

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**^{44}Sc 'ÜN ÜRETİMİ İÇİN
YENİ BİR $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ JENERATÖR
SİSTEMİNİN TASARLANMASI**

Buğra Gökhun BULDUK

Danışman : Prof. Dr. Perihan ÜNAK

Nükleer Bilimler Anabilim Dalı
Nükleer Uygulamalar Doktora Programı

İzmir
2021

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “ ^{44}Sc ’ün Üretimi için Yeni bir $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ Jeneratör Sisteminin Tasarlanması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

18/08/2021

İmzası

Buğra Gökhun BULDUK



ÖZET

**^{44}Sc 'ÜN ÜRETİMİ İÇİN
YENİ BİR $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ JENERATÖR
SİSTEMİNİN TASARLANMASI**

BULDUK, Buğra Gökhan

Doktora Tezi, Nükleer Bilimler Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Perihan ÜNAK

Ağustos 2021, 70 sayfa

Son günlerde yeni PET radyonüklidlerine olan ilgi gittikçe artmaktadır. Özellikle metalik özellik gösteren bu radyonüklidlerin üretim şekilleri, kullanım alanları ve çalışmaları her geçen gün daha da artmaktadır. Uygun yarıömürlü, teşhis ve tedavi kullanım kolaylığı sağlayabilen bu tarz problemler ile yapılan deneyler uluslararası çalışmalarda sıklıkla mevcuttur. Bunların içinde jeneratör ürünü olanların çalışmalara uygun oluşu bu alana daha farklı bir ilginin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Her jeneratörün belirli bir ömrü vardır ve bu ömür ne kadar uzun olursa jeneratör o kadar kullanışlı hale gelir. Bu tezde kullanılan ^{44}Ti ana izotopunun yarıömrü yaklaşık 60 yıl olup tek bir jeneratörle uzun yıllar çalışılmaya elverişli olacaktır. Bu jeneratörden elue edilecek olan ^{44}Sc ile yarı ömrü yaklaşık 4 saat olması ve pozitron salınımı yapmasından dolayı ideal bir PET radyonüklidi olma yolunda önemli bir adım atılmıştır.

İlk önce ana radyoizotop olan ^{44}Ti 'ün üretimi için koşullar teorik olarak (modelleme) ve inaktif izotopları kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için kullanılacak hedef malzeme ^{45}Sc 'in oksitli nanokompozitlerinden oluşturulmuştur. Üretim için en uygun reaksiyon ($p,2n$) reaksiyonu olup, diğer muhtemel radyonüklid safsızlıkları belirli bir soğuma süresinden sonra ihmal edilebilir seviyeye indirgenebilmektedir. Üretim simülasyonu bir proton

hızlandırıcıda (siklotron) gerçekleştirilip bu proton demetinin enerjisi, akısı, açısı ve ıslama süresi belirli modelleme kodları kullanılarak hesaplanmıştır. Bunların en başında Empire3.2/Malta kodu gelmektedir. Bu kod istenilen reaksiyon için belirli enerjilerde belirli reaksiyon tesir kesitlerini vermektedir. Bu tesir kesitlerinden yola çıkılarak MATLAB kodu ile ıslama sonucu oluşacak aktivite oranları da hesaplanmıştır. Hangi izotopların oluşabileceği de Empire3.2/Malta koduyla belirlenebilmektedir. Bunların hepsinin olabilmesi için reaksiyon bağ enerjileri, eşik enerjiler ve minimum Coulomb bariyeri enerjileri de göz önünden bulundurulmalıdır. Ayrıca bombardıman sırasında oluşacak enerji düşüşünün de SRIM-TRIM ile modellenmesi ve bu düşüşün ne kadar olabileceği hesaplanmıştır.

Bombardıman sonrası belirli bir soğuma süresi beklendikten sonra oluşacak ana izotop olan ^{44}Ti 'ün hedef sisteminden ayrılması işlemi gerçekleştirilmesi simüle edilmiştir. Ayırma ve saflaştırma çalışmalarının optimizasyonu inaktif Ti ve Sc kullanılarak yapılmıştır. Bunun için bir reçine sistemi tasarlanmıştır. Bu reçine sistemi literatür bilgilerine dayanarak göre hydroxamate veya dowex reçinesidir. Kimyasal ayırma optimizasyonu yapıldıktan sonra safsızlıklardan arındırılıp HPLC sisteminde incelenmesi mümkün hale gelmiştir.

Kullanıma hazır duruma gelen ^{44}Ti daha sonra jeneratöre yüklenmek üzere anyon değişim kromatografisi yöntemi ile elusyon işlemleri başlatılmıştır. Jeneratör, $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ jeneratörü ile benzer özellik gösterdiğinden kullanımının kolay olacağı bilinmektedir. Elde edilen ^{44}Sc kimyasal saflık analizi için yine HPLC sistemi ile incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: ^{44}Sc , ^{44}Ti , $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ jeneratörü, siklotron, $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$, hydroxamate reçinesi.

ABSTRACT

ANALYZING OF ^{44}Sc PRODUCTION

CONDITIONS FOR A NEW $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$

GENERATOR SYSTEM

BULDUK, Buğra Gökhan

PhD , Department of Nuclear Sciences

Supervisor: Prof. Dr. Perihan ÜNAK

August 2021, 70 pages

Recently, interest in new PET radionuclides has been increasing. The production forms, usage areas and studies of these isotopes, which have metallic characteristics in particular, are developing more and more every day. Experiments with such probes, which can provide convenient half-life, diagnostic and therapeutic ease of use, are often available in international studies. The fact that the generator products are suitable for their operation in these areas has provided a different interest in this area.

Each generator has a specific lifetime. The longer they are, the simpler the use. The chosen ^{44}Ti main isotope for this study has a half-life of about 60 years and will work well for many years with this single generator. The ^{44}Sc , which has derived from this generator, has taken an important step towards becoming an ideal PET radionuclide because it has a half-life of about 4 hours and does positron emission.

First, the production of ^{44}Ti , the main radioisotope, has considered. The target material to be used for this would be the oxidized nanocomposites of ^{45}Sc . The desired reaction for production is (p,2n) reaction, and other possible isotopes can be reduced to negligible level after a certain cooling time. The production has carried out in a proton accelerator (cyclotron) and the energy, flux, angle and duration of the proton beam has calculated using specific modeling codes. At the

top of them is the Empire3.2/Malta code. This code gives specific reaction cross-sections for the desired reaction at certain energies. In these cross-sections, the activity rates that occurred as a result of irradiation with MATLAB code has also calculated. Which isotopes can be formed can also be determined by means of Empire3.2/Malta. The reaction binding energies, threshold energies and minimum Coulomb barrier energies must also be considered to be all of these. In addition, the modeling of the energy drop (stopping power) during bombardment with SRIM-TRIM and how much of this decrease can be calculated.

After the bombardment, the main isotope ^{44}Ti has separated from the target system after a certain cooling-down period has elapsed. Separation and purification optimizations has done using inactive Ti and Sc. A resin system has designed for this which is planned as hydroxamate or dowex resin according to literature information. Once the chemical separation has done, it was possible to purify it from the impurities and examine it in the HPLC system.

The elution process has started by the anion exchange chromatography method to load the generator to the ready state. The generator has thought to be easy to use since it shows similar characteristics with the $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator. The resulting ^{44}Sc has further analyzed by HPLC system for chemical purity analysis.

Keywords: ^{44}Sc , ^{44}Ti , $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ generator, cyclotron, $^{45}\text{Sc}(\text{p},2\text{n})^{44}\text{Ti}$, hydroxamate resin.

ÖNSÖZ

Son zamanlarda siklotron ürünü olarak PET radyonüklidlerinin üretimi hem ekonomik oluşu hem de uygulanan yöntemin kolaylığı bakımından hız kazanmıştır. Özellikle yeni metalik özellik gösteren PET radyonüklidlerinin organ tutulumlarının daha iyi olduğu ve bu yüzden iyi çözünürlük gösterdiği ispatlanmaktadır.

Bir diğer yöntem olan jeneratör ürünü radyonüklidler ise kullanım açısından en basit üretim yöntemidir. Ana radyoizotopun sisteme yüklenmesi ve belirli kimyasallarla elusyonu sonucu bu işlem saniyeler sürmektedir. Jeneratörlerin bir diğer özelliği ise kullanımının ana radyonüklide bağlı olarak uzun süre kullanımını mümkün kılmaktadır. Bu projede ana radyonüklid olan ^{44}Ti 'ün yarı ömrü yaklaşık 60 yıl olduğundan tek bir jeneratörün kullanımı uzun yıllar mümkün olacaktır. Bu kullanım kolaylığı ve ekonomik açıdan büyük önem teşkil etmektedir.

Bu tez kapsamında yeni bir PET radyonüklidi olan ^{44}Sc 'ün bir jeneratör ürünü olarak üretilebilirliği teorik ve deneysel çalışmalarla incelenmiştir.

İZMİR

18/08/2021

Buğra Gökhun BULDUK



İÇİNDEKİLER**Sayfa**

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xviii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Radyonüklid Jeneratörleri	3
2.2. Pozitron Emisyon Tomografisi (PET)	4
2.3. PET Radyonüklidi Olarak Scandium-44	5
2.4. Siklotronlar ve Siklotronlarda Radyonüklid Üretimi	6
2.5. Sintilasyon Dedektörleri	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM	8
3.1. Teorik Hesaplamalar	8

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.1.1. Bozunma Enerjisi (Q-Value) ve Eşik (Threshold) Enerjisi	8
3.1.1.1. Bağlanma Enerjisi	8
3.1.1.2. Eşik Enerjisi	9
3.1.2. Aktivite	10
3.1.3. Empire3.2/MALTA	12
3.1.4. Durdurucu Güç (Stopping Power)	16
3.1.4.1. SRIM (Stopping Powers and Ranges in All Elements) 2013	16
3.2. Deneysel Çalışmalar	19
3.2.1. Kullanılan Cihazlar ve Kimyasallar	19
3.2.1.1. Kullanılan Cihazlar	19
3.2.1.2. Kullanılan Kimyasallar	19
3.3 Hedef Sisteminin Hazırlanması.....	20
3.4 Hydroxamate Reçinesinin Hazırlanması ve Sc^{+3} , Ti^{+4} ve Ca^{+2} ile Yapılan Ayırmalar.....	20
3.4.1 Hydroxamate Reçinesi ile Ca^{++} - Ti^{4+} Ayırmaları.....	22
3.4.2 Hydroxamate Reçinesi ile Sc^{3+} - Ti^{4+} Ayırmaları.....	22

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.4.3 ^{46}Sc Radyoizleyici Kullanılarak Hydroxamate Reçinesi ile Yapılan Ayırmalar.....	23
3.5 Dowex 1x8 Reçinesinin Hazırlanması ve ScCl_3 ve TiCl_4 ile Yapılan Ayırmalar.....	23
3.5.1 Dowex 1x8 Reçinesi ile Ca ve Ti'nin Ayrılabilirliği İçin Kullanılması.....	24
3.6 ^{226}Rn ile Yapılan Çalışmalar	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	25
4.1. $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ Jeneratörü İçin Gerekli $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ Reaksiyon Parametrelerinin Hesaplanması.....	25
4.1.1. 30 MeV'lik Enerjiye Kadar Olan $^{45}\text{Sc}+p$ Reaksiyonlarının Bağ Enerjileri ve Eşik Enerjileri	25
4.1.2. $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ Reaksiyonunun Minimum Coulomb Bariyer Enerjisi	27
4.1.3. EXFOR Datalarına Göre $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ Reaksiyonunun Tesir Kesiti Değerleri	28
4.1.4. Maksimum Tesir Kesiti Değerine Göre Hesaplanan Enerji Düşüşü ve Aktivite	30
4.1.5. Doğal Titanyumun Sadece ^{46}Ti , ^{47}Ti , ^{49}Ti ve ^{50}Ti Zayıf Ağırlıktaki İzotopları ile Protonlarla Reaksiyonları Sonucu Oluşacak Muhtemel Ürünler Olan ^{43}Sc , ^{44}Sc , ^{46}Sc , ^{47}Sc ve ^{44}Ti 'ün İncelenmesi	31

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.1.5.1. $^{46}\text{Ti}(\%8.25)+p$ Reaksiyonunun 30 MeV'e Kadar Olan Ürünleri ile Bağlanma ve Eşik Enerjileri	31
4.1.5.2. $^{47}\text{Ti}(\%7.44)+p$ Reaksiyonunun 30 MeV'e Kadar Olan Ürünleri ile Bağlanma ve Eşik Enerjileri	34
4.1.5.3. $^{49}\text{Ti}(\%5.41)+p$ Reaksiyonunun 30 MeV'e Kadar Olan Ürünleri ile Bağlanma ve Eşik Enerjileri	36
4.1.5.4. $^{50}\text{Ti}(\%5.18)+p$ Reaksiyonunun 30 MeV'e Kadar Olan Ürünleri ile Bağlanma ve Eşik Enerjileri	39
4.2. Deneysel Sonuçlar	41
4.2.1. Hedef Sistemi.....	41
4.2.2. Hydroxamate Reçinesinin HPLC Sonuçları.....	42
4.3. Hydroxamate Reçinesi ile Yapılan Ayırmaların ^{46}Sc Radyoizleyici Kullanılarak Bulunan Reçinede Ayrılabilirliğine İlişkin Sonuçlar.....	47
4.3.1. Dowex 1X8 Reçinesinin HPLC Sonuçları	49
4.4. $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ Karışımının Sintilasyon Dedektörü Sayım Sonuçları ...	57
4.4.1. ^{226}Ra ile Yapılan Çalışmalar.....	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR DİZİNİ	65

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

TEŞEKKÜR	69
ÖZGEÇMİŞ	70



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bir radyonüklid jeneratörünün içten görüntüsü	4
2.2 Pozitron Emisyon Tomografisinin (PET) çalışma prensibinin şematik görünümü	5
2.3 Pozitron bozunması sonrası ortaya çıkan ve zıt yönlere giden fotonların şeması	6
2.4 Lawrence'a göre klasik bir siklotronun basitçe görünümü.....	7
3.1 Eşik Enerjisi ve Minimum Coulomb Bariyer Enerjisi ilişkisi	10
3.2 Empire3.2/MALTA kodunun GUI modunun bir örneği.....	14
3.3 SRIM 2013 ana ekranı	17
4.1 Olasılık fonksiyonu davranışına örnek	27
4.2 EXFOR dataları kullanılarak elde edilmiş $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ reaksiyonu tesir kesitleri.....	28
4.3 Empire3.2/MALTA ve TALYS-2015 verileri de dahil olmak üzere EXFOR dataları kullanılarak elde edilmiş $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ reaksiyonu tesir kesitleri	29
4.4 Belirli enerjide gelen protonların scandium hedef kalınlığına göre enerjilerinin değişimi.....	30
4.5 Belli enerjide gelen protonların farklı kalınlıklardaki hedeflere çarpmasıyla oluşan aktivitenin zamanla değişimi	31

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.6 Sc ₂ O ₃ kaplı Cu plakalar	41
4.7 0.1 M EDTA HPLC Sonuçları.....	43
4.8 0.1 M EDTA ve 10 ⁻³ M CaCl ₃ karışımının HPLC Sonuçları	43
4.9 0.1 M EDTA ve 10 ⁻⁶ M TiCl ₄ karışımının HPLC Sonuçları	44
4.10 0.1 M EDTA, 10 ⁻³ M CaCl ₃ ve 10 ⁻⁶ M TiCl ₄ karışımının HPLC Sonuçları .	44
4.11 Reçinelenmemiş 0.1 M EDTA, 10 ⁻³ M CaCl ₃ ve 10 ⁻⁶ M TiCl ₄ karışımının HPLC Sonuçları.....	45
4.12 Reçinelenmiş 0.1 M EDTA, 10 ⁻³ M CaCl ₃ ve 10 ⁻⁶ M TiCl ₄ karışımının HPLC Sonuçları.....	45
4.13 Hydroxamate Reçinesi'ne yüklenen 100 µL hacimli Sc-46'nın çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumu	47
4.14 Hydroxamate Reçinesi'nden geçirilen 100 µL hacimli Sc-46 eluantının çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumu	48
4.15 Hydroxamate Reçinesi'nden geçirilen 200 µL hacimli 6 M HCl ile alınan Sc-46 eluantının çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumu	48
4.16 Reçinelenmiş 10 ⁻³ M CaCl ₂ , 10 ⁻⁶ M TiCl ₄ ve 5 mg Oxine karışımının HPLC Sonuçları	49
4.17 Reçinelenmiş 12 M HCl'nin HPLC Sonuçları	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.18 Reçinelenmiş 2 M HCl'nin HPLC Sonuçları	50
4.19 10^{-3} M CaCl_2 HPLC Sonuçları	51
4.20 10^{-6} M TiCl_4 HPLC Sonuçları.....	51
4.21 1x1 inç $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresinde alınan ortam aktivitesinin spektrumu	52
4.22 $^{46}\text{ScCl}_3\text{-TiCl}_4$ karışımının reçineden geçirilmesi sonucu alınan elüsyon ölçümünün 1x1 inç $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresinde alınan spektrumu.....	53
4.23 12 M HCl ile yapılan elüsyon sonucu alınan ölçümünün 1x1 inç $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresinde alınan spektrumu	53
4.24 2 M HCl ile yapılan elüsyon sonucu alınan ölçümünün 1x1 inç $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresinde alınan spektrumu	54
4.25 ^{46}Sc ve TiCl_4 ün karşılaştırmalı HPLC Kromatogramı.....	55
4.26 12 M HCl ve 2 M HCl ile yapılan elüsyon sonucu alınan HPLC kromatogramı	55
4.27 Dowex 1x8 Reçinesinden geçen ^{46}Sc elüsyon profili.....	56
4.28 ^{226}Ra bozunma şeması	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.29 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 1 hafta sonraki 1 günlük sintilasyon dedektörü sayımı sonuçları	59
4.30 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 1 ay sonraki 1 günlük sintilasyon dedektörü sayımı sonuçları	60
4.31 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 3 ay sonraki 3 günlük sintilasyon dedektörü sayımı sonuçları	60
4.32 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 6 ay sonraki 3 günlük sintilasyon dedektörü sayımı sonuçları	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 $^{45}\text{Sc}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri	25
4.2 Empire3.2/MALTA dataları kullanılarak elde edilmiş tüm $^{45}\text{Sc}+^1\text{H}$ tesir kesitleri.....	29
4.3 Işınlama parametreleri.....	30
4.4 $^{46}\text{Ti}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri	31
4.5 (p,t), (p, α) ve (p, ^3He) reaksiyonlarının proton enerjisine bağlı tesir kesitleri değerleri	33
4.6 $^{47}\text{Ti}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri	34
4.7 (p, α), (p,n+ α) ve (p,2p) reaksiyonlarının proton enerjisine bağlı tesir kesitleri değerleri	36
4.8 $^{49}\text{Ti}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri	36
4.9 (p, ^3He), (p, α) ve (p,2n+ α) reaksiyonlarının proton enerjisine bağlı tesir kesitleri değerleri	38
4.10 $^{50}\text{Ti}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri	39
4.11 (p,n+ α) reaksiyonunun proton enerjisine bağlı tesir kesitleri değerleri	40
4.12 0.1 M EDTA HPLC pik değerleri.....	43
4.13 0.1 M EDTA ve 10^{-3} M CaCl_3 karışımının HPLC pik değerleri.....	43

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.14 0.1 M EDTA ve 10^{-3} M $TiCl_4$ karışımının HPLC pik değerleri	44
4.15 0.1 M EDTA, 10^{-3} M $CaCl_3$ ve 10^{-3} M $TiCl_4$ karışımının HPLC pik değerleri	44
4.16 Reçinelenmemiş 0.1 M EDTA, 10^{-3} M $CaCl_3$ ve 10^{-3} M $TiCl_4$ karışımının HPLC pik değerleri.....	45
4.17 Reçinelenmiş 0.1 M EDTA, 10^{-3} M $CaCl_3$ ve 10^{-3} M $TiCl_4$ karışımının HPLC pik değerleri	46
4.18 Hidroksamat Reçinesinden Ca ve Ti'un ayrılabilirliğinin HPLC analiz sonuçları.....	46
4.19 Reçinelenmiş 10^{-3} M $CaCl_2$, 10^{-6} M $TiCl_4$ ve 5 mg Oxine karışımının HPLC pik değerleri	49
4.20 Reçinelenmiş 12 M HCl'nin HPLC pik değerleri	50
4.21 Reçinelenmiş 2 M HCl'nin HPLC pik değerleri	51
4.22 10^{-3} M $CaCl_2$ HPLC pik değerleri	51
4.23 10^{-6} M $TiCl_4$ HPLC pik değerleri	52
4.24 Dowex 1X8 Reçinesinden Sc-46'nın elue edilmesi sonucu alınan eluant sayımları	56
4.25 ^{44}Ti üretimi için gerekli olan belli başlı reaksiyonlar	57

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)ÇizelgeSayfa

4.26 ^{226}Ra bozunma ürünlerinin gama enerjileri ve yarı ömürleri	58
4.27 ^{44}Ti üretiminde çıkabilecek olası yan ürünlerin gama enerjileri ve yarı ömürleri.....	59
4.28 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 3 ay sonraki 3 günlük sintilasyon dedektörü sayımı sonuçları	60
4.29 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 6 ay sonraki 3 günlük sintilasyon dedektörü sayımı sonuçları	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
^{44}Ti	Titanyum-44
^{44}Sc	Scandium-44
keV	Kiloelektron-volt
MeV	Megaelektron-volt
p	Proton
d	Döteron (Döteryum)
n	Nötron
α	Alfa
β	Beta
γ	Gama
β^+	Pozitron
Ci (mCi)	Curie (miliCurie),
Bq	Becquerel
b (mb)	barn (milibarn)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Kısaltmalar**

PET Pozitron Emisyon Tomografisi (Positron Emission Tomography)

HPL(R)C High Performance Liquid (Radio) Chromatography



1. GİRİŞ

Radyonüklid jeneratör sistemleri, ana radyonüklidin bozunmasıyla tamamen farklı kimyasal yapıda bir kız (ürün) radyonüklidin ortaya çıkması prensibine dayanır. Kız ve ana radyonüklid birbirinden tamamen farklı yapıda yapıdadırlar ve bu nedenle ana radyonüklid ve kız radyonüklidin kimyasal farklılıklarından yararlanarak kız radyonüklidin yüksek radyonüklidik ve radyokimyasal saflığa sahip bir kız radyonüklid elde edilir. Radyonüklid jeneratörleri, kısa yarı ömürlü radyonüklidlerin üretim yerlerinden uzakta da kullanımına olanak sağlar. Tıbbi uygulamalarda yarı ömür ve taşıma maliyeti gibi zorluklardan dolayı, kısa yarı ömürlü radyonüklidlerin temini için jeneratör sistemleri kullanılmaktadır. Radyonüklid jeneratörleri ucuz ve taşınabilir özelliktedir ve yüksek spesifik aktivitede kız radyonüklid üretilmesini sağlar. İdeal bir radyonüklid jeneratörü için kız radyonüklidin ana radyonüklitten etkin bir şekilde ayrılmasını sağlamak gerekmektedir. Kız radyonüklidin kimyasal ve/veya fiziksel özellikleri ana radyonüklitten farklı olmalıdır. Sağım sıvısı radyofarmasötik hazırlamaya uygun olmalıdır.

Kız radyonüklid uygun kimyasal veya fiziksel teknikler kullanılarak ana radyonüklitten kolay ve verimli ayrılmalıdır. Bu tekniklerden bazıları; çözücü ekstraksiyonu, iyon değişimi, adsorbsiyon kromatografisi, presipitasyon, distilasyon, süblimasyon, elektrokimyasal yöntem vb. yöntemlerdir. Son yıllarda kullanılan jeneratör sistemleri genellikle kolon kromatografi ayırma sistemlerine dayalıdır. Kız radyonüklidin ayırımında şiddetli kimyasal reaksiyonlar olmamalıdır. Radyasyon dozunu en aza indirmek için jeneratör sağımında çalışanın müdahalesi az olmalıdır. Kız radyonüklidin elüsyon verimi ve saflığı kabul edilebilir aralıkta olmalıdır. Ana radyonüklidin fiziksel yarı ömrü jeneratörün raf ömrünü uzatmak için yeterince uzun olmalıdır. Jeneratör bileşenleri radyasyona dayanıklı olmalıdır. Kız radyonüklidin kimyası, radyoizleyici uygulamaları için çok çeşitli bileşiklerin hazırlanmasına uygun olmalıdır. Jeneratörün zırhlaması, kullanımı ve taşınması basit olmalıdır. Kız radyonüklidin bozunduğu çekirdek, kontaminasyon, çevresel süreklilik ve atık bertaraf etme konuları ile ilgili endişeleri sınırlandırmak için kararlı (ya da çok uzun yarı ömürlü) olmalıdır. Kız radyonüklid tanı için kullanılacaksa PET görüntüleme için pozitron salıcı ya da SPECT için

uygun enerjide gama ışını salıcısı olmalıdır. Tedavi için kullanılacak ürün radyonüklid beta ışını gibi parçacık radyasyonu salıcısı olmalıdır. Ancak son yıllarda alfa radyonüklid salıcıları da tedavide önem kazanmaya başlamıştır.

Radyonüklid jeneratör sistemlerinde uzun yarı ömürlü ana radyonüklid ile daha kısa yarı ömürlü kız radyonüklid arasındaki yarı ömür farkına bağlı olarak ana ve kız radyonüklid miktarı arasında geçici ya da daimi denge oluşmaktadır. Ana radyonüklidin aktivitesinin kız radyonüklidin aktivitesine oranının sabit olduğu duruma radyoaktif denge denir. Denge oluşuktan sonra kız radyonüklid ana radyonüklidin bozunma hızında oluşur. Ana radyonüklidin yarılanma ömrünün kız radyonüklidin yarılanma ömrüne oranı 10'dan az ise sistem geçici dengede kalır. Denge kız radyonüklidin yaklaşık 4 yarı ömür süresi geçtikten sonra sağlanır. Ana çekirdeğin aktivitesi kız çekirdeğin aktivitesi arttıkça önemli ölçüde azalır. Denge sağlandığında kız çekirdeğin aktivitesi, ana çekirdeğin aktivitesini geçebilir. Daimi dengede ise ana ve kız radyonüklidin yarı ömürleri arasındaki fark çok fazla ise sistem sürekli dengede kalır. Optimum zaman aralıklarında elüe edilen kız radyonüklidin aktivitesi en az on elüsyon süresince neredeyse sabit kalır. Denge kız radyonüklidin 5-6 yarı ömür süresinden sonra sağlanır.

Radyonüklid jeneratörler kullanım şekillerine göre ikiye ayrılır. Bunlardan ilki olan kuru jeneratörlerde ardışık iki elüsyon arasında kuru kalır. Sıklıkla tercih edilir. Diğer bir jeneratör türü olan ıslak jeneratörlerde ise, ardışık iki elüsyon arasında SF ile doldurulmuş halde kalır. Mikrobiyal kontaminasyon riski en aza indirilmiştir.

Bir jeneratörün kullanılması, kısa ömürlü radyonüklidlerin orijinal üretim sahasından (tipik olarak bir nükleer reaktör) bireysel kullanıcılara dağıtılmasını engeller; nakliye sırasındaki bozulma nedeniyle meydana gelen aktivite kaybı çok az tedarik edilmesine veya çok daha fazla başlangıç miktarının gönderilmesine (ek üretim ve nakliye masraflarına neden olması) neden olabilir. Yerinde radyonüklid üretimi için jeneratörlere bir alternatif, bir siklotron olmakla birlikte, aynı radyonüklidin her iki yöntemle de sağlanabilmesi nadirdir. Daha büyük merkezlerde siklotronlara sahip olmak mümkündür, ancak jeneratörlerden çok daha

pahalı ve karmaşıktır. Bazı durumlarda, bir jeneratör için ana radyonüklidi üretmek için bir siklotron kullanılır.

Scandium-44 (yarılanma ömrü 3.97 saat), uygun bozunma parametreleri nedeniyle Pozitron Emisyon Tomografisinde (PET) uygun bir etkinliğe sahiptir. ^{44}Sc kaynaklarından biri, bu radyoizotopu günlük olarak bir teşhis tesisinde rahatlıkla sağlayabilen $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ jeneratörüdür. Titanyum-44 (yarılanma ömrü 60 yıl) sırayla, skandiyum metal hedeflerinin proton ışınlaması ile elde edilebilir. Bununla birlikte, önemli bir ^{44}Ti ürün grubu, yüksek ışıın akımları, uzun ışınlama süreleri ve ^{44}Ti izolasyonu ve saflaştırılması için ayrıntılı bir kimyasal prosedür gerektirir.

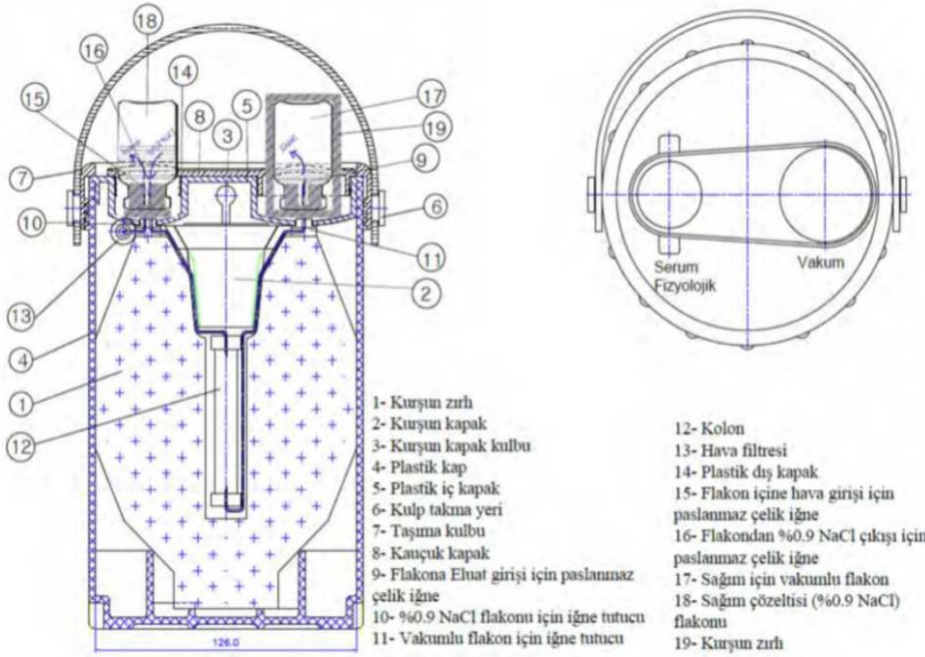
2. GENEL BİLGİLER

2.1 Radyonüklid Jeneratörleri

Radyonüklid jeneratör sistemleri, nükleer tıp, onkoloji ve girişimsel kardiyolojideki çeşitli uygulamalar için hem teşhis hem de terapötik radyonüklidlerin sağlanmasında önemli bir rol oynamaya devam etmektedir. Birçok ebeveyn / kız çifti radyonüklid jeneratör sistemi olarak değerlendirilmesine rağmen, şu anda rutin klinik ve araştırma kullanımında olan nispeten az sayıda jeneratör bulunmaktadır. Esasen, süblimleşme, termokromatografik ayırma, çözücü ekstraksiyonu ve adsorptif kolon kromatografisi dâhil olmak üzere ana / ayırma stratejileri için akla gelebilecek her yaklaşım kullanılmıştır. Klinik uygulamalar için en yaygın kullanılan radyonüklid jeneratörü $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ jeneratör sistemidir, ancak son zamanlarda, $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ jeneratörünün kullanılması, pozitron emisyon tomografisi PET/CT görüntülemesi için pozitron yayan ^{68}Ga kaynağı olarak büyük bir potansiyel göstermektedir. Radyonüklid jeneratörlerinin kullanımı için temel avantajlar arasında makul maliyetler, talep üzerine istenen kızı radyonüklidini elde etme kolaylığı ve kız radyonüklidinin yüksek spesifik aktivitede taşıyıcı olmayan ilave formda bulunabilirliği bulunmaktadır. Bir radyonüklid jeneratörünün iç şeması Şekil 2.1’de verilmiştir.

2.2 Pozitron Emisyon Tomografisi (PET)

Pozitron Emisyon Tomografisi (PET), insan vücudundaki organlar ve metabolizmaların görüntülenmesini sağlayan bir radyoizotop görüntüleme tekniğidir. Görüntüleme ilkesi olarak pozitronun-elektron yok olma olayı sonucunda ortaya çıkan iki adet 511 keV enerjili yok olma fotonun eş zamanlı deteksiyonu kullanılmaktadır. Uygulamada C-11, N-13, O-15, F-18 gibi pozitron yayınlayan radyoizotopların glikoz molekülü ile birleştirilmesi sonucu elde edilen radyofarmasötik hastaya kan yolu ile verilir. Vücuttaki anormal yapılarda biriken bu radyofarmasötikten elde edilen 511 KeV fotonları PET cihazında algılanarak bilgisayarda vücudun 3-boyutlu görüntüsü elde edilmektedir.



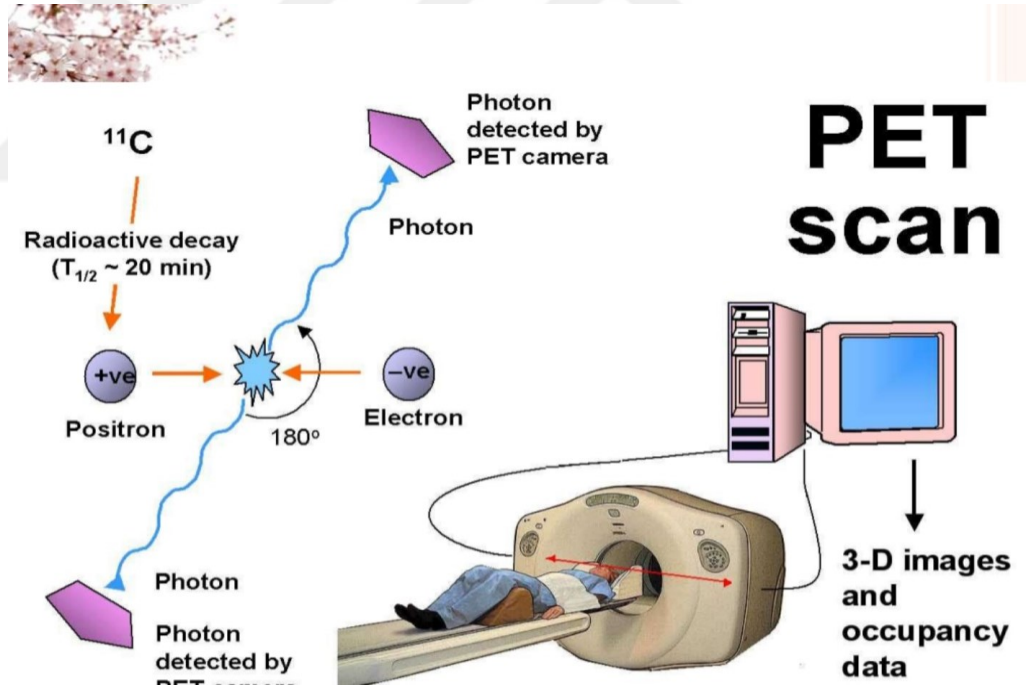
Şekil 2.1 Bir radyonüklid jeneratörünün içten görüntüsü

PET'te kullanılan radyoizotoplar pozitron emisyonuyla bozunur ve izleyici olarak da bu tip radyoizotoplar kullanılabilir. Radyoizotop pozitron emisyon bozunumuna uğrayarak (ya da pozitif beta bozunumu) bir pozitron ve elektronun karşı yüküyle bir anti-madde yayar. Yayılan pozitron dokudaki küçük bir menzilde (1 mm'den az, fakat kullanılan izotopa bağlı) ilerler, bu sürede bir elektronla etkileşim yapacağı noktaya gelene kadar kinetik enerjisini kaybeder. Pozitron Emisyon Tomografisi'nin bu çalışma biçimi Şekil 2.2'de verilmiştir.

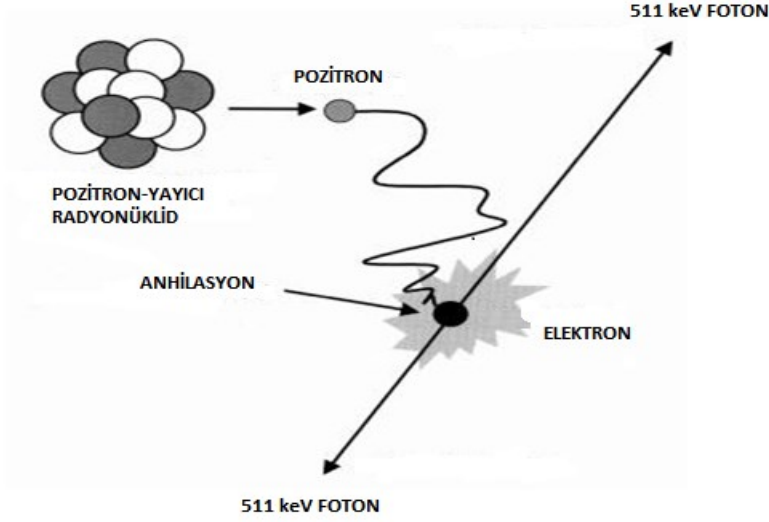
Elektron ve pozitronun karşılaşması ile zıt yönde hareketle bir çift anihilasyon fotonu (gama) oluşur (Şekil 2.3). 511 keV'lik zıt yönde hareket eden bu fotonlar fotoçoklayıcı tüpler veya silikon fotodiyotlarla bir ışık parıldaması (sintilasyon) oluşturarak dedektörde belirlenir.

2.3 PET Radyonüklidi Olarak Scandium-44

3.97 saatlik bir yarılanma ömrüne sahip pozitron yayan radyonüklid ^{44}Sc , klinik PET için iyi bir potansiyel oluşturmaktadır. Bu zamana kadar PET için birçok çalışma mevcut olup çok sayıda konjugat ile şelatlama yapılmıştır. Özellikle ^{68}Ga ile yapılan DOTA çalışmalarının çoğu ^{44}Sc ile de yapılmış ve sonuçlar ^{68}Ga ile yapılanlarla benzer şekilde oluşmuştur.



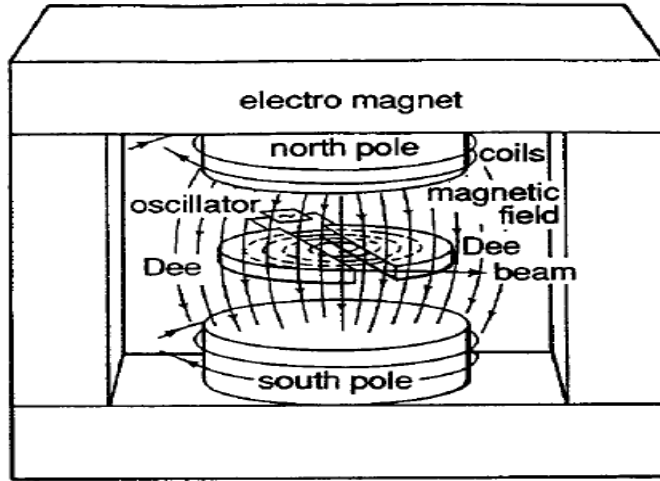
Şekil 2.2 Pozitron Emisyon Tomografisi'nin (PET) çalışma prensibinin şematik görünümü



Şekil 2.3 Pozitron bozunması sonrası ortaya çıkan ve zıt yönlere giden fotonların şeması

2.4 Siklotronlar ve Siklotronlarda Radyonüklid Üretimi

Siklotron Ernest O. Lawrence tarafından 1932'de icat edilen yüklü parçacıkları merkezden başlayıp spiral bir yol boyunca hızlandıran bir parçacık hızlandırıcıdır. Parçacıklar statik manyetik alan sayesinde spiral bir yörüngeye tutturulup elektrik alan sayesinde (radyo dalgaları) hızlandırılırlar. Lawrence Şekil 2.4'te basit bir görüntüsü verilen bu icadıyla 1939'da fizik dalında Nobel ödülünü de kazanmıştır. Siklotronlar, görüntüleme prosedürleri için kullanılabilen radyoaktif izotoplar üreten bir tür kompakt parçacık hızlandırıcıdır. Stabil, radyoaktif olmayan izotoplar, yüklü parçacıkları (protonlar) manyetik bir alanda yüksek enerjiye hızlandıran siklotrona yerleştirilir. Kararlı izotoplar parçacık ışınıyla reaksiyona girdiğinde, protonlar ve hedef atomlar arasında nükleer tıp ve diğer amaçlar için radyoaktif izotoplar oluşturan bir nükleer reaksiyon meydana gelir. Tıpta kullanılan radyoizotoplar çok uzun süre radyoaktif kalmazlar. Bu nedenle laboratuvarın hem izotopları üreten siklotrona hem de son kullanıcıya yakın olması gerekir.



Şekil 2.4 Lawrence'a göre klasik bir siklotronun basitçe görünümü

Siklotronlarda radyonüklid üretimleri çeşitli kimyasal reaksiyonlarla elde edilir. Siklotronun tipine ve enerjilerine göre bombardımanı yapılacak maddeler de çeşitlilik göstermektedir. Bu maddeler alfa, proton, döteron vb. olabilir. ^{44}Ti üretimi için en sık kullanılan yöntemler $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ ve $^{42}\text{Ca}(\alpha,2n)$ reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlarda hedef olarak kullanılan ^{45}Sc kararlı yapıdayken ^{42}Ca kararsız olup ekstra zenginleştirilmiş olarak kullanılmaktadır.

2.5 Sintilasyon Dedektörleri

Sintilasyon dedektörleri, günümüzde nükleer ve parçacık fiziğinde en sık ve yaygın olarak kullanılan parçacık algılama cihazlarından biridir. Bir nükleer partikül veya radyasyon tarafından vurulduğunda belirli materyallerin küçük bir ışık parlaması, yani bir parıltı yayması gerçeğinden yararlanır. Bir fotoçoğaltıcı gibi bir amplifikatör cihazına bağlandığında, bu sintilasyonlar elektriksel darbelere dönüştürülebilir ve bu daha sonra gelen radyasyonla ilgili bilgi vermek için elektronik olarak analiz edilebilir ve sayılabilir.

Bilinen sintilasyon dedektörlerinden bazıları Talyum katkılı Sodyum İyodur (NaI(Tl)) dedektörü, Bizmut Germanat (BGO) dedektörü ve Lantan Bromür (LaBr_3) dedektörüdür. Diğer yandan yarıiletken dedektörler sınıfına giren yüksek

safılıkta Germanyum (HPGe) dedektörü de gama radyasyonunu ölçmek için sık kullanılan dedektörlerden biridir.

LaBr₃ dedektörü savunma sanayinde kullanılan gama spektroskopi radyoizotop belirlenmesi ve tanımlama sistemlerinde kullanılmaktadır. İzotop tanımlaması dedektörün pikleri ayırt etmesine bağlı olarak (algoritma yapısı) farklı tekniklerle yapılır. Çözünürlüğün geliştirmesi üst üste gelen piklerin bile daha doğru tanımlanmasını sağlar. Bu durum izotop sınıflandırması için daha doğrudur.

Bu çalışmada ⁴⁴Ti'ün gama piklerini ölçmek için kullanılan LaBr₃ dedektörü kullanılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Teorik Hesaplamalar

3.1.1 Bağlanma Enerjisi (Q-Value) ve Eşik (Threshold) Enerjisi

3.1.1.1 Bağlanma Enerjisi

Bağlanma Enerjisi, radyoaktif bozunma sonucunda açığa çıkan enerjidir. Radyoaktif bozunma, kararsız bir atom çekirdeğinin iyonlaştırıcı parçacıklar ve radyasyon yayarak enerji kaybettiği süreçtir. Bu bozunma veya enerji kaybı, ana çekirdek adı verilen, yavru çekirdek adı verilen farklı bir atoma dönüşen tek tip bir atomla sonuçlanır. Bu tanımlar doğrultusunda Bağlanma Enerjisi,

$$Q = [m_p + m_T - (m_x + m_R)]c^2 \text{ MeV}$$

olarak belirlenir. Bu eşitlikte,

- m_p gönderilen parçacığın kütlesi (MeV/c²),
- m_T hedef parçacığın kütlesi (MeV/c²),
- m_x oluşan parçacığın kütlesi (MeV/c²),

- m_R oluşan çekirdeğin kütlesi (MeV/c^2),
- c ise ışık hızıdır.

3.1.1.2 Eşik Enerjisi

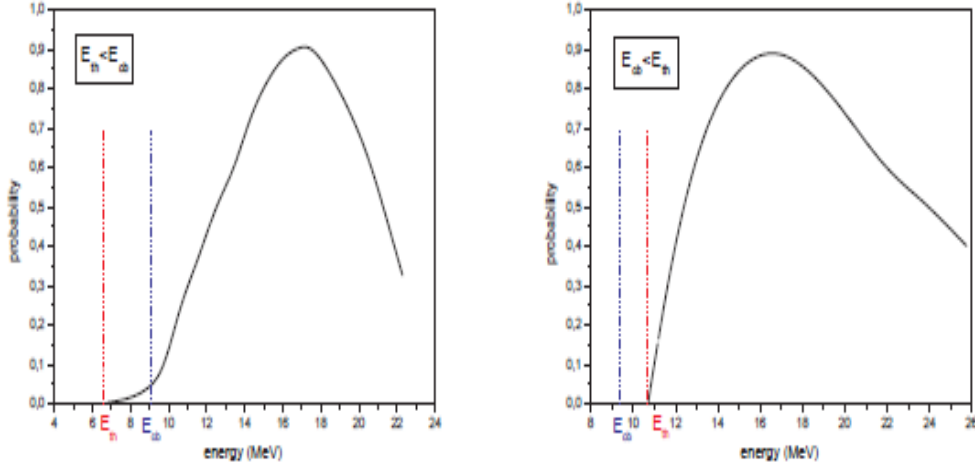
Eşik Enerjisi, bir çift hareket eden parçacığın çarpıştıklarında sahip olması gereken minimum kinetik enerjidir. Eşik enerjisi her zaman istenen parçacığın kalan enerjisinden daha büyük veya ona eşittir. Çoğu durumda, momentum da korunduğu için, eşik enerjisi, istenen parçacığın kalan enerjisinden önemli ölçüde daha büyüktür ve bu nedenle, nihai parçacıklarda hala önemli ölçüde kinetik enerji olacaktır. Bozunma Enerjisi hesaplandıktan sonra Eşik Enerjisi,

$$E_{Th} = -Q \frac{m_p + m_T}{m_T}$$

olarak hesaplanır. Minimum Coulomb Bariyer Enerjisi ise,

$$E_{cb_{\min}} = 1.109(A_p + A_T) \frac{Z_p Z_T}{A_T(A_p^{1/3} + A_T^{1/3})}$$

- A_p gönderilen parçacığın kütle numarası (proton ve nötron sayısı toplamı),
- A_T hedef parçacığın kütle numarası,
- Z_p gönderilen parçacığın atom numarası (proton sayısı),
- Z_T ise gönderilen parçacığın kütle numarasıdır.



Şekil 3.1 Eşik Enerjisi ve Minimum Coulomb Bariyer Enerjisi ilişkisi

3.1.2 Radyoaktivite

Radyoaktivite, kararsız bir çekirdeğin parçacık veya elektromanyetik radyasyon salarak daha kararlı çekirdeklere dönüşmesi olgusudur. Kararsız çekirdeğin daha kararlı çekirdeklere dönüşmesi sırasında açığa çıkan enerjiye bozunma enerjisi denir ve bu enerji, kararsız çekirdek (ana çekirdek) ürün çekirdek arasındaki kütle farkı değişmesinden kaynaklanır. Çekirdekten radyasyon salan herhangi bir nükleer tür (protonların, nötronların ve enerjinin belirli konfigürasyonu) radyoaktif çekirdekler olarak bilinir. Ek olarak, radyoaktivite veya basitçe aktivite, bir radyoaktif atomun belirli bir süre içinde kaç bozunma yaşadığını açıklamak için bir ölçüm olarak kullanılabilir. Bu bozunmalar, çekirdekten enerji veya parçacıkların ayrılmasına neden olur. Radyoaktivite ayrıca radyoaktif bozunma veya nükleer bozunma olarak da adlandırılabilir. Bir çekirdeğin belli enerjideki elektromanyetik veya parçacık radyasyonu ile etkileşmesi sonucunda bir nükleer reaksiyon oluşur. Nükleer reaksiyon oluşma sabiti tesir kesiti olarak tanımlanır. Birimi barn'dır ve 1 barn 10^{-24} cm^2 'ye eşittir. Tesir kesiti,

$$\sigma_R = \pi r_0^2 (A_p^{1/3} + A_T^{1/3})^2$$

şeklindedir ve burada r_0 yaklaşık olarak 1.6 fm'dir.

Üretim oranı ise en basit şekliyle şöyledir,

$$R = n_T I \sigma$$

Fakat tesir kesiti her zaman sabit değildir. Bu yüzden gerçek oran,

$$R = n_T I \int_{E_s}^{E_0} \frac{\sigma(E)}{dE / dx} dE$$

şeklindedir. Bu eşitlikte,

- R saniyedeki oluşan çekirdek sayısı,

- n_T hedef kalınlığı (çekirdek/cm²),

- I başlangıç parçacık akısı (demet akımıyla orantılıdır),

- σ reaksiyon tesir kesiti ya da etkileşim oranı (enerjinin bir fonksiyonudur),

- E başlangıçtaki parçacıkların enerjisi,

- x parçacığın kat ettiği yol,

- $\int_{E_s}^{E_0}$ başlangıç enerjisinden bitiş enerjisine kadar olan başlangıç

parçacığının kat ettiği yol boyunca integral olarak bilinmektedir.

$$n_T = \frac{\rho x}{A_T} N_A$$

Bu eşitlik hedef kalınlığıdır ve,

- A_T hedef materyalin atomik ağırlığı (g),
- ρ yoğunluk (g/cm^3),
- N_A Avogadro sayısı,
- x parçacığın kat ettiği yoldur (cm).

Son olarak da toplam üretim oranı,

$$-\frac{dn}{dt} = n_T I \int_{E_s}^{E_0} \frac{\sigma(E)}{dE / dx} dE - \lambda N$$

Burada ise,

- λ bozunum sabiti, ($=\ln 2/t_{1/2}, s^{-1}$),
- t ışınlama süresi (s),
- N hedefteki radyoaktif çekirdek sayısıdır.

Sonuç olarak nükleer reaksiyondaki son üretim oranı,

$$Y_{EOB} = \frac{N_A I}{A_T} (1 - e^{-\lambda t}) \int_{E_s}^{E_0} \frac{\sigma(E)}{S_T(E)} dE$$

- $S_T(E)$ durdurma gücüdür (Gerçekte dE / dx).

3.1.3 Empire3.2/MALTA

Empire3.2/MALTA çeşitli teorik modeller kullanarak nükleer reaksiyonların gelişmiş modellemesi için modüler nükleer reaksiyon kodları sistemidir. Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI) aracılığıyla çalıştırılan bir dizi

FORTTRAN kodu, giriş parametresi kitaplığı ve deneysel veri kitaplığından (EXFOR / CSISRS) oluşur.

Empire3.2/MALTA, nükleer verilerin temel araştırması ve değerlendirmesi için genel, esnek ve kullanımı kolay bir araç olarak tasarlanmıştır. Tek bir çalışmada çeşitli teorik yaklaşımları birleştirme, alternatif girdi parametreleri arasından seçim yapma ve genişletilmiş gözlemlenebilirler setini hesaplama imkânı sunar. Nükleer veri değerlendirmesi, ENDF-6 formatlaması, dosya doğrulama ve deneysel verilerle grafiksel karşılaştırma ile kolaylaştırılmıştır. Sonuçlar EMPEND kod kullanılarak ENDF-6 (önce ENDF Pre-Processing, sonra ENDF Utility Code) formatına dönüştürülür. Şekil 3.2 Empire3.2/MALTA kodunun GUI modunun bir örneğini göstermektedir. Füzyon reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitinin basit formu şu şekildedir,

$$\sigma_a(U, J, \pi) = \frac{\pi}{k^2} \frac{(2J+1)}{(2I+1)(2i+1)} \sum_{S=|I-i|}^{I+i} \sum_{l=|J-S|}^{J+S} f(l, \pi) T_l^a(\varepsilon)$$

Bu eşitlikte,

$T_l^a(\varepsilon)$ = Transmisyon katsayısını,

U = Çekirdek enerjisini,

ε = Gönderilen parçacığın enerjisini,

k = Relatif hareketin dalga sayısını,

i = Gönderilen parçacığı,

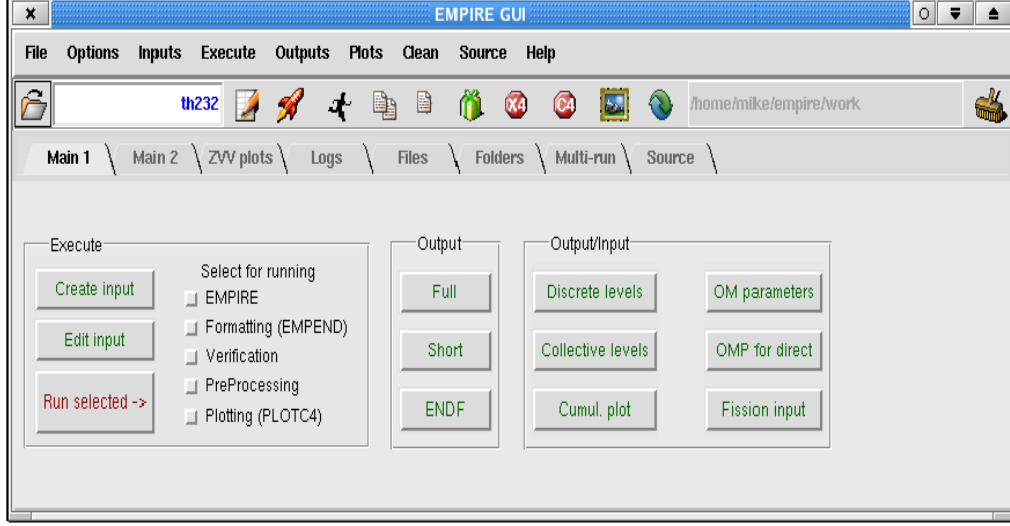
I = Hedefi,

J = Çekirdeği,

S = Kanal döngüsünü,

l = Orbital açısai momentumu ve

$f(l,\pi)$ = Koruma paritesini simgelemektedir.



Şekil 3.2 Empire3.2/MALTA kodunun GUI modunun bir örneği

Fotoabsorpsiyon tesir kesiti ise 2 parametrenin toplamından oluşmaktadır.

$$\sigma_{abs}(E_\gamma) = \sigma_{GDR}(E_\gamma) + \sigma_{QD}(E_\gamma)$$

$\sigma_{GDR}(E_\gamma)$ Lorentz teorisine göre ortaya çıkan ve büyük iki kutuplu rezonans (giant dipole resonance) toplam absorpsiyon tesir kesitini vermektedir ve,

$$\sigma_{GDR}(E_\gamma) = \sum_i \sigma_i \frac{(E_\gamma \Gamma_i)^2}{(E_\gamma^2 - E_i^2)^2 + (E_\gamma \Gamma_i)^2}$$

eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Bu denklemde,

σ_i = pik tesir kesitini,

E_i = enerjiyi ve

Γ_i = genişliği temsil etmektedir.

$\sigma_{QD}(E_\gamma)$ ise Lvinger-tipi teorisini kullanan Chadwick modelini esas alan nükleer fotoabsorpsiyon tesir kesitini simgelemektedir,

$$\sigma_{QD}(E_\gamma) = L \frac{NZ}{A} \sigma_d(E_\gamma) f(E_\gamma)$$

Bu denklemde ise,

$\sigma_d(E_\gamma)$ = deneysel döteron fotobozunum tesir kesitini,

L = Lvinger parametresini ($L=6$),

$f(E_\gamma)$ = Pauli-blocking fonksiyonunu simgeler.

Deneysel döteron fotobozunum tesir kesiti ($\sigma_d(E_\gamma)$) ve Pauli-blocking fonksiyonu ($f(E_\gamma)$) ise,

$$\sigma_d(E_\gamma) = 61.2 \frac{(E_\gamma - 2.24)^{3/2}}{E_\gamma^3}$$

$$f(E_\gamma) = 8.3714 \times 10^{-2} - 9.8343 \times 10^{-3} E_\gamma + 4.1222 \times 10^{-4} E_\gamma^2 - 3.4762 \times 10^{-6} E_\gamma^3 + 9.3537 \times 10^{-9} E_\gamma^4$$

Fisyon reaksiyonu için hesaplanan tesir kesitinin basit formu şu şekildedir,

$$\sigma_{a,f}(E) = \sum_{J\pi} \sigma_a(E_x J\pi) P_f(E_x J\pi)$$

Bu formülde $\sigma_a(E_x J\pi)$ fisyon çekirdeğinin popülasyonunu ve $P_f(E_x J\pi)$ ise fisyon olasılığını vermektedir.

$$P_f(E_x J \pi) = \frac{T_f(E_x J \pi)}{\sum_p T_p(E_x J \pi) + T_\gamma(E_x J \pi) + T_f(E_x J \pi)}$$

3.1.4 Durdurma Gücü (Stopping Power)

Nükleer ve malzeme fiziğinde, durdurma gücü, tipik olarak alfa ve beta parçacıkları gibi yüklü parçacıklar üzerinde, madde ile etkileşim nedeniyle parçacık enerjisi kaybına neden olan geciktirici kuvvettir. Radyasyondan korunma, iyon implantasyonu ve nükleer tıp gibi alanlarda uygulaması önemlidir. En klasik teoriyi hesaplayan Bethe ve Bloch'a göre, durdurma gücü kısaca şu şekildedir:

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{Bethe-Bloch}} = 0.3071 \rho \frac{Zz^2}{A\beta^2} \left[\ln \left(\frac{T_{\max}}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z} \right]$$

3.1.4.1 SRIM (Stopping Powers and Ranges in All Elements) 2013

SRIM, maddede bulunan iyonların taşınmasının birçok özelliğini hesaplayan bir yazılım paketleri koleksiyonudur. Tipik uygulamalar olarak şunları içerir:

- İyon Durması ve Hedeflerdeki Menzil: Maddedeki iyonların enerji kaybının çoğu yönü SRIM'de, Maddedeki Durdurma ve İyon Aralıklarında hesaplanır. SRIM, herhangi bir temel hedefteki herhangi bir enerjideki herhangi bir iyon için durdurma güçleri, menzil ve kademeli dağılım tabloları üreten hızlı hesaplamalar içerir. Daha ayrıntılı hesaplamalar, karmaşık çok katmanlı konfigürasyonlara sahip hedefleri içerir.
- İyon İmplantasyonu: İyon ışınları, hedef kimyasal ve elektronik özellikleri değiştirmek için atom enjekte ederek numuneleri değiştirmek için kullanılır. İyon ışını ayrıca katı hedeflere atom yer değiştirmesi ile zarar verir. Bu tür etkileşimlerin fiziği ile ilişkili kinetik etkilerin çoğu SRIM paketinde bulunur.

- Püskürtme: İyon ışını, iyon püskürtme adı verilen bir işlem olan hedef atomları ortadan kaldırabilir. Herhangi bir enerjideki herhangi bir iyon tarafından püskürtmenin hesaplanması SRIM paketine dahildir.
- İyon İletimi: İyon ışınları, iyonizasyon odalarında veya iyon ışını enerjilerini azaltmak için kullanılan enerji bozucu bloklarda meydana gelenler gibi karışık gaz / katı hedef katmanlardan takip edilebilir.
- İyon Işını Terapisi: İyon ışınları, özellikle radyasyon onkolojisinde medikal tedavide yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.3 SRIM'in başlangıç görüntüsünü vermektedir.

Ion Stopping and Range Tables

Ion: **H** (Hydrogen) Atomic Number: 1 Mass (amu): 1.008 Ion Energy Range (keV): 10 to 10000

Target: **Target** Target Description: Target Density (g/cm3): Gas Tgt.:

Buttons: Add Element, Compound Dictionary, Restore Last Target

Delete Element	Symbol	Name	Atomic Number	Weight (amu)	Stoich	Atom %
X	PT		0		1	100%

Stopping Power Units: MeV / (mg/cm2)

Compound Correction: 1

Buttons: Calculate Table, Clear All, Main Menu, Quit, Problem Solving

Şekil 3.3 SRIM 2013 ana ekranı

Enerjisi 1 MeV'den büyük parçacıklar için yukarıda verilen Bethe-Bloch formülü geçerliken düşük enerjili (30 keV/akb) parçacıklarda bu formül kullanılamaz. Bunun yerine Thomas-Fermi istatistiksel modeli tercih edilir ve SRIM de bu modeli kullanır. Bu modelin sonucu olarak elektronik durdurma gücü şu şekilde formüle edilmiştir,

$$S_e = Z_1^{1/6} 8\pi e^2 a_0 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/2}} \frac{v}{v_0}$$

$$v < v_0 Z_1^{2/3}$$

Bu eşitlikte,

Z_1, Z_2 = gelen parçacığın ve hedefin atom numarası,

v = gelen parçacığın hızı,

e = gelen parçacığın elektronik yükü,

a_0 = Hidrojen atomunun Bohr yarıçapı ve

v_0 = Bohr hızı olarak belirtilmiştir.

Yüksek enerjilerde kullanılan klasik Bethe-Bloch formülü ise şu şekildedir,

$$S = \frac{4\pi e^4 Z_1^2 Z_2}{mv^2} \left[\ln\left(\frac{2mv^2}{I}\right) + \ln\left(\frac{1}{1-\beta^2}\right) - \beta^2 - \frac{C}{Z_2} \right]$$

m = Elektronun kütlesi,

β = v/c ,

c = Işık hızı,

I = Uyarılma potansiyeli (excitation potential),

C/Z_2 = Kabuk düzeltme faktörü (shell correction)

Denklemden belirtilen uyarılma potansiyeli, I ise bu denklemin ana parametresidir ve,

$$\ln I = \sum_n f_n \ln E_n$$

formülü ile belirlenir. Bu denkleme göre,

E_n = Hedef atom için olası enerji dönüşümü ve

f_n = osilatör kuvvetini temsil etmektedir.

3.2 Deneysel Çalışmalar

3.2.1 Kullanılan Cihazlar ve Kimyasallar

3.2.1.1 Kullanılan Cihazlar

HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) sistemi olarak E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü bünyesindeki ODS 5- μ m RP-C18 (250 x 4.6 mm I.D.) (GL Sciences Inc.) kolonu, kolon fırını (Shimadzu CTO-10ASvp) ve düşük basınçlı dörtlü pompa üzerinde diyod array dedektörü (DAD) (Shimadzu SPD-M20A) ile otomatik örnekleyici (SIL-20A HT) içeren Shimadzu LC-10Atvp (SPD-10AV), LaBr₃(Ce) Dedektörlü 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresi (Ortec) ve diğer cihazlar Santrifüj cihazı (Nüve CN180, E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü); Manyetik karıştırıcı (IKA-RH basic 2, E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü); Vorteks cihazı (Heidolph, E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü); Terazı (OHAUS-Pioneer, E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü); Milipor saf su cihazı (Milli-Q Gradient A-10, E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü) kullanılmıştır.

3.2.1.2 Kullanılan Kimyasallar

TiCl₄ (Merck), CaCl₃ (Sigma), CaCl₂ (Merck), RaCl₂, Dowex 1x8, 8-Hidroksikinolin, EDTA (Etildiamintetraasetikasit, Sigma) Sep-Pak kartuşu içindeki Accell reçinesi, Hidroklorik asit (HCl), 2,3,5,6-tetrafluorophenolun (TFP), Oksalik asit (Merck), N-(3-dimethylaminopropyl)-N'-ethylcarbodiimide hydro-chloride (EDC, coupling ajan olarak), Sodyum-Hidroksit (NaOH, pH düzenleyici), Asetonitril (Merck), Metanol (Merck), saf su.

3.3 Hedef Sisteminin Hazırlanması

Hedef sistemini hazırlarken öncelikle bakır plakaların düzleştirilmesi işlemi için yapılan zımparalama çalışmasının ardından üzerindeki safsızlıkların giderilmesi ve plakaların parlatılması için 0.5'lik ve daha sonra 0.3'lük Alumina Polishing Suspension kullanılmıştır. Yaklaşık %100 saflıktaki bakır plakalar için önce 0.1 M HCl içerisinde 1 saat ve daha sonra aseton içerisinde de 1 saat ultrasonik banyoda bekletilmiştir. Ultrasonik banyodan (Ultrasonic Cleaner CP104 from EIA, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü) çıkarılan bakır plakalar etüvde (Nüve FN400, Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü) 37 °C'de yaklaşık 1 saat kurumaya bırakılmıştır. 10 mL aseton içerisinde çözünecek etil selüloz (Sigma Aldrich) ile Sc_2O_3 (veya ScCl_3) daha sonra hazırlanan bakır plakalara kaplanmıştır. Bu işlemin ardından kaplamalar 16-18 saat süre ile 40°C'lik etüvde kurutulmuştur. Kurutulan bakır plakalardaki kaplamalar fazlalıkları alındıktan ve düzleştirildikten sonra ışınlamaya hazır hale getirilmiştir.

3.4 Hydroxamate Reçinesinin Hazırlanması ve Sc^{+3} , Ti^{+4} ve Ca^{+2} ile Yapılan Ayırmalar

Hydroxamate reçinesi silika-bazlı zayıf katyon yer değiştirici reçinenin karboksi grupları fonksiyonlaştırılarak hazırlanmıştır. Yüzey fonksiyonlanma: $-\text{CO}_2-\text{Na}^+$, 300 Å por çapı, 37–55 µm parçacık boyutu, 0.35 mmol/g ligand yoğunluğu). Accell reçinesi (0.42 g) 15 mL Falcon tüp içindeki 8.0 mL suda birkaç gün şişmesi için bekletilmiştir. 30 µL 3 M HCl, 2,3,5,6-tetrafluorophenolun (TFP, 0.8 g, Sigma Aldrich) 250 µL asetonitrildeki taze çözeltisi ve N-(3-dimethylaminopropyl)-N'-ethylcarbodiimide hydrochloride (EDC, 153 mg, 0.8 mmol, SigmaAldrich) konjugasyon ajanı olarak ilave edilmiştir. Reaksiyon karışımı toplamda 4 saat oda sıcaklığında manyetik karıştırıcıda karıştırılarak reaksiyon sürdürülmüştür. Daha sonra reçine filtre edilerek ayrıldıktan sonra önce 3 defa 10 mL su ile sonra 3 defa 10 mL asetonitril ile yıkanarak reaksiyona girmeyen safsızlıklarından ayrılmıştır.

Sonraki aşamada TFP ester grupları içeren reçine hidroksilamin ile reaksiyona sokularak hidroksamat reçinesine döndürülmüştür. 0.01 mmol, hidroksilamin hidroklorür, 1 mL 1.0 M NaOH ve 2 mL metanol karışımında çözüldükten sonra, 25–50 µL 1.0 M NaOH ile pH 5.5'e ayarlanmıştır. Bu çözelti 15

mL falkon tüpü içindeki aktive edilmiş reçineye ilave edildikten sonra reaksiyon (pH 5.0–5.2) oda sıcaklığında 18 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak sürdürülmüştür. Ürün filtre edildikten sonra ayrılarak ve 5 defa 10 mL su ile ve 5 defa 10 mL asetonitril ile yıkanarak saflaştırılmış ve vakumda kurutulmuştur. Kurutulan reçine boş Sep-Pak kartuşa yerleştirilerek Ti ayrılması için kullanılmıştır. Bunun için kolon sırasıyla 8 mL asetonitril, 15 mL su, 2 mL 2.0 M HCl ile yıkanarak aktive edilmiştir. Aktif edilen kolondan önce yıkama suyu karışımı (EDTA-TiCl₄-CaCl₂) daha sonra da oksalik asit geçirilmiştir. Radyoaktif olmayan inaktif Ti izotopları izleyici olarak kullanılarak ve radyoaktif ⁴⁶Sc radyoizleyici olarak kullanılarak Sc'un hedef sisteminden ayrılma koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için en uygun yöntem reçine yöntemidir. Bu yüzden hydroxamate ve dowex reçine sistemi en uygun yöntem olarak seçilmiştir. Hydroxamate reçinesi silika-bazlı zayıf katyon yer değiştirici reçinenin karboksi grupları fonksiyonlaştırılarak hazırlanmıştır. Başlangıç olarak accell reçinesi (0.42 g) 15 mL falkon tüp içindeki 8.0 mL suda yaklaşık 1 gün bekletilmiştir. 30 µL 3 M HCl, 2,3,5,6-tetrafluorophenolun (TFP, 0.8 g, Sigma Aldrich) 250 µL asetonitrildeki taze çözeltisi ve N-(3-dimetilaminopropil)-N'-etilkarbodiimid hidroklorür (EDC, 153 mg, 0.8 mmol, Sigma Aldrich) coupling agent olarak ilave edilmiştir. Reaksiyon karışımı 1 saat oda sıcaklığında manyetik karıştırıcıda karıştırılarak reaksiyon sürdürüldükten sonra 3 saat daha karışım oda sıcaklığında karıştırılarak reaksiyon devam etmiştir. Daha sonra reçine önce filtre edilerek ayrıldıktan sonra önce 3 defa 10 mL su ile sonra 3 defa 10 mL asetonitril ile yıkanarak reaksiyona girmeyen safsızlıklarından ayrılmıştır. Sonraki aşamada TFP ester grupları içeren reçine hidroksilamin ile reaksiyona sokularak hydroxamate reçinesine dönüştürülmüştür. 0.01 mol, 69,49 mg hidroksilamin hidroklorür, 1 mL 1.0 M NaOH ve 2 mL metanol karışımında çözüldükten sonra, 25–50 µL 1.0 M NaOH ile pH 5.3–5.4'e ayarlanıp, çözelti 15 mL falkon tüpü içindeki aktive edilmiş reçineye ilave edilecek ve reaksiyon (pH 5.0–5.2) oda sıcaklığında 18 saat manyetik karıştırıcıda sürdürülmüştür. Ürün filtre edilerek ayrılmış ve 5 defa 10 mL su ile ve 5 defa 10 mL asetonitril ile yıkanarak saflaştırıldıktan sonra vakumda kurutulmuştur. Kurutulan reçine boş Sep-Pak kartuşa yerleştirilerek ⁴⁴Ti yerine inaktif Ti ayrılması için kullanılmıştır. Bunun için önce kolon sırasıyla 8 mL asetonitril, 15 mL su, 2 mL 2.0 M HCl ile yıkanarak aktive edilmiştir. Işınlamadan gelecek olan hedef sisteminden ürün 6 M 1 mL HCl ile 5 defa yıkanarak alınmış ve

reçineden geçirilmiştir. Reçinede sadece Ti kalması beklenmektedir ve kalan bu ürün de okzalik asit ile elue edilerek alınmıştır. Ti yerine ^{44}Ti kullanılması halinde bu şekilde saflandırılan ^{44}Ti daha sonra jeneratöre yüklenmek üzere hazır hale gelmiş olacaktır.

3.4.1 Hydroxamate Reçinesi ile Ca^{++} - Ti^{4+} Ayırmaları

Kurutulan reçine boş Sep-Pak kartuşa yerleştirilerek ^{44}Ti ayrılması için kullanılmıştır. Bunun için kolon sırasıyla 8 mL asetonitril, 15 mL su, 2 mL 2.0 M HCl ile yıkanarak aktive edilmiştir. Aktif edilen kolondan önce yıkama suyu karışımı ($\text{EDTA-TiCl}_4\text{-CaCl}_3$) daha sonra da oksalik asit geçirilmiştir. Bütün kullanılan komplekslerin HPLC analizleri ile ayrılabilirliği gösterilmiştir.

3.4.2 Hydroxamate Reçinesi ile Sc^{3+} - Ti^{4+} Ayırmaları

Radyoaktif olmayan inaktif Ti izotopları izleyici olarak kullanılarak ve ^{46}Sc 'un hedef sisteminden ayrılması işlemi yapılmıştır. Bunun için en uygun yöntem reçine yöntemidir. Reçine sistemi olarak hydroxamate ve dowex reçineleri seçilmiştir. Hydroxamate reçinesi silika-bazlı zayıf katyon yer değiştirici reçinenin karboksi grupları fonksiyonlaştırılarak hazırlanmıştır. Başlangıç olarak accell reçinesi (0.42 g) 15 ml falcon tüp içindeki 8.0 mL suda yaklaşık 1 gün bekletilmiştir. 30 μL 3 M HCl, 2,3,5,6-tetrafluorophenolun (TFP, 0.8 g, Sigma Aldrich) 250 μL asetonitrildeki taze çözeltisi ve N-(3-dimethylaminopropyl)-N'-ethylcarbodiimide hydrochloride (EDC, 153 mg, 0.8 mmol, Sigma Aldrich) coupling agent olarak ilave edilmiştir. Reaksiyon karışımı 1 saat oda sıcaklığında manyetik karıştırıcıda karıştırılarak reaksiyon sürdürüldükten sonra 3 saat daha karışım oda sıcaklığında karıştırılarak reaksiyon devam etmiştir. Daha sonra reçine önce filtre edilerek ayrıldıktan sonra 3 defa 10 mL su ile sonra 3 defa 10 ml asetonitril ile yıkanarak reaksiyona girmeyen safsızlıklarından ayrılmıştır. Sonraki aşamada TFP ester grupları içeren reçine hidroksilamin ile reaksiyona sokularak hidroksamat reçinesine dönüştürülmüştür. 0.01 mol, 694.9 mg hydroxylamine hydrochloride, 1 ml 1.0 M NaOH ve 2 ml metanol karışımında çözüldükten sonra, 25–50 μL 1.0 M NaOH ile pH 5.3–5.4'e ayarlanıp, çözelti 15 mL falcon tüpü içindeki aktive edilmiş reçineye ilave edilecek ve reaksiyon (pH 5.0–5.2) oda sıcaklığında 18 saat manyetik karıştırıcıda sürdürülmüştür. Ürün filtre edilerek

ayrılarak ve 5 defa 10 mL su ile ve 5 defa 10 mL asetonitril ile yıkanarak saflaştırılmış ve vakumda kurutulmuştur.

Kurutulan reçine boş enjektör içerisine 333 mg tartılarak yerleştirilmiştir. Bunun için önce kolon sırasıyla 8 mL asetonitril, 15 mL su, 2 mL 2.0 M HCl ile yıkanarak aktive edilmiştir.

Ti-⁴⁶Sc karışımı hazırlanan reçineden geçirilmiştir (200 uL). Sayım alınmıştır.

Işınlamadan gelecek olan hedef sisteminden ürün 6 M 1 ml HCl ile 5 defa yıkanarak alınmıştır. İçerisinden 200 uL alınıp (200 uL/5mL) sayım alınmıştır.

3.4.3 ⁴⁶Sc Radyoizleyici Kullanılarak Hydroxamate Reçinesi ile Yapılan Ayırmalar

Radyoaktif olmayan inaktif Ti izotopları ve radyoaktif ⁴⁶Sc izleyicisi kullanılarak ⁴⁶Sc'un hedef sisteminden ayrılması için çalışılmıştır. Hydroxamate reçinesi önceki bölümde açıklandığı gibi hazırlanmıştır. Kurutulan reçine boş enjektör içerisine 333 mg tartılarak yerleştirilmiştir. Bunun için önce kolon sırasıyla 8 mL asetonitril, 15 ml su, 2 ml 2.0 M HCl ile yıkanarak aktive edilmiştir. Ti-⁴⁶Sc karışımı hazırlanan reçineden geçirilmiştir (200 uL). Sayım alınmıştır. Işınlamadan gelecek olan hedef sisteminden ürün 6 M 1 ml HCl ile 5 defa yıkanarak alınmıştır. İçerisinden 200 uL alınıp (200 uL/5mL) sayım alınmıştır.

3.5 Dowex 1x8 Reçinesinin Hazırlanması ve ScCl₃ ve TiCl₄ ile Yapılan Ayırmalar

Dowex için ise kullanılacak 1x8'lik reçine sistemi bir enjektör yardımıyla oluşturulmuştur. Bunun için 10⁻³ M ScCl₃ ve 10⁻⁶ M TiCl₄ 5 mL metanol içinde çözüldükten sonra eşit hacimlerde alınarak karıştırılmıştır. ⁴⁶ScCl₃'ün 1 M HCl çözeltisi radyonüklid izleyici olarak kullanılmıştır. Daha sonra 5 mg 8-hidroksikinolin ile çözelti doyurulmuştur. Hazırlanan solüsyon Dowex reçineden geçirilmeden önce reçinenin aktivasyonu sağlandı. Reçineyi aktive etmek için %10'luk NaCl ve %0.2'lik NaOH 80°C'de 2 saat ısıtıldıktan sonra reçineden geçirildi. Hemen ardından % 0.5'lik HCl geçirilmesiyle reçine aktive edildi. Solüsyon elüe edilmeden önce kolonun şartlanması 12 M'lik HCl ile yapıldı.

Solüsyon geçirildikten sonra, önce 12 M HCl (240 mL) sonra ise 2 M HCl (140mL) ile elüsyon yapıldı. İlk 240 mL de atık (TiCl_4 hariç her şey) toplanırken sonraki 140 mL'de TiCl_4 'ün elde edileceği öngörülmektedir. Daha sonra her bir eluant ayrı ayrı HPLC sistemiyle analiz edilmiştir.

HPLC Parametreleri:

Akış hızı 1 ml/dk; Kolon C-18; Dedektör DAD; Mobil faz %10 ACN-%90 su; Dalga boyu 254 nm; enjeksiyon miktarı 10 μL olarak belirlenmiştir. Dowex 1x8'lik reçineden geçirilen $^{46}\text{ScCl}_3$ ve TiCl_4 karışımı 1x1 inç $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresi ile incelenmiştir. İşlem öncesi ortam aktivitesi (background) ölçülmüştür, background ve elüsyonların spektrumları alınmıştır. 5 mg 8-hidroksikinolin çözeltisi ile $^{46}\text{ScCl}_3$ ve TiCl_4 çözeltileri karıştırılarak Dowex 1x8'lik reçineden geçirilmiştir. Elde edilen 200 μL örneklerin çok kanallı analizörde spektrumları ve sayımları alınmıştır. 12 M HCl geçirilerek elde edilen elüsyondan alınan 200 μL ile örneğin de çok kanallı analizörde spektrumu ve sayımları alınmıştır. Son aşamada 2 M HCl geçirilerek elde edilen elüsyondan alınan 200 μL örneğin de sayımı ve gama spektrumu alınmıştır.

İlaveten Dowex 1x8'lik reçineden geçirilen $^{46}\text{ScCl}_3$ ve TiCl_4 HPLC analizleri yapılmıştır.

3.5.1 Dowex 1x8 Reçinesi ile Ca ve Ti'nin Ayrılabilirliği İçin Kullanılması

10⁻³ M CaCl_2 ve 10⁻⁶ M TiCl_4 5'er mL'lik eşit hacimlerde alınarak karıştırılmıştır. Daha sonra 5 mg 8-hidroksikinolin ile çözelti doyurulmuştur. Hazırlanan solüsyon Dowex 1x8 reçineden geçirilmeden önce reçinenin aktivasyonu sağlanmıştır. Reçineyi aktive etmek için %10'luk NaCl ve % 0.2'lik NaOH 80°C'de 2 saat ısıtıldıktan sonra reçineden geçirilmiştir. Hemen ardından % 0.5'lik HCl geçirilmesiyle reçine aktive edilmiştir. Solüsyon elüe edilmeden önce kolonun şartlanması 12 M'lik HCl ile yapılmıştır. Solüsyon geçirildikten sonra, önce 12 M HCl (240 mL) sonra ise 2 M HCl (140 mL) ile elüsyon yapılmıştır. İlk 240 mL de atık (TiCl_4 hariç her şey) toplanırken sonraki 140 mL'de TiCl_4 'ün elde

edileceği öngörülmektedir. Daha sonra her bir eluant ayrı ayrı HPLC sistemiyle incelenmiştir.

3.6 ^{226}Ra ile Yapılan Çalışmalar

Teorik olarak ^{226}Ra 'un alfa ışınlarıyla ^{40}Ca içeren örneklerin birlikte çöktürülmesi halinde ^{40}Ca 'un alfa ışınlarıyla ^{44}Ti 'un üretilebilirliği önce teorik olarak sonra da enstitümüzde mevcut ^{226}Ra standartlarından ^{40}Ca ile ^{226}Ra 'un birlikte hidroksitleri olarak çöktürülmesi halinde ^{44}Ti üretilebilirliği incelenmiştir. Alfa kaynağı olarak 1 mL hacimde 180.64 nCi $^{226}\text{RaCl}_2$ kullanılarak 250 mg CaCl_2 ve 0.5 mL 2M NaOH, 250 µl distile su ile karıştırılarak çöktürülmüş ve zamanla ^{44}Ti 'un oluşabilirliği çok kanallı gama spektrometresi ile incelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ Jeneratörü İçin Gerekli $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ Reaksiyon Parametrelerinin Hesaplanması

4.1.1 30 MeV'lik Enerjiye Kadar Olan $^{45}\text{Sc}+p$ Reaksiyonlarının Bağ Enerjileri ve Eşik Enerjileri

Bu reaksiyon da dâhil olmak üzere ilgili reaksiyonların bozunma ve eşik enerjileri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 $^{45}\text{Sc}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri

Reaksiyon Ürünleri	Bozunma Enerjisi (keV)	Eşik Enerjisi (keV)
$^{46}\text{Ti}+\gamma$	10344.870	0.0
$^{42}\text{Ca}+\alpha$	2339.400	0.0
$^{45}\text{Sc}+p$	0.0	0.0
$^{45}\text{Ti}+n$	-2844.403	2908.150
$^{38}\text{Ar}+2\alpha$	-3917.933	4005.740
$^{44}\text{Ca}+2p$	-6892.190	7046.655
$^{42}\text{K}+p+\alpha$	-7937.265	8115.152
$^{44}\text{Sc}+d$	-9102.660	9306.670
$^{41}\text{Ca}+n+\alpha$	-9141.264	9346.134
$^{43}\text{Ca}+^3\text{He}$	-10305.320	10536.279
$^{34}\text{S}+3\alpha$	-11125.982	11375.334
$^{44}\text{Sc}+n+p$	-11327.230	11581.090

$^{44}\text{Ti}+2\text{n}$	-12376.986	12654.375
$^{43}\text{Sc}+\text{t}$	-12544.630	12825.780
$^{37}\text{Cl}+\text{p}+2\alpha$	-14160.187	14477.540
$^{40}\text{Ar}+2\text{p}+\alpha$	-15745.885	16098.775
$^{37}\text{Ar}+\text{n}+2\alpha$	-15756.406	16109.533
$^{43}\text{Ca}+\text{p}+\text{d}$	-15798.794	16152.870
$^{40}\text{K}+\text{d}+\alpha$	-15808.066	16162.351
$^{39}\text{K}+\text{t}+\alpha$	-17350.455	17739.307
$^{42}\text{Ca}+\text{p}+\text{t}$	-17474.457	17866.088
$^{40}\text{Ca}+2\text{n}+\alpha$	-17504.088	17896.383
$^{39}\text{Ar}+^3\text{He}+\alpha$	-17896.860	18297.960
$^{43}\text{Ca}+\text{n}+2\text{p}$	-18023.36	18427.293
$^{40}\text{K}+\text{n}+\text{p}+\alpha$	-18032.633	18436.773
$^{42}\text{Ca}+\text{n}+^3\text{He}$	-18238.210	18646.959
$^{43}\text{Sc}+\text{n}+\text{d}$	-18801.860	19223.240
$^{30}\text{Si}+4\alpha$	-19049.625	19476.559
$^{43}\text{K}+3\text{p}$	-19704.450	19501.940
$^{42}\text{K}+\text{p}+^3\text{He}$	-20981.082	21451.303
$^{43}\text{Sc}+2\text{n}+\text{p}$	-21026.430	21497.660
$^{42}\text{Ca}+2\text{d}$	-21507.120	21989.129
$^{33}\text{P}+\text{p}+3\alpha$	-22009.290	22502.560
$^{36}\text{Cl}+\text{d}+2\alpha$	-22246.469	22745.049
$^{33}\text{S}+\text{n}+3\alpha$	-22543.133	23048.361
$^{36}\text{S}+2\text{p}+2\alpha$	-22546.564	23051.870
$^{39}\text{Ar}+\text{p}+\text{d}+\alpha$	-23390.340	23914.550
$^{39}\text{K}+\text{n}+\text{d}+\alpha$	-23607.686	24136.771
$^{42}\text{Ca}+\text{n}+\text{p}+\text{d}$	-23731.684	24263.549
$^{38}\text{Ar}+\text{p}+\text{t}+\alpha$	-23731.799	24263.666
$^{36}\text{Cl}+\text{n}+\text{p}+2\alpha$	-24471.035	25019.470
$^{38}\text{Ar}+\text{n}+^3\text{He}+\alpha$	-24495.553	25044.537
$^{36}\text{Ar}+2\text{n}+2\alpha$	-24543.848	25093.914
$^{35}\text{Cl}+\text{t}+2\alpha$	-24569.035	25119.668
$^{42}\text{Sc}+\text{n}+\text{t}$	-24682.895	25236.078
$^{35}\text{S}+^3\text{He}+2\alpha$	-24717.766	25271.730
$^{39}\text{Ar}+\text{n}+2\text{p}+\alpha$	-25.614.900	26188.980
$^{39}\text{K}+2\text{n}+\text{p}+\alpha$	-25832.252	26411.195
$^{42}\text{Ca}+2\text{n}+2\text{p}$	-25956.252	26537.973
$^{41}\text{K}+\text{d}+^3\text{He}$	-26290.318	26879.527
$^{42}\text{K}+2\text{p}+\text{d}$	-26474.559	27067.896
$^{41}\text{Ca}+\text{d}+\text{t}$	-26730.562	27329.637
$^{41}\text{K}+2\text{p}+\text{t}$	-27751.129	28373.076
$^{38}\text{Ar}+2\text{d}+\alpha$	-27764.460	28386.707
$^{39}\text{Cl}+3\text{p}+\alpha$	-28274.540	28908.220
$^{41}\text{K}+\text{n}+\text{p}+^3\text{He}$	-28514.883	29153.947
$^{42}\text{Ar}+4\text{p}$	-28516.130	29155.220
$^{40}\text{Ar}+2^3\text{He}$	-28065.463	29246.557
$^{38}\text{Cl}+\text{p}+^3\text{He}+\alpha$	-28629.924	29271.566
$^{43}\text{Ti}+3\text{n}$	-28675.790	29318.460

Kullanacağımız reaksiyon olan $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ reaksiyonunun Bağ enerjisi -12.376 MeV olup Eşik Enerjisi de 12.654 MeV'dir.

4.1.2 $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ Reaksiyonunun Minimum Coulomb Bariyer Enerjisi

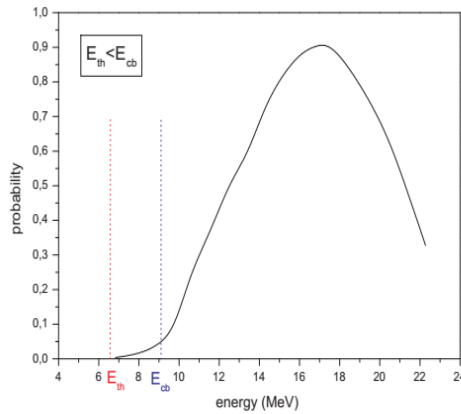
Minimum Coulomb Bariyeri enerjisi reaksiyonun hangi enerji civarında başlayacağı açısından önemlidir. Şu şekilde bir eşitliğe sahiptir:

$$E_{cb_{\min}} = 1.109(A_p + A_T) \frac{Z_p Z_T}{A_T(A_p^{1/3} + A_T^{1/3})}$$

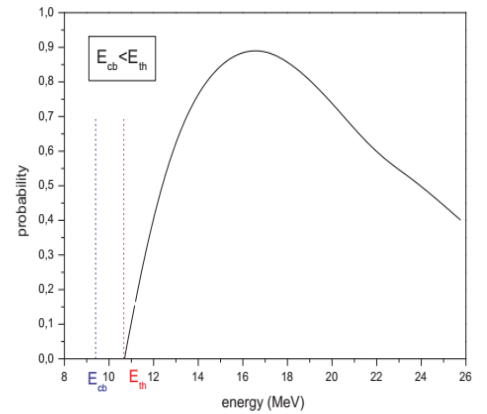
$$E_{cb_{\min}} = 1.109(1 + 45) \frac{21}{45(1^{1/3} + 45^{1/3})}$$

$$E_{cb_{\min}} = 5.224 \text{ MeV}$$

Sonuç olarak reaksiyon eşik enerjisi olan 12 MeV civarında başlayacak olup minimum Coulomb bariyeri enerjisi daha düşük bir değerde kalmıştır. Şekil 4.1 (a)'da, $E_{th} < E_{cb}$, eşik enerjisinin hakim olduğu tüketim enerjisi ile Coulomb bariyeri arasındaki aralığın fonksiyonun nasıl düşük değerlere geldiğini gösterir. Daha yüksek enerjiler için, fonksiyon daha hızlı yükselir. Şekil 4.1 (b)'de, $E_{cb} < E_{th}$ 'de fonksiyonun sıfırdan başlayıp maksimuma çok hızlı ulaştığını görmek mümkündür.



(a)

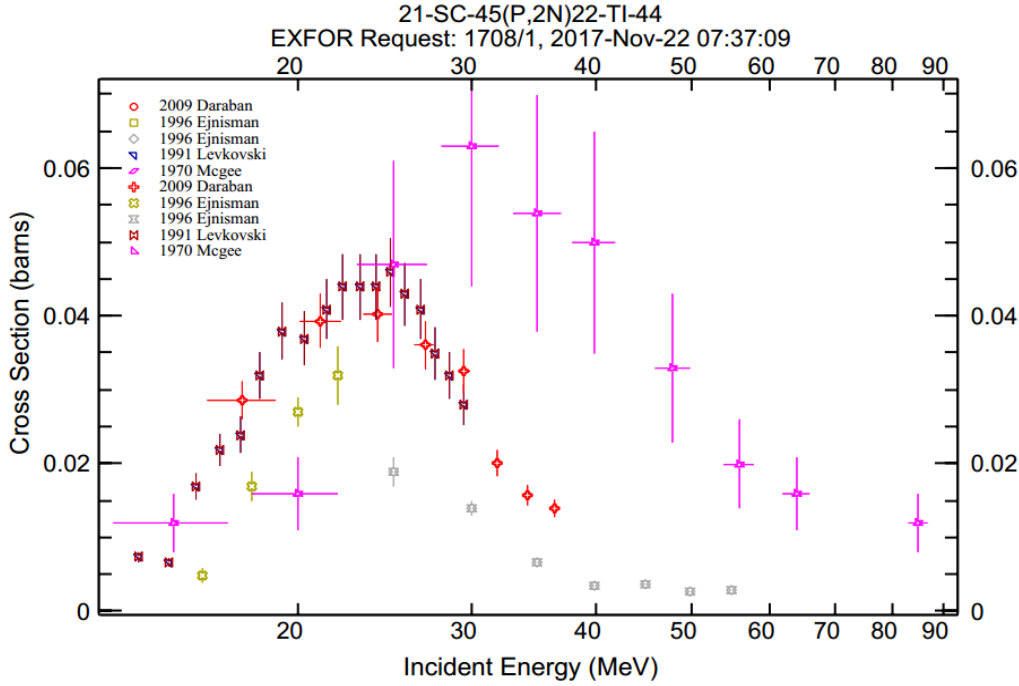


(b)

Şekil 4.1 Olasılık fonksiyonu davranışına örnek

4.1.3 EXFOR Datalarına Göre $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ Reaksiyonunun Tesir Kesiti Değerleri

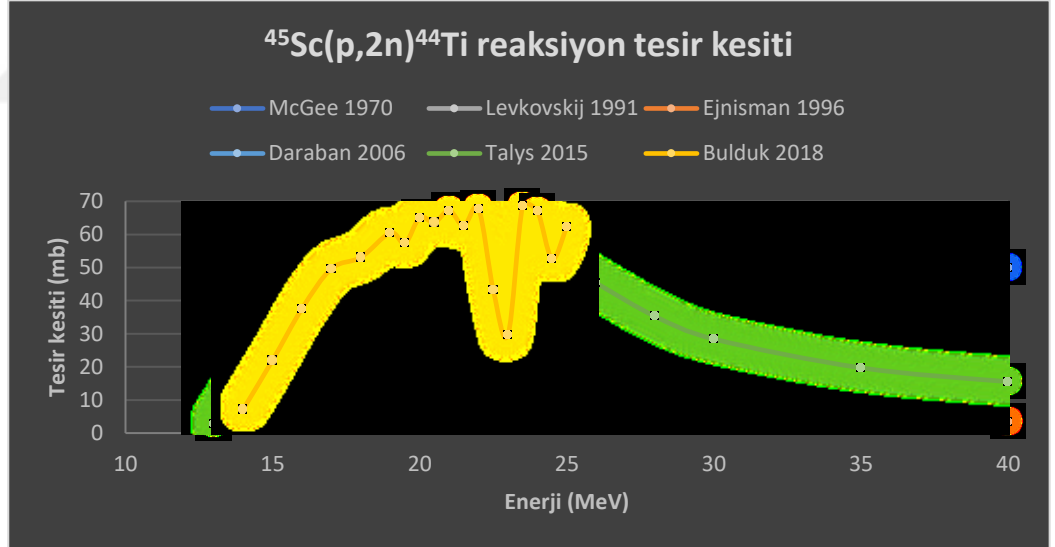
Kullanılan bu bilgiler yapılan deneysel verilere dayanarak bulunmuş verilere aittir ve bu değerler Şekil 4.2’de verilmiştir. Daha sonra kullanılan Empire3.2/MALTA kodu ile reaksiyon tesir kesitleri elde edilmiştir. Çizelge 4.2 ve ardından oluşturulan grafiğe göre (Şekil 4.3) en büyük $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ reaksiyonu tesir kesiti değerleri 21, 22, 23.5 ve 24 MeV enerji aralığındadır. Bir optimizasyon yapmak gerektiğinde ise en küçük enerji değerini seçmek diğer reaksiyonlar sonucu oluşabilecek kimyasal safsızlıkların önüne geçilebilmesi açısından daha faydalıdır. Bunun için seçilen enerji düzeyi 22 MeV olacaktır.



Şekil 4.2 EXFOR dataları kullanılarak elde edilmiş $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ reaksiyonu tesir kesitleri

Çizelge 4.2 Empire3.2/MALTA dataları kullanılarak elde edilmiş tüm $^{45}\text{Sc}+^1\text{H}$ tesir kesitleri

# Einc	(z,gamma)	(z,n)	(z,2n)	(z,p)	(z,d)	(z,t)	(z,2p)	(z,h)	(z,a)	(z,na)	(z,2na)	(z,pa)	(z,npa)	(z,2npa)	(z,2pa)	(z,n2pa)	(z,2n2pa)	(z,n2a)	(z,p2a)	(z,2n2p2a)
0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,6	0,379052	101,741	0	89,297	0	0	0	0	2,49393	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,8	0,358017	119,189	0	103,437	0	0	0	0	3,21301	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,342644	134,264	0	120,385	0	0	0	0	4,20165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,2	0,334311	147,854	0	139,4	0	0	0	0	5,35039	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,4	0,308545	168,803	0	151,354	0	0	0	0	6,4164	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,6	0,278351	192,992	0	161,211	0	0	0	0	7,56129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,8	0,269569	206,88	0	182,402	0	0	0	0	9,20751	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,263593	221,17	0	199,897	0	0	0	0	10,9939	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,5	0,256008	242,094	0	263,427	0	0	0	0	16,5849	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,242888	247,169	0	327,832	0	0	0	0	23,5432	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,197147	243,303	0	429,892	0	0	0	0	39,1526	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,144075	266,161	0	463,612	0	0	0	0	51,0218	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,106525	293,842	0	474,338	0	0	0	0	59,0137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,08186	307,601	0	488,607	0	0,08585	0	0,08585	68,8444	0	0	0	0	0	0	5,4E-05	0	0	0	0
11	0,074614	314,53	0	499,167	0,00318	0	1,25146	0	82,484	0	0	0	0	0	0	0,01205	0	0	0	0
12	0,067896	320,239	0	496,754	0,13357	0	10,3587	0	96,6488	0	0	4,9E-06	0	0	0	0,20966	0	0	0	0
13	0,063931	325,474	0	472,103	3,55064	0	31,2679	3,3E-06	109,068	2,92432	0	0,00368	0	0	0	1,64197	0	0	0	0
14	0,059892	297,455	7,19166	423,145	22,5922	9,9E-06	74,7571	0,00028	113,683	16,1159	0	0,04323	0	0	0	7,41662	0	0	0	0
15	0,060049	218,459	22,0036	355,14	102,616	0,00267	135,341	0,00319	108,403	16,1102	0	0,00995	0	0	0	17,0328	0	0	0	0
16	0,055803	158,896	37,5973	303,355	174,898	0,0261	157,954	0,0151	95,997	32,029	0	1,62786	0	0	0	24,364	0	0	0	0
17	0,050882	123,923	49,6794	232,329	245,08	0,08516	185,989	0,04157	80,137	45,1146	0	3,43961	0	0	0	31,4029	0	0	0	0
18	0,050272	92,2831	53,0928	181,986	329,944	0,18508	179,901	0,08791	62,1144	69,443	0	5,28825	0	0	0	32,1437	0	0	0	0
19	0,043607	67,4348	60,48	147,195	383,761	0,32887	182,517	0,16343	47,9493	76,9174	0	11,3753	0	0	0	35,1754	0	0	0	0
19,5	0,041816	60,2031	57,3378	168,081	387,61	0,38778	183,734	0,21132	40,8788	72,3181	0	12,7432	0	0	0	32,5873	0	0	0	0
20	0,041785	55,2484	65,1187	103,326	432,431	0,53302	187,78	0,68688	34,1502	87,542	0	17,5489	2,8E-08	0	0	33,5189	0	0	0	0
20,5	0,040668	47,7812	63,6231	96,5154	450,319	0,66797	183,176	1,41011	30,8313	89,7156	0	20,9419	5,1E-06	0	0	33,9938	0	0	0	0
21	0,03996	44,5093	67,2537	86,3437	475,475	0,84104	167,072	2,54722	27,797	91,9504	0,00023	22,7053	7,9E-05	0	0	33,1467	0	0	2,63E-07	0
21,5	0,033862	36,5574	62,5871	98,1901	449,109	0,99916	208,058	4,82304	22,967	82,4634	0,00654	24,6921	0,00063	5,7E-07	0	28,9202	0	0	2,06E-06	0
22	0,033579	36,3821	67,7669	68,3265	476,067	1,43331	183,409	8,09323	20,849	92,1772	0,05382	32,1724	0,0037	2,1E-05	0	31,7772	0	0	1,02E-05	0
22,5	0,031261	25,0677	43,272	142,538	331,81	1,16742	371,932	6,10572	12,2166	47,8654	0,07263	17,6691	0,00582	0,00011	2,4E-08	17,0383	6,9E-08	0	1,83E-05	0
23	0,030178	21,6798	29,6221	123,039	369,163	1,35786	412,688	3,66218	9,56796	24,484	0,11797	10,8912	0,00593	0,00031	7,5E-08	9,62085	0	0	4,27E-05	0
23,5	0,031673	27,2194	68,5958	41,2407	504,309	4,24236	168,29	22,2028	14,3428	94,9015	0,83105	39,655	0,05969	0,00467	4,6E-05	8,3E-08	28,0172	3,3E-05	0,00028	0,001136
24	0,031094	25,4347	67,0402	40,911	509,019	5,90739	163,029	23,0484	12,3379	94,4757	1,03122	40,4339	0,09973	0,00744	0,00035	5,7E-07	28,427	0,00024	0,00146	0,0042
24,5	0,026556	24,4644	52,6416	45,2769	463,754	6,69797	246,749	27,7036	10,5212	77,2276	1,67643	31,5972	0,10825	0,01784	0,00099	4E-06	20,409	0,00246	0,00382	0,008004
25	0,026311	22,1543	62,2274	37,8688	487,886	8,81523	181,005	33,1866	12,2211	92,9206	2,24259	40,7432	0,22943	0,04713	0,00906	3,6E-05	24,8749	0,01034	0,00689	0,012748
26	0,024973	18,0684	40,0742	28,0101	499,359	13,0936	244,259	49,8097	8,9267	52,5991	2,75962	28,8237	0,32332	0,07534	0,00535	0,00039	15,9008	0,0309	0,03266	0,045803
27	0,023922	17,6783	28,6443	31,9754	460,34	17,5634	307,178	51,5431	8,43064	36,4285	3,3056	22,98	0,48264	0,11703	0,00773	0,00077	10,4959	0,04696	0,06702	0,077485

Şekil 4.3 Empire3.2/MALTA ve TALYS-2015 verileri de dahil olmak üzere EXFOR dataları kullanılarak elde edilmiş $^{45}\text{Sc}(p,2n)^{44}\text{Ti}$ reaksiyonu tesir kesitleri

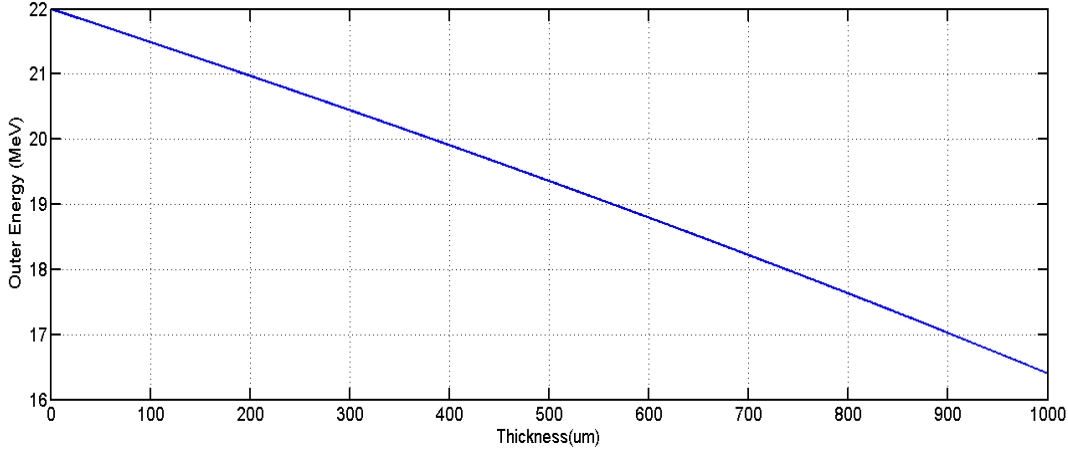
4.1.4 Maksimum Tesir Kesiti Değerine Göre Hesaplanan Enerji Düşüşü ve Aktivite

Işınlama parametreleri daha önceki deneysel verilere ve yapılan hesaplamalara dayanılarak şu şekilde belirlenmiştir.

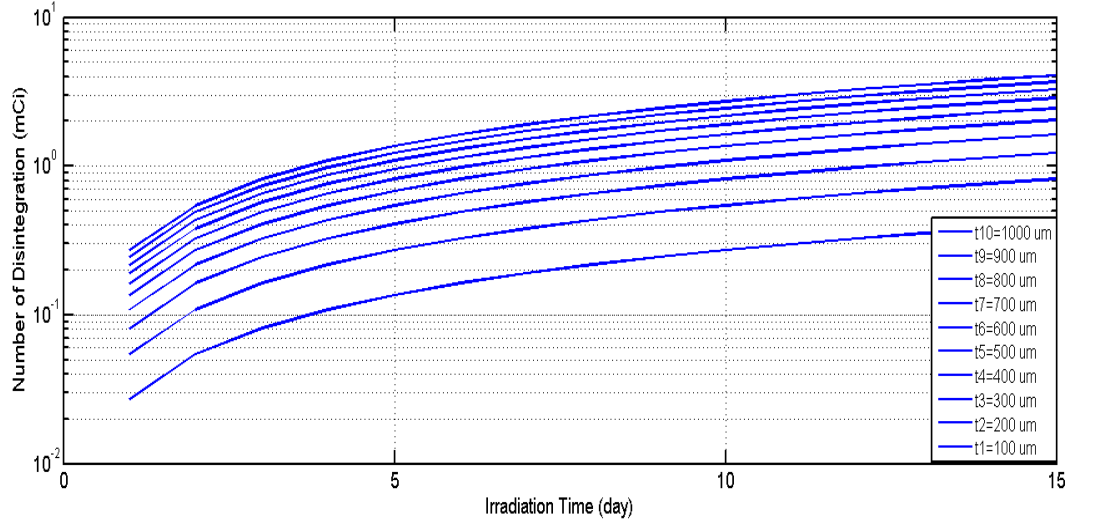
Çizelge 4.3 Işınlama parametreleri

Hedef kalınlığı	100-1000 μm
Işınlama açısı	6 °
Işınlama akımı	200 μA
Işınlama akısı	$1.25 \times 10^{14} \text{ \#/cm}^2.\text{s}$
Proton demeti enerjisi	22 MeV

Şekil 4.4'te göre 22 MeV ile gelen protonlar skandiyum hedefi içerisinde 500 μm kalınlıkta yaklaşık 19 MeV enerjiye kadar düşmektedir. Bu da istenilen aralıklarda olup tesir kesiti bakımından çok fark yaratmamaktadır. MATLAB ve TableCurve5.02 kullanılarak yapılan hesaplar %100 saflıkta skandiyum metali için olup farklı kompozisyonlardaki hedef sistemleri için bu hesaplar tekrarlanabilir olacaktır.



Şekil 4.4 Belirli enerjide gelen protonların skandiyum hedef kalınlığına göre enerjilerinin değişimi



Şekil 4.5 Belli enerjide gelen protonların farklı kalınlıklardaki hedeflere çarpmasıyla oluşan aktivitenin zamanla değişimi

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere 500 μm kalınlıktaki hedef için 10 günlük bir ışınlama süresi için 1 mCi'lik bir aktivite düzeyi elde edilmektedir. Aktivitenin yükseltilebilmesi için proton akısını optimize etmek gerekmektedir.

4.1.5 Doğal Titanyumun Sadece ^{46}Ti , ^{47}Ti , ^{49}Ti ve ^{50}Ti Zayıf Ağırlıktaki İzotopları ile Protonlarla Reaksiyonları Sonucu Oluşacak Muhtemel Ürünler Olan ^{43}Sc , ^{44}Sc , ^{46}Sc , ^{47}Sc ve ^{44}Ti 'ün İncelenmesi

4.1.5.1 $^{46}\text{Ti}(\%8.25)+p$ Reaksiyonunun 30 MeV'e Kadar Olan Ürünleri ile Bağlanma ve Eşik Enerjileri

Çizelge 4.4 $^{46}\text{Ti}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri

Reaksiyon Ürünleri	Bozunma Enerjisi (keV)	Eşik Enerjisi (keV)
$^{47}\text{V}+\gamma$	5167.79	0.0
$^{46}\text{Ti}+p$	0.0	0.0
$^{43}\text{Sc}+\alpha$	-3075.60	3143.10
$^{46}\text{V}+n$	-7834.80	8006.58
$^{39}\text{K}+2\alpha$	-7881.47	8054.28
$^{42}\text{Ca}+p+\alpha$	-8005.47	8180.99
$^{45}\text{Sc}+2p$	-10344.90	10571.70

$^{45}\text{Ti}+d$	-10964.70	11205.10
$^{45}\text{Ti}+n+p$	-13189.30	13478.50
$^{44}\text{Sc}+^3\text{He}$	-13954.10	14260.00
$^{44}\text{Ti}+t$	-14240.10	14552.30
$^{38}\text{Ar}+p+2\alpha$	-14262.80	14575.50
$^{35}\text{Cl}+3\alpha$	-15100.05	15431.13
$^{42}\text{Sc}+n+\alpha$	-15213.91	15547.48
$^{44}\text{Ca}+3p$	-17237.10	17615.00
$^{41}\text{Ca}+d+\alpha$	-17261.58	17640.05
$^{41}\text{K}+2p+\alpha$	-18282.14	18682.99
$^{40}\text{Ca}+t+\alpha$	-19367.17	19791.81
$^{44}\text{Sc}+p+d$	-19447.50	19873.90
$^{41}\text{Ca}+n+p+\alpha$	-19486.14	19913.39
$^{44}\text{Ti}+n+d$	-20497.30	20946.70
$^{43}\text{Ca}+p+^3\text{He}$	-20650.20	21103.00
$^{40}\text{K}+^3\text{He}+\alpha$	-20659.47	21112.44
$^{38}\text{K}+n+2\alpha$	-20959.20	21418.80
$^{45}\text{V}+2n$	-21095.40	21558.00
$^{34}\text{S}+p+3\alpha$	-21470.86	21941.62
$^{44}\text{Sc}+n+2p$	-21672.10	22147.30
$^{31}\text{P}+4\alpha$	-22097.95	22582.46
$^{44}\text{Ti}+2n+p$	-22721.90	23220.10
$^{43}\text{Sc}+p+t$	-22889.50	23391.40
$^{43}\text{Sc}+n+^3\text{He}$	-23653.30	24171.90
$^{37}\text{Ar}+d+2\alpha$	-23876.70	24400.20
$^{37}\text{Cl}+2p+2\alpha$	-24505.06	25042.35
$^{40}\text{Ca}+n+d+\alpha$	-25624.40	26186.23
$^{40}\text{Ar}+3p+\alpha$	-26090.76	26662.82
$^{37}\text{Ar}+n+p+2\alpha$	-26101.30	26673.60
$^{43}\text{Ca}+2p+d$	-26143.70	26716.90
$^{40}\text{K}+p+d+\alpha$	-26152.94	26726.36
$^{42}\text{Ca}+d+^3\text{He}$	-26358.52	26936.45
$^{36}\text{Ar}+t+2\alpha$	-26406.93	26985.92
$^{41}\text{Sc}+2n+\alpha$	-26763.97	27350.78
$^{43}\text{Sc}+2d$	-26922.20	27512.50
$^{36}\text{Cl}+^3\text{He}+2\alpha$	-27097.87	27692.01
$^{39}\text{K}+p+t+\alpha$	-27695.33	28302.57
$^{34}\text{Cl}+n+3\alpha$	-27744.81	28353.13
$^{42}\text{Ca}+2p+t$	-27819.33	28429.29
$^{40}\text{Ca}+2n+p+\alpha$	-27848.96	28459.57
$^{39}\text{Ar}+p+^3\text{He}+\alpha$	-28242.00	28861.00
$^{43}\text{Ca}+n+3p$	-28368.20	28990.20
$^{40}\text{K}+n+2p+\alpha$	-28377.51	28999.71

- ^{43}Sc için (p,α) , $(p,p+t)$, $(p,n+^3\text{He})$, $(p,2d)$ ve $(p,n+p+d)$ reaksiyonları mevcuttur.
- ^{44}Sc için $(p,^3\text{He})$, $(p,p+d)$ ve $(p,n+2p)$ reaksiyonları mevcuttur.

- ^{46}Sc için 30 MeV altında uygun reaksiyon yoktur.
- ^{47}Sc için 30 MeV altında uygun reaksiyon yoktur.
- ^{44}Ti için (p,t), (p,n+d) ve (p,2n+p) reaksiyonları mevcuttur.

Bu reaksiyonlar ele alındığında Empire3.2/MALTA kodu kullanılarak aşağıda hesaplanan reaksiyon tesir kesitlerine ait değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bu reaksiyonlardan sadece (p, α), (p, ^3He) ve (p,t) reaksiyonları hesap aralığında kalmıştır. Bunun sebebi diğer reaksiyonların 100 MeV üzerinde olmasından kaynaklanmakta olup bir proton hızlandırıcının ulaşamayacağı enerji aralığındadır. Bu reaksiyonların içerisinde en önemlisi (p,t) reaksiyonu olup oluşacak ürün ^{44}Ti 'tür ve istenilen ana üründür, fakat oluşacak bu ürünün aktivitesi uzun süreli ışınlamalarda bile istenilen seviyeye çıkamayacak kadar küçüktür.

Çizelge 4.5 (p,t), (p, α) ve (p, ^3He) reaksiyonlarının proton enerjisine bağlı tesir kesitleri değerleri

Einc(MeV)	(z,t)	(z,a)	(z,h)		Einc(MeV)	(z,t)	(z,a)	(z,h)
0,001	0	0	0		4,6	0	0	0
0,002	0	0	0		4,8	0	0	0
0,005	0	0	0		5	0	0	0
0,007	0	0	0		5,5	0	0	0
0,01	0	0	0		6	0	0,00023	0
0,02	0	0	0		7	0	0,03287	0
0,05	0	0	0		8	0	0,66316	0
0,07	0	0	0		9	0	4,8391	0
0,1	0	0	0		10	0	15,1891	0
0,2	0	0	0		11	0	28,308	0
0,3	0	0	0		12	0	40,7181	0
0,4	0	0	0		13	0	55,0884	0
0,5	0	0	0		14	0	71,7165	0
0,7	0	0	0		15	0	87,5348	0
0,85	0	0	0		16	8,8E-05	93,5821	0
1	0	0	0		17	0,00292	92,1893	1,8E-05
1,3	0	0	0		18	0,01678	80,5265	0,00101
1,5	0	0	0		19	0,04245	61,8288	0,01278
1,8	0	0	0		20	0,07705	53,8474	0,0643
2	0	0	0		25	1,90371	10,2289	3,92788
2,25	0	0	0		30	28,8254	4,94975	52,5003
2,5	0	0	0		35	54,2738	10,827	206,706
2,75	0	0	0		40	69,4082	24,0154	234,504
3	0	0	0		45	67,3465	54,3401	250,485
3,2	0	0	0		50	61,0892	84,4272	186,428
3,4	0	0	0		60	23,1253	81,5279	111,491
3,6	0	0	0		70	16,9256	50,9995	82,7318
3,8	0	0	0		80	8,36965	47,17	40,8585
4	0	0	0		90	5,60399	24,2598	31,983
4,2	0	0	0		100	5,24861	14,1322	25,7602
4,4	0	0	0					

4.1.5.2 $^{47}\text{Ti}(\%7.44)+p$ Reaksiyonunun 30 MeV'e Kadar Olan Ürünleri ile Bağlanma ve Eşik Enerjileri

Çizelge 4.6 $^{47}\text{Ti}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri

Reaksiyon Ürünleri	Bozunma Enerjisi (keV)	Eşik Enerjisi (keV)
$^{48}\text{V}+\gamma$	6829.30	0.0
$^{47}\text{Ti}+p$	0.0	0.0
$^{44}\text{Sc}+\alpha$	-2257.30	2305.80
$^{47}\text{V}+n$	-3713.09	3792.77
$^{46}\text{Ti}+d$	-6656.31	6799.15
$^{46}\text{Ti}+n+p$	-8880.88	9071.45
$^{43}\text{Ca}+p+\alpha$	-8953.50	9145.60
$^{40}\text{K}+2\alpha$	-8962.73	9155.06
$^{46}\text{Sc}+2p$	-10465.10	10689.70
$^{45}\text{Sc}+^3\text{He}$	-11507.70	11754.70
$^{43}\text{Sc}+n+\alpha$	-11956.50	12213.10
$^{45}\text{Ti}+t$	-13588.40	13880.00
$^{42}\text{Ca}+d+\alpha$	-14661.79	14976.41
$^{36}\text{Cl}+3\alpha$	-15401.14	15731.63
$^{39}\text{Ar}+p+2\alpha$	-16545.00	16900.00
$^{46}\text{V}+2n$	-16715.68	17074.38
$^{39}\text{K}+n+2\alpha$	-16762.35	17122.05
$^{42}\text{Ca}+n+p+\alpha$	-16886.35	17248.72
$^{45}\text{Sc}+p+d$	-17001.20	17366.00
$^{44}\text{Ca}+p+^3\text{He}$	-18399.90	18794.70
$^{45}\text{Ca}+3p$	-18703.10	19104.50
$^{45}\text{Sc}+n+2p$	-19225.80	19638.30
$^{41}\text{K}+^3\text{He}+\alpha$	-19444.98	19862.25
$^{42}\text{K}+2p+\alpha$	-19629.22	20050.45
$^{45}\text{Ti}+n+d$	-19845.60	20271.50
$^{41}\text{Ca}+t+\alpha$	-19885.23	20311.95
$^{38}\text{Ar}+d+2\alpha$	-20919.13	21368.03
$^{45}\text{Ti}+2n+p$	-22070.20	22543.80
$^{44}\text{Sc}+p+t$	-22071.20	22544.80
$^{44}\text{Sc}+n+^3\text{He}$	-22834.90	23325.00
$^{32}\text{P}+4\alpha$	-23043.18	23537.66
$^{44}\text{Ti}+n+t$	-23121.00	23617.10
$^{38}\text{Ar}+n+p+2\alpha$	-23143.69	23640.33
$^{35}\text{S}+p+3\alpha$	-23365.90	23867.31
$^{44}\text{Ca}+2p+d$	-23893.40	24406.10
$^{35}\text{Cl}+n+3\alpha$	-23980.93	24495.53
$^{42}\text{Sc}+2n+\alpha$	-24094.79	24611.84
$^{41}\text{K}+p+d+\alpha$	-24938.46	25473.61
$^{37}\text{Cl}+^3\text{He}+2\alpha$	-25667.90	26218.71
$^{44}\text{Sc}+2d$	-26103.90	26664.00

$^{44}\text{Ca}+n+3p$	-26117.90	26678.40
$^{41}\text{Ca}+n+d+\alpha$	-26142.46	26703.45
$^{37}\text{Ar}+t+2\alpha$	-26500.37	27069.04
$^{41}\text{K}+n+2p+\alpha$	-27163.02	27745.91
$^{40}\text{Ar}+p+^3\text{He}+\alpha$	-27253.60	27838.44
$^{38}\text{Cl}+2p+2\alpha$	-27278.06	27863.42
$^{43}\text{Ca}+d+^3\text{He}$	-27306.50	27892.50
$^{34}\text{S}+d+3\alpha$	-28127.18	28730.76
$^{40}\text{Ca}+n+t+\alpha$	-28248.05	28854.23
$^{44}\text{Sc}+n+p+d$	-28328.40	28936.30
$^{41}\text{Ca}+2n+p+\alpha$	-28367.02	28975.75
$^{43}\text{Ca}+2p+t$	-28767.30	29384.60
$^{40}\text{K}+p+t+\alpha$	-28776.60	29394.11
$^{41}\text{Ar}+3p+\alpha$	-28872.70	29492.30
$^{42}\text{Ca}+t+^3\text{He}$	-28982.18	29604.10

- ^{43}Sc için (p,n+ α) reaksiyonu mevcuttur.
- ^{44}Sc için (p, α), (p,p+t), (p,n+ ^3He), (p,2d) ve (p,n+p+d) reaksiyonları mevcuttur.
- ^{46}Sc için (p,2p) reaksiyonu mevcuttur.
- ^{47}Sc için 30 MeV altında uygun reaksiyon yoktur.
- ^{44}Ti için (p,n+t) reaksiyonu mevcuttur.

Bu reaksiyonlar ele alındığında Empire3.2/MALTA kodu kullanılarak aşağıda hesaplanan reaksiyon tesir kesitlerine ait değerler Çizelge 4.7’de verilmiştir. Bu reaksiyonlardan sadece (p, α), (p,n+ α) ve (p,2p) reaksiyonları hesap aralığında kalmıştır. Bunun sebebi diğer reaksiyonların 100 MeV üzerinde olmasından kaynaklanmaktadır ve klasik bir proton hızlandırıcı 30 MeV’in üzerine çıkamamaktadır. Bu değerler düşünülse bile çıkan tesir kesiti değerleri çok küçük olduğundan ihmal edilebilir değerlerdir.

Çizelge 4.7 (p, α), (p,n+ α) ve (p,2p) reaksiyonlarının proton enerjisine bağlı tesir kesitleri değerleri

Einc(MeV)	(z,a)	(z,na)	(z,2p)	Einc(MeV)	(z,a)	(z,na)	(z,2p)
0,001	0	0	0	4,6	0	0	0
0,002	0	0	0	4,8	6E-06	0	0
0,005	0	0	0	5	3,6E-05	0	0
0,007	0	0	0	5,5	0,00073	0	0
0,01	0	0	0	6	0,00879	0	0
0,02	0	0	0	7	0,32212	0	0
0,05	0	0	0	8	2,90777	0	0
0,07	0	0	0	9	11,75	0	0
0,1	0	0	0	10	26,3433	0	0
0,2	0	0	0	11	45,8794	0	0
0,3	0	0	0	12	74,0794	0	0
0,4	0	0	0	13	106,163	0	0
0,5	0	0	0	14	133,578	0	0,03932
0,7	0	0	0	15	153,558	2,9E-06	0,47142
0,85	0	0	0	16	167,473	0,00041	1,37775
1	0	0	0	17	160,678	0,08953	3,54798
1,3	0	0	0	18	146,142	0,6937	8,67479
1,5	0	0	0	19	108,512	6,85564	12,4067
1,8	0	0	0	20	88,5029	18,2634	21,9789
2	0	0	0	25	22,8824	87,3791	66,0879
2,25	0	0	0	30	9,46509	72,8718	66,1919
2,5	0	0	0	35	14,5459	38,083	61,3473
2,75	0	0	0	40	45,3609	15,1034	40,8569
3	0	0	0	45	75,4826	10,0664	42,8483
3,2	0	0	0	50	131,201	13,8699	31,7996
3,4	0	0	0	60	120,738	30,4823	25,9015
3,6	0	0	0	70	100,054	27,0785	14,2752
3,8	0	0	0	80	48,3712	33,1325	18,6748
4	0	0	0	90	35,5182	22,0067	20,2196
4,2	0	0	0	100	22,2092	12,7627	8,70911
4,4	0	0	0				

4.1.5.3 $^{49}\text{Ti}(\%5.41)+p$ Reaksiyonunun 30 MeV'e Kadar Olan Ürünleri ile Bağlanma ve Eşik Enerjileri

Çizelge 4.8 $^{49}\text{Ti}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri

Reaksiyon Ürünleri	Bozunma Enerjisi (keV)	Eşik Enerjisi (keV)
$^{50}\text{V}+\gamma$	7949.20	0.0
$^{49}\text{Ti}+p$	0.0	0.0
$^{49}\text{V}+n$	-1384.20	1412.70
$^{46}\text{Sc}+\alpha$	-1938.50	1978.40
$^{48}\text{Ti}+d$	-5917.83	6039.64
$^{48}\text{Ti}+n+p$	-8142.40	8310.00
$^{45}\text{Ca}+p+\alpha$	-10176.50	10386.00
$^{45}\text{Sc}+n+\alpha$	-10699.20	10919.40

$^{42}\text{K}+2\alpha$	-11102.62	11331.15
$^{47}\text{Ti}+n$	-11287.26	11519.59
$^{48}\text{Sc}+2p$	-11349.00	11583.00
$^{47}\text{Sc}+^3\text{He}$	-11869.40	12113.80
$^{48}\text{V}+2n$	-12939.80	13206.10
$^{44}\text{Ca}+d+\alpha$	-15366.80	15683.10
$^{47}\text{Sc}+p+d$	-17362.90	17720.30
$^{47}\text{Ti}+n+d$	-17544.49	17905.62
$^{44}\text{Ca}+n+p+\alpha$	-17591.30	17953.40
$^{41}\text{K}+n+2\alpha$	-18636.42	19020.30
$^{38}\text{Cl}+3\alpha$	-18751.46	19137.43
$^{47}\text{Sc}+n+2p$	-19587.50	19990.70
$^{47}\text{Ti}+2n+p$	-19769.06	20175.98
$^{46}\text{Ti}+n+t$	-20168.14	20583.28
$^{43}\text{Ca}+t+\alpha$	-20240.70	20657.30
$^{41}\text{Ar}+p+2\alpha$	-20346.10	20764.90
$^{46}\text{Ca}+p+^3\text{He}$	-20355.60	20774.60
$^{47}\text{Ca}+3p$	-20797.30	21225.40
$^{46}\text{Sc}+p+t$	-21752.40	22200.10
$^{44}\text{Sc}+2n+\alpha$	-22026.40	22479.80
$^{43}\text{K}+^3\text{He}+\alpha$	-22055.60	22509.50
$^{44}\text{K}+2p+\alpha$	-22496.20	22959.20
$^{46}\text{Sc}+n+^3\text{He}$	-22516.10	22979.60
$^{47}\text{V}+3n$	-23482.15	23965.50
$^{37}\text{Cl}+n+3\alpha$	-24859.34	25371.04
$^{46}\text{Sc}+2d$	-25785.00	26315.80
$^{46}\text{Ca}+2p+d$	-25849.10	26381.20
$^{46}\text{Ti}+2n+d$	-26425.37	26969.30
$^{34}\text{P}+4\alpha$	-26425.80	26969.70
$^{40}\text{Ar}+n+p+2\alpha$	-26445.04	26989.38
$^{43}\text{Ca}+n+d+\alpha$	-26497.90	27049.40
$^{43}\text{K}+p+d+\alpha$	-27549.00	28116.10
$^{39}\text{Ar}+t+2\alpha$	-27832.00	28405.00
$^{46}\text{Sc}+n+p+d$	-28009.60	28586.10
$^{46}\text{Ca}+n+3p$	-28073.70	28651.50
$^{42}\text{Ca}+n+t+\alpha$	-28173.61	28753.53
$^{45}\text{Sc}+d+t$	-28288.50	28870.70
$^{45}\text{Ca}+d+^3\text{He}$	-28529.60	29116.80
$^{46}\text{Ti}+3n+p$	-28649.94	29239.66
$^{43}\text{Ca}+2n+p+\alpha$	-28722.50	29313.70
$^{40}\text{K}+2n+2\alpha$	-28731.79	29323.19
$^{37}\text{S}+p+3\alpha$	-28942.12	29537.85

- ^{43}Sc için 30 MeV altında uygun reaksiyon yoktur.
- ^{44}Sc için (p,2n+ α) reaksiyonu mevcuttur.
- ^{46}Sc için (p, α), (p,p+t), (p,n+ ^3He), (p,2d) ve (p,n+p+d) reaksiyonları mevcuttur.

- ^{47}Sc için (p, ^3He), (p,p+d) ve (p,n+2p) reaksiyonları mevcuttur.
- ^{44}Ti için 30 MeV altında uygun reaksiyon yoktur.

Bu reaksiyonlar ele alındığında Empire3.2/MALTA kodu kullanılarak aşağıda hesaplanan reaksiyon tesir kesitlerine ait değerler Çizelge 4.9'da verilmiştir. Bu reaksiyonlardan sadece (p, α), (p,2n+ α) ve (p, ^3He) reaksiyonları hesap aralığında kalmıştır. Bu değerlere bakıldığında ise ortaya çıkan tesir kesiti değerleri çok küçük olduğundan ihmal edilebilir değerlerde kalmaktadır.

Çizelge 4.9 (p, ^3He), (p, α) ve (p,2n+ α) reaksiyonlarının proton enerjisine bağlı tesir kesitleri değerleri

Einc(MeV)	(z,h)	(z,a)	(z,2na)	Einc(MeV)	(z,h)	(z,a)	(z,2na)
0,001	0	0	0	4,6	0	5,02E-06	0
0,002	0	0	0	4,8	0	2,68E-05	0
0,005	0	0	0	5	0	0,000108	0
0,007	0	0	0	5,5	0	0,001822	0
0,01	0	0	0	6	0	0,014281	0
0,02	0	0	0	7	0	0,282551	0
0,05	0	0	0	8	0	2,03776	0
0,07	0	0	0	9	0	6,84501	0
0,1	0	0	0	10	0	13,9243	0
0,2	0	0	0	11	0	24,6182	0
0,3	0	0	0	12	0	41,5694	0
0,4	0	0	0	13	0	61,6244	0
0,5	0	0	0	14	0	79,1207	0
0,7	0	0	0	15	5,34E-06	93,2308	0
0,85	0	0	0	16	0,000224	104,305	0
1	0	0	0	17	0,001883	108,36	0
1,3	0	0	0	18	0,008182	106,298	0
1,5	0	0	0	19	0,023816	98,3648	0
1,8	0	0	0	20	0,052575	68,8274	0
2	0	0	0	25	1,1443	20,7984	0
2,25	0	0	0	30	14,9523	9,52556	0,226767
2,5	0	0	0	35	54,3884	9,50123	24,1716
2,75	0	0	0	40	90,6186	22,5174	44,9037
3	0	0	0	45	94,6757	59,6861	43,0307
3,2	0	0	0	50	107,868	101,348	39,7818
3,4	0	0	0	60	71,1171	156,34	16,731
3,6	0	0	0	70	50,3799	98,323	15,4823
3,8	0	0	0	80	38,6643	94,3421	15,2876
4	0	0	0	90	43,1693	68,0698	21,1586
4,2	0	1,70246E-07	0	100	32,5417	34,7954	19,159
4,4	0	3,74178E-07	0				

4.1.5.4 $^{50}\text{Ti}(\%5.18)+p$ Reaksiyonunun 30 MeV'e Kadar Olan Ürünleri ile Bağlanma ve Eşik Enerjileri

Çizelge 4.10 $^{50}\text{Ti}+^1\text{H}$ Reaksiyonunun ürünleri Bozunma Enerjileri ve Eşik Enerjileri

Reaksiyon Ürünleri	Bozunma Enerjisi (keV)	Eşik Enerjisi (keV)
$^{51}\text{V}+\gamma$	8061.10	0.0
$^{50}\text{Ti}+p$	0.0	0.0
$^{47}\text{Sc}+\alpha$	-2231.00	2276.00
$^{50}\text{V}+n$	-2990.0	3050.30
$^{49}\text{Ti}+d$	-8714.62	8890.42
$^{48}\text{Ti}+t$	-10599.79	10813.62
$^{46}\text{Ca}+p+\alpha$	-10717.20	10933.40
$^{49}\text{Ti}+n+p$	-10939.19	11159.86
$^{49}\text{Sc}+2p$	-12159.00	12405.00
$^{49}\text{V}+2n$	-12323.40	12572.00
$^{43}\text{K}+2\alpha$	-12417.10	12667.60
$^{46}\text{Sc}+n+\alpha$	-12877.70	13137.50
$^{48}\text{Sc}+^3\text{He}$	-14570.00	14864.00
$^{48}\text{Ti}+n+d$	-16857.02	17197.07
$^{45}\text{Ca}+d+\alpha$	-18891.20	19272.20
$^{48}\text{Ti}+2n+p$	-19081.59	19466.51
$^{44}\text{Ca}+t+\alpha$	-20048.70	20453.20
$^{48}\text{Sc}+p+d$	-20064.00	20468.00
$^{45}\text{Ca}+n+p+\alpha$	-21115.70	21541.70
$^{39}\text{Cl}+3\alpha$	-21617.20	22053.30
$^{45}\text{Sc}+2n+\alpha$	-21638.30	22074.80
$^{48}\text{Ca}+3p$	-21784.97	22224.43
$^{42}\text{Ar}+p+2\alpha$	-21859.00	22300.00
$^{42}\text{K}+n+2\alpha$	-22041.81	22486.45
$^{47}\text{Sc}+p+t$	-22044.90	22489.60
$^{47}\text{Ti}+n+t$	-22226.45	22674.82
$^{48}\text{Sc}+n+2p$	-22288.00	22738.00
$^{47}\text{Sc}+n+^3\text{He}$	-22808.60	23268.70
$^{48}\text{V}+3n$	-23878.90	24360.60
$^{47}\text{Ca}+p+^3\text{He}$	-24018.50	24503.00
$^{45}\text{K}+2p+\alpha$	-24529.90	25024.70
$^{44}\text{K}+^3\text{He}+\alpha$	-25717.30	26236.10
$^{47}\text{Sc}+2d$	-26077.50	26603.60
$^{44}\text{Ca}+n+d+\alpha$	-26306.00	26836.60
$^{47}\text{Sc}+n+p+d$	-28302.10	28873.00
$^{47}\text{Ti}+2n+d$	-28483.68	29058.27
$^{44}\text{Ca}+2n+p+\alpha$	-28530.50	29106.10
$^{40}\text{Ar}+t+2\alpha$	-28902.44	29485.48
$^{35}\text{P}+4\alpha$	-28984.60	29569.20
$^{41}\text{Ar}+d+2\alpha$	-29060.70	29647.00

- ^{43}Sc için 30 MeV altında uygun reaksiyon yoktur.
- ^{44}Sc için 30 MeV altında uygun reaksiyon yoktur.
- ^{46}Sc için (p,n+ α) reaksiyonu mevcuttur.
- ^{47}Sc için (p,p+t), (p,n+ ^3He), (p,2d) ve (p,n+p+d) reaksiyonları mevcuttur.
- ^{44}Ti için 30 MeV altında uygun reaksiyon yoktur.

Bu reaksiyonlar ele alındığında Empire3.2/MALTA kodu kullanılarak aşağıda hesaplanan reaksiyon tesir kesitlerine ait değerler Çizelge 4.11'de verilmiştir. Bu reaksiyonlardan sadece (p,n+ α) reaksiyonu hesap aralığında kalmıştır. Bu reaksiyonların enerji aralıkları çok yüksek değerlerde olduğundan bir proton hızlandırıcının ulaşamayacağı enerji aralığındadır. Bu değerlere çıkılsa bile çıkan tesir kesiti değerleri çok küçük olduğundan ve yeterli soğutma sürelerinin ardından ihmal edilebilir değerlere düşeceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.11 (p,n+ α) reaksiyonunun proton enerjisine bağlı tesir kesitleri değerleri

Einc(MeV)	(z,na)	Einc(MeV)	(z,na)
0,001	0	4,6	0
0,002	0	4,8	0
0,005	0	5	0
0,007	0	5,5	0
0,01	0	6	0
0,02	0	7	0
0,05	0	8	0
0,07	0	9	0
0,1	0	10	0
0,2	0	11	0
0,3	0	12	0
0,4	0	13	0
0,5	0	14	0
0,7	0	15	0
0,85	0	16	0
1	0	17	7,6E-05
1,3	0	18	0,14997
1,5	0	19	0,94112
1,8	0	20	12,1554
2	0	25	87,743
2,25	0	30	133,057
2,5	0	35	103,243
2,75	0	40	49,3772
3	0	45	29,3989
3,2	0	50	23,062
3,4	0	60	61,0783
3,6	0	70	77,0109
3,8	0	80	121,208
4	0	90	103,213
4,2	0	100	54,4331
4,4	0		

4.2 Deneysel Sonuçlar

4.2.1 Hedef Sistemi



Şekil 4.6 Sc₂O₃ kaplı Cu plakalar

PET görüntülemeye kullanılan en yeni radyonüklidlerden biri ⁴⁴Sc'dir. ⁴⁴Sc 3.97 saat yarıömürle %100 EC ve ,%94 β⁺ ışıması yaparak bozunur. Sc³⁺ katyonunun Lu³⁺ ve Y³⁺ ile kimyasal benzerliğinden dolayı, bu radyonüklidlerle işaretlenen DOTA kompleksleri *in vivo* olarak benzer özellikler gösterir. Bu nedenle ¹⁷⁷Lu veya ⁹⁰Y içeren terapötik radyofarmasötikler için ⁴⁴Sc bir teranostik çift özelliği gösterir. Aynı kimya ile çalışan görüntüleme ve terapötik radyonüklidler izleme ve terapiyi aynı ligandla yapabildikleri için bu özelliği gösteren radyonüklid çiftler teranostik olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde, [⁶⁸Ga]Ga-DOTA-kompleksleri bu amaç için kullanılmaktadır (Krajewski et al, 2013).⁴⁴Sc, rutin üretim yönteminin iyi kurulması halinde, ⁶⁸Ga'e göre üstünlük göstermektedir. Pahalı bir ⁶⁸Ge/⁶⁸Ga jeneratör gerektirmez, lojistik için uygun bir yarı ömre, daha düşük bir pozitron enerjisine ve biraz daha yüksek β⁺ dallanma oranına sahiptir. Ayrıca, ⁴⁷Sc (T_{1/2}= 3.35 gün, %100β⁻, %69β⁻—ort143 keV, %31β⁻—ort204 keV, %68γ159 keV), artan ilgiye sahip bir terapötik özellik gösteren ⁴⁴Sc ile aynı kimya ile çalışan bir radyonükliddir ve terapötik özellik gösteren ⁴⁷Sc ile teranostik çift oluşturularak peptid bazlı görüntülemeye, antikor işaretlemeye ve küçük protein radyoişaretlemelerinde kullanılabilir (Hernandez et al., 2014). ⁴⁴Sc, ⁴⁷Sc radyonüklidleri üretimi için birden fazla yöntem üzerinde çalışılarak farklı hedef sistemleri kullanılmıştır. Alliot ve grubu Ca-44 ile zenginleştirilmiş ⁴⁴CaCO₃ dan hazırlanmış peletleri ⁴⁴Ca(p,n)⁴⁴Sc reaksiyonu ile ⁴⁴Sc üretimi için hedef olarak

kullandı (Alliot et al., 2015). Bu çalışmada Sarayköy Ankara'da Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumunun 30 MeV'lik hızlandırıcısının ait uygun hedef sistem olan bakır plakalar üzerine Sc tuzları emdirilerek farklı reçine sistemlerinden ayrılabilirliği incelenmiştir. Hazırlanan Sc_2O_3 kaplı Cu plakalar Şekil 4.6'da görülmektedir.

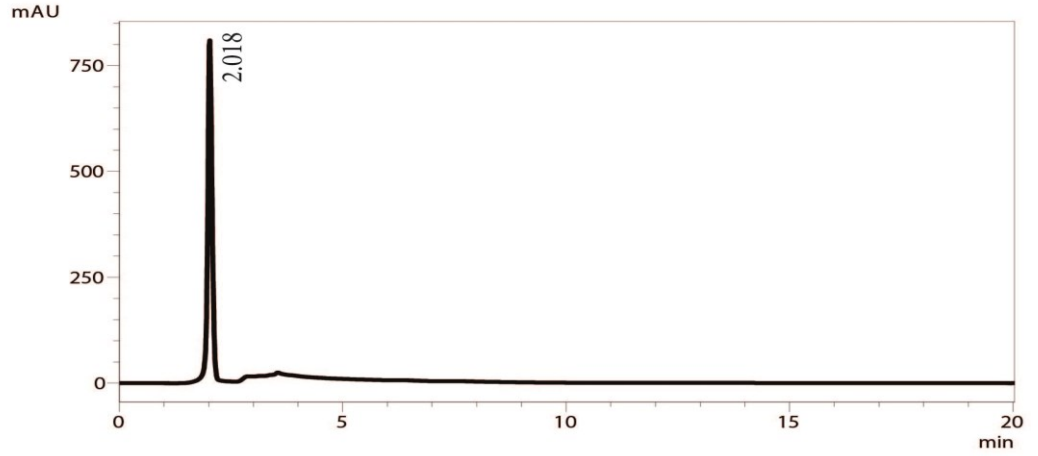
4.2.2 Hydroxamate Reçinesinin HPLC Sonuçları

^{226}Ra çözeltilerinden oluşması muhtemel ^{44}Ti 'ün safsızlıklarından ayrılabilirliğinin tespiti için inaktif koşullarda HPLC analizleri ile Ca ve Ti'un ayrılabilirliği incelenmiştir.

HPLC Parametreleri:

- Akış hızı 1 ml/dk
- Kolon C-18
- Mobil faz %10 ACN-%90 su
- Dalga boyu 254 nm
- olarak belirlenmiştir.

i) Şekil 4.7 0.1 M EDTA'nın, Şekil 4.8 0.1 M EDTA ve 10^{-3} M CaCl_3 karışımının, Şekil 4.9 0.1 M EDTA ve 10^{-6} M TiCl_4 karışımının, Şekil 4.10 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-6} M TiCl_4 karışımının, Şekil 4.11 reçineden geçirilmemiş 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-6} M TiCl_4 karışımının, Şekil 4.12 reçineden geçirilmiş 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-6} M TiCl_4 karışımının HPLC kromatogramlarını göstermektedir. EDTA'nın alıkonma zamanı 2.01 dakika iken EDTA ile şelatlandığını düşündüğümüz $\text{Ca}(\text{EDTA})_2$ piki 2.92 dakikada görülmüştür.

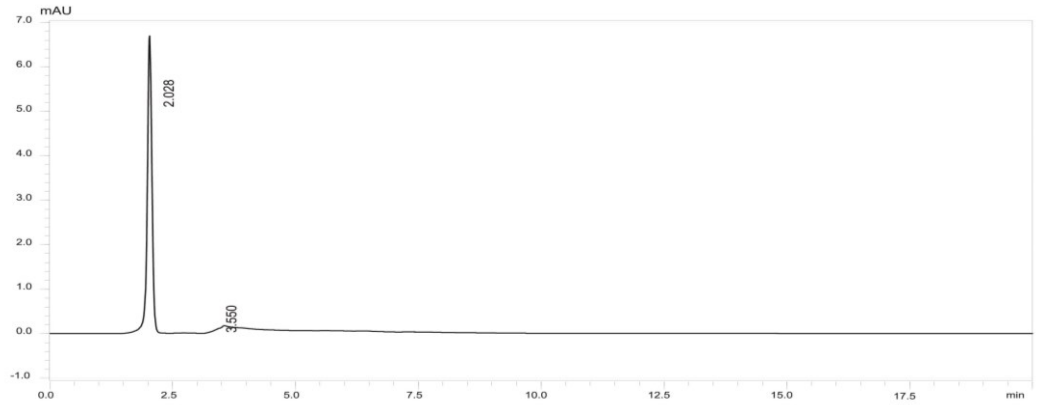


Şekil 4.7 0.1 M EDTA HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.12 0.1 M EDTA HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	2.018	5419715

ii) 0.1 M EDTA (0.75) – 10^{-3} M CaCl_3 (0.25), enjeksiyon miktarı 50 μl

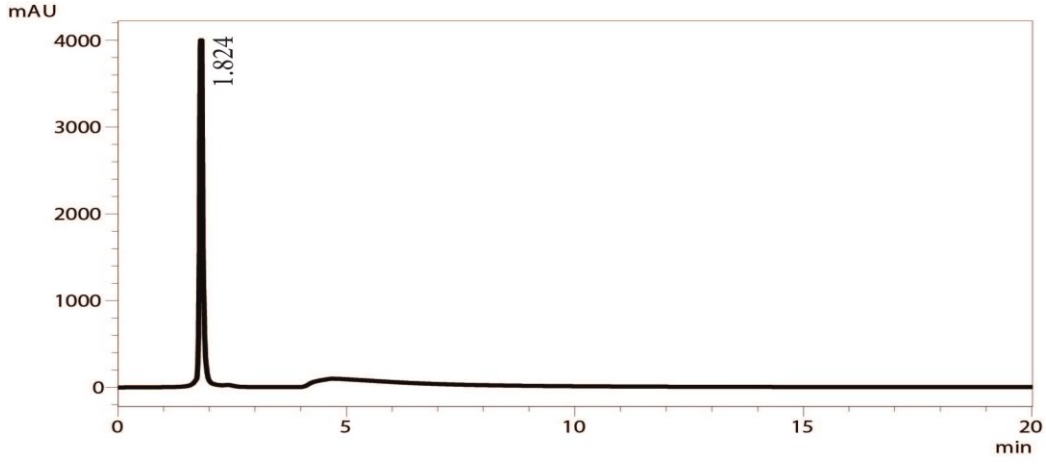


Şekil 4.8 0.1 M EDTA ve 10^{-3} M CaCl_3 karışımının HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.13 0.1 M EDTA ve 10^{-3} M CaCl_3 karışımının HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	2.028	4308820

iii) 0.1 M EDTA (0.75) – 10^{-6} M TiCl_4 (0.25), enjeksiyon miktarı 1 μl

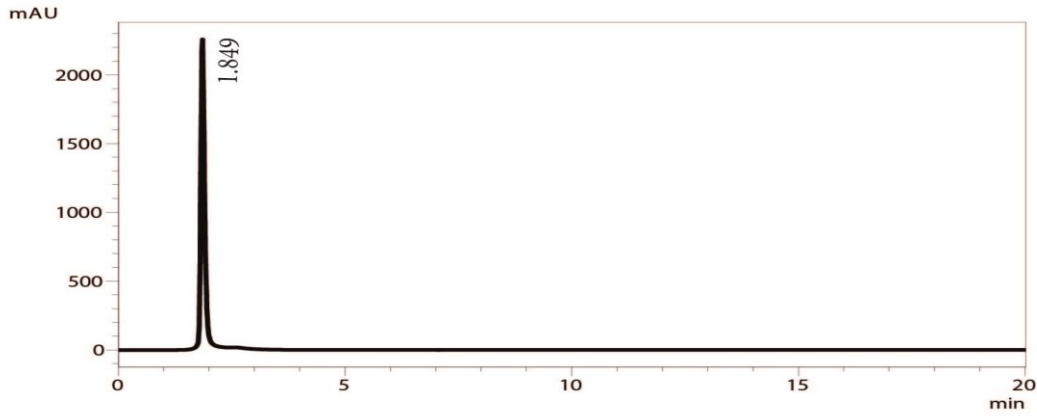


Şekil 4.9 0.1 M EDTA ve 10^{-6} M TiCl_4 karışımının HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.14 0.1 M EDTA ve 10^{-3} M TiCl_4 karışımının HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	1.824	22193163

iv) 0.1 M EDTA (0.75) – 10^{-3} M CaCl_3 (0.125) – 10^{-6} M TiCl_4 (0.125), enjeksiyon miktarı 1 μl

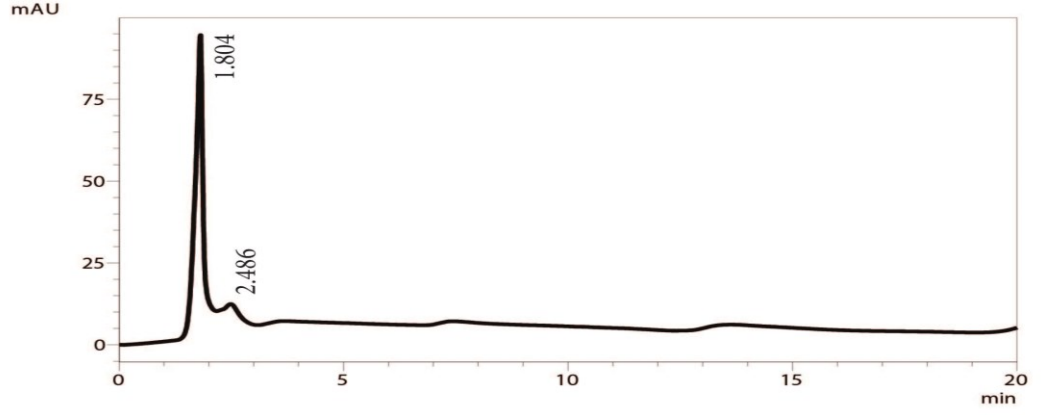


Şekil 4.10 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-6} M TiCl_4 karışımının HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.15 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-3} M TiCl_4 karışımının HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	1.849	13462697

v) Reçinelenmemiş 0.1 M EDTA (0.75) – 10^{-3} M CaCl_3 (0.125) – 10^{-6} M TiCl_4 (0.125), enjeksiyon miktarı 1 μl

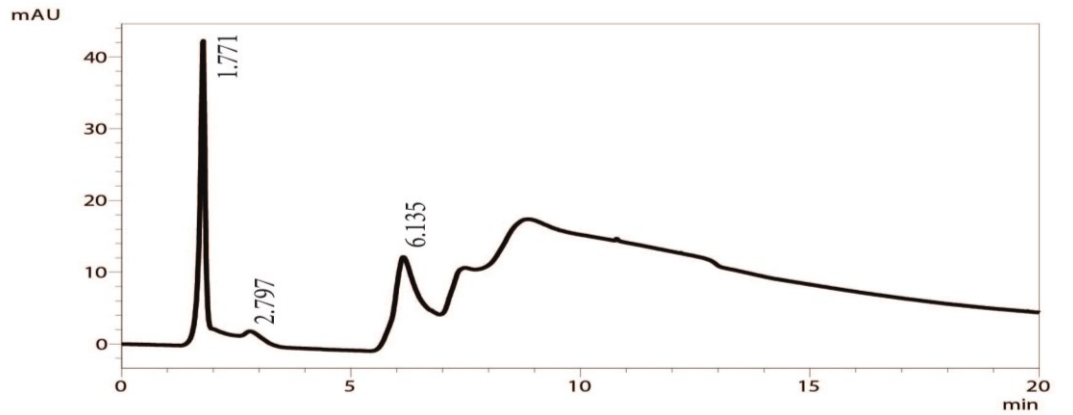


Şekil 4.11 Reçinelenmemiş 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-6} M TiCl_4 karışımının HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.16 Reçinelenmemiş 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-3} M TiCl_4 karışımının HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	1.804	1005361
Pik 2	2.486	72787

vi) 1 M Oksalik asit ile reçinelenmiş 0.1 M EDTA (0.75) – 10^{-3} M CaCl_3 (0.125) – 10^{-6} M TiCl_4 (0.125), enjeksiyon miktarı 1 μl



Şekil 4.12 Reçinelenmiş 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-6} M TiCl_4 karışımının HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.17 Reçinelenmiş 0.1 M EDTA, 10^{-3} M CaCl_3 ve 10^{-3} M TiCl_4 karışımının HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	1.771	318195
Pik 2	2.797	13385
Pik 3	6.135	317201

Sonuç olarak EDTA CaCl_3 ve TiCl_4 'ü kendine bağlarken reçineden geçirilen karışımdan sonra birbirlerinden ayrıldığı görülmektedir. Ancak CaCl_3 ve TiCl_4 'ün kimyasal özellikleri benzer olduğundan hangi pikin hangisine bağlı olduğu bilinmemektedir. Bu sebepten farklı bir reçine kullanılarak ayrılma işlemi tekrarlanmıştır.

Hydroxamate reçinesi ile yapılan Ca ve Ti iyonlarının HPLC analiz sonuçları uyguladığımız koşullarda Ca^{+2} ve Ti^{+4} iyonlarının şelatlayıcı olarak EDTA kullanıp oksalik asit ile elue edildiğinde ayrılabilirdiğini göstermiştir. HPLC analizleri sonucu alınan kromatogramlardan alınan alıkonma zamanları Çizelge 4.18'de gösterilmiştir. Sonuçlar EDTA CaCl_3 ve TiCl_4 'ü ile şelat yaptığında HPLC analizlerinde birbirlerinden ayrıldığı görülmektedir.

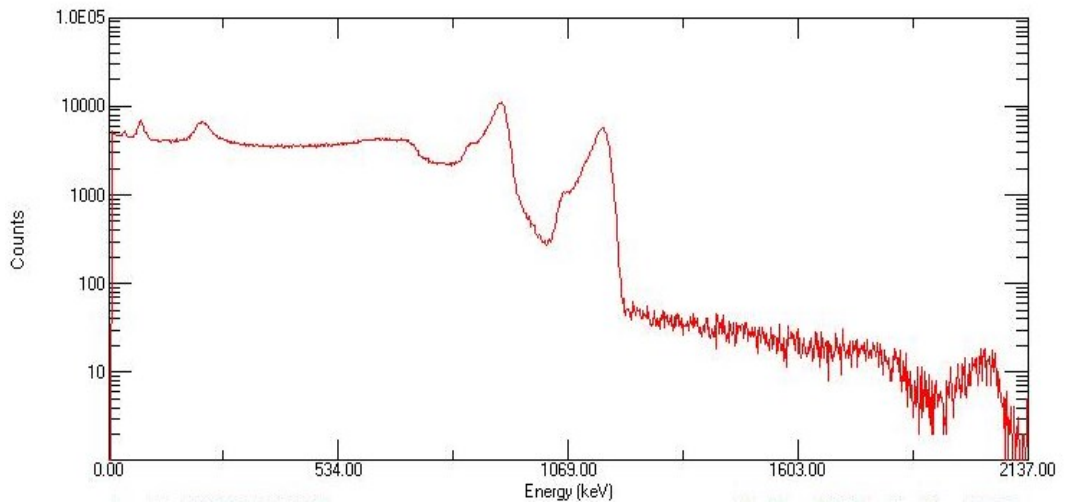
Çizelge 4.18 Hidroksamat Reçinesinden Ca ve Ti'un ayrılabilirliğinin HPLC analiz sonuçları
(HPLC Parametreleri: Akış hızı 1 mL/dk; Kolon C-18; Mobil faz %10 ACN-%90 su; Dalga boyu 254 nm)

Rt (Dak)	$\text{Ca}(\text{EDTA})_2$	$\text{Ti}(\text{EDTA})_4$	EDTA
EDTA	-	-	2.018
Hidroksamat reçinesinden geçirilmemiş 0,1 M EDTA ve 10^{-3} M CaCl_3	2.028	-	-
0,1 M EDTA (0,75) – 10^{-6} M TiCl_4 (0,25)	-	1.824	-

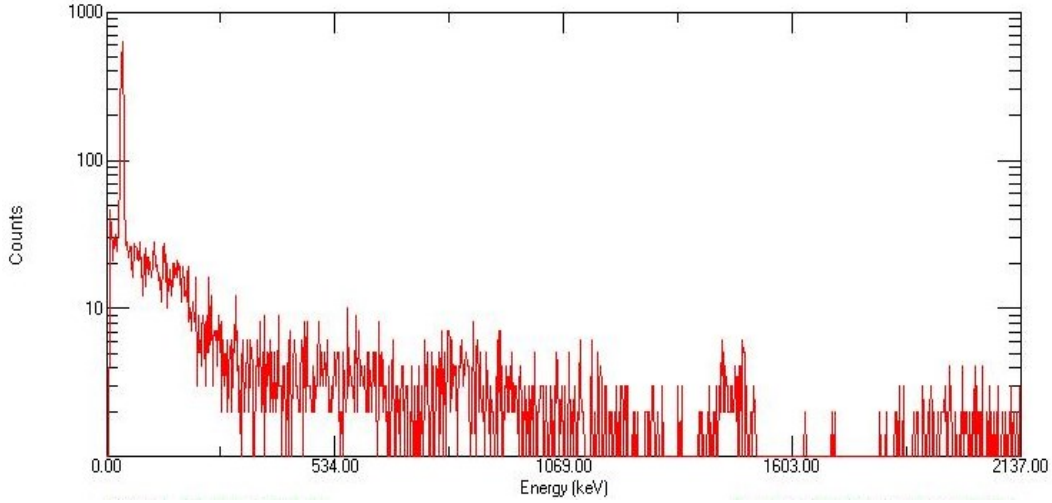
Hidroksamat reçinesinden geçirilmiş 0,1 M EDTA (0,75) – 10 ⁻³ M CaCl ₃ (0,125) – 10 ⁻⁶ M TiCl ₄	6.135	2.797	1.771
--	-------	-------	-------

4.3 Hydroxamate Reçinesi ile Yapılan Ayırmaların ⁴⁶Sc Radyoizleyici Kullanılarak Bulunan Reçinede Ayrılabilirliğine İlişkin Sonuçlar

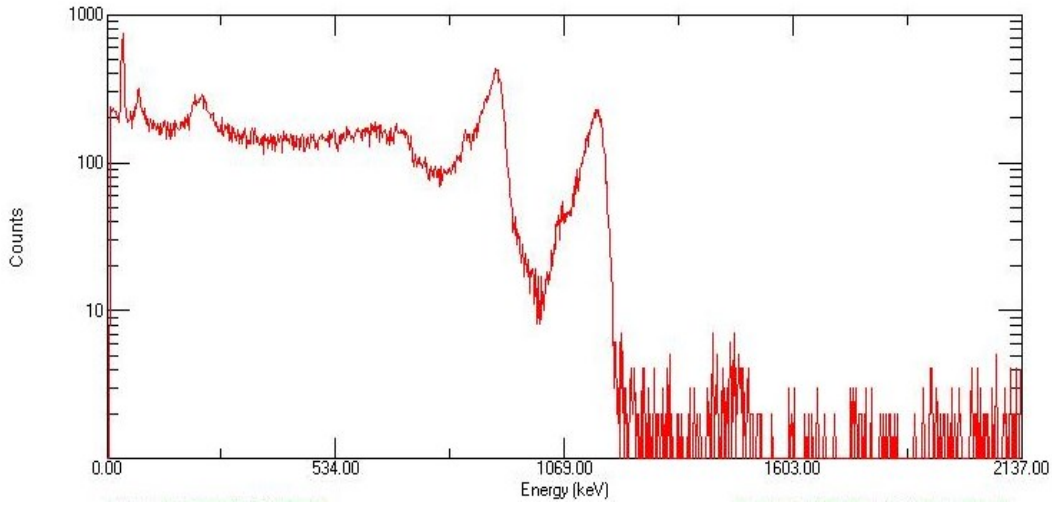
Radyoaktif olmayan inaktif Ti izotopları ve radyoaktif ⁴⁶Sc izleyicisi kullanılarak ⁴⁶Sc'un hedef sisteminden ayrılması için yapılan çalışmaların sonuçları Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te görülmektedir. Şekil 4.13 Hydroxamate Reçinesi'ne yüklenen 100 µL hacimli ⁴⁶Sc'nın çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumu (Sc-46'nın 889.15 keV enerjili pikinin sayısı 6774 sayım /sn; 1112,83 keV enerjili pikinin sayısı 3013 sayım/sn), Şekil 4.14 Hydroxamate reçinesinden geçirilen 100 µL hacimli Sc-46 eluantının çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumu (Sc-46'nın 889.15 keV enerjili pikinin sayısı 3 sayım/sn; 1112,83 keV enerjili pikinin sayısı 1 sayım/sn), Şekil 4.15 Hydroxamate reçinesinden geçirilen 200 µL hacimli 6 M HCl ile alınan Sc-46 eluantının çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumunu göstermektedir.



Şekil 4.13 Hydroxamate Reçinesi'ne yüklenen 100 µL hacimli ⁴⁶Sc'nın çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumu (⁴⁶Sc'nın 889.15 keV enerjili pikinin sayısı 6774 sayım /sn; 1112,83 keV enerjili pikinin sayısı 3013 sayım/sn)



Şekil 4.14 Hydroxamate Reçinesi'nden geçirilen 100 μ L hacimli ^{46}Sc eluantının çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumu (^{46}Sc 'nın 889.15 keV enerjili pikinin sayımı 3 sayım /sn; 1112,83 keV enerjili pikinin sayımı 1 sayım/sn)



Şekil 4.15 Hydroxamate Reçinesi'nden geçirilen 200 μ L hacimli 6 M HCl ile alınan ^{46}Sc eluantının çok kanallı analizörde alınan gama ışını spektrumu (^{46}Sc 'nın 889.15 keV enerjili pikinin sayımı 264 sayım /sn; 1112,83 keV enerjili pikinin sayımı 148 sayım/sn)

Sonuçlar Hydroxamate reçinesinin ^{46}Sc 'yı hedeften ayırmak için uygun olduğunu ve hacim düzelmesi yapıldığında ^{46}Sc 'nın 6 M HCl ile toplam radyoaktivitenin %97.4'ünün Hydroxamate reçinesi ile elue edilebildiğini göstermektedir.

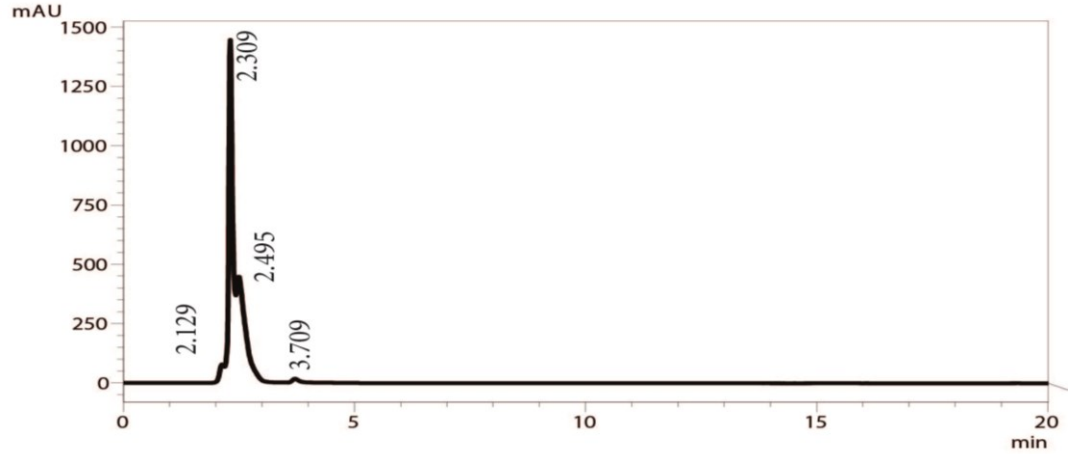
Literatürde Hydroxamate reçinesi Gagnon ve grubu tarafından ^{45}Sc 'un ayrılması amacıyla kullanılmıştır. Yazarlar, 1 mL 1 M oksalik asit içinde >% 50 geri kazanımla ^{45}Ti 'nin ayrılabilirliğinin mümkün olduğunu rapor etmişlerdir (Gagnon et al., 2012). Ancak ayırma yöntemlerinde oksalik asitle elüsyonu ^{45}Ti 'nin

desferalle kompleksini yaparak yapmışlardır. Yazarlar bu reçinenin ^{89}Zr ayrılmasında da başarılı bir şekilde kullanılabileceğini rapor etmişlerdir. Önceki çalışmalarımızda Hydroxamate reçinesi ^{89}Zr 'un üretimi amaçlı bir raporumuzda bu amaçla kullanılmıştır (Bulduk vd., 2019). Bu yöntemde Hydroxamate reçinesinden inaktif Zr oksalik asit ile yaklaşık %75 oranda elue edilmiştir.

4.3.1 Dowex 1X8 Reçinesinin HPLC Sonuçları

Şekil 4.16 reçineden geçirilmiş 10^{-3} M CaCl_2 , 10^{-6} M TiCl_4 ve 5 mg 8 hidroksikinolin karışımının HPLC kromatogramını, Şekil 4.17 12 M HCl ile elue edilmiş HPLC kromatogramını, Şekil 4.18 2 M HCl ile elue edilmiş reçine çözeltisinin HPLC kromatogramını, Şekil 4.19 10^{-3} M CaCl_2 'ün HPLC kromatogramını, Şekil 4.20 10^{-6} M TiCl_4 'ün HPLC kromatogramını göstermektedir.

i) 5 mL 10^{-3} M CaCl_2 , 5 ml 10^{-6} M TiCl_4 ve 5 mg Oxine karışımının reçineden geçirildikten sonraki kromatogramı



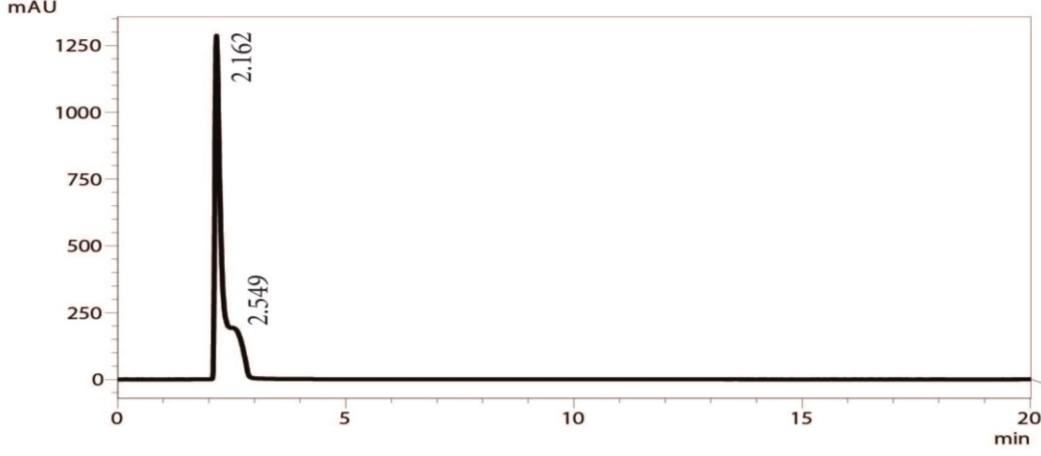
Şekil 4.16 Reçinelenmiş 10^{-3} M CaCl_2 , 10^{-6} M TiCl_4 ve 5 mg Oxine karışımının HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.19 Reçinelenmiş 10^{-3} M CaCl_2 , 10^{-6} M TiCl_4 ve 5 mg Oxine karışımının HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	2.129	527392
Pik 2	2.309	8861490

Pik 3	2.495	6113248
Pik 4	3.709	135744

ii) 12 M 240 mL HCl asidin reçineden geçirildikten sonraki kromatogramı

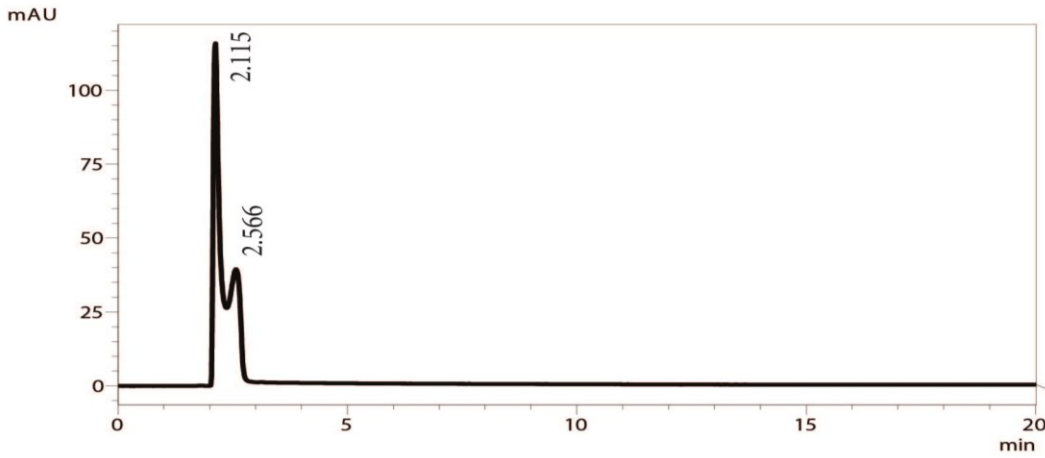


Şekil 4.17 Reçinelenmiş 12 M HCl'nin HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.20 Reçinelenmiş 12 M HCl'nin HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	2.162	12132219
Pik 2	2.549	3174387

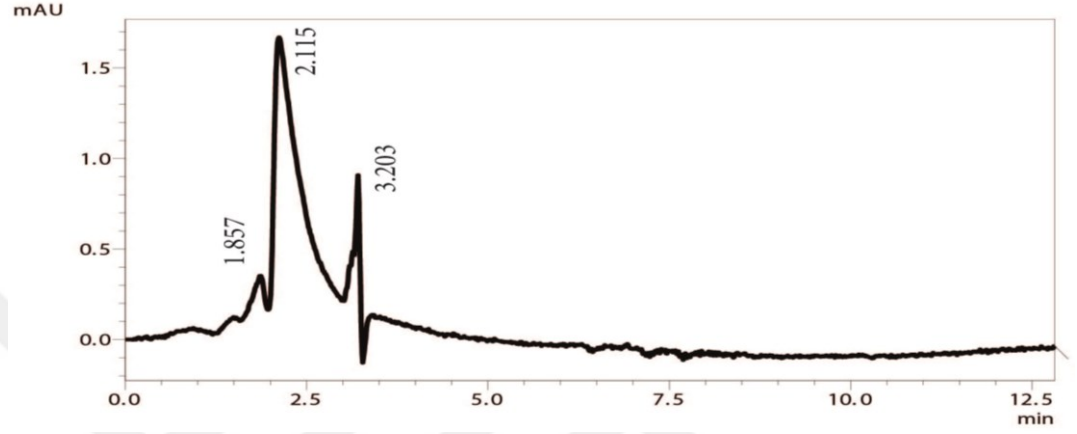
iii) 2 M 140 mL HCl asidin reçineden geçirildikten sonraki kromatogramı



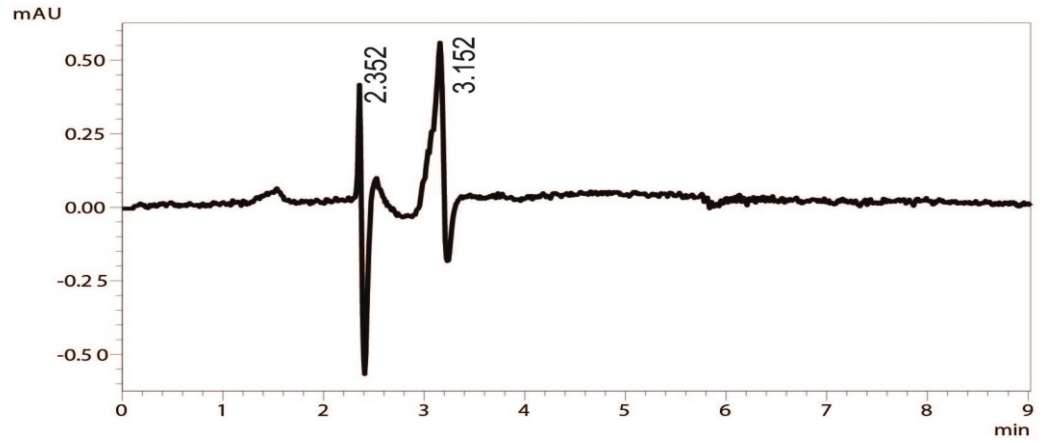
Şekil 4.18 Reçinelenmiş 2 M HCl'nin HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.21 Reçinelenmiş 2 M HCl'nin HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	2.115	1149218
Pik 2	2.566	629750

iv) 10^{-3} M CaCl_2 Şekil 4.19 10^{-3} M CaCl_2 HPLC KromatogramıÇizelge 4.22 10^{-3} M CaCl_2 HPLC pik değerleri

Pikler	Rt	Alan
Pik 1	1.857	2098
Pik 2	2.115	34025
Pik 3	3.203	5757

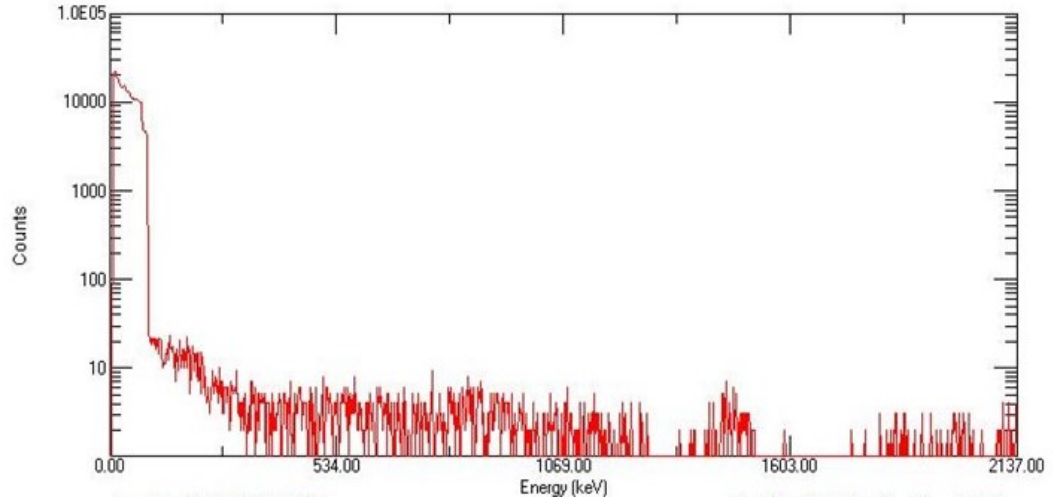
v) 10^{-6} M TiCl_4 Şekil 4.20 10^{-6} M TiCl_4 HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.23 10^{-6} M TiCl_4 HPLC pik değerleri

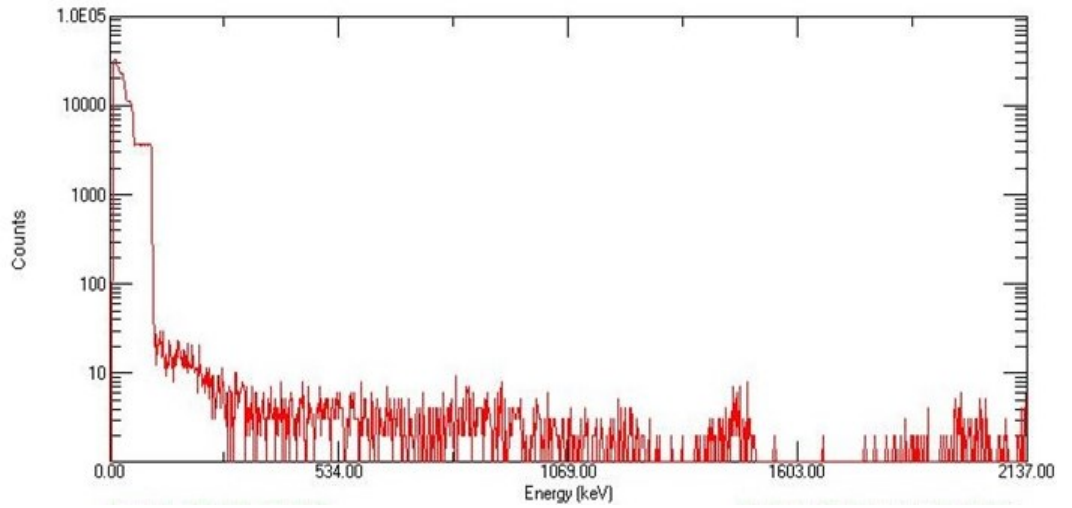
Pikler	Rt	Alan
Pik 1	2.352	714
Pik 2	3.152	5066

Sonuç olarak karışımın reçineden geçirildikten sonra TiCl_4 'ün reçinede kalıp daha sonra ilk önce 12 M HCl ile daha sonra da 2 M HCl ile alınması hedeflenmiştir. Fakat TiCl_4 ve CaCl_2 benzer kimyasal özellik gösterdiğinden ayrımlarının mümkün olmadığı görülmüştür. Bu çalışmanın amacı hedef sistem olarak Ca kullanıldığında oluşacak Ti için bir ayırım yapılabilirliğinin görülmesidir.

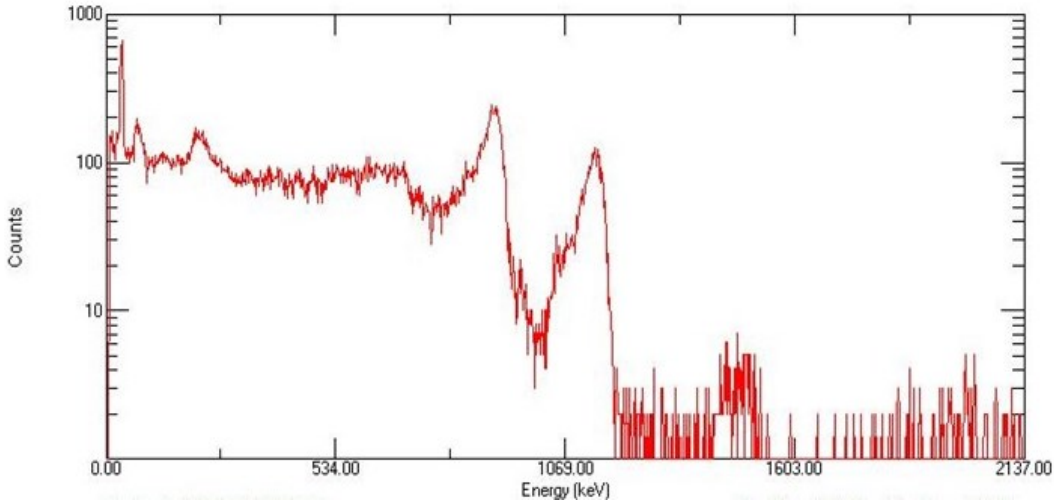
Ayırma ve saflandırmada Sc'u daha iyi belirleyebilmek için bu çalışmada taşıyıcı olarak ^{46}Sc radyonüklidi kullanılmıştır. ^{46}Sc , Sc'un 83.8 günlük yarıömürle β ve γ ışıması yaparak bozunan nispeten daha uzun ömürlü bir radyonüklididir. Dowex 1x8'lik reçineden geçirilen $^{46}\text{ScCl}_3$ ve TiCl_4 karışımı 1x1 inç $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresi ile incelenmiştir. İşlem öncesi ortam aktivitesi (background) ölçülmüştür, alınan background ve elüsyon spektrumları Şekil 4.21'de yer almaktadır. 5 mg 8-hidroksikinolin çözeltisi ile $^{46}\text{ScCl}_3$ ve TiCl_4 çözeltileri karıştırılarak Dowex 1x8lik reçineden geçirilmiştir. Elde edilen 200 μL örnek yapılan ölçüm sonucu Şekil 4.22'de yer almaktadır. 12 M HCl geçirilerek elde edilen elüsyondan alınan 200 μL ile yapılan ölçüm Şekil 4.23'te yer almaktadır. Bu işlem sonrası 2 M HCl geçirilerek elde edilen elüsyondan alınan 200 μL örnek ölçüm sonucu şekil 4.24'te yer almaktadır. ^{46}Sc 'nin radyoizleyici olarak kullanıldığı reçineden geçirilen örneklerin HPLC analizlerinde ^{46}Sc ve Ti'un ayrılabilirdiği Şekil 4.25'teki ^{46}Sc ve TiCl_4 'ün karşılaştırmalı HPLC radyokromatogramı'nda görülmektedir.



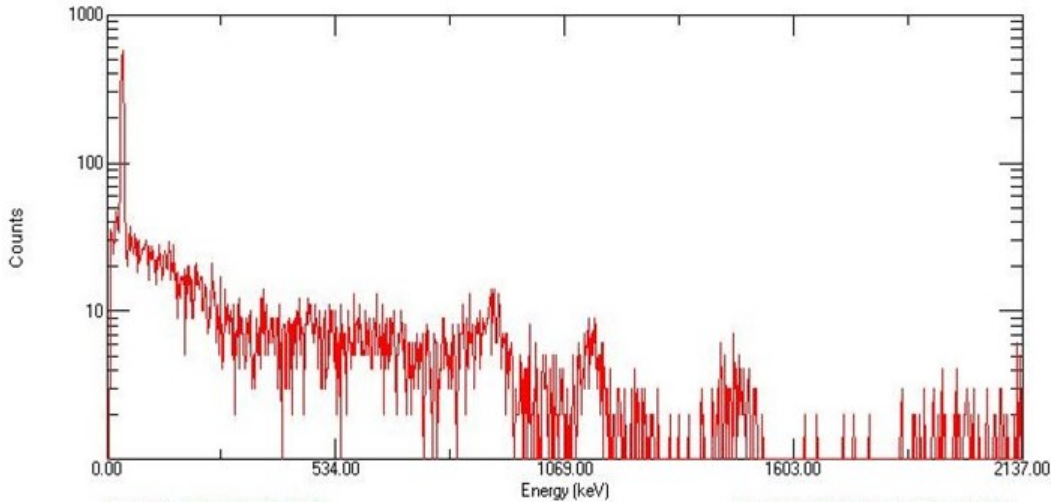
Şekil 4.21 1x1 inç LaBr₃(Ce) Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresinde alınan ortam aktivitesinin spektrumu



Şekil 4.22 ⁴⁶ScCl₃-TiCl₄ karışımının reçineden geçirilmesi sonucu alınan elüsyon ölçümünün 1x1 inç LaBr₃(Ce) Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresinde alınan spektrumu

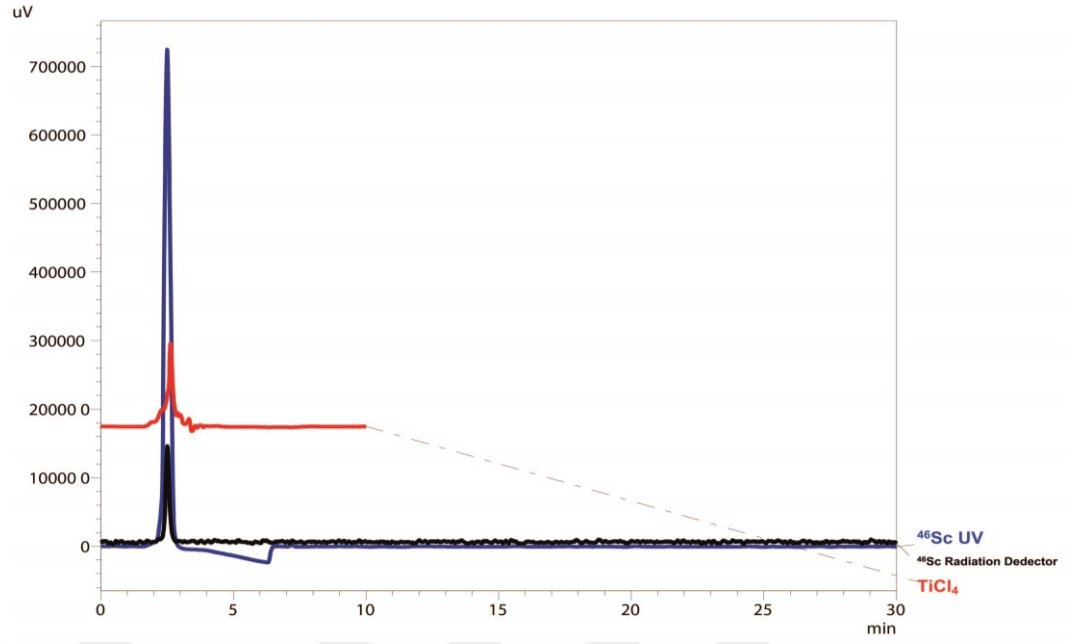


Şekil 4.23 12M HCl ile yapılan elüsyon sonucu alınan ölçümünün 1x1 inç LaBr₃(Ce) Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresinde alınan spektrumu

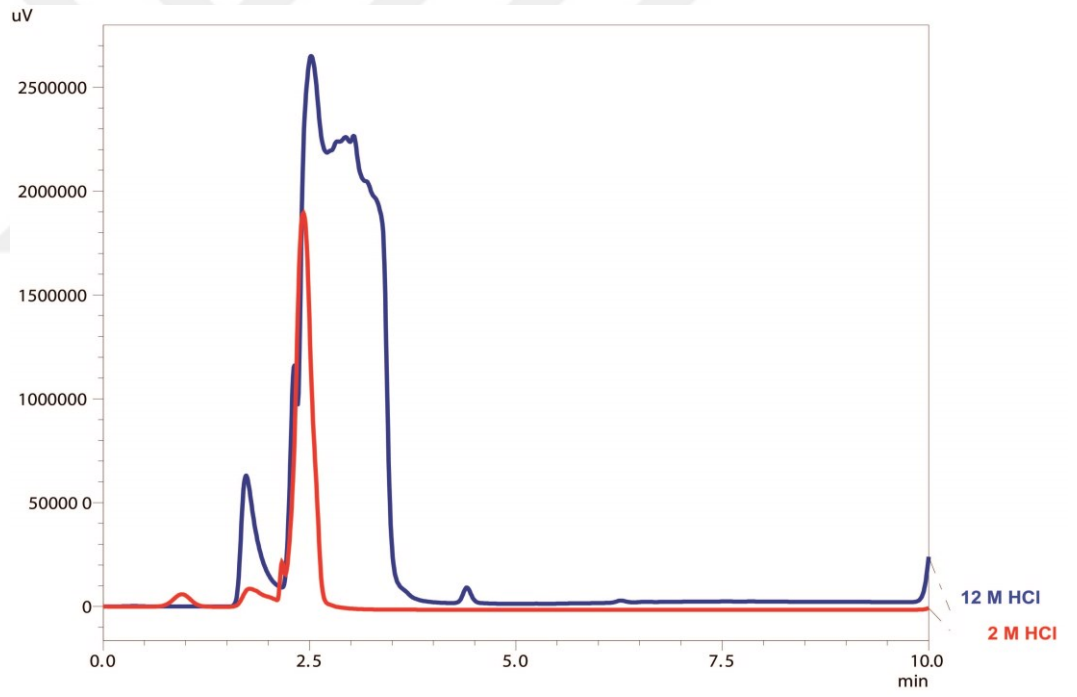


Şekil 4.24 12M HCl ile yapılan elüsyon sonucu alınan ölçümünün 1x1 inç LaBr₃(Ce) Dedektörlü Ortec 1024 kanallı çok kanallı gama spektrofotometresinde alınan spektrumu

Şekil 4.26’da 12 M HCl ve 2 M HCl ile yapılan elüsyon sonucu alınan HPLC kromatogramları görülmektedir. ⁴⁶Sc radyoizleyici olarak kullanıldığından ayırma sonucu daha iyi görülürken Sc’un zayıf olan absorbands değerleri ve farklı bileşenlerden gelen girişimler nedeniyle Sc ve Ti’un ayrılabilirliği radyoizleyici kullanılmadığında çok iyi belirlenememektedir. Bu nedenle ⁴⁶Sc radyoizleyici kullanılarak alınan HPLC kromatogramlarında ayırma sonuçları çok daha iyi gözlenmiştir. Aynı şekilde reçineden geçirilen ⁴⁶Sc sayımları da ayırmanın yüksek verimle olduğunu doğrulamaktadır.



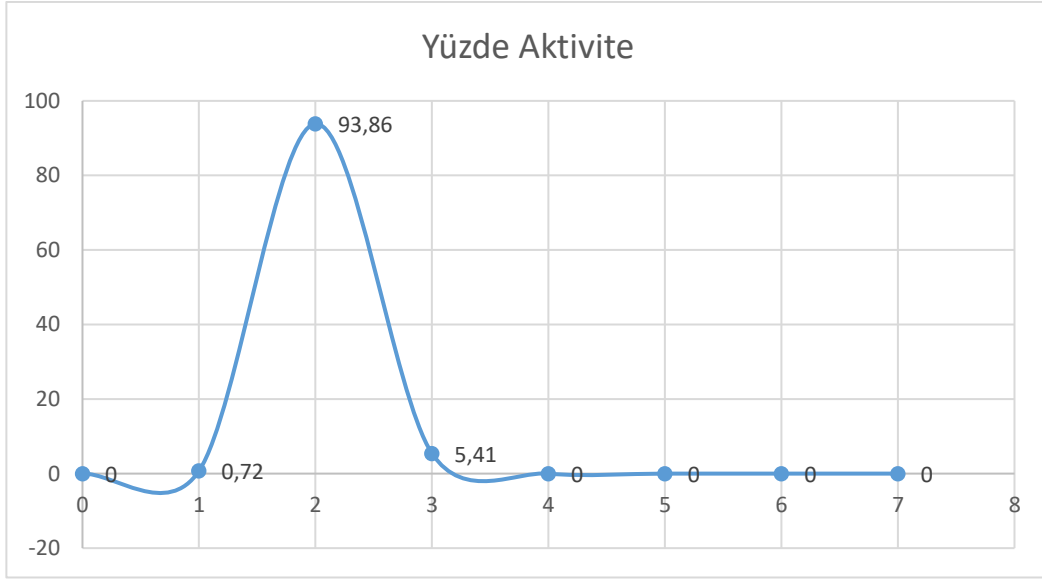
Şekil 4.25 ^{46}Sc ve TiCl_4 ün karşılaştırmalı HPLC Kromatogramı



Şekil 4.26 12 M HCl ve 2 M HCl ile yapılan elüsyon sonucu alınan HPLC Kromatogramı

Çizelge 4.24 Dowex 1X8 Reçinesinden Sc-46'nın elue edilmesi sonucu alınan eluant sayımları

Stok 100 μ L ^{46}Sc 'nin 300s lik sayımı (sayım/s)	Dowex 1x8 reçinesine ^{46}Sc yüklendikten sonra geçen çözeltinin sayımı (sayım/s)	12 M HCl ile gelen ^{46}Sc sayımı (sayım/s)	2 M HCl ile elue edilen ^{46}Sc sayımı (sayım/s)
889,15 keV için 9171,38	889,15 keV için 2	889,15 keV için 180	889,15 keV için 9
1120,83 keV için 4296,11	1120,83 keV için 0	1120,83 keV için 80	1120,83 keV için 6

Şekil 4.27 Dowex 1x8 Reçinesinden geçen ^{46}Sc elusyon profili

Çizelge 4.24 Dowex 1X8 Reçinesinden ^{46}Sc 'nin elue edilmesi sonucu alınan eluant sayımlarını göstermektedir. Bu sayımlar kullanılarak elusyon verimi hesaplanmıştır. Şekil 4.27 Dowex 1x8 reçinesi ile ^{46}Sc aktivitesinin 12 M HCl ile % 93.86 oranında elue edilebildiğini göstermektedir.

Bulduğumuz sonuçları literatürlerle karşılaştırsak Bartos ve grubu ^{47}Sc 'yi, Dowex 50 katyon reçinesi üzerine adsorbe ederek 0.5 M amonyum asetat ile ayrıştırdı. Önerilen prosedürde ^{47}Sc ayırma verimi, 2 saatten az ayırma süresiyle yaklaşık % 90'dır. Elde edilen taşıyısız ^{47}Sc , DOTATATE konjugatını işaretlemek için kullanılmıştır. (Bartos et al., 2012).

4.4 RaCl₂-CaCl₂-NaOH Karışımının Sintilasyon Dedektörü Sayım Sonuçları

4.4.1 ²²⁶Ra ile Yapılan Çalışmalar

⁴⁴Ti üretimi için olası reaksiyonlar şöyledir:

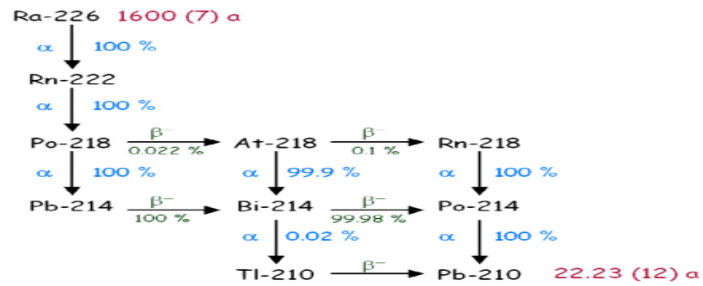
Çizelge 4.25 ⁴⁴Ti üretimi için gerekli olan belli başlı reaksiyonlar

Reaksiyon	Bağ Enerjisi (MeV)	Eşik Enerjisi (MeV)
⁴⁰ Ca(α,γ) ⁴⁴ Ti	5.127	0
⁴⁸ Ti(p,2n+t) ⁴⁴ Ti	-36.747	35.477
⁴⁸ Ti(d,3n+t) ⁴⁴ Ti	-36.972	38.525
⁵¹ V(p,4n+α) ⁴⁴ Ti	-42.076	42.908
⁴⁸ Ti(n,5n) ⁴⁴ Ti	-43.229	44.139
⁵¹ V(d,5n+α) ⁴⁴ Ti	-44.301	46.052
⁵¹ V(n,5n+t) ⁴⁴ Ti	-61.890	63.116

⁴⁰Ca(α,γ)⁴⁴Ti reaksiyonuna göre oluşabilecek yan ürünlerin bazıları şunlardır:

- ⁴⁴Ti(α,p)⁴⁷V
- ⁴⁴Ti(α,γ)⁴⁸Cr
- ⁴⁰Ca(α,p)⁴³Sc
- ⁴³Sc(p,γ)⁴⁴Ti
- ⁴⁴Ti(p,γ)⁴⁵V

Bu sonuçlara dayanarak herhangi bir yan ürünün kimyasal ya da radyokimyasal zararının olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.28 ²²⁶Ra bozunma şeması (Chisté et. al., 2007)

Alfa kaynağı olarak 1 ml 180.64 nCi $^{226}\text{RaCl}_2$ kullanılarak 250 mg CaCl_2 ve 0.5 ml 2M NaOH, 250 μl distile su ile karıştırılarak çöktürülmüştür. ^{226}Ra 'nın alfa enerjisi 4.78 MeV olup bozunma şeması ve ürünlerinin gama enerjisi aşağıda verilmiştir.

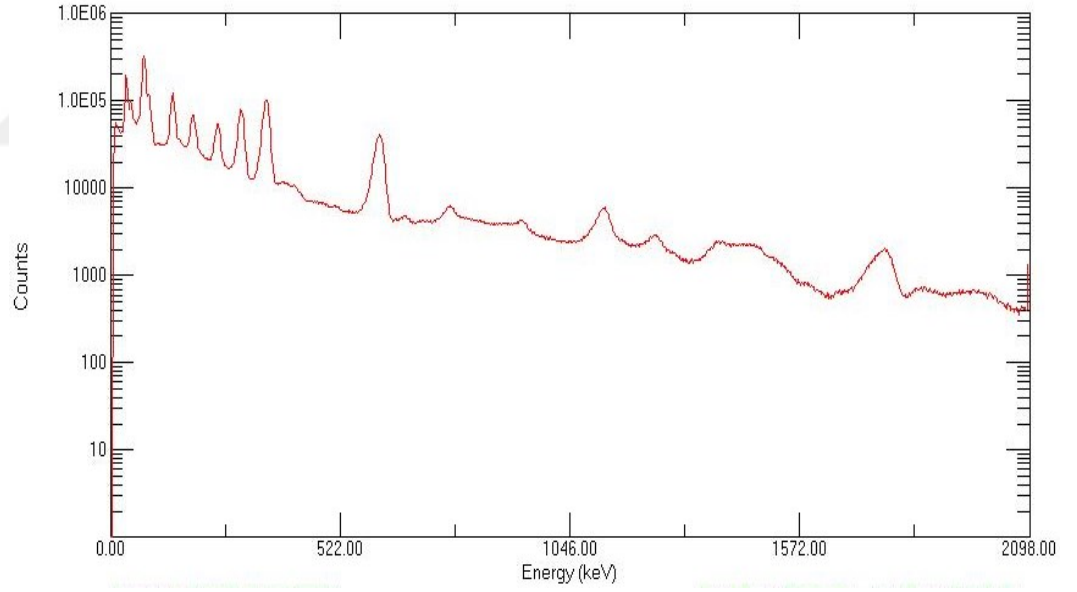
Çizelge 4.26 ^{226}Ra bozunma ürünlerinin gama enerjileri ve yarı ömürleri (Chisté et. al., 2007)

Radyoizotop	Gama Enerjisi (keV)	Yarı ömür
^{226}Ra	81.07	1602 yıl
	83.78	
	186.1	
	600	
^{210}Pb	47	21 yıl
^{211}Pb	405	36.1 dakika
	832	
^{212}Pb	239	10.64 saat
^{214}Pb	74.81	26.8 dakika
	77.11	
	295	
	352	
	766	
	785	
^{222}Rn	186	3.8 gün
^{214}Po	609	162.3 μsaniye
	665	
	768	
	934	
	1120	
	1238	
	1764	
	2118	
^{214}Bi	241	19.9 dakika
	295	
	351	
	785	
^{40}K	1460	10^9 yıl

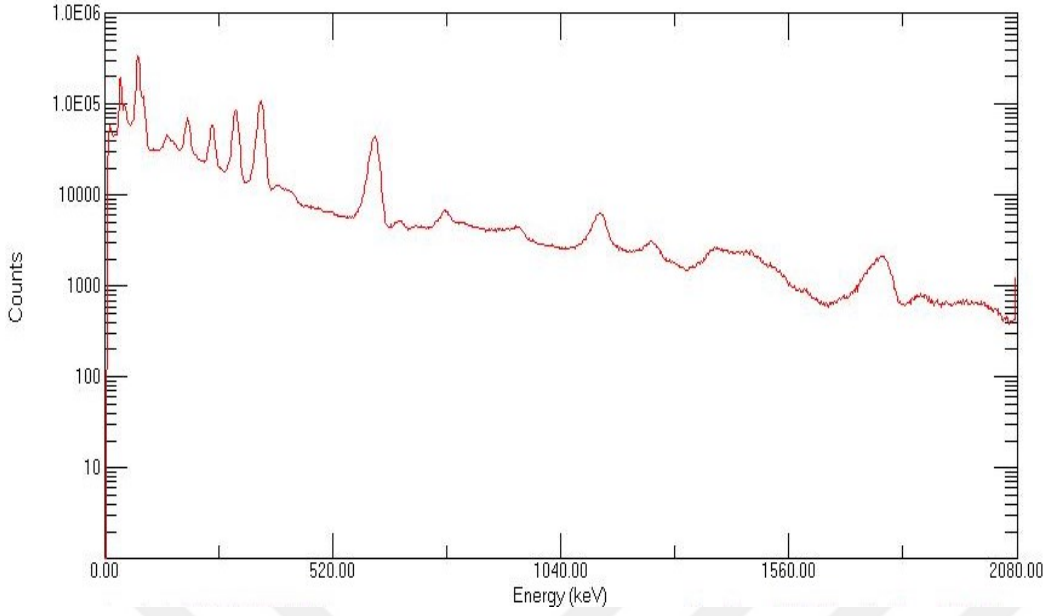
İhtiyaç duyulan ^{44}Ti için ve gerçekleşecek olası reaksiyon yan ürünlerinin gama enerjileri ise şu şekildedir.

Çizelge 4.27 ^{44}Ti üretiminde çıkabilecek olası yan ürünlerin gama enerjileri ve yarı ömürleri

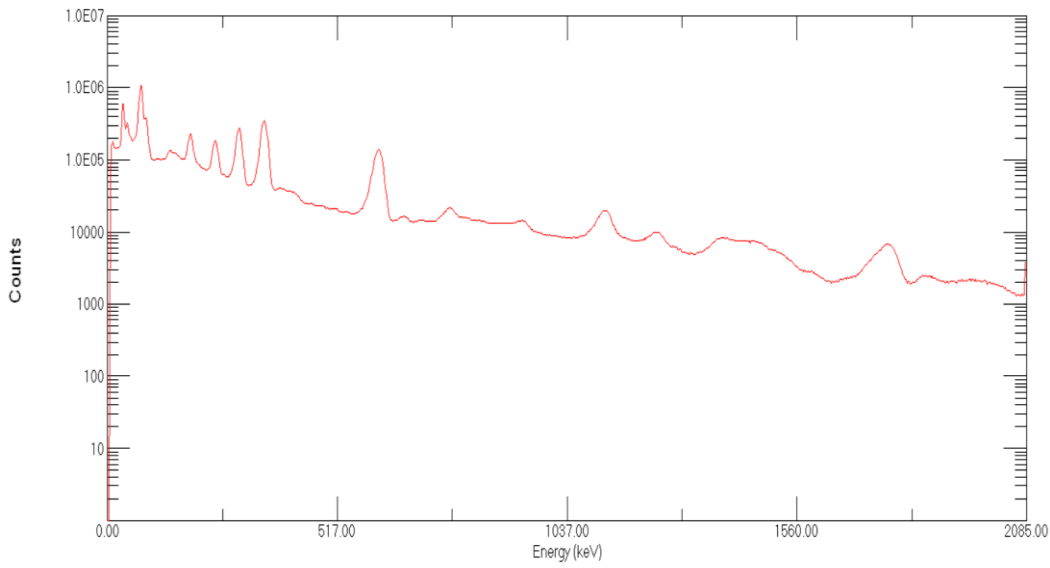
Radyoizotop	Gama Enerjisi (keV)	Yarı ömür
^{44}Ti	67.8	60 yıl
	78.3	
^{46}Sc	889	83.9 gün
	1120	
^{52}V	1434	3.76 dakika
^{47}Ca	1308	4.53 gün
^{22}Na	511	2.60 yıl
	1274	
^{24}Na	1369	15 saat
^{38}Cl	1600	37.3 dakika
^{47}V	511	32.6 dakika
^{48}Cr	511	21.6 saat
^{45}V	511	547 milisaniye
^{46}Cr	511	0.26 saniye
^{44}Sc	511	3.97 saat



Şekil 4.29 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 1 hafta sonraki 1 günlük sintilasyon dedektörü spektrumu



Şekil 4.30 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 1 ay sonraki 1 günlük sintilasyon dedektörü spektrumu



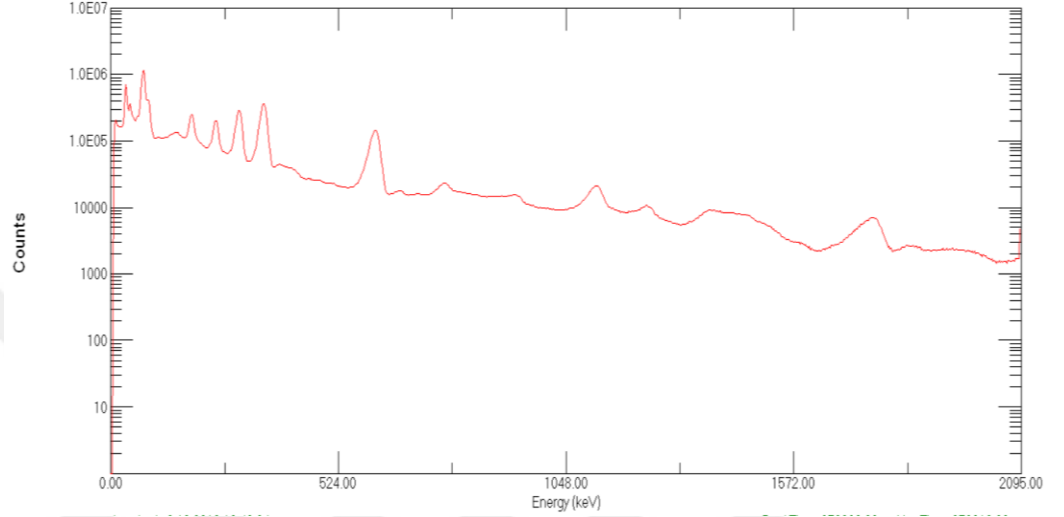
Şekil 4.31 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 3 ay sonraki 3 günlük sintilasyon dedektörü spektrumu

Sayım sonuçları (belirgin piklerde) şu şekildedir:

Çizelge 4.28 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 3 ay sonraki 3 günlük sintilasyon dedektörü sayımı sonuçları

Enerji (keV)	Sayım
35.94	607477

44.01	329083
74.24	1094537
86.34	391579
187.21	228866
241.73	190047
296.28	275436
352.88	352666
610.04	141030



Şekil 4.32 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 6 ay sonraki günlük sintilasyon dedektörü spektrumu

Sayım sonuçları (belirgin piklerde) şu şekildedir:

Çizelge 4.29 $\text{RaCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaOH}$ karışımının 6 ay sonraki günlük sintilasyon dedektörü sayımı sonuçları

Enerji (keV)	Sayım
34.41	718133
44.64	369285
75.35	1180863
85.59	425961
185.91	256060
241.18	202426
296.45	287021
351.13	369131
609.65	146213

1 ay, 3 ay ve 6 aylık sayım sonuçlarına bakıldığında orantılı bir artışın söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. Spesifik noktalar olan ^{44}Ti 'ün gama enerjileri 67.8

ve 78.3 keV’de ise artışlar orantılı olup ^{214}Pb ile çakışmaktadır. Bunun sebebi olarak ^{44}Ti ’ün yüksek enerjilere çıkamamasından kaynaklanmaktadır. Bu durum ^{226}Ra ’daki alfa parçacıklarının yeterince hızlanamamasından kaynaklanmaktadır. Bu durumun gerçekleşebilmesi için bir alfa parçacığı hızlandırıcısına ihtiyaç duyulmaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Günümüzde kanser vakalarının artan bir eğride ilerlemesi sebebiyle kanserli hücrelerin görüntülenmesi ve hızlı bir şekilde tedaviye başlanması en önemli araştırma konularındandır. Bu sebeple hızlı ve kesin sonuç verebilecek sistemler üzerindeki çalışmalar önem kazanmıştır. Özellikle yeni medikal görüntüleme problemlerinin üretimi hakkında çok sayıda araştırma yapılmaktadır. PET (Pozitron Emisyon Tomografisi) medikal görüntüleme alanında sık kullanılan sistemlerden biridir. Pozitron bozunumu yapan ^{44}Sc (Skandiyum-44, $t_{1/2}=3.97$ saat) radyoizotopu, son yıllarda sıkça araştırılan yeni metalik PET radyonüklidlerinden biri olmuştur. Bir jeneratör sistemi üzerinden elde edilmesi ve yarı-ömrünün çalışmaya elverecek kadar uzun, radyoaktif atığın bertarafını kolaylaştıracak kadar kısa oluşu kullanımını kolay hale getirmektedir. Tek bir ışınlama yapılarak elde edilen ^{44}Ti (Titanyum-44, $t_{1/2}=60$ yıl) kullanılarak üretilen $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ jeneratöründen uzun yıllar ^{44}Sc radyonüklidi elde etmek mümkün olacaktır. Son günlerde yeni PET radyonüklidlerine olan ilgi gittikçe artmaktadır. Özellikle metalik özellik gösteren bu izotopların üretim şekilleri, kullanım alanları ve çalışmaları her geçen gün daha da gelişmektedir. Uygun yarıömürlü, teşhis ve tedavi kullanım kolaylığı sağlayabilen bu tarz problemler ile yapılan deneyler uluslararası çalışmalarda sıklıkla mevcuttur. Bunların içinde jeneratör ürünü olanların çalışmalara uygun oluşu bu alana daha farklı bir ilginin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Her jeneratörün belirli bir ömrü vardır. Bunlar ne kadar uzun olursa kullanımı o kadar basit hale gelmektedir. Bu proje için seçilen ^{44}Ti ana izotopunun yarıömrü yaklaşık 60 yıl olup tek bir jeneratörle uzun yıllar çalışmayı elverişli kılacaktır. Bu jeneratörden elue edilecek olan ^{44}Sc ise yarı ömrü yaklaşık 4 saat

olduğundan ve pozitron salınımı yaptığından ideal bir PET radyonüklidi olma yolunda önemli bir adım atmıştır.

Bu tez çalışması ile proton hızlandırıcısında ^{44}Ti 'ün üretimi için koşullar Empire3.2/Malta kodu kullanılarak teorik olarak modelleme ile proton demetinin enerjisi, akısı, açısı ve ışınlama süresi belirli modelleme kodları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu kod istenilen reaksiyon için belirli enerjilerde belirli reaksiyon tesir kesitlerini vermektedir. Bu tesir kesitlerinde yola çıkılarak MATLAB kodu ile ışınlama sonucu oluşacak aktivite oranları da hesaplanmıştır. Deneysel olarak proton hızlandırıcı yerine Ra-226'dan (α, γ) reaksiyonu ile ^{44}Ti 'iün oluşumu incelenmiştir. Bu reaksiyonla ilgili teorik hesaplamalar da yine MATLAB kodu kullanılarak yapılmıştır. Hangi izotopların oluşabileceği de Empire3.2/Malta koduyla belirlenmiştir. Ayrıca bombardıman sırasında oluşacak hedef üzerinde gelen parçacıkların enerji düşüşünün de SRIM-TRIM ile modellenmesi ve bu düşüşün ne kadar olabileceği de hesaplanmıştır. Sonraki çalışmalarda doğal titanyum ile üretilebilen ^{44}Sc , ^{46}Sc ve ^{47}Sc incelenmiş olup üretimin herhangi uygun hızlandırıcılarda gününbirlik kullanımlara yatkın olduğu görülmüştür. Son olarak doğal titanyumun sadece ^{46}Ti , ^{47}Ti , ^{49}Ti ve ^{50}Ti zayıf ağırlıktaki izotopları ile proton ve nötronlarla reaksiyonları sonucu oluşacak muhtemel ürünler olan ^{43}Sc , ^{44}Sc , ^{46}Sc ve ^{47}Sc incelenmiş olup reaksiyon sonucu oluşabilecek yan ürünlerin ana ürüne büyük etkilerinin olmayacağı veya belirli süreler sonunda etkisiz kalacağı düşünülmektedir.

Teorik modelleme ile bombardıman sonrası belirli bir soğuma süresi beklendikten sonra oluşacak ana izotop olan ^{44}Ti 'ün hedef sisteminden ayırma ve saflandırma çalışmalarının optimizasyonu inaktif Ti ve Sc kullanılarak yapılmıştır. Bunun için hidroksamat veya dowex olarak iki farklı reçine sistemi üzerinde çalışılmıştır. HPLC analizleri ile ayırma koşulları test edilmiştir. İlâveten Sc için ^{46}Sc radyoizleyici kullanılarak ayırmanın etkinliği test edilmiştir.

Bu kapsamda yeni PET radyonüklidlerinin üretimi ve jeneratör sistemi oluşturulması üzerinde çalışılmıştır. Daha ileri aşamaların gerçekleşmesi ile hastane kullanımına uygun hale getirilirse tek bir üretim ile bir hastane bu jeneratörle uzun yıllar çalışabilme imkânı bulacaktır. Bunun ekonomik açıdan bir

hastane için ne kadar önemli olduğu da ortadadır. Yeterli imkân bulunduğunda ^{44}Ti üretimi mümkün olup $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ jeneratörünün geliştirilmesiyle sağlık sistemine ciddi katkılar sağlayacağı, uzun yarıömrü sayesinde tek jeneratörle uzun yıllar çalışmanın elverişli olacağı ve maliyeti gözle görülür derecede düşüreceğı değerlendirilmektedir.



.KAYNAKLAR DİZİNİ

Aletnizky, Y.G., Novgorodov, A.F., Skripnik, A.V., Filosofov, D.V., Kaplun, V.G., Suzikov, A.G, Eliseev, I.A. and Rösch, F., ⁴⁴Ti: Investigation of target preparation, irradiation, and yields in the ⁴⁵Sc(p,2n) process.

Alliot, C., Kerdjoudj, R., Michel, N., Haddad, F. and Huclier-Markai, S., 2015, Cyclotron production of high purity ^{44m,44}Sc with deuterons from ⁴⁴CaCO₃ targets, Nuclear Medicine and Biology, Volume 42, Issue 6, pages 524-529.

Bartos B., Majkowska A., Kasperek A., Krajewski, S. and Bilewicz A., 2012, New separation method of no-carrier-added ⁴⁷Sc from titanium targets, Radiochim. Acta 100, 457–461

Bulduk B. G., Ünak P., Kılçar A. Y., Güldü Ö. K. and Tekin V., 2019, Analyzing of Production Conditions of ⁸⁹Zr in the Particle Accelerator, Cumhuriyet Science Journal, Cumhuriyet Sci. J., 40, 2, 388-395.

Daraban, L., Rebeles, R.A., Hermanne, A., Tarkanyi, F. and Takacs, S., 2009, Study of the excitation functions for ⁴³K, ^{43,44,44m}Sc and ⁴⁴Ti by proton irradiation on ⁴⁵Sc up to 37 MeV, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B267, 755-759.

Eigner, S., Vera, D.R.B., Fellner, M., Loktionova, N.S., Piel, M., Lebeda, O., Rösch, F. Roß, T.L. and Henke, K.E., 2012, Imaging of Protein Synthesis: *In Vitro* and *In Vivo* Evaluation of ⁴⁴Sc-DOTA-Puromycin, Mol. Imaging Biol., 15, 79-86.

Filosofov, D.V., Loktionova, N.S. and Rösch, F., 2010, A ⁴⁴Ti/⁴⁴Sc radionuclide generator for the potential application of ⁴⁴Sc-based PET-radiopharmaceuticals, Radiochim. Acta 98, 149-156.

Hernandez, R., Valdovinos, H.F., Yang, Y., Chakravarty, R., Hong, H., Barnhart, T.D. and Cai, W., 2014, ⁴⁴Sc: An Attractive Isotope for Peptide-Based PET Imaging, Mol. Pharmaceutics, 11, 2954-2961.

Hoehr, C., Oehlke, E., Benard, F., Lee, C.J., Hou, X., Badesso, B., Fergusson, S., Miao, Q., Yang, H., Buckley, K., Hanemaayer, V., Zeisler, S., Ruth, T.,

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Celler, A. and Schaffer, P., 2014, ^{44g}Sc production using a water target on a 13 MeV cyclotron, *Nuclear Medicine and Biology*, 41, 401-406.

Huclier-Markai, S., Kerdjoudj, R., Alliot, C., Bonraisin, A.C., Michel, N., Haddad, F. and Barbet, J., 2014, Optimization of reaction conditions for the radiolabeling of DOTA and DOTA-peptide with $^{44m/44}\text{Sc}$ and experimental evidence of the feasibility of an *in vivo* PET generator, *Nuclear Medicine and Biology*, 41, e36-e43.

Gagnon, K., Severin, G.W., Barnhart, T.E., Engle, J.W., Valdovinos, H.F. and Nickles, R.J., 2012, ^{45}Ti Extraction Using Hydroxamate Resin, 14th International Workshop on Targetry and Target Chemistry, AIP Conf. Proc. 1509, 211-214.

Kerdoudj, R., Pniok, M., Alliot, C., Kubicek, V., Havlickova, J., Rösch, F., Hermann, P. and Huclier-Markai, S., 2016, Scandium(III) complexes of monophosphorus acid DOTA analogues: a thermodynamic and radiolabelling study with ^{44}Sc from cyclotron and from a $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ generator, *Dalton Trans.*, 45, 1398.

Koumarianou, E., Loktionova, N.S., Fellner, M., Roesch, F., Thews, O., Pawlak, D., Archimandritis, S.C. and Mikolajczak, R., 2012, ^{44}Sc -DOTA-BN[2-14] NH_2 in comparison to ^{69}Ga -DOTA-BN[2-14] NH_2 in pre-clinical investigation. Is ^{44}Sc a potential radionuclide for PET?, *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 2669-2676.

Krajewski, S., Cydzik, I., Abbas, K., Bulgheroni, A., Simonelli, F., Holzwarth, U. and Bilewicz, A. (2013). Cyclotron production of ^{44}Sc for clinical application. *Radiochimica Acta*, 101(5), 333-338.

Lange, R., D'Auria, J., Giesen, U., Vincent, J. and Ruth, T., 1999, Preparation of a radioactive ^{44}Ti target, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A423, 247-255.

Lee, E.J., Kong, Y.B. and Hur, M.G., 2016, Test Production of Ti-44 Using RFT-30 Cyclotron, *Proceedings of Cyclotrons, Presentation*, Zurich, Switzerland.

Majkowska, A. and Bilewicz, A., 2011, Macrocyclic Complexes of $^{44/47}\text{Sc}$ as Precursors of Radiopharmaceuticals, *J. Inorg. Biochem.*, 105, 313-320.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Müller, C., Bunka, M., Reber, J., Fischer, J., Zhernosekov, K., Türlér, A. and Schibli, R., 2013, Promises of Cyclotron-Produced ^{44}Sc as a Diagnostic Match Trivalent β^- -Emitters: In Vitro and In Vivo Study of a ^{44}Sc -DOTA-Folate Conjugate, J. Nucl. Med., 54, 2168-2174.

Pruszyński, M., Loktionova, N.S, Filosofov, D.V. and Rösch, F., 2010, Post-elution processing of $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ generator-derived ^{44}Sc for clinical application, Applied Radiation and Isotopes, 68, 1636-1641.

Pruszyński, M., Majkowska-Pilip, A. and Loktionova N.S., 2012, Radiolabeling of DOTATOC with the long-lived positron emitter ^{44}Sc , Applied Radiation and Isotopes, 70, 974-979.

Radchenko, V., Engle, J.W., Medvedev, D.G., Maassen, J.M., Naranjo C.M., Unc, G.A., Meyer, C.A.L., Mastren, T., Brugh, M., Mausner, L., Cutler, C.S., Birnbaum, E.R., John, K.D., Nortier, F.M. and Fassbender, M.E., 2017, Proton induced production and radiochemical isolation of ^{44}Ti from scandium metal targets for $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ generator development, Nuclear Medicine and Biology, Jul,50:25-32.

Radchenko, V., Meyer, C.A.L., Engle, J.W., Naranjo, C.M., Unc, G.A., Mastren, T., Brugh, E.R., Birnbaum, E.R., John, K.D., Nortier, F.M. and Fassbender, M.E., 2016, Separation of ^{44}Ti from proton irradiated scandium by using solid-phase extraction chromatography and design of $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ generator system, Journal of Chromatography A, 1477(2016), 39-46.

Roesch, F., 2012, Scandium-44: Benefits of a Long-Lived PET Radionuclide Available from the $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ Generator System, Current Radiopharmaceuticals, 5, 187-201.

Severin, G.W., Engle J.W., Valdovinos H.F., Barnhart T.E. and Nickles, R.J., 2012, Cyclotron Produced ^{44}gSc from Natural Calcium, Appl. Radiat. Isot., 70(8), 1526-1530.

Sadeghi, M., Enferadi, M. and Nadi, H., 2011, ^{45}Ti , a Candidate for Positron Emission Tomography: Study of the Cyclotron Production, Radiochemistry, Vol. 53, No. 4, pp. 411-414.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Synowiecki, M.A., Perk, L.R. and Nijssen, J.F.W. 2018, Production of novel diagnostic radionuclides in small medical cyclotrons. EJNMMI Radiopharm Chem.;3(1):pp3.

Szkliniarz, K., Sitarz, M., Walczak, R., Jastrzebski, J., Bilewicz, A., Choinski, J., Jakubowski, A., Majkowska, A., Stolarz, A., Trzcinska, A. and Zipper, W., 2016, Production of Medical Sc radioisotopes with an alpha particle beam, Applied Radiation and Isotopes, 118(2016), 182-189.

Walczak, R., Krajewski, S., Szkliniarz, K., Sitarz, M., Abbas, K., Choiński, J., Jakubowski, A., Jastrzebski, J., Majowskai, A., Simonelli, F., Stolarz, A., Trzińska, A., Zipper, W. and Bilewicz, A., 2015, Cyclotron production of ^{43}Sc for PET imaging, EJNMMI Physics, 2:33.

Ziegler, J.F., 1977, Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements, Volume 3 of The Stopping and Ranges of Ions in Matter, P., 5-10.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince derin bilgi ve deneyimleri ile olumlu katkılar sağlayan her türlü destek ve yardımlarıyla yanımda olan tez hocam Sayın Prof. Dr. Perihan ÜNAK'a,

Enstitümüzün laboratuvarlarında her türlü çalışma imkânını sağlayan Nükleer Bilimler Enstitüsü çalışanlarına ve çok değerli öğretim üyelerine,

Çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan Nükleer Uygulamalar Anabilim Dalı'ndaki öğrenci arkadaşlarıma,

2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Burs Programı kapsamında eğitim hayatıma destekte bulunan TÜBİTAK'a,

100/2000 Doktora Bursu ile zor anımda bana maddi imkânlarını sunan Yüksek Öğretim Kurumu'na,

FGA-2018-20118 No.lu ve “ $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ Jeneratör Sisteminin İnaktif Tasarımı ve Modellemesi” isimli Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenen bu tez için projeyi destekleyen Bilimsel Araştırma Kurulu yöneticilerine,

Doktora öğrenimim esnasında hayatımı birleştirdiğim ve 10 yıldır beni bir an olsun yalnız bırakmayan çok sevdiğim eşim Sayın Ayşegül BULDUK'a,

Son olarak yaşamım ve eğitim hayatım boyunca her an yanımda olan, bana inanan ve güvenen, emeklerini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen en büyük destekçilerim sevgili anneme, babama ve ablama

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Buğra Gökhun BULDUK

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Buğra Gökhan Bulduk

Öğrenim Durumu :

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji
Mühendisliği Bölümü (2008-2014)

Yüksek Lisans : Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü
Nükleer Uygulamalar Yüksek Lisans Programı
(2014-2016)

Doktora : Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü
Nükleer Uygulamalar Doktora Programı
(2016-2021)