

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**U^{233} VE Au^{197} ELEMENTLERİNİN 500-800 MEV ENERJİLİ
PROTONLARLA SPALLASYON REAKSİYONLARINDA OLUŞAN
İZOTOPLARIN ÜRETİM TESİR KESİTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA SOLMAZ

FİZİK ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. İskender DEMİRKOL**

BİNGÖL-2025

**U²³³ VE Au¹⁹⁷ ELEMENTLERİNİN 500-800 MeV ENERJİLİ PROTONLARLA
SPALLASYON REAKSİYONLARINDA OLUŞAN İZOTOPLARIN ÜRETİM
TESİR KESİTLERİ**

Prof. Dr. İskender DEMİRKOL danışmanlığında, Mustafa SOLMAZ tarafından hazırlanan bu çalışma 04/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kani ARICI *İmza* :

Üye : Prof. Dr. İskender DEMİRKOL *İmza* :

Üye : Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ *İmza* :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli katkı ve rehberliğinden dolayı danışmanım Prof. Dr. İskender DEMİRKOL hocama sonsuz teşekkürlerimi iletmek isterim. Zorlu şartlar altında bile yardımlarını ve desteğini esirgemeyen hocama özellikle minnettarım. Ayrıca, seminer dönemi boyunca desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ'e katkıları için teşekkür ederim.

Bu tezi rahmetli babam ve ablama ithafen yazdığımı belirtmek isterim. Onların anıları, bu çalışmanın ilham kaynağı olmuştur.

Bu çalışmanın her aşamasında yanımda olan ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili eşime, aileme ve arkadaşlarıma saygılarımı sunarım ve teşekkürlerimi borç bilirim.

Mustafa SOLMAZ

Bingöl 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM	8
3.1. Hızlandırıcı Kaynaklı Sistem (ADS)	8
3.1.1. Hızlandırıcıların Tarihi Altyapısı	9
3.1.2. Hızlandırıcıların Gelişimi.....	10
3.1.3. Türkiye’deki Hızlandırıcılar ve Gelişimi	11
3.1.4. Hızlandırıcıları Avantajlı Hale Getiren Faktörler	13
3.2. Hızlandırıcılar	14
3.2.1. Elektrostatik Hızlandırıcılar, Tandem Van de Graff.....	14
3.2.2. Lineer Hızlandırıcılar (Linac)	15
3.2.3. Siklotronlar (Cyclotron)	15
3.2.4. Sinkrotronlar (Synchrotron)	16
3.3. Spallasyon (Parçalanma)	16
3.3.1. Spallasyon (Spallation) Reaksiyonu	17

3.3.2. Spallasyon (Spallation) Hedef.....	18
3.3.3. Spallasyon Nötron Hedefi	19
3.4. Yöntem.....	20
3.4.1. Nükleer Modeller	21
3.4.1.1. Nükleer Reaksiyonlardaki Denge-Öncesi Modellerin Özellikleri.	22
3.4.1.2. Cascade Exciton Model.....	23
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	24
4.1. Hesaplama Yöntemi	24
4.1.1. CEM03.1 Programı: Cascade-Excitation Modeli	24
4.1.2. NEA Fransa (Nuclear Energy Agency).....	25
4.2. Reaksiyonlar.....	26
4.2.1. $p + U^{233}$ Nükleer Reaksiyonu	26
4.2.2. $p + Au^{197}$ Nükleer Reaksiyonu.....	34
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Kütle numarası
ADS	: Hızlandırıcı Kaynaklı Sistem
Au	: Altın
CEM	: Cascade Exciton Model
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (European Organization for Nuclear Research)
E	: Enerji
GeV	: Gigaelektron volt
IAEA	: International Atomic Energy Agency
THM	: Türk Hızlandırıcı Merkezi
INC	: Intra-nuclear cascade
KeV	: Kiloelektron volt
mb	: Milibarn
MeV	: Megaelektron volt
n	: Nötron
NNDC	: Nuclear National Data Center
p	: Proton
PET	: Positron Emission Tomography
PIXE	: Particle Induced X-ray Emission
RBS	: Rutherford Backscattering Spectrometry
RNAA	: Radiochemical Neutron Activation Analysis
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
WE	: Weisskopf-Ewing
Z	: Atomik sayısı
σ	: Tesir Kesiti

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	(ADS) Hızlandırıcı Kaynaklı Sistem Reaktörün Yapısı.....	9
Şekil 3.2.	1 GeV Enerjili Bir Protonun Bir Çekirdekle Etkileşimi.....	16
Şekil 3.3.	U^{233} İzotopunun Elde Ediliş Süreci	18
Şekil 3.4.	Reaksiyon Mekanizması Şekli	19
Şekil 4.1.	500-800 MeV Enerjili Protonlar İle U^{233} Hedef Elementin Spallasyon Sonucu Oluşan Atık Elementlerin Ve İzotoplarının (Z) Yüke Bağlı Oluşum Tesir Kesitleri	32
Şekil 4.2.	Au^{197} Hedef Elementin 500 MeV Enerjili Protonlar İle Spallasyonu Sonucunda Oluşan ^{37}Rb İzotoplarının Oluşum Tesir Kesitlerinin CEM03.1 Ve EXFOR Deneysel Veri Kıyaslama Grafiği	37
Şekil 4.3.	Au^{197} Hedef Elementin 500 MeV Enerjili Protonlar İle Spallasyonu Sonucunda Oluşan ^{47}Ag İzotoplarının Oluşum Tesir Kesitlerinin CEM03.1 Ve EXFOR Deneysel Veri Karşılaştırma Grafiği.....	38
Şekil 4.4.	Au^{197} Hedef Elementin 600 MeV Enerjili Protonlar İle Spallasyonu Sonucunda Oluşan ^{36}Kr İzotoplarının Oluşum Tesir Kesitlerinin CEM03.1 Ve EXFOR Deneysel Veri Karşılaştırma Grafiği.....	40
Şekil 4.5.	Au^{197} Hedef Elementin 800 MeV Enerjili Protonlar ile Spallasyonu Sonucunda Oluşan (Z) Yüke Bağlı İzotoplarının Oluşum Tesir Kesitlerinin CEM03.1 Ve EXFOR Deneysel Veri Karşılaştırma Grafikleri	51

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 4.1.	500-800 MeV Enerjili protonlar ile U^{233} hedef elementin spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri.....	27
Tablo 4.2.	500 MeV Enerjili protonlar ile $79 Au^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu.....	36
Tablo 4.3	600 MeV Enerjili protonlar ile Au^{197} hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu.....	39
Tablo 4.4.	800 MeV Enerjili protonlar ile Au^{197} hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu.....	41

U²³³ VE Au¹⁹⁷ ELEMENTLERİNİN 500-800 MEV ENERJİLİ PROTONLARLA SPALLASYON REAKSİYONLARINDA OLUŞAN İZOTOPLARIN ÜRETİM TESİR KESİTLERİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, hedef olarak seçilen U²³³ ve Au¹⁹⁷ elementlerinin nükleer reaksiyon (Spallasyon) süreçlerindeki izotop oluşumları incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı enerji seviyelerinde (500 MeV ve 800 MeV) protonlarla yapılan spallasyon reaksiyonları sonucunda oluşan izotopların oluşum ihtimallerini elde etmek ve bulunan sonuçlar ile literatürden alınan deneysel sonuçları karşılaştırarak bir değerlendirme yapmaktır. Bu amaçla, CEM03.1 programı kullanılarak elde edilen teorik sonuçlar, NEA-(EXFOR) veri tabanındaki Mevcut deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Araştırma neticesinde, yüksek enerjili proton bombardımanı ile elde edilen izotop oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Uzun yarı ömürlü izotopların üretim tesir kesitleri, hedefin uzun vadeli radyoaktif zehirlenme seviyesini öngörmemizi sağlar. Bunun yanı sıra, çalışma nükleer atık yönetimi ve güvenliği konularında da önemli bulgular sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için yol gösterici öneriler içermektedir. Yüksek enerjili nükleer reaksiyon süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına yönelik olarak sunulan bu çalışma, nükleer teknoloji ve enerji üretimi alanlarında daha verimli ve güvenli çözümler geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Uranyum-233, Altın-197, Nükleer enerji, Spallasyon, CEM03.1 programı, Enerji Verimliliği, Nükleer Atık Yönetimi, İzotop Üretimi.

PRODUCTION CROSS-SECTIONS OF ISOTOPES FORMED IN SPALLATION REACTIONS OF U^{233} AND Au^{197} ELEMENTS WITH PROTONS AT 500-800 MEV ENERGY LEVELS

ABSTRACT

In this thesis, the isotopic formations in the nuclear reaction (spallation) processes of the selected target elements U^{233} and Au^{197} were examined. The main aim of the study is to obtain the probabilities of isotopic formations resulting from spallation reactions with protons at different energy levels (500 MeV and 800 MeV) and to evaluate the findings by comparing them with experimental results taken from the literature. For this purpose, the theoretical results obtained using the CEM03.1 program were compared with the available experimental data in the NEA- (EXFOR) database. As a result of the research, it was observed that the isotope formation cross-sections obtained with high-energy proton bombardment had higher values. The production cross-sections of long-lived isotopes allow us to predict the long-term radioactive poisoning level of the target. In addition, the study provides significant findings in the fields of nuclear waste management and safety, offering guiding recommendations for future research. This study, presented to better understand high-energy nuclear reaction processes, aims to contribute to the development of more efficient and safer solutions in the fields of nuclear technology and energy production.

Keywords: Uranium-233, Gold-197, Nuclear energy, Spallation, CEM03.1 program, Energy efficiency, Nuclear waste management, Isotope production.

1. GİRİŞ

Enerji tüketiminin hızla artması, Mevcut enerji kaynaklarının azalmasına ve nükleer tesislerde kullanılan reaktörlerin çevreye büyük miktarda radyoaktif atık oluşturmaya yol açıyor. Bu sorunlarla başa çıkmak için dünya ülkeleri, enerji üretimi ve atıkların yönetimi konusunda ciddi çalışmalar yürütmektedirler. Yeni teknolojiler ve sürdürülebilir enerji kaynakları bulmak, bu mücadelenin merkezinde yer alıyor. (Demirkol, 2005). Bu sebeplerle, teknolojinin gelişmesi ve nüfus artışı nedeniyle enerji tüketimi sürekli artıyor ve enerji ihtiyacı da buna paralel olarak her geçen gün artıyor. Klasik enerji kaynaklarının yanı sıra en çok üzerinde durulan yeni enerji kaynağı nükleer enerjidir (Tokgöz, Kemah ve Akkaya, 2014).

Hızlandırıcı kaynaklı sistem (ADS) enerji yükseltici sisteminin tasarımı, spallasyon hedefinde ortaya çıkan atıkların üretim tesir kesitlerinin kesin bir şekilde bilinmesini gerektirir. Uzun yarı ömürlü izotopların üretim tesir kesitleri, hedefin uzun vadeli radyoaktif zehirlenme seviyesini öngörmemizi sağlar. $Pb (1 \text{ GeV}) + p$ reaksiyonu, nötronca zengin izotoplar üretmek için projekte yakın ağır elementlerin tercih edilmesinde ideal bir seçenek sunar.

Bu gerçekten devrim niteliğinde bir öneriydi. Dr. Rubbia ve ekibi, toryum yakıtlı reaktörlerle enerji üretiminde hem güvenliği hem de verimliliği artırmayı hedefleyerek nükleer enerjiye yeni bir perspektif kazandırdı. Toryumun bol bulunabilirliği ve düşük nükleer atık üretimi gibi avantajları, bu tür reaktörleri geleceğin enerji çözümleri arasında önemli bir yere taşıyor (Rubbia, Rubio, vd., 1995, 1996). Yeni reaktörler, geleneksel uranyum yakıtlı reaktörlerden oldukça farklıdır ve en büyük avantajı nükleer sürecin tamamen kontrol edilebilir olmasıdır. Hızlandırıcıdan gelen proton demeti kesildiğinde reaksiyon nanosaniyeler içinde durur, bu da nükleer kaza riskini ortadan kaldırır. Bu reaktörlerin amacı, toryum yakıttan yüksek termodinamik verim (%40-44) ile enerji üretmek ve Mevcut radyoaktif atıkları kısa ömürlü radyonüklitlere dönüştürerek bertaraf etmektir. Ayrıca, bu reaktörler geleneksel reaktörlere göre çok daha az nükleer atık üretir.

Enerji Yükseltici (Energy Amplifier-EA), geleneksel nükleer reaktörlerdeki kritiklik kazası riskini ($k > 1$) ortadan kaldırarak, nötron çoğaltma katsayısını $k = 0,96-0,98$ aralığında tutan kritik-altı bir reaktör sistemiyle, yüksek proton akımlı (> 10 mA) ve yüksek enerjili (0,5-1,5 GeV) bir hızlandırıcı kompleksini birlikte çalıştırmak üzere tasarlanmış yeni nesil reaktörlerdir. Orta enerjili protonlarla atık çekirdek üretiminin güvenilir tesir kesitleri ve spallation hedef radyoaktif ürünlerin hesaplanması, enerji yükseltici açısından büyük önem taşır (Aleksandrov ve diğerleri., 1994, 1996).

Spallation reaksiyonu, hızlandırıcı güdümlü enerji yükseltici sistemde kritikaltı reaktörün ihtiyaç duyduğu nötron kaynağını sağlar. Ancak, bu reaksiyonun mekanizması hakkında elimizdeki bilgiler, teknik uygulamalara yönelik yeterli kesinliğe sahip değildir. Nötron verimi ve reaksiyon sonucu oluşan atık çekirdeklerin belirlenmesi, enerji yükseltici sistemlerde kullanılan spallation nötron kaynağının hedefi ve tasarımının oluşturulmasında büyük bir öneme sahiptir. Bu süreçler, nötron kaynağının verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar (Demirkol ve ark., 1998, 2001, 2002; Reinhold ve ark., 1998; Benlliure, 2001).

Nükleer reaksiyon deneylerinde elde edilen sonuçlar temel çekirdek fizikini daha iyi anlamak için oldukça önemlidir. Reaksiyonların enerji verimliliği açısından detaylı veriler bilinmediğinden dolayı spallasyon reaksiyonlarından oluşan izotopların üretim tesir kesitlerinin incelenmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda dataların verimli karşılaştırılması için bu tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanması gerekir.

Hızlandırıcıdan gelen bir parçacık ki çoğu tasarımda bu protondur, ağır elementlerden oluşan bir hedefe çarptığında, hedefteki atom çekirdeğinin parçalanması (spallasyon) sonucu çok sayıda nötron ve yüklü atom altı parçacıklar elde edilir. 1 GeV enerjiye sahip bir parçacık, çekirdek ile etkileştiğinde, hedefte bazı nükleonların veya hafif çekirdeklerin oluşumu gözlenir. Yüksek enerjili protonun hedef çekirdeğe çarpması (intranükleer kaskad) ve hedeften yüksek enerjili nükleonların çıkışı ile çevresindeki diğer çekirdeklerle etkileşmesi sağlanır. Bu iki süreçte hedef çekirdeklerin bir kısmı parçalanma veya buharlaşma yoluyla nükleonları dışarı atar.

Bu nükleonların içinde üretilen 20 MeV altı nötronlar, fisyon reaksiyonları için hedefi çevreleyen sistemde kullanılır. Bu nedenle, hızlandırıcı kaynaklı sistemlerin (ADS) temel amacı, proton başına düşen nötron sayısını artırmaktır. Literatürde, bu şekilde nötron üretimi için birçok nükleer reaksiyon bulunmaktadır.

Nötronlarla oluşturulan reaksiyon tesir kesitleri fisyon ve füzyon enerji reaktörlerinin yapısal dayanıklılığını etkileyecek değişimler olabileceğinden dolayı bu problemlerin öneminin anlaşılması ve sorunlara yanıt bulabilmesi açısından reaksiyon tesir kesitlerinin deneysel olarak ölçülerek teorik hesaplamaların yapılabilmesi gerekir.

Bu çalışmada, doğada bulunan bazı ağır elementler hedef olarak kullanılarak, çeşitli enerjilere sahip hızlandırılmış protonlarla bombardımanı sonucunda yayılan atom altı parçacıkların (spallasyon) reaksiyonlarında oluşan izotopların üretim tesir kesitleri incelenmiştir. Böylece hızlandırıcı kaynaklı sistem (ADS) ile yapılan spallasyon reaksiyonlarında oluşan izotopların üretim tesir kesitlerinin hesaplanması çalışmaları için veri tabanının güçlendirilmesi ve üretim teknolojisinin geliştirilmesine yönelik yapılacak deneysel çalışmalara rehberlik etmesi amaçlanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Enerji yükseltici sistemlerin tasarımında, hedef elementlerin yüksek enerjili parçacıklarla etkileşimi esastır. Ağır elementlerin nükleonik özellikleri üzerine yapılan ekstra çalışmalar, bu sistemlerin tasarımında büyük önem taşır, çünkü spallasyon reaksiyonları sonucu oluşan atık çekirdeklerin çoğu radyoaktiftir. Bu nedenle, hedefin tasarımında radyoaktif aktivasyon problemleri göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, atık çekirdeklerin hedef içinde, hızlandırıcı penceresinde ve yapısal materyallerde radyasyon zararına ve aşınmaya katkıda bulunduğu unutulmamalıdır (Sümmerer ve diğerleri, 1990). Çeşitli elementlerin atık çekirdek (izotopik) üretim tesir kesitlerinin deneyleri ve hesaplamaları konusunda yapılan literatür taramasında ilgili olabilecek başlıca yayınlar aşağıda özetlenmiştir.

Benlliure ve ark. (2001) Nuclear Physics A dergisindeki yayınlarında 800 MeV enerjili protonla Au elementinin Spallasyon (parçalanma) sonucu oluşan atık çekirdeklerin izotoplarını incelemişlerdir.

Sultansoy (2001), 25-26 Ekim 2001 tarihlerinde Ankara'da gerçekleştirilen I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi'nde "Parçacık Hızlandırıcıları: Dün, Bugün, Yarın" başlıklı bir bildiri sunmuştur.

Demirkol (2003), Gazi Üniversitesi'nde "Enerji Yükselteci Tasarımında Proton-Ağır Element Çarpışmasında Nötron Üretimi" başlıklı doktora tezini hazırlamıştır. Bu çalışmada, teorik ve deneysel verilerin karşılaştırması yapılmıştır.

Taieb ve ark. (2003) Nuclear Physics A dergisinde 1 GeV enerjili protonla U-238 elementinin spallasyon sonucu oluşan atık çekirdeklerin izotoplarını incelemiştir.

Demirkol (2003), Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'nde yayımlanan "Pb(1 GeV)+p Reaksiyonunda Üretilen Atık Çekirdeklerin İzotopik Üretim Tesir

Kesitleri” başlıklı makalesinde, teorik hesaplamalar yapmış ve bu hesaplamaları deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, özellikle nötronca zengin izotopların üretimi ve radyoaktif atık yönetimi konularında önemli bulgulara ulaşılmıştır. Teorik hesaplamaların doğruluğunu test etmek amacıyla elde edilen deneysel veriler, teorik modellerin geçerliliğini ve güvenilirliğini desteklemektedir.

Yavaş (2004), parçacık hızlandırıcıları üzerine araştırmalar yapmış ve bu çalışmalarını 7-9 Haziran 2004 tarihlerinde Ankara'da düzenlenen II. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi'nde "Parçacık Hızlandırıcıları" başlıklı bir bildiri ile sunmuştur.

Demirkol (2006), Modern Physics Letters A dergisinde 1 GeV enerjili protonla Uranyum ve Toryumun spallasyonu sonucunda ortaya çıkan izotopların oluşum tesir kesitlerini hesaplamıştır.

Napolitani ve ark (2007) Xe-136 elementinin 1 GeV enerjili protonla spallasyon sonucu oluşan atık çekirdeklerin izotoplarını incelemişlerdir.

Genç (2008), 2-5 Aralık 2008 tarihlerinde Ankara'da gerçekleştirilen VI. YUUP Çalıştayı'nda, spallasyon reaksiyonlarını içeren kapsamlı bir bildiri sunmuştur. Bu çalıştayda, spallasyon reaksiyonlarının önemine dikkat çekmiş ve bu tepkimelerin enerji üretimi ve radyoaktif atık yönetimi üzerindeki etkilerini tartışmıştır. Genç'in bildirisi, bu alandaki teorik ve deneysel çalışmalara önemli katkılar sağlamıştır.

Titarenko ve ark. 2008 yılında Fe elementinin çeşitli enerji aralıklarında protonlarla spallasyon sonucu oluşan izotopik üretim tesir kesitlerini incelemişlerdir.

Iwamoto ve ark. (2009), ${}_{90}\text{Th}^{232}$ elementinin 300 MeV enerjiye sahip protonlarla bombardıman edilmesi sonucu ortaya çıkan nötronların enerji spektrumlarının deneysel hesaplamalarını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, protonlarla bombardıman edilen ${}_{90}\text{Th}^{232}$ 'den yayılan nötronların enerji dağılımı detaylı olarak incelenmiş ve bu veriler, teorik modellerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Vaishnane ve ark. (2010), $^{82}\text{Pb}^{208}$ elementini çeşitli enerjilerde protonlarla bombardıman ederek, ortaya çıkan nötronların fisyon tesir kesitlerini deneysel olarak hesaplamışlardır. Bu çalışma, farklı proton enerjilerinin fisyon sürecine olan etkilerini inceleyerek, elde edilen nötronların enerji spektrumlarını detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Deneysel veriler, teorik modellerin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Ertürk ve Boztosun (2004), parçacık hızlandırıcıları üzerine çeşitli çalışmalar yapmış ve 7-9 Haziran 2004 tarihlerinde Ankara'da düzenlenen II. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi'nde "Parçacık Hızlandırıcıları" başlıklı bir bildiri sunmuşlardır. Bu bildiride, parçacık hızlandırıcılarının çalışma prensipleri, uygulama alanları ve gelecekteki potansiyel kullanımları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ertürk ve Boztosun'un çalışmaları, bu alandaki bilgi birikimini artırmak ve yeni araştırmalara zemin hazırlamak amacıyla önemli katkılar sağlamıştır.

TAEK (2014) tarafından hazırlanan faaliyet raporunda, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun hızlandırıcı teknolojisini edinme süreci, parçacık hızlandırıcıları ile yapılan araştırma, geliştirme ve uygulamalar detaylandırılmıştır. Raporda, hızlandırıcı teknolojisinin Türkiye'ye kazandırılması ve bu alandaki bilimsel çalışmalara nasıl katkı sağlanacağı anlatılmaktadır.

Yıldırım (2009), bazı amfoter grubu hedef çekirdeklerin proton giriş reaksiyonları sonucunda üretilen nötronların reaksiyon tesir kesitleri ve yayınlanma spektrumlarının teorik hesaplamalarını yapmış ve bu verileri deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, teorik hesaplamaların doğruluğunu test etmek ve deneysel verilerin geçerliliğini değerlendirmek amacıyla ayrıntılı analizler gerçekleştirilmiştir. Yıldırım'ın çalışması, amfoter grubu çekirdeklerin protonlarla etkileşimlerinde önemli bulgular ortaya koymuştur.

Karadeniz ve arkadaşları (2001), 25-26 Ekim 2001 tarihlerinde gerçekleştirilen I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi'nde, "Hızlandırıcı Güdümlü Reaktörler/Enerji Yükseltici" başlıklı ortak bir bildiri sunmuşlardır. Bu bildiride, hızlandırıcı güdümlü reaktörlerin ve enerji yükseltici sistemlerin çalışma prensipleri ve

uygulamaları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Karadeniz ve ekibinin çalışması, bu alanın gelişimine ve yeni araştırmalara zemin hazırlayacak önemli bilgiler sunmuştur.

Demirkol (2003), Erciyes Üniversitesi'nde 15-17 Ekim tarihlerinde düzenlenen VIII Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojiler Kongresi'nde bir bildiri sunmuştur. Bu bildiride, 30 MeV'den 1500 MeV'e kadar enerjiye sahip hızlandırılmış protonların nükleer spallasyon reaksiyonlarındaki etkilerini, özellikle bazı ağır elementler üzerinde, incelemiştir. Demirkol, bu çalışmada teorik ve deneysel verileri karşılaştırmıştır.

Demirkol (2005), 3-4 Haziran tarihlerinde Kayseri'de düzenlenen Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Enerji Yönetimi Sempozyumu'nda, “ $p + {}^{232}\text{Th}$ Çarpışmasında Spallation Nötron Üretimi ve Enerjileri” başlıklı bir bildiri sunmuştur. Bu bildiride, $p + {}^{232}\text{Th}$ reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan nötron sayıları ve enerjilerinin teorik hesaplamalarını yapmış ve bu hesaplamaları deneysel verilerle karşılaştırmıştır.

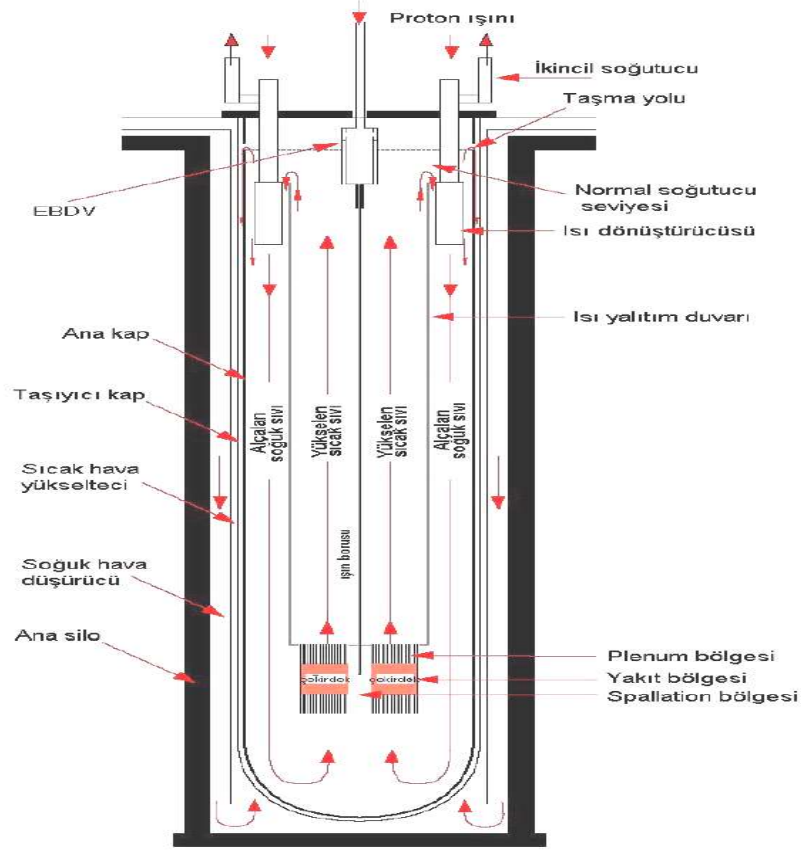
Tel ve ark (2005), ${}^{232}\text{Th}$ ve ${}^{238}\text{U}$ Çekirdeklerinin Nötron Bombardımanından Yayınlanan Nötronların Kinetik Enerji Dağılımı konulu çalışmalarında bir takım teorik çalışmalar yaparak dataları kaydetmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hızlandırıcı Kaynaklı Sistem (ADS)

Hızlandırıcı kaynaklı sistem (Accelerator Driven System -ADS) geleneksel olarak kullanılan reaktörlerden farklı olarak kritik altı çalışan ($k_{eff} < 1$) ve pasif güvenliğe sahip olan ($k_{eff} \approx 0,96-0,98$) reaktör ile proton hızlandırıcıların (1–1,5 GeV) birlikte çalıştığı sistemlerdir (Günay, Korkmaz ve Şarer, 2008). ADS'nin kritik altı durumda çalışması ve istenildiği takdirde hedefe gönderilen akımın kesilmesi ve herhangi olumsuzluğa mahal vermemesi açısından sistemin güvenli çalışmasını sağlamaktadır. Bu sistem yakıt üretimine ilave olarak nükleer fisyon ürünlerinin ve trans-uranyum elementlerinin yakılması veya kararlı hale dönüştürülmesinde de kullanılmaktadır (Günay, Korkmaz ve Şarer, 2008). Bunun yanı sıra yakıt üretimi ile aynı anda meydana gelen fisyonlardan elde edilen enerji tekrar sisteme elektrik enerjisi olarak geri kazandırılmaktadır.

Hızlandırıcı kaynaklı sistemde (ADS) yüksek hızlara ve enerjilere sahip protonlar ile hedef olarak seçilen elementin bombardıman edilmesi sonucunda nötronlar meydana gelmektedir. Hedefin çevresinde bulunan fertil malzemenin bu nötronları yutması ile fisil yakıt olarak kullanılan malzemelere dönüşmesi gerçekleşir (Benlliure ve ark., 1998). Temel Parçacık Fiziği ve Nükleer Fizik başta olmak üzere hızlandırılan bu parçacıklar ile araştırmalar yapılmaktadır. Hızlandırıcı kaynaklı sistemin reaktör şeması Şekil 3.1 de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. (ADS) Hızlandırıcı Kaynaklı Sistem Reaktörün yapısı (Rubbia ve diğerleri, 1996)

3.1.1. Hızlandırıcıların Tarihi Altyapısı

1990'lı yılların başından bu yana Uluslararası Bilim Komitesi tarafından Hızlandırıcı Kaynaklı Sistem (ADS); yüksek dozdaki nükleer atık problemini çözümlmek için geliştirilebilecek bir sistem olarak tanımlandı ve bu sorun ile ilgili birçok temel araştırma programları başlatıldı. Bu programlar alternatiflerin ve bununla ilgili teknolojik konuların araştırılmasına rehberlik etmektedir. Uluslararası kamuoyuna alternatifler sunulurken, Rubbia C.ve CERN'deki arkadaşları tarafından tasarlanmış olan ve son derece güvenli olan ADS reaktörü dikkatleri çekmiştir. 1996 tarihinden itibaren başlayarak, İtalya'da Enerji yükseltici üzerinde gittikçe büyük bir ilgi başlamış ve birçok temel Araştırma ve Geliştirme (ARGE) çalışmalarının konusu olmuştur.

Parçacık hızlandırıcıları ilk olarak 1930'larda kurulmuş ve 1950'lere kadar temel parçacıklarla ilgili önemli çalışmalar kozmik ışın deneylerinden elde edilmiştir. O dönemlerde hızlandırıcılarda hedeflenen enerjiler düşük olduğundan dolayı bu yöntem

tercih edilmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle hızlandırıcılar yaklaşık on kat daha güçlü hale gelmiştir. Özellikle çarpıştırıcıların kurulmasıyla hızlandırıcılar, maddenin özelliklerini ve etkileşimlerini inceleyen en önemli reaktörler haline gelmiştir (Sultansoy, 2001).

3.1.2. Hızlandırıcıların Gelişimi

İnsanoğlunun maddenin temel yapısını anlama arayışı, parçacık fiziği ve nükleer fizik alanında yapılacak yeni deneylerde hızlandırılmış elektron ve proton parçacıklarının kullanımını gündeme getirmiştir. Katot ışınları tüpleri, katot ve anod arasında elektron akımı oluşturan ilk temel hızlandırıcılar olarak bilinir. 1920'lerin sonlarına doğru, Widereo ilk modern lineer elektron hızlandırıcısı olan linac'ı tasarlamıştır. Aynı dönemde, Cockcroft-Walton elektrostatik hızlandırıcısı ile 1932'de protonlar Li çekirdeklerine gönderilmiş ve iki ayrı He çekirdeği elde edilmiştir. Yüksek elektrostatik hızlandırma potansiyeline sahip olan Van de Graaff jeneratörleri sayesinde parçacıklar MeV seviyelerine kadar hızlandırılmıştır (1 eV, bir elektronun 1 voltluk potansiyel farktan kazanabileceği enerji olup, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ 'dir). Aynı dönemlerde, doğrusal indüksiyon hızlandırıcıları ile birkaç MeV'lik enerjilere ulaşılmıştır. Widereo, elektromanyetik RF salınımlı (~MHz) rezonans boşlukları (kaviteler) kullanarak parçacık hızlandırma konseptini önererek, 30 sürüklenme tüpüne sahip hızlandırıcılar ile cıva iyonlarını 1,26 MeV enerjiye kadar hızlandırmıştır.

1940'lı yılların sonlarına doğru gelişen teknoloji sayesinde hızlandırıcılarla ulaşılabilecek enerjinin üst sınırı 10 kat artmıştır ve günümüz TeV (10^{12} eV) enerjilerine çıkarılmıştır. Parçacık fiziği ve nükleer fiziğin bir parçası olan hızlandırıcılar; temel parçacık üretimi, serbest elektron lazerlerinin üretimi, sinkrotron ışınımı üretimi, ikincil demetlerin üretimi ve birçok bilimsel çalışma başta olmak üzere endüstriyel ve teknolojik ürünlerin üretiminde, kalite kontrolü sağlamada kullanılması özellikle gelişmiş ülkelerde temel bilimlerin yanı sıra teknolojinin gelişmesinde önemli bir rol oynayarak ekonominin büyük bir parçası haline gelmiştir.

Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi (CERN), İsviçre-Fransa sınırında yer alarak, birçok bilim insanının parçacıklar ve hızlandırıcılar üzerine çalışmalar yaptığı bir

merkezdir. CERN'e ek olarak, sadece sinkrotron ışınımına dayalı spektroskopi çalışmaları, Hamburg'da HASYLAB, Berlin'de BESSY, Grenoble'da ESRF ve Trieste'de ELETTRA laboratuvarlarında gerçekleştirilmektedir. Almanya'da bulunan Alman Elektron Sinkrotronu (DESY), Japonya'da faaliyette olan Japon Yüksek Enerji Fiziği Laboratuvarı (KEK), Rusya'da BUDKER, Amerika'da Stanford Lineer Hızlandırıcı (SLAC) ve Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı (FNAL), ayrıca JINR-Dubna ve IHEP-Protvino hızlandırıcı merkezleri, birçok bilim insanının çalışmalarını yürüttüğü önemli tesislerdir. Bu merkezlerin varlığı ve bu alandaki yoğun araştırma faaliyetleri, hızlandırıcıların önemini ve teknoloji ile mühendislik alanlarında bilime kazandırdıkları değerleri gözler önüne sermektedir.

Hızlandırıcılar, günümüzde parçacık fiziği ve nükleer fizik deneyleri başta olmak üzere petrol ve doğalgaz yataklarının aranması, X ışınları gözlemlenmesi, nötron terapi tedavileri, proton terapisi ve iyon implantasyonu, çevre atıklarının sterilizasyonu, nükleer santrallerini atık hijyeni, fabrikasyon baca sterilize edilmesi, Toryuma dayalı Nükleer santraller, sinkrotron ışınımı ve plazma ısıtılması gibi üç yüzün üzerinde kullanım alanı mevcuttur. Maliyet bakımından çok yüksek olan radyoizotopların üretilmesi ile mevcut hızlandırıcılar sayesinde teknolojik ürünler hayatımızın birçok yerinde kullanılmaktadır. Dünyada hızlandırıcıların sayısı onbeşbin (15000) civarında olup geliştirilmek amacıyla kurulan büyük özelliklere sahip hızlandırıcıların sayısı 115 civarında bulunmaktadır. CERN'de çalışan araştırmacı ve bilim insanı sayısı 4500, DESY' de çalışan araştırmacı sayısı ise 3000'e ulaşmıştır (Çakır,2009).

3.1.3. Türkiye'deki Hızlandırıcılar ve Gelişimi

Türkiye parçacık hızlandırıcıları alanında diğer ülkelere göre geri kalmış ve gelişmiş ülkelerle aradaki açığı kapatmak için çalışmak durumundayız. Mevcut şartların sebeplerini belirlemek ne kadar önemli ise atılması gereken adımları belirlemek çok daha önemlidir (TAEK, 2014).

1994 yılında Ankara Üniversitesi Fizik ve Fizik Mühendisliği Bölümünde başlatılan Hızlandırıcı Fiziği çalışmaları olarak hazırlanan "Parçacık hızlandırıcıları: Türkiye'de

Neler Yapılmalı?” konulu proje ile Devlet planlama Teşkilatı desteği sayesinde 1997-2000 yılları arasında yürütülerek gerekli çalışmalar yapılmıştır. Altyapı ve hazırlık çalışması niteliğinde olan “Türk Hızlandırıcıları Merkezi (THM)’nin kurulması yönünde öneriler geliştirilmiş ve sonuç raporunda THM’de yer alması istenen tesisler ve kurumsallaşmak için gerekli adımlar atılmıştır. 2002-2005 yılları arasında Ankara Gazi Üniversitesi iş birliği ile iki ayrı proje hazırlanarak THM’de yer alması gereken tesisler ve gerekli parametreler ile araştırma potansiyellerini tanımlayan çalışmalar raporlaştırılmıştır. Türk Hızlandırıcı Merkezi’nin ülkemiz için ARGE amaçlı ilk hızlandırıcı tesisi olan (TARLA)’yı ve ilk Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü’nü kurmayı hedefleyen Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje (YUUP) devlet Planlama Teşkilatı (DPT) 2006 yılında yürürlüğe girerek kullanılması raporda yer almıştır. Türk Hızlandırıcı Merkezi’nin 2015-2025 yılları arasında Ulusal Araştırma Merkezi olarak tamamlanması TAEK verilerinde görülmektedir. (TAEK, 2014) yine Atom Enerjisi Kurumu Proton Hızlandırıcı Tesisi birçok sağlık alanındaki çalışmaları ile nükleer araştırma ve eğitim faaliyetlerinde bulunduğu bu rapor kapsamında ele alınmıştır.

Ankara Üniversitesinin koordinatörlüğünde 12 Üniversiteden oluşan (Ankara, Gazi, İstanbul, Boğaziçi, Doğuş, Uludağ, Dumlupınar, Osmangazi, Niğde, Süleyman Demirel, Erciyes, GYTE) üniversiteleri ortakları ile akademisyen desteği sağlayan, özel ve devlet üniversitelerinden oluşan 15 üniversitenin yaklaşık olarak 168 bilim insanının katılımı ile proje 2014 yılında tamamlanmıştır (TAEK,2014).

Türkiye'deki ADS (Accelerator Driven Systems) nükleer hızlandırıcıları ile ilgili güncel çalışmalar, özellikle TÜBİTAK ve üniversiteler gibi önemli bilimsel kurumlar tarafından yürütülmektedir. TÜBİTAK, hızlandırıcı teknolojileri ve bu teknolojilerin nükleer enerji üretiminde kullanımı üzerine çeşitli araştırma projeleri desteklemektedir. Özellikle Çukurova Üniversitesi, hızlandırıcı sürücülü sistemlerin enerji üretiminde ve nükleer atıkların azaltılmasında kullanımı üzerine çalışmalar yürütmektedir. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), hızlandırıcı teknolojilerinin ülkeye kazandırılması ve bu alandaki bilimsel araştırmaların desteklenmesi amacıyla kapsamlı bir faaliyet raporu hazırlamıştır. Bu çalışmaların temel amacı, enerji üretiminde sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler geliştirmek ve nükleer atıkların yönetiminde ileri teknolojileri

kullanılmaktadır. TÜBİTAK, 2024; Çukurova Üniversitesi, 2024; Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK, 2024).

3.1.4. Hızlandırıcıları Avantajlı Hale Getiren Faktörler

Rubbia C. ve ekibinin de belirttiği üzere hızlandırıcılar; düşük maliyete üretim ve gelecek için temiz bir nükleer enerji üretiminden dolayı önemsenmiştir (Rubbia ve ark. 1995)

1. Teknolojinin gelişimi ile hızlandırıcılar günümüz şartlarında, mantıklı ve hızlı bir şekilde üretilebilmektedir. Üç temel iyi tanımlanmış parçaların günümüz teknolojisi ile uygun olarak birleştirilmesi gerekmektedir.

- a) Hızlandırıcılar
- b) Enerji üretim tankları
- c) Yakıt fabrikasyonu ve yeniden işlenmesi

2. Hızlandırıcıları sıradan nükleer enerji ile birleştirmek yeni ana görevleri üstlenebilir.

- a) Jeolojik depolamanın azalması ile atıklar kömür yakımı sonunda kalan küllerden daha az radyoaktif olması sebebiyle avantajlı hale gelmektedir.
- b) Toryumun kullanılmasına olanak sağlanması ve sonuç olarak plütonyumsuz çevreye zarar vermeyen nükleer enerji üretimi sağlamasıdır.
- c) Kritik güç artışı ve erime kazalarından uzak olması sebebiyle güvenlidir.

3. Hızlandırıcı Kaynaklı Sistemler (ADS), günümüzde faaliyette olan reaktörlerin ve gelişmekte olan ülkelerdeki yeni yapıların yerine geçerek, nükleer enerjiyi daha doğal ve daha ekonomik bir şekilde sağlayabilir. Yeni nesil termal BSR'ler güvenlik açısından kayda değer ilerlemeler (daha iyi kontrol ve azalan ısı soğutma) göstermesine rağmen, uzun süreli atık sorununa ve jeolojik depolama zorluklarına çözüm sunamamaktadır. Ayrıca, BSR'lerde büyük miktarlarda plütonyum üretimi devam etmekte olup, bu durum ciddi riskler taşımaktadır (Demirkol, 2003).

4. Büyük miktardaki atıkların temizlenmesinde kullanılabilirler. Bu sayede, günümüze kadar birikmiş olan atıkların (özellikle plütonyum) jeolojik olarak depolanmasına bir alternatif sunarlar. Ekonomik açıdan faydaları olan bu hızlandırıcılar, plütonyumun yakımı ve yok edilmesi açısından jeolojik tahribat yöntemine kıyasla sadece çevreye değil, ekonomik olarak da avantaj sağlar (Demirkol, 2003).

5. Yeni nesil enerji kaynaklarının, maliyet açısından petrol, doğal gaz ve kömür gibi standart fosil yakıtlarla rekabet edebilir olması gerekmektedir.

- a) Ünitelerin standardizasyonu ve genel tüm giderlerin merkezi olarak kontrolü sonucu ciddi oranda maliyetlerde düşüş olması beklenecektir.
- b) Diğer nükleer sistemlerle karşılaştırıldığında güvenlik giderek artmıştır.
- c) Uygun bir izleme yapılabilmesi için kritik ve hassas olan materyallerin küçük bir alanda toplanmasıyla yüksek derecede güvenlik sağlanmaktadır (Demirkol, İ.2003).

3.2. Hızlandırıcılar

Nükleer fizik araştırmalarında genel olarak iki çeşit hızlandırıcı kullanılmaktadır.

- 1- DC gerilim farkı kullanılan hızlandırıcılar
- 2- Elektromanyetik alan oluşturarak Radyo Frekans salınımlı hızlandırıcılar

Crockcraft-Walton ve Marx, yüksek gerilim hızlandırıcılarının öncüleri olarak kabul edilir. Bu hızlandırıcılar, günümüzde yaygın olarak kullanılan Tandem Van de Graff hızlandırıcılarına evrilmiştir.

3.2.1. Elektrostatik Hızlandırıcılar, Tandem Van de Graff

Bu tür hızlandırıcılarda yaklaşık olarak ~25 MeV'lik terminal voltajı, düzgün bir iletken yüzey veya iyon kaynağı aracılığıyla üretilir ve yüksek voltaj ucuna hareketli bir kayış ile taşınır. Negatif iyonlar, topraklama ucundan yüksek pozitif voltaj ucuna doğru hızlandırılır ve etkin voltaj mega volt seviyelerine çıkar. Bu seviyeye ulaşan parçacık

demeti, vakum sistemi içinde bir metal parçasından geçerek elektronlarını çıkarır ve pozitif iyonları toprak potansiyeline doğru geri hızlandırır. Bu yöntemle hızlandırıcı yüksek enerji üretir fakat yeterli yoğunluğa ulaşamaz. Verimlilik açısından düşük olduğu için bu tür hızlandırıcılarda elektrostatik demek akımı 10-20 μA civarındadır. Bu durum, dar çalışma aralığı nedeniyle dezavantajlıdır. Başlangıçta kullanılan negatif ve pozitif iyon kaynaklarının az bulunurluğu da diğer bir dezavantajdır. Tüm bu dezavantajlara rağmen yaygın olarak kullanılmaları dikkat çekicidir (Ertürk ve Boztosun, 2004).

3.2.2. Lineer Hızlandırıcılar (Linac)

Radyo frekansları kullanarak çalışan bu hızlandırıcılarda iyonların küçük potansiyel fark ile tekrar hızlandırılması gereği yoktur. Lineer bir tüp içerisinde bulunan belirli sayıda elektrotlar yerleştirilerek iyonlar enjekte edilir. Elektrotların fazları değiştirilerek belirli aralıklarla sıralanmış alternatif voltaj verilerek iyonların hareketlenmesi prensibine dayanan bir sistemdir. 1928 yılında R. Wideroe tarafından tasarlanan lineer hızlandırıcı ile 50 keV'lik iyonlar hızlandırılmıştır. İkinci dünya savaşı sonrasında ise proton ve elektron hızlandırıcısı olarak kullanılmıştır. [Stanford Üniversitesi'nde bulunan 50 GeV elektron veya pozitron hızlandırabilen 3 km uzunluğundaki en uzun lineer hızlandırıcıdır (Ertürk ve Boztosun, 2004).

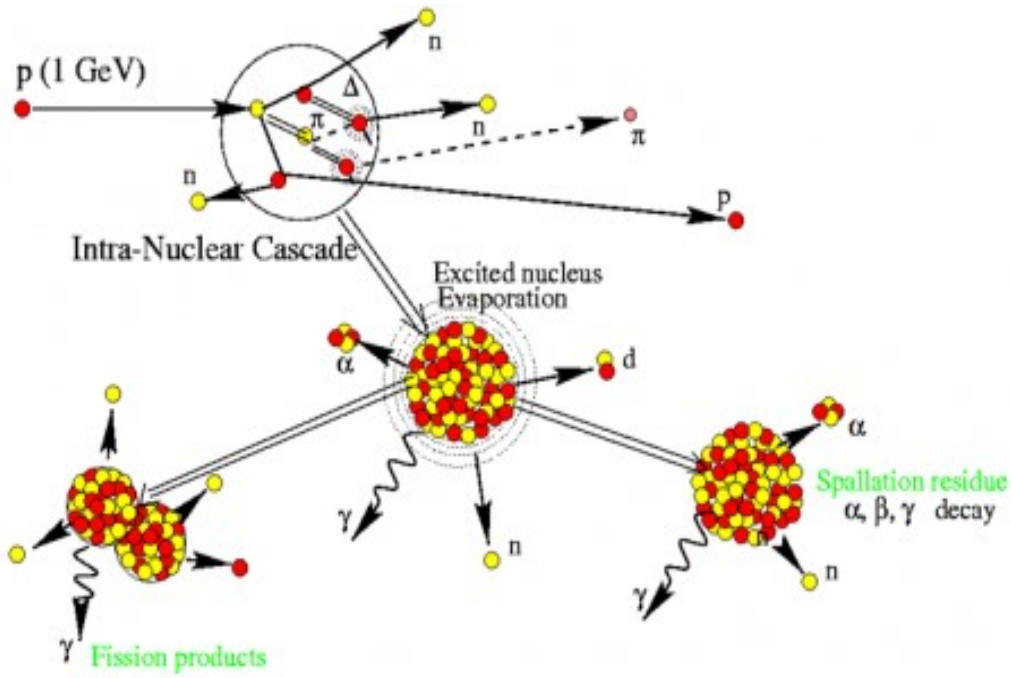
3.2.3. Siklotronlar (Cyclotron)

En yaygın olarak kullanılan ve en iyi bilinen hızlandırıcılardır. Çalışma prensibi olarak Lineer hızlandırıcılarda olduğu gibi değişen fazlarda iyonları hızlandırılması prensibine göre çalışır. İyonları MeV mertebesine kadar hızlandırabilen siklotron, Lineer sistemden farklı olarak parçacıklar kapalı bir yol etrafında bükülmek için manyetik alanda da kullanılır. 1932 yılında Lawarance ve Lewingston tarafından geliştirilmiştir. Hızlandırılmak istenen parçacık siklotron merkezine yerleştirilerek dışa doğru spiral şekilde hızlandırılma prensibine göre çalışır (Ertürk ve Boztosun, 2004).

3.2.4. Sinkrotronlar (Synchrotron)

19. yüzyılın son dönemlerinde X- ışınının keşfi ile hızlandırıcıların yüksek enerji ve nükleer fizikte temel araştırmalarda sinkrotronlar yer almaktadır. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezinde (CERN) birçok hızlandırıcı çeşidi kullanılmaktadır. Tıpta teşhis ve tedavi amaçlı kullanılan hızlandırıcılar kanser teşhis ve tedavilerinde yaygınlaştırılıp geliştirilmiştir. Ülkemizde bulunan sekiz farklı merkezde bulunan ve hastane bünyesinde hızlandırıcılar mevcuttur (Ertürk ve Boztosun, 2004).

3.3. Spallasyon (Parçalanma)

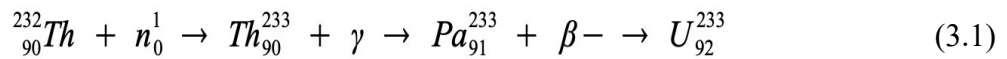


Şekil 3.2. 1 GeV enerjili bir protonun bir çekirdekle etkileşimi (Rubbia ve diğerleri, 1996)

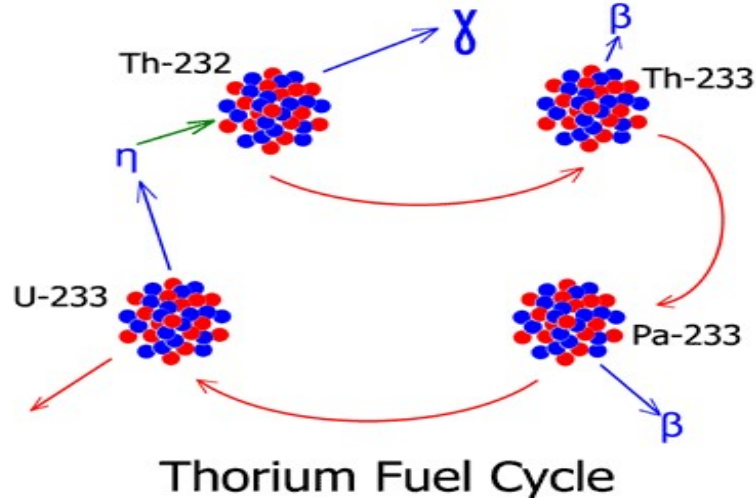
Protonun çekirdekle çarpışması sonucu intra-nükleer kaskad süreci başlar, ardından uyarılmış çekirdek buharlaşır ve fisyon ürünleri ile spallasyon kalıntıları oluşur. 1 GeV enerjili bir protonun bir çekirdekle etkileşim şeması Şekil 3.2 de gösterilmiştir.

3.3.1. Spallasyon (Spallation) Reaksiyonu

Hızlandırıcı güdümlü sistemler (ADS) ile konvansiyonel reaktörler arasındaki en belirgin fark, yüksek enerjili proton demeti ve nötronların bulunduğu hedef bölgedir. 500 MeV'den yüksek enerjiye sahip yoğun bir proton demeti, hedefteki ağır elemente gönderilir. Hedef maddesi ile etkileşime giren proton demeti (mermi) ile gerçekleşen reaksiyona spallasyon (parçalanma) denir. Reaksiyon sonucunda hedefte, bazı atom altı parçacıklar, nükleonlar ve hafif çekirdekler serbest kalarak çevredeki diğer çekirdeklerle etkileşime girer. Hedef çekirdeklerin bir kısmı parçalanma veya buharlaşma yoluyla bol miktarda nükleon yayar. Bu nükleonlardan açığa çıkan nötronlar, 20 MeV altında birincil kaynak nötronlardır ve fisyon reaksiyonunu başlatmak için kritik-altı reaktörde kullanılır. ADS ile yüksek güce sahip spallasyon, kritik-altı reaktörde fisyon reaksiyonunu başlatmak için birincil nötron kaynağını sağlar. Spallasyon sürecinde proton başına düşen nötron sayısı, proton demetinin enerjisi ve hedef elementin kütesine bağlıdır. Birincil nötronlar, fisyon reaksiyon ürünleri olarak kritik-altı reaktörde çoğaltılarak spallasyon nötronları oluşturur. Kararlı veya kısa ömürlü izotoplar içeren nükleer atıkların yüksek derecede radyoaktif çekirdeklerini dönüştürmek için yeniden kullanılır. Proton enerjisi ve hedef element ile ilgili ADS çalışmalarında, proton başına açığa çıkan nötron sayısını incelemek önemlidir (Genç, 2008). Uranyum-233 izotopunun elde edilme denklemi aşağıdaki gibidir (Rubbia ve Diğerleri, 1996).



Uranyum-233 genellikle Toryum-232 (Th^{232}) izotoplarının nükleer reaktörlerde nötron yakalama süreçleri sonucunda elde edilir. Bu süreçte, Th^{232} nötronlarını yakalar ve ${}^{233}\text{Th}$ oluşturur; ${}^{233}\text{Th}$ 'nin yarı ömrü yaklaşık 21.8 dakikadır. ${}^{233}\text{Th}$, beta bozunması sonucu ${}^{233}\text{Pa}$ (protaktinyum) oluşturur ve ${}^{233}\text{Pa}$ 'nın yarı ömrü 26.97 gündür. ${}^{233}\text{Pa}$, beta bozunması sonucu U^{233} oluşturur. U^{233} , fisil bir izotopdur ve termal nötronlarla birleşerek fisyon reaksiyonlarına uğrayabilir (Rubbia ve diğerleri, 1996).



Şekil 3.3. U^{233} izotopunun elde ediliş süreci. (Rubbia ve diğerleri, 1996)

Toryum yakıt döngüsü Şekil 3.3. de gösterilmiştir. Şekilde, Th^{232} 'nin nötron (n) ile bombardıman edilerek Th^{233} 'e dönüştüğü, ardından beta (β) bozunması ile Pa^{233} 'e ve son olarak yine beta (β) bozunması ile U^{233} 'e dönüştüğü süreçler gösterilmektedir. Bu döngü, nükleer enerji üretiminde toryumun nasıl kullanılabileceğini ve toryumun uranyuma dönüşüm sürecini açıklamaktadır. Toryumun fissil element olan U^{233} 'e dönüşüm süreci 27 gündür. Bu süreç, toryumun nükleer yakıt olarak kullanılabilirliğini ve enerji üretimindeki potansiyelini göstermesi açısından ilginç ve önemlidir.

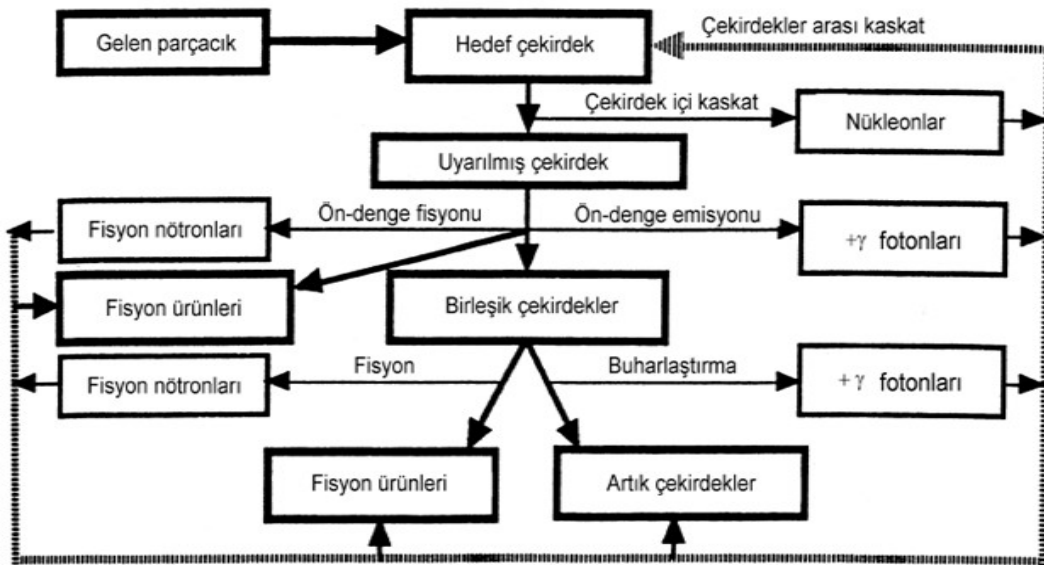
3.3.2. Spallasyon (Spallation) Hedef

Spallasyon reaksiyonlarında, Bizmut ve Kurşun (Bi+Pb) karışımı sıvı metal ya da genel olarak Kurşun (Pb) hedef madde olarak kullanılır. Filyon reaksiyonlarında spallasyona kıyasla daha az nötron üretilir. Reaktörde bulunan Pb, spallasyon için 60 cm uzunluğunda ve 20-50 cm çapında bir hedef olarak yer alır. Hızlandırıcıda (ADS) proton demeti, hedefteki Pb ile etkileşerek kalın hedef içinde durdurulur ve spallasyon sürecinde üretilen yüksek enerjili nükleonların çevresindeki hedef nükleitlerle etkileşmesi sağlanır. Bu nükleitler birbirleriyle etkileşerek kaskad (intranükleer kaskad) safhasını oluşturur. Hızlandırıcıdan gelen proton, GeV seviyesinde Pb hedefi ile etkileştiğinde, spallasyon sonucu nükleonlar, mezonlar, nötronlar ve diğer parçacıklar çekirdekten etrafa saçılır. Protonların ortalama enerjisi, hedef çekirdekten saçılan nükleonların enerjisinden düşük

olduğunda kaskad sona erer. Yüksek enerjili fisyon, hedef Toryum veya Uranyum'dan yapılmışsa gama ve parçacık emisyonu ile bozulan denge öncesi durumdaki hedef çekirdek ile oluşur. Bütün bozunma reaksiyonlarında spallasyon, buharlaşma ve fisyon nötron emisyonu baskındır. ADS'de proton başına açığa çıkan nötron sayısı temel hedeftir. Hedef malzemenin türü nötron verimini etkiler (Pb, Bi, Th, U gibi). Örneğin, Pb spallasyon hedefi için hızlandırılmış 1 GeV proton, yaklaşık 15 nötron üretir. Spallasyon, buharlaşma ve fisyon reaksiyonlarına bağlı olarak ortaya çıkan nötronların enerji miktarı birkaç keV'den başlar. Reaksiyon sonucu açığa çıkan nötronların %90'ı 15 MeV'in altındadır ve açısal dağılımları izotropiktir (Karadeniz, Çetiner, Yücel, Arıkan ve Sultansoy, 2001).

3.3.3. Spallasyon Nötron Hedefi

Spallasyon Nötron Hedefi (SNH), yüksek enerjili mermiyi hedefe göndererek düşük enerjili nötronlar üretmeyi amaçlar. Bu sistem, nötronik verim optimizasyonuna dayanır. Hedef malzemenin yüksek atom numarası, yüksek yoğunluk, yüksek/düşük erime noktası, nötron absorpsiyonunda düşük rezonans, yüksek ısı iletim katsayısı, termal nötronlar için düşük absorpsiyon, yüksek kullanılabilirlik ve düşük maliyet gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir (Genç, 2008). Spallasyon reaksiyon mekanizması Şekil 3.4. de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Reaksiyon Mekanizması şekli (Karadeniz vd 2001)

3.4. Yöntem

Nükleer reaksiyonlarda farklı enerjilerdeki reaksiyon tesir kesitlerinin incelenmesi çok önemlidir. Reaktörlerde üretilen çekirdeklerin genellikle yarı ömre sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, çekirdek reaksiyonlarının üretim tesir kesitleri ve yayılma spektrumlarını doğrudan ölçmek zor olmakla birlikte, çalışmaların zaman kazandırması açısından bu tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanması gereklidir. Nükleer fiziğin uygulamaları hayatımızda önemli bir yere sahip olduğu için bu alandaki araştırmalar giderek daha da önem kazanmaktadır. Ülkemizde hızlandırıcılar ile ilgili çalışmaların yaygınlaştırılması ve bu alandaki gelişmelere katkıda bulunması büyük önem taşımaktadır. Türk Hızlandırıcı Projesi (TAC) veri tabanına katkıda bulunmak, hızlandırıcı kaynaklı sistemler (ADS) ile yapılan spallasyon reaksiyonlarında oluşan izotopların üretim tesir kesitlerinin hesaplanması çalışmalarına destek olacak, veri tabanının güçlendirilmesine ve üretim teknolojisinin geliştirilmesine yönelik deneysel çalışmalara rehberlik edecektir.

Bu çalışmada, U^{233} ve Au^{197} gibi ağır elementler hedef element olarak seçilmiştir ve bu elementler 500-800 MeV enerji aralığında hızlandırılmış protonlarla çarpıştırılacaktır. Bu yüksek enerjili çarpışmalar, çeşitli izotopların oluşumuna yol açacaktır. Çarpışmalar sonucunda oluşacak bu izotopların üretim tesir kesitlerini hesaplamak amacıyla CEM03.1 bilgisayar programı kullanılmıştır. CEM03.1, Cascade-Exciton Modeli'ni (CEM) kullanarak, bu reaksiyonları ve ilgili tesir kesitlerini teorik analizlerle belirlemektedir.

Cascade-Exciton Modeli, nükleer reaksiyonların dinamik süreçlerini simüle ederek, çarpışma sonrası parçacıkların enerji ve açısal dağılımlarını tahmin eder. Bu model, özellikle yüksek enerjili nükleer reaksiyonlar için oldukça uygundur ve detaylı hesaplamalar yapabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen teorik sonuçların doğruluğunu değerlendirmek için, hesaplama sonuçları NEA Fransa'da (EXFOR) data banktan elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

NEA (Nuclear Energy Agency), OECD (Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Teşkilatı) bünyesinde faaliyet gösteren uluslararası bir kuruluştur. NEA, nükleer enerji alanında

yapılan araştırmaları ve veri toplama çalışmalarını koordine eder. Kurum, topladığı verileri bilimsel ve teknolojik araştırmalar için kullanıma sunar ve böylece nükleer enerji teknolojisinin güvenli, sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir hale getirilmesine katkıda bulunur. NEA ayrıca, nükleer güvenlik, radyoaktif atık yönetimi, nükleer teknoloji ve ekonomik analizler gibi çeşitli alanlarda da faaliyet göstermektedir. ye lkeler arasında bilgi ve deneyim paylaşımını teşvik eden NEA, nükleer enerji ile ilgili uluslararası iş birliğini güçlendirmekte ve nükleer enerjiye ilişkin yasal ve düzenleyici çerçevelerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu alışmada, NEA Fransa'dan (EXFOR) data banktan elde edilen deneysel verilerin kullanılması, teorik hesaplamaların doğruluğunu değerlendirmek ve nükleer reaksiyonların daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmak amacıyla önemlidir. Bu karşılaştırmalar sayesinde, CEM03.1 programının hesaplama yetenekleri değerlendirilecek ve nükleer reaksiyonlar hakkında daha kapsamlı bilgiler elde edilecektir

3.4.1. Nükleer Modeller

Enerjili parçacıklar hedefe gönderildiğinde reaksiyon sonrası elde edilen nötronların enerjisi ve oluşum spektrumları deney sonrası gözlemlenebilir. Deney ncesi ve sonrası yapılan teorik hesaplamalarla belirlenen reaksiyon tesir kesiti ve parçacık spektrumlarının tutarlılığı, zaman kaybını önler ve gereksiz masraflardan kaçınmayı sağlar. Bu teorik reaksiyon tesir kesiti ve spektrum değerleri, bazı nükleer yazılım paketleri kullanılarak hesaplanabilir. Hesaplanan değerlerin doğruluğu, önceki deneyler ve bu deneylerin sonuçlarının yer aldığı veri bankaları ile karşılaştırılıp değerlendirilir. Sonuçlar, hata payları hesaplanarak analiz edilir. Bu modeller sayesinde, henüz deney yapılamamış yüksek enerjili (GeV) parçacıkların bombardımanı sonrası oluşacak yeni izotoplar ve reaksiyon üretim tesir kesitleri hesaplanabilir. Bu durum, modelleri kullanışlı ve cazip hale getirir. Bu çalışmada kullanılan yazılım paketleri, dinamik Liouville ve istatistiksel metotlarla yoğun matematiksel işlemler gerektiren, denge ve dengeöncesi modelleri kapsamaktadır. Ayrıca, uyarılmış nükleer sistemler için referans olarak da kullanılırlar.

$$H=H_0+V \quad (3.2.)$$

Bu noktada H_0 , kararlı bileşenleri temsil eder. Kuantum mekaniğinin zamana bağımlı etkileşim teorisinin çözümü, birinci dereceden V 'yi belirler. Bu çözüm, durum yoğunluklarının hesaplanmasına imkân tanır. Bu sistemin çözümü, dengeöncesi modeller için gerekli olan altyapıyı oluşturur (Yıldırım, 2009).

1. **CascadeExciton Modeli:** Bu model, parçacıkların hedef çekirdekte oluşturduğu kaskad sürecini ve ardından gelen eksiton aşamasını inceleyerek reaksiyonları analiz eder.
2. **Hibrit Modeli:** Bu model, hem direkt hem de compound çekirdek reaksiyonlarını birleştirir. Reaksiyonun farklı aşamalarını tek bir çerçevede değerlendirir.
3. **Geometri Bağımlı Hibrit Modeli:** Hibrit modelin daha da geliştirilmiş halidir. Çekirdeklerin geometrik yapısına bağlı olarak reaksiyonları inceleyen bu model, daha kesin sonuçlar sunar.
4. **Intra Nükleer Kaskad Modeli:** Bu model, nükleer reaksiyonlarda meydana gelen parçacıkların iç içe geçmiş kaskadlarını analiz eder. Özellikle yüksek enerjili parçacıkların etkileşimlerini incelemek için kullanılır.

Bu modeller, nükleer reaksiyonları daha iyi anlamak ve analiz etmek için önemli araçlar sağlar.

3.4.1.1. Nükleer Reaksiyonlardaki Denge-Öncesi Modellerin Ortak Özellikleri

Bu çalışmada, dört temel model kullanılmıştır. Bunlardan yalnızca Cascade Exciton modeli, yüksek enerji düzeylerinde (GeV) hesaplamalar yapabilirken, diğer üç model orta enerjili dengeöncesi reaksiyon hesaplamalarını yapabilmektedir. Tüm modeller, gerekli istatistiksel yöntemleri içerir. Referans hesaplamaları için perturbe teorisinden yararlanılır ve tüm hesaplamalar en yüksek seviyede matematiksel yöntemlerle yapılır. Bu modeller, pratik olarak yayılan parçacıkların toplam enerji spektrumları ve reaksiyon üretim tesir kesitlerinin hesaplanmasını sağlar, bu da deney öncesinde araştırmacıların işini kolaylaştırır. Ayrıca, tüm modellerde istatistiksel yöntemler birlikte kullanılarak gerekli hesaplamalarda çekirdeğin yapısı ve açısal momentumun etkisi dikkate alınmamıştır (Yıldırım, 2009).

3.4.1.2. Cascade Exciton Model

Yüksek enerjili olmayan parçacıklarla hedef çekirdek arasında gerçekleşen reaksiyonların denge-öncesi hesaplamalarında Cascade Exciton Modeli (CEM) sıkça kullanılan bir yöntemdir. Gönderilen parçacık, hedef çekirdekte exciton sürecini başlatır ve bu nükleer sistem, istatistiksel dengeye ulaşana kadar parçacık yayımlamaya devam eder. Bu yayımlanma süreci, oluşmuş bileşik çekirdek bozunmaları ve doğrudan etkileşimler üzerinden incelenir. Denge ve denge-öncesi modeller kullanıldığında, nükleer yapının anlaşılması ve parçacık yayılma mekanizmasının açıklanması mümkündür. Yüksek enerjilerde nükleer reaksiyonların birçok özelliği, nükleer seviyelerde ardışık geçiş işlemleri (Cascade) dikkate alınarak gözlemlenebilir. Cascade Modeli, reaksiyonların üç aşamada gerçekleştiğini kabul eder: İlk aşama nükleer seviyelerdeki geçiş, ikinci aşama denge-öncesi, üçüncü aşama ise denge (veya bileşik çekirdek) durumudur. Bu üç aşama genel olarak deneysel olarak ölçülen değerlere katkı sağlar. Buna göre parçacık spektrumu için;

$$\sigma(p)dp = \sigma_{in} \{N_{cas}(p) + N_{preq}(p) + N_{eq}(pt)\} dp \quad (3.3)$$

yazılabilmektedir. Bu denklemdeki inelastik saçılma reaksiyon üretim tesir kesiti, ardışık geçiş modeli kullanılarak hesaplanır ve optiksel model hesaplamalarından bağımsızdır. (Gudima, Mashnik, ve Toneev, 1983) Bu nedenle, bu model hesaplamalarında normalize katsayısına veya ek veriye ihtiyaç yoktur. Cascade Modeli, hızlı parçacıkların kinematik özelliklerini içeren reaksiyon geometrisini dikkate alır ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimleri ihmal eder (Şarer, Aydın, Günay, Korkmaz, ve Tel, 2009).

Bu çalışmada, nükleer reaksiyonların analizinde Cascade Exciton Model (CEM) kullanılmıştır. Bu amaçla, CEM03.1 programı kullanılarak hedef olarak seçilen elementlerin spallasyon reaksiyonları incelenmiş ve bu reaksiyonların sonuçları değerlendirilmiştir. CEM03.1 programı, yüksek enerjili parçacıkların çekirdeklerle etkileşimlerini modelleyerek izotop oluşum süreçlerini simüle etmeye imkan tanımaktadır. Bu sayede, farklı enerji seviyelerinde meydana gelen spallasyon reaksiyonlarının detaylı bir analizi yapılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Hesaplama Yöntemi

Bu çalışmada, U^{233} ve Au^{197} gibi elementler hedef madde olarak kullanılarak üzerlerine 500-800 MeV enerji aralıklarına sahip hızlandırılmış protonlar gönderildi ve bu çarpışmalar sonucunda ortaya çıkacak izotopların üretim tesir kesitleri hesaplandı. Hesaplamalar CEM03.1 bilgisayar programı kullanılarak yapıldı. CEM03.1 programı, Cascade-Exciton Modeli'ni (CEM) kullanarak bu hesaplamaları yapmaktadır. Elde edilen teorik veriler, NEA-Fransa (Nuclear Energy Agency) data banktan elde edilen deneysel verilerle karşılaştırıldı. NEA, OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı) bünyesinde faaliyet gösteren uluslararası bir kuruluştur ve nükleer enerji alanındaki araştırmaları koordine ederek topladığı verileri bilimsel ve teknolojik gelişmeler için kullanıma sunar. Bu karşılaştırma sayesinde, teorik hesaplamaların doğruluğu ve güvenilirlik seviyeleri değerlendirilerek, nükleer reaksiyonların anlaşılması ve enerji verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

4.1.1. CEM03.1 Programı: Cascade-Excitation Modeli

Cascade Excitation Modeli (CEM), nükleer reaksiyonları analiz eden kapsamlı bir hesaplama modeli olarak kullanılmaktadır. Bu model, çarpışmalar sırasında ve sonrasında meydana gelen çok aşamalı süreçleri simüle edebilmektedir. CEM03.1, bu modeli kullanarak yüksek enerjili protonların hedef elementlerle etkileşimlerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Modelin temel prensibi, ilk çarpışma sonrası oluşan yüksek enerjili parçacıkların kademeli olarak enerji kaybetmesi ve uyarılmış hallerin oluşmasıdır. Bu olaylar zinciri, izotopların oluşumunu ve dağılımını belirler. CEM03.1'in hesaplamaları, deneysel verilerle yüksek uyumluluk göstererek güvenilirlik sağlamaktadır. Bu yöntem, özellikle nükleer mühendislik ve yüksek enerjili fizik alanlarında geniş kullanım bulmaktadır (Mashnik, 2003).

CEM03.1 programı kapsamında, 400.000 elastik çarpışma gerçekleştirildi ve bu çarpışmalar 500 ve 800 MeV enerjilerindeki protonlarla sağlandı. Bu işlemler sonucunda meydana gelen spallasyon olayları incelendi ve açığa çıkan tüm izotopların tesir kesitleri detaylı bir şekilde analiz edildi. Bu araştırma, yüksek enerjili protonların nükleer reaksiyon mekanizmaları üzerindeki etkilerini anlamak için önemli veriler sağladı.

4.1.2. NEA Fransa (Nuclear Energy Agency)

OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı) bünyesinde faaliyet gösteren uluslararası bir kuruluştur. Bu kurum, nükleer enerji alanındaki bilimsel araştırmalar ve veri toplama çalışmalarını koordine etmekte ve bu verileri bilimsel ve teknolojik gelişmeler için kullanıma sunmaktadır. Nükleer enerji teknolojisinin güvenli, sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir hale getirilmesini sağlamaktır. Bu bağlamda nükleer güvenlik, radyoaktif atık yönetimi, nükleer teknoloji ve ekonomik analizler gibi çeşitli alanlarda faaliyet göstermektedir. Üye ülkeler arasında bilgi ve deneyim paylaşımını teşvik eden Nükleer enerjiyle ilgili uluslararası işbirliğini güçlendirmiştir. Ayrıca nükleer enerjiye ilişkin yasal ve düzenleyici çerçevelerin geliştirilmesine de katkıda bulunmuştur (Smith ve ark., 2024).

Bu programlar ve modellerle yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu şekilde, izotopların üretim süreçlerinin ve tesir kesitlerinin daha iyi anlaşılması sağlanmıştır. Böylece, nükleer reaksiyonların ve çarpışmaların derinlemesine anlaşılması mümkün olmuştur.

Bu çalışmada, Altın (Au^{197}) ve Uranyum (U^{233}) elementlerine 500-800 MeV enerji aralığında hızlandırılmış proton demetleri gönderildi. Bu yüksek enerjili çarpışmalar sonucunda oluşan izotopların üretim tesir kesitlerini belirlemek amacıyla CEM03.1 bilgisayar programı kullanıldı. CEM03.1 programı, nükleer reaksiyonları analiz etmek için Cascade-Exciton Modeli'ni kullanarak simülasyonlar yapılmıştır. Elde edilen teorik veriler, NEA (Nuclear Energy Agency) databanktan alınan deneysel verilerle karşılaştırıldı.

OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı) bünyesinde faaliyet gösteren uluslararası bir kuruluştur ve nükleer enerji alanındaki araştırmaları koordine ederek topladığı verileri bilimsel ve teknolojik gelişmeler için kullanıma sundu (NEA, 2024).

Bu karşılaştırma, kullanılan yazılımların doğruluk ve güvenilirlik seviyelerini değerlendirme fırsatı sunmaktadır. Böylece, CEM03.1 programının nükleer reaksiyonların simülasyonundaki performansı ve güvenilirliği test edilerek, enerji yükseltici sistemlerin tasarımı ve optimizasyonu açısından kritik veriler elde edildi. Bu değerlendirme, yazılımların bilimsel araştırmalar ve mühendislik uygulamaları için ne derece güvenilir olduklarını ortaya koyarak, gelecekte yapılacak çalışmalar için değerli bilgiler sağlayacak ve nükleer reaksiyonların daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacaktır. Araştırma kapsamında, Altın (Au^{197}) ve Uranyum (U^{233}) elementlerine 500-800 MeV enerji gönderilerek elde edilen veriler, CEM03.1 programı simülasyon sonuçları ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler karşılaştırıldı. Bu süreç, farklı enerji seviyelerinde elementlerin spalasyonu sonucu oluşan elementlerin ve izotoplarının elde edilmesi maksadı ile nasıl davrandığını ve reaksiyon verdiğini belirlemek amacıyla gerçekleştirildi. Elde edilen simülasyon verileri ile deneysel verilerin karşılaştırılması, kullanılan yazılımların doğruluk ve güvenilirlik seviyelerinin değerlendirilmesine olanak tanımış oldu. Bu değerlendirme, enerji yükseltici sistemlerin tasarımı ve optimizasyonu açısından kritik bir öneme sahiptir. Böylece, bu yazılımların bilimsel araştırmalar ve mühendislik uygulamaları için ne derece güvenilir oldukları ortaya konulmuştur.

4.2. Reaksiyonlar

4.2.1. $p+U^{233}$ Nükleer Reaksiyonu

U^{233} (Uranyum-233), nükleer enerji üretiminde önemli bir rol oynayan ve çeşitli araştırmalarda kullanılan bir izotoptur. Uranyum-233; Toryum-232 ve Uranyum-232'nin nötronlarla bombardımana tutulması sonucu oluşur. Bu izotop, nükleer santrallerde yakıt olarak kullanıldığında, fisyon reaksiyonları aracılığıyla büyük miktarda enerji açığa çıkarır. Teorik olarak, U^{233} , ağır elementlerin nötronlarla bombardımanı sonucu oluşan fisyon izotoplarından biridir. U^{233} 'ün bu enerji üretim potansiyeli, onu nükleer enerji sektöründe değerli bir kaynak haline getirir. Nükleer reaktörlerde kullanıldığında,

nötronları yakalayıp fisyon yoluyla parçalanarak enerji üreten U^{233} , özellikle enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji üretimi konusunda büyük avantajlar sunar. Ayrıca U^{233} , diğer fisyon ürünleri ve yan ürünler üretirken, nükleer atık yönetimi konularında da önemli rol oynar. Bu izotopun kullanımı, enerji üretiminin yanı sıra, nükleer silahların yayılmasının önlenmesi ve nükleer tıp gibi alanlarda da araştırmalara konu olmaktadır. Farklı enerjilerde $p+U^{233}$ reaksiyon sonucunda oluşan izotopların üretim tesir kesitleri Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1. 500-800 MeV Enerjili protonlar ile U^{233} hedef elementin spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri

CEM03.1 Programında Farklı Enerjilerde $p+U^{233}$ reaksiyon sonucunda oluşan izotopların üretim tesir kesitleri					
500 MeV			800 MeV		
Z	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)
92	233	4,207	92	233	3,108
	232	61,200		232	45,790
	231	17,460		231	12,190
	230	14,980		230	11,280
	229	8,689		229	11,650
	228	5,585		228	6,424
	227	2,450		227	2,954
	226	1,151		226	1,601
	225	0,331		225	0,507
	224	0,100		224	0,176
	223	0,013		223	0,041
	222	0,004		222	0,009
91	232	0,227	91	232	0,213
	231	1,474		231	1,194
	230	21,420		230	14,230
	229	14,760		229	10,260
	228	7,856		228	6,577
	227	8,152		227	9,979
	226	5,310		226	6,356
	225	4,617		225	5,293
	224	2,786		224	3,185
	223	2,180		223	2,624
	222	1,251		222	1,696
	221	0,445		221	0,873
90	220	0,148	90	220	0,276
	219	0,070		219	0,167
	218	0,013		218	0,054
	232	0,000		232	0,000
	231	0,022		231	0,023
	230	0,183		230	0,167
	229	0,349		229	0,299
	228	0,868		228	0,841
	227	1,504		227	1,054
	226	2,354		226	1,968
	225	2,206		225	1,787
	224	2,324		224	2,420
	223	1,199		223	1,561

Tablo 4.1. (Devam) 500-800 MeV Enerjili protonlar ile U^{233} hedef elementin spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri

500 MeV			800 MeV		
Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)
90	222	1,094		222	1,325
	221	0,375		221	0,493
	220	0,196		220	0,231
	219	0,013		219	0,063
	218	0,004		218	0,023
89	229	0,004	89	229	0,009
	228	0,013		228	0,027
	227	0,070		227	0,054
	226	0,148		226	0,140
	225	0,336		225	0,281
	224	0,523		224	0,348
	223	0,859		223	0,742
	222	1,190		222	0,918
	221	1,870		221	1,601
	220	1,962		220	1,742
	219	3,126		219	2,497
	218	2,768		218	2,398
88	225	0,022	88	226	0,009
	224	0,048		225	0,014
	223	0,074		224	0,041
	222	0,157		223	0,045
	221	0,166		222	0,122
	220	0,401		221	0,176
	219	0,388		220	0,357
	218	0,772		219	0,403
	217	0,715		218	0,823
	216	1,168		217	0,900
	215	0,959		216	1,448
	214	1,796		215	1,375
	213	1,700		214	2,375
	212	1,622		213	2,198
	211	1,181		212	2,103
	210	1,181		211	1,615
	209	0,641		210	1,574
	208	0,523		209	0,850
	207	0,244		208	0,602
	206	0,122		207	0,290
	205	0,026		206	0,240
	204	0,004		205	0,036
87	220	0,022	87	221	0,014
	219	0,074		220	0,041
	218	0,100		219	0,045
	217	0,140		218	0,050
	216	0,170		217	0,127
	215	0,375		216	0,145
	214	0,379		215	0,385
	213	0,885		214	0,561
	212	0,994		213	1,199
	211	1,395		212	1,420
	210	1,081		211	1,656
	209	1,103		210	1,529
	208	0,750		209	1,520
	207	0,794		208	1,267

Tablo 4.1. (Devam) 500-800 MeV Enerjili protonlar ile U^{233} hedef elementin spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri

500 MeV			800 MeV		
Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)
87	206	0,445	87	207	1,203
	205	0,336		206	0,873
	204	0,161		205	0,850
88	225	0,022	88	226	0,009
	224	0,048		225	0,014
	223	0,074		224	0,041
	222	0,157		223	0,045
	221	0,166		222	0,122
	220	0,401		221	0,176
	219	0,388		220	0,357
	218	0,772		219	0,403
	217	0,715		218	0,823
	216	1,168		217	0,900
	215	0,959		216	1,448
	214	1,796		215	1,375
	213	1,700		214	2,375
	212	1,622		213	2,198
	211	1,181		212	2,103
	210	1,181		211	1,615
	209	0,641		210	1,574
	208	0,523		209	0,850
	207	0,244		208	0,602
	206	0,122		207	0,290
	205	0,026		206	0,240
	204	0,004		205	0,036
87	220	0,022	87	221	0,014
	219	0,074		220	0,041
	218	0,100		219	0,045
	217	0,140		218	0,050
	216	0,170		217	0,127
	215	0,375		216	0,145
	214	0,379		215	0,385
	213	0,885		214	0,561
	212	0,994		213	1,199
	211	1,395		212	1,420
	210	1,081		211	1,656
	209	1,103		210	1,529
	208	0,750		209	1,520
	207	0,794		208	1,267
	206	0,445		207	1,203
	205	0,336		206	0,873
	204	0,161		205	0,850

Tablo 4.1. (Devam) 500-800 MeV Enerjili protonlar ile U^{233} hedef elementin spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri

500 MeV			800 MeV		
Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)
86	216	0,009	86	216	0,036
	215	0,057		215	0,041
	214	0,061		214	0,059
	213	0,070		213	0,095
	212	0,179		212	0,271
	211	0,331		211	0,403
	210	0,532		210	0,710
	209	0,510		209	0,728
	208	0,606		208	1,059
	207	0,571		207	0,941
	206	0,680		206	1,267
	205	0,663		205	1,000
	204	0,711		204	1,348
	203	0,506		203	0,964
85	214	0,004	85	216	0,005
	213	0,009		215	0,005
	212	0,009		213	0,009
	211	0,070		212	0,018
	210	0,188		211	0,109
	209	0,562		210	0,294
	208	1,064		209	0,909
	207	1,918		208	1,461
	206	2,162		207	2,827
	205	3,204		206	3,592
	204	2,655		205	5,442
	203	2,690		204	5,306
	202	1,940		203	6,804
	201	1,539		202	5,487
	200	0,876		201	5,157
	199	0,484		200	3,225
	198	0,188		199	1,972
	197	0,122		198	1,095

Spallasyon reaksiyonları sırasında U^{233} 'ün kullanımı, 500 ile 800 MeV enerji aralıklarında protonlarla bombardıman edilerek, nükleer reaksiyon fisyon süreçlerinin anlaşılmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik deneysel analizlerle karşılaştırılacaktır. Bu analizlerde, farklı enerji aralıkları incelenecektir. Literatürdeki çalışmalar genellikle daha düşük enerjilerde gerçekleştirilmiştir ve U^{233} 'ün yapay bir element olması nedeniyle deneysel veriler sınırlıdır. Bu nedenle, sadece CEM03.1 programı kullanılarak elde edilen teorik veriler ile Nea Fransa data banktan elde edilen deneysel veriler karşılaştırılacaktır. Bu çeşitli enerji aralıklarında yapılan kıyaslamalar sonucunda, üretim tesir kesitleri belirlenecek ve elde edilen veriler literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılacaktır. 500 ile 800 MeV arasındaki enerji değerleri literatür ile karşılaştırılacak ve grafiklerle yorumlanacaktır. Bu karşılaştırma, nükleer reaksiyonların

ve enerji verimliliğinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacak ve kullanılan yazılımların doğruluk ve güvenilirlik seviyelerini değerlendirme fırsatı sunacaktır.

CEM03.1 programında farklı enerjilerde gerçekleşen $p + U^{233}$ reaksiyonu sonucunda (A) kütle numarasına bağlı üretim tesir kesitleri verilmiştir. Tesir kesiti, belirli bir reaksiyonun gerçekleşme olasılığını ölçen bir büyüklüktür ve enerjinin fonksiyonu olarak değişir. Bu değerler, nükleer fizik ve mühendislik alanlarında, özellikle nükleer reaktör tasarımı ve radyasyon güvenliği çalışmalarında önemli bir rol oynar.

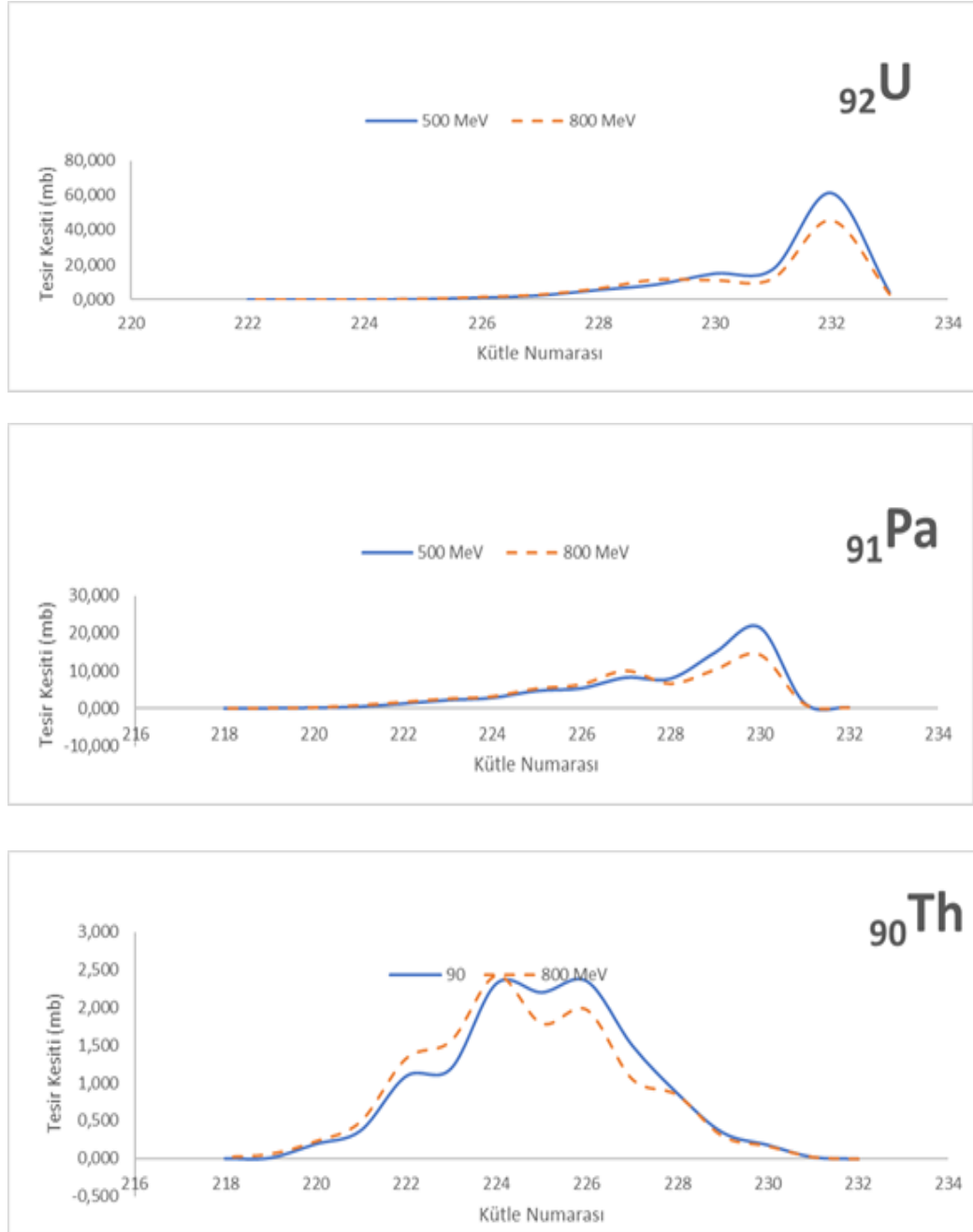
Tablo 4.1’de yer alan veriler, 500-800 MeV enerji seviyelerinde $p + U^{233}$ izotopunun protonlarla etkileşimi sonucunda oluşan ürünlerin tesir kesitlerini içerir. Bu veriler, nükleer reaksiyonların anlaşılması ve modelleme çalışmalarında önemli bir rol oynar. Özellikle, nükleer reaktörlerin ve diğer nükleer teknolojilerin tasarımında ve optimizasyonunda kullanılır.

CEM03.1 programı, karmaşık nükleer reaksiyonları simüle ederek, farklı enerji seviyelerinde hangi ürünlerin oluşacağını ve bu ürünlerin tesir kesitlerini belirlemeye yardımcı olur. Bu sayede, araştırmacılar ve mühendisler, belirli bir enerji aralığında en verimli ve güvenli nükleer reaksiyonları seçebilirler.

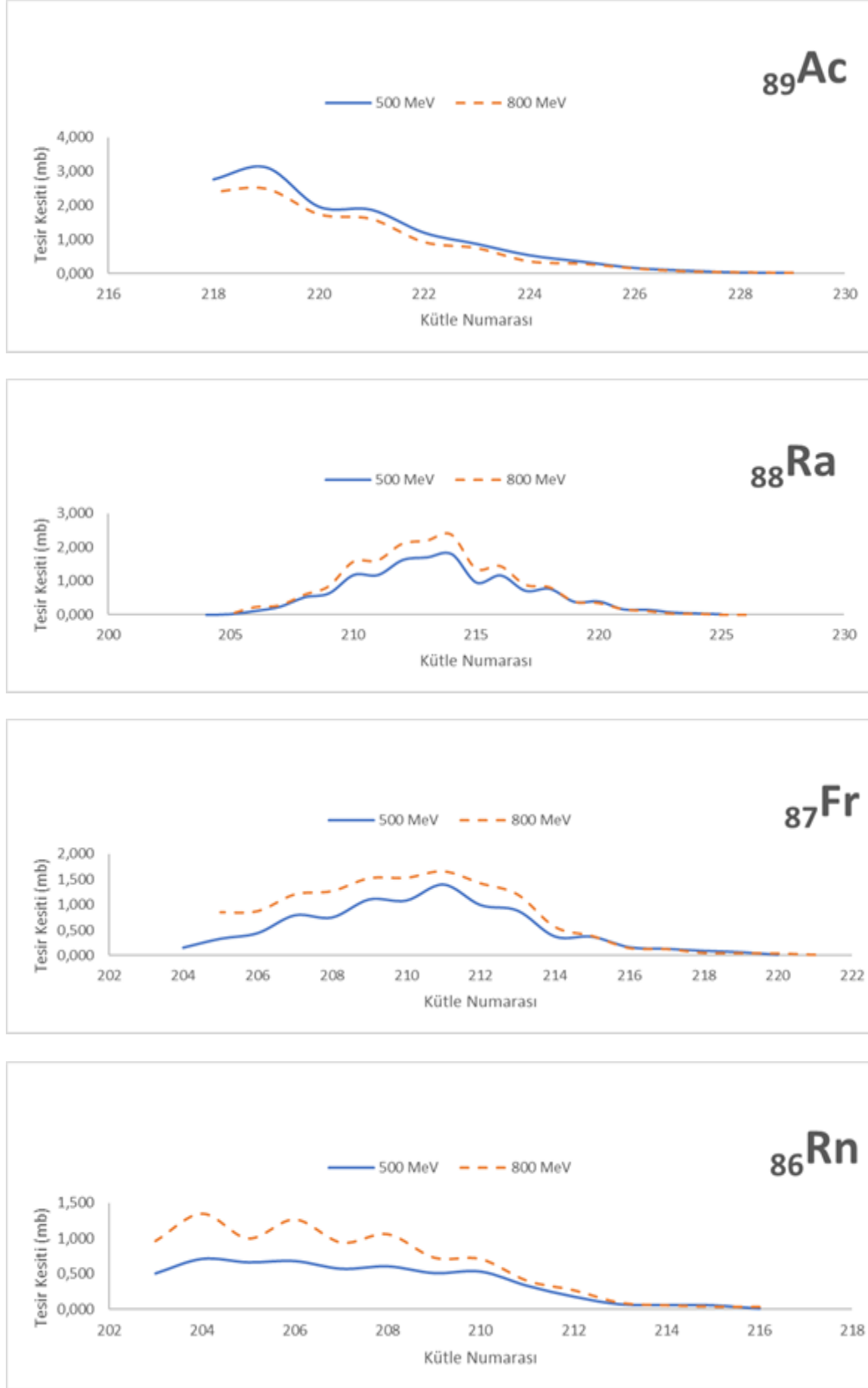
NEA (EXFOR) veri tabanında, yüksek enerjilerde deneysel veriler bulunmadığı için sadece bu çalışmada kullanılan CEM03.1 programına ait enerji değerleriyle yapılan karşılaştırmalar yer almaktadır. Şekil 4.1.de özellikle 500-800 MeV enerji aralığında yapılan simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Grafik, farklı enerji seviyelerinde $p + {}_{92}U^{233}$ reaksiyonu sonucunda (A) kütle numarasına bağlı üretim tesir kesitlerini karşılaştırmak için oluşturulmuştur.

Yüksek enerjilerde deneysel verilerin olmaması nedeniyle, bu çalışmada sadece CEM03.1 programı tarafından sağlanan simülasyon verileri kullanılmıştır. Bu durum, deneysel verilerin eksikliği nedeniyle karşılaştırmaların sınırlı olduğunu ve yalnızca simülasyon sonuçlarına dayandığını göstermektedir. Ancak, bu simülasyon sonuçları,

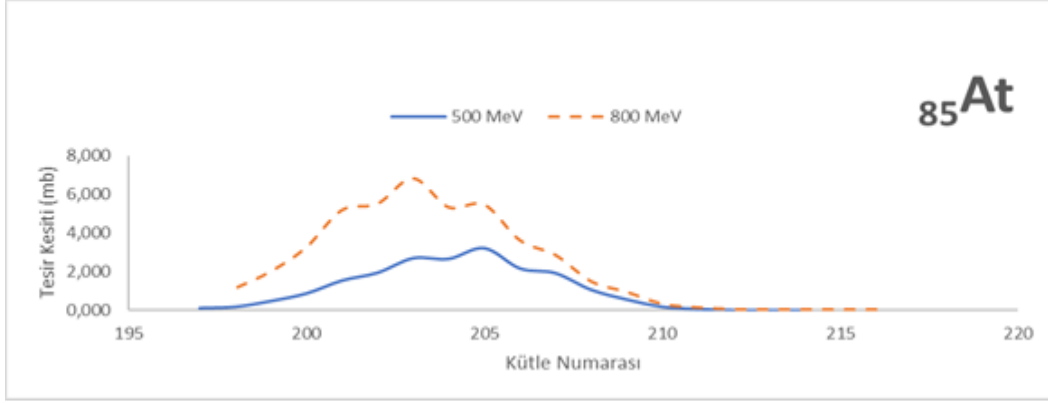
yüksek enerjili nükleer reaksiyonların anlaşılması ve modelleme çalışmaları için önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 4.1. 500-800 MeV Enerjili protonlar ile U^{233} hedef elementin spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin oluşum tesir kesitleri



Şekil 4.1. (Devam): 500-800 MeV Enerjili protonlar ile U^{233} hedef elementin spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin oluşum tesis kesitleri



Şekil 4.1. (Devam): 500-800 MeV Enerjili protonlar ile U^{233} hedef elementin spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin oluşum tesir kesitleri

Bu şekiller, CEM03.1 hedef programında, $p + U^{233}$ izotopu ile 500-800 MeV enerjilerde (A) kütle numarasına bağlı reaksiyon üretim tesir kesitlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 4.1’de, $Z = 92-85$ arası elementler için üretim tesir kesit değerleri yer almaktadır. Tesir kesiti, belirli bir reaksiyonun gerçekleşme olasılığını ölçen bir büyüklüktür ve enerjinin fonksiyonu olarak değişir. Bu değerler, nükleer fizik ve mühendislik alanlarında, özellikle nükleer reaktör tasarımı ve radyasyon güvenliği çalışmalarında önemli bir rol oynar. Şekil 4.1’de, farklı enerji seviyelerinde U^{233} hedef elementin proton ile spallasyonu sonucunda oluşan izotopların oluşumu karşılaştırılarak hangi enerji seviyelerinde hangi elementlerin daha fazla üretildiği gösterilmiştir.

4.2.2. $p + Au^{197}$ Nükleer Reaksiyonu

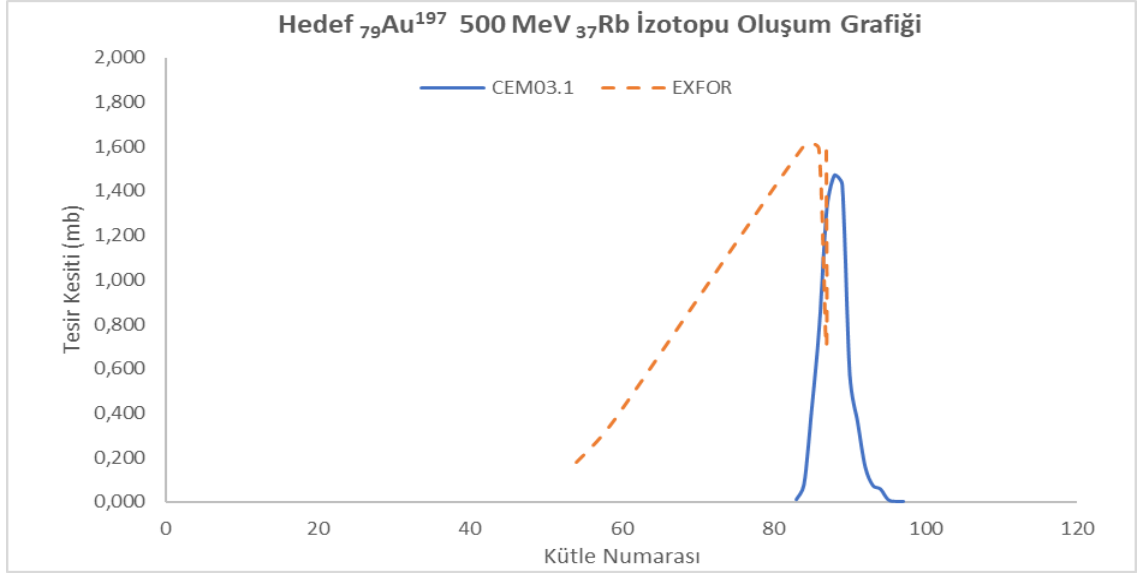
Au^{197} (Altın), nükleer fizikte ve çeşitli teknolojik uygulamalarda kullanılan değerli bir izotoptur. Altın-197, nötronlarla bombardıman edildiğinde, Altın-198 izotopu oluşur. Teorik olarak, Au^{197} , nötronların atom çekirdeği ile etkileşimi sonucu izotop değişimlerinin incelendiği bir elementtir. Bu izotop, radyoaktif özelliklere sahip olup, nötron emisyonu ve termal nötron detektörlerinde kullanılmaktadır. $^{197}_{79}Au$ ’nin nötronlarla etkileşimi, nükleer araştırmaların yanı sıra, tıp ve endüstride de önemli uygulamalara sahiptir. Örneğin, altın izotopları, kanser tedavisinde radyasyon terapisi olarak kullanılırken, aynı zamanda malzeme bilimlerinde ve kimyasal analizlerde de değerlendirilmektedir. Au^{197} ’nin bu çeşitli kullanımları, onu nükleer bilim ve teknoloji alanında çok yönlü bir element haline getirir.

Spallasyon reaksiyonları sırasında Au^{197} kullanarak, 500 ile 800 MeV enerji aralıklarında protonlarla bombardıman yapıp reaksiyon sonuçlarına bakıldı. Farklı enerji aralıklarında hesaplamalar yapılmıştır. Bu çeşitli enerji aralıklarında elde ettiğimiz sonuçları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıyoruz. Bu çalışma, altının nükleer bilimdeki önemini vurgulayan Mevcut araştırmalarla paralel olarak, $^{79}Au^{197}$ izotopunun çeşitli enerji seviyelerinde gösterdiği davranışları detaylandırıyor. Literatürde, Au-197 izotopuna ait yeterli deneysel veriler bulunmakta ve bu verileri teorik hesaplamalarla karşılaştırıyoruz. Bu nedenle, sadece CEM03.1 programı kullanarak elde ettiğimiz teorik veriler ile NEA'dan elde edilen deneysel verileri karşılaştırıyoruz. Bu karşılaştırmalar sonucunda, kullandığımız yazılımların doğruluk ve güvenilirlik seviyelerini değerlendiriyor ve nükleer reaksiyonları daha iyi anlamamıza katkı sağlıyoruz. Böylece, bu yazılımların bilimsel araştırmalar ve mühendislik uygulamaları için ne derece güvenilir olduklarını ortaya koyuyoruz.

Tablo 4.2. 500 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Ross ve Bachmann, 1974)

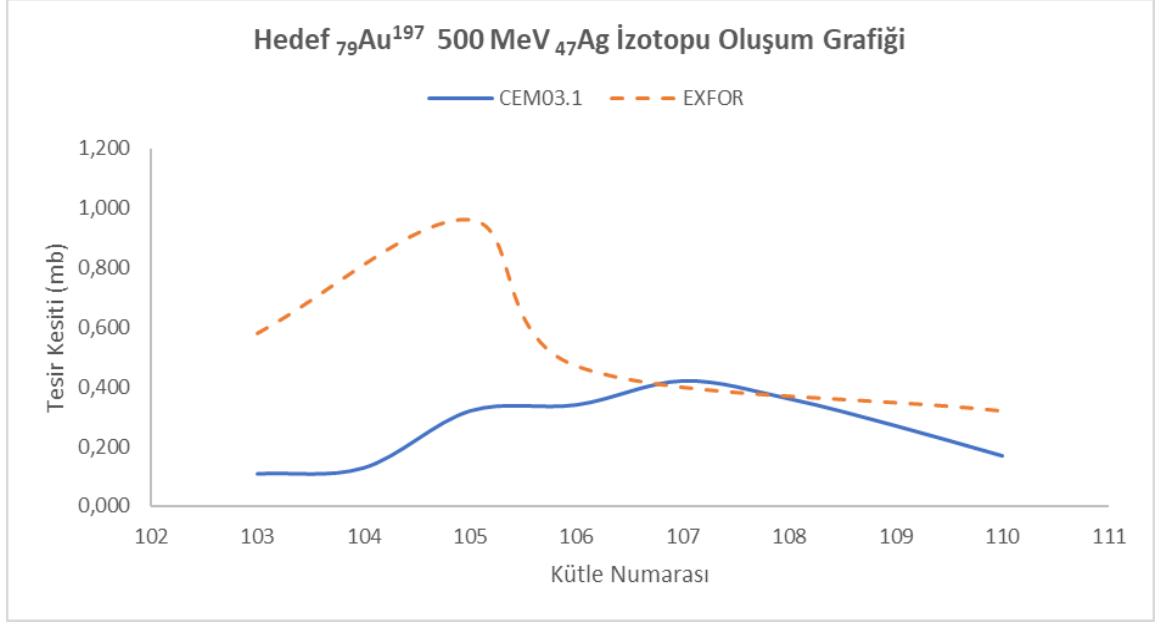
Au¹⁹⁷ Hedef Elementin 500 MeV Enerjili Protonlar İle Spallasyonu Sonucu İzotop Oluşum Tesir						
Proton Enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Verileri			Nuclear Energy Agency (EXFOR) Deneysel Veriler (Ross ve Bachmann,		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti (mb)
500 MeV	37	83	0,012	37	46	0,075
		84	0,080		54	0,180
		85	0,416		59	0,370
		86	0,792		84	1,600
		87	1,324		86	1,590
		88	1,472		87	0,700
		89	1,428		87	1,590
		90	0,572	47	94	0,150
		91	0,364		95	1,400
		92	0,160		96	0,580
		93	0,076		103	0,960
		94	0,060		105	0,470
		95	0,012		106	0,320
		96	0,004		110	0,310
		97	0,004		83	1,590
	47	101	0,004	79	88	0,580
		102	0,030		151	0,420
		103	0,110		148	0,590
		104	0,130			
		105	0,320			
		106	0,340			
		107	0,420			
		108	0,360			
		109	0,270			
		110	0,170			
	79	111	0,170			
		112	0,030			
		113	0,030			
		114	0,004			
		115	0,010			
		181	0,023			
		182	0,074			
		183	0,642			
		184	1,381			
		185	5,986			
		186	8,435			
		187	13,980			
		188	15,070			
		189	21,400			
		190	19,170			
		191	24,820			
		192	21,330			
		193	29,900			
		194	22,770			
		195	33,980			
		196	53,890			
		197	6,100			

Au^{197} izotopunun 500 MeV enerji seviyelerinde protonlarla spallasyon reaksiyonları incelenmektedir. CEM03.1 teorik modeli kullanılarak elde edilen reaksiyon tesir kesitleri, EXFOR veri tabanında yer alan deneysel verilerle karşılaştırılmaktadır. Hazırlanan tabloda, farklı enerji seviyelerinde gözlemlenen üretim tesir kesitleri listelenmiş ve teorik ile deneysel sonuçlara ait veriler yer almaktadır.



Şekil 4.2. Au^{197} hedef elementin 500 MeV enerjili protonlar ile spallasyonu sonucunda oluşan $37Rb$ izotoplarının oluşum tesir kesitlerinin CEM03.1 ve EXFOR deneysel veri kıyaslama grafiği. (Ross ve Bachmann, 1974)

Şekil 4.2’de, Au^{197} hedefi için 500 MeV enerji seviyelerinde protonlarla yapılan spallasyon reaksiyonlarının tesir kesitleri yer almaktadır. Yatay eksen, kütle numarasını ve dikey eksen, tesir kesitini (mb) göstermektedir. Grafikte iki farklı veri seti bulunmaktadır: CEM03.1 teorik modeli ve EXFOR deneysel verileri. Şekil 4.2 CEM03.1 programı kullanılarak elde edilen teorik veriler ile EXFOR veri tabanında yer alan deneysel verilerin karşılaştırılmasını sunmaktadır. Farklı enerji seviyelerinde gözlemlenen üretim tesir kesitlerinin karşılaştırılması, teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumu değerlendirmektedir.



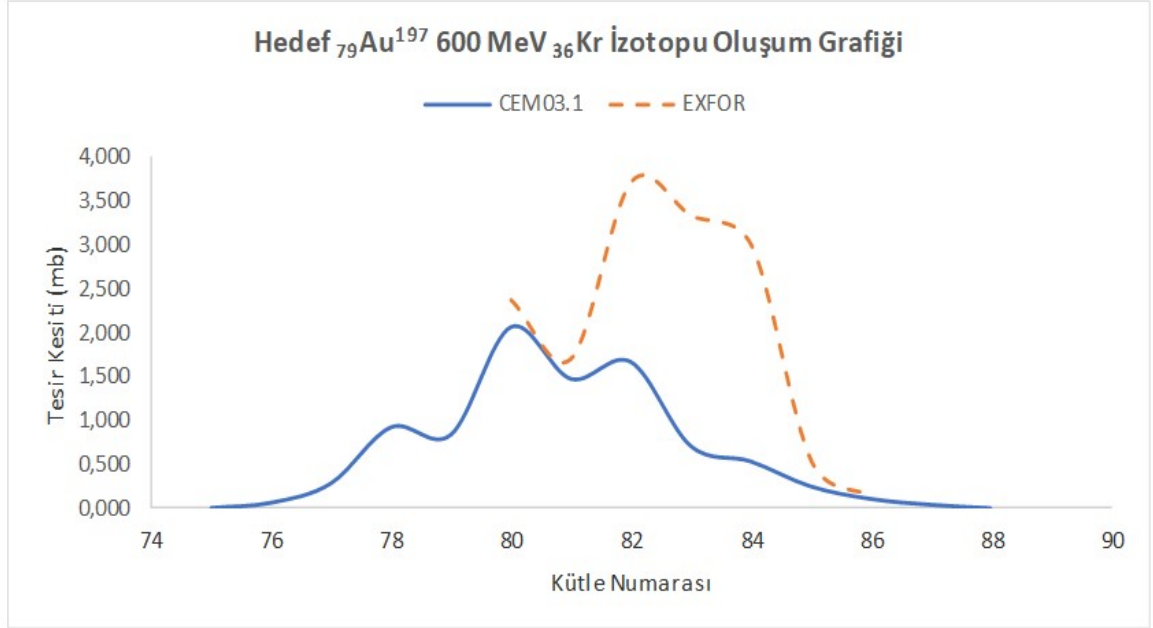
Şekil 4.3. ^{197}Au hedef elementin 500 MeV enerjili protonlar ile spallasyonu sonucunda oluşan ^{47}Ag izotoplarının oluşum tesis kesitlerinin CEM03.1 ve EXFOR deneysel veri karşılaştırma grafiği (Ross ve Bachmann, 1974)

Şekil 4.3’de, ^{197}Au hedefi için 500 MeV enerjili protonlarla yapılan spallasyon reaksiyonlarının tesis kesitleri yer almaktadır. Yatay eksen, kütle numarasını (kütle numarası) ve dikey eksen, tesis kesitini (mb) göstermektedir. Grafikte CEM03.1 teorik ve EXFOR deneysel verileri olmak üzere iki farklı veri seti bulunmaktadır: Aynı enerji seviyelerinde gözlemlenen üretim tesis kesitlerinin karşılaştırılması, teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumu değerlendirmektedir.

Tablo 4.3. 600 MeV Enerjili protonlar ile Au¹⁹⁷ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu. (Michel ve ark., 1989)

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 600 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesitleri						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik verileri			Nuclear Energy Agency (EXFOR) Deneysel Veriler (Michel ve ark., 1989)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)
600 MeV	36	75	0,008	36	80	2,370
		76	0,068		81	1,700
		77	0,290		82	3,720
		78	0,930		83	3,330
		79	0,846		84	2,990
		80	2,074		85	0,520
		81	1,482		86	0,132
		82	1,676	54	88	0,610
		83	0,715		95	1,360
		84	0,540		103	0,189
		85	0,254		124	0,170
		86	0,111		126	0,230
		87	0,044		128	0,210
		88	0,004		129	0,190
	54	118	0,000		130	0,044
		119	0,012		131	0,160
		120	0,012	65	149	0,300
		121	0,040	71	171	20,700
		122	0,020	71	173	65,600
		123	0,024	72	172	24,200
		124	0,044	72	175	42,600
		125	0,040	76	185	60,300
		126	0,032	79	196	77,000
		127	0,012			
		128	0,020			
		130	0,004			
	65	145	0,000			
		146	0,075			
		147	0,159			
		148	0,139			
		149	0,230			
		150	0,127			
		151	0,072			
		152	0,028			
	79	153	0,036			
		154	0,000			
		190	16,880			
		191	21,310			
		192	18,710			
		193	29,400			
		194	19,950			
		195	29,360			
		196	48,540			
		197	5,275			

Tablo 4.3’de Au^{197} izotopunun 600 MeV enerji seviyelerinde protonlarla spallasyon reaksiyonları incelenmektedir. CEM03.1 teorik modeli kullanılarak elde edilen reaksiyon tesir kesitleri, EXFOR veri tabanında yer alan deneysel verilerle karşılaştırılmaktadır. Hazırlanan tabloda, farklı enerji seviyelerinde gözlemlenen üretim tesir kesitleri listelenmiş ve teorik ile deneysel sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.4. Au^{197} hedef elementin 600 MeV enerjili protonlar ile spallasyonu sonucunda oluşan ^{36}Kr izotoplarının oluşum tesir kesitlerinin CEM03.1 ve EXFOR deneysel veri karşılaştırma grafiği (Michel ve ark., 1989).

Şekil 4.4 Au^{197} hedefi için 600 MeV enerji seviyesinde tesir kesitini göstermektedir. Yatay eksen kütle numarasını (74'ten 90'a kadar) ve dikey eksen tesir kesitini (mb cinsinden) göstermektedir. Grafikte iki farklı veri seti bulunmaktadır: CEM03.1 verileri daha düşük tesir kesitleri gösterirken, EXFOR verileri daha yüksek tesir kesitleri göstermektedir. Grafik, kütle numarası 80 civarında iki zirve noktası göstermektedir. Bu grafik, nükleer reaksiyonların incelenmesi ve modelleme çalışmaları için önemlidir.

Tablo 4.4. 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti							
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)			
	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir Kesiti(mb)	kesiti
800 MeV	42	104	0,008	42	101	0,107	
		103	0,004		100	0,207	
		102	0,035		99	0,385	
		101	0,067		98	0,652	
		100	0,145		97	0,855	
		99	0,226		96	0,962	
		98	0,626		95	0,915	
		97	0,763		94	0,692	
		96	1,358		93	0,556	
		95	1,205		92	0,386	
		94	1,369		91	0,086	
		93	0,892	43	104	0,042	
		92	0,771		103	0,117	
		91	0,184		102	0,258	
		90	0,047		101	0,417	
		89	0,008		100	0,628	
		88	0,000		99	0,79	
	43	109	0,000		98	0,86	
		108	0,004		97	0,735	
		107	0,004		96	0,584	
		106	0,004		95	0,463	
		105	0,020		94	0,283	
		104	0,035		93	0,061	
		103	0,117	44	106	0,054	
		102	0,137		105	0,13	
		101	0,364		104	0,268	
		100	0,454		103	0,472	
		99	0,779		102	0,595	
		98	0,810		101	0,741	
		97	0,869		100	0,677	
		96	0,571		99	0,632	
		95	0,399		98	0,447	
		94	0,160		97	0,309	
		93	0,059		96	0,124	
		92	0,004	45	108	0,079	

Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
Proton enerjisi (MeV)	44	108	0,004	45	107	0,169
		107	0,008		106	0,244
		106	0,059		105	0,441
		105	0,074		104	0,49
		104	0,215		103	0,644
		103	0,325		102	0,541
		102	0,696		101	0,467
		101	0,724		100	0,333
		100	1,158		99	0,223
		99	1,103		98	0,068
		98	1,025	46	110	0,084
		97	0,524		109	0,183
		96	0,466		108	0,284
		95	0,145		107	0,367
		94	0,039		106	0,448
		93	0,000		105	0,426
	45	110	0,004		104	0,446
		109	0,016		103	0,267
		108	0,070		102	0,254
		107	0,157		101	0,122
		106	0,266	47	112	0,075
		105	0,556		111	0,158
		104	0,544		110	0,249
		103	0,892		109	0,311
		102	0,826		108	0,362
		101	0,876		107	0,372
		100	0,599		106	0,368
		99	0,360		105	0,241
		98	0,117		104	0,151
		97	0,063		103	0,104
		96	0,004		102	0,028
		95	0,004	48	114	0,067
		94	0,000		113	0,141
	46	114	0,000		112	0,206
		113	0,004		111	0,249
		112	0,004		110	0,286
		111	0,016		109	0,271
		110	0,067		108	0,207

Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
		109	0,090		107	0,163
		s108	0,207		106	0,091
		107	0,305		105	0,049
		106	0,626	49	116	0,088
		105	0,606		115	0,137
		104	0,728		114	0,173
		103	0,524		113	0,213
		102	0,407		112	0,24
		101	0,176		111	0,189
		100	0,094		110	0,154
		99	0,012		109	0,11
		98	0,004		108	0,07
	47	116	0,000		107	0,035
		115	0,012	50	119	0,046
		114	0,004		118	0,101
		113	0,027		117	0,131
		112	0,031		116	0,176
		111	0,168		115	0,179
		110	0,168		114	0,157
		109	0,266		113	0,142
		108	0,360		112	0,106
		107	0,423		111	0,066
		106	0,344		110	0,041
		105	0,325		109	0,024
	48	104	0,133	71	171	0,04
		103	0,106		170	0,1
		102	0,031		169	0,2
		101	0,004		168	0,47
		100	0,000		167	0,81
		117	0,004		166	1,56
		116	0,023		165	2,23
		115	0,031		164	3,48
		114	0,094		163	4,45
		113	0,137		162	5,66
		112	0,262		161	6,04
		111	0,293		160	5,71
		110	0,516		159	4,7
		109	0,430		158	3,57

Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
	49	108	0,571	72	157	1,9
		107	0,364		156	0,91
		106	0,364		155	0,32
		105	0,129		176	0,13
		104	0,063		175	0,31
		103	0,027		174	0,96
		102	0,000		173	2,3
		122	0,000		172	3,05
		121	0,004		171	4,6
		120	0,004		170	6,4
		119	0,000		169	8,56
		118	0,023		168	10,94
		117	0,020		167	13,47
		116	0,082		166	15,87
		115	0,125		165	13,25
		114	0,196		164	10,94
		113	0,317		163	8,56
		112	0,223		162	5,83
		111	0,278		161	3,93
		110	0,180		160	1,67
	50	109	0,114		159	0,14
		108	0,020	73	182	0,01
		107	0,012		181	0,06
		121	0,000		180	0,09
		120	0,020		179	0,22
		119	0,043		178	0,4
		118	0,082		177	0,76
		117	0,125		176	1,4
		116	0,121		175	2,26
		115	0,141		174	3,26
		114	0,223		173	4,55
		113	0,168		172	5,55
		112	0,290		171	7,11
		111	0,117		170	8,4
		110	0,102		169	10,3
		109	0,020		168	11,48
		108	0,004		167	11,48
	71	179	0,000		166	8,4

Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
		178	0,004	74	165	5,32
		177	0,012		164	3,11
		176	0,008		163	1,21
		175	0,016		162	0,31
		174	0,041		186	0,02
		173	0,069		184	0,12
		172	0,143		182	0,35
		171	0,310		180	0,65
		170	0,436		178	1,09
		169	0,892		176	1,8
		168	1,528		174	3,11
		167	3,027		172	4,6
		166	4,388		170	6,4
		165	7,272		168	8,56
		164	10,030		166	10,94
		163	13,650		164	13,47
		162	12,480		162	15,87
		161	12,520		170	13,25
		160	9,448		168	10,94
		159	6,759		166	7,81
		158	2,004		164	5,32
		157	0,493		162	2,2
		156	0,045		164	2,2
		155	0,004		164	0,65
		154	0,000		186	0,45
	72	180	0,004	75	185	0,76
		179	0,004		184	1,18
		178	0,020		183	2,1
		177	0,033		182	3,06
		176	0,102		181	4,37
		175	0,155		180	6,37
		174	0,196		179	8,53
		173	0,481		178	11,36
		172	0,782		177	13,85
		171	1,129		176	15,79
		170	2,787		175	16,89
		169	3,174		174	16,89
		168	7,826		173	12,4

Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
		167	9,199		172	12,4
		166	14,850		171	5,35
		165	12,770		170	1,48
		164	14,980		169	1,48
		163	8,389		168	0,56
		162	9,012		167	0,45
		161	3,911		166	0,13
		160	2,172		191	0,56
		159	0,179		190	0,74
		158	0,008		189	1,69
		157	0,000		188	2,81
					187	3,81
	73	184	0,000	76	186	5,04
		183	0,008		185	7,44
		182	0,016		184	9,7
		181	0,045		183	11,41
		180	0,065		182	13,42
		179	0,143		181	15,8
		178	0,163		180	18,57
		177	0,387		179	17,49
		176	0,440		178	16,23
		175	1,116		177	17,49
		174	1,467		176	18,93
		173	3,145		175	3,19
		172	3,760		174	3,15
		171	7,069		173	3,59
		170	8,189		172	3,19
		169	12,430		171	0,44
		168	12,390		170	0,14
		167	12,780		193	3,54
		166	9,391		192	4,18
		165	6,087		191	5,04
		164	3,398		190	6,05
		163	2,041		189	8,05
		162	0,412		188	9,82
		161	0,061		187	11,52
		160	0,008		186	13,51
	74	188	0,000		185	15,71
		187	0,008			

Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
		186	0,008		184	18,34
		185	0,008		183	19,43
		184	0,069		182	19,81
		183	0,086		181	20,13
		182	0,171		180	19,35
		181	0,232		179	18,33
		180	0,530		178	17,35
		179	0,811		177	16,58
		178	1,540		176	15,35
		177	2,290		175	13,16
		176	4,054		174	6,14
		175	5,015		173	3,19
		174	9,045		172	1,82
		173	9,753		171	0,29
		172	16,110		170	0,07
		171	15,790	78	196	21,4
		170	21,880		195	31,34
		169	14,240		194	21,28
		168	12,520		193	21,34
		167	6,555		192	19,99
		166	5,500		191	10,86
		165	2,119		190	10,86
		164	1,381		189	4,02
		163	0,077		188	2,05
		162	0,000		187	0,22
	75	191	0,004		186	11,53
		190	0,004		185	5,6
		189	0,029		184	3,34
		188	0,065		183	1,4
		187	0,151		182	0,34
		186	0,159		180	0,57
		185	0,375		175	0,18
		184	0,489	79	196	57,98
		183	0,868		195	41,06
		182	1,226		194	30,99
		181	2,057		193	25,19
		180	2,717		192	25,19
		179	4,534		191	21,25

Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
		178	4,665		190	21,25
		177	7,777		189	15,47
		176	8,185		188	13,47
		175	12,630		187	8,61
		174	11,540		186	3,67
		173	13,150		185	1,92
		172	10,880		184	3,42
		171	9,758		183	1,92
		170	3,214		182	0,91
		169	1,723		180	0,12
		168	0,864		178	0,01
		167	0,183		176	0,01
		166	0,020		174	0,004
		165	0,004			
		164	0,000			
	76	193	0,016			
		192	0,041			
		191	0,086			
		190	0,293			
		189	0,436			
		188	0,872			
		187	1,141			
		186	2,172			
		185	2,229			
		184	3,459			
		183	4,555			
		182	7,260			
		181	6,873			
		180	13,360			
		179	12,860			
		178	19,500			
		177	16,480			
		176	23,230			
		175	15,410			
		174	15,600			
		173	8,935			
		172	5,777			
		171	1,271			

Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
		170	1,129			
		169	0,350			
		168	0,179			
	77	196	0,000			
		195	0,024			
		194	0,183			
		193	0,538			
		192	1,063			
		191	2,485			
		190	2,506			
		189	4,351			
		188	4,131			
		187	6,246			
		186	5,753			
		185	9,941			
		184	8,323			
		183	14,380			
		182	11,990			
		181	15,000			
		180	13,210			
		179	13,830			
		178	10,230			
		177	8,128			
		176	3,707			
		175	1,850			
		174	0,542			
		173	0,077			
	78	196	0,367			
		195	12,030			
		194	14,450			
		193	8,784			
		192	19,200			
		191	11,830			
		190	15,060			
		189	11,860			
		188	16,340			
		187	15,110			
		186	20,020			

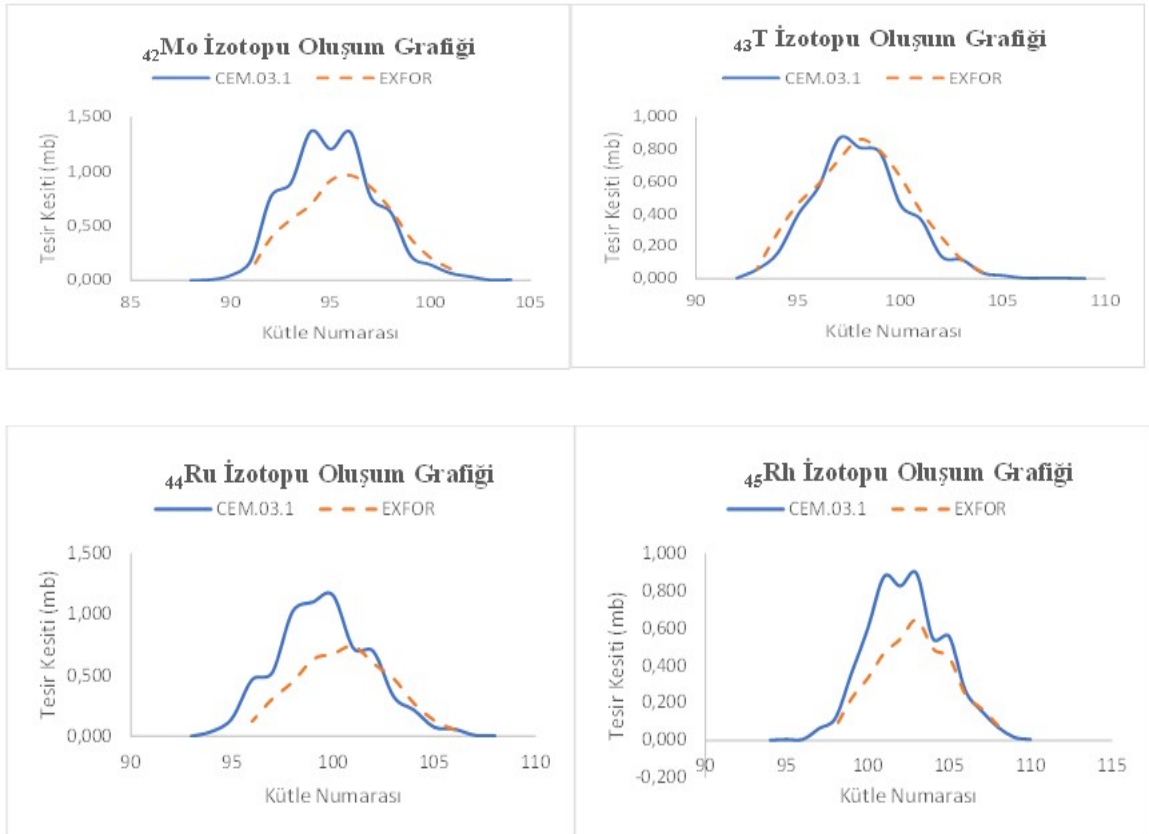
Tablo 4.4. (Devam): 800 MeV Enerjili protonlar ile $^{79}\text{Au}^{197}$ hedef elementin CEM03.1 programında spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin ve izotoplarının oluşum tesir kesitleri ile NEA-(EXFOR) deneysel veriler Karşılaştırma Tablosu (Benlliure ve ark., 2001, Rejmund ve ark.,2001).

Au¹⁹⁷ Hedef elementin 800 MeV Enerjili protonlar ile Spallasyon Sonucu İzotop Oluşum Tesir Kesiti						
Proton enerjisi (MeV)	CEM.03.1 Teorik Verileri			Nuclear Energy Agency Deneysel Veriler (EXFOR) Verileri (EXFOR)		
	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti (mb)	Z Değeri	A Değeri	Tesir kesiti Kesiti(mb)
		185	15,910			
		184	22,300			
		183	16,840			
		182	16,880			
		181	11,270			
		180	10,100			
		179	5,292			
		178	3,927			
		177	1,263			
		176	0,595			
		175	0,183			
		174	0,122			
		173	0,016			
		172	0,008			
		171	0,000			
	79	196	40,790			
		195	21,880			
		194	16,060			
		193	28,830			
		192	16,160			
		191	17,130			
		190	12,890			
		189	13,190			
		188	9,379			
		187	8,397			
		186	4,836			
		185	3,622			
		184	0,672			
		183	0,363			
		182	0,041			
		181	0,020			
		179	0,004			

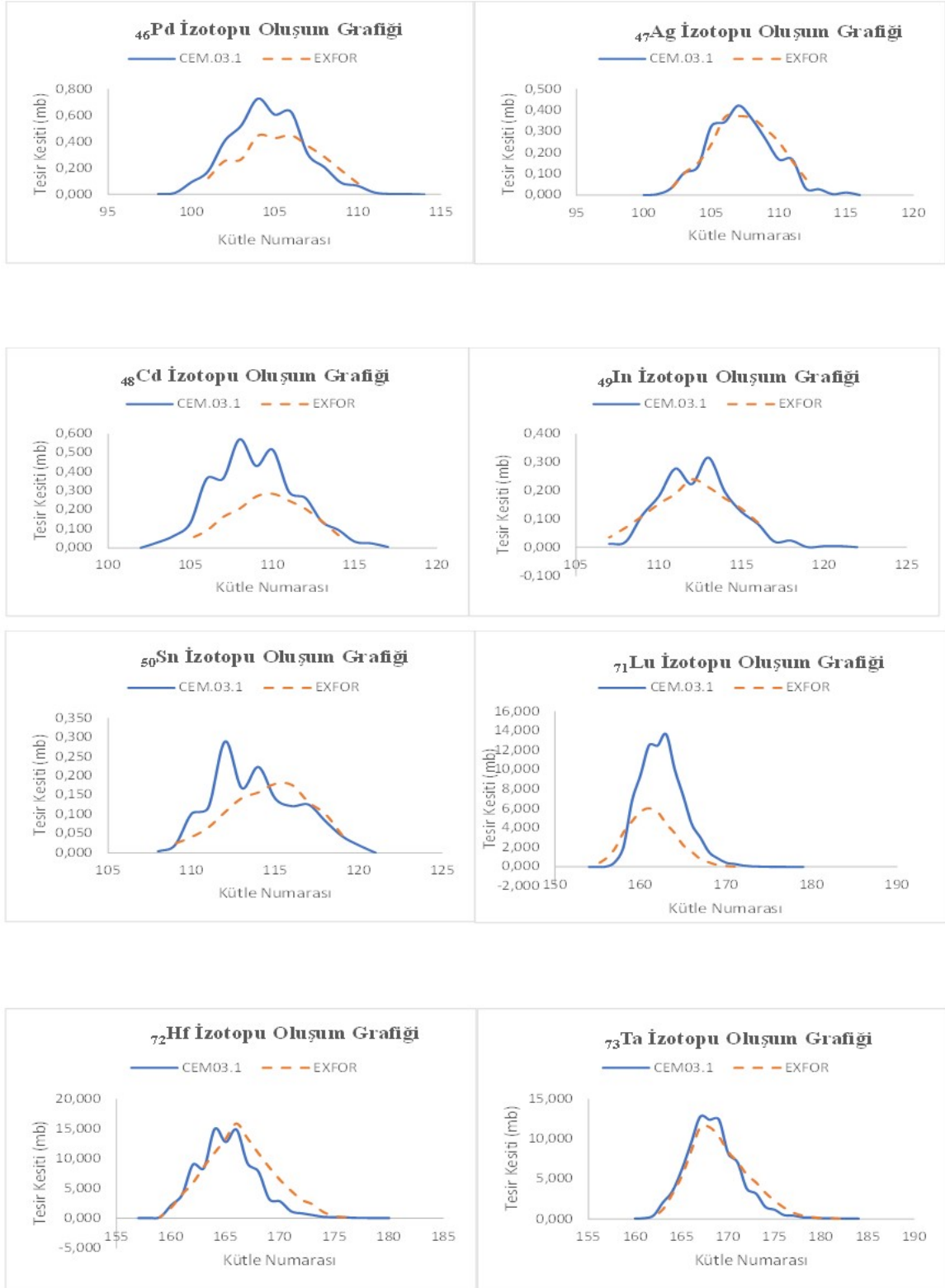
Tablo 4.4 Au¹⁹⁷ izotopunun 800 MeV enerjili protonlarla spallasyon reaksiyonları sonucunda oluşan (Z=42-79) farklı elementlerin ve izotopların oluşum tesir kesitlerini göstermektedir. CEM03.1 teorik modeli kullanılarak elde edilen reaksiyon tesir kesitleri,

EXFOR veri tabanında yer alan deneysel verilerle karşılaştırıldı (Şekil4.5). Hazırlanan tabloda, 800 MeV enerjide elde edilen izotop üretim tesir kesitleri listelendi ve teorik ile deneysel sonuçlar arasındaki uyum değerlendirildi.

Şekil 4.5’de Au¹⁹⁷ hedefi için 800 MeV enerjili protonlar ile spallasyonu sonucu oluşan element ve izotoplarının oluşum tesir kesitlerini göstermektedir.



Şekil 4.5. Au¹⁹⁷ hedef elementin 800 MeV enerjili protonlar ile spallasyonu sonucunda oluşan izotopların oluşum tesir kesitlerinin CEM03.1 ve EXFOR deneysel veri karşılaştırma grafikleri



Şekil 4.5. (Devam): Au¹⁹⁷ hedef elementin 800 MeV enerjili protonlar ile spallasyonu sonucunda oluşan izotoplarının oluşum tesisir kesitlerinin CEM03.1 ve EXFOR deneysel veri karşılaştırma grafikleri



Şekil 4.5. (Devam): Au¹⁹⁷ hedef elementin 800 MeV enerjili protonlar ile spallasyonu sonucunda oluşan izotoplarının oluşum tesir kesitlerinin CEM03.1 ve EXFOR deneysel veri karşılaştırma grafikleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen bulgular, yüksek enerjili protonların hedeflerle etkileşimi üzerine detaylı analizler sunmaktadır. Çalışmada spallasyon sonrasında çok sayıda atık element ve izotopların oluşum tesir kesitleri belirlenmiştir. Çalışmamızda kullanılan teorik modeller ile elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve yüksek uyum sağladığı görülmüştür. Bu sonuçların, Türkiye'de hızlandırıcı teknolojilerinin gelişimi ve nükleer enerji üretimi alanlarında önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir. Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM), Ankara Üniversitesi'nde yürütülen geniş kapsamlı bir projedir ve 2006 yılında başlatılmıştır. THM, Türkiye'nin ilk elektron hızlandırıcı ve ışıınım tesislerini barındıran bir araştırma altyapısıdır. Bu tesisler, bilimsel ve teknik araştırmaların yanı sıra endüstriye de son teknoloji yetenekler sunmayı hedeflemektedir. Çalışmamızın, THM'nin bu hedeflere ulaşmasına ve Türkiye'deki hızlandırıcı projelerinin uluslararası düzeyde rekabet edebilirliğini artırmasına katkıda bulunabileceği ümit edilmektedir.

Spallasyon reaksiyonları sırasında, hedef olarak kullanılan U^{233} ve Au^{197} elementleri 500 ile 800 MeV enerji aralıklarında protonlarla bombardıman edilerek, nükleer reaksiyon süreçlerinin anlaşılmasını desteklemiştir. Literatürdeki çalışmalar genellikle daha düşük enerjilerde gerçekleştirilmiş olup, U^{233} 'ün yapay bir element olması nedeniyle deneysel veriler sınırlıdır. U^{233} ile ilgili yüksek enerjilerde, NEA (EXFOR) veri tabanında deneysel veriler bulunmamaktadır. Bu nedenle, sadece CEM03.1 programı kullanılarak elde edilen teorik veriler ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çeşitli enerji aralıklarında yapılan teorik hesaplamalar sonucunda üretim tesir kesitleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. 500 ile 800 MeV arasındaki enerji değerlerinin literatür ile karşılaştırılması ve grafiklerle yorumlanması, nükleer reaksiyonların daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca, kullanılan yazılımların doğruluk ve güvenilirlik seviyeleri de değerlendirilmiştir. Bu analizler, spallasyon süreçlerinin optimizasyonu için önemli veriler sunmuştur.

Şekil 4.1 Z (elementin atom numarası) değeri arttıkça izotop oluşum tesir kesitlerinde genel bir artış gözlemlenmiştir. Hedef elementin Z'e daha yakın oluşan elementlerin izotop oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, en yüksek Z değeri olan 92'de ani bir düşüş yaşanmıştır. Yüksek enerjilerde, NEA (EXFOR) veri tabanında deneysel verilerin bulunmaması nedeniyle yalnızca CEM03.1 programı kullanılarak elde edilen teorik veriler (Tablo 4.1) dikkate alınmıştır. Bu çalışma, nükleer reaksiyon süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına yönelik önemli veriler sunmuştur.

Tablo 4.2 verileri, $^{79}\text{Au}^{197}$ hedefi için 500 MeV enerji seviyesinde protonlarla yapılan reaksiyonların tesir kesitlerini göstermektedir. Veriler, CEM03.1 programı ve NEA Fransa (EXFOR) ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir. 500 MeV enerjide, Şekil 4.2 de $Z = 79$ ve $A = 196$ için tesir kesiti 53,890 mb ile en yüksek değere ulaşmıştır. Ayrıca, $Z = 79$ ve $A = 195$ için 33,980 mb, $Z = 79$ ve $A = 193$ için ise 29,900 mb tesir kesitleri gözlemlenmiştir.

Yüksek enerjilerde tesir kesitleri genellikle artma eğilimindedir. Bununla birlikte, belirli Z ve A değerlerinde ani düşüşler görülebilir. Örneğin, Şekil 4.2 de $Z = 37$ ve $A = 97$ için tesir kesiti sadece 0,004 mb olarak kaydedilmiştir. Bu durum, daha düşük Z'li elementlerin ve izotopların oluşum ihtimalinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 grafiklerinden de anlaşıldığı üzere CEM03.1 programı ve NEA EXFOR verileri arasındaki uyum, bu çalışmanın önemli bir bulgusudur. Özellikle yüksek Z ve A değerlerinde elde edilen sonuçlar, her iki veri seti arasındaki tutarlılığı göstermektedir. Bu durum, kullanılan teorik modellerin ve yazılımların doğruluğunu teyit ederken, nükleer reaksiyon süreçlerini daha iyi anlamak için önemli bir temel sağlamaktadır. Sonuçlar, ilgili alanlarda hesaplamaların güvenilirliğini artırmak için kullanılan modellerin doğruluğunu teyit etmektedir. Bu tür analizler, nükleer teknoloji ve enerji üretimi çalışmalarında önemli katkılar sunmaktadır.

Tablo 4.3 verilerinde görüldüğü üzere genel olarak 600 MeV enerjilerinde tesir kesitleri artış eğilimindedir. Bu eğilim, Şekil 4.4 de $Z = 79$ ve $A = 190$ 'dan 197'ye kadar olan

değerlerde belirgin bir şekilde görülmektedir. Ancak, daha düşük Z ve A değerlerinde tesir kesitleri oldukça düşük kalmaktadır. Örneğin, $Z = 36$ ve $A = 75$ için tesir kesiti sadece 0,008 mb olarak kaydedilmiştir.

Tablo 4.4 verilerine göre 800 MeV enerji seviyesinde, $^{197}_{79}\text{Au}$ hedefiyle yapılan proton spallasyon reaksiyonlarında CEM03.1 ve EXFOR verileri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6 da $Z = 79$ ve $A = 196$ için en yüksek tesir kesiti 48,540 mb olarak bulunmuştur. Genel olarak, Z ve A değerleri arttıkça tesir kesitlerinin de artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, düşük Z ve A değerlerinde tesir kesitleri belirgin derecede düşüktür. CEM03.1 ile EXFOR verileri arasında uyum olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4 ve Şekil 4.5 grafikleri incelendiğinde, 800 MeV enerji seviyesinde $^{197}_{79}\text{Au}$ hedefi için protonlarla yapılan reaksiyonlarda CEM03.1 ve EXFOR verileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, her iki veri seti arasında yüksek bir uyum olduğu Şekil 4.6 da gösterilmektedir.

Uzun yarı ömürlü izotopların üretim tesir kesitlerinin incelenmesi, hedef malzemenin uzun vadeli radyoaktif zehirlenme seviyelerinin tahmin edilmesine olanak tanımıştır. Bu izotopların üretilme oranları ve miktarları, bir nükleer reaksiyonun ardından ortamda ne kadar süre boyunca radyoaktif kalacağını belirlemede kritik bir rol üstlenecektir. Araştırmada elde edilen veriler, radyoaktif atık yönetimi ve güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. Uzun yarı ömürlü izotopların üretim kesitlerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesi, nükleer enerji santrallerinde, tıbbi izotop üretiminde ve radyoaktif atık depolama tesislerinde alınacak önlemleri şekillendirmeye yardımcı olacaktır. Ayrıca, bu izotopların çevresel ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmede de yol gösterici olabilecektir. Bu çalışma kapsamında, uzun yarı ömürlü izotopların üretim tesir kesitlerinin detaylı analizi, nükleer teknoloji uygulamalarının güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından gerekli öneme sahip olduğu görülmektedir.

500-800 MeV enerjili protonların U-233 hedef elementine spallasyon sonucu oluşan atık elementlerin tesir kesitlerini CEM03.1 programında elde edilen sonuçlarla ve exforda sonuçlarına göre özellikle toryum izotoplarının oluşumuna odaklandık. CEM03.1

programı ile elde edilen verilerde, kütle numarası 224 olan toryum izotopu 2,324 tesir kesitine sahiptir. Bu değer, Exforda sonuçlarında 2,420 olarak gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, kütle numarası 225 olan toryum izotopu CEM03.1 programında 2,206 tesir kesitine sahipken, Exforda sonuçlarında 1,787 olarak kaydedilmiştir. Kütle numarası 226 olan toryum izotopu ise CEM03.1 programında 2,354 tesir kesitine sahipken, Exforda sonuçlarında 1,968 olarak gözlemlenmiştir. Toryum izotoplarının radyoaktif özellikleri ve oluşum tesir kesitlerine göre belirli bir enerji aralığında sıkça oluştuğu gözlemlenmiştir. CEM03.1 programı ve Exforda sonuçları karşılaştırıldığında, her iki veri setinde de benzer eğilimler ve tutarlılık gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bazı küçük sapmalar ve farklar gözlemlenmiştir. Bu sapmalar, deneysel koşullardaki farklılıklardan kaynaklanabileceği gibi, programın hesaplama yöntemlerindeki varyasyonlardan da kaynaklanabilir.

Genel olarak, CEM03.1 programının sonuçları, Exforda sonuçlarına büyük ölçüde paralel ve tutarlı bir şekilde uyum sağlamaktadır. Bu karşılaştırma çalışması, toryum izotoplarının spallasyon reaksiyonları sonucu oluşumunu daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu tür çalışmalar, gelecekteki nükleer araştırmalar ve uygulamalar için önemli bir temel oluşturmaktadır.

500-800 MeV enerjili protonların U-233 hedef elementine spallasyon sonucu bombardımanı ile çeşitli radyoaktif izotoplar oluşur. Bu süreçte çekirdek parçalanarak çeşitli radyoaktif elementler ve izotoplar meydana getirir. Bu elementler arasında uranyum (U), toryum (Th), plütonyum (Pu), radyum (Ra), polonyum (Po), radon (Rn), kobalt (Co), sezyum (Cs), stronsiyum (Sr) ve iyot (I) gibi radyoaktif elementler açığa çıktığı görülmüştür.

Bu radyoaktif elementler, spallasyon işlemi sonucu ortaya çıkmakta ve radyoaktif atık olarak çevreye yayılmaktadır. Bu atıkların radyoaktif özellikleri nedeniyle, uzun vadeli radyoaktif zehirlenme riski bulunmaktadır. Örneğin, toryum izotopları (Th-224, Th-225, Th-226) radyoaktif özellikler sergileyerek çevrede kalıcı kirlenmeye yol açabilir.

Radyoaktif atıkların uzun vadeli etkileri, bu elementlerin radyoaktif bozunma süreçleri ve yarı ömürleri ile ilişkilidir. Bu elementlerin radyoaktif bozunma ürünleri ve yaydıkları

radyasyon, insan sağlığı ve evre üzerinde zararlı etkilere neden olabilir. Radyoaktif zehirlenme seviyesinin öngörülmesi, bu elementlerin konsantrasyonları, bozunma süreçleri ve çevresel dağılımları dikkate alınarak yapılabilir. Sonuç olarak, spallasyon sonucu oluşan radyoaktif elementlerin, uzun vadeli radyoaktif zehirlenme riskine neden olabilecek atıklar oluşturduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, radyoaktif atıkların yönetimi ve güvenli bertarafı, evre ve insan sağlığı için büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın sınırlamaları ve olası yanlışlıkları da dikkate alınmalıdır. Kullanılan deneysel verilerin sınırlı olması ve belirli enerji aralıklarında eksik verilerin bulunması, sonuçların doğruluğunu etkileyebilir. NEA (EXFOR) veri tabanında bazı enerji aralıklarında deneysel çalışmaların olmaması da önemli bir sınırlamadır. CEM03.1 programı gibi teorik modellerin kullanımı, bazı belirsizlikler ve varsayımlar içerebilmektedir. Ve bu modellerin doğruluğu kullanılan parametrelerin hassasiyetine bağlıdır. Deneysel lm hataları ve cihaz hassasiyetleri de verilerin güvenilirliğini etkileyebilir. Kullanılan verilerin kaynağına bağlı olarak belirli hatalar oluşabilir ve simülasyon programlarının varsayımları gerçekte meydana gelen süreçlerle tam olarak örtüşmeyebilir. Bu sınırlamalar ve olası yanlışlıklar, tez bulgularının ve sonuçlarının değerlendirilmesinde göz önünde bulundurulmalı ve çalışmanın bilimsel geçerliliği ve güvenilirliğine katkı sağlamak için dikkatlice ele alınmalıdır. Bu çalışmanın bulguları doğrutusunda, gelecekte yapılması gereken araştırmalar için bazı önemli öneriler bulunmaktadır. İlk olarak, U^{233} ve Au^{197} izotopları için farklı enerji aralıklarında daha geniş kapsamlı deneysel veriler toplanmalıdır. Bu, teorik modellerin doğruluğunu doğrulamak ve nükleer reaksiyon süreçlerini daha iyi kavramak için kritiktir. Ayrıca, CEM03.1 ve diğer simülasyon programlarının doğruluğunu artırmak için daha gelişmiş ve hassas parametreler kullanılarak yapılan analizler gereklidir. Bu izotopların kullanımıyla ilgili nükleer atık yönetimi ve güvenliği üzerine daha fazla araştırma yapılmalıdır.

Elde edilen bulguların pratik uygulamalara dönüştürülmesi için birkaç öneri sunulabilir. Öncelikle, U^{233} elementinin enerji verimliliği konusundaki avantajlarından yararlanarak nükleer reaktör tasarımlarının optimize edilmesi mümkündür. Ayrıca, yüksek enerjili proton ve nötron bombardımanlarının etkilerini göz önünde bulundurarak daha verimli ve

sürdürülebilir nükleer yakıtlar geliştirmek mümkündür. Son olarak, teorik modellerin doğruluğunu artırarak, nükleer teknoloji ve enerji üretimi alanlarında daha güvenilir ve etkin çözümler bulunabilir.

Araştırma neticesinde, yüksek enerjili proton bombardımanı ile elde edilen izotop oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek Z değerlerinde olduğu görölmüştür. Ayrıca, uzun yarı ömürlü izotopların üretim tesir kesitleri, hedefin uzun vadeli radyoaktif zehirlenme seviyesini öngörmemizi sağlamıştır.

KAYNAKLAR

Aleksandrov, Y. V. (1996). Production Cross Section for Radioactive Nuclides in Lead Target Bombarded by 660 MeV Protons, C, Moscow 96, 221.

Author (s) (n.d.). *Diagram illustrating nuclear reactions involving a high-energy proton (1 GeV) interacting with a nucleus.* Retrieved from [https://nds.iaea.org/talys/tutorials/talys.pdf].

Aydin, A., Tel. E. and Sarer, B. (2007). Investigation of the (n, p) reaction cross-sections of Some Nuclei in The Rare-Earth Elements for an Incident Energy Range of 8–24 MeV, *Physica Scripta*, 75, 299–306.

Benlliure, J. (2001) New Data and Monte Carlo Simulations on Spallation Reactions Relevant for the Design of ADS. <http://www.nea.fr/html/pt/docs/iem/madrid00/Proceedings/Paper.52>.

Benlliure, J., Armbruster, P., Bernas, M., Boudard, A., Dufour, J.P., Enqvist, T., ... and Volant, C. (2001). Isotopic production cross sections of fission residues in ^{197}Au -on-proton collisions at 800 A MeV. *Nuclear Physics A*, 683(1-4), 513-539.

Benlliure, J., Grewe, A., De Jong, M., Schmidt, K. H., and Zhdanov, S. (1998). Calculated nuclide production yields in relativistic collisions of fissile nuclei. *Nuclear Physics A*, 628(3), 458-478.

Çakir, Ş. (2019) Enerjisi 10-50 MeV aralığında olan proton demeti ile seçilen hedef elementlerin bombardımanı sonucu oluşan izotopların tespitinin teorik hesaplama ile yapılması. Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çukurova Üniversitesi (2024). Hızlandırıcı sürücülü sistemlerin enerji üretiminde ve nükleer atıkların azaltılmasında kullanımı çalışmaları. Adana, Türkiye: Çukurova Üniversitesi Yayınları.

Data, E. N. R. (2022). EXFOR. CSISRS <https://www-nds.iaea.org/EXFOR>.

Demirkol İ., Tel E., Özmen A. ve Şarer, B. (2002). The Neutron Production by the Reaction of Protons at 30-100 MeV with Different Isotopes of Thin Target, *Balkan Physics Letters*, 10(2), 108-115.

Demirkol, E. T., Arasoğlu, A., Özmen, A., ve Şarer, B. (2020). Enerjisi 30 MeV'den 1500 MeV'e kadar olan hızlandırılmış protonlarla nükleer spallasyon reaksiyonlarında bazı ağır hedeflerin nötron üretim tesir kesitleri. *VIII. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojiler Kongresi*

Demirkol, İ. (2003). Enerji yükseltici tasarımında proton-ağır element çarpışmasında nötron üretimi. *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Ankara*, 114s.

Demirkol, İ. (2005). Hızlandırıcıya Dayalı Yeni Nesil Reaktörler. *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 16-25.

Demirkol, İ., Tel, E. ve Özmen, A. (2003). 208 Pb (1 GeV)+ P Reaksiyonunda Üretilen Atık Çekirdeklerin İzotopik Üretim Tesir Kesitleri..

Ross, E. and Bachmann, K. (1974). Spallation of gold with 580-MeV protons, J, RCA, 21,13) In German.

Ertürk, S. ve Boztosun, İ. (2004). Nükleer Fizik Araştırmalarında Kullanılan Hızlandırıcılar ve Uygulama Alanları. II. *Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları Uygulamaları Kongresi, Ankara*.

Genç, G. B. (2008). Yüksek Enerjili Proton Sürümlü Hedeflerden Nötronik Limitler, *VI. YUUP Çalıştayı, Ankara, Türkiye*.

Gudima, K. K., Mashnik, S. G., and Toneev, V. D. (1983). Cascade-exciton model of nuclear reactions. *Nuclear Physics A*, 401(2), 329-361.

Kalbach, C., Grimes, S. M., and Wong, C. (1975). Comparison of proton and neutron spectra: The extended Griffin model, pairing and isospin. *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, 275(2), 175-181.

Günay, M., Korkmaz, M. E. ve Şarer, B. (2008). Hızlandırıcı Güdümlü Sistemlerde Bazı Uzun Ömürlü Nükleer Atıkların Dönüşümünün İncelenmesi, *SDÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi (E DERGİ)*, 3(2) 183–190.

Günay, M., Korkmaz, M. E. ve Şarer, B. (2008). Hızlandırıcı Güdümlü Sistemlerde Nötronik Hesaplamalar, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 91–101.

Iwamoto, H., Imamura, M., Koba, Y., Fukui, Y., Wakabayashi, G., Uozumi, Y., ... and Nakano, M. (2010). Proton-production double-differential cross sections for 300-MeV and 392-MeV proton-induced reactions. *Physical Review C—Nuclear Physics*, 82(3), 034604.

Kaplan, A., Aydın, A., Tel, ve Sarer, B. (2009). Equilibrium and Pre-Equilibrium Emissions In Proton - Induced Reactions on ^{203}Tl , ^{205}Tl , *Pramana-Journal of Physics*, 72(2): 343- 353.

Karadeniz, H., Çetiner, M. A., Yücel, H., Arıkan, P., ve Sultansoy, S. (2001). Hızlandırıcı Güdümlü Reaktörler/Enerji Yükselteci. *I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi*, Ankara, Türkiye.

Kemah, E. (2017). Yeni Nesil Reaktörlerin Çalışma Prensiplerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.

Mashnik, S. G. (2003). Development of CEM03.1.01 and its Validation Against the New Benchmark Data", OECD-NEA Data Bank, *JEFF Report 132*.

Michel, R., Dittrich, B., Herpers, U., Peiffer, F., Schiffmann, T., and Cloth, P. Dragovitsch, P., Filges, D. (1989). Analyst (London), Proton-induced spallation at 600 MeV, p. -114-287, DOI: 10.1039/an9891400287

Napolitani, P., Schmidt, K. H., Tassan-Got, L., Armbruster, P., Enqvist, T., Heinz, A., ... and Volant, C. (2007). Measurement of the complete nuclide production and kinetic energies of the system Xe $^{136+}$ hydrogen at 1 GeV per nucleon. *Physical Review C—Nuclear Physics*, 76(6), 064609.

Peter, J. (1994). Proton Induced Spallation Reactions, *Radiat. Phys. Chem.* 43, 139-149.

Reinhold, J., Friese, J., Körner, H. J., Schneider, R., Zeitelhack, K., Geissel, H., ... and Sümmerer, K. (1998). Projectile fragmentation of ^{129}Xe at $E_{\text{lab}} = 790 \text{ A MeV}$. *Physical Review C*, 58(1), 247.

Rejmund, F., Mustapha, B., Armbruster, P., Benlliure, J., Bernas, M., Boudard, A., ... and Volant, C. (2001). Measurement of isotopic cross sections of spallation residues in 800 A MeV $^{197}\text{Au} + p$ collisions. *Nuclear Physics A*, 683(1-4), 540-565.

Rubbia, C. (1995). Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier, *European Organization For Nuclear Research, CERN/AT 95*, 4.

Rubbia, C. and Rubio J. A. (1996). A Tentative Programme Towards a full Scale Energy Amplifier, Geneva.

Smith, J. (2024). Bilgisayar Tabanlı Simülasyonların Güvenilirliği ve Geçerliliği. *Journal of Applied Research*.

Sultansoy, S. ve Böylece, Ş. P. (2001). Parçacık Hızlandırıcıları, Toryum ve Türkiye'nin Enerji Problemi. *Ulusal Proton Hızlandırıcıları Çalıştayı*, 20-21.

Sümmerer K. (1990). Target fragmentation of Au and Th by 2.6 GeV protons. *Physical Rev. C*, 42, 6.

Şarer, B., Aydın, A., Günay, M., Korkmaz, M. E., and Tel, E. (2009). Calculations of neutron-induced production cross-sections of $^{180,182,183,184,186}\text{W}$ up to 20 MeV. *Annals of Nuclear Energy*, 36(4), 417-426.

TAEK, (2014). Hızlandırıcı Teknolojisini Edinmek, Parçacık Hızlandırıcıları ile Araştırma, Geliştirme ve Uygulamalar. *Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Faaliyet Raporu*.

Taieb, J., Schmidt, K. H., Tassan-Got, L., Armbruster, P., Benlliure, J., Bernas, M., ... and Wlazło, W. (2003). Evaporation residues produced in the spallation reaction $^{238}\text{U} + p$ at 1 A GeV. *Nuclear Physics A*, 724(3-4), 413-430.

Tel, E., Arasoğlu, A., Demirkol, İ. ve Aytekin, H. (2005) Hızlı Nötronlarla ^{232}Th 'nin ^{238}U Çekirdeklerinin Reaksiyonundan Yayınlanan Nötron Spektrumunun İncelenmesi., *TFD*, Muğla, Türkiye.

Titerenko, Y. E. (2002). Experimental and Theoretical Studies of the Yields of Residual Product Nuclei Produced in Thin Pb and Bi Targets Irradiated by 40-2600 MeV Protons", <http://www.tech-db.ru/istc/db/projects.nsf/prjn>.

Tokgöz, S. R., Kemah, E. ve Akkaya, R. (2014). Nükleer Yakıt Üretiminde, Hızlandırıcı Kaynaklı Sistemler (ADS) ile Konvansiyonel Zenginleştirme Sistemlerinin Karşılaştırılması. In *2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2014)*, Karabük University, Karabük, Turkey (18-20).

TÜBİTAK. (2024). Hızlandırıcı teknolojileri ve nükleer enerji üretimi araştırma projeleri. Ankara, Türkiye: TÜBİTAK Yayınları.

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) (2024). *Hızlandırıcı teknolojilerinin kazandırılması ve bilimsel araştırmaların desteklenmesi faaliyet raporu*. Ankara, Türkiye: TAEK Yayınları.

Vaishnane, L. A. (2010). *Izv. Rossiiskoi Akademii Nauk, Ser. Fiz* 74, 529.

Yavaş, Ö. (2004). Türk Hızlandırıcı Kompleksi Projesi. II. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi. *tk/hk2* <http://www.taek.gov.tr/uphuk2>.

Yıldırım, G. (2009). *Bazı Amforter Grubu Hedef Çekirdeklerin Proton Giriş Reaksiyonlarında Üretilen Nötronların Reaksiyon Tesir Kesitlerinin ve Yayınlanma Spektrumlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 62.