaplama altyapısı oluşturma hedefinde başarılı olduğu söylenebilir.

Pozitron yayıcı olarak  $^{110m}\text{In}$  üzerinde yapılmış olan çalışma sayısı nispeten az da olsa bu çalışmada elde edilen verilerin bir kısmına farklı veri tabanlarından da erişim mümkündür. Bu tercihin amacı çalışma kapsamında geliştirilen “Deterministik Benzetim Programı”nın veri üretim güvenilirliğini test etmektir. Sonuç olarak çalışma kapsamında geliştirilen “Deterministik Benzetim Programı” diğer “Yüklü Parçacık İle Nükleer Aktivasyon” reaksiyonları için de kullanışlı bir araç olduğu gösterilmiştir.

#### 5.4.2 Tezin ikincil ereği

Indium-111, çeşitli radyofarmasötiklerde klinik görüntülemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Pozitron yayan  $^{110m}\text{In}$  potansiyel olarak pozitron emisyon tomografi çalışmalarında kullanılabilir. Şu ana kadar  $^{110m}\text{In}$ 'den çok az faydalanılmıştır. Görüldüğü üzere  $^{110m}\text{In}$ , "69,1" dakika yarıömrü sayesinde makul sayılabilecek kullanım ömrüne sahip bir pozitron kaynağı olarak üretim yerinde kullanımı olanaklıdır.

Pozitron kaynağı olarak  $^{110m}\text{In}$  eldesine yönelik dolaylı üretim rotaları olan  $^{\text{nat}}\text{In}(p,xn)^{110}\text{Sn}$  ve  $^{108}\text{Cd}(\alpha,2n)^{110}\text{Sn}$  için reaksiyon eşik enerjileri sırası ile 30 MeV ve 17,76 MeV ile yaygın kullanımda olan siklotron tesislerinde erişilmesi zor enerjilerdir. Ayrıca  $^{\text{nat}}\text{In}(p,xn)^{110}\text{Sn}$  reaksiyonu nükleer etkileşim tesir kesitleri oldukça düşük olduğu için demet enerjisi ve/veya demet akısı görece yüksek değerlerde ışınlama gerektirecektir. Bu nedenle doğrudan üretim rotaları olan;  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$ ,  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$  üç reaksiyon öne çıkmıştır.

Burada en düşük  $^{110m}\text{In}$  saturasyon aktivitesi  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonunda gözlenmiştir. Bu durum reaksiyon tesir kesitinin en büyük tepe noktasına sahip olması (343,9 milibarn) ile çelişiyor gibi görünmektedir. Ancak Şekil 4.8, Şekil 4.11 ve Şekil 4.14 karşılaştırıldığında görülecektir ki ürün-enerji grafiklerinde altta kalan alan açısından  $^{107}\text{Ag}(\alpha,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu en düşük olanıdır. Yani tesir kesiti yüksek bir tepe yapsada ortalamada düşük bir etkileşim tesir kesiti ortaya koymaktadır.

Şu anda yaygın kullanımda olan pozitron kaynağı üretim tesislerinin aktivite değerlerine bakıldığında  $\sim 6,7 \text{ GBq}/\mu\text{A@sat}$  ile  $\sim 3,7 \text{ MBq}/\mu\text{A@sat}$  aralığında ürün radyonüklidlerle çalışılmakta [12]. Bu çalışmada bulunan değerler ise Çizelge 5.4'de görüldüğü üzere  $0,264 \text{ GBq}/\mu\text{A@sat}$ ,  $1,98 \text{ GBq}/\mu\text{A@sat}$  ve  $1,35 \text{ GBq}/\mu\text{A@sat}$  ile yaygın kullanımda olan pozitron kaynaklarına ciddi bir alternatif oluşturmaktadırlar.

Çizelge 5.4'de görüldüğü üzere ürün radyonüklid  $^{110m}\text{In}$  saturasyon aktivitesi açısından  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonu en verimli seçenektir. Döteronla ışınlama seçeneği yaygınlık açısından proton hızlandırıcılardan geridedir. Ancak  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$  reaksiyonunun takip eden  $^{110m}\text{In}$  aktivitesi de kabul edilebilir ve uygulanabilir bir seçenek olarak durmaktadır.

Endüstride lazer teknolojilerinden, batarya teknolojilerine, nükleer fizik uygulamalarına ve sağlık vb sektörlere hitaben kullanıma sunulan ve %99 izotopik

zenginlikte  $^{110}\text{Cd}$  hedef nüklid temini birçok ticari firma tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca oluşan ürün  $^{110\text{m}}\text{In}$  çekirdeklerinin hızlı bir şekilde kimyasal olarak ana hedef materyalden ayrıştırılmasına yönelik uygulanmakta olan teknikler halihazırda mevcuttur [14].

Tüm bu sonuçlar;  $^{110\text{m}}\text{In}$  pozitron kaynağının üretim rotası olarak  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$  ve  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110\text{m}}\text{In}$  reaksiyonlarını önemli bir alternatif yapmaktadır. Yeterli yarıömür uzunluğu, aktivite verimliliği ve ulaşılabilirlik açısından bu reaksiyonlar halihazırda yaygın kullanıma sahip alternatiflerinden daha geride değildirler.

Burada soru işaretleri doğuran tek taraf  $^{110\text{m}}\text{In}$  kaynaklı pozitronların görece yüksek olan 2260 keV son nokta enerjileri ve 1015 keV ortalama enerjileri ile yokoluş ışınmasını hedef bölgenin dışında da gerçekleştirebilme olasılıklarıdır. Bu durum bu tezin ana konusu olmamakla beraber elektronların ve pozitronların insan dokusundaki eriminin bilinmesini gerektirmektedir. Bu amaçla elektron ve pozitron için “Bethe Denklemi” ve erim denklemi olan denklem (3.6), (3.7) ve (3.10) kullanılarak yazılan elektron ve pozitronlar için erim benzetim programı ile hesaplanmıştır. Bu kodlar EK D’de verilmiştir. 1015 keV ortalama enerjili elektron ve pozitronlar için insan dokusuna muadil “TISSUE (ICRU four-component)” içinde CSDA erim değerleri sırası ile 4,87 ve 4,9 milimetre olarak elde edilmiştir. Azami erim (Projected Range), CSDA erim oranı (Detour Factor) insan dokusu için 0,90 dolaylarında alındığında azami erim (Projected Range) değerleri yaklaşık 4 milimetre civarında olacaktır. Dolayısı ile  $^{110\text{m}}\text{In}$  kaynaklı pozitronlar yaklaşık 4 milimetre yarıçaplı bir küresel hacimde yokoluş ışınması gerçekleştirebilecektir.

Bu durum görüntülenmek istenilen bölgenin olduğundan daha hacimli görünmesine yol açabilir. Ancak bu konuda belirleyici görüş radyasyon onkolojisi profesyonellerine aittir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Report on molybdenum-99 production for nuclear medicine-2010-2020** (t.y.). Erişim Tarihi: 19.04.2020, Erişim Adresi: [https://www.oecd-neo.org/med-radio/docs/200902\\_AIPESMolySupplyReport.pdf](https://www.oecd-neo.org/med-radio/docs/200902_AIPESMolySupplyReport.pdf). (s.12)
- [2] **Los Alamos National Laboratory: MCNP Home Page**. (t.y.). Erişim Tarihi: 19.04.2020, Erişim Adresi: <https://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov/index.shtml>
- [3] **Bilgisayar Simülasyonları Genel Sınıflandırmaları** (t.y.). Erişim Tarihi: 19.04.2020, Erişim Adresi: <https://plato.stanford.edu/entries/simulations-science/>
- [4] **GNU Octave Yazılım Dili** (t.y.). Erişim Tarihi: 19.04.2020, Erişim Adresi: <https://www.gnu.org/software/octave/about.html>
- [5] **What is JANIS? - OECD Nuclear Energy Agency**. (t.y.). Erişim Tarihi: 19.04.2020, Erişim Adresi: <https://www.oecd-neo.org/janis/whatisjanis.html>
- [6] **SRIM** (t.y.). Erişim Tarihi: 19.04.2020, Erişim Adresi: <http://www.srim.org/SRIM/SRIMINTRO.htm>
- [7] **Charged Particle Cross Section Database | IAEA**. (t.y.). Erişim Tarihi: 19.04.2020, Erişim Adresi: <https://www.iaea.org/resources/databases/charged-particle-cross-section-database>
- [8] **Tárkányi, F. T., Ignatyuk, A. V., Hermanne, A., Capote, R., Carlson, B. V., Engle, J. W., Kellett, M. A., Kibédi, T., Kim, G. N., Kondev, F. G., Hussain, M., Lebeda, O., Luca, A., Nagai, Y., Naik, H., Nichols, A. L., Nortier, F. M., Suryanarayana, S. V., Takács, S., & Verpelli, M.** (2019). Recommended nuclear data for medical radioisotope production: diagnostic positron emitters. In *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* (Vol. 319, Issue 2). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6380-5>
- [9] **Tárkányi, F., Ditrói, F., Takács, S., Hermanne, A., Baba, M., Yuki, H., & Ignatyuk, A. V.** (2016). Investigation of activation cross sections of proton induced reactions on rhodium up to 70 MeV for practical applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 412(2016), 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.09.001>
- [10] **Tárkányi, F., Takács, S., Ditrói, F., Hermanne, A., Baba, M., Mohsena, B. M. A., & Ignatyuk, A. V.** (2015). New cross section data and review of production routes of medically used <sup>110m</sup>In. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with*

- [11] **Kakavand, T.; Mirzaii, M.; Eslami, M. . et al.** (2015). Experimental and Monte Carlo study on production of In-110m via Cd-nat(p,xn) reaction. *Journal Of Radioanalytical And Nuclear Chemistry*, 306(2), 423–427.
- [12] **Schmor, P. W.** (2010). Review of cyclotrons used in the production of radioisotopes for biomedical applications. *CYCLOTRONS 2010 - 19th International Conference on Cyclotrons and Their Applications*, 419–424.
- [13] **Holland, J. P., Williamson, M. J., & Lewis, J. S.** (2010). Unconventional Nuclides for Radiopharmaceuticals. *Molecular Imaging*, 9(1), 1–20. <https://doi.org/10.2310/7290.2010.00008>
- [14] **Lundqvist, H; Tolmachev, V; Bruskin, A; Einarsson, L; Malmberg, P.** (1995). Rapid separation of in-110 from enriched cd targets by thermal-diffusion. *Applied Radiation And Isotopes*, 46(9), 859–863. [https://doi.org/10.1016/0969-8043\(95\)00183-E](https://doi.org/10.1016/0969-8043(95)00183-E)
- [15] **Lundqvist, H; Scottrobson, S; Einarsson, L. et al.** (1991).  $^{10}\text{Sn}/^{110}\text{In}$ —A new generator system for positron emission tomography. *Applied Radiation And Isotopes*, 42(5), 447–450.
- [16] **Artun, O.** (2018). Calculation of the mass stopping powers of medical, chemical, and industrial compounds and mixtures. *Nuclear Technology and Radiation Protection*. <https://doi.org/10.2298/NTRP180608001A>
- [17] **Grimes, D. R., Warren, D. R., & Partridge, M.** (2017). An approximate analytical solution of the Bethe equation for charged particles in the radiotherapeutic energy range. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10554-0>
- [18] **Ghossain, M. O. E.-.** (2017). Calculations of Stopping Power, and Range of Ions Radiation (Alpha Particles) Interaction with Different Materials and Human Body Parts. *International Journal of Physics*, Vol. 5, 2017, Pages 92-98, 5(3), 92–98. <https://doi.org/10.12691/IJP-5-3-5>
- [19] **Sarsam, M. N., Saied, B. M., & Oudah, O. N.** (2013). Stopping Power for Proton Interacting with Aluminum, Beryllium and Carbon Using Different Formulas. *Journal of University of Al-Qadisiyah for Pure Science (Quarterly)*, 18.
- [20] **Sharifian, M., Sadeghi, M., & Alirezapour, B.** (2017). Utilization of GEANT to calculation of production yield for  $^{89}\text{Zr}$  by charge particles interaction on  $^{89}\text{Y}$ , natZr and natSr. *Applied Radiation and Isotopes*. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.06.005>
- [21] **Mun, S. C., Chai, J. S., Ghergherehchi, M., & ...** (2017). Study of Geant4 Simulation for Cyclotron Radioisotope Production in Various Target Size. 21st Int. Conf. on .... <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/cyclotrons2016/papers/mop20.pdf>



- [22] **Yuksel, D.** (2019). Hızlandırıcıya Dayalı Radyoizotop Üretimi ve Ülkemizde Nükleer Tıp : Güncel Durum Çalıştayı. (s.19) <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31773.26089>
- [23] **International Atomic Energy Agency.** (2006). Directory of Cyclotrons used for Radionuclide Production in Member States, (s.2) Update (Issue October).
- [24] **International Atomic Energy Agency.** (2008). Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice. IAEA Technical Report, 465, 230. (s. 201, 202, 208) <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.12.004>
- [25] **International Atomic Energy Agency.** (t.y.). Database of Cyclotrons for Radionuclide Production [Çevrimiçi Veritabanı]. Erişim Tarihi: 04 Nisan 2020 Erişim Adresi: <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/Cyclotron.aspx>
- [26] **Braccini, S.** (2016). Compact medical cyclotrons and their use for radioisotope production and multi-disciplinary research. Proceedings of the 21st International Conference on Cyclotrons and Their Applications, TUD01, 229–234. [www.jacow.org](http://www.jacow.org)
- [27] **Glenn G. Knoll.** (2010). Radiation Detection and Measurement (4th Edition). (s.1-27) In John Wiley & Sons, Inc.
- [28] **Gamow, G.** (1928). Quantum Theory of the Atomic Nucleus. Zeitschrift Für Physik, 51, 204–2012.
- [29] **Glenn G. Knoll.** (2010). Radiation Detection and Measurement (4th Edition). (s.29-56) In John Wiley & Sons, Inc.
- [30] **Podgorsak, Ervin B.** (2010). Radiation Physics for Medical Physicists, Second Edition. (s.431-434), Springer
- [31] **L’Annunziata, M. F.** (2016). Radioactivity: Introduction and History, From the Quantum to Quarks: Second Edition. (s.714-716), Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-19309-9>
- [32] **Podgorsak, Ervin B.** (2010). Radiation Physics for Medical Physicists, Second Edition. (s.513, 514), Springer
- [33] **Tsoufanidis, N., & Landsberger, S.** (2015). Measurement and Detection of Radiation. (s.100-103 ve s.112-116) CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18203>
- [34] **Leo, W. R.** (1994). Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. (s 29) Springer BerlinHeidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-57920-2>
- [35] **International Atomic Energy Agency.** (2012). Cyclotron produced radionuclides : operation and maintenance of gas and liquid targets. 4, 104. (s.30)
- [36] **Martin, J. E.** (2013). Physics for Radiation Protection, Third Edition. (s.100-101), Weinheim : Wiley-VCH-Verl.
- [37] **Martin, J. E.** (2013). Physics for Radiation Protection, Third Edition. (s.117), Weinheim : Wiley-VCH-Verl.

- [38] **National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory.** (t.y.). Search and plot nuclear structure and decay data interactively [Çevrimiçi Veritabanı]. Erişim Tarihi: 04 Nisan 2020 Erişim Adresi: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/decaysearchdirect.jsp?nuc=110IN&unc=nds>
- [39] **Physical Measurement Laboratory of NIST.** (t.y.). CODATA Internationally recommended 2018 values of the Fundamental Physical Constants [Çevrimiçi Veritabanı]. Erişim Tarihi: 04 Nisan 2020 Erişim Adresi: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Category?view=html&Atomic+and+nuclear.x=108&Atomic+and+nuclear.y=13>
- [40] **IAEA Nuclear Data Services.** (t.y.). Live Chart of Nuclides nuclear structure and decay data [Çevrimiçi Veritabanı]. Erişim Tarihi: 04 Nisan 2020 Erişim Adresi: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
- [41] **Charged Particle Cross Section Database | IAEA.** (t.y.). Erişim Tarihi: 04 Nisan 2020 Erişim Adresi: [https://www-nds.iaea.org/medical/positron\\_emitters.html](https://www-nds.iaea.org/medical/positron_emitters.html)
- [42] **Nuclear Energy Agency Nuclear Data Services.** (t.y.). Tables of reaction Q values for residual production cross-sections [Çevrimiçi Veritabanı]. Erişim Tarihi: 04 Nisan 2020 Erişim Adresi: <http://www.oecd-nea.org/janis/book/>
- [43] **TRIM (Version "SRIM-2013.00")** [Computer software] James F. Ziegler (2013). The Stopping and Range of Ions in Matter, <<http://www.srim.org/>> Erişim Tarihi: 11 Eylül 2019.

## **EKLER**

**EK A:** Nükleer Reaksiyon Eşik Enerjisi Hesaplayıcı Program GNU-Octave Kodları.

**EK B:** Parçacık Demet Erimi Hesaplayıcı Benzetim Programı GNU-Octave Kodları.

**EK C:** Ürün ve Aktivite Hesaplayıcı Benzetim Programı GNU-Octave Kodları.

**EK D:** Pozitron Erimi Hesaplayıcı Benzetim Programı GNU-Octave Kodları.





## EK A

Nükleer Reaksiyon Eşik Enerjisi Hesablayıcı Program GNU-Octave Kodları.

```
%Reaksiyon Q Degerleri.
%JANIS Book of proton-induced cross-sections OECD NEA Data Bank.
%Q1=-7.58200 MeV;%Ag107(He4,n)In110 Reaksiyon Enerjisi (MeV)
%Q2=-6.88471 MeV;%Cd110(d,2n)In110 Reaksiyon Enerjisi (MeV)
%Q3=-4.66035 MeV;%Cd110(p,n)In110 Reaksiyon Enerjisi (MeV)
clear all;close all;clc
%Atomik ve Nükleer Sabitler: (https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html)
%Nüklid Kutle Degeri:
%(https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html)
Ag107=106.905091;%akb olarak element kutlesi.
Cd110=109.903007;%akb olarak element kutlesi.
In110=109.907171;%akb olarak element kutlesi.
p=1.007825;%akb olarak parcacik kutlesi.
n=1.008664;%akb olarak parcacik kutlesi.
d=2.014101;%akb olarak parcacik kutlesi.
t=3.016049;%akb olarak parcacik kutlesi.
He3=3.016029;%akb olarak parcacik kutlesi.
He4=4.002603;%akb olarak parcacik kutlesi.
akb=931.494102;%MeV olarak ortalama nükleon kutle enerji esdegeri.

%Hesaplanan Reaksiyon Q Degerleri. Denklem (3.2)
Q1=(Ag107+He4-(In110+n))*akb
Q2=(Cd110+d-(In110+2*n))*akb
Q3=(Cd110+p-(In110+n))*akb

%Hesaplanan Reaksiyon Esik Enerji Degerleri. Denklem (3.3)
Eth1=-Q1*(Ag107+He4)/Ag107%Al27(p,d+He4)Na22 Reaksiyon Esik Enerjisi
(MeV)
Eth2=-Q2*(Cd110+d)/Cd110%Al27(p,n+p+He4)Na22 Reaksiyon Esik Enerjisi
(MeV)
Eth3=-Q3*(Cd110+p)/Cd110%Al27(p,t+He3)Na22 Reaksiyon Esik Enerjisi (MeV)

disp".....MeV"
```



## EK B

Parçacık Demet Erimi Hesaplayıcı Benzetim Programı GNU-Octave Kodları.

```
% Ag107(He4,n)In110 REAKSIYONU
```

```
clear all;close all;clc
```

```
c=3*10^8;%(m/s)isik hizi.
me=0.511;%(MeV)elektron kutlesi enerji esdegeri.
Na=6.022*10^26;%(nukleon/kg)avagadro sayisi.
re=2.818*10^-15;%(metre)klasik elektron yaricapi.
z=2;%(Mermi parcacik proton sayisi (elementer yuk cinsinden elektriksel yuku).
mp=3727.3794066;%(MeV)mermi parcacik kütle enerji degeri.
Z=47;%(Hedef materyal atom numarası.
A=106.905091;%(Hedef Materyal Bagil Atom Kutlesi.(akb)
d=10473;%(kg/m3)Hedef materyal yogunlugu.
dE=0.1;%(MeV)Mermi parcacik kinetik enerji degisimi.
E=30:-dE:0;
E2=dlmread('Aga110In_Enrj.txt');
tesir=dlmread('Aga110In_Tesir.txt');%(milibarn)
I=(9.76+58.8*Z^-1.19)*Z*10^-6;%(MeV)Hedef materyal iyonizasyon potansiyeli.
Nv=d*Na/A;%(atom/m3)parcacigin icinde yolaldigi materyal birimhacim atom
sayisi.
for k=1:length(E)
gamma2=((E + mp)/mp).^2;%(lorenz donusum katsayi karesi.
beta2=1-(1./gamma2);%(v/c)^2.
dEdx=4*pi*re^2*me*z^2*Z*Nv./beta2.*(log(2*me*beta2.*gamma2/I)-beta2);
end
for m=1:length(E)
dx=(1./dEdx).*dE;
R(m)=sum(dx(1:m));
end
RMAX=max(R)

dlmwrite("AgaEnerjiErim.txt",[E(:),R(:)])
figure(1)
plot(E2,tesir,"or");
title('107Ag(4He,n)110In REAKSIYONU')
xlabel('ENERJİ (MeV)')
ylabel('TESİR KESİTİ (milibarn)')
grid on
figure(2)
plot(R,E,"or")
title('107Ag(4He,n)110In REAKSIYONU')
xlabel('PARCACIK DEMETİ ERİMİ (metre)')
ylabel('PARCACIK DEMETİ ENERJİ DEĞİSİMİ (MeV)')
grid on
```

```
% Cd110(d,2n)In110 REAKSIYONU
```

```

clear all;close all;clc

c=3*10^8;%(m/s)isik hizi.
me=0.511;%(MeV)elektron kutlesi enerji esdegeri.
Na=6.022*10^26;%(nukleon/kg)avagadro sayisi.
re=2.818*10^-15;%(metre)klasik elektron yarıçapı.
z=1;%(Mermi parçacık proton sayısı (elementer yük cinsinden elektriksel yükü)).
mp=1875.612942;%(MeV)mermi parçacık kütle enerji değeri.
Z=48;%(hedef materyal atom numarası).
A=109.903007;%(Hedef Materyal Bagil Atom Kutlesi.(akb)
d=8642;%(kg/m3)Hedef materyal yoğunluğu.
dE=0.1;%(MeV)Mermi parçacık kinetik enerji değisimi.
E=30:-dE:0;
E2=dlmread('Cdd110In_Enrj.txt');
tesir=dlmread('Cdd110In_Tesir.txt');%(milibarn)
I=(9.76+58.8*Z^-1.19)*Z*10^-6;%(MeV)Hedef materyal iyonizasyon potansiyeli.
Nv=d*Na/A;%(atom/m3)parçacığın icinde yolaldığı materyal birimhacim atom
sayisi.
for k=1:length(E)
gamma2=((E + mp)/mp).^2;%(lorentz donusum katsayı karesi.
beta2=1-(1./gamma2);%(v/c)^2.
dEdx=4*pi*re^2*me*z^2*Z*Nv./beta2.*(log(2*me*beta2.*gamma2/I)-beta2);
end
for m=1:length(E)
dx=(1./dEdx).*dE;
R(m)=sum(dx(1:m));
end
RMAX=max(R)

dlmwrite('CddEnerjiErim.txt',[E(:),R(:)])
figure(1)
plot(E2,tesir,"or");
title('110Cd(d,2n)110In REAKSIYONU')
xlabel('ENERJİ (MeV)')
ylabel('TESİR KESİTİ (milibarn)')
grid on
figure(2)
plot(R,E,"or")
title('110Cd(d,2n)110In REAKSIYONU')
xlabel('PARCACIK DEMETİ ERİMİ (metre)')
ylabel('PARCACIK DEMETİ ENERJİ DEĞİSİMİ (MeV)')
grid on

% Cd110(p,n)In110 REAKSIYONU

clear all;close all;clc

c=3*10^8;%(m/s)isik hizi.
me=0.511;%(MeV)elektron kutlesi enerji esdegeri.
Na=6.022*10^26;%(nukleon/kg)avagadro sayisi.

```



```

re=2.818*10^-15;%(metre)klasik elektron yarıçapı.
z=1;%Mermi parçacık proton sayısı (elementer yük cinsinden elektriksel yükü).
mp=938.272088;%(MeV)mermi parçacık kütle enerji değeri.
Z=48;%hedef materyal atom numarası.
A=109.903007;%Hedef Materyal Bagil Atom Kutlesi.(akb)
d=8642;%(kg/m3)Hedef materyal yoğunluğu.
dE=0.1;%(MeV)Mermi parçacık kinetik enerji değisi.
E=30:-dE:0;
E2=dlmread('Cdp110In_Enrj.txt');
tesir=dlmread('Cdp110In_Tesir.txt');%(milibarn)
I=(9.76+58.8*Z^-1.19)*Z*10^-6;%(MeV)Hedef materyal iyonizasyon potansiyeli.
Nv=d*Na/A;%(atom/m3)parçacığın içinde yolaldığı materyal birimhacim atom
sayısı.
for k=1:length(E)
gamma2=((E + mp)/mp).^2;%lorentz donusum katsayi karesi.
beta2=1-(1./gamma2);%(v/c)^2.
dEdx=4*pi*re^2*me*z^2*Z*Nv./beta2.*(log(2*me*beta2.*gamma2/I)-beta2);
end
for m=1:length(E)
dx=(1./dEdx).*dE;
R(m)=sum(dx(1:m));
end
RMAX=max(R)

dlmwrite("CdpEnerjiErim.txt",[E(:),R(:)])
figure(1)
plot(E2,tesir,"or");
title('110Cd(p,n)110In REAKSIYONU')
xlabel('ENERJİ (MeV)')
ylabel('TESİR KESİTİ (milibarn)')
grid on
figure(2)
plot(R,E,"or")
title('110Cd(p,n)110In REAKSIYONU')
xlabel('PARCACIK DEMETİ ERİMİ (metre)')
ylabel('PARCACIK DEMETİ ENERJİ DEĞİSİMİ (MeV)')
grid on

```



## EK C

Ürün ve Aktivite Hesaplayıcı Benzetim Programı GNU-Octave Kodları.

% Ag107(He4,n)In110 REAKSIYONU

clear all; close all;clc

c=3\*10^8;%(m/s)isik hizi.

me=0.511;%(MeV)elektron kutlesi enerji esdegeri.

Na=6.022\*10^26;%(nukleon/kg/m3)avagadro sayisi.

re=2.818\*10^-15;%(metre)klasik elektron yaricapi.

z=2;%(Mermi parcacik proton sayisi (elemanter yuk cinsinden elektriksel yuku).

mp=3727.379406;%(MeV)mermi parcacik kütle enerji esdegeri.

Z=47;%(Hedef materyal atom numarası).

A=106.905091;%(Hedef Materyal Bagil Atom Kutlesi.(akb)

d=10473;%(kg/m3)Hedef materyal yogunlugu.

dE=0.1;%(MeV)Mermi parcacik kinetik enerji degisimi.

E=dlmread('Aga110In\_Enrj2.txt');

I=(9.76+58.8\*Z^-1.19)\*Z\*10^-6;%(MeV)Hedef materyal iyonizasyon potansiyeli.

Nv=d\*Na/A;%(atom/m3)parcacigin icinde yolaldigi materyal birimhacim atom sayisi.

for k=1:length(E)

gamma2=((E + mp)/mp).^2;%(lorentz donusum katsayi karesi.

beta2=1-(1./gamma2);%(v/c)^2.

dEdx=4\*pi\*re^2\*me\*z^2\*Z\*Nv./beta2.\*(log(2\*me\*beta2.\*gamma2/I)-beta2);

end

for m=1:length(E)

dx=(1./dEdx).\*dE;

R(m)=sum(dx(1:m));

end

RMAX=max(R)

T=4146;%(saniye)Urun yariomru(69.1 dakikaya denk).

t=1:42000;%(saniye)Aktivasyon isinlanma suresi(yaklasik 10 yariömüre denk).

x=RMAX;%(metre)Parcacik akimina paralel hedef materyal kalinalik.

kesit=1;%(metrekare)akima maruz kalan birim kesit.

V=x\*kesit;%(metreküp)Hedef Materyal Hacmi.

akim=1\*10^-6;%(1mikroamper-->amper=Coulomb/saniye).

aki0=(akim\*10^19\*(5/8))/(z\*kesit);% Hedefe saniyede birim yüzeye gonderilen parcacik.

N01=Na\*V\*d/A;%(Baslangicta hedef materyal atom sayisi).

tesir=dlmread('Aga110In\_Tesir2.txt');%(milibarn).

for k=1:length(tesir)

dn(k)=dx(k)\*tesir(k)\*(10^-31)\*Nv;

dN(k)=sum(dn(1:k));

end

for k=1:length(tesir)

aki=aki0\*exp(-[0;dN(:)]);

end

for m=1:length(tesir)

```

for n=1:length(t)
N(n,m)=aki(m)*tesir(m)*(10^-31)*dx(m)*(N01/x)*(exp(-aki(m)*tesir(m)*(10^-
31)*t(n))-exp(-(log(2)/T)*t(n)))/((log(2)/T)-aki(m)*tesir(m)*(10^-31));
end
end
Ndt=sum(N,2);
NdE=N(length(t,:));
for k=1:length(t)
A=(log(2)/T).*Ndt;
oran(k)=Ndt(k)/N01;
end
Amax=max(Ndt)*(log(2)/T)
Asp=Amax/(1000*V*d)

dlmwrite("AgaSureAktvt.txt",[t(:),A(:)])
figure(1)
stem(R,NdE)
title('Ag107(He4,n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('PARCACIK ERIMI (metre)')
ylabel('URUN RADYONU KLID SAYISI (Çekirdek)')
grid on
figure(2)
plot(t,A,".r")
title('Ag107(He4,n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('ISINLAMA SURESI (saniye)')
ylabel('URUN RADYONU KLID AKTIVITESI (Bq)')
grid on
figure(3)
x=t;y=R;[x,y]=meshgrid(x,y);z=N;surf(z);colormap('jet');
title('Ag107(He4,n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('HEDEF MATERYAL BAGIL DERINLIK')
ylabel('ISINLAMA SURESI (Saniye)')
zlabel('OLUSAN RADYONU KLID SAYISI')

%'Cd110(d,2n)In110 REAKSIYONU

clear all;close all;clc

c=3*10^8;%(m/s)isik hizi.
me=0.511;%(MeV)elektron kutlesi enerji esdegeri.
Na=6.022*10^26;%(nukleon/kg/m3)avagadro sayisi.
re=2.818*10^-15;%(metre)klasik elektron yariçapi.
z=1;%(Mermi parçacik proton sayisi (elemanter yuk cinsinden elektriksel yuku).
mp=1875.612942;%(MeV)mermi parçacik kütle enerji degeri.
Z=48;%(hedef materyal atom numarası.
A=109.903007;%(Hedef Materyal Bagil Atom Kutlesi.(akb)
d=8642;%(kg/m3)Hedef materyal yogunlugu.
dE=0.1;%(MeV)Mermi parçacik kinetik enerji degisimi.
E=dlmread('Cdd110In_Enrj2.txt');
I=(9.76+58.8*Z^-1.19)*Z*10^-6;%(MeV)Hedef materyal iyonizasyon potansiyeli.

```

```

Nv=d*Na/A;%(atom/m3)parcacigin icinde yolaldigi materyal birimhacim atom
sayisi.
for k=1:length(E)
gamma2=((E + mp)/mp).^2;%lorentz donusum katsayi karesi.
beta2=1-(1./gamma2);%(v/c)^2.
dEdx=4*pi*re^2*me*z^2*Z*Nv./beta2.*(log(2*me*beta2.*gamma2/I)-beta2);
end
for m=1:length(E)
dx=(1./dEdx).*dE;
R(m)=sum(dx(1:m));
end
RMAX=max(R)-min(R)

T=4146;%(saniye)Urun yariomru(69.1 dakikaya denk).
t=1.42000;%(saniye)Aktivasyon isinlanma suresi(yaklasik 10 yariömüre denk).
x=RMAX;%(metre)Parcacik akimina paralel hedef materyal kalinlik.
kesit=1;%(metrekare)akima maruz kalan birim kesit.
V=x*kesit;%(metreküp)Hedef Materyal Hacmi.
akim=1*10^-6;%(1mikroamper-->amper=Coulomb/saniye).
aki0=(akim*10^19*5/8)/(z*kesit);% Hedefe saniyede birim yüzeye gonderilen
parcacik.
N01=Na*V*d/A;%Baslangicta hedef materyal atom sayisi.
tesir=dlmread('Cdd110In_Tesir2.txt');%(milibarn).
for k=1:length(tesir)
dn(k)=dx(k)*tesir(k)*(10^-31)*Nv;
dN(k)=sum(dn(1:k));
end
for k=1:length(tesir)
aki=aki0*exp(-[0;dN(:)]);
end
for m=1:length(tesir)
for n=1:length(t)
N(n,m)=aki(m)*tesir(m)*(10^-31)*dx(m)*(N01/x)*(exp(-aki(m)*tesir(m)*(10^-
31)*t(n))-exp(-(log(2)/T)*t(n)))/((log(2)/T)-aki(m)*tesir(m)*(10^-31));
end
end
Ndt=sum(N,2);
NdE=N(length(t),:);
for k=1:length(t)
A=(log(2)/T)*Ndt;
oran(k)=Ndt(k)/N01;
end
Amax=max(Ndt)*(log(2)/T)
Asp=Amax/(1000*V*d)

dlmwrite("CddSureAktvt.txt",[t(:),A(:)])
figure(1)
stem(R,NdE)
title('Cd110(d,2n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('PARCACIK ERIMI (metre)')

```

```

ylabel('URUN RADYONU KLID SAYISI (Çekirdek)')
grid on
figure(2)
plot(t,A,".r")
title('Cd110(d,2n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('ISINLAMA SURESI (saniye)')
ylabel('URUN RADYONU KLID AKTIVITESI (Bq)')
grid on
figure(3)
x=t;y=R;[x,y]=meshgrid(x,y);z=N;surf(z);colormap('jet')
title('Cd110(d,2n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('HEDEF MATERYAL BAGIL DERINLIK')
ylabel('ISINLAMA SURESI (Saniye)')
zlabel('OLUSAN RADYONU KLID SAYISI')

% Cd110(p,n)In110 REAKSIYONU

clear all;close all;clc

c=3*10^8;%(m/s)isik hizi.
me=0.511;%(MeV)elektron kutlesi enerji esdegeri.
Na=6.022*10^26;%(nukleon/kg/m3)avagadro sayisi.
re=2.818*10^-15;%(metre)klasik elektron yariçapı.
z=1;%(Mermi parçacik proton sayisi (elemantar yuk cinsinden elektriksel yuku).
mp=938.272088;%(MeV)mermi parçacik kütle enerji degeri.
Z=48;%(hedef materyal atom numarası.
A=109.903007;%(Hedef Materyal Bagil Atom Kutlesi.(akb)
d=8642;%(kg/m3)Hedef materyal yogunlugu.
dE=0.1;%(MeV)Mermi parçacik kinetik enerji degisimi.
E=dlmread('Cdp110In_Enrj2.txt');
I=(9.76+58.8*Z^-1.19)*Z*10^-6;%(MeV)Hedef materyal iyonizasyon potansiyeli.
Nv=d*Na/A;%(atom/m3)parçacigin icinde yolaldigi materyal birimhacim atom sayisi.
for k=1:length(E)
gamma2=((E + mp)/mp).^2;%(lorentz donusum katsayi karesi.
beta2=1-(1./gamma2);%(v/c)^2.
dEdx=4*pi*re^2*me*z^2*Z*Nv./beta2.*(log(2*me*beta2.*gamma2/I)-beta2);
end
for m=1:length(E)
dx=(1./dEdx).*dE;
R(m)=sum(dx(1:m));
end
RMAX=max(R)-min(R)
T=4146;%(saniye)Urun yariomru(69.1 dakikaya denk).
t=1:42000;%(saniye)Aktivasyon isinlanma suresi(yaklasik 10 yariömüre denk).
x=RMAX;%(metre)Parçacik akimina paralel hedef materyal kalınlık.
kesit=1;%(metrekare)akima maruz kalan birim kesit.
V=x*kesit;%(metreküp)Hedef Materyal Hacmi.
akim=1*10^-6;%(1mikroamper-->amper=Coulomb/saniye).

```

```

aki0=(akim*10^19*5/8)/(z*kesit);% Hedefe saniyede birim yüzeye gonderilen
parcacik.
N01=Na*V*d/A;%Baslangicta hedef materyal atom sayisi.
tesir=dlmread('Cdp110In_Tesir2.txt');%(milibarn).
for k=1:length(tesir)
dn(k)=dx(k)*tesir(k)*(10^-31)*Nv;
dN(k)=sum(dn(1:k));
end
for k=1:length(tesir)
aki=aki0*exp(-[0;dN(:)]);
end
for m=1:length(tesir)
for n=1:length(t)
N(n,m)=aki(m)*tesir(m)*(10^-31)*dx(m)*(N01/x)*(exp(-aki(m)*tesir(m)*(10^-
31)*t(n))-exp(-(log(2)/T)*t(n)))/((log(2)/T)-aki(m)*tesir(m)*(10^-31));
end
end
Ndt=sum(N,2);
NdE=N(length(t),:);
for k=1:length(t)
A=(log(2)/T).*Ndt;
oran(k)=Ndt(k)/N01;
end
Amax=max(Ndt)*(log(2)/T)
Asp=Amax/(1000*V*d)

dlmwrite("CdpSureAktvt.txt",[t(:),A(:)])
figure(1)
stem(R,NdE)
title('Cd110(p,n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('PARCACIK ERIMI (metre)')
ylabel('URUN RADYONU KLID SAYISI (Çekirdek)')
grid on
figure(2)
plot(t,A,"r")
title('Cd110(p,n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('ISINLAMA SURESI (saniye)')
ylabel('URUN RADYONU KLID AKTIVITESI (Bq)')
grid on
figure(3)
x=t;y=R;[x,y]=meshgrid(x,y);z=N;surf(z);colormap('jet')
title('Cd110(p,n)In110 REAKSIYONU')
xlabel('HEDEF MATERYAL BAGIL DERINLIK')
ylabel('ISINLAMA SURESI (Saniye)')
zlabel('OLUSAN RADYONU KLID SAYISI')

```





## EK D

Pozitron Erimi Hesaplayıcı Benzetim Programı GNU-Octave Kodları.

% İnsan doku muadili "TISSUE (ICRU)" içerisinde pozitronun CSDA erimini hesaplayıcı program kodları:

```
clear all;close all;clc
```

```
c=3*10^8;%(m/s)isik hizi.
```

```
me=510.998;%(keV)elektron kutlesi enerji esdegeri.
```

```
Na=6.022*10^26;%(nukleon/kg)avagadro sayisi.
```

```
re=2.818*10^-15;%(metre)klasik elektron yarıçapı.
```

```
z=1;%Mermi parçacık proton sayısı (elementer yük cinsinden elektriksel yükü).
```

```
mp=510.998;%(keV)mermi parçacık kütle enerji değeri.
```

```
Zef=1*0.05+6*0.655+7*0.0111+8*0.2839;%TISSUE (ICRU 4 bile?en) efektif atom numarası.
```

```
Aef=1*0.05+12*0.655+14*0.0111+16*0.2839;%TISSUE (ICRU4) Efektif Bagil Atom Kutlesi.(akb)
```

```
d=1000;%(kg/m3)Hedef materyal yoğunluğu.(EStar)
```

```
dE=1;%(keV)Mermi parçacık kinetik enerji değişimi.
```

```
E=1000:-dE:0;%(keV)ln110 bozunum ortalama pozitron enerjisi.
```

```
I=0.0679%*(keV)Hedef materyal iyonizasyon potansiyeli.(NIST)
```

```
Nv=d*Na/Aef;%(atom/m3)parçacığın içinde yolaldığı materyal birimhacim molekül sayısı.
```

```
for k=1:length(E)
```

```
gamma=((E + mp)/mp);
```

```
gamma2=((E + mp)/mp).^2;%lorentz donusum katsayı karesi.
```

```
beta=(1-(1./gamma2)).^(1/2);
```

```
beta2=1-(1./gamma2);%(v/c)^2.
```

```
dEdxe=(4*pi*re^2*me*z^2*Zef*Nv./beta2).*(log(me*beta.*gamma.*sqrt(gamma-1)/I)+(1./(2*gamma2)).*(((gamma-1).^2/8)+1-(gamma2+2*gamma-1).*log(2)));
```

```
dEdxp=(4*pi*re^2*me*z^2*Zef*Nv./beta2).*(log(me*beta.*gamma.*sqrt(gamma-1)/I)-
```

```
(beta2/24).*(23+14./(gamma+1)+10./(gamma+1).^2+4./(gamma+1).^3)+log(2)/2);
```

```
end
```

```
for m=1:length(E)
```

```
dx=(1./dEdxe).*dE;
```

```
dxp=(1./dEdxp).*dE;
```

```
Re(m)=sum(dx(1:m));
```

```
Rp(m)=sum(dxp(1:m));
```

```
end
```

```
RMAXe=max(Re)
```

```
RMAXp=max(Rp)
```

```
plot(Rp,E,'or')
```

```
title('TISSUE (ICRU4) POZITRON ERİM-ENERJİ')
```

```
xlabel('ORTAMDA POZITRON ERİMİ (metre)')
```

```
ylabel('POZITRON ENERJİ DEĞİŞİMİ (keV)')
```

```
grid on.
```



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad-Soyad** : Mustafa RABUŞ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 22.02.1977/Besni  
**E-posta** : mstfrbs@yahoo.com

### **ÖĞRENİM DURUMU:**

- **Lisans** : 2000, YTÜ, Fen Edb.Fakültesi, Fizik Lisans.

### **MESLEKİ DENEYİM:**

- 17.07.2000-17.08.2000: TAEK ÇNAEM Staj.
- 02.05.2001-03.09.2001: İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü İTÜ Triga Mark-II Reaktör Teknik Personel.
- 2002 - ... : MEB Ortaöğretim Fizik Öğretmenliği.