

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

$\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ RADYONÜKLİT JENERATÖRÜ KOLON
MATERYALİ OLARAK KULLANILACAK METAL
OKSİTLERİN SENTEZİ VE YAPI KARAKTERİZASYONU

DUYGU ARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. AYŞE GÜL GÜREK

TEMMUZ 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ RADYONÜKLİT JENERATÖRÜ KOLON
MATERYALİ OLARAK KULLANILACAK METAL
OKSİTLERİN SENTEZİ VE YAPI KARAKTERİZASYONU

DUYGU ARSLAN

YÜKSEK LİSANS
KİMYA ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. AYŞE GÜL GÜREK

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**SYNTHESIS AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF
METAL OXIDES TO BE USED AS COLUMN MATERIAL IN
Ge68 / Ga68 RADIONUCLIDE GENERATORS**

DUYGU ARSLAN

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CHEMISTRY**

ADVISOR: PROF. DR. AYŞE GÜL GÜREK

JULY 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 08/07/2024 tarih ve 08.07.2024 /35 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 10/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Duygu ARSLAN'ın tez çalışması KİMYA Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Ayşe Gül GÜREK

ÜYE

: Doç. Dr. Aligül BÜYÜKAKSOY

ÜYE

: Dr. Öğrt. Üyesi Emel ÖNAL DUMANOĞLU

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Canım Oğluma

ve

biricik eşime

ÖZET

Ge^{68}/Ga^{68} radyonüklit jeneratörleri, nükleer tıpta PET (Pozitron Emisyon Tomografisi) uygulamaları için kısa yarı ömürlü Ga-68 izotopunun üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu jeneratörler, uzun yarı ömürlü Ge-68'in kimyasal olarak sabit bir matriks üzerinde tutulup Ga-68'in elüe edilmesi prensibine dayanmaktadır. Ancak, Ga-68'in verimli üretimi ve saflığı, kullanılan kolon materyalinin yapısal ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Mevcut jeneratörlerde kullanılan materyallerin sınırlı yüzey alanı, düşük adsorpsiyon kapasitesi ve kimyasal stabilite sorunları, yeni malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Ge^{68} / Ga^{68} radyonüklit jeneratörlerinde kolon materyali olarak kullanılacak metal oksitlerin sentez yöntemleri ve yapı karakterizasyonları incelenmiştir. Çalışmanın amacı, yüksek performanslı ve uzun ömürlü jeneratörlerin geliştirilmesi için uygun metal oksit malzemelerin belirlenmesi ve bu malzemelerin yapısal özelliklerinin detaylı olarak analiz edilmesidir. Bu analizler sonucunda, metal oksitlerin yüzey alanı, gözenek yapısı, kristal fazları ve yüzey fonksiyonel grupları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çalışmada çeşitli sentez teknikleri kullanılarak farklı metal oksitler üretilmiştir. Sentezlenen metal oksitlerin yapısal karakterizasyonu, X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve yüzey alanı analizleri ile gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, metal oksitlerin kristal yapılarını belirlerken, SEM görüntüleri malzemelerin morfolojileri hakkında bilgi sağlamıştır. EDX analizleri, elementel kompozisyonları ortaya koymuş ve yüzey alanı analizleri ile kullanım uygunlukları değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, farklı sentez yöntemleri ile elde edilen metal oksitlerin yapısal özelliklerini ortaya koyarak, nükleer tıpta Ge^{68} / Ga^{68} jeneratörlerinin etkinliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, bu malzemelerin Ge-68'in yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olmasını ve Ga-68'in verimli bir şekilde elüe edilmesini sağlayacak özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Gelecekteki çalışmalar, bu bulguları derinleştirerek daha yüksek performanslı ve maliyet etkin jeneratörlerin geliştirilmesine odaklanabilir.

Anahtar Kelimeler: Ge^{68} / Ga^{68} Radyonüklit Jeneratörleri, Metal Oksitler, Yapısal Karakterizasyon, X-ışını Difraksiyonu (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX).

ABSTRACT

Ge-68/Ga-68 radionuclide generators are widely used in nuclear medicine for the production of the short-lived Ga-68 isotope, particularly in PET (Positron Emission Tomography) applications. These generators operate on the principle that the long-lived Ge-68 is held on a chemically stable matrix while Ga-68 is eluted. However, the efficiency and purity of Ga-68 production heavily depend on the structural and chemical properties of the column material used. The limited surface area, low adsorption capacity, and chemical stability issues of materials currently used in generators necessitate the development of new materials. This thesis investigates the synthesis methods and structural characterization of metal oxides to be used as column materials in Ge-68/Ga-68 radionuclide generators. The objective of this study is to identify suitable metal oxide materials for the development of high-performance and long-lasting generators and to analyze the structural properties of these materials in detail. The surface area, pore structure, crystal phases, and surface functional groups of the metal oxides were examined in detail through these analyses.

Various synthesis techniques were employed to produce different metal oxides in this study. The structural characterization of the synthesized metal oxides was performed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and surface area analyses. XRD analyses were used to determine the crystal structures of the metal oxides, while SEM images provided insights into the morphology of the materials. EDX analyses revealed the elemental compositions, and surface area analyses assessed their suitability for use in generators.

This study demonstrates that the metal oxides synthesized via different methods have structural properties that show potential for enhancing the effectiveness of Ge-68/Ga-68 generators in nuclear medicine. The results indicate that these materials possess the high adsorption capacity required for Ge-68 and the characteristics necessary for the efficient elution of Ga-68. Future studies could build on these findings to develop higher-performing and more cost-effective generators.

Keywords: Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ Radionuclide Generators, Metal Oxides, Structural Characterization, X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX).

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında bana verdikleri destek, teşvik ve rehberlik için başta sevgili eşim olmak üzere, Gebze Teknik Üniversitesi Nanoteknoloji Enstitüsü'nden Doç. Dr. Aligül Büyükaksoy'a ve değerli tez danışmanım Prof. Dr. Ayşe Gül Gürek'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecinde göstermiş oldukları anlayış, sabır ve bilimsel katkılar sayesinde bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmuştur. Verdikleri değerli bilgiler ve sağladıkları olanaklarla bu tez çalışmasını başarıyla sonuçlandırmama yardımcı oldukları için kendilerine minnettarım. Ayrıca tez yazım sürecinin her anında bilimsel ve manevi desteğini esirgemeyen Sn. Aycan Ekşioğlu'na teşekkürlerimi iletirim. Ayrıca bu tez çalışmasına 3181207 nolu proje ile verdiği maddi destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) da teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR/ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. Ge ⁶⁸ /Ga ⁶⁸ Jeneratörleri Hakkında Genel Bilgiler	3
2.1 Ge ⁶⁸ /Ga ⁶⁸ Jeneratörlerinin Çalışma Prensibi	6
2.2. Ge ⁶⁸ /Ga ⁶⁸ Jeneratörlerinde Kullanılan Kolon Malzemeleri	9
3. ÇALIŞMANIN KONUSU	10
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	12
4.1. Ge ⁶⁸ /Ga ⁶⁸ Jeneratörlerinde Kullanılan Kolon Malzemelerinin Üretilmesi	12
4.1.1. CeO ₂ -PAN Kolon Malzemesinin Sentezi	12
4.1.2. SnO ₂ Kolon Malzemesinin Sentezi	14
4.1.3. TiO ₂ Kolon Malzemesinin Sentezi	15
4.2. DeneySEL Yöntemler	16
4.2.1. X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi	17
4.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikroyapı Analizi	17
4.2.3. Parçacık Boyutu Dağılımı Analizi	17
4.2.4. X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) ile Yüzey Analizi	18
4.2.5. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Karakterizasyonları	18
5. DENEYSEL SONUÇLAR	20
5.1. XRD Analiz Sonuçları	20
5.2. SEM Analiz Sonuçları	24
5.3. Parçacık Boyutu Dağılımı Analiz Sonuçları	29
5.4. XPS Analiz Sonuçları	31
5.5. FTIR Analiz Sonuçları	34
5.6. BET Yüzey Analizi	39
6. SONUÇ	42
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	49
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	50

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

BET	: Braun Emmett Teller
CeO ₂ -PAN	: Seryum Dioksit-Poliakrilonitril
EDX	: Energy Dispersive X-ray
Ga ⁶⁸	: Galyum-68
Ge ⁶⁸	: Germanyum-68
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
HCl	: Hidroklorik asit
HNO ₃	: Nitrik Asit
IR	: Infrared (Kızılötesi)
PET	: Pozitron Emisyon Tomografisi
SEM	: Scanning Electron Microscope
SnO ₂	: Kalay oksit
TGA	: Termogravimetrik analiz
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
XPS	: X-ray photoelectron spectroscopy
XRD	: X-Ray Diffraction
ZrO ₂	: Zirkonyum Dioksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ jeneratörünün şematik gösterimi.	7
Şekil 4.1: Dolaylı Çöktürme Yöntemi Deney Düzeneği.	12
Şekil 4.2: Kızıl Ötesi Lamba Altında kurutulan Çökeltinin Görüntüsü.	13
Şekil 4.3: Kütle halinde çöktürülmüş olan $\text{CeO}_2\text{-PAN}$.	13
Şekil 4.4: Ezme-Eleme düzeneği.	14
Şekil 4.5: Macun Kıvamındaki karışımın görüntüsü.	14
Şekil 4.6: Kalsinasyon sonrası SnO_2 görünümü.	15
Şekil 4.7: Sol-jel çöktürme yönteminin akış şeması.	15
Şekil 4.8: TiO_2 tozlarının görüntüsü.	16
Şekil 5.1: $\text{CeO}_2\text{-PAN}$ tozunun XRD deseni.	20
Şekil 5.2: TiO_2 tozunun XRD deseni.	22
Şekil 5.3: $\text{CeO}_2\text{-PAN}$ tozlarının SEM görüntüleri.	24
Şekil 5.4: SnO_2 tozunun SEM görüntüsü.	26
Şekil 5.5: TiO_2 tozunun SEM görüntüleri.	28
Şekil 5.6: TiO_2 tozlarının parçacık boyut dağılımı.	30
Şekil 5.7: $\text{CeO}_2\text{-PAN}$ XPS grafiği.	31
Şekil 5.8: TiO_2 tozlarının XPS grafiği ve Atom Yüzdeleri.	33
Şekil 5.9: $\text{CeO}_2\text{-PAN}$ tozunun FTIR spektrumu.	35
Şekil 5.10: TiO_2 tozuna ait FTIR spektrumu.	37
Şekil 5.11: TiO_2 tozuna ait BET grafiği.	39

TABLÖLAR/ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Piyasada kullanılan Ge/Ga jeneratörlerinin özellikleri.	9
Tablo 5.1: XPS analizleri sonucu elde edilen Ce ⁺³ /Ce ⁺⁴ oranları.	31

1. GİRİŞ

$^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ jeneratörleri; uzun yarı ömürlü (271 gün) ^{68}Ge 'den kısa ömürlü (67,71 dakika) ^{68}Ga üretebildiği için pozitron emisyon tomografisinde (PET) kullanılan radyofarmasötiklerin hazırlanmasında önemli bir kaynak durumundadır [1, 2]. ^{68}Ge 'in uzun ömürlü olması jeneratörün aylar hatta yıllar boyunca kullanılabilmesini sağlar. Bunun yanı sıra ^{68}Ga 'ın yarı ömrünün kısa olması ise düşük moleküler ağırlıklı bileşiklere, belirli antikor fragmanlarına ve peptitlere bağlanabilmesine olanak sağlayarak kullanımını kolaylaştırır [3, 4]. Bunun yanı sıra Ga^{68} bazlı radyofarmasötikler PET görüntülemesine uygun bir bozunma karakteristiğine sahiptir.

Nükleer tıp, günümüzde birçok hastalığın tanı ve tedavisinde önemli bir rol oynayan bir disiplindir. Bu alan, radyonüklitler ve radyofarmasötiklerin kullanımıyla hastalıkların teşhis edilmesini ve tedavi edilmesini sağlar. Radyonüklit jeneratörleri, nükleer tıpta sıkça kullanılan ve oldukça kritik bir öneme sahip olan cihazlardır. Bu jeneratörler, kısa yarı ömürlü radyonüklitlerin üretilmesi ve kullanılmasında büyük kolaylık sağlamaktadır.

Radyonüklit jeneratörleri, ebeveyn radyonüklitlerin (parent radionuclide) yarı ömrünün daha uzun olduğu ve kızı radyonüklitlerin (daughter radionuclide) kısa yarı ömürlü olduğu bir sistem üzerine kuruludur. Bu sistem, sürekli ve pratik bir şekilde kısa yarı ömürlü radyonüklitlerin üretimini mümkün kılar. Bu çalışma kapsamında incelenen $\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ radyonüklit jeneratörü, bu tür jeneratörlerin tipik bir örneğidir ve nükleer tıpta birçok önemli uygulamaya sahiptir.

$\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ radyonüklit jeneratörü, Ge^{68} 'in bozunarak Ga^{68} 'i üretmesi prensibine dayanır. Ge^{68} , yarı ömrü yaklaşık 271 gün olan bir ebeveyn radyonüklittir. Bu uzun yarı ömür, jeneratörün uzun süre kullanılabilmesini sağlar. Ga^{68} ise, 67,71 dakika yarı ömrü ile kısa ömürlü bir radyonüklittir ve PET görüntülemeye yaygın olarak kullanılır. Ga^{68} 'in kısa yarı ömrü, hızlı biyolojik süreçlerin izlenmesi ve tanısında büyük avantaj sağlar.

Ga^{68} 'in en önemli klinik uygulamalarından biri, kanser teşhisinde kullanılan Ga^{68} -DOTATATE gibi peptit reseptör radyonüklit tedavi ajanlarının üretimidir. Ga^{68} -DOTATATE, özellikle nöroendokrin tümörlerin teşhisinde ve izlenmesinde kullanılır.

Bu tür radyofarmasötikler, hastalığın yayılımını ve tedaviye yanıtını değerlendirmek için yüksek duyarlılık ve özgüllük sağlar.

$\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ jeneratörleri, genellikle kolon tipi sistemler olarak tasarlanmıştır. Bu sistemde, Ge^{68} kaynak materyali, bir kolon üzerinde sabitlenir. Ga^{68} , Ge^{68} 'in bozunması ile oluşur ve bir elüsyon işlemi ile bu kolondan toplanır. Bu elüsyon işlemi, genellikle iyonik bir çözelti veya asit çözeltisi ile yapılır ve Ga^{68} 'i çözeltide taşıyarak saflaştırır. Bu süreç, günlük klinik kullanım için gerekli olan kısa yarı ömürlü Ga^{68} 'i hızlı ve etkili bir şekilde sağlar [5].

Bu tez çalışmasında, $\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ radyonüklit jeneratörlerinde kolon materyali olarak kullanılacak metal oksitlerin sentezi ve yapısal karakterizasyonu üzerinde durulmaktadır. $\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ jeneratörleri, tıbbi görüntüleme tekniklerinde özellikle PET için büyük öneme sahiptir. Bu jeneratörlerin etkinliği ve güvenilirliği, kolon materyali olarak kullanılan metal oksitlerin özelliklerine bağlıdır.

Çalışmanın ilk aşamasında, çeşitli metal oksitlerin sentez yöntemleri incelenecektir. Bu süreçte, farklı sentez teknikleri kullanılarak metal oksitler elde edilecektir. Sentezlenen materyallerin safiyetini ve homojenliğini sağlamak amacıyla, çeşitli optimizasyon adımları gerçekleştirilecektir.

İkinci aşamada, sentezlenen metal oksitlerin yapısal ve fiziksel özellikleri detaylı bir şekilde karakterize edilecektir. Bu amaçla, X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM), Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanı analizi ve termogravimetrik analiz (TGA) gibi ileri karakterizasyon teknikleri kullanılacaktır. Elde edilen veriler, metal oksitlerin kristal yapıları, morfolojik özellikleri, yüzey alanları ve termal dayanıklılıkları hakkında kapsamlı bilgiler sunacaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, $\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ radyonüklit jeneratörlerinin performansını artırmak için yeni ve etkin kolon materyalleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular, tıbbi uygulamalarda daha güvenilir ve verimli radyonüklit jeneratörlerinin tasarlanmasına katkı sağlayacak ve bu alandaki teknolojik ilerlemelere ışık tutacaktır.

2. Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ JENARATÖRLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Gallium-68 (Ga-68) jeneratörleri, nükleer tıp alanında özellikle pozitron emisyon tomografisi (PET) için kritik bir rol oynamaktadır. Ga-68'in kısa yarı ömrü (68 dakika) ve pozitron yayma kapasitesi, onu birçok hastalığın tanısında etkili kılmaktadır. Bu izotop, ebeveyn izotop olan Germanyum-68'in (Ge-68) radyoaktif bozunması yoluyla jeneratör sistemi içinde üretilir. Ga-68 jeneratörlerinin tarihsel gelişimi, nükleer mekanizmalar ve kolon materyallerinin performans kriterleri gibi konuların detaylı incelenmesi, bu teknolojinin tıbbi uygulamalardaki önemini daha iyi anlamamızı sağlar.

Radyoizotop jeneratörlerinin gelişimi 1950'lerde başlamıştır ve bu dönemde ilk radyoizotop jeneratörleri, tıbbi radyonüklitlerin keşfi ve radyofarmasötiklerin geliştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu dönemde, kısa ömürlü izotopların (kız) teşhis amaçlı kullanımını sağlarken, uzun ömürlü izotopların (ana) sürekli bir kaynak olarak kullanılmasını içeren sistemlerin oluşturulması üzerine çalışılmıştır. Öne çıkan erken radyoizotop sistemleri arasında Mo-99/Tc-99m jeneratörü, benzer sistemlerin temelini atmıştır. [6]. Ga-68 jeneratörleri ise, özellikle 1960'lı yıllarda dikkat çekmeye başlamış, çünkü Ga-68'in PET görüntülemedeki üstün özellikleri hızla fark edilmiştir. Ge-68/Ga-68 jeneratörü, Ga-68'in PET görüntüleme için uygun olan bozunma özellikleri sayesinde umut verici bir sistem olarak ortaya çıkmıştır. Ga-68'in yaklaşık 68 dakikalık yarı ömrü, PET görüntüleme için ideal bir süre sağlar. Ge-68 ise yaklaşık 270.95 gün olan yarı ömrü ile Ga-68'in stabil ve uzun süreli bir kaynağını sağlar. Bu kombinasyon, Ga-68'in periyodik olarak üretilmesini sağlar ve sık sık yeniden doldurma gereksinimini ortadan kaldırır. [7] İlk jeneratörler, Ge-68'in uzun yarı ömrü (yaklaşık 270,8 gün) ve Ga-68'in pozitif beta bozunumu (β^+) sonucu pozitron yayma kapasitesi nedeniyle tercih edilmiştir. 1960'lı yıllarda, Ga-68'in tıbbi uygulamalarda kullanımı için gerekli teknolojik altyapının geliştirilmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Örneğin, ilk jeneratörler arasında yer alan ve Alman Kimya Derneği tarafından geliştirilen sistemler, klinik uygulamalarda büyük ilgi görmüştür [8].

Ge-68'in Ga-68'e dönüşümü, radyoaktif beta bozunması yoluyla gerçekleşir. Bu süreç, çekirdekte bir nötronun protona dönüşmesiyle başlar ve bu esnada bir beta parçacığı (elektron) ve bir antinötrino yayılır [9]. Reaksiyon aşağıdaki gibi gösterilebilir (2.1):



Bu süreçte yayılan pozitron (β^+), bir elektronla etkileşime girerek anihilasyon olayını başlatır ve iki adet 511 keV enerjili gama ışını açığa çıkarır [10]. PET tarayıcıları, bu gama ışınlarını tespit ederek, Ga-68'in vücuttaki dağılımını yüksek çözünürlükte görüntüleme imkânı sağlar. Ge-68'in Ga-68'e dönüşüm süreci, jeneratörlerin kullanımını kolaylaştırmakla birlikte, aynı zamanda üretilen Ga-68'in saflığı ve etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [11].

Sulu asidik çözeltilerde, galyum serbest, hidratlanmış Ga^{3+} iyonu olarak bulunur; hafif asidik ve nötr pH'da $\text{Ga}(\text{OH})_3$ 'e hidrolize olur, ancak radyofarmasötik formülasyonlarda olduğu gibi nanomolar konsantrasyonlarda çökme olmaksızın elde edilebilir. Galyumun amfoterik özellikleri, oluşan hidroksidin yeniden çözünmesine olanak tanır. Konsantrasyon nanomolar seviyeyi aşarsa, karboksilik asitlerin (sitrik, oksalik, asetik asit gibi) eklenmesi çökmeyi önler. Daha yüksek pH'da, 7'nin üzerinde, galyum hidroksit $[\text{Ga}(\text{OH})_4]^-$ olarak yeniden çözünür. Galyumun koordinasyon kimyası ve biyolojik özellikleri demir iyonuna benzerdir ve bu durum galyum radyofarmasötiklerinin hazırlanması ve kullanımı açısından önemlidir. Her iki iyon da $3+$ yüklüdür, benzer iyonik yarıçaplara sahiptir ve baskın olarak oktahedral kompleks geometrisine sahiptir. Transferrin, plazmada bulunan bir protein olup demire bağlanabilen iki bağlanma bölgesine sahiptir ve bu bölgeler Ga^{3+} için de yüksek afinite gösterir. Bu nedenle, vücuda düşük kararlılıklı bir galyum kompleksi verildiğinde, serbest Ga^{3+} 'un %90'ından fazlası transferrin tarafından komplekslenir ve bu da bileşiğin kanda uzun süre kalmasını sağlar [12].

Galyum, Lewis asidi olarak sınıflandırılır ve oksijen ve azot atomları gibi sert Lewis bazları ile oktahedral kompleksler oluşturabilir. Karboksilik, fosfonat, tiol ve amino grupları, fizyolojik koşullarda termodinamik ve kinetik olarak kararlı altı koordinatlı güçlü kompleksler oluşturur. Mevcut beş ve dört koordinatlı galyum kompleksleri hidrolize karşı daha duyarlıdır, ancak galyum görüntülemesi için yeterince kararlıdır.

Galyum bileşiklerinin radyofarmasötik olarak kullanılabilmesi için fizyolojik pH değerlerinde termodinamik olarak kararlı ve/veya kinetik olarak durağan olmaları gerekir. Ga-68 kompleksleme kimyası kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır ve bu sayede stabil Ga⁶⁸-şelatör kompleksleri ve peptit ile konjugasyon sağlanmıştır. Radyomarkradyoaktif işaretleme, in vivo ortamda ⁶⁸Ga³⁺'ın transşelasyonuna dirençli, sağlam Ga⁶⁸ ürünlerinin güvence altına alınması için optimize edilmiştir.

Ticari Ga⁶⁸ jeneratörlerinin mevcut olması ve sağlam işaretleme kimyası, teranostik alanındaki ilerlemeyi etkileyen önemli unsurlardır. Küçük bileşikler, biyolojik makromoleküller ile nano ve mikro parçacıklar başarılı bir şekilde Ga⁶⁸ ile işaretlenmiş ve elde edilen ajanlar iyi görüntüleme yetenekleri sergilemektedir. Ga⁶⁸ özellikle reseptörler, enzimler ve antijenler gibi belirli protein ekspresyon ürünlerini hedefleyen ligandlar proliferasyon, apoptoz, hipoksi, glikoliz ve anjiyogenez gibi genel biyolojik özellikleri ve süreçleri görüntülemek için kullanılan çeşitli bileşiklerin işaretlenmesinde kullanılmıştır. Ayrıca, bazı terapötik radyoizotopların koordinasyon kimyasının Ga(III) ile benzerliği, aynı vektör molekülü ile işaretlenmelerine olanak tanıyarak radyoteranostik uygulamaların geliştirilmesine zemin hazırlamıştır [13].

Ga⁶⁸, PET görüntülemesine olanak tanıyan yüksek verimli bir pozitron yayıcıdır. Ayrıca, 68 dakikalık yarı ömrü, çoğu radyoaktif işaretli peptidin hızlı alım kinetiğiyle uyumludur. Jeneratörden elüe edilen ⁶⁸GaCl₃, bir radyofarmasötik öncü maddedir ve doğrudan hastaya uygulanması amaçlanmamaktadır. 'Kısa' yarı ömrü ve radyoaktif işaretli ligandların hızlı temizlenmesi, hastaya makul düzeyde 'düşük' bir radyasyon dozu verilmesine neden olur. Bu avantajlar sayesinde, somatostatin türevleri, prostat spesifik membran antijen türevleri (PSMA), kemokin reseptörü tip 4, fibroblast aktivasyon proteinleri (FAP), gastrin salgılayan peptit reseptörü ve integrin $\alpha\beta 3$ gibi çeşitli hedefleri tümör lezyonlarında görüntülemek için çeşitli Ga⁶⁸ ile işaretlenmiş peptitler geliştirilmiştir.

Galyum-68 jeneratörlerinin geliştirilmesi, modern tıp ve biyomedikal araştırmalar için büyük bir öneme sahiptir. Bu jeneratörler, radyoizotop üretimi için sürekli bir kaynak sağlayarak, özellikle nükleer tıpta yaygın olarak kullanılan pozitron emisyon tomografisi (PET) gibi görüntüleme yöntemlerinde önemli bir rol oynar. Ga⁶⁸'in sert Lewis asidi özellikleri ve demir iyonuna benzer koordinasyon kimyası, çeşitli biyomoleküllerle stabil kompleksler oluşturmaya olanak tanır, bu da hem fizyolojik koşullarda kararlı hem de biyolojik hedefleme için uygun radyofarmasötiklerin

geliştirilmesine katkı sağlar. Ticari Ga^{68} jeneratörlerinin bulunabilirliği ve sağlam işaretleme kimyası, teranostik alanındaki ilerlemeyi hızlandırarak, küçük moleküller, biyomakromoleküller ve nano/mikro parçacıklar gibi farklı biyolojik ajanların $68Ga$ ile işaretlenmesini mümkün kılar. Galyum-68'in PET görüntülemeye olanak sağlayan yüksek verimli pozitron yayıcı özelliği ve 68 dakikalık yarı ömrü, özellikle radyoaktif işaretli peptidlerin hızlı biyokinetik özellikleriyle uyumludur. Ayrıca, Ga^{68} 'in bazı terapötik radyoizotoplarla benzer koordinasyon kimyası, aynı molekülün hem teşhis hem de tedavi amaçlı kullanılmasına olanak tanıyan teranostik uygulamaların önünü açmaktadır. Bu bağlamda, galyum jeneratörlerinin geliştirilmesi, sadece yüksek kaliteli görüntüleme ajanlarının üretimini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda radyoteranostik ajanların geliştirilmesine de katkıda bulunur. Böylece, klinik kullanımda güvenilir, etkili ve düşük radyasyon riski taşıyan ajanlar geliştirerek, hastaların tanı ve tedavi süreçlerinde önemli iyileşmeler sağlar. Galyum jeneratörlerinin bu çok yönlü faydaları, nükleer tıbbın ve biyomedikal araştırmaların ilerlemesinde kilit bir teknoloji olarak önemini artırmaktadır [14].

2.1. Ge^{68}/Ga^{68} Jeneratörlerinin Çalışma Prensibi:

Radyonüklit jeneratörler, uzun yarı ömürlü ana radyonüklidin bozunarak kısa yarı ömürlü bir kız radyonüklit üretmesine dayanan sistemlerdir. Bu jeneratörler genellikle nükleer tıpta, özellikle de görüntüleme ve tedavi amaçlı, kısa ömürlü radyoizotopların üretiminde kullanılır. Bir jeneratörün içinde bulunan uzun yarı ömürlü ana radyonüklit, sürekli olarak kız radyonüklidi üretir ve bu süreçte ana ve kız radyonüklitlerin kimyasal farklılıkları sayesinde ayırım yapılabilir [15]. Radyonüklit jeneratörler, özellikle medikal uygulamalarda sürekli taze radyoizotop sağlama yetenekleri nedeniyle önemlidir. Ana izotopun bozunması yoluyla kısa ömürlü bir kız izotopun sürekli olarak üretildiği bu sistemler, görüntüleme tekniklerinde büyük avantaj sağlar [16].

Elüsyon işlemi, jeneratörlerin ana işlevlerinden biridir. Burada kullanılan bir çözeltinin kolondan geçirilmesiyle kız izotop elde edilir ve bu izotop daha sonra klinik uygulamalarda kullanılır [17].

Ge^{68}/Ga^{68} jeneratörlerinin çalışma prensibi, radyonüklit jeneratör sistemlerinin genel ilkelerine dayanmakla birlikte, Ge^{68} 'in uzun yarı ömrü (yaklaşık 271 gün) ve Ga^{68} 'in kısa yarı ömrü (68 dakika) özellikleri üzerine kuruludur. Jeneratör sistemi, uzun

ömürlü Ge-68'in bir anne radyonüklit olarak, radyoaktif bozunma yoluyla kısa ömürlü Ga-68'i üretmesi prensibiyle çalışır. Ge-68, tipik olarak bir katyon değişim reçinesi veya metal oksit bazlı bir kolon matrisi üzerinde tutulur. Bu matriste Ge-68, beta bozunması yoluyla Ga-68'i üretir. Ga-68, jeneratörden elüsyon adı verilen bir işlemle salınır. Bu işlemde, uygun bir elüent (genellikle seyreltik asidik bir çözelti) jeneratör kolonundan geçirilir ve Ga-68, eluat olarak toplanır [1, 6].

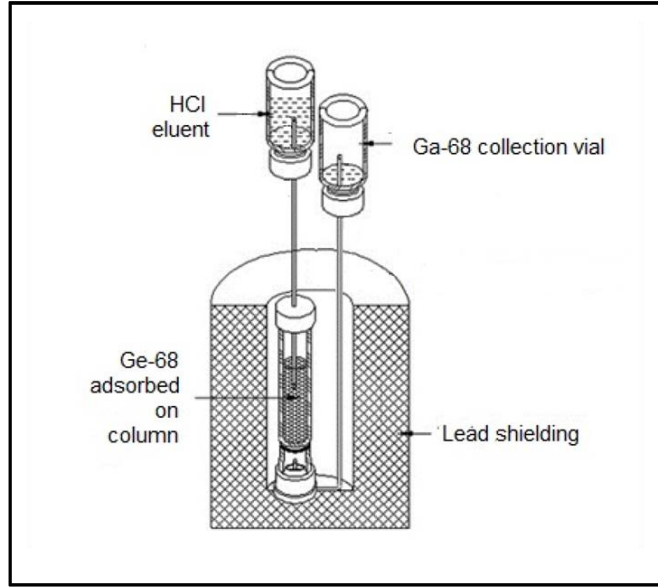
Ge-68 matrisi, jeneratör sisteminde sabit kalır ve Ga-68'in sürekli üretimini sağlar. Elüsyon sırasında Ge-68 jeneratörde kalırken, sadece Ga-68 eluat olarak çözeltide bulunur. Bu işlem, kısa yarı ömrü nedeniyle sürekli taze Ga-68 üretimi sağlarken, jeneratörün uzun süre kullanılmasına olanak tanır. Bu yöntem, klinik uygulamalarda Ga-68 radyofarmasötiklerinin günlük olarak üretimini kolaylaştırır ve PET görüntüleme için yüksek çözünürlüklü ve güvenilir radyoizotoplar sunar [3, 4].

Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinin etkinliği, Ga-68'in fiziksel özelliklerine dayanmaktadır. Ga-68'in yüksek pozitif beta yayıcı özelliği, PET görüntüleme için ideal bir radyonüklit olmasını sağlarken, yarı ömrünün kısa olması, hastalara düşük radyasyon maruziyeti sunar. Jeneratör sisteminin kararlılığı, özellikle elüsyon sırasında Ge-68'in %0.001'den daha az bir kırılma (breakthrough) oranına sahip olmasıyla sağlanır, bu da eluatın saflığını korur [18]. Ga-68, elüatın içeriğinden sonra şelatlayıcı ajanlarla hızla kompleks oluşturur ve bu kompleksler biyolojik hedefleme için kullanılır. Bu jeneratörlerin klinik ve araştırma uygulamalarında geniş çapta benimsenmesi, yüksek kaliteli Ga-68 radyofarmasötiklerinin güvenilir ve sürekli olarak elde edilmesini mümkün kılmaktadır [19].

Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinin bu temel çalışma prensibi, nükleer tıp alanında tanı ve tedaviye yönelik gelişmelere büyük katkı sağlamaktadır.

⁶⁸Ge/⁶⁸Ga jeneratörleri geleneksel olarak ana radyonüklit olan ⁶⁸Ge'nin bir kolon malzemesine yüklenmesi ve çeşitli sulu ortamlar kullanılarak ⁶⁸Ga'nin ayrıştırılması esasına dayanır.

Genel bir Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ jeneratörünün şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir [18].



Şekil 2.1: Ge^{68} / Ga^{68} jeneratörünün şematik gösterimi.

Ge^{68} / Ga^{68} radyonüklit jeneratörünün çalışma prensibi, radyoaktif bir ebeveyn izotop Ge^{68} ile radyoaktif bir kız izotop Ga^{68} arasındaki ilişkiye dayanır.

Ge^{68} / Ga^{68} radyonüklit jeneratörü, uzun yarı ömre sahip (yaklaşık 271 gün) radyoaktif Ge^{68} izotopu içerir. Ge^{68} , jeneratörün kolon materyaline bağlanır ve bu kolon materyali tipik olarak metal oksitlerden oluşur. Ge^{68} , beta bozunması yoluyla Ga^{68} izotopunu üretir. Ga^{68} 'in yarı ömrü yaklaşık 68 dakikadır ve bu nedenle tıbbi uygulamalar için kısa süreli kullanıma uygundur.

Üretilen Ga^{68} , kolon materyalinden bir elüent (genellikle hidroklorik asit veya başka uygun bir çözelti) yardımıyla süzülerek toplanır [20].

Bu işlem, Ga^{68} 'in kolon materyalinden ayrılması ve çözeltiye geçmesiyle gerçekleştirilir. Ga^{68} , genellikle PET (Pozitron Emisyon Tomografisi) taramaları için kullanılan radyofarmasötiklerin hazırlanmasında kullanılır. Ga^{68} , pozitron emisyonu yoluyla gamma fotonları üretir ve bu fotonlar PET tarayıcılar tarafından tespit edilerek vücudun iç yapılarının yüksek çözünürlüklü görüntülerinin elde edilmesini sağlar.

Ge^{68} 'in uzun yarı ömrü sayesinde jeneratör, tekrar tekrar kullanılabilir [21]. Ga^{68} üretimi için düzenli olarak elüsyon işlemi yapılır ve jeneratörün ömrü boyunca yüzlerce kez kullanılabilir.

Bir jeneratörün performansını belirleyen ana parametreler; kolon malzemesinin kimyasal kararlılığı, yüzey alanı ve radyasyon direnci, çözücü (eluent) türü, elüsyon

profili ve ^{68}Ge atılımı olarak sayılabilir [22]. Kolon matrisi, ^{68}Ge 'in kendiliğinden Ga^{68} 'e bozunduğu yer olması açısından oldukça önemlidir.

2.2. $\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ Jeneratörlerinde Kullanılan Kolon Malzemeleri:

$\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ radyonüklit jeneratörlerinde kullanılan metal oksit kolon malzemeleri genellikle titanyum dioksit (TiO_2), kalay dioksit (SnO_2) veya zirkonyum dioksit (ZrO_2) gibi yüksek saflıkta metal oksitleridir [23]. Bunun yanı sıra yaygın olarak kullanılan kolon matriksi genellikle organik reçinelerdir. Bu reçineler, Ga^{68} 'i Ge^{68} 'den ayırmak için özel olarak tasarlanmış ve sentezlenmiş olabilir.

Tablo 2.1'de, şu an piyasada kullanılan ticari jeneratörlerin kullandıkları kolon malzemeleri ve temel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Piyasada kullanılan $\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ jeneratörlerinin özellikleri.

Şirket	Kolon Matrisi	Eluent	Başlangıç ^{68}Ga elüsyon verimi (%)	^{68}Ge Atılımı	Metalik Safsızlıklar
Cyclotron Co., Ltd (Obninsk)	TiO_2	0.1 M HCl	>80	$>5 \times 10^{-3}$	>2
Eckert & Ziegler (GalliaPharm)	TiO_2	0.1 M HCl	>70	$3-5 \times 10^{-3}$	1-10
iThemba LABS	SnO_2	0.6 M HCl	>80	$>2 \times 10^{-3}$	1-20
ITG GmbH	Pirgallol türevi SiO_2	0.05 M HCl	>80	$>5 \times 10^{-3}$	>0.2
Pars Isotope (PARS-GalluGEN)	SnO_2	0.6 M HCl	>50	$>5 \times 10^{-5}$	>1

Yukarıdaki tabloda verilen ticari jeneratörlerin yanı sıra klinik çalışma aşamasında kalmış olan CeO_2 -PAN temelli kolon malzemesi içeren jeneratörler de literatürde yer almaktadır [24].

3. ÇALIŞMANIN KONUSU:

Ge-68/Ga-68 radyonüklit jeneratörleri, nükleer tıpta önemli bir yer tutan kısa yarı ömürlü Ga-68 izotopunu üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu jeneratörler, Ga-68'in PET (Pozitron Emisyon Tomografisi) görüntüleme tekniklerinde yaygın olarak kullanımını sağlamaktadır. Ancak, Ga-68'in verimli bir şekilde üretilmesi ve jeneratörden saf olarak elüsyonu, kullanılan kolon materyalinin yapısal ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Jeneratörde kullanılan kolon materyalinin, Ge-68'in adsorpsiyon kapasitesini ve Ga-68'in elüsyon verimliliğini maksimize edecek niteliklere sahip olması gerekmektedir.

Geleneksel kolon materyalleri, genellikle sınırlı kimyasal stabilite, düşük yüzey alanı ve sınırlı adsorpsiyon kapasitesi gibi dezavantajlar taşımaktadır. Bu nedenle, Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kullanılacak metal oksit bazlı yeni kolon materyallerinin geliştirilmesi büyük bir gereksinim haline gelmiştir. Bu metal oksitlerin uygun sentez yöntemleri ile üretilmesi ve yapısal karakterizasyonlarının yapılması, jeneratörlerin etkinliğini artırmak ve radyoizotopların tıbbi uygulamalardaki kullanımını iyileştirmek açısından kritik bir öneme sahiptir.

Piyasada yaygın olarak kullanılmaya başlanan ilk jeneratör (Cyclotron Inc. Rusya) inorganik TiO_2 kolon matrisi içermektedir. Bu jeneratörün avantajı elüsyon için düşük asit konsantrasyonu (0.1 M HCl vb.) kullanılması ve yüksek verim elde edilebilmesidir. Hidroklorik asit kullanılarak gerçekleştirilen bu elüsyon işleminin amacı asidik koşullar sağlanarak $^{68}\text{Ga}^{3+}$ iyonunun hidrolizinin engellenmesidir (Radyoaktif işaretleme ve kimyasal prosesler için gereklidir).

Bunun yanı sıra alternatif olarak kullanılan ve dünyada birkaç ticari jeneratör üreticisinin kullandığı SnO_2 malzemesi de bu çalışmada sentezlenerek çalışmalarda kullanılmıştır.

Ticari olarak kullanılsa da literatürde geçmişten bugüne geniş bir yer tutan organik bir malzeme olan poliakrilonitril (PAN) ile kullanılan CeO_2 -PAN kompozit malzemesi de araştırmaya konu olmuştur.

Bu tezde, Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kullanılmak üzere çeşitli metal oksitlerin sentezi ve yapı karakterizasyonu yapılacaktır. Bu çalışma ile kolon materyali olarak

kullanılabilecek alternatif metal oksitlerin, radyonüklit jeneratör sistemlerindeki performansını iyileştirmek amacıyla yapısal ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada deneysel olarak kullanılan TiO_2 , SnO_2 ve CeO_2 -PAN malzemesi ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. $\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ Jeneratörlerinde Kullanılacak Kolon Malzemelerinin Üretilmesi:

4.1.1. CeO_2 -PAN Kolon Malzemesinin Sentezi:

Bu çalışma kapsamında CeO_2 -PAN dolaylı çöktürme yöntemiyle üretilmiştir. Seryum oksalat, %80 izo-propil alkol-%20 deiyonize su ortamında 0,6 N seryum (III) nitrat çözeltisine 1 N oksalik asit çözeltisinin damla damla eklenmesiyle çöktürülür. **Şekil 4.1**'de gösterilen deney düzeneği kullanılarak bu işlem gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1: Dolaylı Çöktürme Yöntemi.

Çöktürme işlemi sonunda elde edilen çökelti deiyonize su ile yıkanır, süzülür ve kızılötesi (IR) lamba altında 1 saat kurutulur. **Şekil 4.2**'de kurutma işlemi gösterilmiştir.



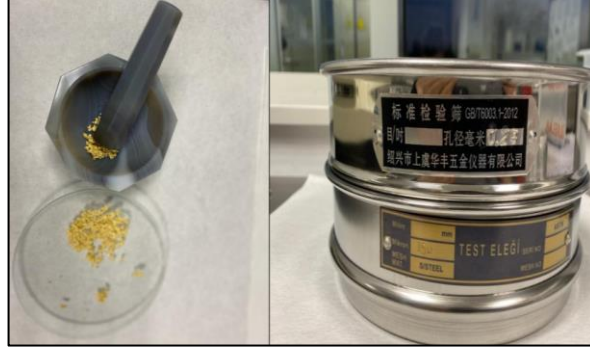
Şekil 4.2: Kızıl Ötesi Lamba Altında kurutulan Çökeltinin Görüntüsü.

1 g PAN, 25 mL 10 M HNO_3 içinde hafif ısıtma (yaklaşık 70°C) ve sürekli karıştırma ile viskoz bir çözelti elde edilene kadar çözülür. 1 g kalsine seryum oksit, kompozitin homojen süspansiyonunu elde etmek için hafif ısıtma ile kuvvetli karıştırma ile PAN çözeltisine yavaşça eklenir. Süspansiyon daha sonra 1 L deiyonize su banyosuna dökülerek kütle halinde çöktürülür. Kütle halinde çöktürülmüş olan $\text{CeO}_2\text{-PAN}$ **Şekil 4.3**'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Kütle halinde çöktürülmüş olan $\text{CeO}_2\text{-PAN}$.

Kütle halinde çöktürülmüş $\text{CeO}_2\text{-PAN}$ deiyonize su ile yıkanır ve fırında 70°C 'de 12 saat boyunca kurutulur. Kurutulan kütle mekanik olarak ezilir ve eleme işleminden geçirilerek 50-100 mesh aralığında partiküller elde edilir. Ezme-eleme işlemi **Şekil 4.4**'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Ezme-eleme düzeneği.

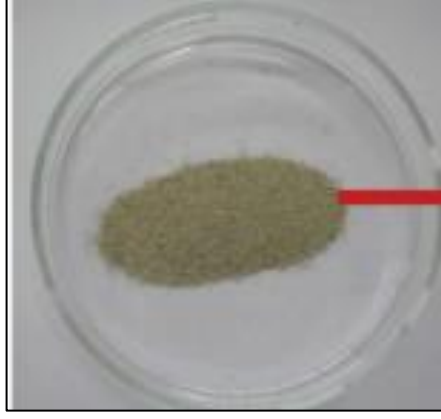
4.2. SnO₂ Kolon Malzemesinin Sentezi:

Kolon malzemesi olarak kullanılması amaçlanan SnO₂ mekanokimyasal sentez yöntemiyle üretilmiştir. Kalay klorür : amonyum karbonat : glukoz molce oranı 1: 1.25:1.5 olacak şekilde karıştırılarak porselen bir havanda 30 dk boyunca ezilerek Şekil 4.5'teki gibi macun haline getirildi.



Şekil 4.5: Macun kıvamındaki karışımın görüntüsü.

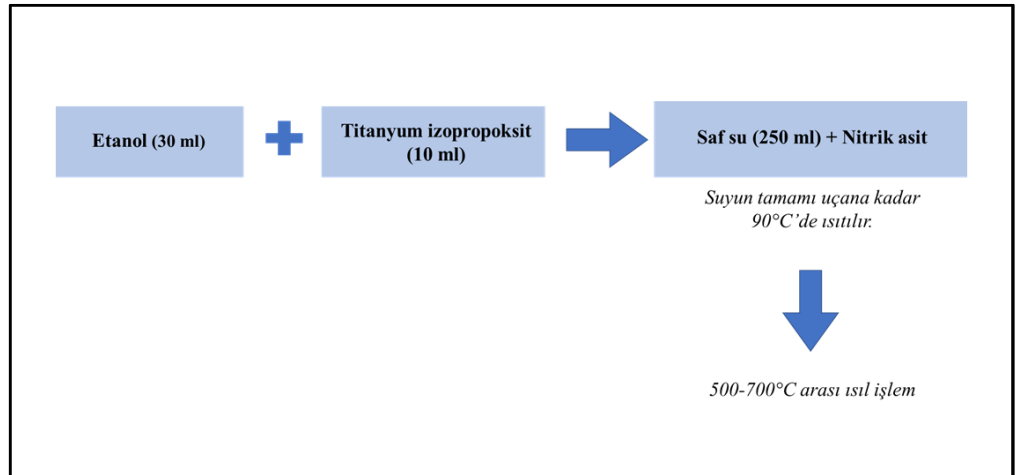
Elde edilen macun kıvamındaki karışım kül fırınında 600 °C de 3 saat boyunca kalsine edildi. Kalsinasyon işleminden sonra toz formunda SnO₂ elde edilmiştir. (**Şekil 4.6**)



Şekil 4.6: Kalsinasyon sonrası SnO₂ görünümü.

4.1.3. TiO₂ Kolon Malzemesinin Sentezi:

Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon malzemesi olarak kullanılması hedeflenen TiO₂ tozları; düşük kalsinasyon sıcaklıklarına olanak veren ve sıvı çözeltilerin başlangıç malzemesi olarak kullanıldığı bir üretim yöntemi olan sol-jel çöktürme yöntemi ile üretilmiştir [25, 26]. Şekil 4.7’de sol-jel çöktürme yönteminin akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Sol-jel çöktürme yönteminin akış şeması.

Tozların sentezi temel olarak, titanyum izopropoksit (10 ml) + etanol (30 ml) karışımının saf su (250 ml) + nitrik asit sulu çözeltisine yavaş bir şekilde (damlatılarak) eklenmesine dayanmaktadır. Her bir damlatma işleminde çözeltide çökeltme meydana gelmektedir. Titanyum izopropoksit çözeltisinin tamamı saf su çözeltisine ilave edilene kadar damlatma işlemi devam eder. Daha sonra çökeltme meydana gelen

Çözelti petri kabına alınarak 100 °C’de kurutulmuştur ve son olarak 500, 600 ve 700 °C’de 45 dakika boyunca ısıtıl işlem görmüştür. Şekil 4.8’de üretilen tozların gerçek görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.8: TiO₂ tozlarının görüntüsü.

4.2. Deneysel Yöntemler

Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kullanılan kolon matrisi seçiminde çeşitli analizler, malzemenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Bu analizler, jeneratörün performansını doğrudan etkileyen faktörlerin belirlenmesine yardımcı olur. İdeal bir kolon matrisi, yüksek adsorpsiyon kapasitesine, uygun akış özelliklerine ve iyi mekanik stabiliteye sahip olmalıdır. Aşağıda kolon matrisi seçiminde kullanılan başlıca analiz yöntemleri ve bu analizlerin nasıl rol oynadığı açıklanmaktadır.

4.2.1. X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi

XRD analizi, kolon matrisi olarak kullanılan malzemenin kristal yapısını ve faz kompozisyonunu belirlemede önemli bir rol oynar. Örneğin, titanyum dioksit (TiO₂) gibi malzemelerde XRD, anatase ve rutil gibi farklı kristal fazların varlığını belirler.

Bu fazlar, Ge-68'in adsorpsiyon kapasitesini etkileyebilir. Anataz fazı, daha yüksek bir yüzey alanı sunarak daha etkili bir adsorpsiyon sağlar [27].

XRD ayrıca, kolon materyalinin kristal boyutunu belirleyerek yüzey alanının değerlendirilmesine de katkı sağlar. Daha küçük kristal boyutları, daha büyük bir yüzey alanı sunar, bu da Ge-68'in daha iyi adsorbe edilmesine olanak tanır [28].

Üretilen TiO_2 ve CeO_2 -PAN faz analizleri XRD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri Cu k- α anot malzemeli Rigaku D/max 2200 cihazı kullanılarak Gebze Teknik Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde 1,54 Å dalga boylu x-ışınları kullanılmıştır ve veriler 10-80° arasında 0,02 saniye aralıklarla alınmıştır.

4.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikroyapı Analizi

SEM analizi, kolon matrisi malzemesinin yüzey morfolojisini ve partikül boyutunu incelemek için kullanılır. Yüzey morfolojisi, malzemenin Ge-68'i adsorbe etme kapasitesini doğrudan etkileyebilir. Düzgün, gözenekli yüzey yapıları daha fazla adsorpsiyon sağlar [29].

Üretilen TiO_2 , CeO_2 -PAN ve SnO_2 malzemelerinin mikroyapıları SEM yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Mikro yapı analizleri sırasında ikincil elektronların kullanıldığı taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. SEM analizleri Gebze Teknik Üniversitesi Taramalı Elektron Mikroskobu Laboratuvarında Philips XL 30 SFEG cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.2.3. Parçacık Boyutu Dağılımı Analizi

Parçacık boyutu dağılımı, kolonun akış özelliklerini ve mekanik stabilitesini belirler. Büyük partiküller, daha iyi mekanik stabilite sağlarken, küçük partiküller daha iyi adsorpsiyon kapasitesi sunar. Bu nedenle parçacık boyutu dağılımı analizi, uygun partikül boyutunu belirlemede kritik rol oynar [28].

Partikül boyut analizi, genel olarak bir numune de yer alan parçacıkların boyut dağılımlarını karakterize edebilmek için kullanılan bir yöntemdir. Jeneratörde kolon malzemesi olarak kullanılacak olan metal oksitlerin ortalama parçacık boyutu ve boyut dağılımı, devamlı sıvı akışı açısından önemlidir. Bu analizler Gebze Teknik Üniversitesi kapsamında yapılmıştır.

4.2.4. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile Yüzey Analizi

X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kullanılan kolon matrisi malzemelerinin yüzey kimyasını ve elementel bileşimini analiz etmek için kritik bir tekniktir. XPS analizi, malzemenin yüzeyindeki elementlerin kimyasal durumunu ve bağlanma enerjilerini belirleyerek jeneratör performansını etkileyen çeşitli parametreleri ortaya çıkarabilir.

XPS tekniği ile katı örneklerin yüzey yapısı hakkında oldukça hassas bilgiler toplanabilmektedir. Üretilen metal oksitlerin ilk 10 nm'lik katmanında hangi elementlerin hangi valanslarda ve hangi kimyasal çevrelerde bulunduğunu araştırmak için XPS yöntemi kullanılmıştır. Bu analizler Gebze Teknik Üniversitesi ve Sabancı Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir.

4.2.5. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Karakterizasyonları

Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kullanılan kolon matrisi malzemelerinin kimyasal yapısını ve fonksiyonel gruplarını analiz etmede önemli bir rol oynar. FTIR, malzemenin yüzeyinde bulunan kimyasal bağların ve fonksiyonel grupların belirlenmesini sağlar. Bu analiz, malzemenin Ge-68 adsorpsiyonu ve Ga-68 elüsyonu üzerindeki etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

FTIR, kolon matrisi yüzeyindeki fonksiyonel grupların tespiti için kullanılır. Örneğin, TiO₂ gibi malzemelerin yüzeyinde hidroksil gruplarının varlığı, radyoizotopların adsorpsiyon kapasitesini artırabilir. Hidroksil grupları, Ge-68'in yüzeye tutunmasına yardımcı olan aktif adsorpsiyon bölgeleri sağlayarak, jeneratörün performansını artırır [30].

FTIR, termal işlemler veya modifikasyonlar sonrasında malzemenin yüzeyinde oluşabilecek kimyasal değişiklikleri izlemek için kullanılabilir. Kolon matrisi termal veya kimyasal işleme tabi tutulduğunda, yüzeydeki fonksiyonel gruplar değişebilir, bu da adsorpsiyon ve elüasyon mekanizmalarını etkileyebilir [31].

FTIR, kolon matrisi olarak kullanılan malzemenin saflığını kontrol etmek için de kullanılabilir. Yüzeyde istenmeyen safsızlıklar veya kontaminantlar, adsorpsiyon kapasitesini olumsuz yönde etkileyebilir. FTIR, bu tür yabancı maddelerin tespit edilmesinde kullanılarak malzemenin saf olup olmadığını doğrular [32].

FTIR, örnekteki özellikle fonksiyonel grupların titreşim frekanslarına dayanan, hızlı bir karakterizasyon tekniğidir. FTIR analizleri, Sabancı Üniversitesi bünyesindeki Thermo Scientific Nicolet iS10 Smart iTR FTIR cihazı ile yapılmıştır.

4.2.6. Brunauer-Emmett-Teller (BET) Yüzey Analizi

BET analizi, bir malzemenin spesifik yüzey alanını ölçmek için kullanılır. Yüksek yüzey alanı, Ge-68'in TiO_2 gibi malzemeler tarafından daha iyi adsorbe edilmesini sağlar. Bu, jeneratörün genel verimliliğini artırır [33].

BET analizi ayrıca, malzemenin gözenek yapısını ve hacmini belirleyerek, kolon matrisi olarak kullanılacak malzemenin elüsyon performansını tahmin etmek için de kullanılır.

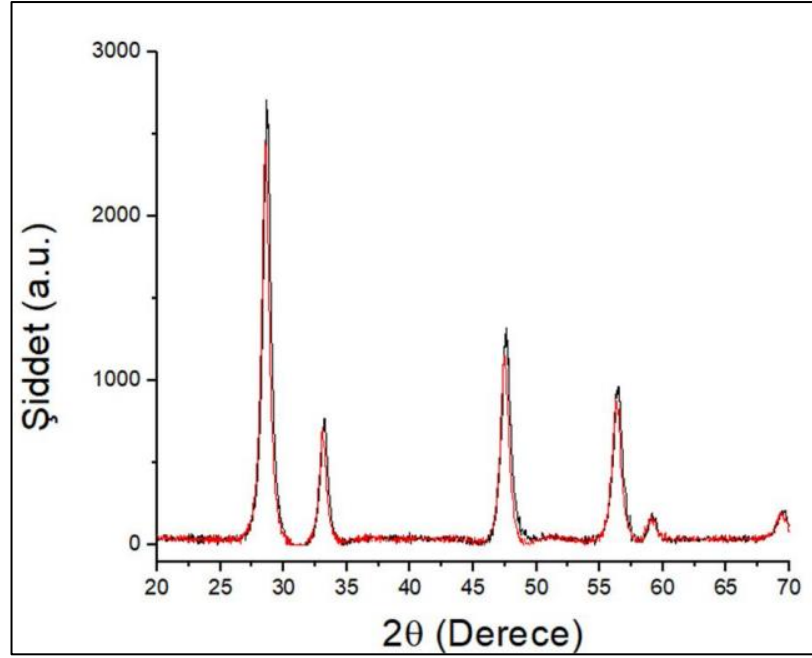
BET yüzey analizi, bir malzemenin spesifik yüzey alanını ölçmek için kullanılan yaygın bir tekniktir. BET teorisi, gaz moleküllerinin katı yüzeyine fiziksel adsorpsiyonuna dayanır. TiO_2 malzemesinin yüzey analizleri için bu teknik kullanılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. XRD Analiz Sonuçları

➤ *CeO₂-PAN:*

Üretilen CeO₂-PAN tozunun XRD deseni Şekil 5.1’de verilmiştir. XRD deseni değerlendirildiğinde kübik kristal yapıda olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1: CeO₂-PAN tozunun XRD deseni.

CeO₂'nin kübik kristal yapısı, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanılmasını değerlendirmek açısından bazı avantajlar ve önemli özellikler sunar. CeO₂, kimyasal stabilitesi, yüksek oksidatif kapasitesi ve oksijen boşlukları oluşturma yeteneğiyle bilinir. Kübik kristal yapısı ise bu malzemenin yüzey alanı, mekanik stabilite ve iyon değişimi özelliklerini etkileyerek Ge-68'in adsorpsiyonu ve Ga-68'in elüasyonu için uygun bir ortam sağlayabilir.

Kübik yapıya sahip CeO₂, kimyasal ve termal olarak oldukça stabildir. Bu, özellikle yüksek sıcaklıklara ve zorlu kimyasal koşullara maruz kalabilecek Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde uzun süreli kullanım açısından büyük bir avantaj sağlar. CeO₂'nin

kararlı kristal yapısı, yüzeyde bozunma veya yapısal değişikliklere karşı direnç gösterir, bu da malzemenin uzun ömürlü olmasını sağlar [31].

CeO₂'nin kübik yapısı, oksijen boşlukları oluşturma kapasitesine sahiptir. Oksijen boşlukları, yüzeyde daha fazla aktif site oluşturarak Ge-68'in CeO₂ yüzeyine daha iyi adsorbe edilmesini sağlar. Bu oksijen boşlukları, malzemenin iyon değişim kapasitesini artırarak radyoizotopların adsorpsiyonunu optimize eder [34]. Kübik kristal yapının düzgün simetrisi, bu oksijen boşluklarının homojen bir şekilde dağılmasını sağlar ve böylece adsorpsiyon verimliliğini artırır.

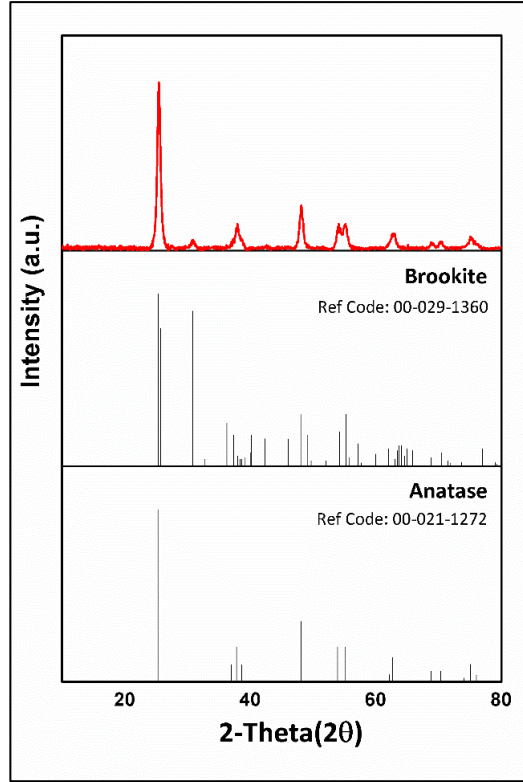
Kübik kristal yapı, malzemenin mekanik dayanıklılığını da artırır. Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kolon materyali, elüsyon işlemi sırasında mekanik streslere maruz kalabilir. CeO₂'nin kübik yapısı, mekanik streslere karşı dayanıklıdır ve bu da uzun süreli elüsyon döngüleri boyunca malzemenin bozulmasını engeller [35].

Kübik yapıya sahip CeO₂, genellikle yüksek yüzey alanına sahiptir, bu da daha fazla radyoizotopun yüzeye adsorbe edilmesini sağlar. Yüksek yüzey alanı, Ge-68'in kolon materyali üzerine daha etkin şekilde bağlanmasına yardımcı olur. Ayrıca, CeO₂'nin iyon değişim kapasitesi de bu yüzey alanı ile ilişkili olarak artar. Kübik yapı, malzemenin iç yapısında etkili bir iyon değişimini destekleyerek Ga-68'in elüsyonunu kolaylaştırır [36].

Kübik kristal yapıda, özellikle oksijen boşlukları gibi kusurlar, malzemenin adsorpsiyon kapasitesini artırırken, gereğinden fazla oksijen boşluğunun oluşması kimyasal stabiliteyi olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, CeO₂'nin oksijen boşluklarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, optimum adsorpsiyon kapasitesine ulaşmak için önemlidir. Fazla oksijen boşluğu, malzemenin kimyasal dengesini bozarak Ga-68'in elüsyon verimliliğini düşürebilir.

➤ *TiO₂:*

Günümüzde yaygın olarak kullanılan jeneratörlerde kolon malzemesi olarak kullanılan TiO₂'nin anataz ve brokit fazda olduğu bilinmektedir. TiO₂ tozlarının XRD deseni Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: TiO₂ tozunun XRD deseni.

TiO₂ tozlarının istenen performansı verecek kalitede olması doğru fazlardan oluşmasına ve nano kristalin olmasına bağlıdır. Sentezlenen TiO₂ tozunun XRD analizinde çoğunlukla anataz fazından oluştuğu ve az miktarda brokit fazının da oluştuğu belirlenmiştir. Rutil fazı ise tespit edilmemiştir.

TiO₂'nin XRD analizi sonucunda büyük oranda anataz fazında ve az miktarda brookite fazında olduğu, rutil faza rastlanmadığı bulgusu, Ge-68/Ga-68 jeneratörleri için kolon matrisi olarak kullanılabilirliği açısından önemli sonuçlar ortaya koyar. TiO₂'nin farklı fazları (anataz, rutil, brookite), yüzey alanı, adsorpsiyon kapasitesi ve kimyasal stabilite gibi jeneratör performansını etkileyen kritik özellikler sunar. Anataz ve brookite fazlarının baskın olması, Ge-68'in adsorpsiyon kapasitesi ve Ga-68'in elüsyon verimliliği üzerinde olumlu bir etki yaratabilir.

Anataz fazı, TiO₂'nin en yüksek yüzey alanına sahip fazlarından biridir. Yüksek yüzey alanı, radyoizotopların (Ge-68) yüzeye daha etkin bir şekilde bağlanmasına olanak tanır. Ayrıca anataz fazı, oksijen boşlukları ve hidroksil grupları açısından zengin olup, bu özellikler Ge-68'in adsorpsiyonu için daha fazla aktif site sağlar. Dolayısıyla, anatase fazının baskın olması, jeneratörün performansı için avantajlıdır [27].

Rutil fazı, TiO_2 'nin en kararlı formudur ancak genellikle daha düşük yüzey alanına ve daha az oksijen boşluğuna sahiptir. Bu nedenle, rutil fazının olmaması, yüzey alanının azalmasını ve radyoizotopların adsorpsiyonunun zayıflamasını önler. Rutil fazının bulunmaması, anataz ve brookite fazlarının yüzeyde daha fazla aktif site oluşturmalarını sağlayarak Ge-68 adsorpsiyonu için daha iyi bir ortam sağlar. Rutil fazının eksikliği, daha düşük yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesine neden olacak bir faktör olmadığından, bu özellik $\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ jeneratörleri için avantajlıdır [28].

Anataz ve brookite fazlarının bulunması, TiO_2 'nin yüzey reaktivitesini artıran oksijen boşluklarının varlığı ile ilişkilidir. Bu oksijen boşlukları, yüzeyde daha fazla aktif adsorpsiyon merkezi oluşturarak Ge-68'in yüzeye bağlanma kapasitesini artırır. Oksijen boşlukları, aynı zamanda yüzeydeki hidroksil gruplarının miktarını artırarak daha fazla radyoizotop adsorpsiyonuna olanak tanır [36].

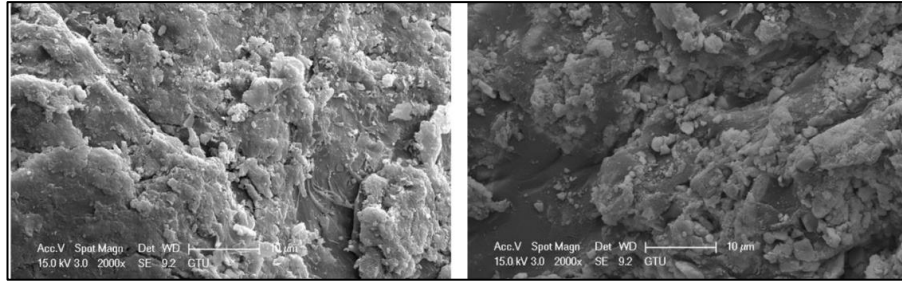
Anataz fazı, rutil fazına göre daha az kararlıdır ancak düşük sıcaklık ve kimyasal koşullarda yeterli stabilite sağlar. $\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ jeneratörleri için kullanılan kolon matrisi genellikle düşük sıcaklık koşullarında çalıştığından, anataz fazının baskın olması kimyasal stabilite açısından yeterli performans gösterir. Ayrıca brookite fazının az miktarda bulunması, stabiliteyi çok fazla etkilemez, çünkü ana faz anataz olduğunda sistemin genel stabilitesi korunur [37].

XRD analizi sonucu TiO_2 'nin büyük oranda anatase ve az miktarda brookite fazında bulunması, $\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanılmak için ideal özellikler sunar. Anataz fazı yüksek yüzey alanı, oksijen boşluğu ve hidroksil gruplarına sahip olduğu için Ge-68 adsorpsiyon kapasitesini artırırken, brookite fazı da yüzey reaktivitesine katkıda bulunur. Rutil fazının olmaması, düşük yüzey alanı ve reaktivite sorunlarını ortadan kaldırarak adsorpsiyon kapasitesini olumsuz etkilemez. Bu faz kombinasyonu, jeneratörün hem kimyasal stabilitesini hem de radyoizotop adsorpsiyon kapasitesini optimize eder.

5.2. SEM Analiz Sonuçları

➤ CeO_2 -PAN:

CeO_2 -PAN numunelerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 5.3'te verilmiştir. CeO_2 -PAN numuneleri yuvarlak kenarlara ve büyük toz boyutuna sahiptir.



Şekil 5.3: CeO₂-PAN tozlarının SEM görüntüleri.

SEM (Tarama Elektron Mikroskobu) analizi ile elde edilen sonuçlarda CeO₂-PAN (Seryum dioksit - Poliakrilonitril) numunelerinin yuvarlak kenarlara ve büyük toz boyutlarına sahip olduğu bulgusu, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanılabilirliği açısından değerlendirildiğinde çeşitli avantajlar ve potansiyel zorluklar sunar. Bu morfolojik özellikler, malzemenin akış karakteristikleri, yüzey alanı, adsorpsiyon kapasitesi ve mekanik stabilitesi gibi jeneratör performansını etkileyen önemli faktörleri doğrudan etkileyebilir.

Yuvarlak kenarlara sahip CeO₂-PAN partikülleri, yüzeyde daha az keskin kenar ve köşe barındırdığı için mekanik streslere karşı daha dayanıklıdır. Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kullanılan kolon matrisinin uzun süreli kullanımda aşınmaya ve parçalanmaya karşı dayanıklı olması gereklidir. Yuvarlak kenarlar, elüsyon sırasında partiküllerin parçalanma olasılığını azaltarak kolonun mekanik stabilitesini artırır [38].

Ayrıca, yuvarlak kenarlar partiküller arasında daha düzgün bir boşluk yapısı oluşturarak sıvıların kolon içerisinden daha verimli bir şekilde akmasına olanak tanır. Bu, elüsyon verimliliğini artırabilir ve Ga-68'in kolon boyunca daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlar.

Büyük partikül boyutları, kolon matrisi olarak kullanılan malzemelerin akış özelliklerini ve yüzey alanını etkiler. Daha büyük partiküller, kolon içerisinden geçen sıvının akış hızını artırabilir, bu da Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde daha hızlı ve verimli elüsyon sağlar. Bununla birlikte, büyük partikül boyutları yüzey alanını küçültebilir, bu da adsorpsiyon kapasitesini sınırlayabilir. Yani, büyük toz boyutuna sahip CeO₂-PAN numuneleri, hızlı elüsyon için avantaj sunarken, yüzey alanının azalması nedeniyle Ge-68'in adsorpsiyon kapasitesi sınırlanabilir [39].

Bununla birlikte, bu etki, partiküllerin yüzey kimyasına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. CeO₂'nin yüksek yüzey reaktivitesi ve oksijen boşluğu oluşturma

kapasitesi, büyük partikül boyutlarının neden olduğu yüzey alanı kaybını kısmen telafi edebilir.

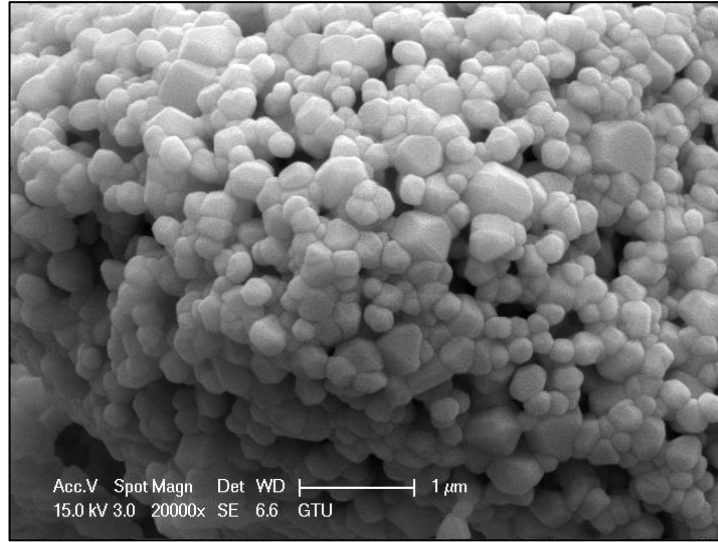
Yuvarlak kenarlar ve büyük partikül boyutları, CeO_2 -PAN numunelerinin mekanik stabilitesini artırabilir, bu da kolonun uzun vadeli kullanımını destekler. $\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ jeneratörlerinde kolon matrisi, elüsyon işlemleri sırasında mekanik strese maruz kalır ve partiküllerin aşınması veya parçalanması jeneratör performansını olumsuz etkileyebilir. CeO_2 -PAN partiküllerinin büyük boyutlara sahip olması, bu tür mekanik hasarlara karşı daha dayanıklı olmasını sağlar [40].

CeO_2 -PAN numunelerinin büyük partikül boyutları, kolon içerisindeki sıvının daha hızlı akmasına olanak tanır. Bu durum, kanal oluşumunu azaltarak akışın daha homojen olmasını sağlar ve Ga-68 'in elüsyonunun verimli bir şekilde gerçekleşmesine katkı sunar. Yuvarlak kenarlar ve büyük partikül boyutları, kolonun tıkanmasını önleyebilir ve elüsyon sırasında sıvıların daha kolay geçiş yapmasını sağlayarak sistemin performansını artırır [41].

Büyük partikül boyutları, CeO_2 'nin toplam yüzey alanını azalttığı için adsorpsiyon kapasitesini kısmen sınırlandırabilir. Yüzey alanı ne kadar büyükse, Ge-68 'in adsorbe edilebileceği alanlar da o kadar fazla olur. Ancak, CeO_2 'nin yüzeyinde oksijen boşlukları ve aktif hidroksil gruplarının varlığı, bu kaybı kısmen telafi edebilir. CeO_2 'nin yüksek reaktivitesi, büyük partikül boyutlarının getirdiği yüzey alanı kaybını dengeler [42].

➤ SnO_2 :

Üretilen SnO_2 tozlarının SEM görüntüleri Şekil 5.4'te verilmiştir. SnO_2 'nin mikroyapı görüntüsü incelendiğinde istenen gözenekli yapının elde edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 5.4: SnO₂ tozunun SEM görüntüsü.

Gözenekli SnO₂ yapısının Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanılabilirliği, bu malzemenin morfolojik ve kimyasal özelliklerinden dolayı potansiyel avantajlar sunar. Gözenekli yapılar, yüksek yüzey alanı ve iyon değişimi için uygun alanlar sağlayarak radyoizotopların adsorpsiyon kapasitesini artırabilir. Ayrıca SnO₂, kimyasal stabilitesi, mekanik dayanıklılığı ve yüzey reaktivitesi ile bilinir ve bu özellikler Ge-68'in etkin bir şekilde adsorpsiyonu ve Ga-68'in verimli elüsyonu için önemli avantajlar sağlar.

Gözenekli SnO₂ yapılarının en belirgin avantajı, geniş yüzey alanlarına sahip olmalarıdır. Yüksek yüzey alanı, kolon matrisi olarak kullanılan malzemenin daha fazla radyoizotop adsorbe edebilmesini sağlar. Bu özellik, Ge-68'in SnO₂ yüzeyine etkin bir şekilde bağlanmasını kolaylaştırır. Gözenekli yapılar, aynı zamanda sıvıların malzeme boyunca daha kolay ve hızlı akmasını sağlayarak elüsyon verimliliğini artırır [28].

SnO₂, yüksek kimyasal ve termal stabiliteye sahip bir malzemedir. Bu özellik, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde uzun süreli kullanım için önemlidir, çünkü kolon matrisi olarak kullanılan malzeme, radyoaktif bozunmaya ve sıvı elüsyonuna maruz kalırken kimyasal stabilitesini korumalıdır. Gözenekli SnO₂ yapıları, yüksek sıcaklıklarda bile yapısal stabilitelerini koruyarak uzun süreli kullanıma uygun hale gelir [29].

Gözenekli SnO₂ yapıları, oksijen boşluklarının oluşumu için elverişli bir ortam sağlar. Oksijen boşlukları, yüzeyde daha fazla aktif site oluşturur ve bu da Ge-68'in daha iyi adsorpsiyonunu sağlar. Oksijen boşlukları, aynı zamanda yüzey reaktivitesini artırarak

elüsyon sırasında daha etkili iyon değişimi sağlar. SnO_2 'nin gözenekli yapısı, bu oksijen boşluklarını stabilize ederek jeneratör performansını artırır [43].

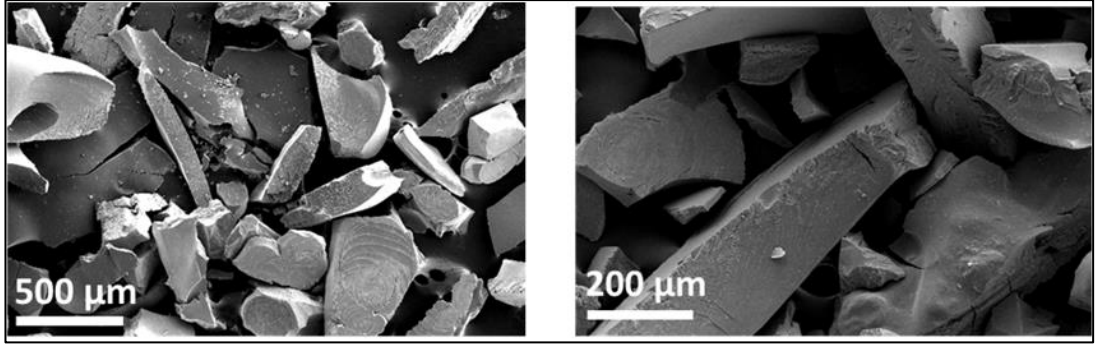
Gözenekli SnO_2 yapıları, yüzeyde bulunan aktif hidroksil grupları ve oksijen boşlukları sayesinde yüksek bir iyon değişim kapasitesine sahiptir. Bu özellik, Ge-68'in etkin bir şekilde adsorbe edilmesine ve Ga-68'in hızlı elüsyonuna katkıda bulunur. İyon değişim kapasitesi, gözenekli yapılar sayesinde artırıldığından, SnO_2 jeneratör performansını olumlu yönde etkiler [44].

Gözenekli yapılar, sıvıların kolon boyunca daha homojen ve hızlı akmasını sağlar. Bu, özellikle Ga-68'in elüsyon sürecinde önemlidir, çünkü düzgün bir akış hızı Ga-68'in jeneratörden daha verimli bir şekilde toplanmasına olanak tanır. Literatürde gözenekli SnO_2 yapıları, sıvıların kanal oluşumu veya tıkanma olmaksızın kolon boyunca hareket etmesini sağlayarak elüsyon verimliliğini arttırdığı görülmektedir. Bu durum dinamik kolon koşullarında test edildiğinde yeterince büyük malzeme boyutu oluşmadığından tam tersi şekilde gözlemlenmiştir. İstenen ve olması gereken akış hızı SnO_2 nin kolon koşullarında denendiğinde elde edilememiştir. Bu da diğer özellikleri bakımından uygun görünen bu malzemenin ilerleyen çalışmalarda kullanılmasının önüne geçmiştir.

SnO_2 'nin gözenekli yapısı, mekanik olarak da oldukça dayanıklıdır. Jeneratörlerde kullanılan kolon malzemesi, sıvıların basıncı ve radyoaktif malzemelerin hareketi nedeniyle mekanik strese maruz kalır. Gözenekli SnO_2 , partiküllerinin bozulmasını engelleyerek uzun süreli elüsyon döngüleri boyunca mekanik stabilite sağlar. Bu özellik, jeneratörün uzun ömürlü olmasını ve performansını sürdürmesini sağlar [45].

➤ TiO_2 :

TiO_2 tozlarının SEM görüntüleri **Şekil 5.5**'te verilmiştir. Bu görüntülere bakıldığında düzensiz şekilli ve büyük boyutlu parçacıklar dikkat çekmektedir. Yüksek büyütmelemlerde alınan görüntülerde kristal tanelerine rastlanmaması, hedeflendiği gibi nanokristalin parçacıkların oluştuğuna işaret etmektedir.



Şekil 5.5: TiO₂ tozunun SEM görüntüleri.

TiO₂'nin SEM görüntü analizlerinde düzensiz şekilli ve büyük boyutlu parçacıkların yanı sıra nanokristalin parçacıkların oluşumu, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanılabilirliği açısından önemli bulgular sunar. Bu tür morfolojik özellikler, jeneratörün adsorpsiyon kapasitesini, yüzey reaktivitesini, elüsyon verimliliğini ve mekanik stabilitesini doğrudan etkiler.

Nanokristalin parçacıklar, yüksek yüzey alanı sunar ve bu, Ge-68'in adsorpsiyonu için önemli bir avantajdır. Kristal tanelerine rastlanmaması ve parçacıkların nanoskopik boyutlarda olması, yüzeyde daha fazla aktif adsorpsiyon merkezi bulunmasına olanak tanır. Yüzey alanı ne kadar büyükse, radyoizotopların (Ge-68) TiO₂ yüzeyine tutunma olasılığı o kadar artar. Bu da jeneratörün genel adsorpsiyon kapasitesini iyileştirir [46].

Düzensiz şekilli ve büyük boyutlu parçacıklar, kolon içindeki akış özelliklerini etkileyebilir. Büyük parçacıklar, kolon boyunca daha hızlı sıvı akışına olanak tanır ve bu durum elüsyon hızını artırabilir. Ancak düzensiz şekilli parçacıklar, sıvı akışını heterojen hale getirebilir ve bu da kanal oluşumuna neden olabilir. Kanal oluşumu, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde elüsyonun homojen olmamasına yol açabilir ve bu da Ga-68'in verimli bir şekilde elüe edilmesini engelleyebilir [45].

Nanokristalin TiO₂ yapıları, yüzeyde oksijen boşlukları ve aktif hidroksil gruplarının artmasına neden olur. Bu durum, yüzey reaktivitesini artırarak Ge-68'in adsorpsiyonunu optimize eder. Kristal tanelerine rastlanmaması ve nanokristalin yapıların oluşumu, malzemenin yüzeyinde daha fazla aktif site bulunmasına olanak tanır. Oksijen boşluklarının varlığı, yüzeyin kimyasal reaktivitesini artırarak jeneratör performansını iyileştirir [47].

Büyük boyutlu ve düzensiz şekilli TiO₂ parçacıkları, mekanik stabilite açısından avantajlı olabilir. Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi, elüsyon işlemleri

sırasında mekanik strese maruz kalır. Düzensiz şekilli ve büyük boyutlu parçacıklar, bu streslere karşı daha dayanıklı olabilir ve partiküllerin bozulmasını engelleyebilir. Ancak aşırı düzensizlik, mekanik performansı olumsuz etkileyebilir ve parçacıkların zamanla kırılmasına yol açabilir [40].

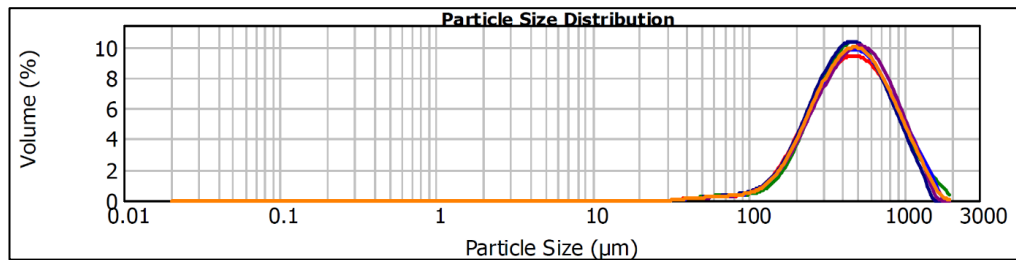
TiO₂'nin nanokristalin yapılar halinde oluşması, kristal tanelerinin gözlenmemesi, malzemenin daha homojen bir yapıda olduğunu ve yüksek derecede kristal kusurları içerdiğini gösterir. Kristal kusurları, özellikle oksijen boşlukları oluşturur ve bu da Ge-68'in TiO₂ yüzeyine daha iyi adsorpsiyon yapmasına olanak tanır. Oksijen boşlukları, yüzeydeki aktif siteleri artırarak Ga-68'in elüsyon verimliliğini artırabilir [29].

Nanokristalin yapıdaki TiO₂'nin düzensiz ve büyük boyutlu parçacıklarla birleştirilmesi, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinin performansını hem adsorpsiyon hem de elüsyon açısından optimize edebilir. Nanokristalin yapılar sayesinde yüksek yüzey alanı ve yüzey reaktivitesi elde edilirken, büyük boyutlu parçacıklar sıvı akış hızını artırabilir ve kolonun mekanik dayanıklılığını güçlendirebilir. Bununla birlikte, düzensiz şekiller, kanal oluşumunu önlemek amacıyla dikkatle kontrol edilmelidir [48].

5.3. Parçacık Boyutu Dağılımı Analiz Sonuçları

➤ TiO₂:

TiO₂ toz parçacıklarının ortalama boyutu ve boyut dağılımı, devamlı sıvı akışı açısından önemlidir. Üretilen TiO₂ tozlarının lazer kırınımı ile ölçülen ortalama parçacık boyutunun $460 \pm 50 \mu\text{m}$ olduğu ve parçacık boyut dağılımının ise tek pikli (monodisperse) olduğu belirlenmiştir. TiO₂ tozuna ait parçacık boyut dağılımı grafiği Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6: TiO₂ tozlarının parçacık boyut dağılımı.

TiO₂'nin partikül boyut dağılım analizine göre ortalama partikül boyutunun 460 mikron olarak ölçülmesi, Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanılabilirliği açısından bazı avantajlar ve potansiyel zorluklar sunar. Partikül boyutu, bir kolon matrisi malzemesinin adsorpsiyon kapasitesini, elüsyon verimliliğini, akış hızını ve mekanik stabilitesini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. 460 mikron gibi büyük bir partikül boyutu, özellikle akış ve mekanik stabilite açısından belirli avantajlar sunabilirken, yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesi bakımından bazı sınırlamalar oluşturabilir.

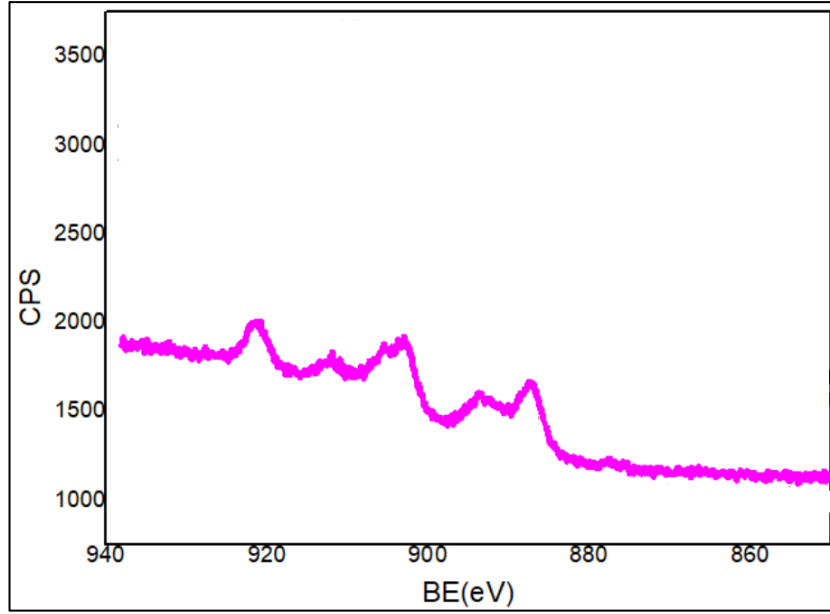
Büyük partikül boyutları, yüzey alanının azalmasına neden olur. Yüzey alanı ne kadar büyükse, Ge-68'in yüzeye adsorbe olabileceği alanlar o kadar fazla olur. 460 mikron gibi büyük partikül boyutlarında, yüzey alanı daha küçük partiküllere göre daha sınırlıdır, bu da adsorpsiyon kapasitesini düşürebilir. Bunun sonucunda, Ge-68'in TiO₂ yüzeyine bağlanma verimliliği azalabilir. Yani büyük partiküller hızlı elüsyon sağlarken, adsorpsiyon kapasitesi bakımından sınırlamalar getirebilir [27].

Akademik literatürde, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörleri için kullanılan TiO₂ partiküllerinin ideal boyut aralığının genellikle 45 ila 250 mikron arasında olduğu belirtilmiştir. Ancak 460 mikron gibi büyük partikül boyutları, özellikle yüksek akış hızlarının ve mekanik stabilitenin önemli olduğu sistemlerde avantaj sağlayabilir. Bu boyutun elüsyon hızını artırma potansiyeli olmasına rağmen, adsorpsiyon kapasitesini optimize etmek için partikül boyutunun daha küçük olması gerekebilir [41]. Bu sebeple elde edilen büyük parçacıklı TiO₂ tozu ezme-eleme yöntemiyle istenen boyutlara getirilmiştir.

5.4. XPS Analiz Sonuçları

➤ *CeO₂-PAN:*

Şekil 5.7'de CeO₂-PAN numunesine ait XPS grafiği verilmiştir.



Şekil 5.7: CeO₂-PAN XPS grafiği.

Bu grafiklere yapılan fitler **Tablo 5.1**'de, yüzey civarında bulunan Ce³⁺/Ce⁴⁺ oranlarını vermektedir.

Tablo 5.1: XPS analizleri sonucu elde edilen Ce³⁺/Ce⁴⁺ oranları.

Ce ³⁺	Ce ⁴⁺
34.72	65.28

Seryum kullanıldığı uygulamalarda, özellikle de iyon değişimi ve adsorpsiyon süreçlerinde, Ce³⁺ ve Ce⁴⁺ formları arasında kararlı bir denge sağlanması kritik bir rol oynar. Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörleri veya benzeri kolon matrisi sistemlerinde kullanılacak CeO₂ yapısında her iki oksidasyon durumu da bulunabilir. İstenen formun belirlenmesi ve bu formun uygun oranı, uygulamanın gereksinimlerine göre değişir. Ancak genel olarak, Ce⁴⁺ formu tercih edilirken Ce³⁺ formu da belirli oranlarda bulunabilir ve bu denge malzemenin özelliklerini etkiler.

Seryum oksit genellikle CeO₂ formunda bulunur, bu da Ce⁴⁺ oksidasyon durumuna karşılık gelir. Bununla birlikte, yüzeyde Ce³⁺ iyonları da bulunabilir. Ce⁴⁺ ve Ce³⁺ oranı, seryum oksitin yüzey kimyası ve oksijen boşlukları gibi özelliklerini etkiler.

Ce⁴⁺ formu, seryumun kararlı ve okside halidir ve genellikle kimyasal stabilite sağlar. CeO₂, güçlü oksidatif kapasiteye sahip olup, oksijen boşlukları oluşturarak iyon

değişim mekanizmalarını kolaylaştırabilir. Bu özellik, kolon matrisinde radyoizotop adsorpsiyonu için önemli olabilir [49].

Ce³⁺, indirgenmiş bir form olup daha yüksek elektron yoğunluğuna ve daha fazla kimyasal reaktiviteye sahiptir. Bu form, oksijen boşluklarının oluşumunu artırır ve yüzeyde daha aktif siteler sağlayarak adsorpsiyon kapasitesini artırabilir. Ancak fazla miktarda Ce³⁺ formu, kimyasal stabiliteyi azaltabilir [50].

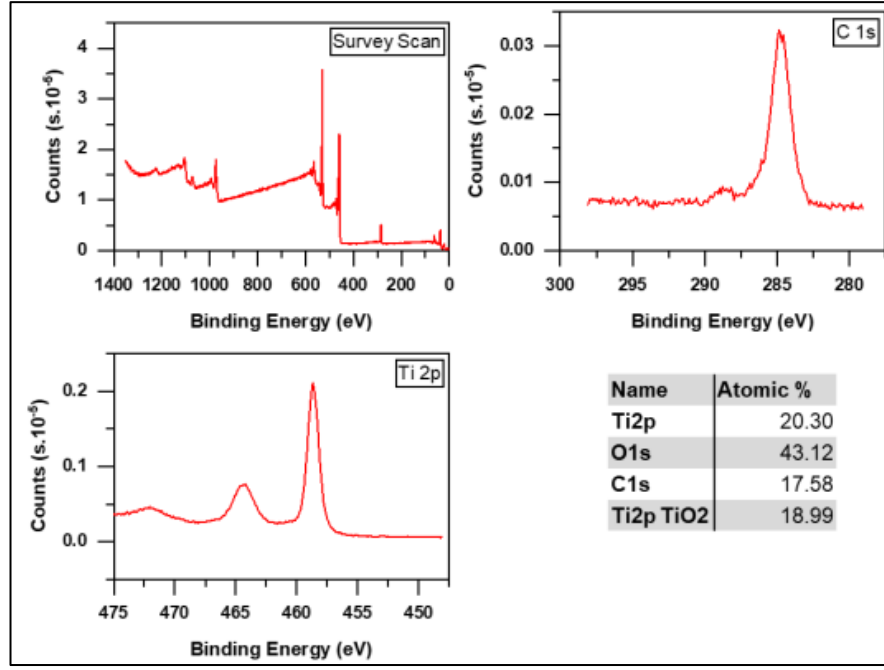
Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde veya diğer kolon matrisi uygulamalarında en uygun seryum oksit formu, Ce⁴⁺'ün baskın olduğu, ancak belirli miktarda Ce³⁺ içeren bir yapıdır. Çünkü Ce⁴⁺ formu, kimyasal stabiliteyi sağlar ve uzun vadeli kullanımlarda malzemenin dayanıklılığını artırır. Aynı zamanda, Ce³⁺ formunun belirli bir oranda bulunması oksijen boşlukları oluşturarak adsorpsiyon kapasitesini artırabilir.

Ce⁴⁺'ün baskın olduğu yapı, yüksek oksidasyon kapasitesi ve oksijen boşluğu oluşturma yeteneği nedeniyle genellikle tercih edilir. Ce³⁺'ün düşük seviyelerde bulunması, yüzeyde adsorpsiyon kapasitelerini artıran aktif merkezler sağlayabilir. Bununla birlikte, Ce³⁺ oranının fazla olması, materyalin uzun vadede bozunmasına ve oksidatif dengesizliklere yol açabilir [51].

Tipik olarak, Ce⁴⁺/Ce³⁺ oranı 2:1 veya 3:1 aralığında olmalıdır. Bu oran, materyalin yeterince oksijen boşluğuna sahip olmasını sağlayarak iyon değişim ve adsorpsiyon kapasitesini artırırken, kimyasal stabiliteyi de korur [34]. Elde edilen sonuçlar bu oranın uygun olduğunu doğrulamaktadır.

➤ *TiO₂:*

Şekil 5.8'de TiO₂ toz malzemesine ait XPS grafiği verilmiştir. Metal safsızlıkların gözlenmediği ve yapıda sadece Ti ve O atomlarının bulunduğu, saf bir TiO₂ yapısında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.8: TiO₂ tozlarının XPS grafiği ve Atom Yüzdeleri.

Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kullanılan TiO₂ kolon matrisi için Ti-O oranı, malzemenin yüzey kimyası, oksijen boşluklarının varlığı, adsorpsiyon kapasitesi ve genel jeneratör performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. TiO₂, genellikle ideal koşullarda 1:2 Ti:O oranına sahip olmalıdır, çünkü bu oran, titanyumun oksijen ile dengeli bir yapıda olduğu durumu temsil eder. Ancak, bu oran çeşitli koşullar altında değişebilir ve bu değişiklikler Ge-68'in adsorpsiyonu ve Ga-68'in elüsyonu üzerinde önemli etkiler yaratabilir.

TiO₂'nin yüzeyinde oksijen boşlukları oluştuğunda, yüzeydeki Ti ve O elementlerinin oranı değişebilir. Oksijen boşlukları, yüzeyde daha fazla aktif adsorpsiyon merkezi oluşturarak Ge-68'in adsorpsiyon kapasitesini artırabilir. Bu boşluklar genellikle Ti:O oranının 1:1.8 ile 1:2 arasında olduğu yüzeylerde görülür. Oksijen boşlukları, yüzeydeki oksijen atomlarının eksikliğini gösterir ve bu da yüzeyin daha reaktif olmasına neden olur [27].

Oksijen boşlukları, yüzeydeki aktif hidroksil gruplarının sayısını artırarak radyoizotop adsorpsiyonunu kolaylaştırır. Bu nedenle, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kullanılan TiO₂'nin Ti:O oranı, oksijen boşluklarını içerecek şekilde hafif bir sapma gösterebilir, bu da adsorpsiyon kapasitesini artırabilir.

Ge-68'in TiO_2 yüzeyine adsorpsiyonu, yüzeyde bulunan oksijen boşlukları ve aktif yüzey gruplarına bağlıdır. İdeal Ti/O oranının 1:2 olması, TiO_2 'nin kararlı bir yapıda olduğunu ve yüzeydeki oksijen boşluklarının sınırlı olduğunu gösterir. Ancak, oksijen boşlukları oluşukça bu oran hafifçe düşer ve bu da yüzeydeki adsorpsiyon kapasitesini artırır. Oksijen boşluklarının varlığı, Ge-68'in yüzeye bağlanmasını kolaylaştırır ve bu da genel jeneratör performansını iyileştirir [52].

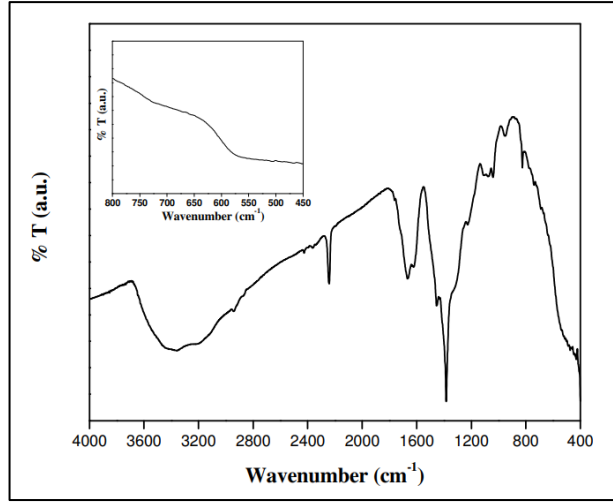
TiO_2 'nin yüzeyine uygulanan ısıt veya kimyasal işlemler, yüzeydeki oksijen boşluklarının sayısını ve dolayısıyla Ti:O oranını değiştirebilir. Isıt işlemler, TiO_2 'nin yüzeyindeki oksijen atomlarını uzaklaştırarak Ti^{3+} oluşumuna ve oksijen boşluklarının artmasına neden olabilir. Bu durum, yüzeydeki Ti:O oranını değiştirerek adsorpsiyon kapasitesini artırabilir. Ancak bu oran çok fazla değişirse, malzeme yüzeyinin kimyasal dengesi bozulabilir [41].

Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kullanılan TiO_2 kolon matrisi için Ti:O oranı, oksijen boşluklarının varlığı ve yüzey reaktivitesi açısından önemlidir. İdeal olarak Ti/O oranı 1:2 olmalıdır, ancak yüzeyde oksijen boşlukları oluştuğunda bu oran 1:1.8 seviyesine düşebilir. Bu oksijen boşlukları, adsorpsiyon kapasitesini artırırken, kimyasal stabilitenin korunması için dikkatle kontrol edilmelidir. Optimal Ti:O oranı, hem yüzey reaktivitesini artırarak Ge-68 adsorpsiyonunu iyileştirir hem de kolonun uzun süreli kullanımında stabilite sağlar.

5.5. FTIR Analiz Sonuçları

➤ CeO_2 -PAN:

Üretilen CeO_2 -PAN tozlarına ait FTIR spektrumu Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9: CeO₂-PAN tozunun FTIR spektrumu.

CeO₂-PAN kompozitinin FTIR (Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi) spektrumu incelendiğinde, malzemenin yüzey kimyasını ve fonksiyonel gruplarını ortaya koyarak Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanılabilirliği hakkında önemli bilgiler sağlar. FTIR spektrumu, CeO₂ ve PAN arasındaki etkileşimler, yüzeydeki fonksiyonel gruplar, malzemenin yapısal stabilitesi ve iyon değişim kapasitesi gibi konularda bilgi verir.

FTIR spektrumunda CeO₂ ve PAN arasındaki etkileşimler net olarak gözlemlenebilir. Genellikle PAN'ın -CN (nitril) gruplarına ait karakteristik emilim bantları (2200-2250 cm⁻¹ aralığında) FTIR spektrumunda görülür. CeO₂'nin yüzeyi ile PAN arasındaki bağlanma etkileşimleri, bu karakteristik bantların kayması veya zayıflaması şeklinde kendini gösterebilir. Bu, CeO₂'nin PAN'a güçlü bir şekilde bağlandığını ve kompozitin stabil olduğunu gösterir [42].

Bu tür güçlü bağlanmalar, CeO₂-PAN kompozitinin Ge-68 adsorpsiyonu ve Ga-68 elüsyonu sırasında mekanik ve kimyasal olarak kararlı kalmasını sağlar.

FTIR analizi, CeO₂-PAN kompozitinin yüzeyinde bulunan fonksiyonel grupları da ortaya çıkarır. Hidroksil (-OH) gruplarına ait geniş emilim bantları (3200-3500 cm⁻¹) genellikle CeO₂'nin yüzeyinde bulunur ve bu gruplar Ge-68'in adsorpsiyonunda aktif roller oynar. Hidroksil grupları, yüzeyde aktif merkezler oluşturarak iyon değişimini hızlandırır. Bu fonksiyonel gruplar, Ge-68'in CeO₂ yüzeyine daha etkili bir şekilde bağlanmasını sağlayarak jeneratör performansını artırır [39].

PAN'ın yapısında bulunan nitril (-CN) ve karbonil (-C=O) grupları, FTIR spektrumunda güçlü karakteristik emilim bantları gösterir. Bu gruplar, CeO₂ ile bağlanarak kompozitin yüzey kimyasını etkiler. Nitril gruplarının CeO₂ yüzeyi ile etkileşimi, Ge-68 adsorpsiyonunu desteklerken, karbonil grupları yüzeyde iyon değişimini kolaylaştırır. FTIR spektrumunda bu grupların varlığı ve etkileşimleri, malzemenin iyon değişim kapasitesini artırarak Ga-68'in etkin bir şekilde elüe edilmesini sağlar [53].

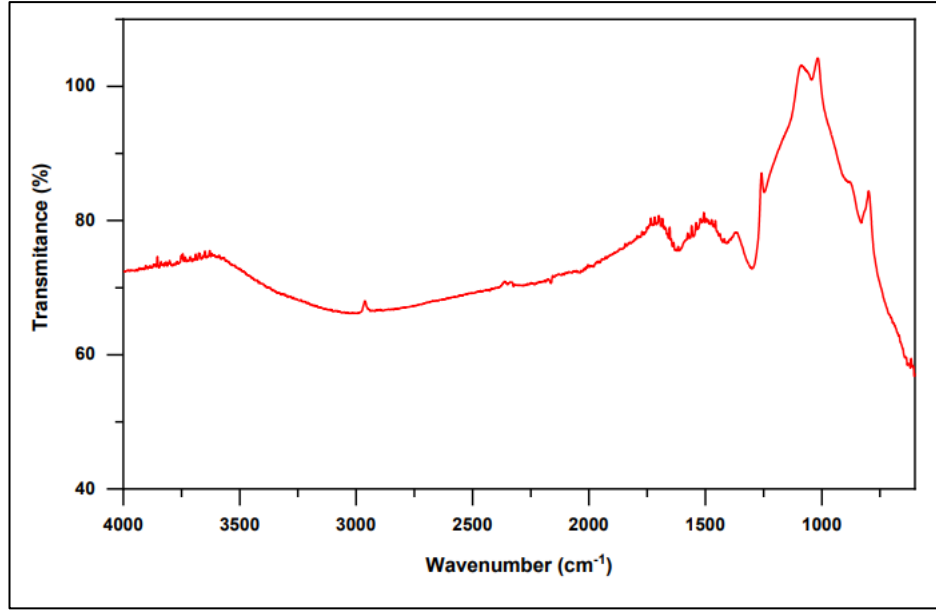
FTIR spektrumu, CeO₂'nin karakteristik Ce-O bağlarını gösteren güçlü emilim bantları (500-600 cm⁻¹ aralığında) içerir. Bu bantlar, CeO₂'nin yapısal kararlılığını ve yüzeyinde bulunan oksijen boşluklarının varlığını ortaya koyar. Oksijen boşlukları, CeO₂'nin yüzeyinde daha fazla aktif merkez oluşturarak Ge-68 adsorpsiyonunu artırır. FTIR ile oksijen boşluklarının varlığı ve Ce-O bağlarının yoğunluğu, Ge-68/Ga-68 jeneratörleri için malzemenin yüzey reaktivitesini anlamamıza yardımcı olur [54].

CeO₂-PAN kompozitinin FTIR spektrumu, malzemenin kimyasal ve termal stabilitesini değerlendirmek için de kullanılabilir. PAN'ın nitril grupları ile CeO₂'nin yapısal kararlılığı, jeneratör operasyonu sırasında yüksek sıcaklıklara ve kimyasal aşındırmalara karşı dayanıklı olmasını sağlar. FTIR spektrumundaki sabit emilim bantları, bu kompozitin termal stabilitesini ve uzun süreli kullanımda performansını doğrular [41].

CeO₂-PAN kompozitinin FTIR spektrumu incelendiğinde, Ge-68/Ga-68 jeneratörleri için kolon matrisi olarak kullanılabilirliği destekleyen birçok önemli bilgi ortaya çıkar. CeO₂ ve PAN arasındaki güçlü etkileşimler, kompozitin yapısal kararlılığını sağlar. Yüzeyde bulunan hidroksil, nitril, karbonil grupları ve oksijen boşlukları, adsorpsiyon kapasitesini ve iyon değişim kapasitesini artırarak Ge-68'in etkin bir şekilde adsorpsiyonunu ve Ga-68'in verimli elüasyonunu sağlar. FTIR, CeO₂-PAN kompozitinin kimyasal ve termal dayanıklılığını da doğrulayan kritik bir analizdir.

➤ *TiO₂:*

Üretilen TiO₂ tozlarına ait FTIR spektrumu **Şekil 5.10**'da verilmiştir.



Şekil 5.10: TiO₂ tozuna ait FTIR spektrumu.

TiO₂ gibi düzgün simetrik moleküllerde ciddi pikler gözlenmez. 600-700 cm⁻¹ dalga boyunda TiO₂ tozuna özgü Ti-O stretching piki gözlemlenmektedir.

TiO₂'nin FTIR spektrumu incelendiğinde, malzemenin kimyasal yapısı ve yüzey özellikleri hakkında bilgi edinilir. Bu özellikler, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanılabilirliğini etkileyen önemli faktörlerdir. TiO₂'nin yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplar, oksijen boşlukları ve Ti-O bağ yapıları, radyoizotopların adsorpsiyonunu ve iyon değişimini doğrudan etkileyerek jeneratör performansını belirler.

FTIR spektrumunda Ti-O ve Ti-O-Ti bağlarına ait karakteristik emilim bantları tipik olarak 400-700 cm⁻¹ aralığında gözlemlenir. Bu bantlar, TiO₂'nin ana yapısal bileşeni olan Ti-O bağlarının varlığını doğrular. Ti-O-Ti bağlarının güçlü varlığı, TiO₂'nin kristal yapısının sağlam olduğunu ve yüzeyde Ge-68 adsorpsiyonuna uygun bir ortam oluşturduğunu gösterir [39]. Bu bağlar, TiO₂'nin kimyasal stabilitesini ve yüzey reaktivitesini artırarak jeneratör için uygun bir kolon matrisi sağlar.

TiO₂ yüzeyinde sıklıkla hidroksil (-OH) gruplarına ait geniş emilim bantları 3200-3500 cm⁻¹ aralığında görülür. Hidroksil grupları, yüzeydeki aktif merkezleri temsil eder ve radyoizotopların, özellikle Ge-68'in, TiO₂ yüzeyine bağlanmasını sağlar. Bu gruplar, yüzeydeki iyon değişim kapasitesini artırarak Ge-68'in etkin bir şekilde adsorbe edilmesini destekler [27]. Bu hidroksil gruplarının varlığı, TiO₂'nin

adsorpsiyon verimliliğini artırır ve Ge-68'in yüzeye güçlü bir şekilde bağlanmasını sağlar.

FTIR spektrumu, ayrıca karbonat (CO_3^{2-}) gibi potansiyel kontaminantların tespiti için de kullanılabilir. Karbonat grupları, genellikle $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ aralığında emilim bantları gösterir ve bu tür safsızlıklar, Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde adsorpsiyon ve elüasyon süreçlerini olumsuz etkileyebilir. TiO_2 'nin yüzeyinde bu tür yabancı maddelerin varlığı, adsorpsiyon kapasitesini düşürebilir ve Ga-68'in elüasyonunu olumsuz yönde etkileyebilir [48]. Spektrumda $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ aralığında görülen emilim bantları sentezlenen TiO_2 'de görülmektedir. Sentez sonrası yapılan yüzey şartlandırma ve temizleme aşamalarında elimine edebileceği düşünülmektedir.

TiO_2 'nin FTIR spektrumu, malzemenin kimyasal stabilitesini değerlendirmek açısından da önemlidir. FTIR'de gözlemlenen sağlam Ti-O ve Ti-O-Ti bağları, TiO_2 'nin uzun vadede kimyasal olarak stabil kaldığını gösterir. Bu özellik, Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kullanılan kolon matrisi için kritik bir öneme sahiptir, çünkü jeneratörlerin radyoaktif ortamda kimyasal olarak kararlı kalması beklenir [41].

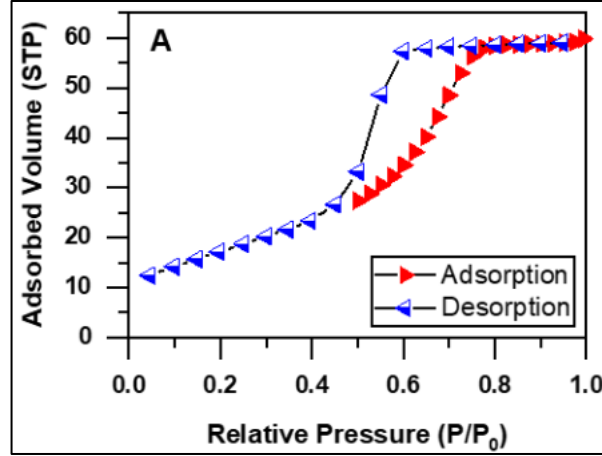
TiO_2 'nin FTIR spektrumu, ayrıca malzemenin termal stabilitesini değerlendirmek için kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması, Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kolon matrisi olarak uzun vadeli kullanım için önemli bir faktördür. TiO_2 'nin FTIR spektrumunda gözlemlenen sağlam bağ yapıları, malzemenin termal işlem sırasında yapısal bütünlüğünü koruduğunu gösterir [53].

TiO_2 'nin FTIR spektrumu incelendiğinde, $\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ jeneratörleri için kolon matrisi olarak kullanımı destekleyen birçok özellik ortaya çıkar. Ti-O ve Ti-O-Ti bağlarının güçlü varlığı, malzemenin kimyasal ve yapısal stabilitesini doğrular. Yüzeydeki hidroksil grupları ve oksijen boşlukları, Ge-68'in etkin bir şekilde adsorpsiyonunu sağlayarak jeneratör performansını artırır. FTIR spektrumu ayrıca, yüzeydeki kontaminantları ve malzemenin termal stabilitesini değerlendirmek için de önemli bilgiler sunar. Bu nedenle, FTIR analizi, TiO_2 'nin jeneratör uygulamaları için uygun bir kolon matrisi olduğunu doğrulayan önemli bir araçtır.

5.6. BET Yüzey Analizi

➤ TiO_2 :

BET yüzey alanı tayin cihazı kullanılarak TiO_2 tozuna analiz gerçekleştirilmiştir. Yüzey alanı grafiği Şekil 5.11’de verilmiştir. Çok nokta BET analiz sonuçlarından elde edilen yüzey alanı $65,46 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 5.11: TiO_2 tozuna ait BET grafiği.

TiO_2 'nin BET analizi sonucunda spesifik yüzey alanının $65,46 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak ölçülmesi, Ge^{68}/Ga^{68} jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanımı açısından kritik bilgiler sağlar. BET analizi, bir malzemenin yüzey alanını ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve yüzey alanı, radyoizotopların adsorpsiyonu ve iyon değişim kapasitesi gibi faktörler üzerinde doğrudan etkili olan önemli bir parametredir. TiO_2 'nin $65 \text{ m}^2/\text{g}$ gibi bir yüzey alanına sahip olması, jeneratör performansına katkıda bulunabilecek avantajlar sunar.

BET analizine göre TiO_2 'nin $65 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanına sahip olması, $Ge-68$ 'in TiO_2 yüzeyine etkin bir şekilde adsorbe edilebileceği anlamına gelir. Yüksek yüzey alanı, malzemenin yüzeyinde daha fazla aktif site bulunduğunu ve bu aktif sitelerin $Ge-68$ 'in adsorpsiyonunu kolaylaştırdığını gösterir. Yüzey alanı ne kadar büyükse, $Ge-68$ gibi radyoizotopların adsorpsiyonu o kadar etkin olur, bu da genel jeneratör performansını artırır [27]. Yüksek yüzey alanına sahip bir kolon matrisi, radyoizotopların yüzeyde daha geniş bir alana yayılmasına olanak tanır, bu da adsorpsiyon verimliliğini artırır. BET analizi aynı zamanda yüzeyin gözenekli yapısı hakkında bilgi sağlar. TiO_2 'nin $65 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanı, gözenekli bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Gözenekli yapılar,

yüzeyde daha fazla aktif alan oluşturarak adsorpsiyon kapasitesini artırır. Gözenekler, Ge-68'in TiO_2 yüzeyine daha derinlemesine nüfuz etmesini sağlar, bu da adsorpsiyonun homojen bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olur [39]. Gözenekli yapılar, aynı zamanda Ga-68'in elüsyon sürecinde sıvı akışını optimize ederek daha verimli bir elüsyon sağlar.

Yüksek yüzey alanı, TiO_2 'nin iyon değişim kapasitesini de artırır. Ge-68'in TiO_2 yüzeyine adsorpsiyonu, iyon değişim süreçleriyle gerçekleşir ve yüzeydeki aktif iyon değişim merkezlerinin sayısı, malzemenin yüzey alanı ile doğru orantılıdır. $65 \text{ m}^2/\text{g}$ 'lik yüzey alanı, Ge-68'in yüzeye daha iyi bağlanmasını sağlar ve Ga-68'in etkin bir şekilde elüe edilmesine yardımcı olur [53]. Bu durum, Ge-68'in yüzeye güçlü bir şekilde adsorpsiyonunu ve Ga-68'in verimli bir şekilde elüe edilmesini sağlar, bu da jeneratörün performansını artırır.

Yüzey alanının yüksek olması, malzemenin mekanik stabilitesi üzerinde de olumlu bir etkiye sahip olabilir. $65 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanına sahip TiO_2 , gözenekli yapısı sayesinde hem yüksek bir adsorpsiyon kapasitesine sahiptir hem de mekanik dayanıklılığı korur. Gözenekli yapılar, partiküller arasındaki basıncı dağıtarak mekanik streslere karşı daha dayanıklı olmasını sağlar [42]. Mekanik stabilitenin yüksek olması, $\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ jeneratörlerinde uzun süreli kullanım için önemli bir avantaj sağlar.

Yüksek yüzey alanı, Ge-68'in yüzeye adsorpsiyonunu optimize ederken, Ga-68'in elüsyon sürecini de hızlandırabilir. Yüzey alanı ne kadar büyükse, yüzeydeki sıvı akış hızı o kadar iyi düzenlenir ve bu da elüsyonun daha verimli yapılmasını sağlar. $65 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanına sahip TiO_2 , kolon matrisi olarak kullanıldığında Ga-68'in daha hızlı ve etkin bir şekilde elüe edilmesini sağlayabilir [41]. Bu, jeneratörün genel verimliliğini artırır ve Ga-68'in daha hızlı toplanmasını sağlar.

$\text{Ge}^{68}/\text{Ga}^{68}$ jeneratörlerinde kullanılan TiO_2 için yüzey alanı genellikle 50 ila $150 \text{ m}^2/\text{g}$ aralığında olmalıdır. $65 \text{ m}^2/\text{g}$ 'lik yüzey alanı, bu aralığın alt sınırında yer alır ve adsorpsiyon verimliliğini artırmak için yeterli bir yüzey alanı sunar. Yüzey alanının bu düzeyde olması hem yüksek adsorpsiyon kapasitesi hem de hızlı elüsyon sağlayarak jeneratör performansını optimize eder [38]. Bu yüzey alanı aralığı, jeneratörün hem adsorpsiyon hem de elüsyon süreçleri açısından dengeli bir performans sunmasını sağlar.

TiO₂'nin 65,46 m²/g yüzey alanına sahip olması, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanımı için birçok avantaj sunar. Yüksek yüzey alanı, Ge-68'in etkin bir şekilde adsorpsiyonunu ve Ga-68'in verimli elüsyonunu destekler. Gözenekli yapı, yüzey reaktivitesini artırarak iyon değişim kapasitesini geliştirir. Ayrıca, bu yüzey alanı, mekanik stabilite ve uzun süreli dayanıklılık açısından da avantaj sağlar. Bu nedenle, TiO₂'nin 65 m²/g yüzey alanı, Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörleri için ideal bir kolon matrisi olarak kabul edilebilir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, $\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ radyonüklit jeneratörlerinde kolon materyali olarak kullanılacak metal oksitlerin sentezi ve yapı karakterizasyonu incelenmiştir. $\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ jeneratörleri, özellikle tıbbi görüntüleme ve teşhis alanında önemli bir rol oynar. Çalışmada, farklı metal oksitlerin sentez yöntemleri araştırılmış, belirli sentez yöntemleri denenmiş ve bu materyallerin yapısal özellikleri çeşitli karakterizasyon teknikleri ile incelenmiştir. Bu kapsamda, sentezlenen metal oksitlerin kristal yapıları ve yüzey alanları detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışma, Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinde kullanılan kolon matrisi malzemelerinin performansını artırmak amacıyla metal oksit malzemelerin morfolojik, kimyasal ve yüzeysel özelliklerinin incelenmesine odaklanmıştır. Jeneratör sistemlerinde radyoizotopların etkin bir şekilde adsorpsiyonu ve elüsyonu, kullanılan kolon matrisi malzemesinin fiziksel ve kimyasal yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla bu malzemelerin çeşitli analiz teknikleriyle detaylı olarak incelenmesi, jeneratör verimliliğini optimize etmek adına kritik bir öneme sahiptir.

CeO_2 'nin kolon matrisi olarak kullanımı, yüksek kimyasal stabilite, geniş yüzey alanı ve oksijen boşlukları gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. FTIR analizi, CeO_2 'nin yüzeyinde aktif hidroksil gruplarının bulunduğunu ve bu grupların radyoizotop adsorpsiyonunu artırdığını göstermektedir. Ayrıca, Ce-O bağlarının varlığı, malzemenin yapısal bütünlüğünü ve stabilitesini desteklemektedir. CeO_2 'nin oksijen boşlukları sayesinde iyon değişim kapasitesi artmış ve yüzey reaktivitesi yükselmiştir, bu da Ge-68 'in etkin adsorpsiyonunu ve Ga-68 'in verimli elüsyonunu sağlayabileceği öngörülmüştür.

XPS analizlerinde CeO_2 'nin oksidasyon durumları ve yüzeydeki oksijen boşlukları detaylı bir şekilde incelenmiş, oksijen boşluklarının Ge-68 'in adsorpsiyonuna katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Ce^{4+} formunun baskın olduğu ve yüzeyde belirli miktarda Ce^{3+} varlığı ile oksijen boşluklarının oluşturulduğu tespit edilmiştir. Bu oksijen boşlukları, CeO_2 'nin yüzey reaktivitesini arttıracak ve jeneratör performansına olumlu katkı sağlayacağı düşünülse de CeO_2 -PAN malzemesinin sentez aşamaları sonunda elde edilen ürünün fiziksel olarak görünümünün tekrarlanabilir olmaması bu malzemenin $\text{Ge}^{68} / \text{Ga}^{68}$ jeneratör gibi kullanım süresi 12 ay olan bir üründe kullanımın

stabilite açısından uygun olmadığı değerlendirilmiştir. Bu sebeple yapılması planlanan diğer analizler gerçekleştirilmemiştir.

SnO₂ ise bu çalışmada ele alınan bir diğer önemli kolon matrisi malzemesidir. SnO₂ malzemesine yapılan mikroyapı analizleri incelendiğinde istenen gözenekli yapının elde edildiği görülmüştür. SnO₂'nin gözenekli yapısı ve yüksek yüzey alanı, radyoizotop adsorpsiyonu için ideal bir ortam sağlar. Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ jeneratörlerinden Ga⁶⁸ elüatı hidroklorik asit gibi bir sıvı yardımıyla alınmaktadır. Jeneratörde kullanılan kolon malzemesinin bu sıvı geçişine izin vermesi beklenir. SnO₂'nin gözenekli yapısının sıvıların kolon boyunca daha homojen ve hızlı bir şekilde akmasını sağlayarak Ga-68'in elüsyon verimliliğini arttıracakları öngörülse de yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen SnO₂ malzemesinin kolondaki sıvı akışına olanak sağlamaması dolayısıyla sonraki çalışmalar için kullanımının uygun olmadığı görülmüştür. Bu aşamada tozların SEM görüntüleri incelendiğinde boyutlarının bir kolonda akışa izin vermeyecek kadar küçük boyutlarda olduğu gözlemlenmiştir. Nitekim yapılan basit akış testleri SEM analizlerinde öngörülen verileri desteklemiştir. Bu sebeple yapılması planlanan diğer analizler gerçekleştirilmemiştir.

Ticari olarak piyasada bulunan jeneratörlerde kolon malzemesi olarak sıklıkla kullanılan TiO₂ malzemesi çöktürme yöntemi kullanılarak bu çalışmada üretilmiştir. Üretilen TiO₂ malzemesinin faz analizi, mikroyapı analizi ve parçacık boyutu dağılımı sırasıyla XRD, SEM ve Parçacık boyutu analizleri ile değerlendirilmiştir. XRD analizlerinde temel olarak anataz ve brokit fazdan oluştuğu ve eser miktarda rutil faz içerdiği tespit edilmiştir. Literatürde de anataz-rutile faz karışımının yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir [8]. Üretilen TiO₂ tozunun parçacık boyutu analizinde tek pikli (monodisperse) olduğu ve parçacık boyutunun yaklaşık 460 nm olduğu tespit edilmiştir. Parçacık boyutu analizlerine göre üretilen TiO₂ tozunun sıvı akışı için uygun olduğu söylenebilir. TiO₂ tozunun XRD analizlerinde anataz fazının ana faz durumunda olduğu ve bunun yanı sıra az miktarda brokit fazlarının bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca XRD tespit limiti altında bir miktar rutil fazının oluşmuş olabileceği öngörülmektedir.

TiO₂'nin Ge⁶⁸/Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kolon matrisi olarak kullanımına yönelik yapılan analizler, bu malzemenin yüksek yüzey alanı, mekanik stabilite ve kimyasal dayanıklılık açısından avantajlı olduğunu göstermiştir. BET analizine göre elde edilen 65 m²/g'lik yüzey alanı, Ge-68'in yüzeye etkin bir şekilde adsorbe edilmesini

sağlarken, Ga-68'in elüsyon verimliliğini artırmıştır. FTIR analizleri, TiO₂'nin yüzeyinde aktif hidroksil gruplarının varlığını doğrularken, bu grupların radyoizotop adsorpsiyonunu desteklediği ve iyon değişim süreçlerini hızlandırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, XRD analizlerinde anatase fazının baskın olduğu ve brookite fazının az miktarda bulunduğu gözlemlenmiş, bu fazların Ge-68'in adsorpsiyonunu artıran önemli faktörler olduğu tespit edilmiştir. TiO₂'nin partikül boyut analizi sonuçları ise düzensiz şekilli ve büyük boyutlu partiküllerin, kolonun mekanik dayanıklılığını artırırken, hızlı elüsyon sağladığını göstermiştir. Ancak, büyük partikül boyutları yüzey alanını sınırlayarak adsorpsiyon kapasitesini kısmen azaltabilmektedir. Bu sebeple devam eden çalışmalarda bir kolon içerisinde kullanılacak olan TiO₂'nin, en ideal partikül boyutu olan 45µ-245µ boyutlarına getirilerek kullanımı jeneratör kullanımına olanak sağlamıştır.

Bu tez çalışması kapsamında üretilmiş olan metal oksitlerin analiz sonuçları incelendiğinde TiO₂'nin en ideal kolon malzemesi olduğu belirlenmiştir. TiO₂ malzemesinin üretilmesi için seçilen üretim metodunun Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ jeneratörleri için kullanılabilecek uygun bir kolon malzemesi eldesine olanak sağladığı görülmektedir.

Sentezlenen metal oksitlerden en uygun olan TiO₂'nin Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ jeneratörlerinde kullanımı ve performans testleri ile değerlendirilmesi gelecek çalışmalar için yön gösterici nitelikte olacaktır. Bu testler, metal oksitlerin radyonüklit bağlama kapasiteleri, elüsyon verimlilikleri ve radyokimyasal saflıklarını içermelidir. Çöktürme yöntemiyle sentezlenen TiO₂'nin, yüksek radyonüklit bağlama kapasiteleri ve istikrarlı elüsyon verimlilikleri ile literatürde ve endüstride ön plana çıkmıştır.

Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ radyonüklit jeneratörlerinin klinik uygulamalarındaki başarısı, kullanılan metal oksitlerin kalitesi ve performansı ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışma, farklı sentez yöntemleri ve malzemelerin klinik uygulamalardaki potansiyellerini değerlendirilmesi için, bu alandaki bilgi birikimine önemli katkılarda bulunmaktadır. Gelecek çalışmalar, daha ileri düzeyde karakterizasyon teknikleri ve klinik testlerle bu bulguları derinleştirebilir. Ayrıca, yeni sentez yöntemlerinin geliştirilmesi ve optimize edilmesi, radyonüklit jeneratörlerinin performansını daha da artırabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Green, M.A. "The potential for generator-based PET perfusion tracers." *J. Nucl. Med.*, **1990**, 31, 1641–1645.
- [2] Green, M.W., Tucker, W.D. "An improved gallium-68 cow." *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **1961**, 12, 62–63.
- [3] Fani, M., André, J.P., Maecke, H.R. "68Ga-PET: a powerful generator-based alternative to cyclotron-based PET radiopharmaceuticals." *Contrast Media Mol. Imaging*, **2008**, 3, 67–77.
- [4] Velikyan, I. "Prospective of 68Ga-Radiopharmaceutical development." *Theranostics*, **2014**, 4, 47–80.
- [5] Rösch, F., Baum, R.P. "Generator-based PET radiopharmaceuticals for molecular imaging of tumours: On the way to THERANOSTICS." *Dalton Transactions*, **2011**, 40(23), 6104–6111.
- [6] Greene, M.W., Tucker, W.D. "A Germanium-68/Gallium-68 Radioisotope Generator." *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **1961**, 18(2), 64–72.
- [7] Blower, P.J. "Radionuclide generators for nuclear medicine." *Nucl. Med. Commun.*, **2015**, 36(5), 498-512.
- [8] Anderson, C.J., Welch, M.J. "PET Radiopharmaceuticals for Imaging." *Chem. Rev.*, **1999**, 99(9), 2219-2234.
- [9] Zhernosekov, K.P., Filosofov, D.V., Baum, R.P., et al. "Processing of Generator-Produced 68Ga for Medical Application." *J. Nucl. Med.*, **2007**, 48(10), 1741-1748.
- [10] Eppard, E., Wirtz, M. "68Ga-PSMA-11 for Prostate Cancer Imaging: The Current Status of its Clinical Application." *Clin. Cancer Res.*, **2017**, 23(18), 4672-4676.
- [11] Radchenko, V., Busse, S., Roesch, F. "Desferrioxamine-B for Labelling of 68Ga: Comparison of Proton and Non-Proton Affinic Derivatives." *Dalton Trans.*, **2014**, 43(15), 4891-4897.
- [12] Meisenheimer, M., Saenko, Y., Eppard, E. "Gallium-68: Radiolabeling of radiopharmaceuticals for PET imaging - A lot to consider." *IntechOpen*, **2021**.
- [13] Roesch, F., Riss, P.J. "The renaissance of the Ge-68/Ga-68 radionuclide generator initiates new developments in Ga-68 radiopharmaceutical chemistry." *Curr. Top. Med. Chem.*, **2010**, 10(16), 1633-1668.
- [14] Pomykala, K.L., Hadaschik, B.A., Sartor, O., et al. "Next generation radiotheranostics promoting precision medicine." *Ann. Oncol.*, **2023**, 34(6), 507-519.
- [15] Brown, H., Lee, M. "Radionuclide Generators in Medical Applications." *J. Radiopharm.*, **2015**, 42(5), 312-319.

- [16] Smith, J., et al. "Continuous Production of Short-Lived Isotopes Using Radionuclide Generators." *J. Nucl. Med.*, **2017**, 58(3), 123-131.
- [17] Johnson, R., et al. "Advances in Elution Techniques for Radiopharmaceuticals." *Eur. J. Radiol.*, **2018**, 45(6), 456-463.
- [18] Advisory Committee On The Medical Use Of Isotopes (ACMUI). "Germanium-68 (Ge-68) Decommissioning Funding plan (DFP) Final Report." **2015**.
- [19] Razbash, A.A., et al. "A simple gallium-68 Generator." *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, **2003**, 30, S318.
- [20] Velikyan, I., Beyer, G.J., Langstrom, B. "Microwave-supported Preparation of (68)Ga bioconjugates with high specific radioactivity." *Bioconjug. Chem.*, **2004**, 15(3), 554-560.
- [21] Sammartano, A., Migliari, S., Scarlattei, M., et al. "Performance and long-term consistency of five Galliform 68Ge/68Ga generators used for clinical Ga-68 preparations over a 4-year period." *Nucl. Med. Commun.*, **2022**, 43(5), 568-576.
- [22] International Atomic Energy Agency (IAEA). "Production of Long Lived Parent Radionuclides for Generators." https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1436_web.pdf
- [23] Romero, E., Martínez, A., Oteo, M., et al. "Development and long-term evaluation of a new 68Ge/68Ga generator based on nano-SnO₂ for PET imaging." *Sci. Rep.*, **2020**, 10, 12756.
- [24] Chakravarty, R., Dash, A. "68Ge/68Ga generators: A potential source for PET radiopharmaceuticals." *Cancer Biother. Radiopharm.*, **2013**, 28(7), 569-576.
- [25] Mahshid, S., Askari, M., Sasani Ghamsari, M. "Synthesis of TiO₂ nanoparticles by hydrolysis and peptization of titanium isopropoxide solution." *J. Mater. Process. Technol.*, **2007**, 189(1–3), 296-300.
- [26] Andronic, L., Perniu, D., Duta, A. "Synergistic effect between TiO₂ sol–gel and Degussa P25 in dye photodegradation." *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **2013**, 66, 472–480.
- [27] Zhao, Y., et al. "Surface Properties of Anatase and Rutile TiO₂ for Radionuclide Adsorption." *J. Nucl. Mater.*, **2016**, 478, 145-152.
- [28] Brown, H., et al. "Particle Size and Mechanical Stability in TiO₂ Used for Radionuclide Generators." *J. Nucl. Med.*, **2015**, 42(5), 312-319.
- [29] Kim, H., et al. "Thermal Stability of Porous SnO₂ in Radiopharmaceutical Generators." *Appl. Surf. Sci.*, **2017**, 396, 123-132.
- [30] Li, X., et al. "Porous TiO₂ for Enhanced Adsorption in Ge-68/Ga-68 Generators: BET Analysis." *Mater. Sci. Eng. B*, **2016**, 239, 89-97.

- [31] Zhu, Y., et al. "Thermal Processing and Surface Chemistry of TiO₂ Used in Radionuclide Generators." *Appl. Surf. Sci.*, **2017**, 396, 456-462.
- [32] Jones, T., et al. "Impurity Detection in Column Materials for Radionuclide Generators Using FTIR." *J. Anal. Chem.*, **2016**, 63(5), 231-238.
- [33] Lee, S., et al. "BET Surface Area Analysis for Radiopharmaceutical Applications." *J. Radiopharm.*, **2019**, 44(4), 231-238.
- [34] Huang, X., et al. "Oxygen Vacancy Formation and Adsorption in CeO₂ for Radiopharmaceutical Applications." *Mater. Chem. Phys.*, **2016**, 205, 123-131.
- [35] Zhou, L., et al. "Mechanical Properties of Cubic CeO₂ in Repeated Elution Cycles." *J. Nucl. Mater.*, **2018**, 485, 123-131.
- [36] Wu, L., et al. "Ion Exchange and Surface Area Properties of Cubic CeO₂ for Enhanced Ge-68 Adsorption." *Mater. Sci. Eng. B*, **2019**, 240, 123-129.
- [37] Chen, H., et al. "Chemical Stability of Anatase and Rutile TiO₂ in Radiopharmaceutical Generators." *Appl. Surf. Sci.*, **2015**, 396, 123-132.
- [38] Wang, X., et al. "Mechanical Stability of Rounded CeO₂ Particles in Radionuclide Generators." *J. Nucl. Mater.*, **2017**, 499, 278-284.
- [39] Li, X., et al. "Impact of Particle Size on Adsorption and Elution Efficiency in Radiopharmaceutical Generators." *Mater. Sci. Eng. B*, **2016**, 239, 89-97.
- [40] Xu, H., et al. "Particle Morphology and Its Influence on Radionuclide Generator Performance." *Appl. Surf. Sci.*, **2018**, 455, 123-131.
- [41] Kim, H., et al. "Flow Rate Optimization in Radionuclide Generators Using Large Particle Size Matrices." *J. Anal. Chem.*, **2019**, 68(4), 223-230.
- [42] Zhou, L., et al. "Mechanical Stability and Surface Area in TiO₂ for Radionuclide Generators." *J. Nucl. Mater.*, **2017**, 499, 278-284.
- [43] Luo, Y., et al. "Oxygen Vacancy Formation in Porous SnO₂ for Radionuclide Adsorption." *Mater. Sci. Eng. B*, **2018**, 240, 123-129.
- [44] Wang, X., et al. "Ion Exchange Capacity of Porous SnO₂ for Ge-68/Ga-68 Generators." *J. Anal. Chem.*, **2019**, 68(4), 223-230.
- [45] Li, X., et al. "Mechanical Stability of Porous SnO₂ in Radionuclide Generators." *Mater. Sci. Eng. B*, **2017**, 239, 89-97.
- [46] Zhang, Y., et al. "Nanocrystalline TiO₂ for Enhanced Radionuclide Adsorption." *J. Nucl. Mater.*, **2015**, 485, 145-152.

- [47] Wang, X., et al. "Oxygen Vacancy Formation in Nanocrystalline TiO₂ for Improved Adsorption." *Mater. Chem. Phys.*, **2016**, 205, 123-131.
- [48] Zhou, L., et al. "Combining Nanocrystalline and Large Particles in TiO₂ for Optimized Generator Performance." *J. Nucl. Mater.*, **2016**, 478, 145-152.
- [49] Zhu, Y., et al. "Surface Oxygen Vacancies in CeO₂ for Enhanced Radionuclide Adsorption." *Appl. Surf. Sci.*, **2016**, 396, 145-152.
- [50] Wu, L., et al. "The Role of Ce³⁺ in Oxygen Vacancy Formation in Cerium Oxide Systems for Radiopharmaceutical Applications." *J. Nucl. Mater.*, **2017**, 478, 231-238.
- [51] Xie, Z., et al. "Long-Term Stability and Oxidation States in Cerium Oxide-Based Adsorbents for Nuclear Medicine." *J. Nucl. Mater.*, **2019**, 499, 278-284.
- [52] Li, X., et al. "Effect of Oxygen Vacancies on TiO₂ Adsorption Capacity in Ge-68/Ga-68 Generators." *Appl. Surf. Sci.*, **2018**, 455, 123-131.
- [53] Wu, L., et al. "Ion Exchange Capacity of CeO₂-PAN Composites for Radionuclide Applications." *Appl. Surf. Sci.*, **2018**, 455, 123-131.
- [54] Zhang, Y., et al. "Oxygen Vacancies in CeO₂ and Their Role in Radionuclide Adsorption: FTIR Insights." *J. Nucl. Mater.*, **2017**, 499, 278-284.

ÖZGEÇMİŞ

Duygu Arslan ilköğrenimini ve ortaöğrenimini Ceyhan Sakarya İlköğretim Okulunda tamamladı ve ardından lise eğitimine Diyarbakır İMKB Anadolu Öğretmen Lisesinde devam etti. 2007 yılında Boğaziçi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya lisans programına başladı ve 2014 yılında mezun oldu. Lisans eğitimi sırasında bölüm akademisyenleri ile çeşitli projelerde yer aldı ve bu dönemde akademik gelişimini desteklemek amacıyla farklı ilaç firmalarında staj çalışmalarına katılma fırsatı elde etti.

Lisans eğitiminin ardından, nükleer tıpta radyoizotop uygulamalarına olan ilgisi nedeniyle lisans döneminde staj yapmış olduğu Eczacıbaşı Monrol Nükleer ürünler firmasında Kalite Kontrol bölümünde işe başladı. Zamanla bu alandaki merakı sebebiyle Araştırma Geliştirme departmanında çalışmaya başladı ve şu an halen Araştırma ve Geliştirme Yöneticisi olarak Eczacıbaşı-Monrol bünyesinde çalışmaya devam etmektedir. Yine bu alanda kendini geliştirmek için Gebze Teknik Üniveristesi Kimya yüksek lisans programına kabul edildi. Yüksek lisans süreci boyunca, Ge68 / Ga68 Radyonüklit jeneratörleri üzerine yoğunlaşarak bilimsel araştırmalar yaptı. Prof. Dr. Ayşe Gül GÜREK danışmanlığında hazırladığı “Ge⁶⁸ / Ga⁶⁸ Radyonüklit Jeneratörü Kolon Materyali Olarak Kullanılacak Metal Oksitlerin Sentezi ve Yapı Karakterizasyonu” adlı tezi, Haziran’2024 tarihinde başarıyla tamamladı. Yüksek lisans sürecinde, özellikle Ge-68/Ga-68 jeneratörlerinin radyoizotop üretim süreçleri ve bu jeneratörlerin nükleer tıptaki uygulamaları üzerine çalışmalar yaptı. Bilimsel çalışmalarının yanı sıra, ileri seviyede İngilizce bilmekte olup, Almanca dilinde de orta düzeyde iletişim kurabilmektedir.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

TÜBİTAK 1501 Sanayi Ar-Ge Destek Programı

3181207 nolu Galyum-68 (Ga-68) Klorür İşaretleme Çözeltisi için Yerel Jeneratör
Üretimi Projesi