

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İTÜ TRIGA MARK-II ARAŞTIRMA REAKTÖRÜ YAKIT
ELEMANLARININ TAHRİBATSIZ ANALİZ YÖNTEMİ İLE YANMA
ORANI ANALİZİ VE GAMA SPEKTROSKOPİSİ İNCELEMELERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alperen KAYA

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İTÜ TRIGA MARK-II ARAŞTIRMA REAKTÖRÜ YAKIT
ELEMANLARININ TAHRİBATSIZ ANALİZ YÖNTEMİ İLE YANMA
ORANI ANALİZİ VE GAMA SPEKTROSKOPİSİ İNCELEMELERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alperen KAYA
(302231001)**

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tayfun AKYÜREK

HAZİRAN 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**BURNUP ANALYSIS AND GAMMA SPECTROSCOPY INVESTIGATIONS
OF ITU TRIGA MARK-II RESEARCH REACTOR SPENT FUEL
ELEMENTS USING NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS METHODS**

M.Sc. THESIS

**Alperen KAYA
(302231001)**

Department of Nuclear Researches

Radiation Science and Technology Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Tayfun AKYÜREK

JUNE 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 302231001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alperen KAYA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "İTÜ TRIGA MARK-II ARAŞTIRMA REAKTÖRÜ YAKIT ELEMANLARININ TAHRİBATSIZ ANALİZ YÖNTEMİ İLE YANMA ORANI ANALİZİ VE GAMA SPEKTROSKOPİSİ İNCELEMELERİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Tayfun AKYÜREK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tayfun BÜKE
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Mayıs 2025
Savunma Tarihi : 13 Haziran 2025





Çok Kıymetlim Annem Rahmetli Leman Kaya'ya,



ÖNSÖZ

Bu tez, yürütücülüğünü Doç. Dr. Tayfun AKYÜREK tarafından yapılan 122F488 numaralı Tübitak 3501 Kariyer Geliştirme Programı projesiyle desteklenmiştir. Projeyi kabul etmesi ve çalışma imkanı sunması sebebiyle Tübitak'a, İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktöründeki çalışmalara destek veren İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğüne, Enerji Enstitüsüne, Nükleer Denetleme Kurumuna, çalışmalar süresince desteklerinden ötürü Yük. Müh. Sahip KIZILTAŞ ve Ar. Gör. Onur ERBAY'a, jüri üyelerimiz Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN ve Prof. Dr. Tayfun BÜKE'ye, çalışma arkadaşım Zeynep BODUROĞLU'na ve kendisinin bana verdiği emekler ile bugünlere gelmemde yoluma ışık tutan, 2024 yılının Haziran ayında kaybettiğim çok kıymetli annem Leman KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

Haziran 2025

Alperen KAYA
(Fizikçi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Nükleer Enerji	1
1.2 Nükleer Reaktörler	1
1.2.1 TRIGA Reaktörleri	2
1.2.2 İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü	3
1.3 İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü Kalp Konfigürasyonu	4
1.4 İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü Elemanları	5
1.5 Tezin Motivasyonu.....	6
2. TEORİ.....	9
2.1 Yanma Oranı ve Hesaplama Yöntemleri.....	9
2.1.1 Deneysel Yöntemler.....	9
2.1.2 Nümerik Yöntemler	10
2.2 Tahribatsız Analiz Yöntemi	10
2.3 Spektrum Analizi.....	13
3. METOT.....	15
3.1 Yakıt İnceleme Sistemi ve Tahribatsız Analiz Yöntemi ile Nükleer Yakıt İnceleme Sistemi.....	15
3.2 Deney ve Simülasyon.....	21
4. SONUÇLAR	23
4.1 Yakıt Elemanlarının Yanma Oranları	23
4.2 Yakıt Elemanlarının Spektrum Analizleri ve Karşılaştırılması.....	27
4.3 İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü için Rekonfigürasyon Çalışması ...	35
5. TARTIŞMA	39
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ.....	47



KISALTMALAR

cm	: Santimetre
HPGe	: High-Purity Germanium
m	: metre
MCNP	: Monte Carlo N-Particle
TA	: Tahribatsız Analiz Yöntemi
TRIGA	: Training Research Isotopes General Atomics
μSv	: MikroSievert



SEMBOLLER

BU	: Burnup (Yanma oranı)
I	: Deneysel aktivite
k	: Dallanma oranı
N	: Fisyon ürünü çekirdeklerinin sayısını
S	: Öz soğurma faktörü
T	: Soğuma zamanı
U	: Başlangıçtaki uranyum atomlarının sayısını
Y	: ¹³⁷ Cs için fisil ürün verimi
ε	: Mutlak dedektör verimi
λ	: Bozunma sabiti



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Yakıt elemanları ve yanma oranları	24
Çizelge 4.2 : Reaktör kalbindeki halkaların ortalama yanma oranları.	27
Çizelge 4.3 : B5 yakıt elemanının 2018 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.....	28
Çizelge 4.4 : B5 yakıt elemanının 2024 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.....	30
Çizelge 4.5 : B5 yakıt elemanının 2018 ve 2024 yıllarındaki gama spektrumu pikleri karşılaştırması	31
Çizelge 4.6 : F30 yakıt elemanının 2018 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.....	32
Çizelge 4.7 : F30 yakıt elemanının 2024 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.....	33
Çizelge 4.8 : F30 yakıt elemanının 2018 ve 2024 yıllarındaki gama spektrumu pikleri karşılaştırması	34
Çizelge 4.9 : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün yakıt elemanlarının rekonfigurasyon öncesi ve sonrasındaki konumları.....	36



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : İTÜ TRIGA Mark II Araştırma Reaktörü.	4
Şekil 1.2 : İTÜ TRIGA Mark II Araştırma Reaktörü eski kontrol konsolu.	4
Şekil 1.3 : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün kalp konfigürasyonu.....	4
Şekil 1.4 : İTÜ TRIGA Mark II Araştırma Reaktörü yakıt elemanı.	5
Şekil 2.1 : D18 yakıt elemanının 2024 yılındaki gama spektrumu.....	14
Şekil 2.2 : E14 yakıt elemanının 2024 yılındaki gama spektrumu.	14
Şekil 3.1 : Yakıt İnceleme Sistem.	16
Şekil 3.2 : Tahribatsız analiz yöntemi ile nükleer yakıt inceleme sistemi.....	17
Şekil 3.3 : Nükleer yakıt inceleme elemanı kurşun kask.....	18
Şekil 3.4 : Dört yakıt elemanının ¹³⁷ Cs aktiviteleri ve yanma oranları.	19
Şekil 4.1 : ¹³⁷ Cs aktivitesi ve yanma oranı grafiği.....	23
Şekil 4.2 : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü yakıt elemanlarının yanma oranları.....	26
Şekil 4.3 : B5 yakıt elemanının 2018 yılındaki 37 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu.....	28
Şekil 4.4 : B5 yakıt elemanının 2024 yılındaki 768 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu.....	29
Şekil 4.5 : F30 yakıt elemanının 2018 yılındaki 10 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu.....	31
Şekil 4.6 : F30 yakıt elemanının 2024 yılındaki 755 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu.....	33
Şekil 4.7 : İTÜ TRIGA Mark-II Reaktörü kalbi için rekonfigürasyon çalışması.....	37



İTÜ TRIGA MARK-II ARAŞTIRMA REAKTÖRÜ YAKIT ELEMANLARININ TAHRİBATSIZ ANALİZ YÖNTEMİ İLE YANMA ORANI ANALİZİ VE GAMA SPEKTROSKOPİSİ İNCELEMELERİ

ÖZET

Nükleer reaktörlerde yakıt elemanlarının yanma oranı değerleri hem reaktör sisteminin güvenliğini hem de enerji üretim kapasitesini gösteren önemli parametrelerdir. Ayrıca, bu değerler yakıt kullanımını optimize etmeyi ve reaktörün operasyonel ömrünü uzatmayı amaçlayan reaktör yeniden yapılandırma süreçlerinde kullanılır.

Bu çalışmada, İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü için, reaktörün içerisinde bulunan 67 yakıt elemanının yüzdesel oranlardaki yanma oranı değerlerinin tespiti, seçilen iki yakıt elemanının (B5, F30) karşılaştırmalı spektrum analizleri ve 1979 yılından beri reaktörde yapılmış herhangi bir rekonfigurasyon çalışması bulunmaması sebebiyle yeni bir rekonfigurasyon önerisinin sunulması başlıca amaçlardır.

İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründeki tüm yakıt elemanlarının yüzdesel oranda yanma değerleri, 2018 yılında aynı reaktörde dört yakıt (B5, D18, E14, F30) elemanı üzerinde yürütülen önceki bir çalışmadan elde edilen verilerle karşılaştırmak için tahribatsız bir analiz yöntemi kullanılarak bir korelasyon kurulmuştur. Bu korelasyona dayanarak, tüm yakıt elemanlarının yanma değerlerini hesaplamak için yeni bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu metodoloji sayesinde, 2018 yılındaki çalışmada kullanılmış dört yakıt elemanının yanma oranı değerleri ile 2024 yılında yapılan çalışmada aynı dört yakıt elemanının ¹³⁷Cs aktiviteleri kullanılarak bir korelasyon kurulmuş ve elde edilen denklem vasıtasıyla İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe bulunan 67 yakıt elemanının yanma oranı değerleri yüzdesel değerlerde elde edilmiş ve reaktörün kalp konfigürasyonundaki halka şeklindeki dizilimlerine göre gruplandırılarak çizelge haline getirilmiştir. Bu yanma hesaplamaları sonucunda, reaktörde uzun yıllardır yeni bir rekonfigurasyon çalışması yapılmadığı düşünülerek reaktörün operasyonel ömrünü uzatmak için yeni bir rekonfigurasyon önerilmiştir.

Ayrıca 2018 yılında Akyürek ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışma verileri kullanılarak, kalbin en iç halkasında bulunan B5 yakıt elemanı ile kalbin en dış halkasında bulunan F30 yakıt elemanının gama spektrumları çıkarılarak, 2024 yılında yapılmış olan çalışmadaki aynı yakıt elemanlarının gama spektrumları ile karşılaştırmaları da yapılmıştır. Her bir spektrumdaki tepe noktalarında bulunan radyoizotopları tanımlamak için her bir spektral tepe ayrı ayrı analiz edilmiştir ve iki farklı yılda yapılan spektrumlar karşılaştırılarak benzer ve farklı radyoizotopların tespiti yapılmıştır.

Bu çalışmayla, İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün tüm yakıt elemanlarının mevcut yanma oranı değerleri yüzdesel ölçüde elde edildi ve reaktör işletimi ve yakıt yönetimi için değerli içgörüler sağlandı. Ayrıca, aynı reaktördeki en son çalışmayla karşılaştırmalı bir analiz, yanma özelliklerinin ve zaman içindeki evrimlerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağladı. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen

tüm bilgiler İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün gelecekte yapılacak çalışmalar için referans yanma oranı değerlerini sunması, reaktöre önerilen yeniden yapılandırma örneği ile reaktörün operasyonel ömrünü uzatmak adına öneri sunulması açısından önemli bir yere sahiptir.



BURNUP ANALYSIS AND GAMMA SPECTROSCOPY INVESTIGATIONS OF ITU TRIGA MARK-II RESEARCH REACTOR SPENT FUEL ELEMENTS USING NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS METHODS

SUMMARY

The burnup values of nuclear fuel elements are critical parameters for both the operational safety and energy production efficiency of nuclear reactors. These values play a vital role in reactor core management, particularly in optimizing fuel utilization and extending reactor lifespan. They are also used to guide core reconfiguration strategies that aim to enhance the long-term sustainability of the reactor. For accurate determination of burnup values, both simulation and experimental methods are employed. While each method comes with its own uncertainties, applying both approaches to the same experimental system enables more robust and reliable assessments.

This study presents a comprehensive experimental analysis of the burnup values of the ITU TRIGA Mark-II Research Reactor's fuel elements using a non-destructive assay (NDA) technique based on gamma spectroscopy. The primary objective of the study is to validate previously conducted burnup simulations by experimentally calculating the percentage burnup values of each fuel element within the core. Furthermore, due to the fact that no core reconfiguration has been performed since 1979 at the ITU TRIGA reactor, the experimentally obtained burnup values are used to propose a new reconfiguration strategy. This aims to increase reactor sustainability, optimize operational performance, and enhance fuel utilization.

Two distinct fuel inspection systems were utilized during the study. The first system was developed and used in 2018. It is an external, lead-shielded fuel inspection setup composed of three main components. The first component is a transportation cask designed for the safe removal of fuel elements from the reactor core. It is cylindrical in shape, measuring 85 cm in length and 40 cm in diameter, and includes a 5 cm wide central channel for fuel movement, with attachment rings for crane operation. Once the fuel is safely transferred, it is placed into the second component a T-shaped cylindrical measurement chamber, equipped with multiple beam holes for gamma and neutron spectrometry. This chamber allows for the insertion of a neutron source for subcritical measurements and neutron activation analysis. The third component is an electronic lift system that enables vertical movement of the fuel element, allowing axial measurements at various heights. In this system, four representative fuel elements (B5, D18, E14, and F30) were selected from different radial positions in the reactor core, ranging from the center to the outer rings. For each element, gamma spectroscopy measurements were conducted every 3 cm along their axial lengths, with each measurement lasting 10 minutes. High-purity germanium (HPGe) detectors were used, and the average ^{137}Cs activity values obtained from the spectra were used to calculate the relative burnup percentages of these elements.

The second system was specifically developed and implemented in 2024 for this study and is a new non-destructive fuel inspection system installed directly above the reactor core. Unlike the first system, this configuration allows for in-situ measurements, thereby reducing the risks associated with fuel transportation. Designed in accordance with radiation protection standards and operated under the supervision of health physicists and licensed reactor operators, this system enables safer and more efficient inspection of fuel elements. In this setup, 67 fuel elements located within the reactor core were individually measured according to a scheduled plan. Each element was extracted using a hoisting mechanism and placed inside a lead-shielded collimator, which is mounted on a rail system. The gamma spectra were acquired from the center of each fuel element, with 10-minute measurement durations. The HPGe detector was positioned 70 cm away from the fuel to minimize dead-time, which was kept below 15%. The ^{137}Cs activities measured in 2024 were converted to percentage burnup values using a correlation established from the 2018 data. This correlation was based on the known linear relationship between ^{137}Cs activity and burnup, as documented in the literature. The core assumption was that the burnup values of the reference fuel elements (B5, D18, E14, and F30) did not change between 2018 and 2024 due to the reactor's inactivity in this period. Using this assumption, a linear calibration curve was constructed, and the corresponding equation was applied to the ^{137}Cs activities of the remaining 63 fuel elements.

The calculated burnup values were categorized into five distinct ranges and visualized on a core configuration map using color coding. Each fuel element's name and its corresponding burnup percentage were also compiled in a detailed table. Upon analysis of the spatial distribution of burnup, it was observed that fuel elements located at the center of the core had significantly higher burnup values, while those toward the outer rings showed decreasing trends. This outcome aligns with expectations, as the neutron flux and fission rate are highest at the core center. The B5 element was identified as having the highest burnup at 5.23%, while the F30 element had the lowest at 2.34%. A reconfiguration proposal was developed based on these burnup distributions. The suggested strategy involves relocating low-burnup elements from the outer rings to the inner regions of the core and moving high-burnup elements from the center to the periphery. This redistribution aims to balance the ^{235}U content within the core, extend fuel life, and maintain core symmetry, all of which are crucial for optimal reactor performance and safety. A more detailed reconfiguration proposal is presented in a separate study.

Another key objective of this study was the comparative analysis of gamma spectra obtained from fuel elements B5 and F30 in both 2018 and 2024. For B5, measurements were performed after cooling periods of 37 days (2018) and 768 days (2024). For F30, the corresponding cooling times were 10 days (2018) and 755 days (2024). The spectra acquired in 2018 were from the first external inspection system, while those from 2024 were obtained using the second, in-core system. The spectral analysis revealed that 10 radioisotopes were commonly present in both years for each fuel element. Additionally, 5 unique isotopes were detected in 2018 for B5 and 3 in 2024, while F30 showed 8 unique isotopes in 2018 and only 1 in 2024. The differences are attributed to the decay behavior of isotopes based on their half-lives. Short-lived isotopes were prominent in the 2018 spectra due to the short post-irradiation times, while long-lived isotopes dominated the 2024 spectra. Notably, the presence of ^{152}Eu , ^{134}Cs , and ^{54}Mn in 2024 (absent in the 2018 measurements) is consistent with their long half-lives and accumulation over time. The study also identified the radioisotope ^{140}La , emitting at

1596 keV, as a potential alternative burnup indicator. It was detected in both B5 and F30 spectra taken after 37 and 10 days of cooling, respectively. Given its short half-life, the optimal detection window for ^{140}La is within the first 0–40 days following reactor shutdown. Therefore, future research is recommended to further explore the use of ^{140}La as a short-term burnup indicator.

In conclusion, this study not only experimentally validates the burnup calculations of the ITU TRIGA Mark-II reactor but also provides essential data for core optimization and reconfiguration. The comprehensive comparison between two different measurement systems, the large-scale burnup mapping of 67 fuel elements, and the comparative analysis of isotopic evolution over six years collectively enhance our understanding of fuel behavior in research reactors. These findings lay the groundwork for future experimental and simulation studies aimed at improving the safety, efficiency, and sustainability of research reactor operations.





1. GİRİŞ

1.1 Nükleer Enerji

Global bir gereklilik haline gelen enerji ihtiyacı artışı, halihazırda kullanılan enerji kaynaklarının dışında güvenliği yüksek ve sürdürülebilirliği uzun, yeni enerji kaynaklarını bulmayı hedeflemiştir. En çok tercih edilen yakıt türü fosil yakıtların olumsuz çevresel etkileri ve kaynaklarının sınırlı olması sebebiyle bu yakıtlara alternatif yeni enerji kaynakları arayışı başlamıştır. Öne çıkan alternatif enerji kaynağı ise nükleer enerjidir. Bu kaynağın uzun yıllar sağlayacağı enerji ve çevre dostu düşük karbon emisyonu ile tercih edilen bir alternatif enerji kaynağı olmuştur [1]. Nükleer enerji kaynaklarının önde gelen avantajı, birim kütle başına çok yüksek enerji üretmesidir. Örneğin enerji üretimi için kullanılmakta olan kömürün açığa çıkardığı enerji ile nükleer enerji üretimi için yakıt olarak kullanılan ^{235}U yakıtının açığa çıkardığı enerji karşılaştırıldığında, arada yaklaşık 2,5 milyon kat oranın nükleer enerji lehine bir enerji üretimi farkı bulunmaktadır. Bu fark, nükleer enerjinin ne kadar avantaj sağlayabileceğini göstermektedir [2]. Bu avantajın kullanımını sağlayan ve nükleer enerjiyi, elektrik üretiminde kullanan yerlerin yüzdeleri; Avrupa için %42, doğu Asya için %17 ve ABD için %21 oranındadır [1]. Ülke bazındaki incelemelerde bu oranlar ciddi anlamda yükselmektedir. Örneğin Fransa için bu oranlar %75 değerini bulmaktadır [1]. Nükleer reaktörler, nükleer enerji üretimini kontrol temelleri üzerine oturarak güvenli bir zeminde üretmektedir. Bu enerji üretiminin yanında, üniversiteler yapılan bilimsel araştırmalar, nükleer tıp alanı, endüstri gibi birçok farklı mecrada da kullanılmaktadır. Bunlara ek, araştırma reaktörleri nötron üretiminde, malzeme analiz yöntemlerinde ve radyoizotop üretiminde kullanılarak nükleer mühendislik alanında geniş bir çalışma yelpazesine sahiptir [1].

1.2 Nükleer Reaktörler

Nükleer reaktörler birçok özelliklerine göre kategorize edilebilir. Bu kategorizasyon için kullanılan en temel özellikleri ise nötronlarının kinetik enerjileridir ve hızlı-termal

reaktörler olarak adlandırılırlar. Nötronlar, reaktördeki fisyon olaylarının oluşmasını sağlayan parçacıklardır. Her bir fisyon olayı sonucunda iki ya da üç nötron açığa çıkar ve yüksek enerjilere sahip olurlar. Eğer reaktörde bu olayları yavaşlatacak bir moderatör bulunmuyorsa reaktördeki fisyon olaylarının çoğunu hızlı nötronlar üretir. Bu reaktörlere hızlı reaktörler denilmektedir. Hızlı reaktörlerin aksine moderatör bulunan reaktörlerde ise nötronların yavaşlatılması sebebiyle hızlı nötronlar termal bölgeye düşerler ve reaktördeki fisyon olaylarının oluşmasını sağlarlar. Bu reaktörlere de termal reaktörler denir [3]. Bu ayrım dışında güç reaktörleri için de sınıflandırma 2000 yılı sonrasında, elektrik üretiminde kullanılan güç reaktörlerinin sayısı 500'e yaklaşmaktadır. Bu reaktörlerin içinde basınçlı su, kaynar su, gaz soğutmalı, ağır su soğutmalı, hafif su basınçlı reaktörler bulunmaktadır [4]. Güç reaktörleri elektrik üretiminden sorumludur. Elektrik üretimi dışında üniversitelerde bilimsel araştırmalara öncülük edilmesi, radyoizotop üretimi gibi çalışmalara imkan sunulması için nükleer araştırma reaktörleri kullanılmaktadır. Buna ek bu reaktörler düşük güçlüdür [5]. Nükleer araştırma reaktörleri farklı tip tasarımlara sahiptir. Açık havuz tipi ve tank tipi reaktör modelleri bu tasarımlara örnektir. Açık havuz tipi reaktörlerin bir avantajı, reaktör çekirdeğinin reaktör operatörleri tarafından rahatlıkla gözlemlenebilmesidir. Tank tipi reaktörlerde ise bu durum olmasa da kapalı tasarımı ve iyi soğutma sistemi sayesinde daha yüksek güç elde edilir [6].

1.2.1 TRIGA Reaktörleri

General Atomics kurumu 1950 yıllarının başlarında nükleer araştırma reaktörü geliştirmek istemiştir. Reaktörde başlıca hedefledikleri özellikler, güvenliği üst düzey, operasyonelliği ucuz ve çeşitli çalışma alanları için kullanılabilir bir tasarımı üretmektir. Ayrıca yakıt olarak düşük oranda zenginleştirilmiş ²³⁵U kullanmak istemişlerdir. Bu hedefleri doğrultusunda 1955 yılında baş harflerini (Training, Research, Isotope Production, General Atomic) kelimelerinden alan TRIGA araştırma reaktörü sunuldu. Bu reaktörün tanıtımı ile ileriki yıllarda 50'yi aşkın TRIGA reaktörü inşa edildi ve Mark isminin de eklenmesiyle Mark I, Mark II, Mark III versiyonları da üretildi [7]. Çalışma prensipleri aynı olan modellerin tank tasarımları ve yakıt tipleri birbirinden farklılık göstermektedir. TRIGA reaktörlerinin en önemli özelliği kullandıkları yakıtın ani negatif sıcaklık katsayısına sahip olmasıdır. Zenginleştirilmiş uranyum-zirkonyum-hidrit (U-ZrH) içeriğini yakıt olarak kullanan TRIGA reaktörler sahip oldukları bu katsayısı sayesinde reaktördeki ani güç artışı oluşması durumunda

yakıt sıcaklığını hızla yükselterek nötron yavaşlatma etkinliğini azaltır ve reaktörün reaktivitesini düşürerek gücü sınırlamış olur. Bu özellik TRIGA için kendinden güvenli reaktör tanımını kazandırmıştır [7].

1.2.2 İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü

Dünya üzerinde yaygın olarak kullanılmakta olan TRIGA reaktörleri, araştırma ve eğitim alanında kullanılması amacıyla 11 Mart 1979 yılında İstanbul Teknik Üniversitende, İTÜ TRIGA Mark-II ismiyle işletmeye alınmıştır [8]. Yer seviyesinde inşa edilen ve reaktörün çekirdeğinin sabit olması Mark-II isminin temelini oluşturmaktadır. İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü, grafit yansıtıcılara sahip, moderatör olarak hafif su kullanılan açık tank tipi bir reaktördür. Zenginleştirilmiş uranyum ile zirkonyum-hidrit (ZrH) yavaşlatıcı homojen şekilde karıştırılmış ve reaktörün yakıt içeriği olarak kullanılmıştır. Bu reaktör iki modda çalışmaktadır. Bunlar darbeli çalışma modu ve sürekli çalışma modudur. Sürekli modda çalıştırılan reaktör 250 kW güce ulaşabilmektedir. Darbeli modda ise çok kısa sürelerde 1200 MW güç seviyesi gözlemlenebilir. Diğer TRIGA reaktörlerde olduğu gibi İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün de yakıt elemanları ani sıcaklık katsayısına sahip olan, U-ZrH_{1,6} bileşiminden oluşmaktadır. Güvenliği ve verimliliği sayesinde İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünü üniversitenin eğitim ve araştırma çalışmalarında, radyoizotop üretimi gibi çalışma alanlarında önemli imkanlar sağlamaktadır [8]. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2 İTÜ TRIGA Mark II Araştırma Reaktörünü, reaktörün eski kontrol konsolunu göstermektedir [9].



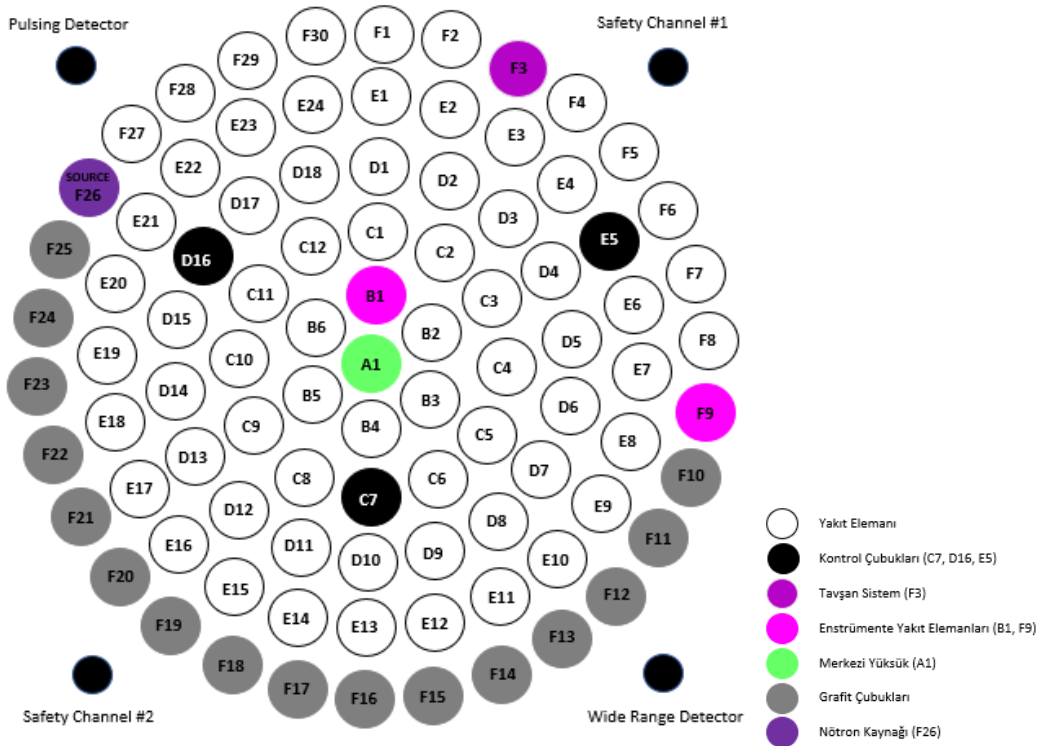
Şekil 1.1 : İTÜ TRIGA Mark II Araştırma Reaktörü [9].



Şekil 1.2 : İTÜ TRIGA Mark II Araştırma Reaktörü eski kontrol konsolu [9].

1.3 İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü Kalp Konfigürasyonu

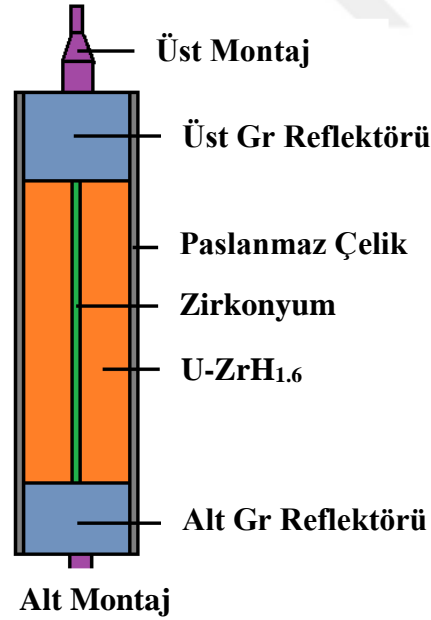
Silindirik kalp konfigürasyonuna sahip İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü 69 yakıt elemanına (paslanmaz çelik kılıfa sahip), 3 kontrol çubuğuna, 1 tavşan sistemine ve kalp merkezinden dışarı doğru sıralanan 5 halkaya (B, C, D, E, F), 2 ışınlama kanalına, 1 nötron kaynağına ve 16 grafit yansıtıcıya da sahiptir [10]. Şekil 1.3 reaktörün kalp konfigürasyonu göstermektedir [11].



Şekil 1.3 : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün kalp konfigürasyonu [11].

1.4 İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü Elemanları

Kalp konfigürasyonu, reaktörün merkezini ve kalp olarak adlandırılan bölgeyi göstermektedir (Şekil 1.3). Kalp içeriğinde, soğutucu (yalnızca termal reaktörlerde), yavaşlatıcı ve yakıt elemanları bulunmaktadır. Hızlı reaktörlerde soğutucu hariç diğer iki bileşeni içerir [1]. Ayrıca İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün kalbi kalp konfigürasyonunda verilen reaktör elemanları (Şekil 1.3) ile ilgili tanımlar yapılmıştır. Reaktör içerisinde bulunan yakıt elemanı; üst-alt montaj, üst-alt Gr reflektörü, paslanmaz çelik, zirkonyum, U-ZrH_{1.6} fisil izotopu içermektedir (Şekil 1.4). Bu izotop hem reaktörün kritikliğinden sorumludur hem de fisyon enerjisinin açığa çıkmasını sağlamaktadır. Reaktörlerin büyük bölümünde ²³⁵U içeriği artırılır ve yüzde birkaçı zenginleştirilerek kullanılır [1,11]. %20 oranında zenginleştirilmiş uranyum-zirkonyum-hidrit (U-ZrH) içeriğini yakıt olarak kullanan İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü ani sıcaklık katsayısına sahiptir. Bu katsayısı sayesinde reaktördeki ani güç artışı oluşumu durumunda yakıt sıcaklığını hızla yükselterek nötron yavaşlatma etkinliğini azaltır ve reaktörün reaktivitesini düşürerek gücü sınırlamış olur. Bu da reaktör güvenliğini artıran bir durumdur [7].



Şekil 1.4 : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü yakıt elemanı [11].

Hareket ettirilebilen kontrol çubukları, nötron soğurucu malzemelerdir ve reaktörün kontrolü için kullanılmaktadır. Kontrol çubukları nötron soğurucu malzemelerdir ve çoğalma faktörünü (k) etkilemektedirler. Çoğalma faktörü basit tanımıyla; bir

jenerasyondaki fisyon sayılarının bir önceki jenerasyondaki fisyon sayılarına oranını olarak tanımlanır. Kontrol çubuklarının reaktörden çekilmesi durumunda k değeri artarken, kontrol çubuklarının reaktöre girmesi ile k değeri azalır. Bu sebeple kontrol çubukları kullanılarak reaktör başlatılabilir, kapatılabilir ya da reaktörün güç çıkışları değiştirilebilir. Kontrol çubukları borlu çelik, kadmiyum ya da gümüş-indiyum-kadmiyum gibi nötron absorpsiyonu yüksek malzemeler kullanılarak üretilmektedir [1]. Reaktör kalbinin bitişiğinde bulunan bölge, yansıtıcı olarak adlandırılır. Bu bölgede nötron yavaşlatıcı malzeme içeren (bu reaktörde grafit) bir yapı bulunmaktadır. Tüm nötronlar kalp içinde tutulamaz ve bazı nötronlar kalbin dışına kaçar. Yansıtıcı ile bu nötronların yansıtılarak kalbin merkezine geri dönmesi sağlanır. Bu sayede kalbin merkezine geri dönen nötronlar, zincir tepkimenin devamını sağlar [1]. Yavaşlatıcı ise, sadece termal reaktörlerde bulunmaktadır. Fisyon sonucunda açığa çıkan nötronları termal enerjiye yavaşlatmak için kullanılmaktadır. Yavaşlatıcı olarak genellikle su, ağır su ve grafit kullanılmaktadır [1]. İTÜ TRIGA Mark-II reaktöründe yavaşlatıcı olarak hafif su kullanılmaktadır [8].

1.5 Tezin Motivasyonu

İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü üzerinde birçok simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu simülasyon sonuçlarından elde edilen yanma oranları değerlerinin karşılaştırılması ve teyit edilmesi amacıyla bir deneysel çalışma ile reaktörde bulunan tüm yakıt elemanlarının yanma oranları hesaplamalarının elde edilmesi ihtiyacı doğmuştur. Buna ek olarak, İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü üzerinde 1979 yılından beri herhangi bir yeniden yakıt yer değişimi (rekonfigürasyon) çalışması yapılmamış olması sebebiyle reaktöre yeni bir yakıt dizilimi önerisi ihtiyacı da doğmuştur. Bu iki durum, Tübitak 3501 Kariyer Projesi'ne önerilip kabul edilmesiyle çalışmamızın temelleri atılmış oldu. Bu motivasyon ile çalışmada üç ana amaç vardır. Bunların ilki ve en önemlisi, İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe bulunan 67 adet yakıt elemanının deneysel yöntemlerle hesaplanmasıdır. Bu hesaplama için 2018 yılında İTÜ TRIGA Mark- II Araştırma Reaktöründe Akyürek ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [11], reaktörde bulunan ve reaktörün kalbinin merkezinden dış halkalarına doğru seçilen dört yakıt elemanının (B5, D18, E24, F30) yüzdesel yanma oranı değerleri, tahribatsız analiz yöntemi olan gama spektroskopisi ile hesaplanmıştır. Buradan elde edilen yüzdesel yanma oranı değerleri ile 2024 yılında

kendi çalışmamızda 67 yakıt elemanından elde ettiğimiz ^{137}Cs aktivitesi değerleri ile bir korelasyon oluşturulması ve oluşan yeni metodoloji ile İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün içerisinde bulunan 67 yakıt elemanının yüzdesel yanma oranları değerlerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Elde edilen yüzdesel yanma oranları değerleri ile reaktördeki tüm yakıt elemanlarının buldukları halkalara göre bir çizelge ve şekil ile görselleştirme oluşturulması amaçlanmıştır. İkinci ana amacımız, tüm yakıt elemanları için elde edilen yüzdesel yanma oranları değerlerine uygun bir rekonfigurasyon önerisi sunmaktır. Bu sayede yakıtların kullanımını artırmak, reaktörün performansını ve sistemin sürdürülebilirliğini iyileştirmek açısından katkı sağlanması amaçlanmıştır. Son ana amaç ise Akyürek ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmadan [11] seçilen iki yakıt elemanının (B5, F30) gama spektrumlarının, 2024 yılında aynı iki yakıt elemanının (B5, F30) gama spektrumları ile incelenip karşılaştırılması, her bir enerji tepesinin ayrı ayrı analiz edilmesi ve hangi radyoizotopların elde edildiğinin çizelge haline getirilmesi de amaçlanmıştır. B5 ve F30 yakıt elemanları üzerinde yapılan spektrum incelemeleri, 2018 verileri için 10 günlük (F30 yakıt elemanı için) ve 37 günlük (B5 yakıt elemanı için) bir soğuma süresine göre incelenirken, 2024 verileri için 755 günlük (F30 yakıt elemanı için) ve 768 günlük (B5 yakıt elemanı için) bir soğuma süresi ardından incelenmiştir. Bu spektrum incelemeleri sonucunda gelecek çalışmalarda kullanılabilecek alternatif bir indikatör (gösterge) radyoizotop tespiti de yapılmıştır. Bu ana amaçlar üzerinde çalışmamız gerçekleştirilmiştir.



2. TEORİ

2.1 Yanma Oranı ve Hesaplama Yöntemleri

Nükleer reaktörlerde bulunan yakıtların yanma oranlarının bilgisi reaktör için önem arz etmektedir. Yanma oranı, nükleer reaktörlerde bulunan yakıt elemanlarının birim kütle başına elde edilen enerjiyi göstermektedir. Bu parametre, nükleer reaktöre ait olan yakıt bileşenlerinin reaktörün operasyonel çalışma süresince ne kadar enerji üretildiğinin bilgisini verir. Ayrıca reaktörün performansını gösterirken, reaktörün güvenlik parametrelerinin belirlenmesini de sağlamaktadır. Ayrıca yakıtın, reaktörde bulunduğu sürenin başlangıcından, yakıt elemanı üzerinde hesaplama yapılacak olan zamana kadar maruz kaldığı radyasyon süresi ile geçirdiği fisyon olaylarının sonucunda ne kadar tükendiği bilgisini de elde etmektedir [1]. Yanma Oranı, deneysel ve simülasyon yöntemleri kullanılarak belirlenebilir:

2.1.1 Deneysel yöntemler

Yakıtların yanma oranlarının belirlenmesi için kullanılmakta olan deneysel yöntemler, tahribatlı analiz ve tahribatsız analiz (TA) yöntemleridir Tahribatlı analiz yönteminde ise yanmış yakıtların yanma oranı hesaplaması için yakıtın kimyasal yolla çözünmesi gerekmektedir [13]. Bunun için genellikle radyokimyasal analiz ile kütle spektroskopisi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en iyisi ise kütle spektroskopisi yöntemidir. Çünkü nükleitlerin bağıl ve mutlak konsantrasyonları çıkarılır ve matematiksel ifadeler kullanılarak bu bilgiler, yakıt yanma oranları ile birleştirilir “Ancak bu yöntem pahalı olması sebebiyle ve yakıtı parçalarına ayrılması gerektiğinden kullanılması önerilmeyen bir metottur.” [13]. Tahribatsız analiz yönteminde ise üzerinde çalışma yapılan yakıt elemanının yapısını değiştirmeden ve bozmadan analizinin yapılması amaçlanır. Bunlardan biri olan gama spektroskopisi ile yanmış yakıtın analizi yapılır. Bu analizde, yakıtlarda bulunan ve bölünebilen her bir nükleit için fisyon olayı başına salınan enerjinin gözlemlenmesi hedeflenir [13]. Bu gözlemin aktarılması için de bir indikatör (gösterge) izotop seçimi yapılmaktadır.

Yanma oranı ile ilgili yapılan çalışmalarda; Reilly, 1978 yılında denklem (2.1) kullanarak çalışmalarını yapmıştır [14].

$$BU = 100 \times \frac{\left(\frac{N}{Y}\right)}{U} \quad (2.1)$$

(2.1) numaralı denklemde N fisyon ürünü çekirdeklerinin sayısını, Y fisyon ürünü verimini ve U da başlangıçtaki uranyum atomlarının sayısını temsil etmektedir. Usman ve Dennis 2010 yılında denklem (2.2) kullanarak yanma oranı hesaplarını yapmışlardır [15].

$$BU = (1.8895 \times 10^{-22}) \times E \times \frac{(N)}{Y} \quad (2.2)$$

(2.2) numaralı denklemde de N ve Y ifadeleri fisyon ürünü çekirdeklerinin sayısını, Y fisyon ürünü verimini temsil etmektedir. Ayrıca, bundan başka birçok tahribatsız yöntem kullanılmakla beraber bu yöntem reaktörün güç geçmişinden bağımsız olarak yanma oranı hesabı yapan en etkili yöntemlerdendir.

2.1.2 Nümerik yöntemler

Yakıtların yanma oranı hesaplamaları yapılırken nükleer analiz yazılımları (MCNP veya ORIGEN gibi) kullanılabilir. Bu yazılımlar ile yakıtların yanma süreçleri, reaktörün operasyonel bilgileri ve reaktöre ait olan değişkenlerin bilgileri kullanılarak simüle edilip hesaplanabilir [16].

2.2 Tahribatsız Analiz Yöntemi

Materyallerin analizi ve karakterizasyonu yapılırken iki yöntem kullanılır. Bunlar tahribatlı analiz ve tahribatsız analiz (TA) yöntemleri olmak üzere önemli farklılıklara sahiptir. Bu iki yöntem kullanılarak materyallerin iç yapısı belirlenir, mekanik özellikleri ile ilgili bilgiler elde edilir ve nükleer yakıt elemanlarının analizinde kullanılır. Bu çalışmada Tahribatsız analiz yöntemi olan gama spektroskopisi kullanılmıştır. TA, materyallerin ya da bileşenlerin iç yapısına herhangi bir zarar vermeden ya da yapıyı değiştirmeden analiz edilmesini sağlar. Bu yöntem ile özellikle nükleer yakıt elemanlarının karakterizasyonu belirlenirken öte yandan metal gibi malzemelerin kusur tespiti yapılabilir ve yapıların ne kadar dayanıklı olduğu ile ilgili bilgiler elde edilebilir [17]. Ayrıca üzerinde çalışma yapılan materyal ya da

malzemenin tekrar kullanılmasına olanak sağlar. Gama ışınları, radyoaktif bozunum süreci sonucunda açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu gama ışınlarını incelemek, nükleer durumların yapılarını açıklamak ve bilgi edinmek adına önemli bir yöntemdir. Oldukça kolay olan bu analiz yöntemi, gama ölçümü yapabilen herhangi bir dedektörle yapılabilmektedir. Ancak dedektörün yüksek çözünürlüklü ve yüksek hassasiyetli olması ölçümlerin analizlerini kolaylaştırır. Bu analiz yöntemi, nükleer fizik, nükleer mühendislik ve malzeme bilimi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu ölçümler yapılırken; öncelikle gama ışınlarının spektrumlardaki enerji ve şiddetlerinin bilgileri elde edilir. Ardından radyasyonun karakteri, spinleri ve pariteleri belirlenir [18]. Gama spektroskopisinde yaygın olarak kullanılan dedektörler yarı iletken dedektörlerdir. Bu dedektörlerin yüksek çözünürlük ve yüksek hassasiyete sahip olması, düşük enerjili gama ışınları için etkili bir ölçüm dedektörüdür [19]. Bu dedektörler dışında talyum katkılı ya da sodyum iyodür dedektörleri de tercih edilmektedir. Bu dedektörler daha düşük maliyetleri ve geniş kullanım alanlarına sahip dedektörlerdir. Fakat enerji çözünürlüklerinin yarı iletken dedektörlere düşük olması sebebiyle düşük enerjili gama ışınları ölçümlerini algılayamazlar. Gama spektroskopisinde tercih edilen sodyum iyodür sintilatör dedektörler ve yarı iletken dedektörlerin bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin sodyum iyodür sintilatör dedektörlerinin boyutlarının büyük olduğu ve malzemesinin yoğunluğu sebebi ile gama ışınlarının dedektörle yüksek etkileşim ihtimalleri vardır. Bunun sonucunda dedektör ile etkileşen tüm parçacıkların büyük bir kısmı emilir ve fotofraksiyona sebep olur. Ayrıca sintilatör dedektörlerinin enerji çözünürlükleri düşüktür ve bu sebeple düşük enerjili fotonların ölçümlerini yapamazlar. Yarı iletken dedektörler ise sodyum iyodür sintilatör dedektörlere oranla daha yüksek bir enerji çözünürlüğüne sahiptirler. Ancak bunun bir sonucu olarak bu dedektörler daha küçük boyutlardadırlar. Bu da fotopik verimliliğinin düşmesine sebep olur. Fakat yarı iletken dedektörlerde bulunan germanyum yarı iletkeninin üstün enerji çözünürlüğü ile spektrumlardaki tepe noktaları birbirlerine çok yakın olsalar da ayrılırlar ve net tepelerin görülür hale gelmesini sağlarlar. Ayrıca düşük enerjili gama ışınlarının tespitinin de yapılmasına yardımcı olur [19]. Bu sebeple bu çalışmada da HPGe yarı iletken dedektörü kullanılmıştır. Kullanmış olduğumuz gama spektroskopisi, yakıt elemanlarının yanma oranı değerlerinin hesaplanması için kullanılan yaygın bir yöntemdir [20]. Bu yöntem, yakıtta tahribata sebep olmaması ve daha uygun bir çalışma alanı oluşturması sebebiyle uygulanması da kolay bir yöntemdir. Bu yöntem kullanılırken bir indikatör

(gösterge) izotop seçimine ihtiyaç vardır. ^{154}Eu , ^{137}Cs ya da ^{134}Cs gibi radyoizotoplar sıklıkla kullanılan indikatörlerdir. Bu indikatörler için aranan koşullar, düşük nötron yakalama kesiti, uzun yarı ömür ve yüksek enerjili gama emisyonu, yüksek fisyon verimi, yüksek dallanma oranı, düşük üretim modu ve matris yayılımı özelliklerini taşınmasıdır [15, 21]. Bu indikatörün ^{137}Cs olarak belirlenmesiyle birlikte Akyürek ve çalışma arkadaşları tarafından [11] farklı bir yakıt inceleme sistemi kullanılarak tahribatsız analiz yöntemi gama spektroskopisi ile çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk sistemde, bu çalışmadaki sisteme benzer bir yakıt inceleme kaskı reaktör dışına konumlandırılmıştır ve yakıt elemanının aksel uzunluktaki farklı noktalarından ölçüm alınmasını kolaylaştırmıştır. Ayrıca bu sistemin arka kısmına bir nötron kaynağı yerleştirilebilmektedir. Buna ek olarak bu sistem ile nötron spektroskopisi çalışmaları da yapılabilmektedir. İkinci sistem ise reaktör çekirdeğinin havuzunun üzerine yerleştirilmiş kurşun kask sistemi ile yakıt elemanlarının merkez noktasından ölçüm almayı hedeflemiş ve nükleer yakıtların analizlerini kolaylaştırmıştır. Bu sayede iki farklı nükleer yakıt inceleme sistemiyle, İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün yakıt elemanlarının yüzdesel yanma oranları ^{137}Cs aktivite ölçümleri ile belirlenmiştir. İlk sistemde, reaktör kalbindeki farklı halkalardan seçilen dört yakıt elemanı özelinde (B5, D18, E14 ve F30) aksel düzlemde gama spektroskopisi yapılmıştır ve ^{137}Cs indikatörü kullanılarak bu dört yakıt elemanının yanma oranı değerleri ilk sistemle belirlenmiştir. Elde edilen bu yanma oranı değerleri ile ikinci sistemden aynı dört yakıt elemanı için (B5, D18, E14 ve F30) elde edilen ^{137}Cs aktiviteleri kullanılarak bir korelasyon oluşturulması amaçlanmıştır ve bu sayede reaktörde bulunan tüm yakıt elemanlarının yanma oranları dağılımı tahmin edilmiştir. İkinci sistemde, gama spektroskopisi ölçümleri tüm yakıt elemanlarının merkezinden alınmıştır; bu yakıt elemanları arasında, ilk sistemle yanma değeri daha önce belirlenenler de bulunmaktadır. Tüm yakıt elemanlarının gama emisyonları, yanması bilinen elemanların verilerine göre doğrusal olarak uydurulduğunda, elde edilen eğim ile tüm elemanların yanma oranı değerleri hesaplanabilmektedir. B5, D18, E14 ve F30 yakıt elemanlarının yanma oranı değerleri, birinci sistemde ölçülen ^{137}Cs emisyon oranları temel alınarak denklem (2.1) ve (2.3)'de verilen yanma hesaplama formülleri ile hesaplanmıştır [11].

$$I (\text{counts/s}) = \epsilon \cdot k \cdot S \cdot N \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot T} \quad (2.3)$$

Bu hesaplamalarda kullanılan parametreler şunlardır:

I: Ölçülen gama aktivitesi,

ϵ : Dedektörün mutlak verimliliği,

k: Yanma göstergesinin dallanma oranı (branching ratio),

S: Özsoğurma (self-attenuation) faktörü,

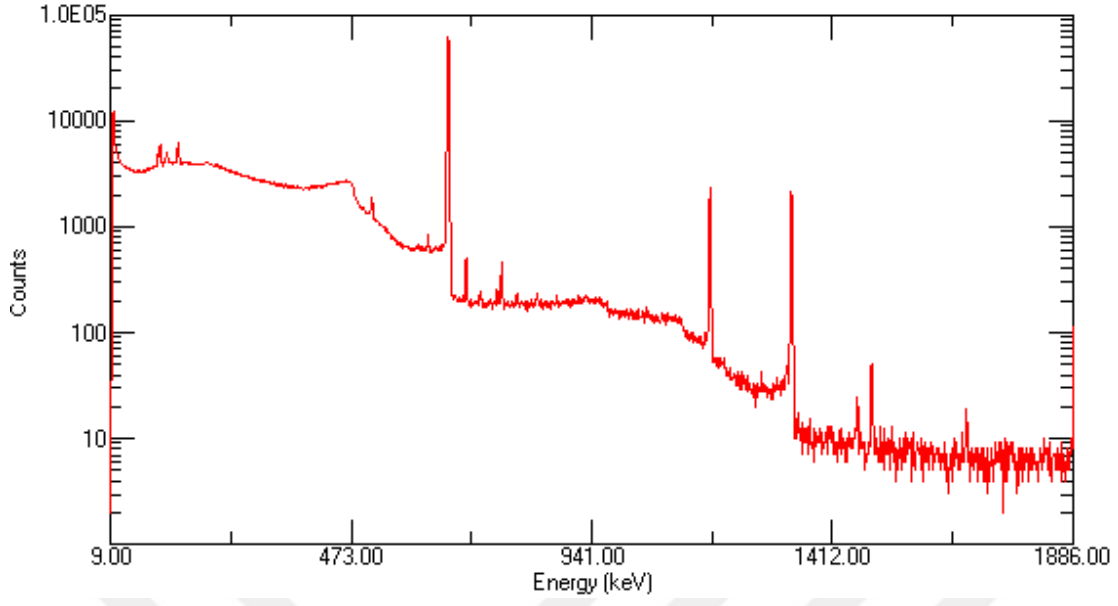
λ : Bozunma sabiti,

T: Yakıt elemanının soğuma süresi,

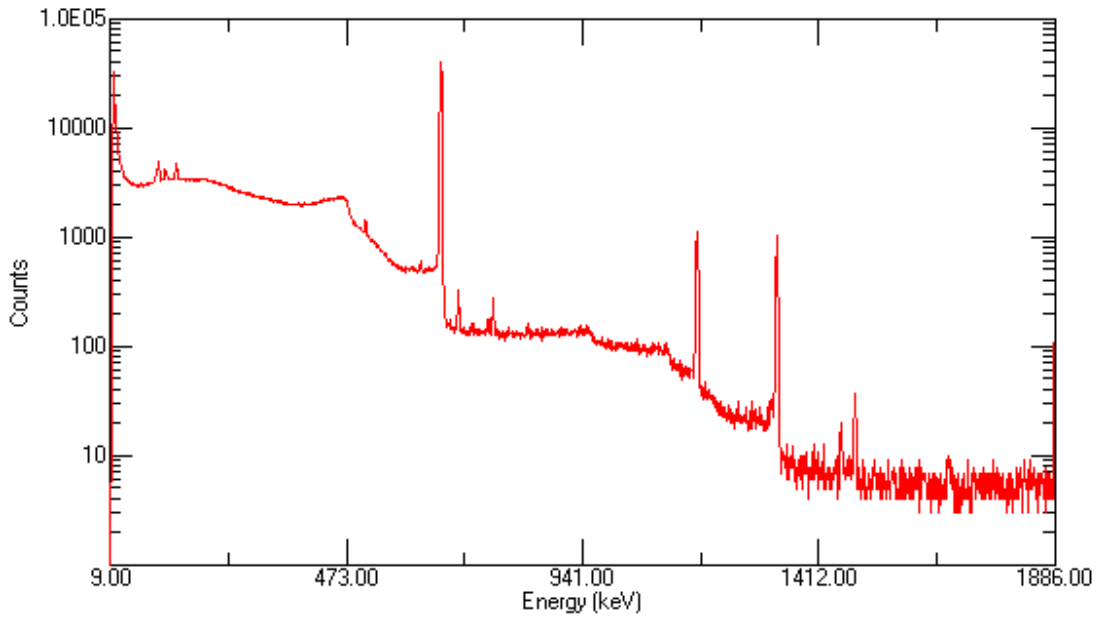
N: fisyon ürünü çekirdeklerinin sayısını temsil etmektedir. [11,14]. Bu çalışma aynı zamanda kapsamlı bir gama spektroskopisi analizini de içermektedir. Her iki yakıt izleme sisteminden farklı zamanlarda toplanan spektral veriler detaylı şekilde değerlendirilmiş ve sistematik olarak karşılaştırılmıştır.

2.3 Spektrum Analizi

Gama spektrumlarında, belirli enerjilerde tepeler (peak) oluşmaktadır ve bu tepe değerleri belirli radyoizotopları temsil etmektedir. Bu enerjileri ölçmek için belirli bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Bir dedektör yardımıyla (yarı iletken ya da sodyum iyodür) yapılan ölçümler ile oluşan elektronik sinyaller, ön yükseltici adı verilen elektronik aksana gider. Bu aksana gelen yükler voltaj yüklerine dönüştürülür. Sonrasında bir diğer elektronik aksan olan yükseltici ile bu voltaj yükleri milivolt seviyesinden volt seviyesine yükseltilir. Elde edilen çıkış pulsları çok kanallı analizörün kullanımıyla sayısal değerlere dönüştürülür ve spektrum oluşturulur [19]. Bu çalışmada tahribatsız analiz yöntemi gama spektroskopisi kullanılarak yapılan incelemeler sonucunda, 2018 yılında İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe iki farklı yakıt elemanı (B5, F30) üzerinde yapılmış spektrum analizi verileri ve gama spektrumları kullanılarak, 2024 yılında aynı iki yakıt elemanı için gama spektrumları çıkarılmış, spektrumdaki her bir tepe için incelemeler yapıp açığa çıkan radyoizotoplar belirlenmiş ve 2018 verileri ile karşılaştırmaları yapılmıştır. 2024 yılındaki çalışmadan alınan bazı yakıtların gama spektrumları verilmiştir (Şekil 2.1, Şekil 2.2). İki spektrum karşılaştırıldığında, benzer bir tepe dağılımının olduğunu görmekteyiz. Yakıtların benzer soğuma sürelerine sahip olması bu tepe dağılımına sebep olabilir.



Şekil 2.1 : D18 yakıt elemanın 2024 yılındaki gama spektrumu.

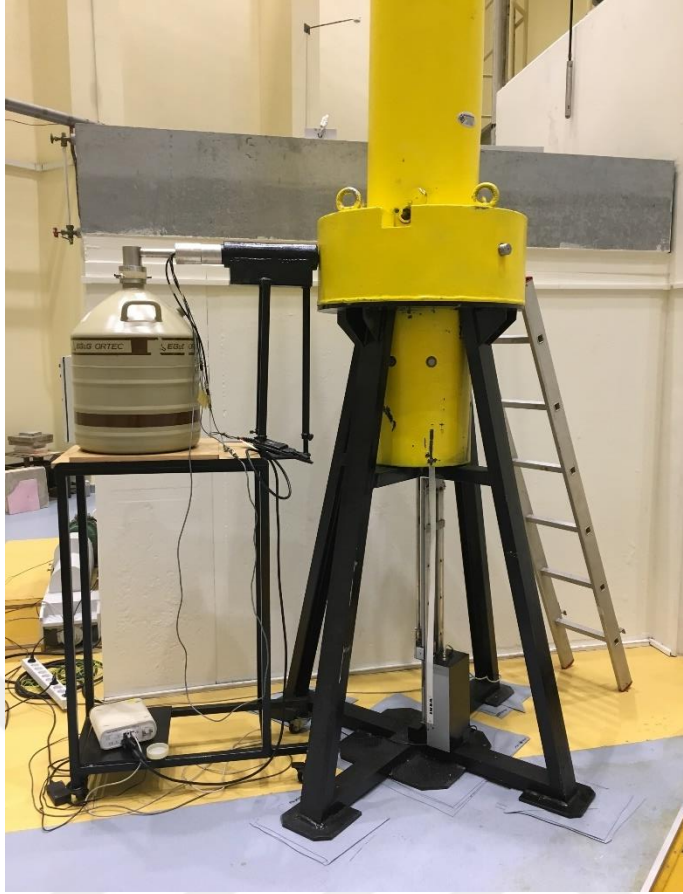


Şekil 2.2 : E14 yakıt elemanın 2024 yılındaki gama spektrumu.

3. METOT

3.1 Yakıt İnceleme Sistemi ve Tahribatsız Analiz Yöntemi ile Nükleer Yakıt İnceleme Sistemi

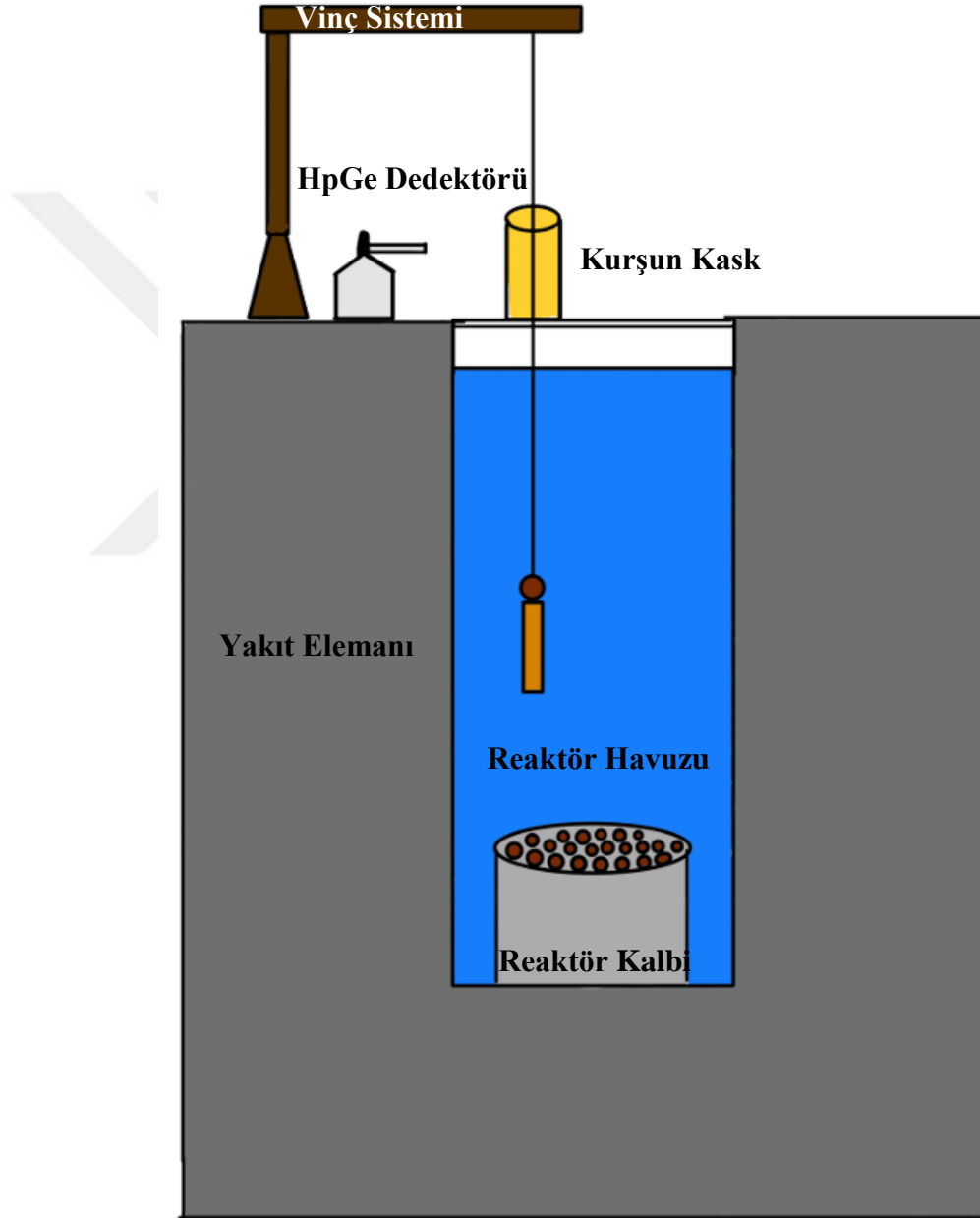
İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe yapılan çalışmalar süresince, radyasyondan korunma yöntemlerine bağlı kalınmış, reaktörde geçirilen süre boyunca maruz kalınan doz değerleri not edilmiş, reaktör operatörü ile radyasyondan korunma ve sağlık fizikçisi çalışanlarının dediklerine uyularak belirli bir program içerisinde yakıt çekim çalışmalarımız kendileri tarafından yapılmış ve sonlandırılmıştır. Tüm çalışma gerekli kurumlardan izinler alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada, İTÜ TRIGA Mark II Araştırma Reaktörünün kalbinde bulunan tüm yakıt elemanlarının yüzdesel yanma oranları, iki farklı yakıt inceleme sistemi kullanılarak, on dakikalık ölçümler alınarak ve ^{137}Cs indikatör radyoizotopunun aktivitesi ile yanma oranı arasındaki doğrusal ilişkiye dayandırılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, B5, D18, E14 ve F30 yakıt elemanlarının farklı zamanlar ait alınmış gama spektroskopisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Fakat, kolaylık sağlanması amacıyla bu çalışmada yalnızca B5 ve F30 yakıt elemanlarının farklı zamanlarda yapılmış gama spektroskopisi analizlerine yer verilmiştir. Bu çalışmada yapılan yüzdesel yanma oranı hesaplamaları, 2018 yılında Akyürek ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmadan alınmış yanma oranları değerleri ile bir korelasyon oluşturulması sonucu elde edilmiştir. Bu sebeple, ilk olarak 2018 yılındaki yakıt inceleme sistemi (Şekil 3.1) ile çalışmaların nasıl yapıldığı bilgisi verilmelidir. Yakıt İnceleme Sistemi (Şekil 3.1) reaktörün dış kısmına yerleştirilen ve kurşun materyalinden oluşan özel bir sistem olarak tasarlanmıştır. Bu sistem üç ana bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşen taşıma kabı olarak adlandırılır ve görevi bir vinç sistemi yardımıyla reaktör kalbi içerisinde bulunan ilgili yakıt elemanlarının kalpten çıkarılarak güvenli bir şekilde reaktör dışına taşınmasını ve yakıt elemanının ikinci ana bileşen olan ölçüm kabına yerleştirilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.1 : Yakıt inceleme sistemi [11].

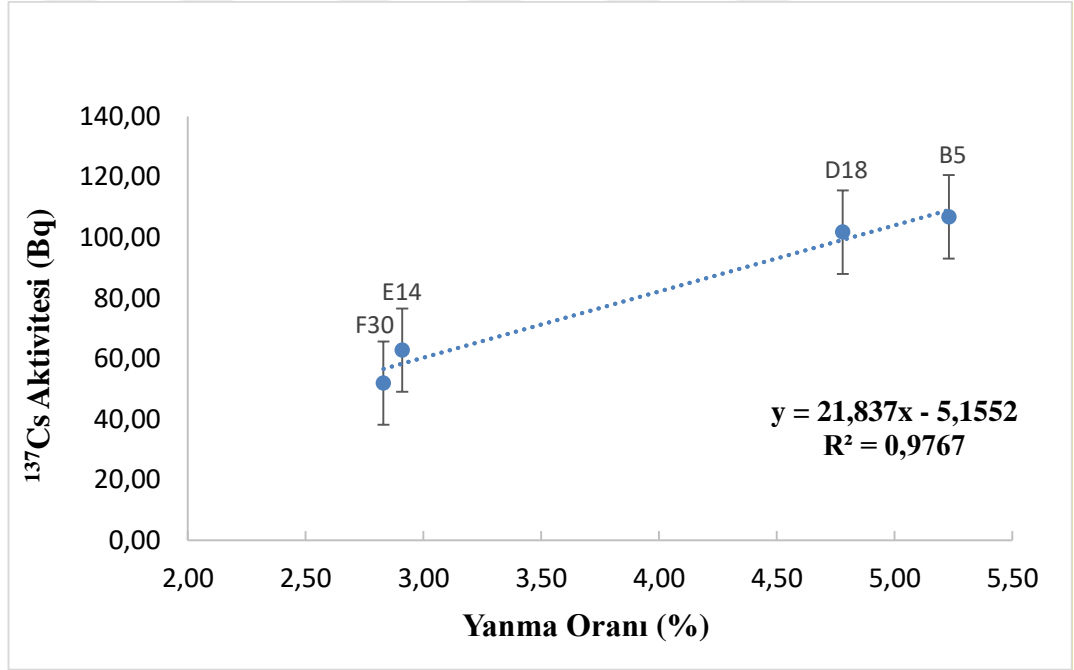
Yakıt elemanı, ölçüm kabı içerisindeki elektronik ızgaraya yerleştirilir. İkinci ana bileşen ölçümlerin yapıldığı T şeklindeki ölçüm kabıdır. Ölçüm kabı üzerinde gama spektroskopisi ölçümleri yapılabilmesi için bazı delikler bulunmaktadır. Ayrıca, sistemin arkasına konulacak olan bir nötron kaynağı ile nötron spektroskopisi ölçümlerinin de yapılabilmesine de olanak sağlayan bu sistemin son ana bileşeni ise yakıt elemanının y eksenini boyunca hareketini sağlayan elektronik sistemdir. Bu sayede yakıtın farklı noktalarından ölçüm alınabilmesi sağlanmaktadır [11]. Bu sistem ile reaktörün kalbinin merkezinden kalp merkezinin dışına doğru olmak üzere seçilen dört yakıt elemanı (B5, D18, E14 ve F30) sırasıyla belirtilen şekilde yakıt inceleme sistemine yerleştirilmiş ve her yakıtın ayrı ayrı eksenel düzlemi boyunca her 3 cm’de bir on dakikalık gama spektroskopisi ölçümleri alın ve ^{137}Cs aktiviteleri belirlenmiştir. Belirlenen ^{137}Cs aktivitelerinin ortalamaları alınarak denklem (2.1) ve (2.3)’de verilen yanma hesaplama formülleri ile hesaplanmıştır [11]. Yakıt inceleme sistemi ile 2018 yılında yapılmış olan çalışma sonucu dört yakıt elemanının yüzdesel yanma oranları hesaplanmış ve bizim çalışmamızda kullanacağımız korelasyon için referans değerler olarak alınmıştır. Bu çalışma için reaktör güvenlik komitesinin, çekirdek dışındaki

kapsamlı inceleme sistemi ile tüm yakıt elemanlarında gama spektroskopisi yapılmasının yakıt güvenliği açısından risk oluşturabileceği yönündeki değerlendirmesi nedeniyle, bu çalışmadaki ikinci sistem kullanılmıştır. İkinci sistem, 2024 yılında yapmış olduğumuz çalışmadaki Tahribatsız analiz yöntemi ile nükleer yakıt inceleme sistemi (Şekil 3.2), birinci sistemin aksine reaktör havuzunun (mavi bölge) üzerine konumlandırılmıştır. Bu sayede daha güvenli bir ölçüm sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 3.2 : Tahribatsız analiz yöntemi ile nükleer yakıt inceleme sistemi.

bulunan 67 yakıt elemanının her birinin ^{137}Cs aktivitesi tespitleri yapılmıştır. 2018 yılındaki çalışmadan referans alınan [11] dört yakıt elemanının (B5, D18, E14 ve F30) yüzdesel yanma oranları ile aynı yakıt elemanlarının, mevcut çalışmamızdan elde edilen ^{137}Cs aktivitesi değerleri belirlenmiştir. ^{137}Cs aktiviteleri ile verilmiştir. ^{137}Cs aktivitesinin yanma oranı ile doğrusal arttığı literatürde iyi bilinmektedir [15]. Elde edilmek istenen korelasyon (Şekil 3.4) 2018 yılındaki B5, D18, E14 ve F30 yakıt elemanlarının yüzdesel yanma oranları ile 2024 yılındaki aynı dört yakıt elemanının ^{137}Cs aktiviteleri ile verilmiştir. 2018 yılındaki çalışmadan [11] referans alınan yanma oranlarının, 2024 yılındaki ^{137}Cs aktivitelerinin bilgileri ile kullanılmasının sebebi, 2018 yılından sonra reaktörün çalıştırılmamış olmasıdır. Bu durum, yakıt elemanlarının bu yıla gelindiğindeki yüzdesel yanma oranı değerlerinde bir değişim göstermemesinin beklenmesi ile ilişkilidir. Bu sayede korelasyon oluşturulmuştur.



Şekil 3.4 : Dört yakıt elemanının ^{137}Cs aktiviteleri ve yanma oranları.

Verilere doğrusal bir trend çizgisi uydurulmuş ve bu eğriye ait denklem, denklem (3.1) olarak elde edilmiştir.

$$y=21,837x - 5,1552 \quad (3.1)$$

Ölçülen ^{137}Cs aktiviteleri (Tablo 3.1), bu doğrusal denklem (3.1)'de yerine konularak $R^2=0.9767$ korelasyon katsayısıyla yüksek doğrulukta yüzdesel yanma oranı değerleri hesaplanmıştır. Bu sayede yeni bir metodoloji kullanılarak literatüre katkıda

bulunulması hedeflenmiştir. Elde edilen bu lineer ilişkinin, tüm diğer yakıt elemanlarının yüzdesel yanma oranı değerlerinin hesaplanmasıyla beraber benzer şekilde ^{137}Cs aktivitelerine karşılık gelen yanma oranı değerleri ile oluşturulacak grafiğin aynı lineerliği göstermesi beklenmektedir.

Çizelge 3.1 : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü yakıt elemanlarının ^{137}Cs aktiviteleri (Bq).

Yakıt Elemanı	^{137}Cs Aktivitesi (Bq)	Yakıt Elemanı	^{137}Cs Aktivitesi (Bq)
B1	106,75	E3	75,88
B2	97,29	E4	68,72
B3	99,89	E6	82,63
B4	106,33	E7	64,60
B5	106,83	E8	57,70
B6	106,75	E9	56,66
C1	102,83	E10	53,65
C2	107,42	E11	55,12
C3	96,90	E12	53,73
C4	95,10	E13	52,48
C5	81,73	E14	62,78
C6	89,47	E15	68,32
C8	102,70	E16	59,71
C9	80,48	E17	62,30
C10	93,75	E18	76,59
C11	100,65	E19	81,46
C12	106,98	E20	73,65
D1	89,95	E21	68,41
D2	92,59	E22	63,20
D3	92,80	E23	66,01
D4	86,09	E24	66,06
D5	83,82	F1	53,33
D6	80,39	F2	68,40
D7	70,00	F4	54,91
D8	66,41	F5	52,99
D9	74,41	F6	57,17
D10	63,17	F7	49,16
D11	85,97	F8	54,06
D12	77,84	F9	54,06
D13	78,53	F27	48,62
D14	76,23	F28	45,84
D15	81,66	F29	51,31
D17	102,37	F30	51,92
D18	101,79		
E1	64,69		
E2	70,10		

Ayrıca iki yakıt elemanı (B5 ve F30) için spektrum analizi yapılarak hangi fisyon ürünlerinin açığa çıktığı tespit edilmiştir. Bu sayede spektrum analizi yapılarak her bir enerji tepesi için açığa çıkan radyoizotoplar tespit edilmiş ve 2018 yılındaki yakıt elemanlarının spektrum analizlerinden elde edilen radyoizotoplar ile 2024 yılında mevcut çalışmadaki spektrumların aralarındaki ilişki karşılaştırılmıştır. Yüksek yarı ömürlü ve yüksek yoğunluğa sahip radyoizotopların her iki yılın verilerinde gözlemlenmesi öngörülmürken, kısa yarı ömürlü radyoizotopların kısa soğuma süresi sonrasında elde edilen spektrumdan dolayı 2018 yılında gözlemlenirken, 2024 yılında spektrumun uzun soğuma süresi sonrası elde edilmesi sebebiyle aktivitesini kaybederek kaybolması beklenmektedir. Bu çalışmada, yüzdesel yanma oranı hesaplamaları ve spektrum analizleri dışında rekonfigürasyon çalışması da yapılmıştır. Bir nükleer reaktörün çekirdeğindeki yakıt elemanlarının uygun hesaplamalar yapılarak yerlerinin değiştirilip yeniden düzenlenmesine rekonfigürasyon denir. Bu düzenleme, reaktörün çalışma ömrünün uzatılması, reaktör çekirdeğinde bulunan yakıtların yanma oranlarının optimizasyonu, reaktörün verimliliğini artırmak ve güvenlik parametrelerini iyileştirmek gibi sebeplerle yapılmaktadır. Rekonfigürasyon yapılırken herhangi bir sayısal kısıtlama yoktur ve nükleer reaktörün çalışma ömrü boyunca birkaç kez yapılabilmektedir. Ancak her bir rekonfigürasyon reaktörün tipine, yakıt türüne ve gereksinimlere göre değişiklik gösterebilmektedir [22]. TRIGA reaktörlerinde rekonfigürasyon, eğitim ve araştırma için kullanılan ihtiyaçlara göre yapılmaktadır. Reaktördeki yakıtların yanma oranları farklılık göstermektedir ve reaktör çekirdeği içerisindeki yakıt elemanlarının buldukları konumlar ve her bir yakıtın yanma oranları belirlenip değerlendirilerek, yakıtların yer değişikliği yapılır. Örneğin, İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe, 1979 yılından beri herhangi bir yakıt yer değişimi yapılmaması sebebiyle reaktör için bir rekonfigürasyon önerisi ihtiyacını doğurmuştur [11]. Bu çalışmada, yüzdesel yanma oranı hesaplamaları, spektrum analizleri ve karşılaştırmaları ile İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü için bir rekonfigürasyon önerisi çalışması yapılmış ve gösterilmiştir.

3.2 Deney ve Simülasyon

Temelinde radyasyon ve temel çevresel koşullar bulunan çalışmaların simüle edildiği senaryolarda yüzde yüzlük bir benzerlik elde etmek mümkün değildir. Radyasyon başlı başına her bir ölçümde farklı sonuçlar verebilen bir unsurken, deney sistemi,

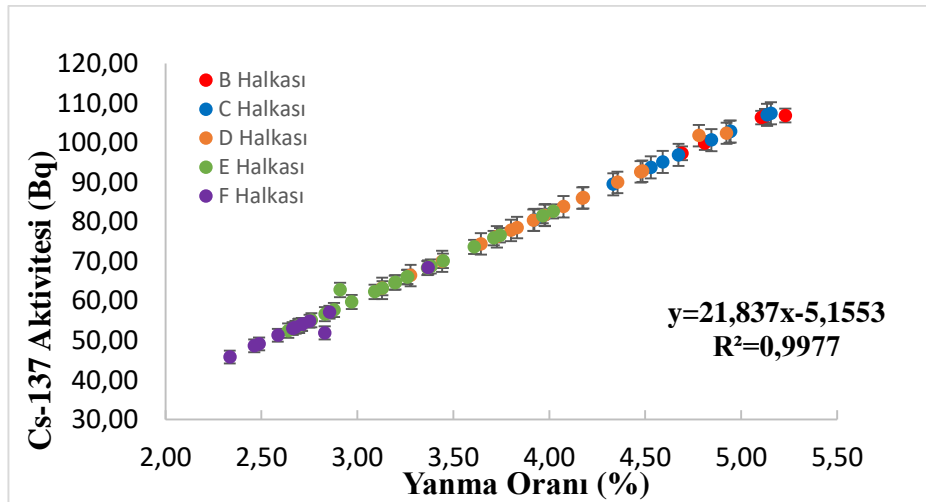
dedektörlerin kalitesi ve çalışma durumu, ortam koşulları tüm sistemi etkileyen unsurlardır. Bunlar simüle edildiğinde birbirinden farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu sebeple %10 ve altındaki hata oranları ile karşılaşıldığında deney ve simülasyon değerleri birbiriyle uyumlu görülmektedir. Nükleer reaktörlerde yanma oranlarının doğru belirlenebilmesi için reaktörün kalp tasarımı ve güvenlik parametrelerinin tespiti için oldukça önemlidir. Ancak, yanma oranı hesaplamaları yapılırken sadece simülasyon çalışmalarının yapılması, birçok hata kaynağı sebebiyle güvenilir sonuçlar vermeyebilmektedir. Missouri Science and Technology Reaktöründe yapılan bir çalışmada, güç değerlerinin yanlış modellenmesi, kısa yarı ömürlü fisyon ürünlerinin bozunmalarının yanlış hesaplanması sonucunda izotopik bileşimlerin yanlış değerlendirilmesine yol açmıştır. Bu hatalar sonucunda yakıt elemanlarının kullanım sürelerinden daha az yanmış olduğu sonucu vermiştir [23]. Birbirine benzer şekilde MCNP simülasyon kodları da bazı kısıtlamalar ile kullanılmaktadır. Genellikle nükleer reaktörlerde bulunan yakıt elemanlarının yanma olaylarının modellenmesi için kullanılmaktadır. Fakat, nötron etkileşimleri 63 enerji grubunda incelenir. Bu nedenle nötron etkileşimleri doğru tahmin edilemez ve yanma oranları değerleri hatalı sonuçları beraberinde getirebilir. Deneysel çalışmalara genel olarak bakıldığında, farklı konumlardaki yakıt elemanları farklı oranlarda yanma oranı değerlerine sahipken, MCNP aynı durumu eşit yanma oranlarına sahip şekilde kabul etmektedir ve bu sebeple bazı yakıt elemanları hiç yanmamış gibi görülebilir. Türkmen ve ekibinin gerçekleştirdiği simülasyonlarda, F30, D18, E14 ve B5 yakıt elemanları için sırasıyla %0,59, %0,93, %0,59 ve %1,08 oranlarında yanma hesaplanmıştır [12]. Buna karşın deneysel bulgular, bu elemanların gerçekte çok daha yüksek oranda yandığını göstermektedir: F30 için %2,92, D18 için %4,93, E14 için %3,00 ve B5 için %5,40 oranlarında yanma tespit edilmiştir [24]. Bu tür farkların nedeni, Dalle ve Veloso tarafından da vurgulandığı üzere, güç dalgalanmaları ve termal kalibrasyon eksikliklerinden kaynaklanabilir [25]. Ayrıca, reaktör sıcaklığı arttıkça yakıt içerişindeki izotopların nötron yutma kesitlerinde değişimler meydana geldiği ve bu durumun doppler genişlemesi etkisiyle açıklandığı bilinir. Doppler etkisi, fisil malzemelerin nötron etkileşimlerini değiştirir ve yanma oranlarını etkiler; ancak MCNP kullanılan simülasyonlarda bu etki dikkate alınmaz ve nötron yutma oranları hatalı hesaplanabilir, yakıt sıcaklıklarındaki değişimler doğru modellenemeyebilir. Bu gibi eksiklikler, simülasyonların reaktörün gerçek koşullarını tam olarak yansıtmasını engellemektedir.

4. SONUÇLAR

Bu kısımda çalışmanın üç temel amacı üzerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bunlar sırasıyla; İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe bulunan 67 yakıt elemanının oluşturulan korelasyon ile (Şekil 3.4) yüzdesel yanma oranlarının hesaplanması, 2018 yılında yapılan çalışmadan [11] seçilen B5 ve F30 yakıt elemanlarının spektrumlarının analizlerini, aynı yakıt elemanlarının 2024 yılındaki spektrum analizleri ile karşılaştırmaları ve son olarak elde edilen yüzdesel yanma oranları verileri kullanılarak reaktöre uygun bir rekonfigürasyon önerisi sunulmasıdır.

4.1 Yakıt Elemanlarının Yanma Oranları

Referans olarak alınan yüzdesel yanma oranları verileri ve 2024 yılında ölçülen ^{137}Cs aktiviteleri ile oluşturulan grafik üzerinden elde edilen korelasyon ile 67 yakıt elemanının yüzdesel yanma oranı hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken literatürden bilinen ^{137}Cs aktivitesinin yanma oranı ile doğrusal arttığı bilgisinin [15], tüm yakıt elemanlarının yanma oranlarının hesaplanması ve ^{137}Cs aktivitelerinin bilinmesi ile benzer lineer ilişkiyi gösterdiği (Şekil 4.1) tespit edilmiştir. Bu da çalışmanın birbiri ile uyumunu ve doğruluğunu gösteren bir sonuç olmuştur.



Şekil 4.1 : ^{137}Cs aktivitesi ve yanma oranı grafiği.

İTÜ TRIGA Mark II Araştırma Reaktörü kalbinde bulunan 67 yakıt elemanının yüzdesel yanma oranlarının hesaplanması ile yakıt elemanlarının isimleri ve yakıt elemanlarına ait yüzdesel yanma oranları verilmiştir (Çizelge 4.1). Yakıt elemanları B, C, D, E ve F olmak üzere halkalara ayrılmıştır ve sırasıyla kalbin merkezinin merkez kısmından dış kısımlarına doğru sıralanmıştır. Yakıt elemanlarının halka şeklinde isimlendirilmesi; deney aşamasında, elde edilen verilerin kaydında, yanma oranlarının konumlara göre incelenmesinde ve yapılacak rekonfigurasyonlarda kolaylık sağlamaktadır.

Çizelge 4.1 : Yakıt elemanları ve yanma oranları.

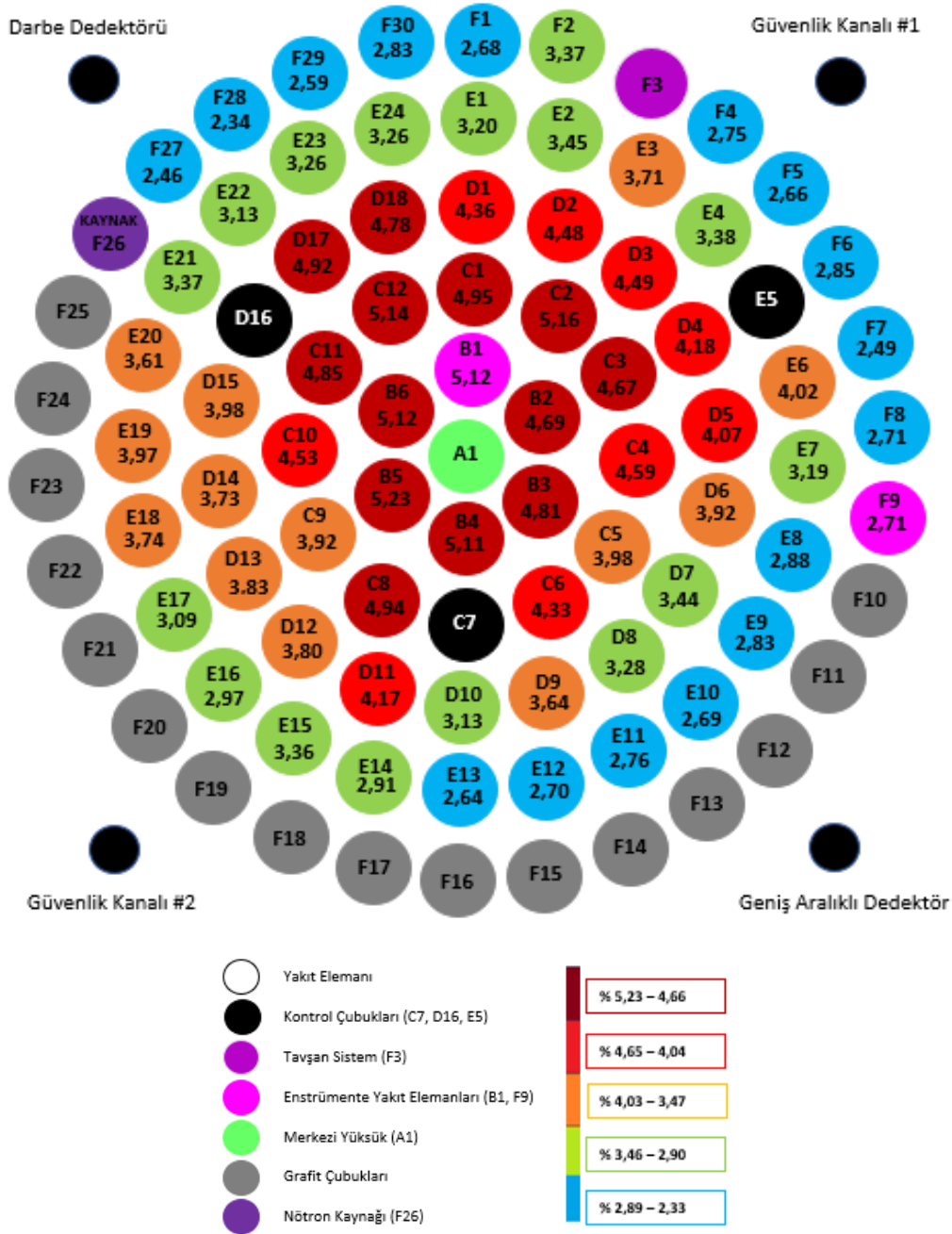
Yakıt Elemanı	Yanma Oranı (%)	Yakıt Elemanı	Yanma Oranı (%)
B1	5,12	C1	4,95
B2	4,69	C2	5,16
B3	4,81	C3	4,67
B4	5,11	C4	4,59
B5	5,23	C5	3,98
B6	5,12	C6	4,33
D1	4,36	C8	4,94
D2	4,48	C9	3,92
D3	4,49	C10	4,53
D4	4,18	C11	4,85
D5	4,07	C12	5,14
D6	3,92	E1	3,20
D7	3,44	E2	3,45
D8	3,28	E3	3,71
D9	3,64	E4	3,38
D10	3,13	E6	4,02
D11	4,17	E7	3,19
D12	3,80	E8	2,88
D13	3,83	E9	2,83
D14	3,73	E10	2,69
D15	3,98	E11	2,76
D17	4,92	E12	2,70
D18	4,78	E13	2,64
F1	2,68	E14	2,91
F2	3,37	E15	3,36
F4	2,75	E16	2,97
F5	2,66	E17	3,09
F6	2,85	E18	3,74
F7	2,49	E19	3,97
F8	2,71	E20	3,61
F9	2,71	E21	3,37
F27	2,46	E22	3,13
F28	2,34	E23	3,26

Çizelge 4.1 (devam) : Yakıt elemanları ve yanma oranları.

Yakıt Elemanı	Yanma Oranı (%)	Yakıt Elemanı	Yanma Oranı (%)
F29	2,59	E24	3,26
F30	2,83		

Ayrıca, yüzdesel yanma oranlarının rahatlıkla gözlemlenebilmesi için beş farklı yüzdesel yanma oranı aralığı belirlenmiş ve her farklı aralık için birer renk ataması yapılarak reaktör kalp konfigürasyonu içerisindeki yüzdesel yanma oranı dağılımı görselleştirilerek gösterilmiştir (Şekil 4.2). Aralıklar, koyu kırmızı renkten mavi renge doğru yüksek yanma oranından düşük yanma oranına göre sıralanmıştır. Koyu kırmızı alanlar (%5,23-%4,66), açık kırmızı alanlar (%4,65-%4,04), yüksek nötron akısının bulunduğu iç kalp bölgesinde daha fazla yanma göstermektedir. Turuncu renkli bölgelerde (%3,47-%4,03) orta düzeyde yanma, yeşil bölgelerde (%2,90-%3,46) ve mavi bölgelerde (%2,33-%2,89) ise düşük yanma gözlemlenmiştir. Enstrümante (ölçüm amaçlı sabitlenmiş) yakıt elemanları taşınamaz olduğundan, bu elemanlara ait yanma değerleri, en yakın komşu yakıt elemanlarının verilerine göre tahmin edilmiştir. Bu sıralama ile kalp konfigürasyonu içerisinde 13 yakıtın %5,23 ile %4,66 aralığında, 9 yakıtın %4,65 ile %4,04 aralığında, 13 yakıtın %4,03 ile %3,47 aralığında, 16 yakıtın %3,46 ile %2,90 aralığında ve 16 yakıtın %2,89 ile %2,33 aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu yanma oranları kalp konfigürasyonu üzerinde incelendiğinde, kalbin merkezinde yüksek oranda yanmış 22 yakıt ve bunları takip eden orta oranda yanmış 11 yakıt takip etmektedir. Az oranda yanmış 34 yakıtın ise kalbin merkezinin uzağında ve en dış kısmında sıralanmış olduğu gözlemlenmiştir. Yanma oranlarına bakıldığında, en yüksek yanma oranına sahip yakıtın %5,23 ile B5 yakıtı (kalbin merkezindeki) olduğu ve en az yanma oranına sahip yakıtın ise %2,34 ile F28 yakıtı (kalbin merkezinden en uzaktaki) yakıt olduğu gözlemlenmiştir. 67 yakıtın ortalama yanma oranı ise %3,71 olarak hesaplanmıştır. Bu konfigürasyon ile (Şekil 4.2) nötron akı yoğunluğunun ve yüksek fisyon olaylarının kalbin merkezinde yoğun oluşması sebebiyle yakıt elemanları bu bölgede daha yüksek oranda yüzdesel yanma oranına sahiptir. Öte yandan kalbin merkezinden dış çeperlere doğru gidildikçe yüzdesel yanma oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da kalbin merkezinin aksine nötron akı yoğunluğunun ve yüksek fisyon olaylarının daha az gerçekleşmesi ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca konfigürasyon bizlere (Şekil 4.2) nötron akı yoğunluğunun kalbin merkezinde bulunan B ve C halkalarının üst bölümüne (D halkasına) doğru bir

kaymanın olduğunu göstermektedir. İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe simülasyon yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada da [26] benzer bir nötron akı yoğunluğu şeması gözlemlenmiş ve bu çalışmadan elde edilen konfigürasyon ile (Şekil 4.2) uyumlu olduğu sonucu elde edilmiştir. E halkası incelendiğinde, E8 yakıt elemanından E13 yakıt elemanına kadar olan yakıtların, F halkasındaki yakıtlara yakın şekilde düşük yanmalarının sebebi nötron akı yoğunluğunun reaktör içerisinde homejen dağılmamasından kaynaklı olduğu ilişkilendirilebilir.



Şekil 4.2 : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü yakıt elemanlarının yanma oranları.

Reaktör kalbinde yüzdesel yanma oranlarının kalbin merkezinden, kalp merkezinin dışına doğru gidildikçe nasıl bir dağılıma sahip olduğunu incelemek için konfigürasyonda bulunan halkalar değerlendirildiğinde (Çizelge 4.2), ortalama yüzdesel yanma oranlarının kalbin merkezindeki halkadan (B halkası), kalp merkezinin dışındaki halkalara (Sırasıyla C, D, E ve F) doğru azaldığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2 : Reaktör kalbindeki halkaların ortalama yanma oranları.

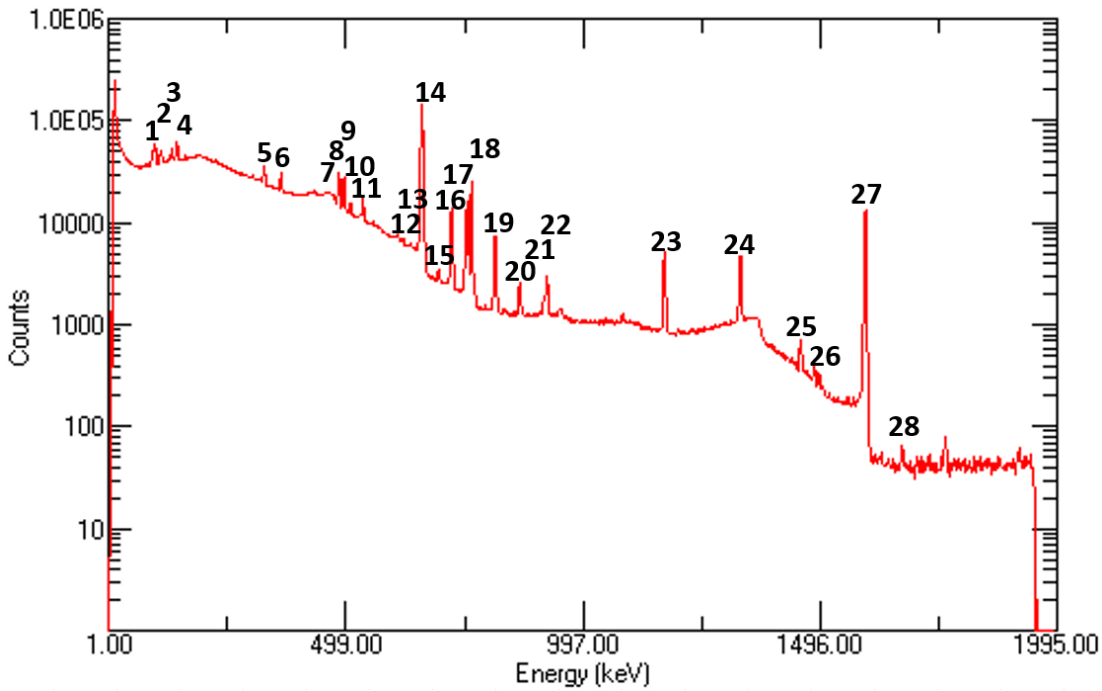
Halka İsmi	Yanma Oranı (%)
B	5,01
C	4,64
D	4,01
E	3,22
F	2,70

İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü yakıt elemanlarının yüzdesel yanma oranları beklenildiği gibi kalbin merkezinde yüksek oranlara sahipken, dış çeperlere doğru daha düşük yanma oranları gözlemlenmiştir. Ayrıca 1979 yılından beri İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün herhangi bir kalp rekonfigürasyonu ya da yeni yakıt eklemesi yapılmamasını da bunu destekler niteliktedir. Çünkü bu iki durumdan biri yapılmış olsaydı merkezin dışında da yüksek oranda yanmış yakıt elemanlarının gözlemlenmesi beklenirken, kalbin merkezine yığılmış yüksek oranda yanmış yakıt elemanları yerine düşük oranda yanmış yakıt elemanları gözlemlenebilirdi.

4.2 Yakıt Elemanlarının Spektrum Analizleri ve Karşılaştırılması

Bu bölümde, Akyürek ve çalışma arkadaşlarının 2018 yılında (B5, F30) iki yakıt ile yaptığı çalışmanın [11] spektrum analizleri incelenerek, 2024 yılında yapılan çalışmanın önceki çalışmadaki aynı iki yakıtın spektrum analizlerinin incelenmesiyle birlikte karşılaştırma yapılması hedeflenmiştir. Gama spektrumunda oluşan enerji piklerinin radyoizotop tespiti yapılırken; bazı radyoizotoplar için literatürde yapılmış benzer çalışmalarda elde edilen spektrumlardaki veriler ile karşılaştırmalar yapılarak uygun radyoizotoplar seçilmiştir. Benzer çalışmalarda bu çalışmada olduğu gibi benzer spektrumlar elde edilmiş olup, değişkenlerin; kullanılan dedektör, ölçüm alınan süre, ölçüm alınan mesafe gibi değişiklik gösteren değişkenler olsa da açığa çıkan spektrumlar benzerdir [27,28,29]. Bazı radyoizotoplar için de nuclear data center

sitesinde uygun enerji aralığı ve uygun yarı ömür sahibi radyoizotoplar seçilmiştir [30]. B5 yakıtının 2018 yılındaki 37 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu gösterilmiş (Şekil 4.3) ve bu spektrumdaki piklerin temsil ettikleri radyonüklidler (Çizelge 4.3) verilmiştir. Spektrumdaki en belirgin tepeler (peakler) ^{137}Cs (#14), ^{95}Nb (#17), ^{95}Zr (#16-17), ^{140}La (#5-7-8-19-20-21-22-27), ^{60}Co (#23-24) izotoplarına aittir. Toplam 28 radyoizotop gözlemlenmiş olup, 5 farklı enerji seviyesinde ^{140}La radyoizotopu bulunmaktadır. Ayrıca 487 keV ile 1596 keV arasında (iki enerji dahil) 20 pik gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3 : B5 yakıtının 2018 yılındaki 37 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu.

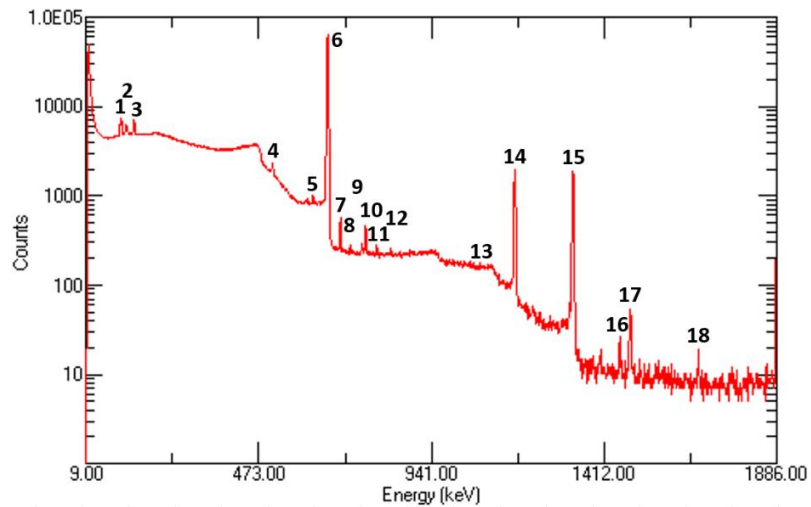
Çizelge 4.3 : B5 yakıtının 2018 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.

Tepe Numarası	Enerji (KeV)	Radyonüklid	Yoğunluk (%)	Yarı Ömür (Yıl)
1	105,31	^{155}Eu	21,12	4,753
2	133,5	^{144}Ce	11,09	$7,8 \times 10^{-1}$
3	145,44	^{141}Ce	48,29	$8,9 \times 10^{-2}$
4	162,66	^{140}Ba	6,22	$3,5 \times 10^{-2}$
5	328,762	^{140}La	20,3	$4,6 \times 10^{-3}$
6	364,49	^{131}I	81,5	$2,2 \times 10^{-2}$
7	432,493	^{140}La	2,9	$4,6 \times 10^{-3}$
8	487,021	^{140}La	45,5	$4,6 \times 10^{-3}$
9	497,08	^{103}Ru	91	$1,075 \times 10^{-1}$

Çizelge 4.3 (devam) : B5 yakıtının 2018 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.

Tepe Numarası	Enerji (KeV)	Radyonüklid	Yoğunluk (%)	Yarı Ömür (Yıl)
10	511,7	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	86	1,0075
11	537,261	¹⁴⁰ Ba	24,39	3,5 x10 ⁻²
12	610,33	¹⁰³ Ru	5,76	1,075 x10 ⁻¹
13	621,9	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	9,93	1,0075
14	661,66	¹³⁷ Cs	85,1	30,17
15	696,51	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	1,34	3 x10 ⁻⁵
16	724,192	⁹⁵ Zr	44,27	1,75 x10 ⁻¹
17	756,725	⁹⁵ Zr	54,38	1,75 x10 ⁻¹
18	765,8	⁹⁵ Nb	99,81	9,58 x10 ⁻²
19	815,772	¹⁴⁰ La	23,28	4,6 x10 ⁻³
20	867,846	¹⁴⁰ La	5,5	4,6 x10 ⁻³
21	919,55	¹⁴⁰ La	2,66	4,6 x10 ⁻³
22	925,189	¹⁴⁰ La	6,9	4,6 x10 ⁻³
23	1173,23	⁶⁰ Co	99,85	5,27
24	1332,49	⁶⁰ Co	99,98	5,27
25	1460,82	⁴⁰ K	10,66	1,248x10 ⁹
26	1489,16	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	0,28	3 x10 ⁻⁵
27	1596,21	¹⁴⁰ La	95,4	4,6 x10 ⁻³
28	1674,72	⁵⁸ Co	0,52	2 x10 ⁻¹

B5 yakıtının 2024 yılındaki 768 günlük soğuma süresi ardından alına ölçümün gama spektrumu gösterilmiş (Şekil 4.4) ve bu spektrumdaki piklerin temsil ettikleri radyonüklidler (Çizelge 4.4) verilmiştir. Spektrumdaki en belirgin tepeler (peakler) ¹³⁷Cs(#6), ⁶⁰Co(#14-15) ve ¹⁴⁴Ce/¹⁴⁴Pr(#7-17) radyoizotoplarıdır. Toplam 18 radyoizotop gözlemlenmiştir. Burada ise 661 keV ile 1489 keV arasında (iki enerji dahil) 12 tepe gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 : B5 yakıtının 2024 yılındaki 768 günlük soğuma süresi ardından ölçümün gama spektrumu.

Çizelge 4.4 : B5 yakıtının 2024 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.

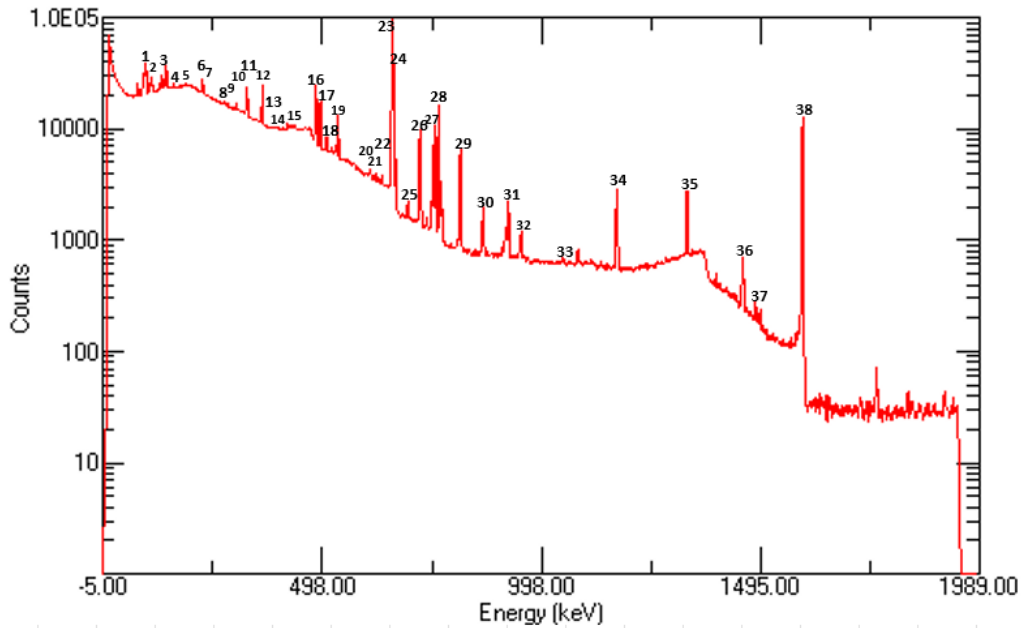
Tepe Numarası	Enerji (KeV)	Radyonüklid	Yoğunluk (%)	Yarı Ömür (Yıl)
1	105,31	¹⁵⁵ Eu	21,12	4,753
2	121,78	¹⁵² Eu	28,67	13,537
3	133,5	¹⁴⁴ Ce	11,09	7,8 x10 ⁻¹
4	511,7	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	86	1,0075
5	621,9	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	9,93	1,0075
6	661,66	¹³⁷ Cs	85,1	30,17
7	696,51	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	1,34	3,287 x10 ⁻⁵
8	724,192	⁹⁵ Zr	44,27	1,75 x10 ⁻¹
9	756,725	⁹⁵ Zr	54,38	1,75 x10 ⁻¹
10	765,8	⁹⁵ Nb	99,81	9,58 x10 ⁻²
11	795,864	¹³⁴ Cs	85,46	30,17
12	834,85	⁵⁴ Mn	99,98	8,543 x10 ⁻¹
13	1046,7	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	30,35	1,0075
14	1173,23	⁶⁰ Co	99,85	5,27
15	1332,49	⁶⁰ Co	99,98	5,27
16	1460,82	⁴⁰ K	10,66	1,248x10 ⁹
17	1489,16	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	0,28	3,287 x10 ⁻⁵
18	1674,72	⁵⁸ Co	0,52	2 x10 ⁻¹

İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün B5 yakıtının 2018 ve 2024 yıllarındaki gama spektrumlarından elde edilen piklerin temsil ettiği izotopların karşılaştırmaları yapılmış ve ortak izotoplar ile yalnızca 2018 ve 2024 yıllarında gözlemlenmiş izotoplar verilmiştir (Çizelge 4.5). Buradan 10 izotopun ortak, 5 izotopun 2018 yılına özgü (bu izotoplar farklı enerjilerde de gözlemlendi) ve 3 izotopun da 2024 yılına özgü olduğu gözlemlenmiştir. Yarı ömürleri yüksek olan radyoizotopların her iki spektrumda da gözlemlendiği kaydedilmiştir. Yarı ömürleri kısa olan radyoizotopların ise 2018 yılında 37 günlük soğuma süresi ardından gözlemlenmesi, kısa yarı ömürlü radyoizotopların spektrumda baskın şekilde ortaya çıkmasına sebep olurken 2024 yılında 768 günlük soğuma süresi sonrasında aktivitelerini kısa sürede kaybederek spektrumda yarı ömrü uzun radyoizotopların baskın şekilde gözlemlenmesine sebep olurken, 2024 yılındaki spektrumda 2018 yılından farklı olarak ¹⁵²Eu, ¹³⁴Cs ve ⁵⁴Mn radyoizotoplarının gözlemlenmesinin de benzer şekilde uzun yarı ömre sahip olmaları ile ilişkilendirilebilir.

Çizelge 4.5 : B5 yakıtının 2018 ve 2024 yıllarındaki gama spektrumu pikleri karşılaştırması.

Aynı İzotoplar	2018 Yılı Farklı İzotoplar	2024 Yılı Farklı İzotoplar
^{155}Eu	^{141}Ce	^{152}Eu
^{144}Ce	^{140}Ba	^{134}Cs
$^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$	^{140}La	^{54}Mn
^{137}Cs	^{131}I	-
$^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}$	^{103}Ru	-
^{95}Zr	-	-
^{95}Nb	-	-
^{60}Co	-	-
^{40}K	-	-
^{58}Co	-	-

F30 yakıtının 2018 yılındaki 10 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu gösterilmiş (Şekil 4.5) ve bu spektrumdaki tepelerin temsil ettikleri radyonüklidler (Çizelge 4.6) verilmiştir. Spektrumdaki en belirgin tepeler ^{137}Cs (#23), ^{95}Zr (#26-27), ^{95}Nb (#28), ^{140}La (#11-16-29-30-31-32-38), ^{60}Co (#34-35) izotoplarına aittir. Toplam 38 radyoizotop gözlemlenmiş olup, 8 farklı enerji seviyesinde ^{140}La radyoizotopu bulunmaktadır. Ayrıca 487 keV ile 1596 keV arasında (iki enerji dahil) 23 tepe gözlemlenmiştir. B5 yakıtının 2018 spektrumu ile kıyaslandığında sayıca 10 pikin fazla gözlemlendiğini gördük. Bu fark, daha kısa soğuma süresi ile ilişkilendirilebilir.

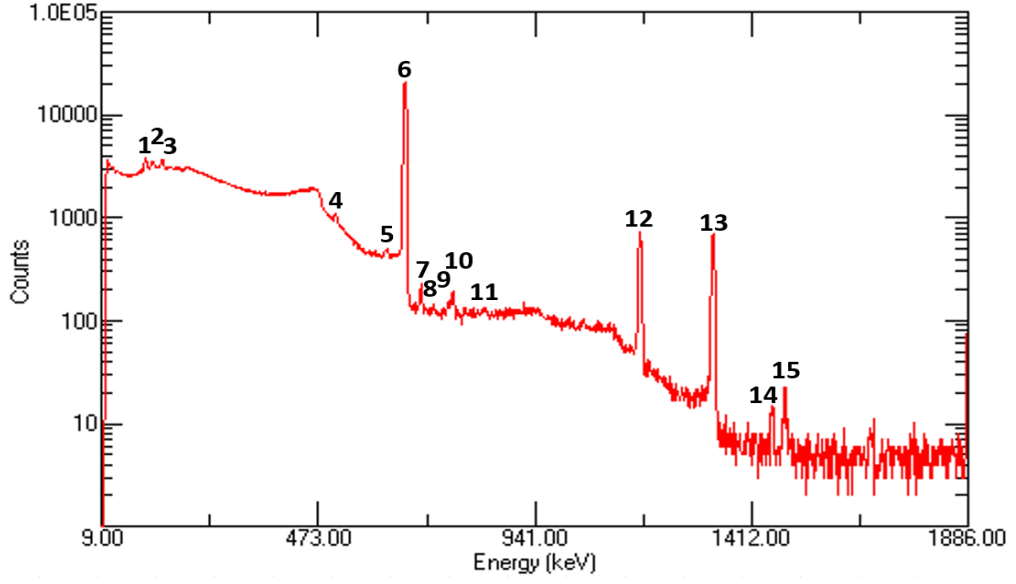


Şekil 4.5 : F30 yakıtının yılındaki 10 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu.

Çizelge 4.6 : F30 yakıtının 2018 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.

Tepe Numarası	Enerji (KeV)	Fisyon Ürünü	Yoğunluk (%)	Yarı Ömür (Yıl)
1	105,31	¹⁵⁵ Eu	21,12	4,753
2	121,78	¹⁵² Eu	28,67	13,54
3	133,5	¹⁴⁴ Ce	11,09	7,8 x10 ⁻¹
4	136,47	⁵⁷ Co	10,68	7,44 x10 ⁻¹
5	145,44	¹⁴¹ Ce	48,29	8,9 x10 ⁻²
6	162,66	¹⁴⁰ Ba	6,22	3,5 x10 ⁻²
7	223,2373	¹³³ Ba	0,45	10,52
8	275,925	¹³³ Ba	17,8	10,52
9	284,305	¹³¹ I	6,12	2,19 x10 ⁻²
10	302,851	¹³³ Ba	18,33	10,52
11	328,762	¹⁴⁰ La	20,3	4,6 x10 ⁻³
12	364,49	¹³¹ I	81,5	2,2 x10 ⁻²
13	423,722	¹⁴⁰ Ba	3,15	3,45x10 ⁻²
14	432,493	¹⁴⁰ La	2,9	4,6 x10 ⁻³
15	437,575	¹⁴⁰ Ba	1,929	3,45 x10 ⁻²
16	487,021	¹⁴⁰ La	45,5	4,6 x10 ⁻³
17	497,08	¹⁰³ Ru	91	1,075 x10 ⁻¹
18	511,7	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	86	1,0075
19	537,261	¹⁴⁰ Ba	24,39	3,5 x10 ⁻²
20	610,33	¹⁰³ Ru	5,76	0,1075 x10 ⁻¹
21	621,9	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	9,93	1,0075
22	630,19	¹³² Cs	0,95	1,64 x10 ⁻²
23	661,66	¹³⁷ Cs	85,1	30,17
24	667,71	¹³² Cs	97,59	1,64 x10 ⁻²
25	696,51	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	1,34	3 x10 ⁻⁵
26	724,192	⁹⁵ Zr	44,27	0,175 x10 ⁻¹
27	756,725	⁹⁵ Zr	54,38	0,175 x10 ⁻¹
28	765,8	⁹⁵ Nb	99,81	9,58 x10 ⁻²
29	815,772	¹⁴⁰ La	23,28	4,6 x10 ⁻³
30	867,846	¹⁴⁰ La	5,5	4,6 x10 ⁻³
31	919,55	¹⁴⁰ La	2,66	4,6 x10 ⁻³
32	925,189	¹⁴⁰ La	6,9	4,6 x10 ⁻³
33	1046,7	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	30,35	1,02285552
34	1173,23	⁶⁰ Co	99,85	5,27
35	1332,49	⁶⁰ Co	99,98	5,27
36	1460,82	⁴⁰ K	10,66	1,248x10 ⁹
37	1489,16	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	0,28	3 x10 ⁻⁵
38	1596,21	¹⁴⁰ La	95,4	4,6 x10 ⁻³

F30 yakıtının 2024 yılındaki 755 günlük soğuma süresi ardından alınan gama spektrumu gösterilmiş (Şekil 4.6) ve bu spektrumdaki tepelerin temsil ettikleri radyonüklidler (Çizelge 4.7) verilmiştir. Spektrumdaki en belirgin tepeler ¹³⁷Cs(#6) ve ⁶⁰Co(#12-13) izotoplarına aittir. Ayrıca 661 keV ile 1489 keV arasında (iki enerji dahil) 10 tepe gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6 : F30 yakıtının 2024 yılındaki 755 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümün gama spektrumu.

Çizelge 4.7 : F30 yakıtının 2024 yılındaki gama spektrumundaki piklerinin her tepe sayısı, karşılık gelen gama enerjisi, izotop, yoğunluk ve yarı ömürleri.

Tepe Numarası	Enerji (KeV)	Fisyon Ürünü	Yoğunluk (%)	Yarı Ömür (Yıl)
1	105,31	¹⁵⁵ Eu	21,12	4,753
2	121,78	¹⁵² Eu	28,67	13,54
3	133,5	¹⁴⁴ Ce	11,09	7,8 x10 ⁻¹
4	511,7	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	86	1,0075
5	621,9	¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	9,93	1,0075
6	661,66	¹³⁷ Cs	85,1	30,17
7	696,51	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	1,34	3,287 x10 ⁻⁵
8	724,192	⁹⁵ Zr	44,27	1,75 x10 ⁻¹
9	756,725	⁹⁵ Zr	54,38	1,75 x10 ⁻¹
10	765,8	⁹⁵ Nb	99,81	1 x10 ⁻¹
11	834,85	⁵⁴ Mn	99,98	8,5 x10 ⁻¹
12	1173,23	⁶⁰ Co	99,85	5,27
13	1238,28	⁶⁰ Co	66,9	5,27
14	1460,82	⁴⁰ K	10,66	1,248x10 ⁹
15	1489,16	¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	0,28	3 x10 ⁻⁵

Aynı karşılaştırmalar İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün F30 yakıt elamanın 2018 ve 2024 yılında elde edilmiş gama spektrumları için de yapılmıştır (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6).

Çizelge 4.8 : F30 yakıtının 2018 ve 2024 yıllarındaki gama spektrumu pikleri karşılaştırması.

Aynı İzotoplar	2018 Yılı Farklı İzotoplar	2024 Yılı Farklı İzotoplar
¹⁵⁵ Eu	⁵⁷ Co	⁵⁴ Mn
¹⁵² Eu	¹⁴¹ Ce	-
¹⁴⁴ Ce	¹⁴⁰ Ba	-
¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	¹³³ Ba	-
¹³⁷ Cs	¹³¹ I	-
¹⁴⁴ Ce/ ¹⁴⁴ Pr	¹⁴⁰ La	-
⁹⁵ Zr	¹⁰³ Ru	-
⁹⁵ Nb	¹³² Cs	-
⁶⁰ Co	-	-
⁴⁰ K	-	-
-	-	-

F30 yakıtının 2018 ve 2024 yıllarındaki gama spektrumlarından elde edilen piklerin temsil ettiği izotopların karşılaştırmaları yapılmış ve ortak izotoplar ile yalnızca 2018 ve 2024 yıllarında gözlemlenmiş izotoplar verilmiştir (Çizelge 4.8). Buradan 10 izotopun ortak, 8 izotopun 2018 yılına özgü (bu izotoplar farklı enerjilerde de gözlemlendi) ve 1 izotopun da 2024 yılına özgü olduğu gözlemlenmiştir. Burada da B5 yakıtının spektrum karşılaştırmalarına benzer şekilde; Yarı ömürleri yüksek olan radyoizotopların her iki spektrumda da gözlemlendiği kaydedilmiştir. Yarı ömürleri kısa olan radyoizotopların ise 2018 yılında 10 günlük soğuma süresi ardından gözlemlenmesi, kısa yarı ömürlü radyoizotopların spektrumda baskın şekilde ortaya çıkmasına sebep olurken 2024 yılında 755 günlük soğuma süresi sonrasında aktivitelerini kısa sürede kaybederek spektrumda yarı ömrü uzun radyoizotopların baskın şekilde gözlemlenmesine sebep olurken, 2024 yılındaki spektrumda 2018 yılından farklı olarak ⁵⁴Mn radyoizotopunun gözlemlenmesinin de benzer şekilde uzun yarı ömre sahip olması ile ilişkilendirilebilir. Her iki yakıtın gama spektrumlarındaki izotoplara bakıldığında bazı izotoplar, örneğin ¹⁰⁶Ru/¹⁰⁶Rh ve ¹⁴⁴Ce/¹⁴⁴Pr, kız (daughter) izotoplarının gama emisyonlarıyla tanımlanmıştır. Akyürek ve arkadaşları tarafından yapılan önceki çalışmalarda, kısa, orta ve uzun ömürlü alternatif radyoizotoplar belirlenmiştir [31]. ¹⁴⁰La, ¹³¹I ve ⁹⁵Nb, yüksek gama enerjisi ve verimi nedeniyle alternatif yanma göstergeleri olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, bu izotopların düşük difüzyon katsayıları, yakıt izleme uygulamalarına uygunluklarını artırmaktadır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, bu üç izotop spektrumlarında mevcuttur. Ancak, daha önceki çalışmada bu izotoplara ait tüm zirvelerde yanma

analizi yapılamayacağı açıkça belirtilmiştir [9]. Bu nedenle, yüksek enerjili ve yüksek yoğunluklu zirveler seçilerek bu izotoplar yanma göstergesi olarak kullanılabilir. ^{140}La 'nın 1596 keV enerjideki izotopunun yanma göstergesi olarak kullanımı için en uygun zaman penceresi, ışınlamadan sonraki ilk 0–40 gün arasındadır. Bununla birlikte, ^{95}Nb izotopu, 765.8 keV enerjisinde baskın bir tepe olarak görülmektedir ve bu sürede uygun bir yanma göstergesi olarak değerlendirilebilir. ^{131}I içinse, sadece ilk birkaç gün içinde yanma analizi yapılması mümkündür. Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 gözlemlenen tepelere karşılık gelen radyoizotopları sunmaktadır. ^{137}Cs gibi uzun ömürlü izotoplar ile ^{144}Ce ve ^{106}Ru 'nun bozunum ürünlerinin hâlâ spektrumlarda mevcut olduğunu göstermektedir. 2024 yılına gelindiğinde ise spektrumlarda, kısa yarı ömürlü radyoizotopların neredeyse tamamının kaybolduğu belirlenmiştir.

4.3 İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü için Rekonfigurasyon Çalışması

Bu çalışmanın bir diğer amacı, 67 yakıt elemanının kurulan korelasyon ile elde edilen yüzdesel yanma oranları verileri kullanarak 1979 yılından beri İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörü için herhangi bir rekonfigurasyon çalışması yapılmaması sebebiyle, reaktöre uygun bir rekonfigurasyon çalışması önermektir. Şekil 4.7, kalp içinde zamanla oluşan düzensiz yanma oranı dağılımını düzeltmeyi hedefleyen bir yakıt rekonfigurasyon stratejisini göstermektedir. Düşük yanmaya sahip yakıtların dış halkalardan iç bölgelere taşınması ve çekirdeğin dört eşit bölgeye ayrılarak ^{235}U içeriğinin dengelenmesiyle, yakıt kullanımı artırılmakta ve çekirdek simetrisi korunmaktadır. Bu rekonfigurasyonda esas alınan yanma değerleri, ^{137}Cs aktivitesi ile doğrusal ilişki kurularak elde edilmiştir. Rekonfigurasyon için genel kanı, taze yakıtların reaktörün kalbin merkezine ve yakınına konumlandırılıp, merkezden uzaklaştıkça yüksek oranda yanmış yakıtların az az yerleştirilmesi ve kalbin en dış kısmında yüksek oranda yanmış yakıtların kullanılması yönündedir. Bu sayede kalbin merkezinde gerçekleşen fisyon olaylarının, daha az yanmış yakıtlar ile başlamasının reaktör için verimli olacağı öngörülmektedir [22].

İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün yakıt elemanlarının rekonfigurasyon öncesi ve sonrasındaki konumları verilmiştir (Çizelge 4.9). Bu sayede yakıtların yüzdesel yanma oranlarına göre hangi halkaya ve konuma yerleştirildikleri rahat şekilde görülmektedir. Çok yüksek oranda yanmış yakıtlar F halkasında

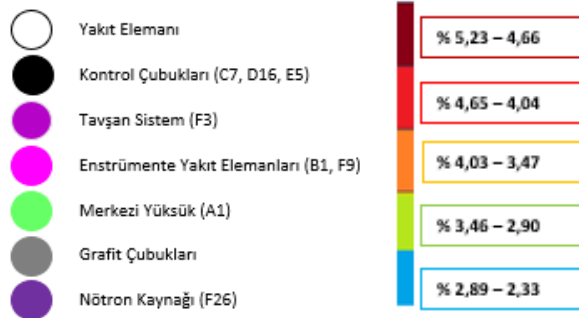
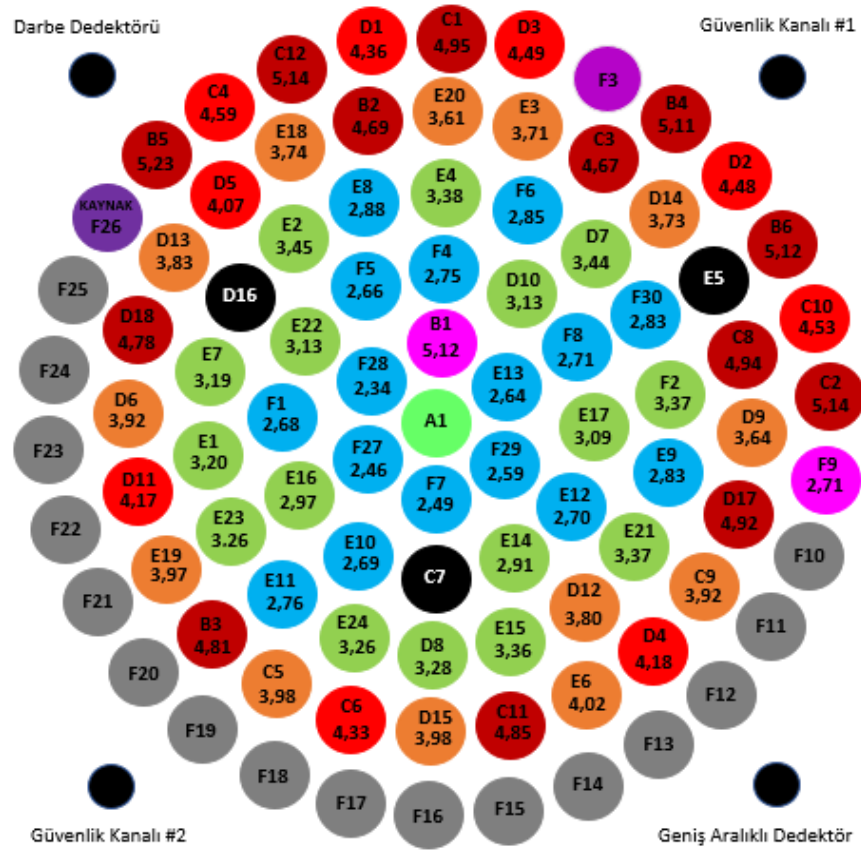
konumlandırılırken, yüksek oranda yanmış yakıtlar D ve E halkalarında, düşük oranda yanmış yakıtlar E ve C halkalarında ve çok düşük oranda yanmış yakıtlar C ve B halkalarında konumlandırılmıştır.

Çizelge 4.9 : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün yakıt elemanlarının rekonfigurasyon öncesi ve sonrasındaki konumları.

Yakıtın Eski Konumu	Yakıtın Yeni Konumu	Yakıtın Eski Konumu	Yakıtın Yeni Konumu
B1	B1	D8	D12
B2	E13	D9	E15
B3	F29	D10	D8
B4	F7	D11	E24
B5	F27	D12	E11
B6	F28	D13	E23
C1	F4	D14	E1
C2	D10	D15	E7
C3	F8	D16	D16
C4	E17	D17	E2
C5	E12	D18	E8
C6	E14	E1	E20
C7	C7	E2	E3
C8	E10	E3	C3
C9	E16	E4	D14
C10	F1	E5	E5
C11	E22	E6	C8
C12	F5	E7	D9
D1	E4	E8	D17
D2	F6	E9	C9
D3	D7	E10	D4
D4	F30	E11	E6
D5	F2	E12	C11
D6	E9	E13	D15
D7	E21	E14	C6
E15	C5	F1	C1
E16	B3	F2	D3
E17	E19	F3	F3
E18	D11	F4	B4
E19	D6	F5	D2
E20	D18	F6	B6
E21	D13	F7	C10
E22	D5	F8	C2

Çizelge 4.9 (devam) : İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün yakıt elemanlarının rekonfigürasyon öncesi ve sonrasındaki konumları.

Yakıtın Eski Konumu	Yakıtın Yeni Konumu	Yakıtın Eski Konumu	Yakıtın Yeni Konumu
E23	E18	F9	F9
E24	B2	F26	F26
		F27	B5
		F28	C4
		F29	C12
		F30	D1



Şekil 4.7 : İTÜ TRIGA Mark-II Reaktörü kalbi için rekonfigürasyon çalışması.



5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe bulunan tüm yakıt elemanları, gama spektroskopisine dayalı tahribatsız analiz yöntemi kullanılarak ve iki farklı yakıt inceleme sistemi aracılığıyla incelenmiştir. Birinci sistemde gama spektroskopisi ölçümleri, reaktör kalbin merkezinden dış çeperlerine doğru seçilen dört yakıtın (B5, D18, E24, F30) her 3 cm'de yakıtın aksel uzunluğu boyunca alınan ^{137}Cs aktivitelerinin ortalamaları ile yüzdesel yanma oranı hesaplamaları yapılmıştır. İkinci sistemde de aynı yakıt elemanlarının yüzdesel yanma oranları değerlerinin, reaktörün çalıştırılmadığı bilgisi sebebiyle zaman içerisinde değişkenlik göstermeyeceği düşünülerek aynı kabul edilmiş ve bu yakıtların tam merkez noktasından gama spektroskopisi ölçümleri alınarak ^{137}Cs aktiviteleri tespit edilmiştir. 2024 yılından elde edilen ^{137}Cs aktiviteleri ile 2018 yılından referans alınan yüzdesel yanma oranı değerleri arasında kurulan doğrusal korelasyona göre İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktöründe bulunan tüm yakıt elemanlarının yüzdesel yanma oranları hesaplanmış, yakıt elemanlarının reaktör kalbindeki konumlarına göre 5 farklı yüzdesel yanma oranı aralığı belirlenmiş, her bir aralık için farklı renkler belirlenerek yüzdesel yanma oranları gruplandırılmış ve her bir yakıt elemanının bulunduğu halkaların ortalama yüzdesel yanma oranları kaydedilmiştir. Bunlar incelendiğinde, reaktör kalbinin iç halkalarında daha yüksek yanma olduğu gözlemlenirken, dış halkalara doğru yanmanın azaldığı ortaya konulmuştur. Örneğin, kalbin en iç halkasında yer alan B5 yakıt elemanı %5,23 ile en yüksek yanma oranına sahipken, en dış halkada bulunan F28 yakıt elemanında bu oran %2,34 ile en düşük seviyede gözlemlenmiştir. Burada beklenildiği gibi en iç halka olan B halkasında, en yüksek oranda yüzdesel yanma oranları gözlemlenirken, B halkasından kalp dışına sıralanan C, D, E ve F halkalarındaki yüzdesel yanma oranlarının azaldığı ve en düşük yüzdesel yanma oranı ortalamasının F halkasına ait olduğu gözlemlenmiştir. Uzun yıllar boyunca reaktörde herhangi bir kalp konfigürasyon çalışması yapılmaması ya da reaktöre herhangi bir yeni yakıt eklemesi yapılmaması ve bu bilgilerin kayıtlı olması sebebiyle, buna ek olarak fisyon olaylarının kalbin merkezinde başlaması ve kalp merkezinde akı yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle en yüksek yanma oranlarına

sahip olması beklenen B halkasındaki yakıtlarının en yüksek oranlarda yandığı tespit edilmiştir. Halkalar arasında gözlemlenen düzensiz yanma oranı dağılımı, reaktörde bir rekonfigürasyon ihtiyacını ortaya koymuş olup, reaktöre yeni bir rekonfigürasyon (Şekil 4.7) önerilmiştir. Geçmiş çalışmalardan edinen bilgiler ışığında, düşük yanmaya sahip yakıtların dış halkalardan iç bölgelere taşınması ve çekirdeğin dört eşit bölgeye ayrılarak ^{235}U içeriğinin dengelenmesiyle, yakıt kullanımı artırılmakta ve çekirdek simetrisi korunmaktadır. Bu rekonfigürasyonda esas alınan yanma değerleri, ^{137}Cs aktivitesi ile doğrusal ilişki kurularak elde edilmiştir. Reaktörün kalbinin merkezinde çok yüksek oranda yanmış yakıtların, reaktör kalbinin en dış kısmına (F halkasına) aralarına yüksek oranda yanmış yakıtlar ile yerleştirilmesi uygun görülmüştür. Aynı yöntem ile kalbin dış kısmından (F halkasından) kalbinin merkezine doğru (sırasıyla E, D, C halkasına doğru) yüksek yanma oranına sahip yakıtlardan, düşük yanma oranlarına sahip yakıtları birbirleri aralarına yerleştirerek, kalbin merkezinde (B halkasında) en az yanmış yakıtlara yer verilmesi şeklinde rekonfigürasyonun tamamlanması hedeflenmiştir. Buna ek olarak, B5 ve F30 yakıt elemanlarının gama spektroskopik incelemeleri, B5 için sırasıyla 37 gün ve 768 gün soğuma süresine sahipken, F30 için sırasıyla 10 gün ve 755 gün olmak üzere iki farklı soğuma süresi için gerçekleştirilmiştir. 37 ve 10 günlük soğuma sürelerine ait gama spektroskopisi, reaktör dışındaki yakıt inceleme sisteminde yapılırken; 768 ve 755 günlük soğuma süresine ait ölçümler, reaktör üzerine kurulu yakıt inceleme sisteminde gerçekleştirilmiştir. Spektrumlar karşılaştırıldığında, B5 yakıtı için 2018 ve 2024 yıllarında 10 radyoizotopun ortak, 2018 yılında 5 farklı radyoizotop bulunduğu ve 2024 yılında ise 3 farklı radyoizotopun varlığı gözlemlenmiştir. F30 yakıtı için ise 2018 ve 2024 yıllarında 10 radyoizotopun ortak, 2018 yılında 8 farklı radyoizotopun bulunduğu ve 2024 yılında 1 farklı radyoizotopun varlığı gözlemlenmiştir. İki yakıt elemanı için de 2018 ve 2024 yılındaki farklılıklar ve benzerlikler için ortak yorumlar yapılabilir. Yarı ömürleri yüksek olan radyoizotoplar, her iki spektrumda da gözlemlenmiştir. Öte yandan yarı ömürleri kısa olan radyoizotopların, B5 ve F30 yakıtları için 2018 yılında sırasıyla 37 ve 10 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümler sonucunda gözlemlenmesi, kısa yarı ömürlü radyoizotopların spektrumda baskın şekilde ortaya çıkmasına sebep olurken, B5 ve F30 yakıtları için 2024 yılında 768 ve 755 günlük soğuma süresi sonrasında aktivitelerini kısa sürede kaybederek spektrumda yarı ömrü uzun radyoizotopların baskın şekilde gözlemlenmesine sebep olmuştur. Ayrıca 2024 yılındaki spektrumlarda 2018 yılından farklı olarak ^{152}Eu , ^{134}Cs

ve ^{54}Mn radyoizotoplarının gözlemlenmesinin de benzer şekilde uzun yarı ömre sahip olmaları ile ilişkilendirilebilir. Bir diğer durum ise çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda, 37 ve 10 günlük soğuma süresi ardından alınan ölçümlerde 1596 keV enerjide açığa çıkan ^{140}La radyoizotopunun alternatif indikatör (gösterge) olarak yanma analizi çalışmaları için uygun olduğu anlaşılmış ancak kullanımı için en uygun zaman penceresinin ışınlamadan sonraki ilk 0–40 gün olabileceği belirlenmiştir. Bu bağlamda gelecekte yapılacak çalışmaların bu radyoizotop ile yanma analizi üzerine odaklanması planlanmıştır. Bu çalışma ile İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün yakıt elemanlarına ait önemli bilgiler elde edilmiştir. Reaktörün operasyonel sürecini yönetilmesi ve daha uzun ömürlü çalışması için elde edilen bilgiler ışığında reaktöre yeni bir rekonfigürasyon önermek, reaktörün yeni bir yakıt ihtiyacı olup olmadığını öğrenmek, her bir yakıt elemanının yüzdesel yanma oranının gelecek çalışmalar adına referans olması bu çalışmanın değerini ortaya koymaktadır. Bu çalışma ile İTÜ TRIGA Mark-II Araştırma Reaktörünün yakıt elemanlarına ait önemli bilgiler elde edilmiştir. Reaktörün operasyonel sürecini yönetilmesi ve daha uzun ömürlü çalışması için elde edilen bilgiler ışığında reaktöre yeni bir rekonfigürasyon önermek, reaktörün yeni bir yakıt ihtiyacı olup olmadığını öğrenmek, her bir yakıt elemanının yüzdesel yanma oranının gelecek çalışmalar adına referans olması bu çalışmanın değerini ortaya koymaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [2] Url-1 <<https://www.euronuclear.org/glossary/fuelcomparison/#:~:text=8%20kWh%20of%20heat%20can,three%20million%20times%20the20energy>>, erişim tarihi 11.04.2025.
- [3] Glasstone, S., & Sesonske, A. (1994). *Nuclear reactor engineering: Reactor systems engineering* (4th ed.). New York, NY: Springer.
- [4] Stacey, W. M. (2007). *Nuclear reactor physics* (2nd ed.). Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- [5] Url-2 <<https://www.iaea.org/topics/research-reactors>>, erişim tarihi 11.04.2025.
- [6] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). *Research reactors: Purpose and future*. Retrieved from <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/05/research-reactors-purpose-and-future.pdf>
- [7] Boeck, H., & Villa, M. (2007). *Vienna TRIGA reactor characteristics*. Vienna: Vienna University of Technology, Atomic Institute of the Austrian Universities.
- [8] Url-3 <<http://www.triga.İTÜ.edu.tr/>>, erişim tarihi 11.04.2025.
- [9] Url-4 <<http://www.aimenerji.com/arge-projeleri.aspx?code=1402da76-76a4-4469-9f88-991172aa6fca>>, erişim tarihi 11.04.2025.
- [10] Büke, T., & Yavuz, H. (2002). Fuel element burn-up calculation in İTÜ TRIGA Mark-II reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 29(8), 947–956.
- [11] Akyürek, T., Reyhancan, İ. A., Kızıltas, M. Ş., & Açıköz, D. (2024). Experimental burn-up analysis of İTÜ TRIGA Mark II reactor fuel elements. *Nuclear Engineering and Design*, 424, 113229. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113229>
- [12] Türkmen, M., Çolak, Ü., Ergün, S., (2015). Effect of burnup on the neutronic parameters of İTÜ Triga Mark II research reactor. *Prog. Nucl. Energy* 83, 26–34.
- [13] Hsue, S. T., Crane, T. W., Talbert, W. L., Jr., & Lee, J. C. (t.y.). *Nondestructive assay methods for irradiated nuclear fuels* (p. 24).
- [14] Reilly, D., Ensslin, N., Smith, H., Jr., & Kreiner, S. (1991). *Passive nondestructive assay of nuclear materials*. NUREG/CR-5550. Retrieved from <https://www.nrc.gov/docs/ML0914/ML091470585.pdf>
- [15] Dennis, M. L., & Usman, S. (2010). Feasibility of 106Ru peak measurement for MOX fuel burnup analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 240(10), 3687–3696. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.07.003>

- [16] Zheng, M., Tian, X. W., Wei, H., & Zhang, D. (2014). Development of a MCNP–ORIGEN burn-up calculation code system and its accuracy assessment. *Annals of Nuclear Energy*, 63, 491-498. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.08.020>
- [17] Hellier, C. (2012). *Handbook of nondestructive evaluation* (2nd ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- [18] Krane, K. S. (1987). *Nuclear physics* (1st ed.). Wiley.
- [19] Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). Wiley.
- [20] Lisman, F.L., 1970. et, al., Determination of the nuclear fuel burn-up from fission product analysis. *Nucl. Sci. Eng.* 42, 215–219.
- [21] Akyurek, T., Tucker, L.P., Usman, S., 2014. Review and characterization of best candidate isotopes for burnup analysis and monitoring of irradiated fuel. *Ann. Nucl. Energy* 69, 278–291.
- [22] Dashchenko, A. I. (Ed.), (2006). *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-29397-3>
- [23] Rhodes, H. J. (2018). *Fuel burnup simulation and analysis of the Missouri S&T Reactor* (Master's thesis, University of Missouri-Rolla). Missouri, US A.
- [24] Türkmen, M., Çolak, Ü., & Ergün, Ş. (2015). Effect of burnup on the neutronic parameters of İTÜ TRIGA Mark II research reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 83, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.05.003>
- [25] H. M. Dalle and M. A. Veloso, Monte Carlo simulation of TRIGA IPR-R1: reactivity worth, burnup, flux and power. In: 3rd World TRIGA Users Conference, Minas Centro-Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, August 22-25, (2006)]
- [26] Türkmen, M., & Çolak, Ü. (2013). Analysis of İTU TRIGA Mark II research reactor using Monte Carlo method. *Annals of Nuclear Energy*, 53, 507–513. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.10.004>
- [27] Jansson, P., Grape, S., Tobin, S., & Liljenfeldt, H. (2014, March 2–6). *Experimental comparison between high purity germanium and scintillator detectors for determining burnup, cooling time and decay heat of used nuclear fuel*. Paper presented at the 40th Annual Waste Management (WM) Conference, Phoenix, Arizona, USA.
- [28] Jansson, P., Tobin, S., Liljenfeldt, H., Fugate, M., Favalli, A., & Sjöland, A. (2016). Axial and azimuthal gamma scanning of nuclear fuel-Implications for spent fuel characterization. *Journal of Nuclear Materials Management*, 45(1), 34–47.
- [29] Karimzadeh, S., Khan, R., & Böck, H. (2011). Gamma spectrometry inspection of TRIGA MARK II fuel using caesium isotopes. *Nuclear Engineering and Design*, 241(1), 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.10.031>

[30] **Url-5** <<https://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/sbygame.html>>, erişim tarihi 16.04.2025.

[31] **T. Akyurek, L. P. Tucker, S. Usman**, (2014) Review and characterization of best candidate isotopes for burnup analysis and monitoring of irradiated fuel. *Ann. Nucl. Energy*, 69, (2014) 278-291.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Alperen KAYA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2023, Marmara Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2023-2025 yıllarında 122F488 numaralı Tübitak 3501 Kariyer Geliştirme Programı projesinde görev aldı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Akyürek, T., Kaya, A.,** 2025. Nondestructive Burnup Analysis and Gamma-Ray Spectroscopic Evaluation of Spent Fuel Elements in the ITU TRIGA Mark-II Reactor. 5. *International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies*, May 24-25, 2025 Ankara, Turkey.