



**BİR MİKRO NÜKLEER REAKTÖRÜN NÖTRONİK ANALİZİ VE
TORYUM YAKIT KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ahmet ÇİFCİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet ÇİFCİ

22/06/2023

BİR MİKRO NÜKLEER REAKTÖRÜN NÖTRONİK ANALİZİ VE TORYUM YAKIT KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet ÇİFCİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2023

ÖZET

Bu tez çalışmasında 22 MW_{th} gücünde 15 ton kütleyle sahip yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı Holos mikro nükleer reaktörünün tüm kor modelleme yöntemiyle nötronik analizi yapılmıştır. Holos mikro nükleer reaktörü 151 tane altıgen grafit bloktan oluşmaktadır. Her bir yakıt demeti 54 soğutucu kanalı ve 19 yakıt kanalı içermektedir. Ayrıca Küçük Modüler Reaktörler konusu değerlendirilmiştir. Küçük Modüler Reaktörler, Hafif Su Reaktörlerine göre yatırım maliyetlerinin düşük olması, boyutlarının küçük olması gibi sebeplerle ön plana çıkmaktadır. Taşınabilir olmasının yanı sıra hızlı kuruluma sahip olmaları da büyük avantajlar sağlamaktadır. Dünyada yaşanan enerji kriziyle beraber literatürdeki çalışma sayısı görece hızlı bir şekilde artmıştır. Yapılan çalışmalarda yakıt olarak kullanılan çok katmanlı yakıt kürecikleri kendiliğinden güvenli yakıtlar olup genellikle boş yakıt kanallarına doğrudan doldurulmaktadır. Bazı çalışmalarda sinterlenmiş grafit ile peletlenmiş olarak kullanılan bu yakıt küreciklerini, bu çalışmada küçük modüler reaktörde kullanarak Th-232 elementini yakıp sonuç olarak reaktörde ne kadar U-233 elementi oluştuğu, yakabilme kapasitesi, yakıtta hacmen ne kadar toryum elementi kullanılabilirliğine bakılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda, Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktörler için genellikle Nötronik analiz için sonsuz hücre yöntemi kullanılır. Fakat bu yöntemde reaktördeki elementlerin tükenme miktarları, tüm kor analizlerle yapılan nötronik analizlerle her zaman örtüşmemektedir. Bu çalışmada Tüm Kor Geometri ile nötronik analiz yapılmıştır. Çalışmada temel olarak Serpent Monte Carlo Reaktör Fiziği Yanma Hesaplama Kodu kullanılmıştır. Çok katmanlı yakıt kürelerinin yakıt kanallarındaki dağılımı için ise OpenMC Monte Carlo Nötron ve Foton Taşıma Simülasyonu Kodu kullanılmıştır.

Bilim Kodu : 92805
Anahtar Kelimeler : HTGR, Küçük Modüler Reaktör, Serpent, Toryum, Mikro Reaktör
Sayfa Adedi : 76
Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

NEUTRONIC ANALYSIS OF A MICRO NUCLEAR REACTOR AND
INVESTIGATION OF ITS THORIUM FUEL FEASIBILITY

(M. Sc. Thesis)

Ahmet ÇİFCİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

In this thesis, neutronic analysis of a high temperature gas cooled Holos micro nuclear reactor with a power of 22 MWth and a mass of 15 tons was carried out using the full core modeling method. The Holos micro nuclear reactor consists of 151 hexagonal graphite blocks. Each fuel assembly contains 54 coolant channels and 19 fuel channels. In addition, the subject of Small Modular Reactors has been evaluated. Small modular reactors stand out compared to Light Water Reactors due to their low investment costs and small size. In addition to being portable, it also provides great advantages of having fast installation. With the energy crisis in the world, the number of studies in the literature has increased relatively rapidly. Triso Particles used as fuel in the studies are inherently safe fuels and are usually filled directly into empty fuel channels. In this study, these fuel spheres, which are used as pellets with sintered graphite in some studies, were used in a small modular reactor to burn the Th-232 element and as a result, how much U-233 element was formed in the reactor, its burning capacity, how much thorium element available in the fuel by volume were examined. In the studies in the literature, the infinite cell method is generally used for Neutronic analysis for High Temperature Gas Cooled Reactors. However, in this method, the depletion amounts of the elements in the reactor do not always coincide with the neutronic analyzes made with full core analyses. In this study, neutronic analysis was performed with Whole Core Geometry. Basically, Serpent Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code was used in the study. OpenMC Monte Carlo Neutron and Photon Transport Simulation Code were used for the distribution of Triso particles in fuel channels.

Science Code : 92805

Key Words : HTGR, Small Modular Reactor (SMR), Serpent, Thorium, Micro
Reactor

Page Number : 76

Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŐEKKÖR

Bu tez çalıŐmasının oluŐmasında konu belirleme aŐamasından itibaren tÖm sÖrelerde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaŐan, her konuda yardım ve desteğini gÖrdÖğÖm Sayın Prof. Dr. Adem ACIR 'a, maddi ve manevi her tÖrlÖ anlamda bana daima destek olan babam ŐÖkrÖ ÇİFCİ 'ye ve annem Halise ÇİFCİ 'ye, Hacettepe Öniversitesindeki NÖkleer Enerji MÖhendisliği lisans programındaki Öğrenimim boyunca tecrÖbelerini, bilgilerini benimle paylaŐan bÖlÖm hocalarıma, Hacettepe Öniversitesi NÖkleer Enerji MÖhendisliği bÖlÖmünde her zaman desteklerini gÖrdÖğÖm Araştırma GÖrevlisi Uğur KARAKURT 'a ve Araştırma GÖrevlisi Osman BİLEN 'e teŐekkÖrÖ bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER.....	13
3.1. Küçük Modüler Reaktörler	13
3.1.1. Entegre basınçlı su reaktörleri.....	14
3.1.2. Erimiş tuz reaktörleri.....	16
3.1.3. Isı borusu reaktörler	17
3.1.4. Sıvı metal soğutmalı reaktörler	19
3.1.5. Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler	21
4. METODLAR VE YÖNTEM	25
4.1. HOLOS Mikro-Reaktör Tüm Kor Nötronik Analizi	26
4.2. Reaktörün Teknik Özellikleri.....	28
4.3. Nötron Taşınım Denklemi.....	30
4.4. Tüm Kor Geometri Modelleme.....	32
4.4.1. Yakıt demeti boyutlarının ve yakıt kanallarının konumlarının belirlenmesi	32

4.4.2. Yakıt kanallarındaki çok katmanlı yakıt küreciklerinin sayısının bulunması ve rastgele konumlarının belirlenmesi için kullanılan yöntem	34
5. NÖTRONİK ANALİZ SONUÇLARI	35
5.1. UCO Yakıt Kullanan HOLOS Reaktörü Nötronik Analiz Sonuçları	36
5.2. Reaktör Sınıfı (Pu, Th)O ₂ Yakıt Kullanan HOLOS Reaktörü Nötronik Analiz Sonuçları	39
5.2.1. (% 10 Th, %90 RS-Pu)O ₂ yakıtı	40
5.2.2. (% 30 Th, RS %70 Pu)O ₂ yakıtı	42
5.2.3. (% 35 Th, %65 RS-Pu)O ₂ yakıtı	44
5.3. Silah Sınıfı(SS) (Pu,Th)O ₂ Yakıt Kullanan HOLOS Reaktörü Nötronik Analiz Sonuçları	46
5.3.1. (% 10 Th, %90 SS-Pu)O ₂ yakıtı.....	48
5.3.2. (% 30 Th, %70 SS-Pu)O ₂ yakıtı.....	51
5.3.3. (% 50 Th, %50 SS-Pu)O ₂ yakıtı.....	53
5.3.4. (% 60 Th, %40 SS-Pu)O ₂ yakıtı.....	56
5.3.5. (% 65 Th, %35 SS -Pu)O ₂ yakıtı.....	58
5.3.6. (% 70 Th, %30 SS-Pu)O ₂ yakıtı.....	60
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	69
EKLER.....	73
EK-1 Çok Katmanlı Yakıt Küreciklerinin Dağılımı için OpenMC kodu	74
ÖZGEÇMİŞ	76

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Dünyadaki Küçük Modüler Reaktörler ve Durumları	5
Çizelge 4.1. Reaktör Geometrisi için Gerekli Parametreler	28
Çizelge 4.2. UCO Yakıtlı Çok Katmanlı Yakıt Küreciğinin Katmanları	28
Çizelge 4.3. Reaktör ve Silah Sınıfı Plütonyum Elementi İzotop Konsantrasyonu.....	29
Çizelge 4.4. Malzeme Yoğunlukları	29
Çizelge 5.1. Farklı Hacimlerdeki (Th+RS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Nötronik Analiz Sonuçları	40
Çizelge 5.2. Farklı Hacimlerdeki (Th+SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Nötronik Analiz Sonuçları	48

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. UCO Yakıtı için Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi.....	37
Şekil 5.2. UCO Yakıtı için Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütleli Değişimi	37
Şekil 5.3. UCO Yakıtı için Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütleli Değişimi	38
Şekil 5.4. UCO Yakıtı için Zamana Bağlı Yanma Değerleri	38
Şekil 5.5. (Th+RS-Pu)O ₂ Yakıtının Farklı Oranlarda Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi	39
Şekil 5.6. (%10 Th+ %90 RS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi	41
Şekil 5.7. (%10 Th+ %90 RS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütleli Değişimi	41
Şekil 5.8. (%10 Th+ %90 RS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütleli Değişimi	42
Şekil 5.9. (%30 Th+ %70 RS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi	43
Şekil 5.10. (%30 Th+ %70 RS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütleli Değişimi.....	43
Şekil 5.11. (%30 Th+ %70 RS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütleli Değişimi.....	44
Şekil 5.12. (%35 Th+ %65 RS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi	45
Şekil 5.13. (%35 Th+ %65 RS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütleli Değişimi.....	45
Şekil 5.14. (%35 Th+ %65 RS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütleli Değişimi.....	46
Şekil 5.15. (Th+SS-Pu)O ₂ Yakıtının Farklı Oranlarda Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi	47
Şekil 5.16. (%10 Th+ %90 SS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi.....	49
Şekil 5.17. (%10 Th+ %90 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütleli Değişimi.....	50
Şekil 5.18. (%10 Th+ %90 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütleli Değişimi.....	50

Şekil	Sayfa
Şekil 5.19. (%30 Th+ %70 SS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi.....	52
Şekil 5.20. (%30 Th+ %70 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	52
Şekil 5.21. (%30 Th+ %70 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	53
Şekil 5.22. (%50 Th+ %50 SS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi.....	54
Şekil 5.23. (%50 Th+ %50 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	55
Şekil 5.24. (%50 Th+ %50 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	55
Şekil 5.25. (%60 Th+ %40 SS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi.....	56
Şekil 5.26. (%60 Th+ %40 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	57
Şekil 5.27. (%60 Th+ %40 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	57
Şekil 5.28. (%65 Th+ %35 SS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi.....	58
Şekil 5.29. (%65 Th+ %35 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	59
Şekil 5.30. (%65 Th+ %35 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	59
Şekil 5.31. (%70 Th+ %30 SS-Pu)O ₂ Yakıtının Zamana Bağlı Kritiklik Değişimi.....	60
Şekil 5.32. (%70 Th+ %30 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı Pu İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	61
Şekil 5.33. (%70 Th+ %30 SS-Pu)O ₂ Yakıtı İçin Zamana Bağlı U İzotoplarının Kütlesel Değişimi.....	61

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Akademik Lomonosov, Yüzen Nükleer Güç Santrali	6
Resim 2.2. KLT-40S Reaktörü	7
Resim 2.3. HTGRU [5] Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör Birimi	8
Resim 2.4. HTGRU Tüm Kor Geometri Serpent Görseli.....	9
Resim 2.5. Taşıma Konteyneri İçerisindeki 13 MWe HOLOS QUAD (4 tane kritik altı güç modülü).....	10
Resim 2.6. 22 MWth Holos Reaktörünün Serpent Görseli.....	10
Resim 2.7. Taşınabilir Holos Reaktörü.....	11
Resim 2.8. Taşınabilir Holos Reaktörü.....	11
Resim 2.9. Taşınabilir Holos Reaktörü.....	12
Resim 3.1. Reaktörlerin Güçlerine göre Sınıflandırılması.....	13
Resim 3.2. Entegre Basınçlı Su Reaktörü (IPWR)	15
Resim 3.3. Erimiş Tuz Reaktörü.....	17
Resim 3.4. Isı Borusu Reaktörü Şeması.....	18
Resim 3.5. Kilopower Reaktörü.....	19
Resim 3.6. Sodyum Soğutmalı Sıvı Metal Reaktörü	20
Resim 3.7. ALFRED Reaktörü	21
Resim 3.8. Hidrojen Üretimi için HTGR.....	22
Resim 3.9. HOLOS Kritik Altı Güç Modülleri, Çalışma ve Kapanma Durumları.....	23
Resim 4.1. Holos UCO Yakıt Demeti Serpent Görseli.....	26
Resim 4.2. Holos (Th,Pu)O ₂ Yakıt Demeti Serpent Görseli.....	27
Resim 4.3. Çok Katmanlı Yakıt Küreciğinin Kesiti	29
Resim 4.4. Yakıt Demeti Boyutları.....	33
Resim 4.5. Yakıt Kanallarının Konumları	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
C	Toplam Öncü Sayısı
d	Gün
E	Enerji
g	Gram
N	Gecikmiş Nötron Öncü Sayısı
P	Basınç, (Pa)
Pu	Plütonyum elementi
r	Konum Vektörü (x,y,z)
s	Kaynak Terimi
T	Sıcaklık, (K)
Th	Toryum elementi
t	Zaman
U	Uranyum elementi
v	Nötron Hız Vektörü
W	Watt
η_{th}	Termal verim
v_p	Fisyon Başına Ortalama Üretilen Nötron
$\hat{\Omega}$	Hareket Yönündeki Birim Vektör (Katı Açısı)
Σ	Makroskobik Tesir Kesiti
λ	Bozunma Sabiti
χ	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
ψ	Açısal Akı
ϕ	Skalar Akı

Kısaltmalar**HTGR****HTR****MATLAB****MSR****OpenMC****Serpent****SMR****Açıklamalar**

High Temperature Gas-Cooled Reactors

High Temperature Reactors

Matrix Laboratory

Molten Salt Reactors

Monte Carlo Neutron and Photon Transport Simulation Code

Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code

Small Modular Reactors

1. GİRİŞ

Dünyada yaşanan enerji kriziyle birlikte ülkeler nükleer enerjiye yönelmeye başlamıştır. Nükleer enerji teknolojisi ile nükleer atıkların geri dönüşümü ve içerdiği uzun ömürlü aktinitlerden dolayı çevre için gelecekte ne gibi problemler doğuracağı tahmin edilebilmektedir. Ayrıca günümüzde kullanılan reaktörlerin tamamı uranyum reaktörleridir, uranyum yakıtı açısından gelecekte daha zengin yataklara sahip toryum rezervlerinden faydalanılması beklenmektedir. Bu sebeple toryum elementinin günümüz ticari ve araştırma reaktörlerde kullanılmaya uygun bir yakıt olma ihtimalinin araştırılması literatürde yer almaktadır. Son zamanlarda toryum ve plütonyum karışımı nükleer yakıtlardan faydalanarak nötronik performanslar 4. Nesil reaktörler, HTGR, PBMR, FBMR gibi reaktörlerde farklı yazarlar tarafından incelenmiştir [1-12].

Türkiye'nin de aralarında bulunduğu ülkeler, daha az aktinit üreten, aktinit yakan, yüksek kalitede ısı üreten vb. birçok reaktör tasarımı üzerinde çalışmaktadır. Yeni nesil nükleer reaktörlerden olan küçük modüler reaktörler için dünyada çokça araştırma-geliştirme çalışması yapılmaktadır. Bu çalışmada küçük modüler reaktörlerde sıkça gördüğümüz bir reaktör tipi olan yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı nükleer reaktör için nötronik analiz yapılmıştır. Küçük modüler reaktörlerin yatırım maliyetlerinin düşük olması, taşınabilir olması ve bunun sonucu olarak büyük şebeke sistemlerinin konumlarına bağlı olmaksızın uzak alanlarda çalışabilmesi günümüzde bu kadar ön plana çıkma sebepleri arasında gösterilebilir.

22 MW_{th} güce sahip olan bu reaktörde yakıt olarak kullanılan çok katmanlı yakıt küreciklerini farklı yapılarda ve yüzdelerle kullanılarak reaktörde toryum kullanılabilirliğiyle ilgili hesaplamalar yapıldı. Reaktörde, reaktör sınıfı plütonyum ve silah sınıfı plütonyum olarak iki çeşit yakıt kullanılmış sonuç olarak toryum kullanılabilme ve yakabilme oranlarına bakılmıştır. Ayrıca toryum elementinin tükenme miktarına bağlı olarak reaktörde üretilen U-233 elementinin kütleli değişimine bakılmıştır. Kullanılan çeşitli hacimlerdeki toryum yakıtı için reaktörün kritiklik değerlerine, yanma değerlerine ve kullanılan fisil izotopların tükenme değerlerine bakılmıştır.

HTGR tipi reaktörlerin önemli özelliklerinden biri termal verimlerinin yaklaşık %50 seviyelerinde olmasıdır. Dolayısıyla hafif sulu reaktör tiplerine göre termal verimleri görece fazladır. HTGR tipi SMR'ler taşınabilir olması ve hızlı inşa edilmesi özelliklerinden dolayı askeri garnizonlara hizmet etmesi, deniz üslerinde kullanılması ve uzak bölgelerin enerji ihtiyaçlarını karşılaması amaçlarıyla kullanılmaktadır. Bu tip reaktörlerin bir diğer önemli özelliği ise nükleer silahsızlanmaya dolaylı yollarla da olsa hizmet etmesidir. Çok katmanlı yakıt küreciklerinin (TRISO Particles) içerisindeki yakıt bölgesinde askeri nitelikte olan Plütonyum elementini bulundurması bunun en temel göstergesidir. Güç ve araştırma reaktörlerinde üretilebilen plütonyum elementi fisil bir yakıt olduğu için kolayca fisyon yapabilir ve uranyum rezervlerini kullanmadan bu tip reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilir.

Ülkemizin de içinde bulunduğu bazı ülkelerde SMR'lerin termik reaktörlerle aynı sahada konumlandırılması üzerine çalışmalar vardır. Bu çalışmalar kayda değerdir çünkü aynı sahada aynı alt yapı imkanlarını kullanabilirler. Örneğin su soğutmalı SMR'ler için suyun geri kazanılması amacıyla soğutma kulesinden, üretilen enerjinin dağıtılması içinse şebeke altyapısı kullanılabilir böylece SMR'lerin işletim maliyetlerinin daha da düşmesi sağlanır.

Bu tez çalışmasında nötronik analiz yapılırken Finlandiya'da bulunan VTT Teknik Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen Serpent Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation kodu kullanılmıştır [13]. Elementlerin tesir kesitleri, bozulma ve fisyon verimleri için ilgili ENDF/B-VII veri kütüphaneleri kullanılmıştır. Ayrıca çok katmanlı yakıt küreciklerin yakıt kanallarındaki dağılımı için Serpent kodu yerine lokasyonların daha iyi yakınsaması için 2011 yılında Massachusetts Institute of Technology tarafından geliştirilen OpenMC Monte Carlo Neutron and Photon Transport Simulation Code isimli Monte Carlo algoritmalarına dayanan kod kullanılmıştır [14]. OpenMC kodunun koşulması için fusion-energy/neutronics-workshop isimli kütüphane Docker isimli program aracılığıyla yerel ağda görünmesi sağlanmış ve Jupyter Notebook aracılığıyla Python API ile koşulmuştur. Onun haricinde diğer tüm hesaplamalar ve sonuç grafiklerinin elde edilmesi için 1970'lerin sonunda Cleve MOLER tarafından New Mexico Üniversitesinde geliştirilmeye başlanan MATLAB Matrix Laboratory isimli program kullanılmıştır [15].

Bu çalışmadaki HTGR tipi reaktör, altıgen geometri şeklindeki grafitten oluşan yakıt demetlerinin bir araya getirilmesinden oluşmaktadır. Bir yakıt demetinde 54 tane soğutucu

kanalı ve 19 tane yakıt kanalı bulunmaktadır. Reaktörde toplam 151 adet yakıt demeti bulunmaktadır. Yakıt kanallarında ise %40 paketleme oranı kadar çok katmanlı yakıt kürecikleri bulunmaktadır. Reaktörde soğutucu olarak 7 MPa basınca sahip Helyum kullanılmıştır. Reaktörün dış katmanında güvenlik amacıyla Zirkonyum kullanılmıştır. Yakıt kanallarının dış kısmında ise zarf tabakası olarak SiC bileşiği kullanılmıştır. Yakıt kanalının içi sinterlenmiş grafitten oluşmaktadır. Çok katmanlı yakıt kürecikleri ise sırasıyla yakıt, Pirolitik Karbon ve Ti_3SiC_2 katmanlarından oluşmaktadır. Ti_3SiC_2 bileşiğinden oluşan katman bir nevi zarf görevi görmektedir. İçerisindeki Ti elementi ise zarfın sağlamlığını artırmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

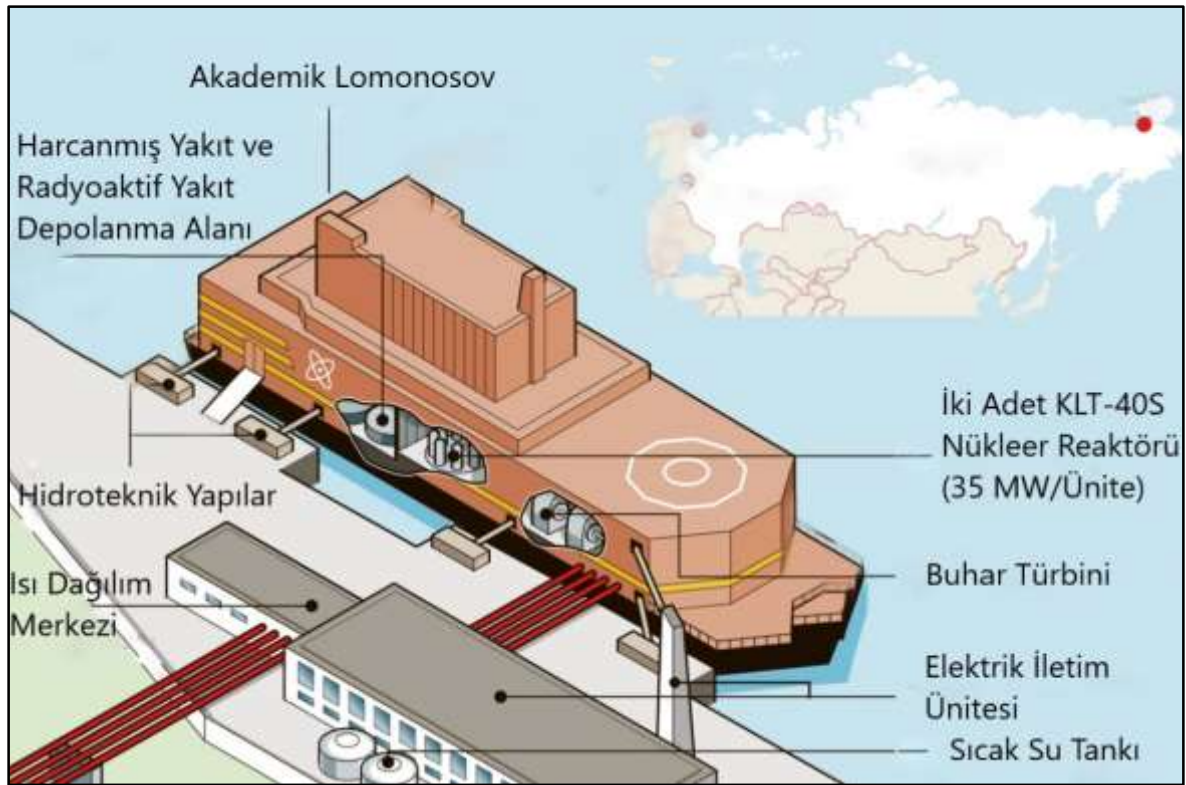
Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı tanımına göre bir reaktörün küçük modüler kategorisine girebilmesi için reaktör gücünün maksimum 300 MWe olması gerekir. 300 MWe değerinden 700 MWe değerine kadar güç üreten reaktörler ise orta modüler olarak tanımlanmıştır [16]. 15 MWe değerinden daha küçük güç üreten reaktörler ise çok küçük modüler reaktörler kategorisine girmektedir. Bu tez çalışmasındaki HOLOS isimli reaktörün gücü 11 MWe olduğundan dolayı çok küçük modüler reaktörler sınıfına girmektedir. Genel olarak küçük modüler reaktör tanımı ise şu şekildedir: Genellikle 300 MWe eşdeğeri veya daha az olan nükleer reaktörlerdir [16]. Bu yüzden genel olarak 300 MWe değerinden daha az güç üreten reaktörler küçük modüler reaktörler olarak anılmaktadır.

Gelişmiş küçük modüler reaktörler dört ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlar hafif su reaktörleri, hızlı nötron reaktörleri, grafit kontrollü yüksek sıcaklık reaktörleri ve çeşitli erimiş tuz reaktörleridir. Bu tip reaktörlerle ilgili dünyada birçok ülke tarafından kapsamlı çalışmalar vardır. Ülkemizde özel bir şirket, bir Erimiş Tuz Reaktörü tasarımı üzerine çalışmaktadır. Erimiş tuz reaktörlerinin yapım aşamasına geçebilmesi için en büyük problem olan korozyona dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Tüm ana başlıklardaki reaktörlere bakıldığında ise günümüzde 5 tane işletilen, 4 tane yapım aşamasında, 17 tane geliştirme aşamasında ve 21 tanesi ise tasarım aşamasında SMR bulunmaktadır [16]. Yapım aşamasında olan reaktörlerden biri bu çalışmada da üzerinde çalışılan HTR tipi reaktördür. Bu çalışmadaki HOLOS isimli reaktörün de içinde bulunduğu Çok küçük modüler reaktörlerde ise 11 tane reaktör geliştirme aşamasında bulunmaktadır. Literatürdeki SMR çalışmalarının bazıları Dünya Nükleer Birliğinden alınan bilgilerle Çizelge 2.1’de verilmiştir [16].

Çizelge 2.1. Dünyadaki küçük modüler reaktörler ve durumları

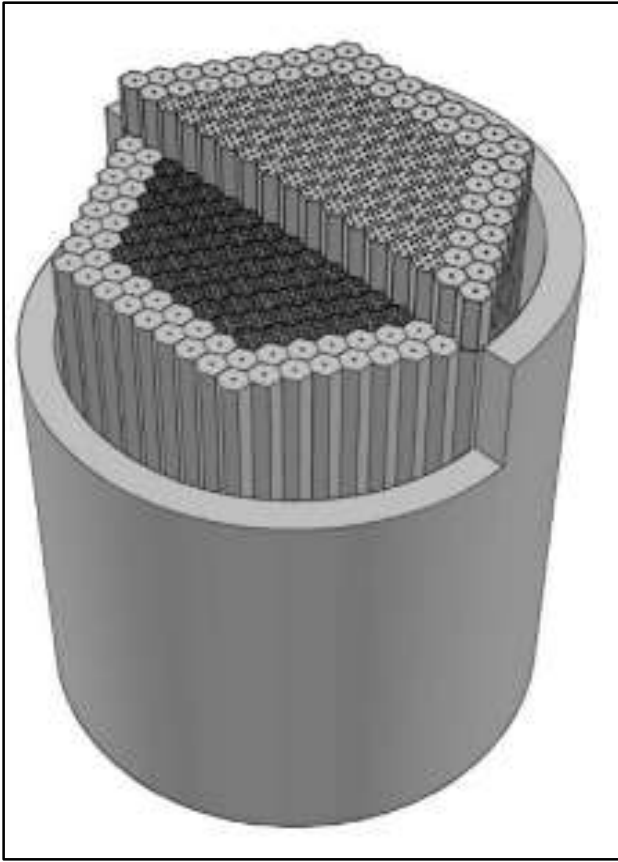
İsim	Güç (MWe)	Tip	Geliştirici Ülke	Durumu
CNP-300	300	PWR	Pakistan and Çin	İşletme
KLT-40S	35	PWR	Rusya	İşletme
HTR-PM	210	HTGR	Çin	İnşa Aşaması
BREST	300	Lead FNR	Rusya	İnşa Aşaması
SMR-160	160	PWR	ABD and Kanada	Geliştirme
Integral MSR	192	MSR	Kanada	Geliştirme
Holos	3-13	HTGR	ABD	Geliştirme

Ruslara ait olan KLT-40S reaktörü buz kırıcılarda kendini kanıtlamış, düşük zenginliğe sahip yakıtla -uzak alanlara güç sağlamak amacıyla KLT-40 reaktöründen türetilmiştir. Bu reaktörde 150 MWth enerji üretir ve bu enerjinin 38.5 MWe hatta verebilmektedir. Reaktör tuzdan arındırma veya bölgesel ısıtma amaçlı kullanılabilir. Reaktörün yanma değeri 45 GWd/t'dir. Reaktör 12 yıl çalıştıktan sonra kullanılan yakıtlar merkezi tesise götürülmektedir. Yakıt olarak, %18,6 zenginliğe sahip uranyum alüminyum silisti kullanılmaktadır. Reaktörün toplam çalışma süresi 40 yıldır. Bu tip reaktörler gemilerle taşınmakta olup yüzen nükleer güç santralleri denir. Bu santrallerin en popülerleri yine Rus Yapımı Akademik Lomonosov adlı Resim 2.1'de verilen yüzen nükleer güç santralidir. Akademik Lomonosov Mayıs 2020'de ticari faaliyetine başlamıştır ve ilk yüzer nükleer güç santrali olarak literatüre geçmiştir. Akademik Lomonosov'da KLT-40S adlı Resim 2.2'de verilen küçük modüler reaktör kullanılmaktadır. Bu ve bunun gibi çeşitli reaktörlerin güncel bilgilerine, durumlarına Dünya Nükleer Birliği sayfasından ulaşılabilir [16].

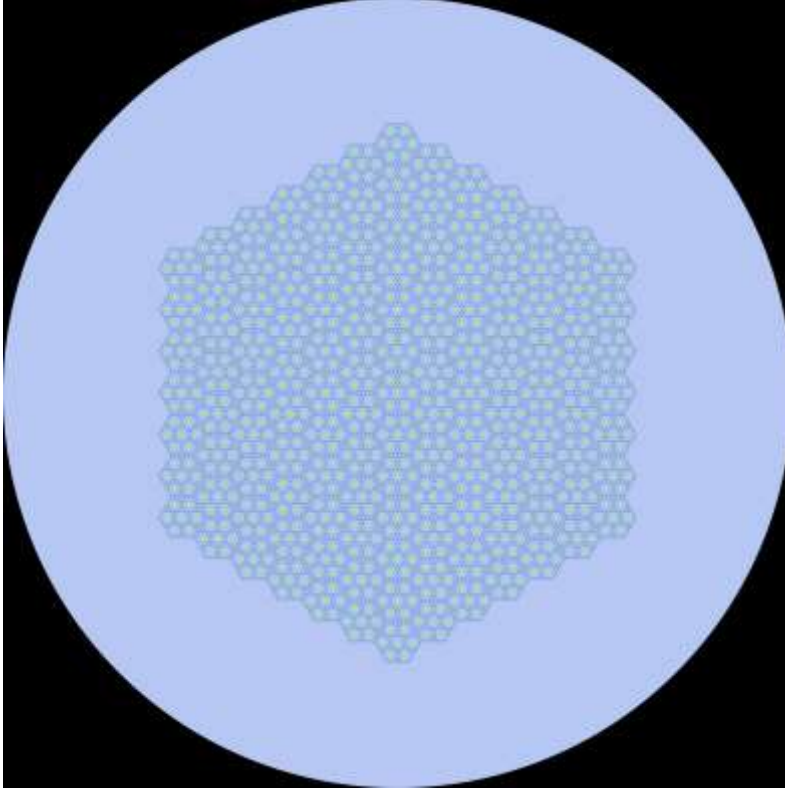


Resim 2.1. Akademik Lomonosov, yüzen nükleer güç santrali [17]

ve bunun doğruluğu incelenmiştir [20]. Ayrıca bu çalışmada ZrC zarf malzemesi ile SiC zarf malzemesinin kritikliğe etkisi üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca yazarlar yakıt demetlerinde kullanılan grafitin yoğunluğuna bağlı olarak reaktörün ne kadar Toryum yakabildiği ile ilgili sonuçları elde etmiştir [20]. Bu iki çalışmada da yakıtta hacmen, %50 toryum %50 plütonyum kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında reaktörün farklı hacim oranlarında toryum kullanılabilirliğine bakılmıştır. Bu iki çalışmada da kullanılan Plütonyum oranları Shamanin ve ark. tarafından yapılan çalışmadan alınmış [20] ve tasarım Resim 2.3'te, tüm kor tasarımı ise Resim 2.4'te verilmiştir [19].

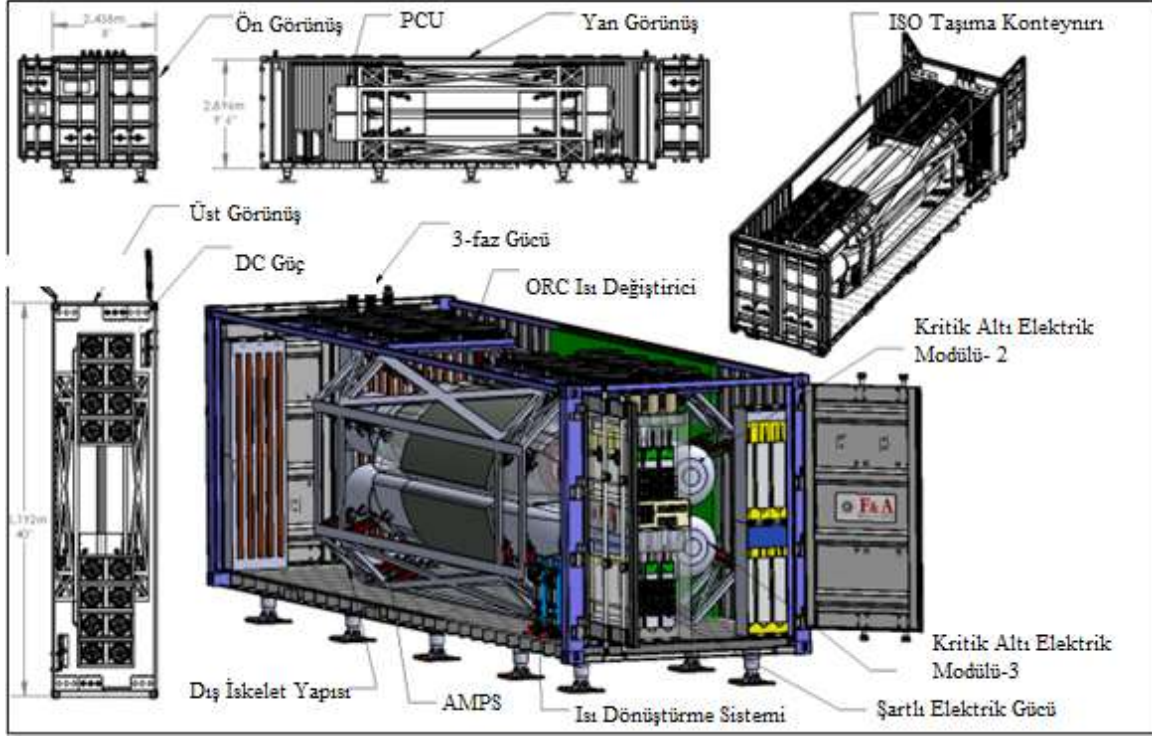


Resim 2.3. Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör ünitesi (HTGRU) [19]

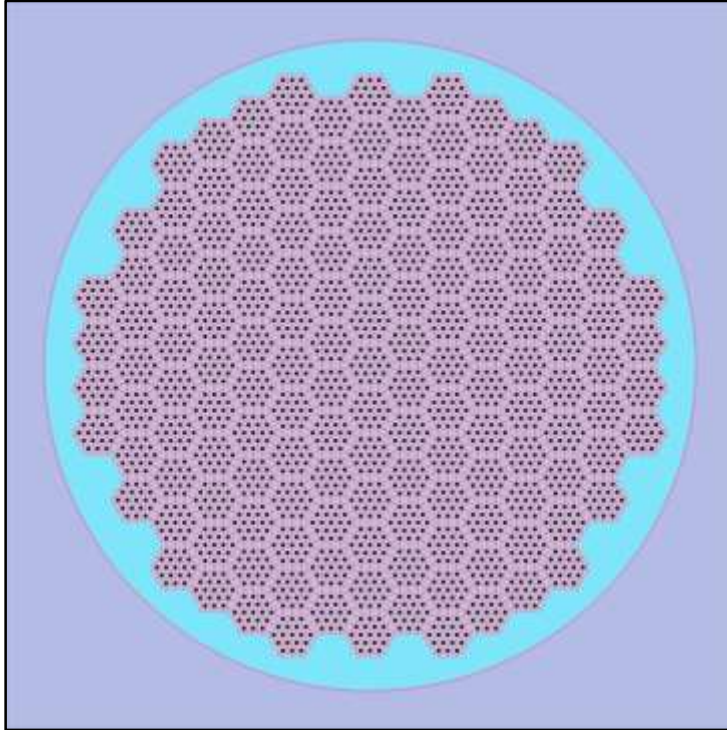


Resim 2.4. HTGRU tüm kor geometri Serpent görseli [21]

Çok küçük modüler reaktörlere bakıldığında HOLOS isimli taşınabilir 4 kritik altı reaktör bloğundan oluşan tasarım ön plana çıkmaktadır. Bu reaktör boyutları görece küçük olduğundan deniz taşıtları ve kara taşıtlarıyla taşınabilmektedir. HOLOS yakıt olarak UCO bileşiği kullanmaktadır. UCO bileşiğinin içindeki Uranyum elementi %19,5 oranında zenginleştirilmiştir. HOLOS, tipi HTGR olan 22 MWth güç üretebilen bir reaktördür. Reaktörde kullanılan çok katmanlı yakıt küreciklerinin katmanları sırasıyla şu şekildedir: yakıt bölgesi, grafitten oluşan koruma bölgesi, iç pirolitik karbon, SiC bölgesi ve dış pirolitik karbon. Reaktör, 54 soğutucu kanalına, 19 yakıt kanalına sahip altıgen şeklindeki 151 tane yakıt demetinden oluşmaktadır [22]. Bu reaktörün ömrü reaktör kalbinin kütlesine bağlı olarak değişmektedir. 15 tonluk kalbe sahip olan reaktör yaklaşık 3,5 yıl, 27 tonluk kalbe sahip olan reaktör ise yaklaşık 8 yıl çalışabilmektedir [23,24]. Bu tez çalışmasında 15 tonluk reaktör kalbine sahip olan tasarımın plütonyum ve toryum karışımı yakıt kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yapılmıştır. HOLOS reaktörüne ait görseller Resim 2.5’de ve Resim 2.6’da verilmiştir.



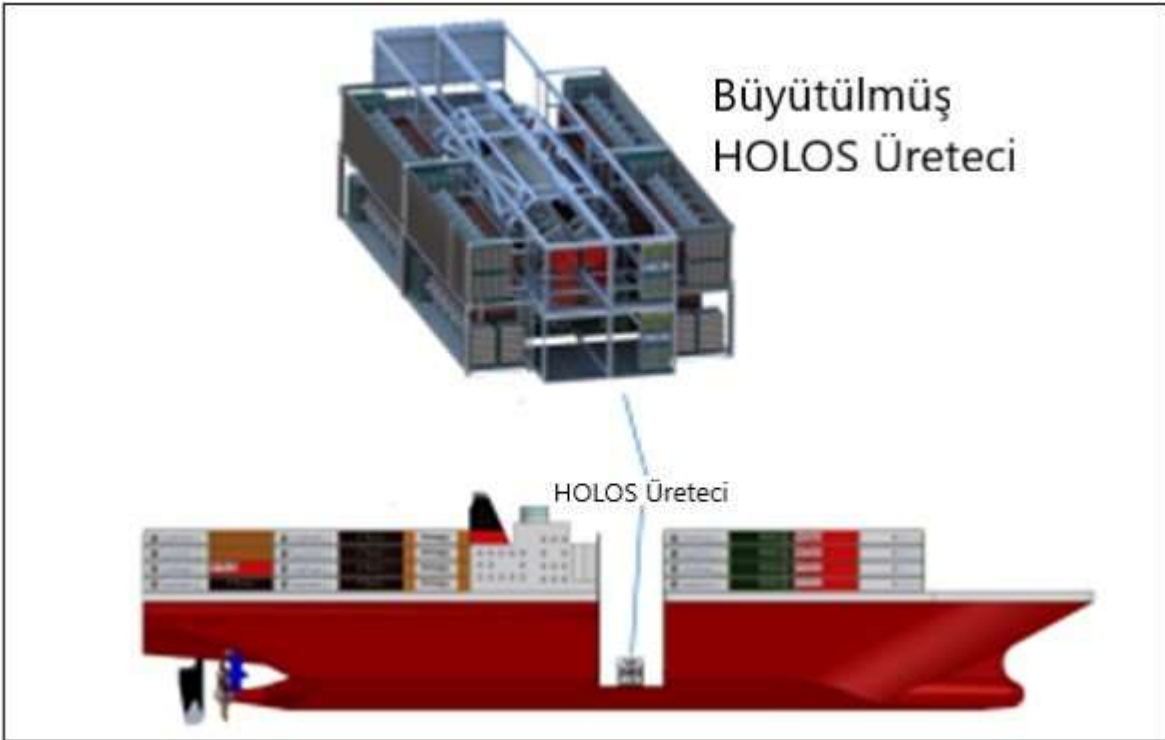
Resim 2.5. Taşıma konteyneri içerisindeki 13 MWe HOLOS QUAD (4 tane kritik altı güç modülü) [24]



Resim 2.6. 22 MWth Holos reaktörünün Serpent görseli



Resim 2.7. Taşınabilir Holos reaktörü görünümü [24]



Resim 2.8. Taşınabilir Holos reaktörü görünümü [24]



Resim 2.9. Taşınabilir Holos reaktörü görünümü [24]

3. KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER

3.1. Küçük Modüler Reaktörler

Küçük modüler reaktörler, geleneksel reaktörlerden daha küçük olan nükleer fisyon reaktörleridir. Bu tip reaktörler, tek bir yerde inşa edilip çalıştırılabilecekleri gibi çalışabileceği sahalara sevk edilebilirler. SMR'ler, güvenli olduklarından, düşük maliyetli olduklarından ve temiz enerji üretebilmelerinden dolayı ön plana çıkmaktadır. Bu reaktörler genellikle askeri garnizonlara hizmet etme, tuzdan arındırma, enerji üretimi, yüksek kaliteli ısı üretmek, enerjinin şebeke bağlantısının ulaşmadığı yerlere ulaştırılması gibi görevleri üstlenmesi ve diğer endüstriyel hizmetlerde kullanılması amaçlarıyla tasarlanmaktadır. SMR tasarımları, soğutucu olarak hafif su veya gaz, sıvı metal veya erimiş tuz gibi diğer soğutucuları kullanabilir. Reaktörlerin ürettikleri elektriksel güce göre sınıflandırılmaları Resim 3.1'de gösterilmiştir [25].



Resim 3.1. Reaktörlerin güçlerine göre sınıflandırılması [25]

Tasarım aşamasında veya çalışan tüm SMR'ler termal nötron bölgesinde veya hızlı nötron bölgesinde çalışan nükleer fisyon reaktörleridir. Bu reaktörlerin bu denli popüler olmasının nedenlerinden bazıları şunlardır:

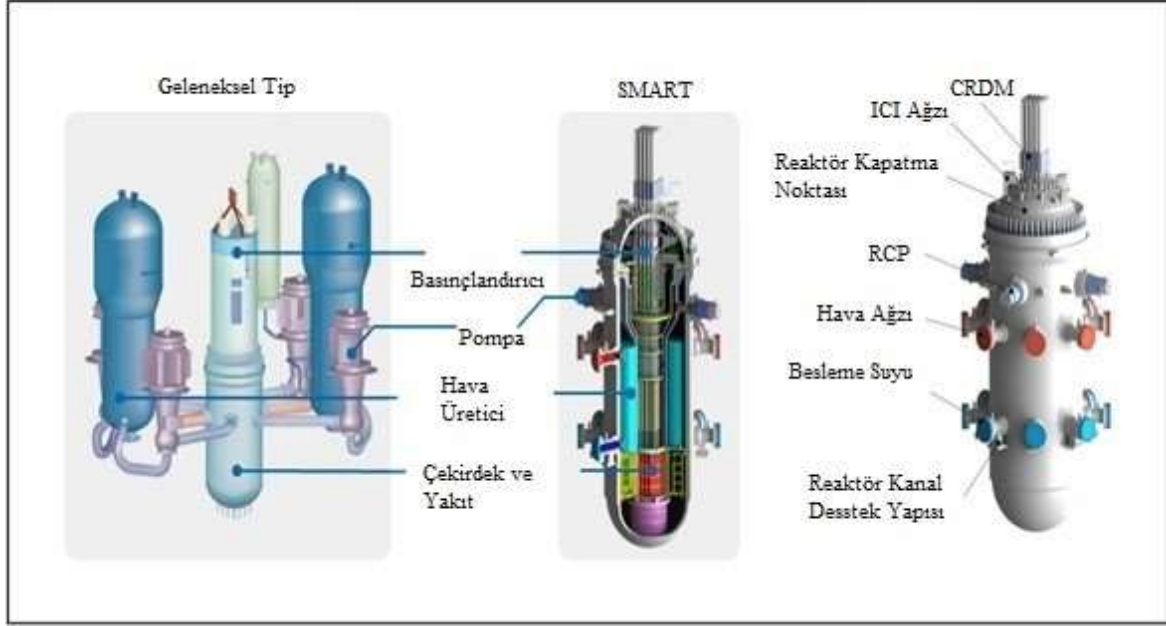
- Soğutma sıvısı sistemleri, bazen arızalar veren ve soğutucu kaybı kazalarına sebebiyet veren pompaları ortadan kaldırmak için doğal konveksiyon kullanabilmektedirler. Böylece reaktör kapatıldıktan sonra bozunma sonucu açığa çıkan ısı için herhangi ek bir soğutma ihtiyacı duymaz. Bazı SMR tasarımlarında pasif sistemi yedeklemek için aktif bir soğutma sistemi vardır [26].
- Moderatörlerdeki ve yakıtlardaki negatif sıcaklık katsayıları, fisyon reaksiyonlarını kontrol altında tutarak, sıcaklığın arttığı durumlarda reaksiyonun yavaşlamasına neden olur [27].
- Bazı SMR tasarımları, boyutlarının küçük olması sebebiyle reaktörü ve kullanılmış yakıt depolama havuzlarını yeraltına gömebilir [28].

Bu ve bunun gibi birçok avantajlı özelliğe sahip SMR'ler dünyaya yepyeni bir enerji üretim anlayışı getirebilir.

Küçük modüler reaktörler sınıfında entegre basınçlı su reaktörleri, erimiş tuz reaktörleri, yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler, sıvı metal soğutmalı reaktörler ve katı hal veya ısı borusu reaktörleri bulunmaktadır. Bu reaktörler tipleriyle ilgili daha geniş bilgiler aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

3.1.1. Entegre basınçlı su reaktörleri

Günümüzde birkaç ülkede geliştirilmekte olan bir SMR türü olan entegre basınçlı su reaktörü, güvenliği artırmak amacıyla birincil devre boru tesisatına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Bunun sonucu olarak bu tasarımda birincil devre ekipmanlarını, reaktör basınç kabının içine yerleştirilmiştir. Buhar üreteçleri kabın içindedir, tek geçişlidir ve tasarım gereği 70 °C ye kadar buhar kızgınlığı sağlayarak tesis verimliliğine önemli katkıda bulunur. Dünyada bu tip reaktörlerden bazıları Kore yapımı olan SMART isimli reaktör lisanslanmış, ABD yapımı NuScale SMR adlı reaktör, düzenleyici kuruluşun değerlendirme aşamasındadır. Japonlara ait IMR adlı reaktör ise tasarım aşamasında bulunmaktadır [29]. Smart isimli reaktöre ait görsel Resim 3.2'de verilmiştir.



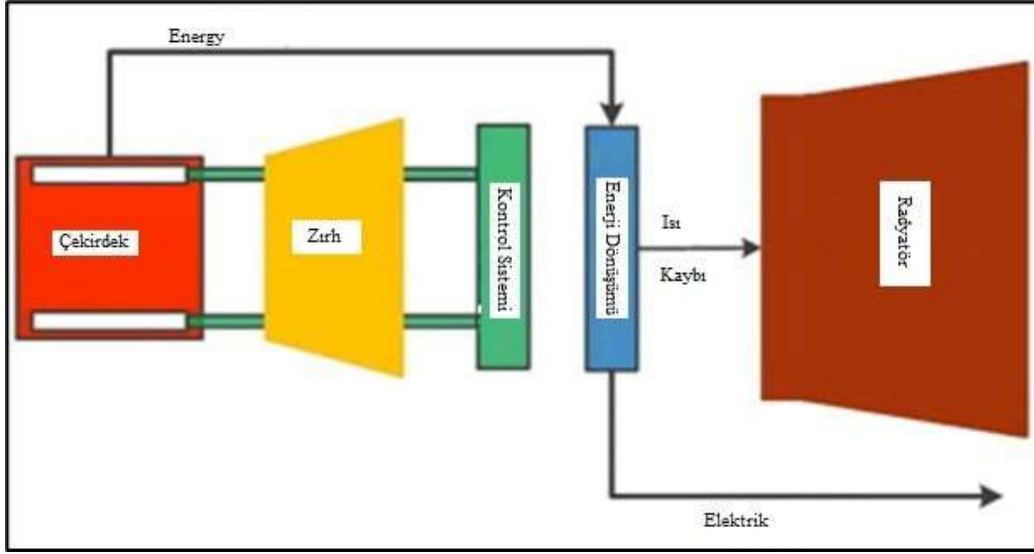
Resim 3.2. Entegre basınçlı su reaktörü (IPWR) [30]

SMART, tek bir reaktör basınçlı kap içinde basınçlandırıcı, buhar üreticileri ve reaktör soğutucu pompaları gibi ana bileşenleri içeren bütünleşmiş bir reaktördür. Reaktör kabı tertibatının bu bütünleşmiş düzenlemesi, büyük çaplı boru bağlantılarının çıkarılmasını sağlayarak, büyük soğutma sıvısı kayıplarının doğal olarak ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır [30]. Sekiz adet tek geçişli buhar üretici, normal çalışma koşulları altında 30°C'lik aşırı ısıtılmış buhar üretmek için sarmal olarak sarılmış borulardan oluşur. Buhar üreticindeki küçük bir ikincil yan su envanteri, ana buhar hattının kopması kazası sırasında, yeniden kritiklik olasılığını azaltır. Pompa contası olmayan, korumalı motora sahip dört reaktör soğutma sıvısı pompası, pompa contası arızasıyla ilişkili soğutma sıvısı kaybını doğal olarak önler. Dört kanallı kontrol çubuğu konum göstergesi, çekirdek koruma sisteminin basitleştirilmesine ve sistem güvenilirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunur. Kap içi basınçlandırıcı, sistem basıncını tüm normal çalışma koşulları boyunca neredeyse sabit bir seviyede kontrol etmek için tasarlanmıştır [30].

SMART reaktörü küçük veya izole elektrik şebekeleri altında elektrik üretimi için uygun olarak tasarlanmıştır. Bölgesel ısıtmanın yanı sıra 100.000 nüfusa yetecek bir deniz suyu tuzdan arındırma tesisi için de uygulanabilir. Tek bir SMART ünitesi 90 MW elektrik ve günlük 40.000 ton tatlı su üretebilmektedir [31].

3.1.2. Erimiş tuz reaktörleri

Bu tip reaktörler üstün güvenlik özellikleri, çok daha az nükleer atık oluşturması ve yakıt olarak uranyumdan çok daha fazla miktarda toryum kullanabilmesi sebebiyle popülerliğini korumaktadır. İlk olarak 1954 yılında Amerikan ordusunun nükleer bombardıman uçağı için tasarlanmıştır [32]. Kıtalararası balistik füzelerin geliştirilmesi sonucu olarak nükleer bombardıman uçaklarına gerek kalmamıştır. Erimiş Tuz Reaktörlerinin diğer reaktörlere göre termodinamik verimleri çok yüksektir. Bu reaktörlerin en büyük sorunu yüksek sıcaklık ve tuz halinde olan yakıtın korozyona sebep olmasıdır. Korozyon ekipmanlara zarar vermektedir dolayısıyla korozyona dayanıklı malzemelerin gelişmesiyle gelecek vadedebilir. Türkiye'nin de içinde bulunduğu birçok ülke MSR'ler üzerinde çalışmaktadır. Bu tip reaktörlerin güvenlik açısından en önemli özellikleri, reaktör iç basıncının 1 bar olması ve reaktörün kendisi erimiş olduğundan reaktörde nükleer erime diye tabir edilen ağır kaza meydana gelmemesidir [33]. MSR'ler geleneksel hafif sulu reaktörlerdeki gibi yaklaşık 300 °C sıcaklıklar yerine yaklaşık 700 °C sıcaklıklarda çalışmaktadır. Bu da daha büyük elektrik üretim verimi, şebeke depolama tesisleri olasılığı, hidrojen üretimi ve süreçsel-ısı kullanılabilirliği gibi bazı fırsatlar sunar. Bu reaktörün en büyük dezavantajları ise; reaktörün yakıt olarak kullandığı yakıt tuzu diğer ekipmanlarla temas halinde olmasından dolayı işletme sırasında bakım-onarım maliyetlerinin görece artması, bazı tasarımlarda erimiş tuzun tutulması için nikel bazlı alaşımların kullanılması fakat bu tip alaşımların yüksek nötron akısı altında deforme olmaya meyilli olması ve yüksek korozyon riski taşımasıdır [32]. Resim 3.3 bir erimiş tuz reaktörü şemasını göstermektedir [34].



Resim 3.4. Isı borusu reaktörü şeması [37]

Isı borusu reaktörler ısı boruları aracılığıyla reaktör korunu soğutmaktadır. Kilopower reaktör NASA'nın uzay yolculukları için tasarladığı reaktördür. Bu reaktörler yakıt olarak yüksek zenginliğe sahip uranyum kullanmaktadır. Yansıtıcı olarak berilyum oksit kullanmaktadır. 10 yılda bir yakıt değişimi yapılmaktadır. Termal verimi, %23 dolaylarındadır [36]. 1 kW elektriksel güce sahiptir [36]. Kilopower reaktörü Resim 3.5'te verilmiştir [37].

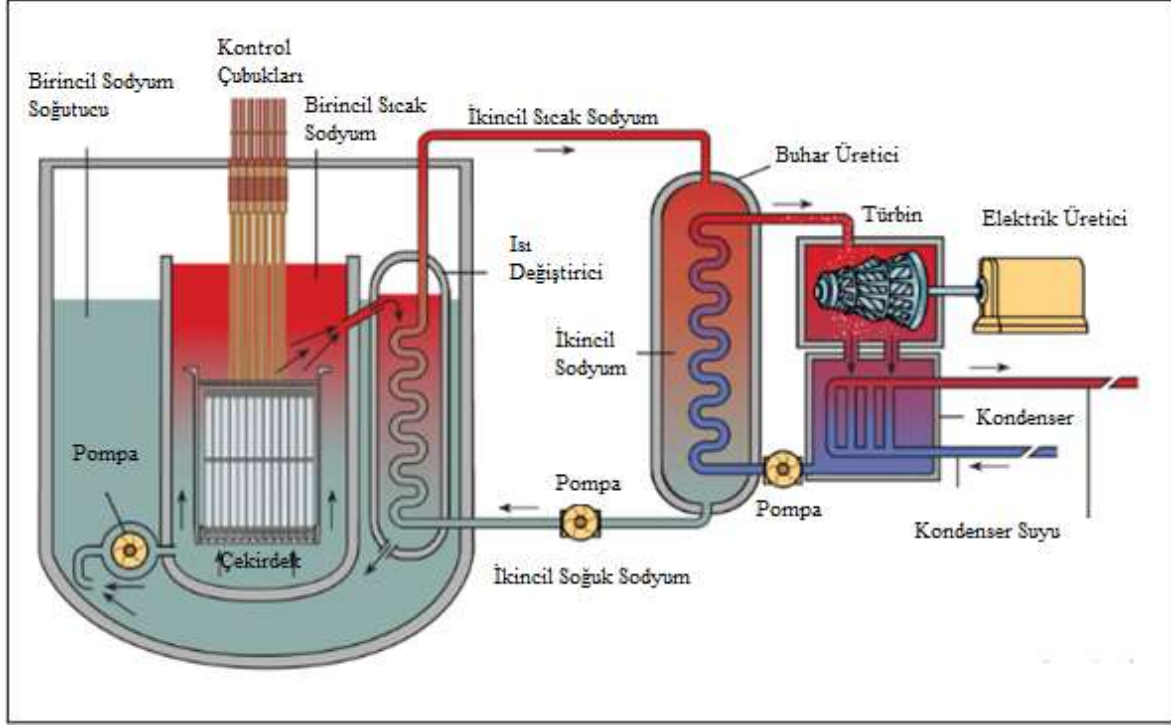


Resim 3.5. Kilopower reaktörü [37]

3.1.4. Sıvı metal soğutmalı reaktörler

Bu reaktörlerde soğutma olarak sodyum, sodyum-potasyum alaşımı, kurşun, kurşun-bizmut ötektik alaşımı ve civa kullanılabilir. Eski çalışmalara bakıldığında soğutucu olarak Sodyum ve Sodyum Potasyum alaşımı kullanılmaktadır. Bunun sebebi diğer metallere oranla çeliği daha az korozyona uğratması ve nükleer yakıtlarla uyumlu olmasıdır [38]. Fakat hava ile temas ettikleri zaman kendiliğinden tutuşurlar ve su ile reaksiyon vererek hidrojen

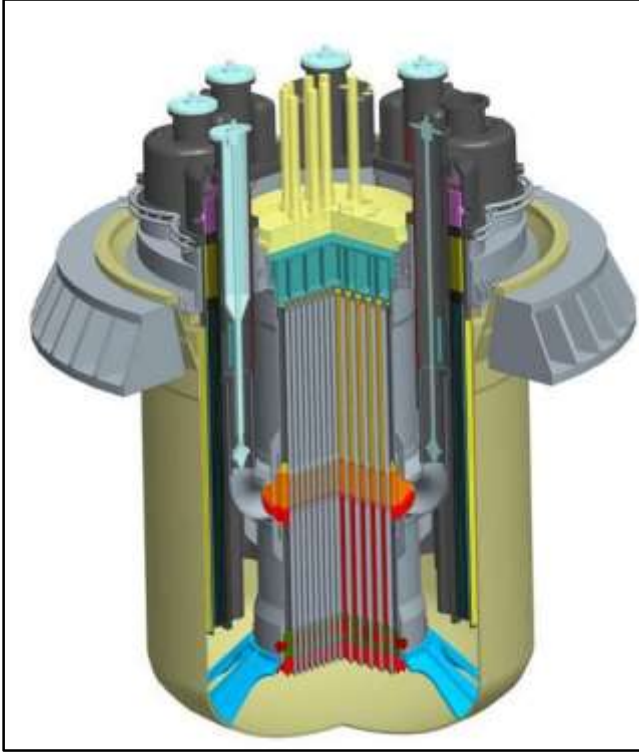
açığa çıkartırlar bu da reaktörde kazaya neden olur. Monju nükleer güç santralinde 1995'te gerçekleşen kaza bu durumdan kaynaklanmıştır [38]. Sodyum soğutmalı hızlı nötron spektrumlu sıvı metal reaktörler 1960'lı yıllarda hızla gelişen nükleer endüstriye fisil malzeme sağlayabilme potansiyeliyle ön plana çıkmıştır [39]. Resim 3.6'da örnek bir sodyum soğutmalı sıvı metal reaktörü verilmiştir [39].



Resim 3.6. Sodyum soğutmalı sıvı metal reaktörü [39]

Günümüzde daha çok kurşun ve kurşun bizmut ötektik alaşımı soğutucu olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmaların hepsi tasarım aşamasındadır. Güncel reaktörlerin durumlarını IAEA'nın ilgili sayfasından bakılabilmektedir [29].

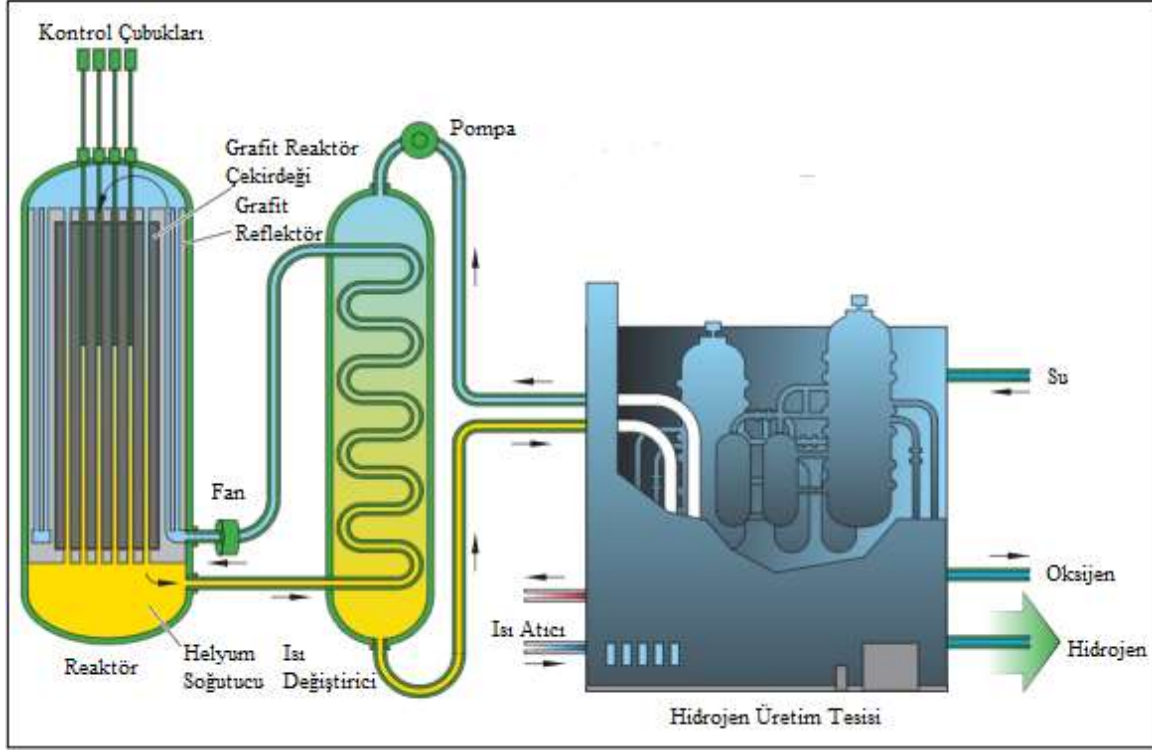
Günümüz tasarımlarına örnek olarak İtalyan tasarımı ALFRED isimli gelişmiş kurşun soğutmalı hızlı reaktör verilebilir. Bu tasarım 125 MW elektriksel güce sahip, kurşun soğutmalı, yakıt olarak MOX kullanan bir hızlı reaktördür [40]. Bu reaktöre ait Resim 3.7'de verilmiştir [40].



Resim 3.7. ALFRED reaktörü [40]

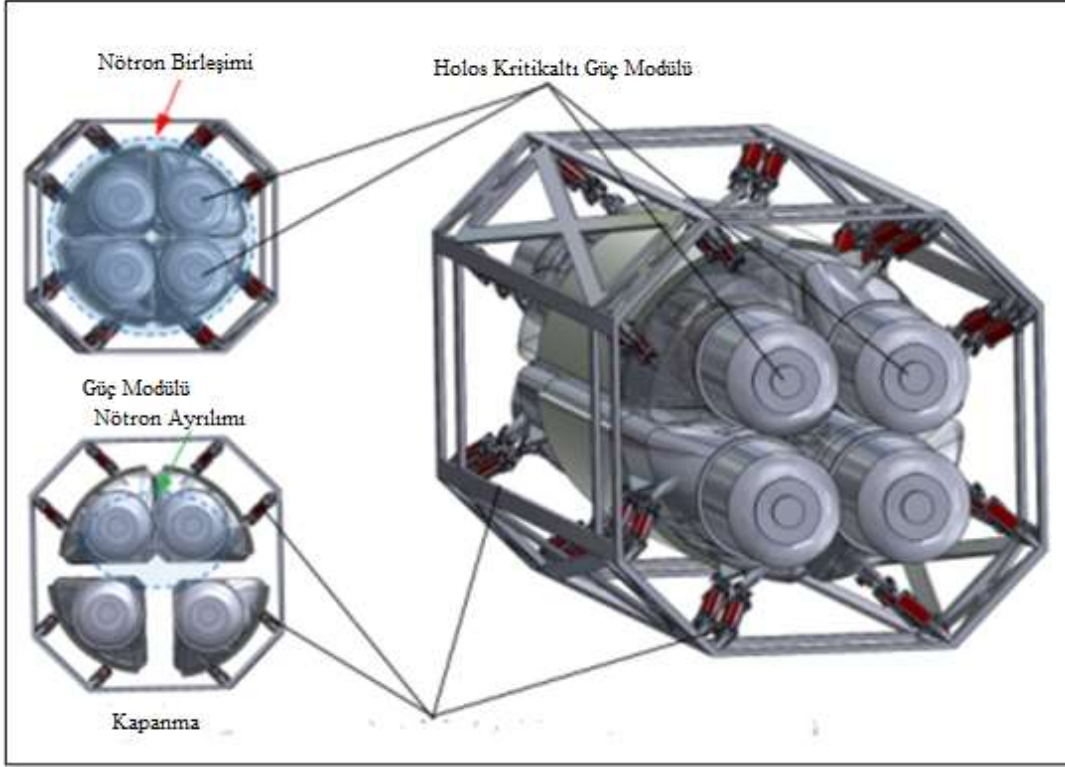
3.1.5. Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler

Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler prizmatik bloklar halinde olabileceği gibi çakıl yataklı şeklinde de olabilir. Moderatör olarak grafit, soğutucu olarak helyum kullanılmaktadır. Soğutucu olarak helyum kullanılmasındaki temel sebep helyumun asal gaz olması ve buna bağlı olarak hiçbir madde ile kimyasal reaksiyon vermemesidir. Ayrıca helyum nötronlara maruz bırakınca radyoaktif olmaz. Yakıt olarak çok katmanlı yakıt kürecikleri kullanılmaktadır. Bu tip reaktörlerin ön plana çıkma sebeplerinden birisi kendiliğinden güvenli olmasıdır. Bunun yanı sıra grafitin termal ataleti büyüktür. Ayrıca yukarıda bahsedilen helyumun tercih edilme nedenleri güvenlik için de sayılabilir. Hidrojen üretimi için kullanılan örnek bir HTGR tipi reaktör Resim 3.8’de verilmiştir [41].



Resim 3.8. Hidrojen üretimi için HTGR [41]

Bu tez çalışmasında nötronik analizi yapılan HOLOS isimli reaktör mikro reaktör konseptine uygun olarak tasarlanmış bir HTGR tipi reaktördür. Bu reaktöre ait görseller Resim 2.5'te ve Resim 2.6'da verilmiştir. HOLOS dört adet kritik altı güç modüllerinden oluşmaktadır. Bu modüller bir araya gelerek reaktörü kritik yapar. Yakıt olarak çok katmanlı yakıt kürecikleri kullanılmaktadır. 22 MW termal enerji üretebilmektedir. Çekirdekte 151 tane grafitten oluşan altıgen geometriye sahip yakıt demeti vardır. Bu demetlerin her biri 19 tane yakıt kanalı ve 54 tane soğutucu helyum gazı kanalı içermektedir. Soğutucu kanallarının dış kısmına zarf malzemesi olarak zirkonyum elementi kullanılmıştır. Benzer şekilde reaktörün yansıtıcı kısmının hava ile doğrudan etkileşimini engellemek için berilyumdan oluşan yansıtıcının dış bölgesine zirkonyumdan oluşan bir katman konulmuştur. Ayrıca soğutucu kanallarının dışındaki zirkonyum zarf malzemesinin çevresinde kurşun bir katman bulunmaktadır. Bu reaktörün ömrü reaktör kalbinin kütlesine bağlı olarak değişmektedir. 15 tonluk kalbe sahip olan reaktör yaklaşık 3,5 yıl, 27 tonluk kalbe sahip olan reaktör ise yaklaşık 8 yıl çalışabilmektedir [23]. HoloS reaktörünün dört adet kritik altı güç modülü, çalışma ve kapanma durumlarındaki güç modüllerinin konumları Resim 3.9'da verilmiştir [24].



Resim 3.9. HOLOS kritik altı güç modülleri, çalışma ve kapanma durumları [24]

4. METODLAR VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında 22 MW termal gücündeki HOLOS reaktörü için tüm kor geometri için nötronik analiz yapılmıştır. Literatürde UCO yakıtı kullanan HOLOS reaktörü için toryum ve farklı sınıflardaki plütonyum karışımı yakıt kullanılmış ve reaktörde hacimsel olarak ne kadar toryum kullanılabilirliğine bakılmıştır. Ayrıca hacimsel toryum kullanılabilirliğinin yanında toryumun ne kadarının yandığına da bakılmıştır. Toryumun nötron yakalaması sonucunda başlayan zincirleme reaksiyon denklem 4.1’de verilmiştir. Bu reaksiyonlar sonucunda ortaya fisil izotop olan U-233 elementi çıkmaktadır. U-233 nötron yutarak U-234’e dönüşür veya fisyon yaparak fisyon ürünlerine bozulur bu sırada 2 veya 3 nötron serbest bırakır.

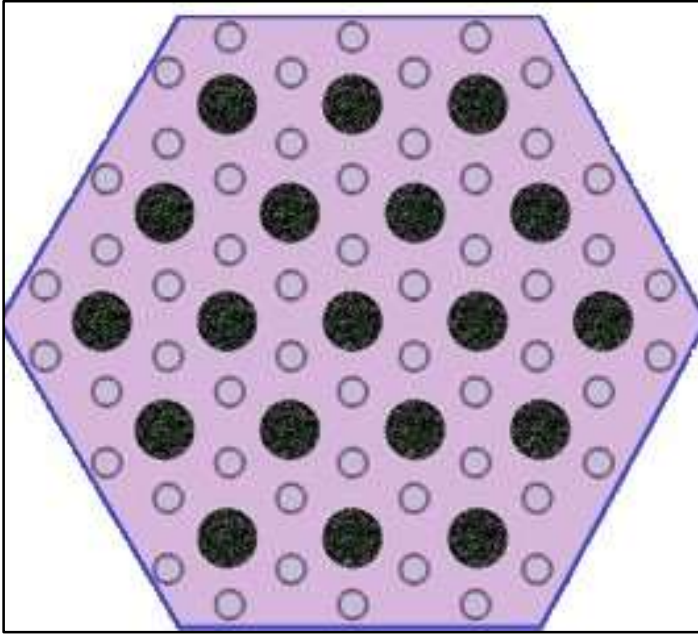


Tüm kor geometri nötronik analiz yapılırken reaktörün yakıt demeti geometrik olarak incelenmiştir. Buna bağlı olarak yakıt kanalları arasındaki perde mesafesi (Pitch) ve yakıt demetinin her birinde bulunan 19 tane yakıt kanalının ayrı ayrı merkezleri bulunmuştur. Yakıt kanallarının ayrı ayrı konumlarının bulunmasındaki sebep geometri oluşturulurken kullanılan yöntemden dolayı Serpent [13] kodu otomatik olarak konumları taşıyamamasından kaynaklanmaktadır. Son olarak uygun veriler kullanılarak reaktör belirlenen geometride oluşturulmuştur.

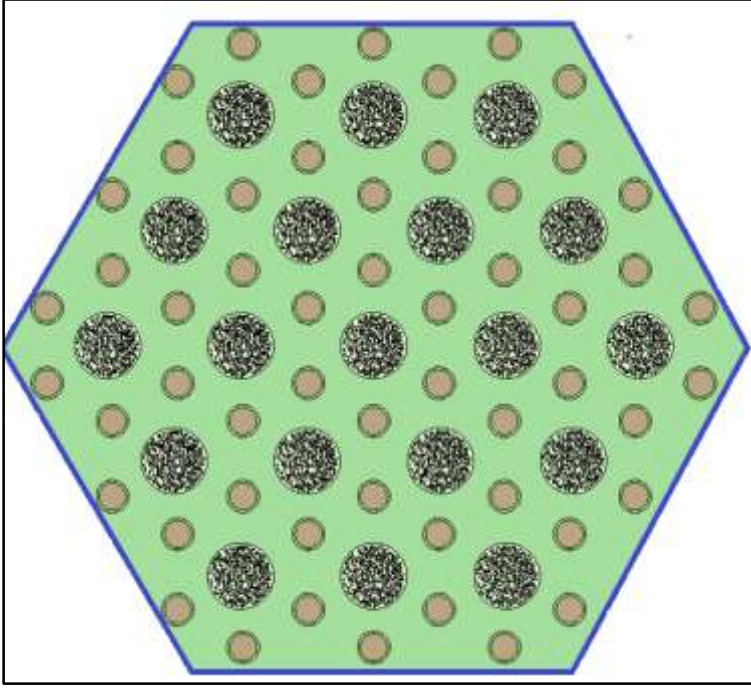
Hesaplamalar yapılırken Serpent [13], OpenMC [14] gibi temeli Monte-Carlo algoritmalarına dayanan olasılık kodları kullanılmıştır. Bu tip kodlarda elementlerin farklı sıcaklıklardaki tesir kesitleri, bozulması ve fisyon olasılıkları için veri kütüphanelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada ENDF/B-VII kütüphaneleri kullanılmıştır. Serpent kodu, reaktör yanma hesabı yapılması, geometri oluşturulması aşamalarında kullanılmıştır. OpenMC kodu, çok katmanlı yakıt küreciklerinin yakıt kanallarındaki üç boyuttaki koordinatlarının elde edilmesi için kullanılmıştır. Son olarak OpenMC kodundan alınan koordinatlar Serpent programında girdi olarak kullanılmıştır.

4.1. HOLOS Mikro-Reaktör Tüm Kor Nötronik Analizi

HOLOS mikro nükleer reaktöründe orijinal yakıt olarak UCO kullanmaktadır. Bu çalışmada toryum elementi kullanıldığından dolayı ve daha sağlam olan çok katmanlı yakıt kürecikleri kullanılmıştır. Bu yakıt kürecikleri sinterlenmiş grafitin içerisinde kullanıldığından dolayı ana reaktördeki yakıt kanallarına sinterlenmiş grafitin üzerine çok katmanlı yakıt kürecikleri OpenMC kodu kullanılarak dağıtılmıştır. Resim 4.1’de ve Resim 4.2’de verilen yakıt demetlerinde kullanılan yakıtı göre dolayısıyla kullanılan yakıt küreciğine göre oluşturulan yakıt kanalları verilmiştir. Resim 4.1’de UCO yakıt tipine göre yakıt demeti verilmiştir. Resim 4.2’de ise $(Th,Pu)O_2$ yakıtı için yakıt demeti verilmiştir. Reaktör boyutlarını korumak adına toplam yakıt demeti sayısı ve yakıt demeti boyutları değiştirilmemiştir.



Resim 4.1. HoloS UCO yakıt demeti Serpent görseli



Resim 4.2. Holos (Th,Pu)O₂ yakıt demeti Serpent görseli

Holos reaktöründe 19 adet yakıt kanalının teker teker konumları bulunmuştur. Bunun sebebi Serpent 'de kullanılan yöntemle ilgilidir. Yakıt kürecikleri öteleme yoluyla konumlandırma yöntemi ile kesitte yerlerine yerleştirilmiştir. Yakıt küreciklerinin konumları için Serpent'te hali hazırda -disperse komutu vardır. Fakat bu komut yaklaşık %35 paketleme oranından daha büyük değerlerde iyi yakınsayamamaktadır. %35 Paketleme oranından daha büyük değerlerde "Grow and Shake" algoritmasının kullanılmasını önerilmektedir. Bunun yerine OpenMC açık kaynak kodu kullanılarak çok katmanlı yakıt kürecikleri yakıt kanallarına uygun olarak dağıtılmış ve her birinin konumlarına ulaşılmıştır. MATLAB programında yazılan kod kullanılarak öteleme işlemi yapılmıştır. Bu kod ile 19 yakıt kanalı için 19 adet dağılım verisi elde edilmektedir. Son olarak da hazırlanan veriler Serpent kodunda girdi olarak kullanılmıştır. Hesaplamalarla ilgili bilgiler bölüm 4.4.2'de ve OpenMC kaynak bilgisayar kodları Ek-1'de verilmiştir.

Serpent, OpenMC gibi Monte Carlo algoritmalarına dayanan olasılıksal kodlar nötron transportunu belirlenen geometride, belirlenen sınır koşullarına göre çözmektedir. Nötron Transport Denklemi, herhangi bir ortamda nötron etkileşimlerini veya taşınımını konu alan çalışmalarda kullanılır.

4.2. Reaktörün Teknik Özellikleri

Nötronik analizi yapılan HOLOS mikro nükleer reaktörüne ait bazı parametreler çizelge 4.1’de verilmiştir [22].

Çizelge 4.1. Reaktör geometrisi için gerekli parametreler [22]

Parametre	Değer
Termal Güç (MWt)	22
Kor Yarıçapı (m)	1.045
Kor Zr Zarf Kalınlığı (cm)	0.5
Yakıt Demeti Sayısı	151
Yakıt Demeti Perde Aralığı (cm)	14.45
Yakıt Kanal Uzunluğu (m)	3.9
Reaktör Uzunluğu (m)	4
Yakıt Kanalı Yarıçapı (cm)	0.7
Soğutucu Kanalı Yarıçapı (cm)	0.3
Soğutucu Kanalı Zr Zarf Kalınlığı (cm)	0.057
Soğutucu Kanalı Kurşun Zarf Kalınlığı (μm)	20

HOLOS reaktörü için UCO yakıt kullanan çok katmanlı yakıt küreciğine ait parametreler Çizelge 4.2’de verilmiştir [22].

Çizelge 4.2. UCO yakıtlı çok katmanlı yakıt küreciğinin katmanları

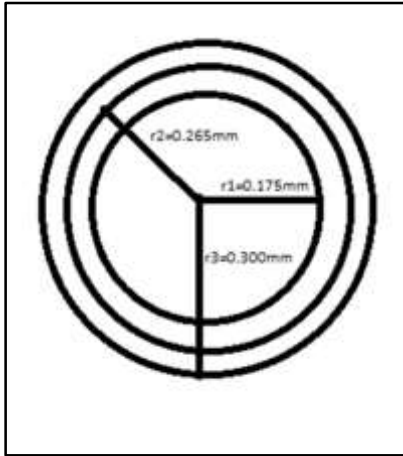
Katman	Değer (μm)
UCO Yakıt Katmanı Çapı	425
Grafit Tampon Katmanı Kalınlığı	100
İç Pirolitik Karbon Katmanı Kalınlığı	40
SiC Katmanı Kalınlığı	35
Dış Pirolitik Karbon Katmanı Kalınlığı	40

Bu tez çalışmasında, toyum yakıtının kullanılabilirliği araştırılmış ve Resim 4.3’te verilen çok katmanlı yakıt küreciği ile ilgili görseldeki boyutlar kullanılmıştır [21]. Buna bağlı olarak yakıt kanalları değiştirilmiştir. Bu yakıt küreciği ile ilgili görsel Resim 4.3’te verilmiştir. Reaktör sınıfı plütonyum yakıtı [21] ile silah sınıfı plütonyum [21] ilgili izotop konsantrasyonları Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Reaktör ve silah sınıfı plütonyum elementi izotop konsantrasyonu

Pu İzotop İsmi	²³⁸ Pu (%)	²³⁹ Pu (%)	²⁴⁰ Pu (%)	²⁴¹ Pu (%)	²⁴² Pu (%)
Reaktör Sınıfı(RS)	1.8	59	23	12.2	4
Silah Sınıfı(SS)	0	94	5	1	0

Hesaplamalarda kullanılan yakıt küreciği sırasıyla (Pu,Th)O₂ yakıt katmanı, pirolitik karbon katmanı ve Ti₃SiC₂ katmanından oluşan çok katmanlı yakıt küreciğinin katmanları Resim 4.3'te verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan yoğunluklar, 10.4 g/cm³, 1.882 g/cm³ ve 4.5 g/cm³ olarak alınmıştır.



Resim 4.3. Çok katmanlı yakıt küreciğinin kesiti [21]

Reaktörde kullanılan malzemelerin yoğunlukları Çizelge 4.4'te verilmiştir [22].

Çizelge 4.4. Malzeme yoğunlukları

Malzeme	Yoğunluk(g/cm ³)
Grafit Blok	1.806
Reflektör Blok	1.778
Soğutucu Helyum	0.00365
Hava	0.0012
Kurşun	10.253
Zr	6.489

Reaktörün nötronik analiz hesaplamalarında soğutucu ve yapısal malzeme özellikleri nötronik veri kütüphanelerinde verilen 900 K sıcaklığa göre alınmıştır ve hesaplamalarda kullanılmıştır.

4.3. Nötron Taşınım Denklemi

Nötron taşınım denklemi, bir malzemedeki parçacıkların akışının açının bir fonksiyonu olduğu kadar uzaysal konum ve zamansal değişkenlerin bir fonksiyonudur. Nötron taşınım denklemi en geniş haliyle denklem 4.2'de verilmiştir.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + v \cdot \Omega \cdot \nabla n + v \cdot \Sigma_t(r, E)n(r, E, \Omega, t) = \int_{4\pi} \int_0^\infty dE' d\Omega' \{ v' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega)n(r, E', \Omega', t) \} + S(r, E, \Omega, t) \quad (4.2)$$

Burada $\frac{\partial n}{\partial t}$ terimi nötronların zamanla değişimini, $v \cdot \Omega \cdot \nabla n$ terimi kaçak nötronları, $v \cdot \Sigma_t(r, E)n(r, E, \Omega, t)$ terimi yok olma, yutulma ve saçılma olaylarının tümünü, $\int_{4\pi} \int_0^\infty dE' d\Omega' \{ v' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega)n(r, E', \Omega', t) \}$ terimi ise nötronların saçılmasını, Son olarak $S(r, E, \Omega, t)$ terimi ise nötron kaynaklarını göstermektedir. r ise uzaysal konum vektörünü göstermektedir ve x, y, z konum vektörlerine bağlıdır. Taşınım denklemindeki kaynak terimi dışarıdan herhangi bir kaynak olabileceği gibi fisyon sonucu açığa çıkan nötronlarda olabilir. O halde kaynak terimi denklem 4.3'teki gibi yazılabilir.

$$S(r, E, \Omega, t) = v \Sigma_f(r, E) \frac{v \cdot n(r, \Omega, E, t)}{4\pi} + S_{dış}(r, E, \Omega, t) \quad (4.3)$$

Burada $v \Sigma_f(r, E) \frac{v \cdot n(r, \Omega, E, t)}{4\pi}$ terimi fisyon terimidir ve $S_{dış}(r, E, \Omega, t)$ terimi ise dış nötron kaynaklarını göstermektedir. Denklem daha alışılmış formda yazıldığında denklem 4.4'teki skaler akı terimi gelmektedir akabinde de genel denklem olarak denklem 4.5'i elde edilir.

$$\Phi(r, E, \Omega, t) = v \cdot n(r, E, \Omega, t) \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \Phi + \Sigma_t(r, E)\Phi(r, E, \Omega, t) = \int_{4\pi} \int_0^\infty dE' d\Omega' \{ \Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega)\Phi(r, E', \Omega', t) \} + S(r, E, \Omega, t) \quad (4.5)$$

Burada $\Omega \cdot \nabla \Phi$ terimindeki yönlü türev x,y,z koordinatlarına bağlıdır. Burada nötron akısının sadece x yönünde olduğunu varsayarsak açısal bağımlılık birim vektörler şeklinde denklem 4.6'daki gibi yazılabilir.

$$\Omega \cdot \nabla \Phi(x) = \Omega_x \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} + \Omega_y \frac{\partial \Phi(x)}{\partial y} + \Omega_z \frac{\partial \Phi(x)}{\partial z} \quad (4.6)$$

Burada nötron akısının yönü (Ω) hem polar açıya (θ) hem de azimut açısına (φ) bağlı olacaktır. Dolayısıyla aşağıdaki denklem 4.7 yazılabilir.

$$\Omega_x = \sin\theta \cos\varphi, \Omega_y = \sin\theta \sin\varphi, \Omega_z = \cos\theta \quad (4.7)$$

Daha sonra koordinat sistemi levha yüzeyine dik olacak şekilde seçildiğinde aşağıdaki denklem 4.8 elde edilir.

$$\Omega \cdot \nabla \Phi(x) = \mu \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (4.8)$$

μ İfadesi $\cos \theta$ değerine eşittir. Skaler akı yerine açısal akı ifadesi yazıldığında en son olarak transport denklemi denklem 4.9'daki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \psi(x, E, \mu, t)}{\partial t} + \mu \frac{\partial \psi(x, E, \mu, t)}{\partial x} + \Sigma_t(r, E) \psi(x, E, \mu, t) = \int_{-1}^{+1} \int_0^{\infty} dE' d\mu' \{ \Sigma_s(E' \rightarrow E, \mu' \rightarrow \mu) \psi(x, E', \mu', t) \} + S(x, E, \mu, t) \quad (4.9)$$

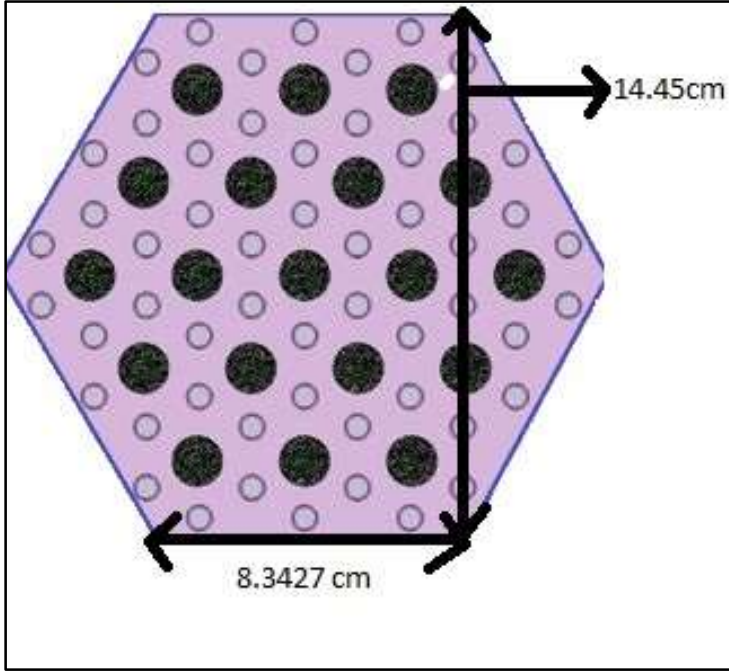
Bu denklem sınır koşulları ve sistem özelliklerine göre esas alınan kabullerle sınırlandırılıp çözülebilmektedir. Denklemi çözerken iki farklı yöntem başvurulabilir. Bunlardan birisi denklemi Legendre Polinomlarıyla seriler halinde açılarak çözülmesi diğeryse sonlu fark yöntemiyle μ terimini Gauss Karelemeleriyle ayırmaktır. Legendre Polinomlarıyla seriler halinde açılan yöntem P_N yaklaşımı denir. μ Terimini Gauss Karelemeleriyle ayırarak sonlu fark yöntemi kullanılan metoda ise S_N yaklaşımı denir [42].

4.4. Tüm Kor Geometri Modelleme

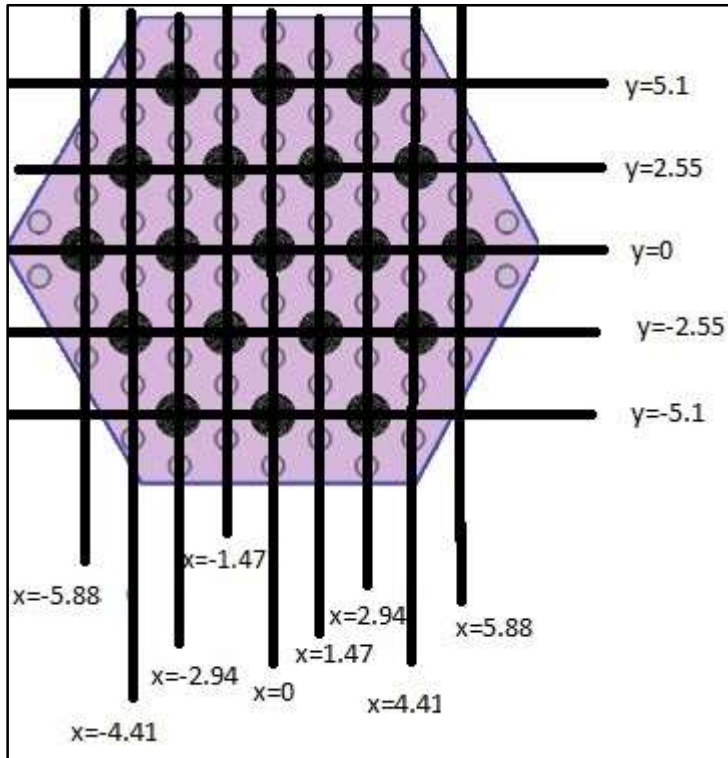
Reaktörün tüm kor geometrisi oluşturulurken öncelikle yakıt demeti incelenmiştir. Yakıt demetinde bulunan yakıt kanallarının perde mesafesi bulunmuş buna bağlı olarak yakıt demeti oluşturulmuştur. Daha sonra yakıt demetleri reaktör koruna uygun bir biçimde yerleştirilmiştir. Burada Serpent kodunda tercih edilen yöntemden dolayı bazı işlemler yapılmıştır. Örneğin yakıt kanallarının merkezleri tek tek bulunmuş ve her bir yakıt kanalına özgü çok katmanlı yakıt küreciği dağılım dosyası oluşturulmuştur. Yakıt küreciklerinin dağılım algoritması OpenMC koduyla yapılmıştır. OpenMC kodunun tercih edilme sebebi Serpent kodunda paketleme oranı %34-35 dolaylarından fazla olduğunda iyi bir şekilde dağıtamamasından kaynaklıdır. Bu durum Gözenekliliğe (Porosity) etki ettiği için önem arz etmektedir. Devamında bulunan yakıt kanalları merkezlerine göre MATLAB koduyla öteleme işlemine tabi tutulmuştur.

4.4.5. Yakıt demeti boyutlarının ve yakıt kanallarının konumlarının belirlenmesi

Reaktör geometrisinde kullanılan yakıt demetinde 19 tane yakıt kanalı, 54 tane soğutucu helyum kanalı ve yakıt demeti boyutları Resim 4.4'te verilmiştir. Yakıt demetinin bir kenar uzunluğu 8,3427 cm'dir. İki paralel kenar arasındaki dik mesafe 14,45 cm'dir. Yakıt kanallarının merkezleri bulunurken ortadaki yakıt kanalı orijin kabul edilip buna bağlı belirlenen aralıklarla diğer yakıt kanallarının merkezleri bulunmuştur. Yapılan ayrıştırma ve belirleme yöntemi ile belirlenen yakıt kanallarının konumları Resim 4.5'te verilmiştir. Resim 4.4'te verilen paralel iki kenar arasındaki mesafe ilgili aralık sayısına bölüdüğü zaman perde mesafesi 0,9633 olarak bulunmuştur. Bulunan perde mesafesi, Resim 4.5'teki konum vektörleri bulunurken kullanılmıştır. Bu veriler geometri oluşturmak için Serpent kodu girdi olarak kullanılmaktadır.



Resim 4.4. Yakıt demeti boyutları



Resim 4.5. Yakıt kanallarının konumları

4.4.6. Yakıt kanallarındaki çok katmanlı yakıt küreciklerinin sayısının bulunması ve rastgele konumlarının belirlenmesi için kullanılan yöntem

Yakıt kanallarında bulunan toplam yakıt küreciği sayısı verilen paketleme oranına (P.O.) göre bulunmaktadır. İlgili formül aşağıda verilmiştir.

$$P.O. = \frac{V_{Yakıt\ Kanalı}}{V_{Kürecik} * N_{ToplamKürecik}} = \frac{\pi R_{yakıt\ kanalı}^2 L_{yakıt\ kanalı}}{\frac{4}{3} \pi R_{Kürecik}^3 * N_{ToplamKürecik}} =$$

$$\frac{\pi * 0.7^2 * 390}{\frac{4}{3} \pi * 0.0428^3 * N_{ToplamKürecik}} = \%40 \quad (4.10)$$

Denklem 4.10 kullanılarak bir yakıt kanalında bulunan toplam yakıt küreciği sayısına ulaşılabilmektedir. Yakıt küreciği tipi UCO yakıtı ve (Th, Pu)O₂ yakıtı için farklıdır. Dolayısıyla kullanılan yakıt küreciği tipine göre denklem 4.10 tekrar çözülmüştür. Yukarıdaki örnek UCO tipi yakıt için yapılmıştır. Yani HOLOS reaktörünün orijinal tasarımındaki gibidir. Daha sonra yakıt küreciklerinin yakıt kanalı boyunca dağıtılması için OpenMC kodu yazılmıştır ve her birinin uzaysal konumu bulunmuştur. Ek-1’de, UCO yakıtı ve UCO bileşiğinin kullanıldığı yakıt küreciği için oluşturulan OpenMC kodu yazılımı verilmiştir. Bir sonraki basamakta ise her yakıt kanalına ilgili küreciklerin ötelenmesi için MATLAB kodu yazılmıştır. Son olarak MATLAB kodundan alınan çıktı dosyaları Serpent kodunda girdi olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, özellikle Serpent kodundaki ilgili dağılım algoritması kullanılmamıştır. Bunun sebebi çok katmanlı yakıt küreciklerinin kullanıldığı reaktörlerde gözeneklilik denen olayın önem arz etmesindedir. Holos reaktörünün ilgili çalışmasında OpenMC kullanıldığından dolayı bu çalışmada da aynı kod tercih edilmiştir. Ayrıca Serpent paketleme oranı görece büyük durumlarda “Grow and Shake” algoritmasına ihtiyaç duymaktadır [43]. Gözeneklilik kavramına boşluk oranı (void fraction) da denilmektedir. Tüm hacimdeki boşlukların bir ölçüsüdür.

5. NÖTRONİK ANALİZ SONUÇLARI

Bu çalışmada 22 MW_{th} yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı Holos taşınabilir mikro reaktörü için farklı yakıt kanalı ve farklı yakıtlar için nötronik analiz yapılmıştır. İlk olarak literatürde kullanılan UCO yakıt için daha sonra farklı hacimsel oranlarda ve farklı Pu sınıfı (Pu,Th)O₂ yakıt için analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda en son zamandaki yanma değerine, yakıt değişimi olmaksızın reaktörün ne kadar süreyle kritik üstü olduğuna ve fisil yakıtların kütleli değişimlerine bakılmıştır. Literatüre bakıldığında UCO yakıtı kullanan 15 tonluk kalbe sahip Holos reaktörü 3,5 yıl yakıt değişimi olmaksızın çalışabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan farklı sınıflardaki (Pu,Th)O₂ yakıtı, bu süreyi aynı ağırlığa sahip reaktör kalbi için değiştirmektedir.

Öncelikle farklı hacimsel oranlarda reaktör sınıfı Pu ve Th karışım yakıtı kullanılmış ve son yanma değeri reaktörün kaç yıldır yakıt yüklemenden tam güçte çalıştığı kontrol edilmiştir. Çizelge 5.1'de verildiği gibi, yakıt olarak %10 Th ve reaktör sınıfı %90 Pu kullanıldığında, reaktör yaklaşık 9 yıl tam güçte çalışabilir ve bitiş zamanı yanma değeri yaklaşık 36 GWd/ton'dur. Ayrıca Pu ve U atomlarının izotop değişimleri ilgili başlıklar altında verilmiştir. Kritiklik analizi için kritiklik-zaman grafiği de ilgili başlıklar altında verilmiştir. Hacim olarak reaktör sınıfı Pu yakıtın oranı azalmaya başladığında, reaktör için pek iyi sonuçlar alınmamaktadır. Bu durum Çizelge 5.1'de verilmiştir. Reaktör sınıfı Pu kullanıldığında kullanılan Th elementinin tükenme miktarında çok büyük bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir.

İkinci olarak, farklı hacimsel oranlarda silah sınıfı Pu ve Th karışımı yakıt kullanılmış ve reaktörün kaç yıldır yakıt yüklemenden tam güçte çalıştığına ve son yanma değerine bakılmıştır. Çizelge 5.2'de verildiği gibi, yakıt olarak %10 Th ve silah sınıfı %90 Pu kullanıldığında, reaktör yaklaşık 32 yıl boyunca tam güçte çalışabilir ve bitiş zamanı yanma değeri yaklaşık 211 GWd/ton'dur. Ayrıca Pu ve U atomlarının izotop değişimleri ilgili başlıklar altında verilmiştir. Kritiklik analizi için kritiklik-zaman grafiği de ilgili başlıklar altında verilmiştir. Ayrıca kullanılan toryumun yaklaşık yüzde 11'inin tükendiği gözlemlendi. Bu kadar büyük miktarda bölünebilir izotopun reaktörde kullanılması nükleer emniyet ve işletme güvenliği açısından uygun değildir. Bununla birlikte, silah sınıfı Pu oranı yakıt hacminde düştüğünde, Th kullanılabilirliği açısından umut vericidir. Yakıt olarak %50

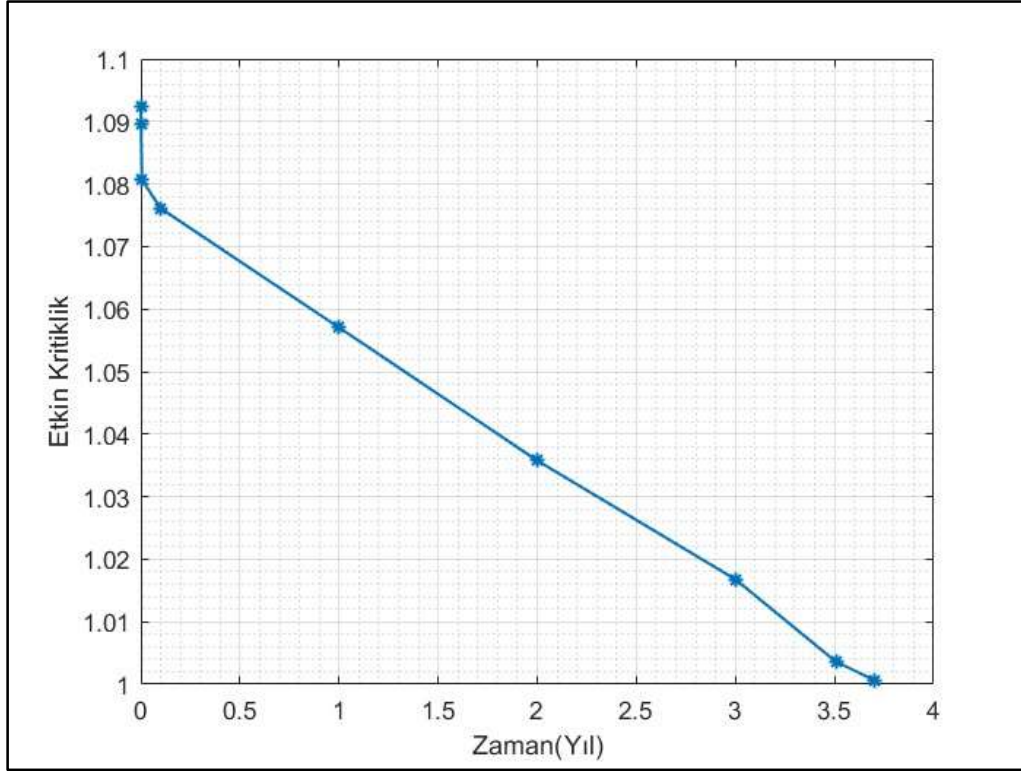
Th ve %50 Silah Sınıfı Pu kullanıldığında efektif tam güç yılının yaklaşık 11 yıl olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan toryumun yaklaşık yüzde 3'ünün tükendiği gözlemlenmiştir. Ardından, reaktör kritik olduğunda yaklaşık 67 GWd/tonluk bir yanma değeri gözlemlenir. Yakıt olarak %50 Th ve %50 silah sınıfı Pu kullanıldığında Pu ve U atomlarının izotop değişimleri ilgili başlıklar altında verilmiştir.

Son olarak, yakıt olarak %10 Th ve silah sınıfı %90 Pu kullanıldığında, bir güç modülü için kritiklik analizi yapılmış ve tek bir güç modülünün kritik altı olduğu gözlemlenmiştir. Bu, reaktörün yapısında herhangi bir çelişki olmadığını gösterdi.

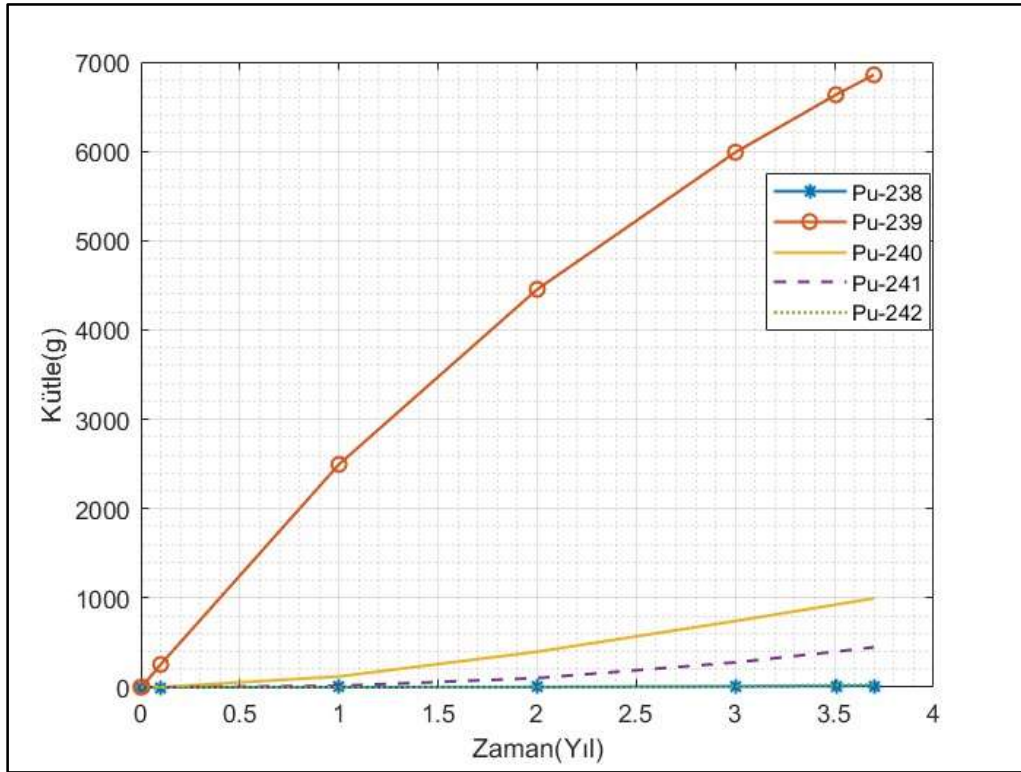
Farklı sınıflardaki Pu ve Th karışımli yakıtlar, farklı oranlarda kullanıldığı durumlardaki sonuçlar aşağıda detaylı bir şekilde başlıklar halinde verilmiştir.

5.1. UCO Yakıt Kullanan HOLOS Reaktörü Nötronik Analiz Sonuçları

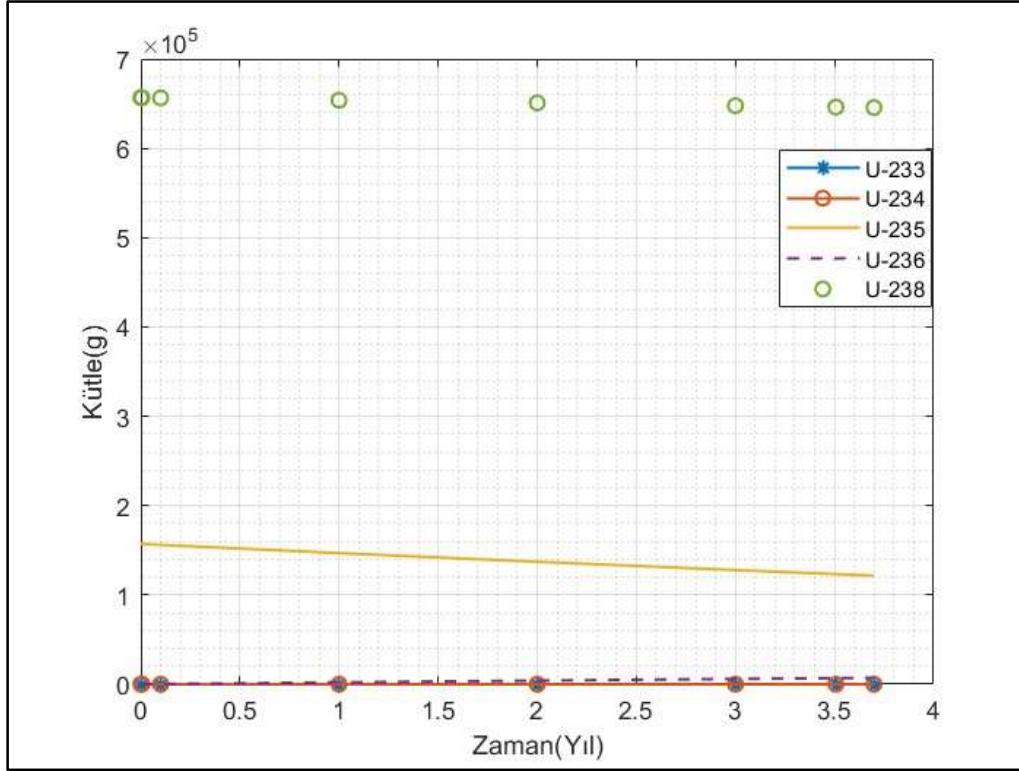
Holos reaktöründe orijinal yakıt olarak UCO nükleer yakıtı kullanılmaktadır. Yakıttaki uranyum %19,95 zenginliğe sahiptir. 15 ton kütleyle sahip Holos reaktörü yaklaşık 3,5 yıl çalıştığı literatürde verilmiştir [23]. Yapılan bu çalışmada, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi reaktör kritiklik değeri ~1,10 olarak elde edilmiştir ve yaklaşık reaktörün çalışma süresi 3,5 yıla karşılık gelmiştir. Reaktörde oluşan Pu elementlerinin zamana bağlı kütleli değişimleri (gr) Şekil 5.2'de verilmiştir. Pu-238 ve Pu-242 izotop değişimleri zamana bağlı olarak stabil konumda ilerlerken, Pu-239, Pu-240 ve Pu-241 fisil yakıtları ise zamana bağlı olarak artış göstermektedir. Reaktördeki U elementlerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 5.3'te verilmiştir. U-238 ve U-235 izotoplarında azalma eğilimi görülmektedir. Şekil 5.4'te gösterildiği gibi reaktör işletim sonunda yanma değeri (Discharge Burnup) 36,4993 GWd/ton elde edilmiştir.



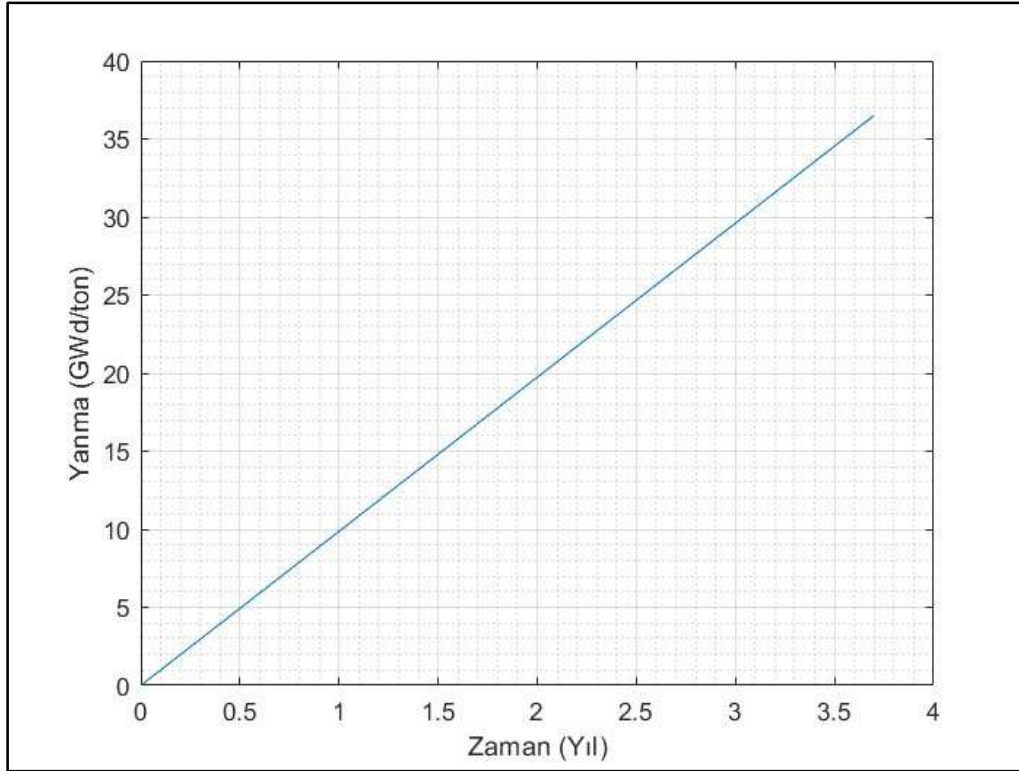
Şekil 5.1. UCO yakıtı için zamana bağlı kritiklik değişimi



Şekil 5.2. UCO yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütleli değişimi



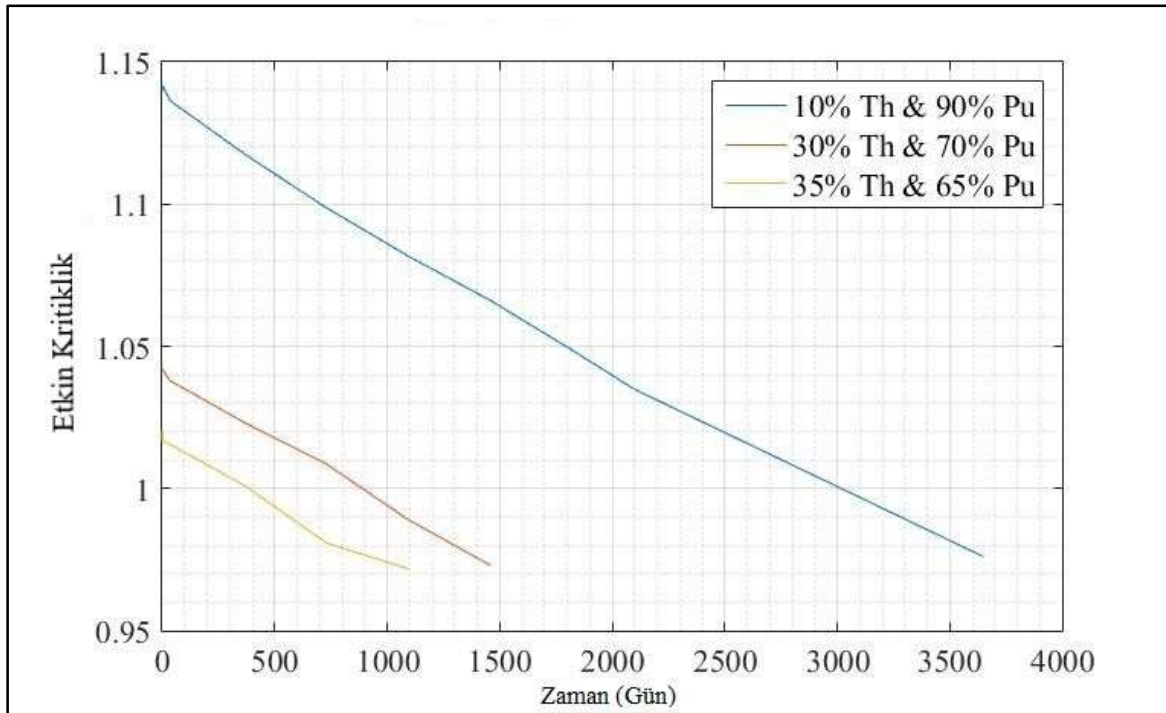
Şekil 5.3. UCO yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütsel değışimi



Şekil 5.4. UCO yakıtı için zamana bağlı yanma değeri

5.2. Reaktör Sınıfı (Pu, Th)O₂ Yakıt Kullanan HOLOS Reaktörü Nötronik Analiz Sonuçları

Farklı hacimsel oranlarda reaktör sınıfı Pu ve Th karışım yakıtlar kullanılmış ve reaktörün kaç yıl yakıt yüklemenden tam güçte çalıştığı ve son yanma değeri incelenmiştir. Çizelge 5.1'de verildiği gibi, yakıt olarak (%10 Th, %90 RS-Pu)O₂ kullanıldığında, reaktör yaklaşık 9 yıl boyunca tam güçte çalışabilmektedir ve reaktör çalışma zamanı sonu yanma değeri yaklaşık 36 GWd/ton olarak elde edilmiştir. Çekirdek ağırlığı 15 ton olan reaktör UCO yakıt kullandığında 3,5 yıl tam güçte çalışabilen reaktör, bu çalışmada yaklaşık olarak aynı koşullarda 9 yıl çalışabilmektedir. Ayrıca, Çizelge 5.1 incelendiğinde hacimsel olarak reaktör sınıfı Pu yakıtın oranı azalması ile, reaktör çalışma zamanı ve yanma değerleri azalma eğilimi göstermektedir. Serpent kodu temeli Monte Carlo algoritmasına dayanan bir kod olduğu için çizelge 5.1'de verilen değerler yaklaşık sonuçlardır.



Şekil 5.5. (Th+RS-Pu)O₂ yakıtının farklı oranlarda zamana bağlı kritiklik değişimi

Yakıt olarak reaktör sınıfı Pu kullanıldığında kullanılan Th elementinin tükenme miktarında çok büyük bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Holos reaktöründe farklı oranlarda kullanılan (RS-Pu,Th)O₂ yakıtları için kritiklik sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5 incelendiğinde, sırasıyla % 35 Th- %65 Pu; % 30 Th- %70 Pu ve % 10 Th- %90 Pu için kritiklik değerleri yaklaşık 1,02; 1,04 ve 1,14 olarak elde edilmiştir. Toryum

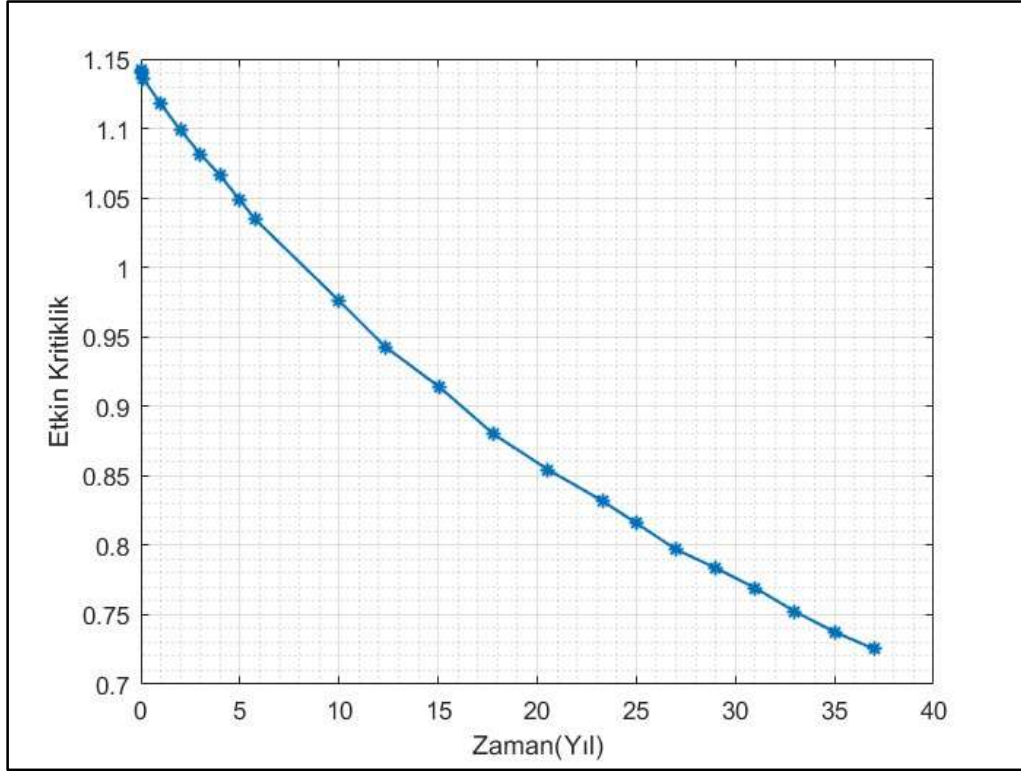
yakıtının artışı ile, hacimsel olarak kaliteli fisil yakıt Pu izotoplarının azalmasından dolayı kritiklik değeri azalma göstermiştir.

Çizelge 5.1. Farklı hacimlerdeki (Th+RS-Pu)O₂ yakıtı için nötronik analiz sonuçları

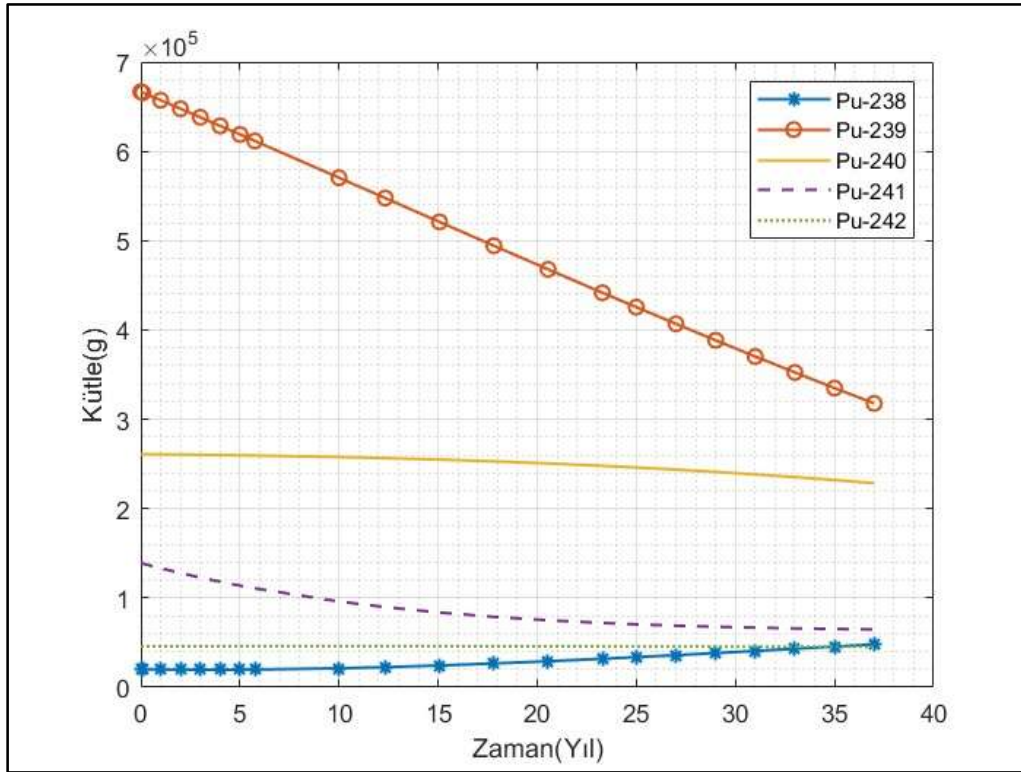
Hacimsel Yakıt Oranı	Tam Güç Çalışma Süresi (Yıl)	Son Gün Yanma Değeri (GWd/ton)
(%10 Th,%90 Pu)O ₂	9	36,8333
(%30 Th,%70 Pu)O ₂	2.5	12.8136
(%35 Th,%65 Pu)O ₂	1	6.4080

5.2.1. (% 10 Th, %90 RS-Pu)O₂ yakıtı

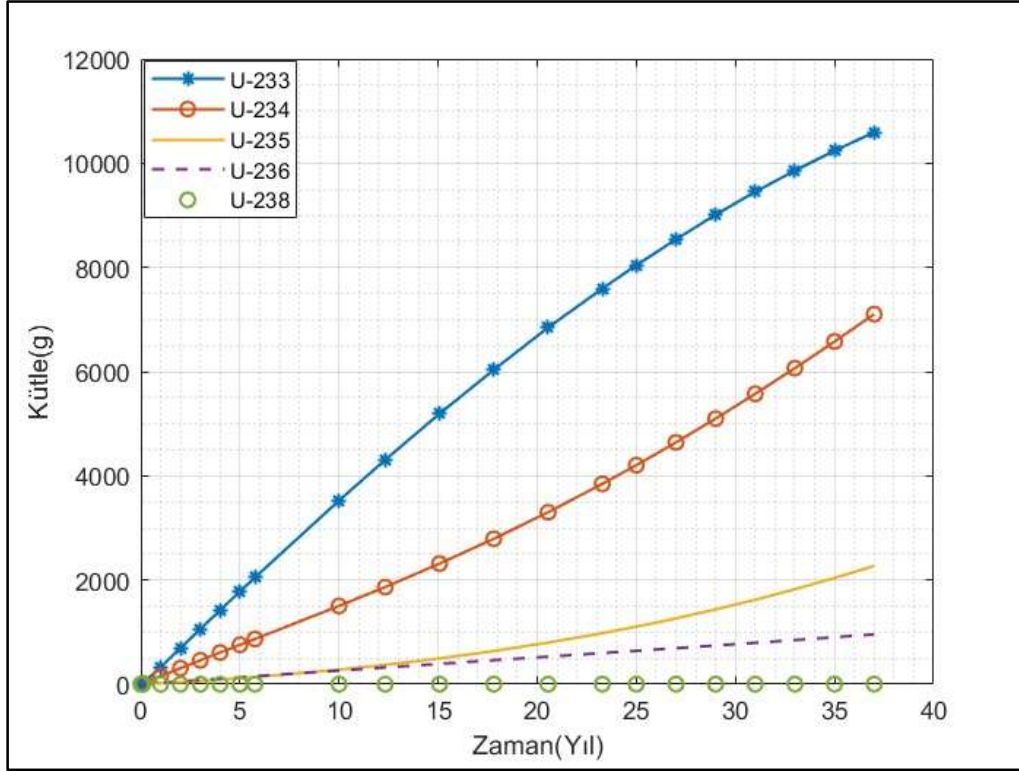
Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.6'da verilmiştir. Çekirdek ağırlığı 15 ton olan reaktör UCO yakıt kullandığında 3,5 yıl tam güçte çalışabilmekteyken, (%10 Th, %90 RS-Pu)O₂ karışimli yakıt kullanıldığında yaklaşık olarak aynı ağırlıkta 9 yıl çalışabilmektedir. (%10 Th, %90 RS-Pu)O₂ karışimli yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 9 yıl yakıt yükmeden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 36 GWd/ton'dur. (%10 Th, %90 RS-Pu)O₂ yakıt kullanıldığında elde edilen izotop değişimleri şekil 5.7 ve şekil 5.8'de gösterilmiştir. Şekil 5.7 incelendiğinde Pu-238 ve Pu-242 izotoplarında kütleli olarak çok az bir değişimle yükseliş görülmüştür. Ek olarak, Pu-239 izotopu $6,6 \times 10^5$ gr ile başladığı ve zamana bağlı olarak lineer hızlı bir şekilde kütleli olarak azaldığı görülmektedir. Pu-240 ve Pu-241 izotopu sırasıyla başlangıçta $2,6 \times 10^5$ gr ve $1,4 \times 10^5$ gr iken yaklaşık referans kritiklik değerinde $2,5 \times 10^5$ gr ve $1,0 \times 10^5$ gr değerlerine ulaşarak bir azalma göstermiştir. Şekil 5.7 incelendiğinde ise U-233 izotopu referans kritiklik değerinde 3500 gr kadar yükselme sergilemiş ve kaliteli fisil yakıt üretimi sağlanmıştır. U-234, U-235 ve U-236 izotoplarında da zamana bağlı artış gözlemlenmiştir.



Şekil 5.6. (%10 Th+ %90 RS-Pu) O_2 Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



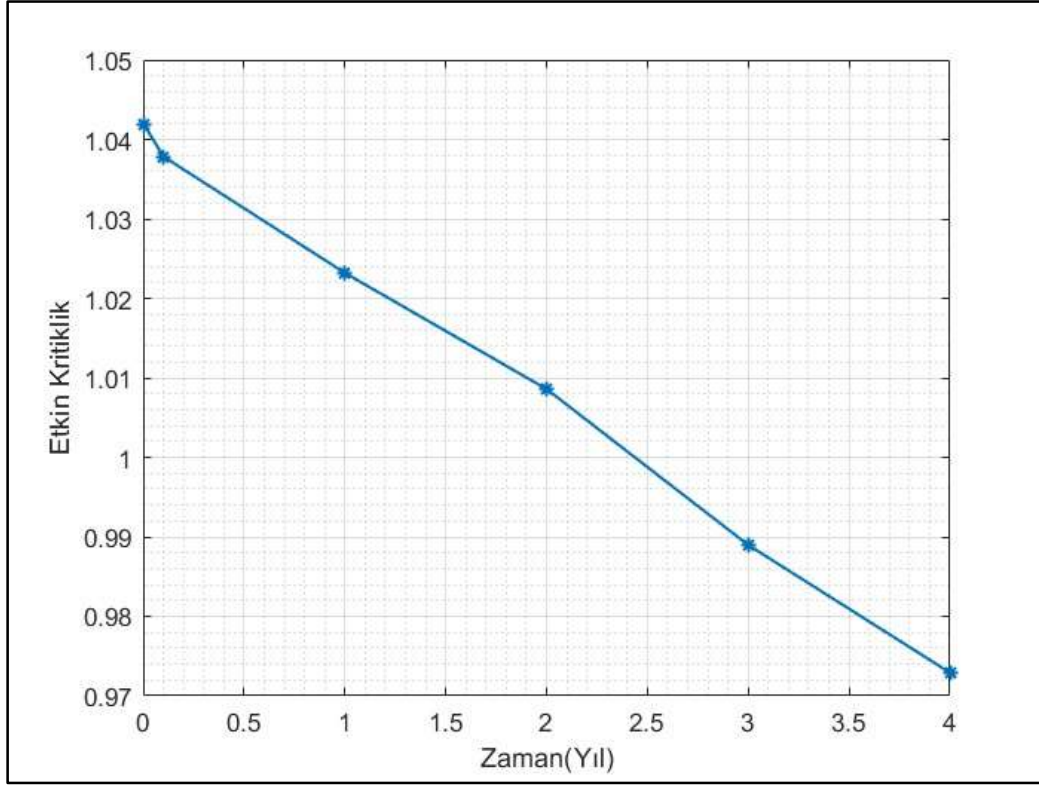
Şekil 5.7. (%10 Th+ %90 RS-Pu) O_2 Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütesel değişimi



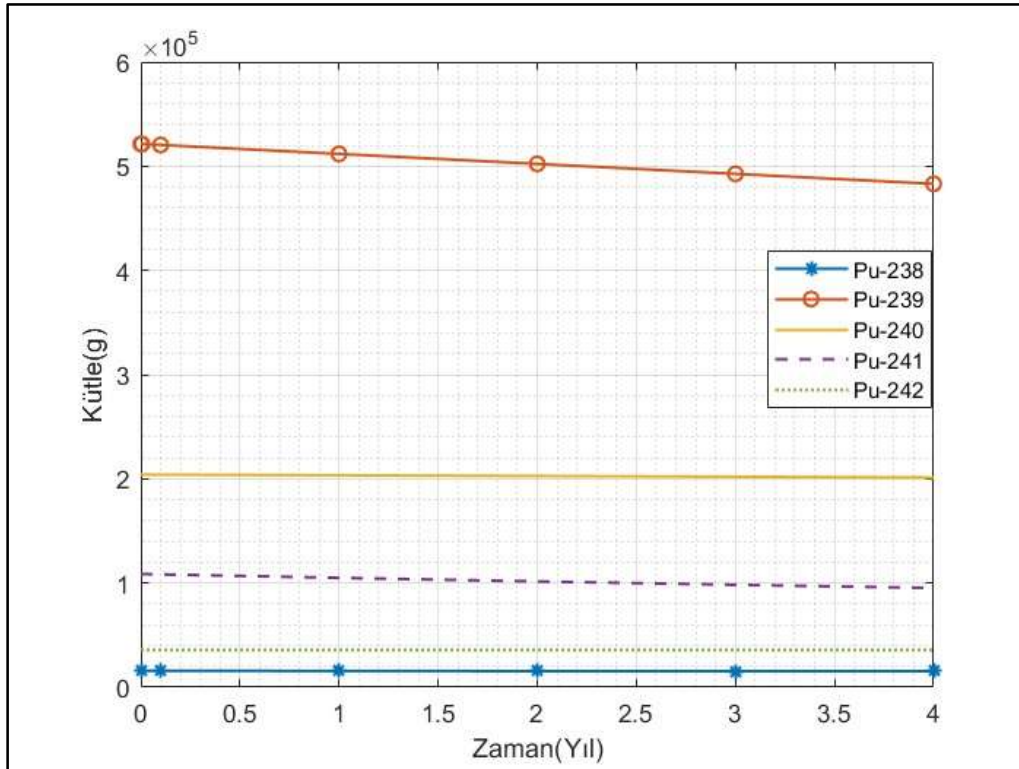
Şekil 5.8. (%10 Th+ %90 RS-Pu) O_2 Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütle değişimi

5.2.2. (% 30 Th, RS %70 Pu) O_2 yakıtı

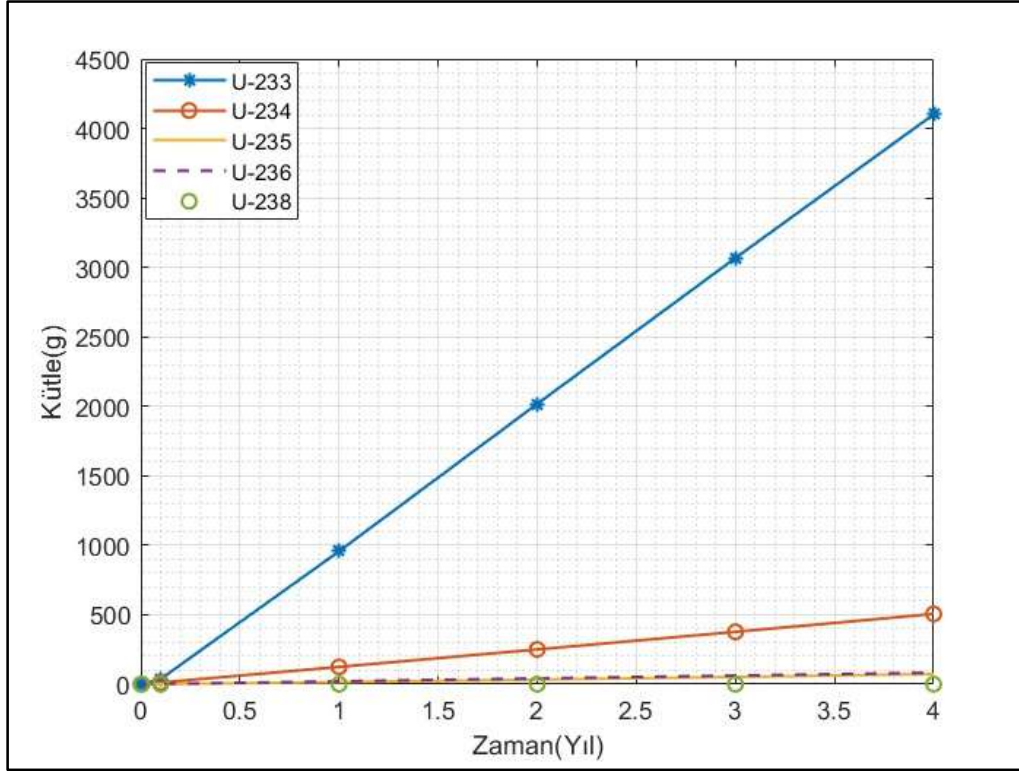
Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.9'da verilmiştir. (%30 Th, %70 RS-Pu) O_2 karışımli yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 2.5 yıl yakıt yüklemeden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 13 GWd/ton'dur. Şekil 5.10 ve şekil 5.11'de gösterildiği gibi, (%30 Th, %70 RS-Pu) O_2 yakıt kullanıldığında elde edilen fisil yakıt izotop değişimleri verilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde Pu-238 ve Pu-242 izotoplarında kütle olarak çok az bir değişim gözlemlenmiştir. Öte yandan, Pu-239 izotopu $5,1 \times 10^5$ gr ile başladığı ve zamana bağlı olarak lineer bir şekilde kütle olarak azaldığı referans kritiklik değerine $5,0 \times 10^5$ grama kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Pu-240 ve Pu-241 izotopu ise çok az bir değişimle sabit bir durum sergilemiştir. Şekil 5.11 incelendiğinde ise U-233 izotopu referans kritiklik değerinde 4000 gr kadar yükselme sergilemiş ve kaliteli fisil yakıt üretimine katkı sağlanmıştır. U-234 izotopu ise zamana bağlı çok az bir artış gözlemlenmiştir.



Şekil 5.9. (%30 Th+ %70 RS-Pu) O_2 Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



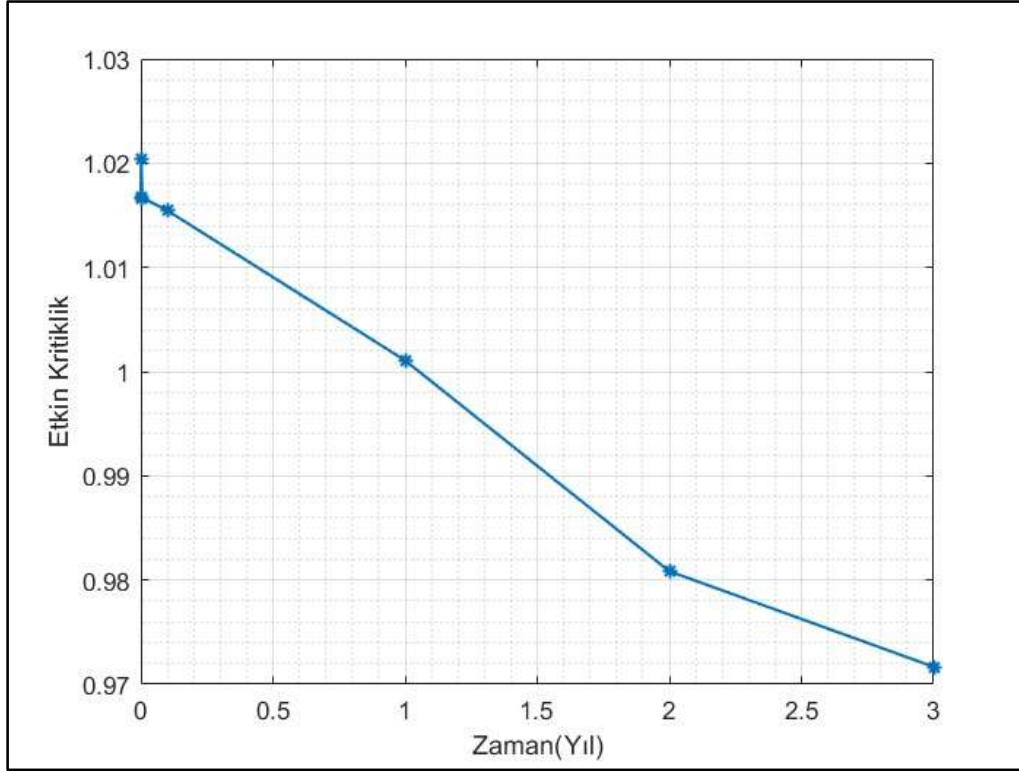
Şekil 5.10. (%30 Th+ %70 RS-Pu) O_2 Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütleli değişimi



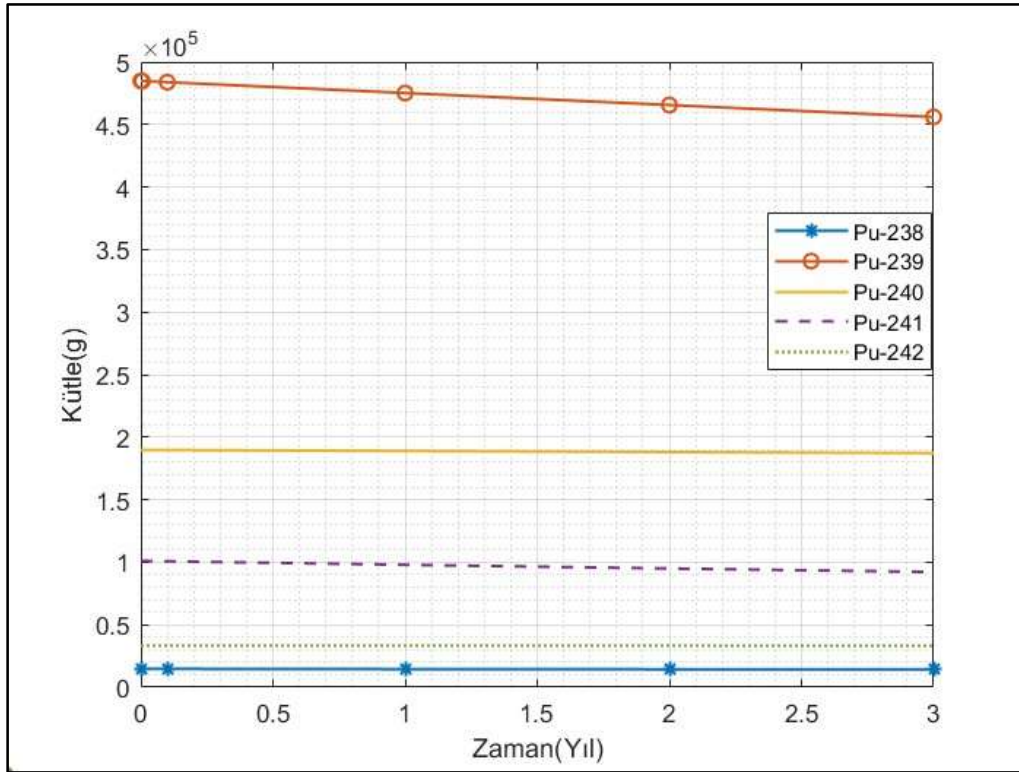
Şekil 5.11. (%30 Th+ %70 RS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütleli değişimi

5.2.3. (% 35 Th, %65 RS-Pu)O₂ yakıtı

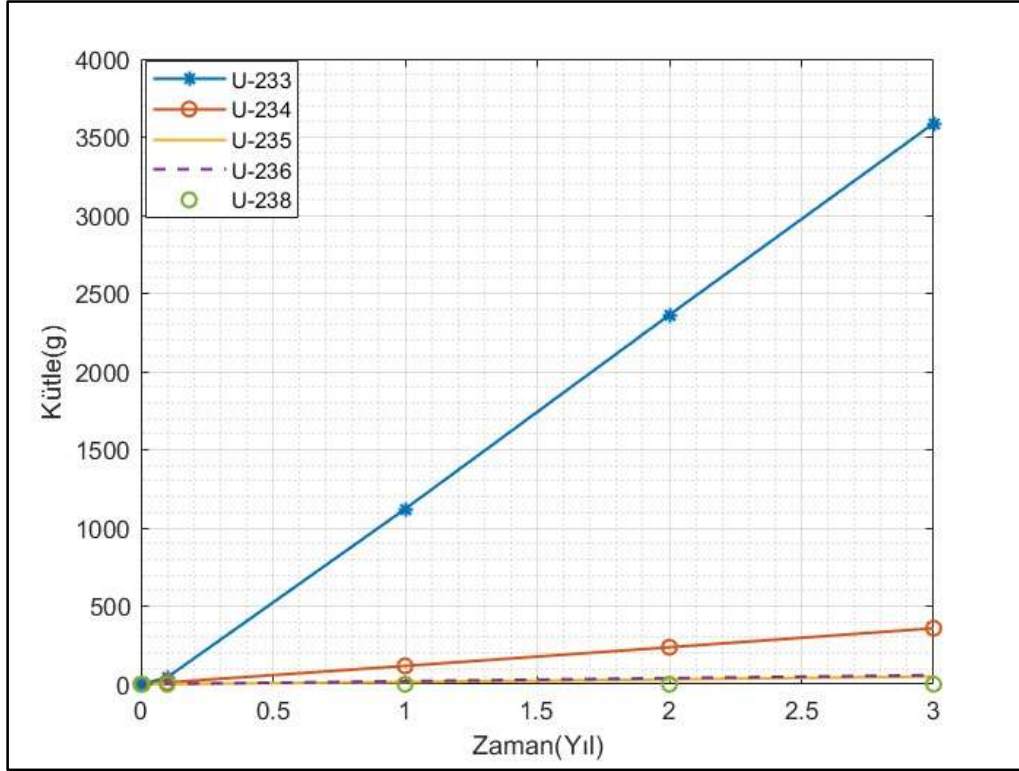
Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.12’de verilmiştir. (% 35 Th, %65 RS-Pu)O₂ karışimli yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 1 yıl yakıt yüklemeyen tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 6 GWd/ton’dur. (%35 Th, %65 RS-Pu)O₂ yakıt kullanıldığında elde edilen fisil yakıt izotop değişimleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te gösterilmiştir. Şekil 5.13 incelendiğinde Pu-238 ve Pu-242 izotoplarında kütleli olarak çok az sabit bir değişim göstermiştir. Öte yandan, Pu-239 izotopu $4,8 \times 10^5$ gr ile başladığı ve zamana bağlı olarak lineer bir şekilde kütleli olarak azaldığı referans kritiklik değerine $4,6 \times 10^5$ grama kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Pu-240 ve Pu-241 izotopu ise çok az bir değişimle sabit bir durum sergilemiştir. Şekil 5.14 incelendiğinde ise U-233 izotopu referans kritiklik değerinde 1100 gr kadar yükselme sergilemiş ve kaliteli fisil yakıt üretimine katkı sağlar iken, zamana bağlı olarak U-234 izotopu ise çok az bir artış göstermiştir.



Şekil 5.12. (%35 Th+ %65 RS-Pu) O_2 Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



Şekil 5.13. (%35 Th+ %65 RS-Pu) O_2 Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütesel değişimi

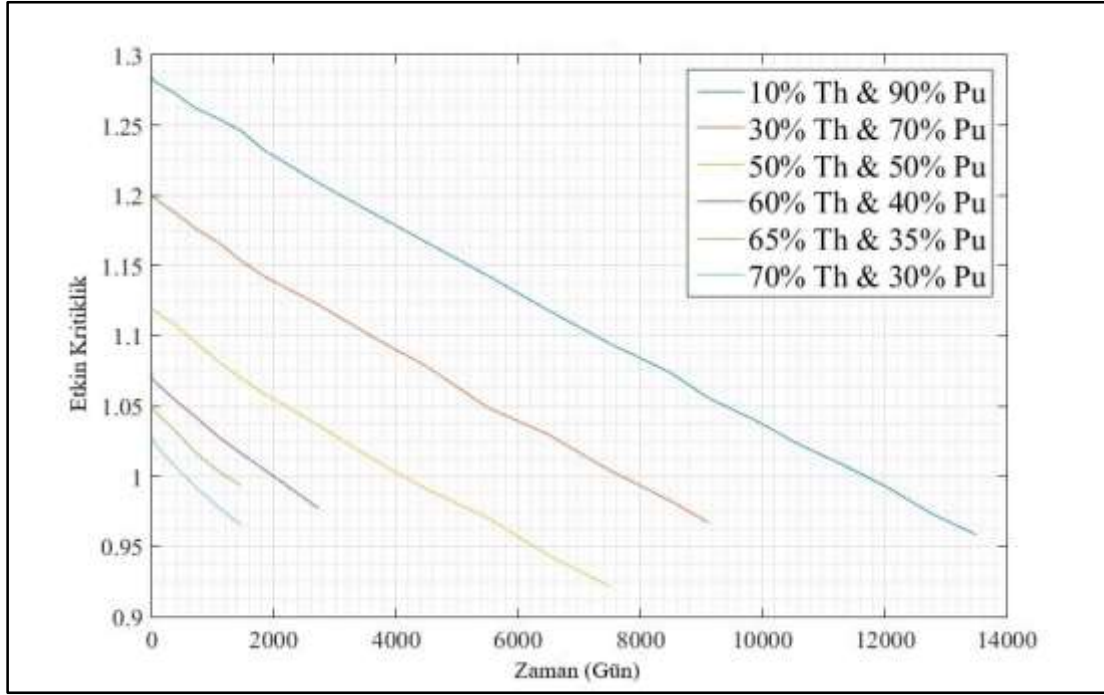


Şekil 5.14. (%35 Th+ %65 RS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütleli değişimi

5.3. Silah Sınıfı(SS) (Pu,Th)O₂ Yakıt Kullanan HOLOS Reaktörü Nötronik Analiz Sonuçları

Şekil 5.15'te gösterildiği farklı hacimsel oranlarda silah sınıfı Pu ve Th karışımı yakıtlar kullanılmış, reaktörün kritiklik ve yanma değerleri incelenmiştir. Şekil 5.15'te gösterilen kritiklik değerleri incelendiğinde, (%10 Th+ %90 SS-Pu)O₂ kullanıldığında kritiklik değeri 1,28 elde edilirken, (%70 Th+ %30 SS-Pu)O₂ kullanıldığında ise bu değer 1,03 olarak elde edilmiştir. Çizelge 5.2'de de gösterildiği gibi (%10 Th+ %90 SS-Pu)O₂ ve (%70 Th+ %30 SS-Pu)O₂ yakıtları için reaktör işletim zamanı sırasıyla 32 ve 1,5 yıl iken ve yanma değerleri 211,313 GWd/ton, 9,500 GWd/ton olarak elde edilmiştir. Çizelge 5.2'de araştırılan (Th-Pu)O₂ parametreleri için yanma ve reaktör işletim zaman değişimleri verilmiştir. Bunlardan, yakıt olarak (50% Th,50% SS-Pu)O₂ incelendiğinde, reaktör yaklaşık 11 yıl boyunca tam güçte çalışabilmekte ve bitiş zamanı yanma değeri yaklaşık 67,5 GWd/ton elde edilmektedir. 15 Ton olan Holos reaktöründe UCO yakıt kullanıldığında, 3,5 yıl tam güçte çalışabildiği referanslarda belirtilmişken [23,24], yakıt olarak (50% Th,50% SS-Pu)O₂ kullanıldığında reaktör işletim zamanı aynı koşullarda yaklaşık olarak 11 yıl olarak bulunmuştur. Hacim olarak silah sınıfı Pu yakıtın yüksek oranlarda kullanılması nükleer emniyet ve güvenlik

açısından sorunlar yaratabileceğinden %50 oranında Pu ve Th tercih edilmiştir. Ayrıca , çizelge 5.2'de toryum tükenme miktarları da verilmiştir. Silah Sınıfı Pu kullanıldığında kullanılan Th elementinin tükenme miktarında reaktör sınıfı Pu yakıtı göre arttığı gözlemlenmiştir. Serpent kodu temeli Monte Carlo algoritmasına dayanan atomların tesir kesitleri, etkileşme oranları gibi olasılık temelleri olan bir kod olduğu için Çizelge 5.2.'de verilen değerler yaklaşık sonuçlardır.



Şekil 5.15. (Th+SS-Pu) O_2 Yakıtının farklı oranlarda zamana bağlı kritiklik değişimi

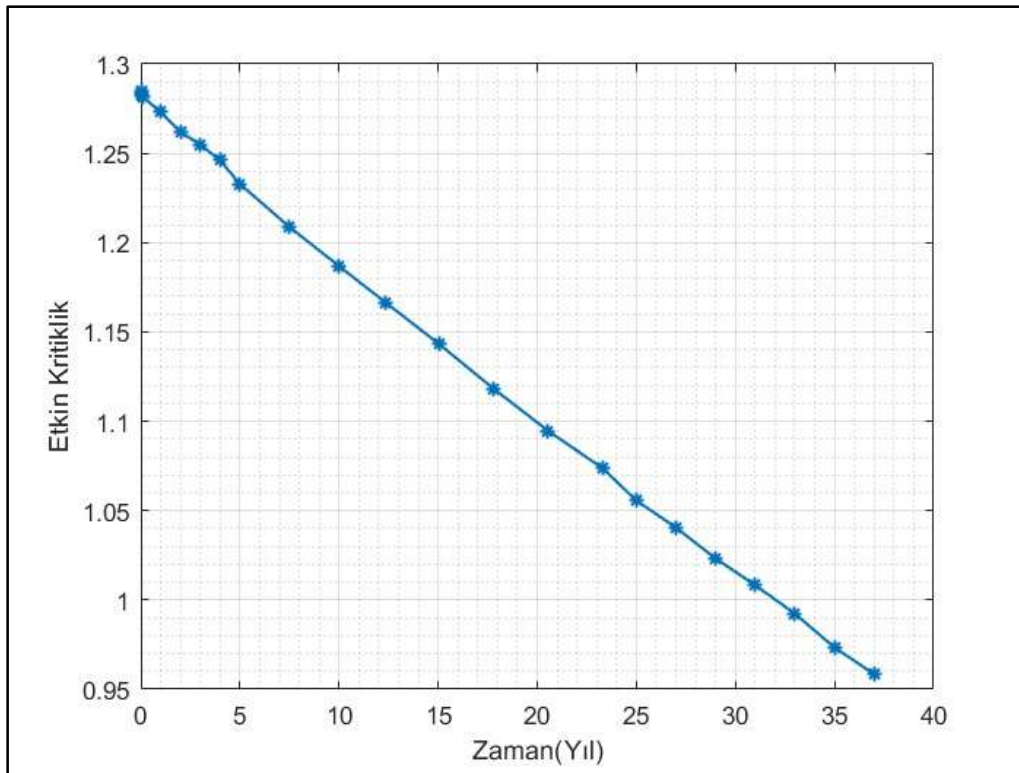
Çizelge 5.2. Farklı hacimlerdeki (Th+SS-Pu)O₂ yakıtı için nötronik analiz sonuçları

Hacimsel Yakıt Oranı	Tam Güç Çalışma Süresi (Yıl)	Son Gün Yanma Değeri (GWd/ton)	Toryum Tükenmesi (%)
(%10 Th,%90 Pu)O ₂	32	211,313	10,96
(%30 Th,%70 Pu)O ₂	21	131,670	6,3403
(%50 Th,%50 Pu)O ₂	11	67,500	3,1516
(%60 Th,%40 Pu)O ₂	5,5	32,074	2,0182
(%65 Th,%35 Pu)O ₂	3,5	25,660	1,0775
(%70 Th,%30 Pu)O ₂	1,5	9,500	0,5451

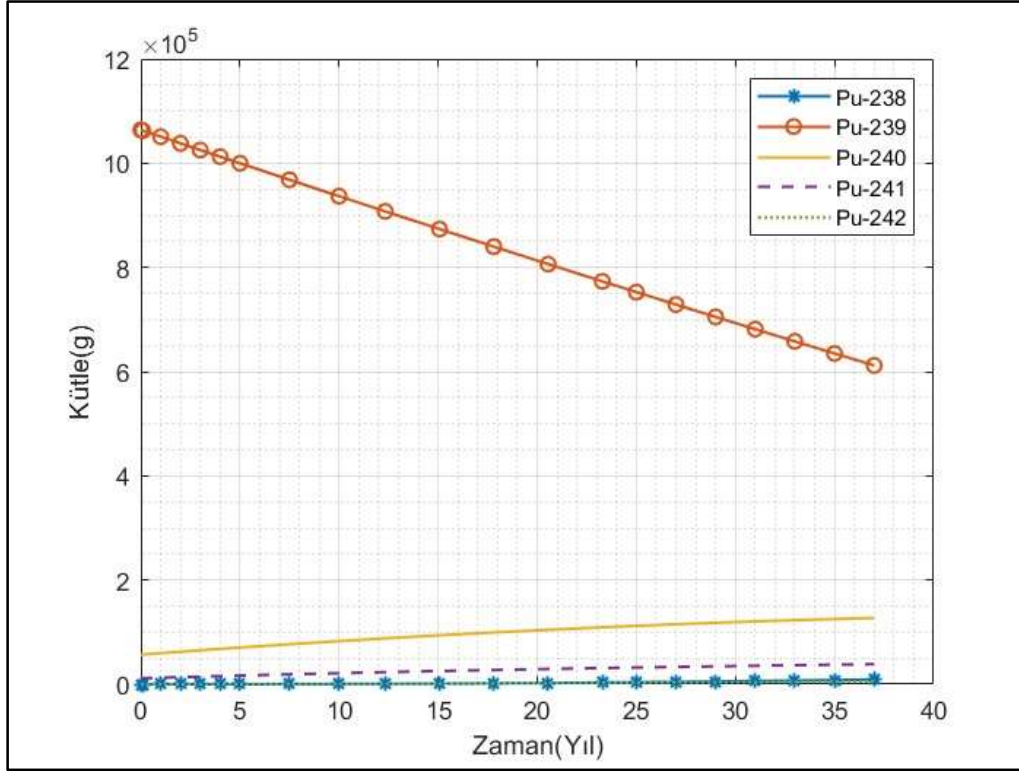
5.3.1. (% 10 Th, %90 SS-Pu)O₂ yakıtı

(%10 Th, %90 SS-Pu)O₂ karışımli yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 32 yıl yakıt yüklemeden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 211 GWd/ton'dur . Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de (%10 Th, %90 SS-Pu)O₂ karışımli yakıt kullanılmış reaktörün fisil yakıt değişimleri verilmiştir. Şekil 5.17 incelendiğinde Pu-238 ve Pu-242 izotoplarında kütsel olarak sabit bir değişim göstermiştir. Öte yandan, Pu-239 izotopu 10,5x10⁵ gr ile başladığı ve zamana bağlı olarak lineer bir şekilde kütsel olarak azaldığı referans kritiklik değerine 6,3x10⁵ grama kadar hızlı bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Pu-240 ve Pu-241 izotopu ise çok az bir değişimli bir durum sergilemiştir. Şekil 5.18 incelendiğinde U-233 izotopu referans kritiklik değerinde işletim zamanı sonunda 8000 gr kadar yükselme sergilemiş ve kaliteli fisil yakıt üretimine katkı sağlar iken, zamana bağlı olarak U-234 izotopu ise çok az bir artış göstererek 800 gr kadar yükselmiştir. U-233'teki artışa bağlı olarak Th elementinin tükenme miktarında %10 gibi görece fazla bir tükenme olduğu gözlenmiştir. Toryumun tükenmesinin bu denli çok olması ve son zamanlardaki U-233 izotop kütselinin diğer durumlardan az olması, üretilen U-233 elementinin fisyonndan üretilen enerjiye büyük oranda katkı sağladığını göstermektedir. Farklı hacimsel oranlarda kullanılan silah sınıfı yakıtlar içinde en fazla toryum tükenmesi bu

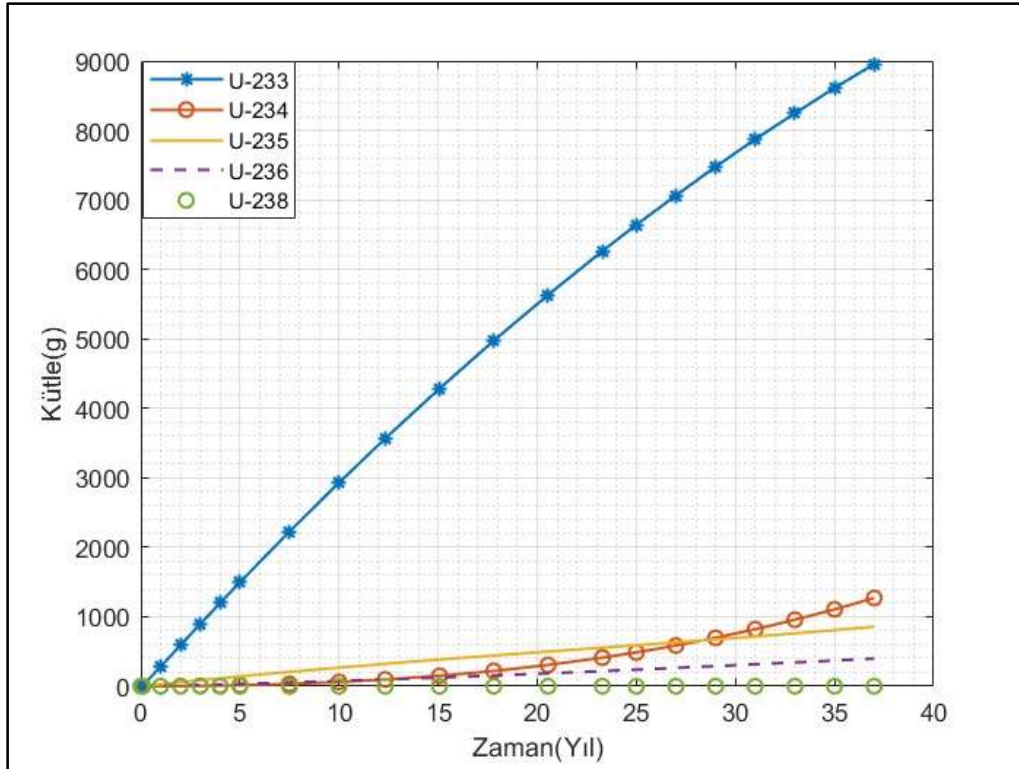
yakıt tipinde gerçekleşmiştir. Kullanılan fisil miktarı arttıkça hızlı fisyon olasılığı artmakta ve dolayısıyla üretilen U-233 miktarı artmaktadır. Hatta daha fazla U-233 üretmek için alternatif olarak kullanılan grafit blokların yoğunluğu düşürülmelidir. Fakat bu durum reaktörün yakıt değişimi olmaksızın reaktörün tam güç çalışma süresini düşürecektir. Ancak, bu reaktörlerde silah sınıfı yakıtların bu denli yüksek hacimsel oranlarda kullanılması nükleer emniyet ve nükleer güvenlik açısından önerilmez. Diğer bir yandan bu yakıtın reaktörde kullanılması dünyadaki silah sınıfı Pu stoklarının tüketilmesi ve nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanılmasına dolaylı yolla katkı sağlamaktadır.



Şekil 5.16. (%10 Th+ %90 SS-Pu)O₂ Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



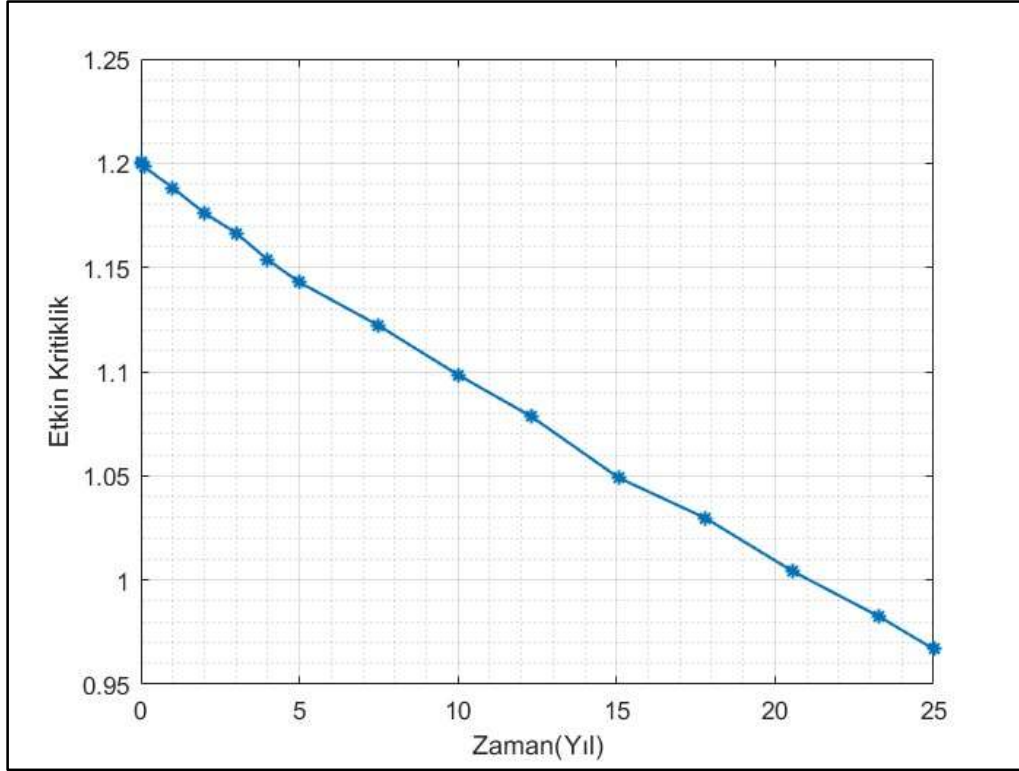
Şekil 5.17. (%10 Th+ %90 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütleli değişimi



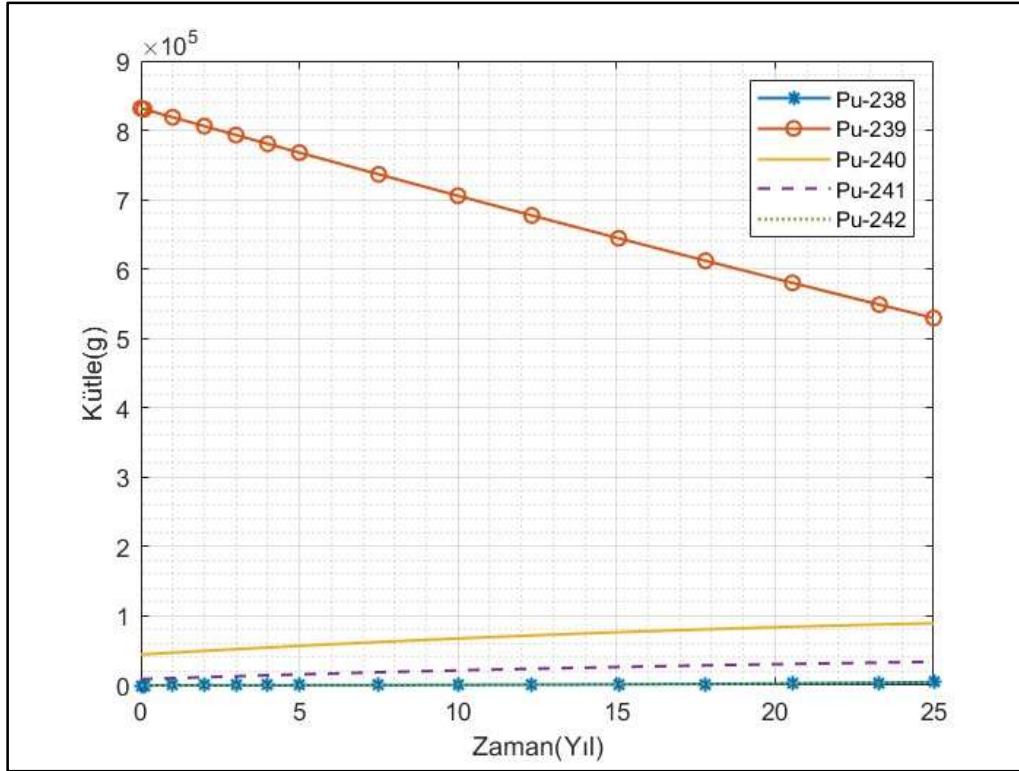
Şekil 5.18. (%10 Th+ %90 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütleli değişimi

5.3.2. (% 30 Th, %70 SS-Pu)O₂ yakıtı

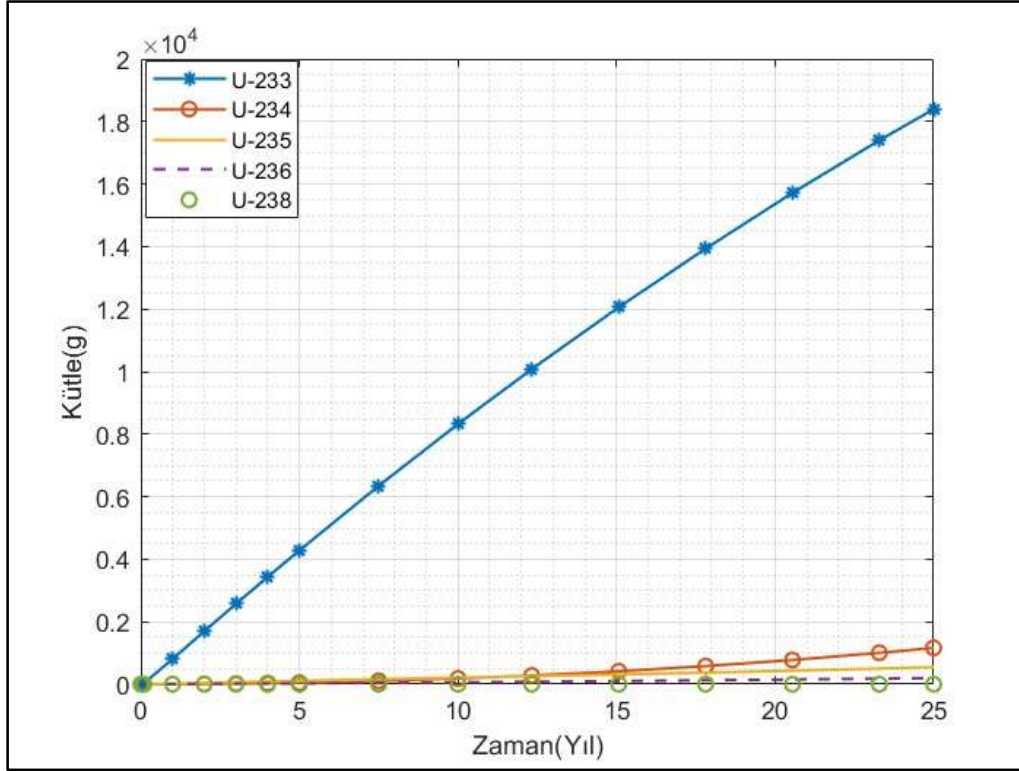
Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.19'da verilmiştir. (%30 Th, %70 SS-Pu)O₂ karışimli yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 21 yıl yakıt yüklemeden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 132 GWd/ton'dur. (%30 Th, %70 SS-Pu)O₂ karışimli yakıt kullanıldığında meydana gelen kütleli fisil yakıt değişimi şekil 5.20 ve şekil 5.21'de verilmiştir. Şekil 5.20 incelendiğinde Pu-238 ve Pu-242 izotoplarında kütleli olarak sabit bir değişim gösterdiği, öte yandan, Pu-239 izotopu $8,1 \times 10^5$ gr ile başladığı ve zamana bağlı olarak lineer bir şekilde kütleli olarak azaldığı referans kritiklik değerine $5,9 \times 10^5$ grama kadar hızlı bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Pu-240 ve Pu-241 izotopu ise çok az bir değişimli bir durum sergilemiştir. Şekil 5.21 incelendiğinde ise U-233 izotopu referans kritiklik değerinde işletim zamanı sonunda $1,59 \times 10^4$ gr kadar yükselme sergilemiş ve kaliteli fisil yakıt üretimine katkı sağlar iken, zamana bağlı olarak U-234 izotopu ise çok az bir artış göstermiştir. Toryumun tükenmesinin bir önceki duruma göre azalması yakıttaki fisil izotop oranının hacimsel olarak düşmesinden kaynaklanmaktadır. Son zamanlardaki U-233 izotop kütleli bir önceki durumdan fazla olması, üretilen U-233 elementinin fisiyondan üretilen enerjiye katkı sağlamasının yeterli düzeyde olmamasını gösterir. Kullanılan fisil miktarı azaldığı için hızlı fisyon olasılığı azalmaktadır ayrıca nötron spektrumunun termal bölgeye daha fazla kayması da üretilen U-233'ün fisiyondan üretilen enerjiye katkı sağlamamasının bir diğer nedeni olarak söylenebilir. Üretilen U-233 izotopunun katkısının korunması için kullanılan grafit blokların yoğunluğu düşürülmelidir.



Şekil 5.19. (%30 Th+ %70 SS-Pu)O₂ Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



Şekil 5.20. (%30 Th+ %70 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütesel değişimi

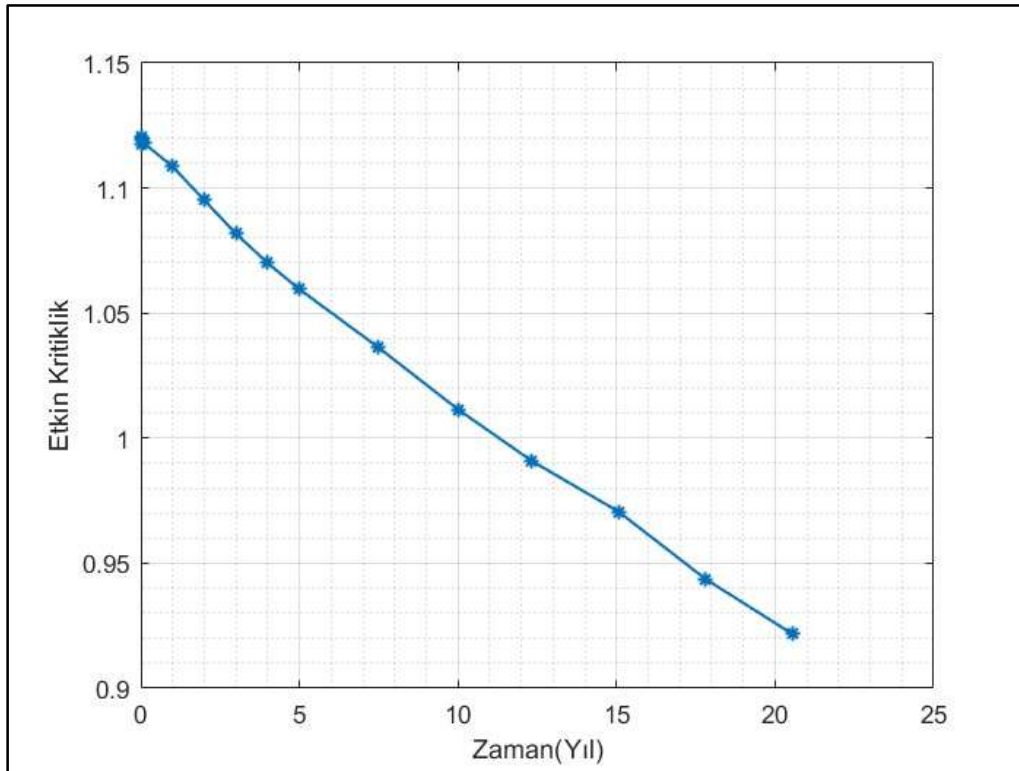


Şekil 5.21. (%30 Th+ %70 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütleli değişimi

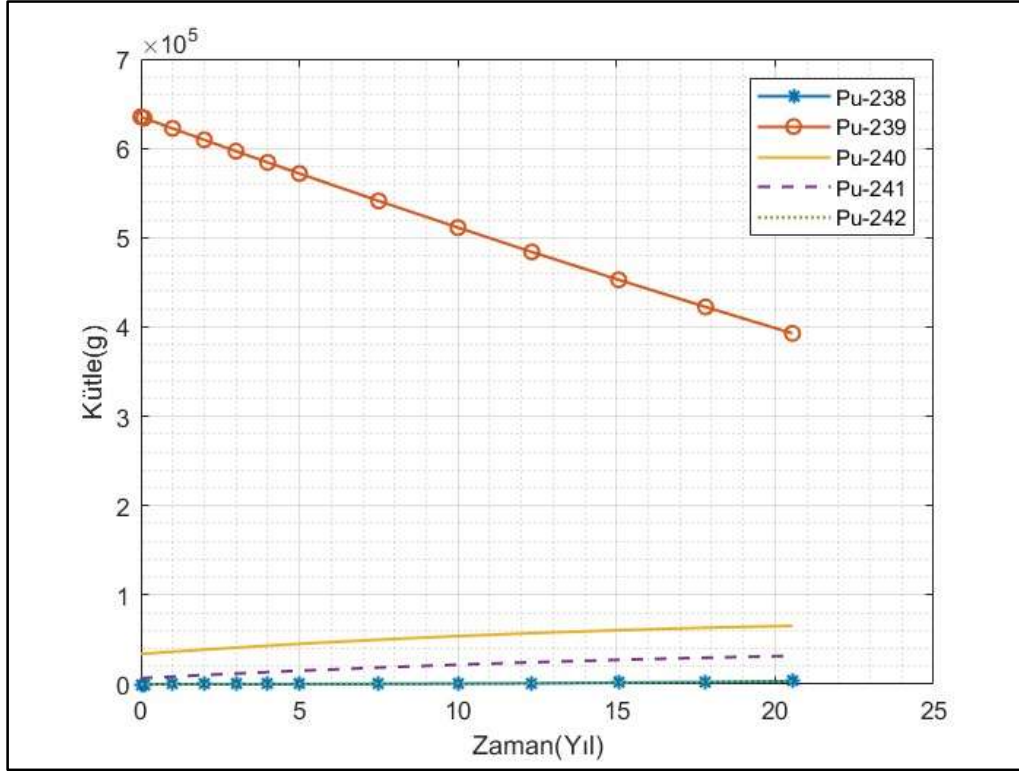
5.3.3. (% 50 Th, %50 SS-Pu)O₂ yakıtı

(%50 Th, %50 SS-Pu)O₂ karışimli yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 11 yıl yakıt yüklemeden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 67,5 GWd/ton'dur. Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.22'de verilmiştir. Şekil 5.23 ve şekil 5.24'te (%50 Th, %50 SS-Pu)O₂ karışimli yakıt kullanıldığında meydana gelen kütleli fisil yakıt değişimi verilmiştir. Şekil 5.23 incelendiğinde Pu-238 ve Pu-242 izotoplarında kütleli olarak sabit bir değişim gösterdiği, öte yandan, Pu-239 izotopu $6,4 \times 10^5$ gr ile başladığı ve zamana bağlı olarak lineer bir şekilde kütleli olarak azaldığı referans kritiklik değerine 5×10^5 grama kadar hızlı bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Pu-240 ve Pu-241 izotopu ise çok az bir değişimli bir durum sergilemiştir. Şekil 5.24 incelendiğinde ise U-233 izotopu referans kritiklik değerinde işletim zamanı sonunda $1,52 \times 10^4$ gr kadar yükselme sergilemiş ve kaliteli fisil yakıt üretimine katkı sağlar iken, zamana bağlı olarak U-234 izotopu ise çok az bir artış göstermiştir. (%50 Th, %50 SS-Pu)O₂ karışimli yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 11 yıl yakıt yüklemeden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.24 incelendiğinde, U-233 izotopunun görece fazla bir şekilde arttığı dolayısıyla kullanılan Th elementinin tükenme miktarında %6

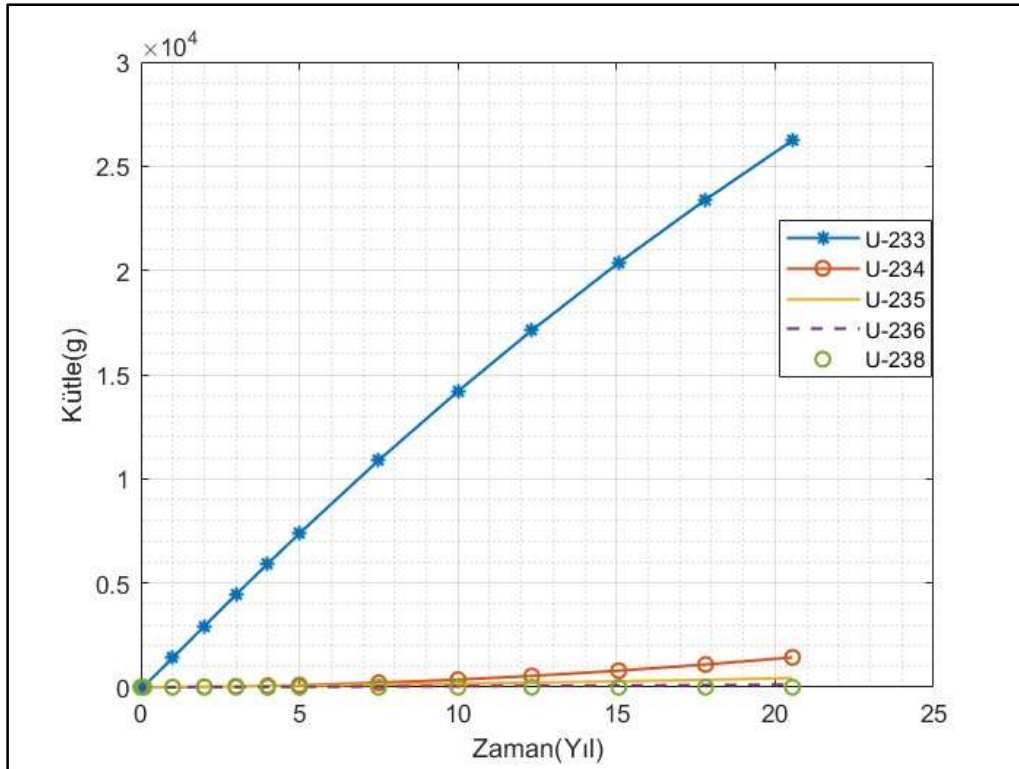
gibi bir tükenme olduğu gözlenmiştir. Toryumun tükenmesinin bir önceki duruma göre azalması yakıttaki fisil izotop oranının hacimsel olarak düşmesinden kaynaklanmaktadır. Son zamanlardaki U-233 izotop kütlesinin bir önceki durumdan fazla olması, üretilen U-233 elementinin fisyon üretilen enerjiye katkı sağlamayı büyük oranda bırakmasından kaynaklanmıştır. Bunun sebebi yukarıda da belirtildiği gibi nötron spektrumunun termal bölgeye daha fazla kayması ve akabinde üretilen U-233'ün fisyon üretilen enerjiye katkı sağlamamasıdır. Kullanılan fisil miktarı azaldığı için hızlı fisyon olasılığı azalmaktadır. Üretilen U-233 izotopunun katkısının korunması için kullanılan grafit blokların yoğunluğu düşürülmelidir. Çekirdek ağırlığı 15 ton olan reaktör UCO yakıt kullandığında 3,5 yıl tam güçte çalışabilmekteyken [23], (%50 Th, %50 SS-Pu)O₂ karışımli yakıt kullanıldığında yaklaşık olarak aynı ağırlıkta 11 yıl çalışabilmektedir. Literatürde Holos reaktörü taşınabildiği için tonaj ağırlığı dikkate alınarak tam güç çalışması belirtilmektedir. Bu çalışmalarda yaklaşık 27 tonluk ağırlıkta 8,3 yıl tam güç çalışabilen reaktör için 11 yıl daha düşük tonajda çalışabilmesi sağlanmıştır [23]. Bunun yanı sıra nükleer silah malzemesi olarak kullanılan SS-Pu stoklarını yakıt olarak kullandığı için nükleer silahsızlanmaya dolayısıyla nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanılmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 5.22. (%50 Th+ %50 SS-Pu)O₂ Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



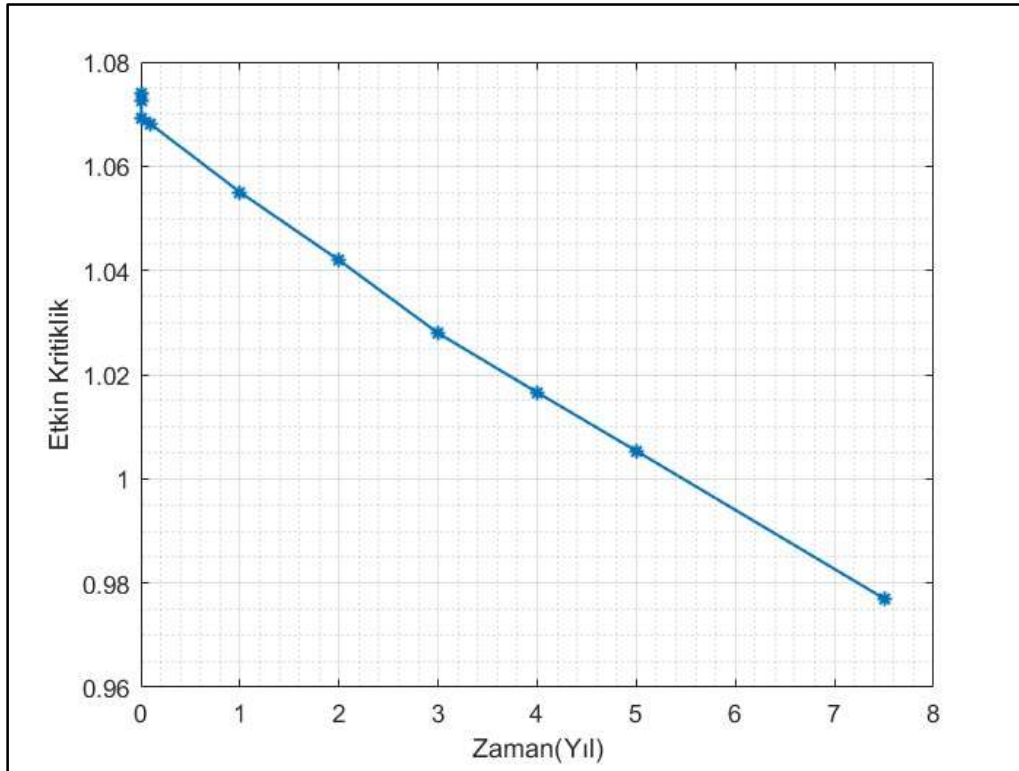
Şekil 5.23. (%50 Th+ %50 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütle değişimi



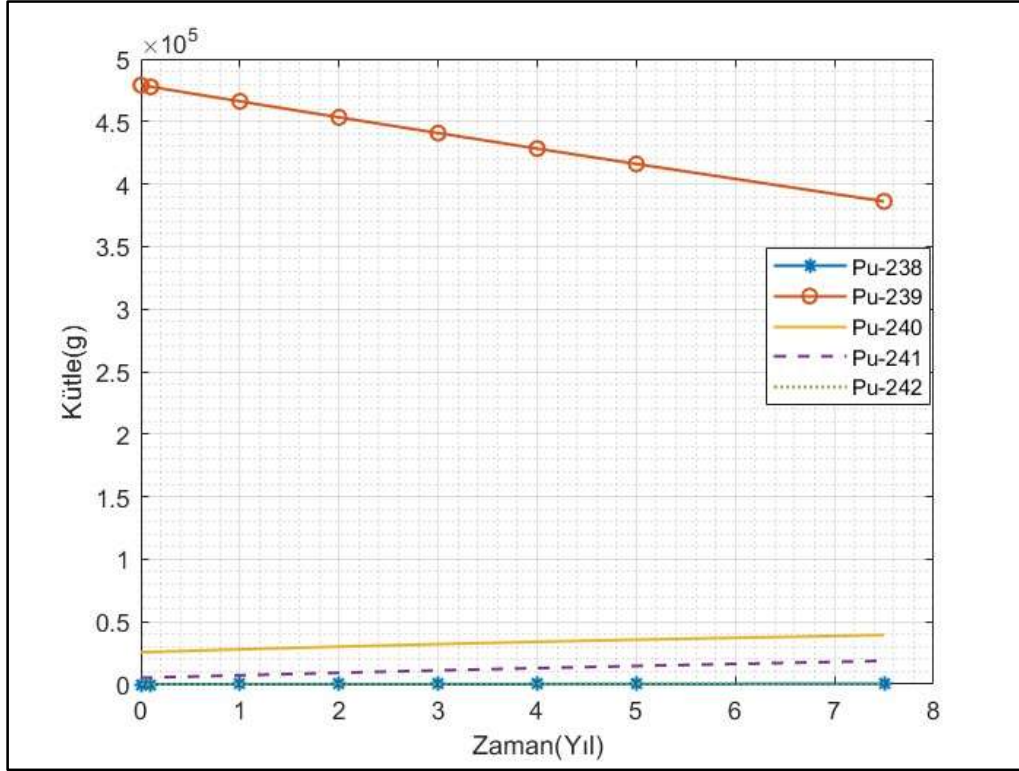
Şekil 5.24. (%50 Th+ %50 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütle değişimi

5.3.4. (% 60 Th, %40 SS-Pu)O₂ yakıtı

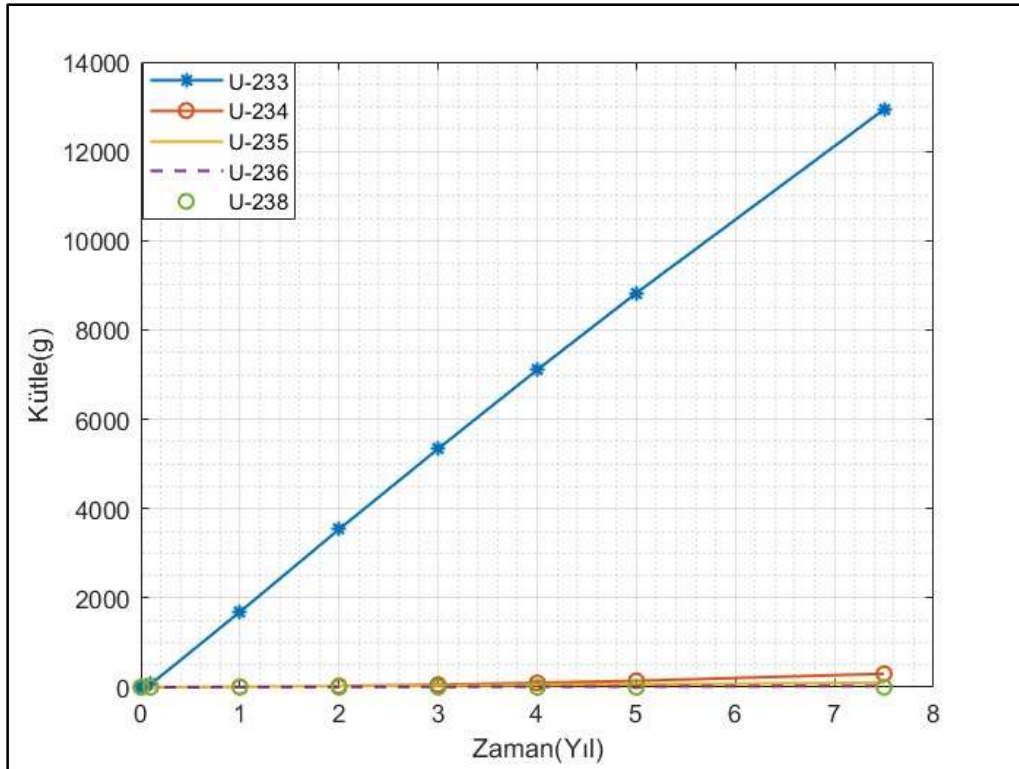
(%60 Th, %40 SS-Pu)O₂ karışımı yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 5,5 yıl yakıt yüklemenden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 32 GWd/ton'dur. Ayrıca Pu ve U atomlarının zamana bağlı izotop değişimleri Şekil 5.26'da ve Şekil 5.27'de verilmiştir. İlgili grafiklere bakıldığında Th elementinin tükenmesi sonucu oluşan U-233 izotopunun önceki durumlarla karşılaştırıldığında fisyon katkısı iyice azaldığı gözlenmiştir. Toryumun tükenmesinin bir önceki durumlara göre azalması yakıttaki fisil izotop oranının hacimsel olarak düşmesinden kaynaklanmaktadır. Kullanılan fisil miktarı azaldığı için hızlı fisyon olasılığı azalmaktadır. Üretilen U-233 izotopunun katkısının korunması için kullanılan grafit blokların yoğunluğu düşürülmelidir. Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.25'te verilmiştir. Çekirdek ağırlığı 15 ton olan reaktör UCO yakıt kullandığında 3,5 yıl tam güçte çalışabilmekteyken [23], (%60 Th, %40 SS-Pu)O₂ karışımı yakıt kullanıldığında yaklaşık olarak aynı ağırlıkta 5,5 yıl çalışabilmektedir. Literatürdeki Holos reaktörüne göre hacmen %60 Th kullanıldığında dahi reaktörün 5,5 yıl aynı tonajda daha uzun süre çalışabildiği gösterilmiştir.



Şekil 5.25. (%60 Th+ %40 SS-Pu)O₂ Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



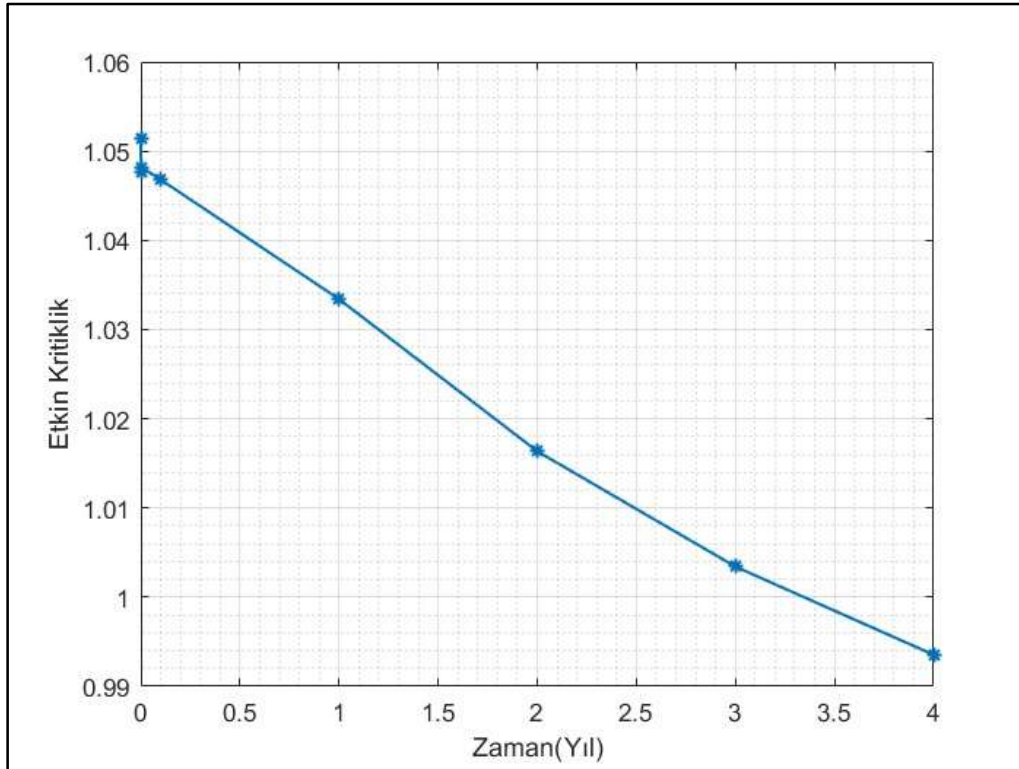
Şekil 5.26. (%60 Th+ %40 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütle değişimi



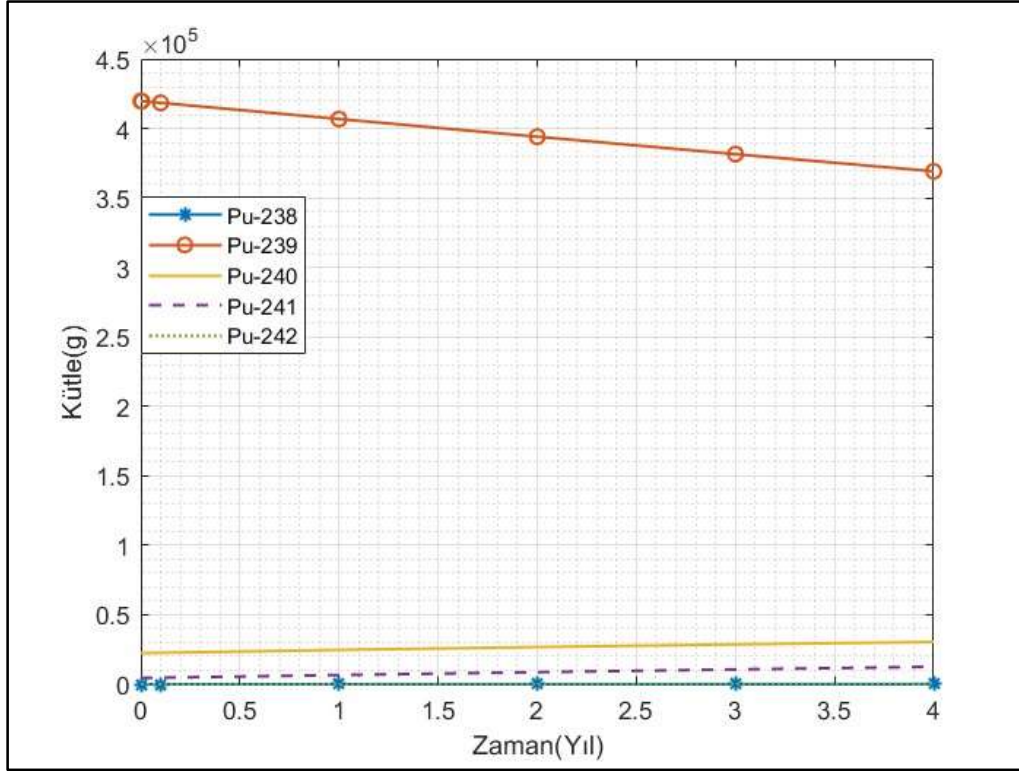
Şekil 5.27. (%60 Th+ %40 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütle değişimi

5.3.5. (% 65 Th, %35 SS -Pu)O₂ yakıtı

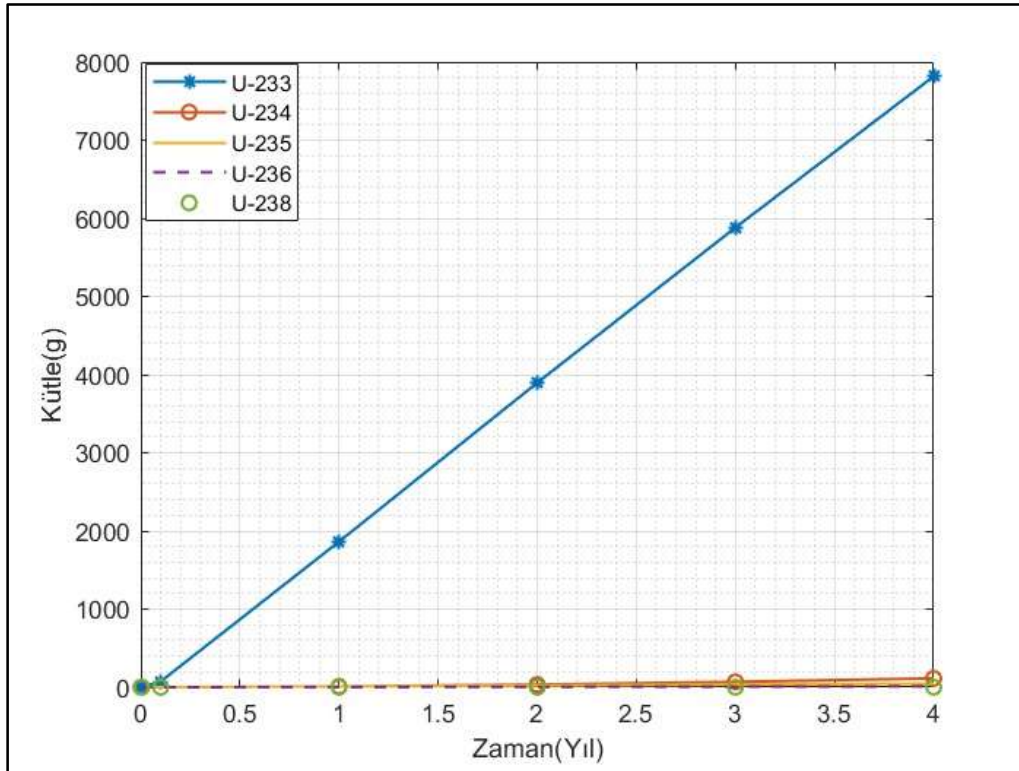
(%65 Th, %35 SS-Pu)O₂ karışımı yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 3,5 yıl yakıt yüklemenden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 26 GWd/ton'dur. Ayrıca Pu ve U atomlarının zamana bağlı izotop değişimleri Şekil 5.29'da ve Şekil 5.30'da verilmiştir. Toryumun tükenmesi yaklaşık %1 dolaylarında gerçekleşmiştir tükenmenin bir önceki durumlara göre azalması yakıttaki fisil izotop oranının hacimsel olarak düşmesinden kaynaklanmaktadır. Kullanılan fisil miktarı azaldığı için hızlı fisyon olasılığı azalmaktadır. Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.28'te verilmiştir. Çekirdek ağırlığı 15 ton olan reaktör UCO yakıt kullandığında 3,5 yıl tam güçte çalışabilmekteyken [23], (%65 Th, %35 SS-Pu)O₂ karışımı yakıt kullanıldığında yaklaşık olarak aynı ağırlıkta aynı süre çalışabilmektedir. Dolayısıyla Pu stoklarının azaltılması ve bunun sonucu olarak nükleer silahsızlanmaya katkı için bu oranlardaki yakıt tercih edilebilir.



Şekil 5.28. (%65 Th+ %35 SS-Pu)O₂ Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



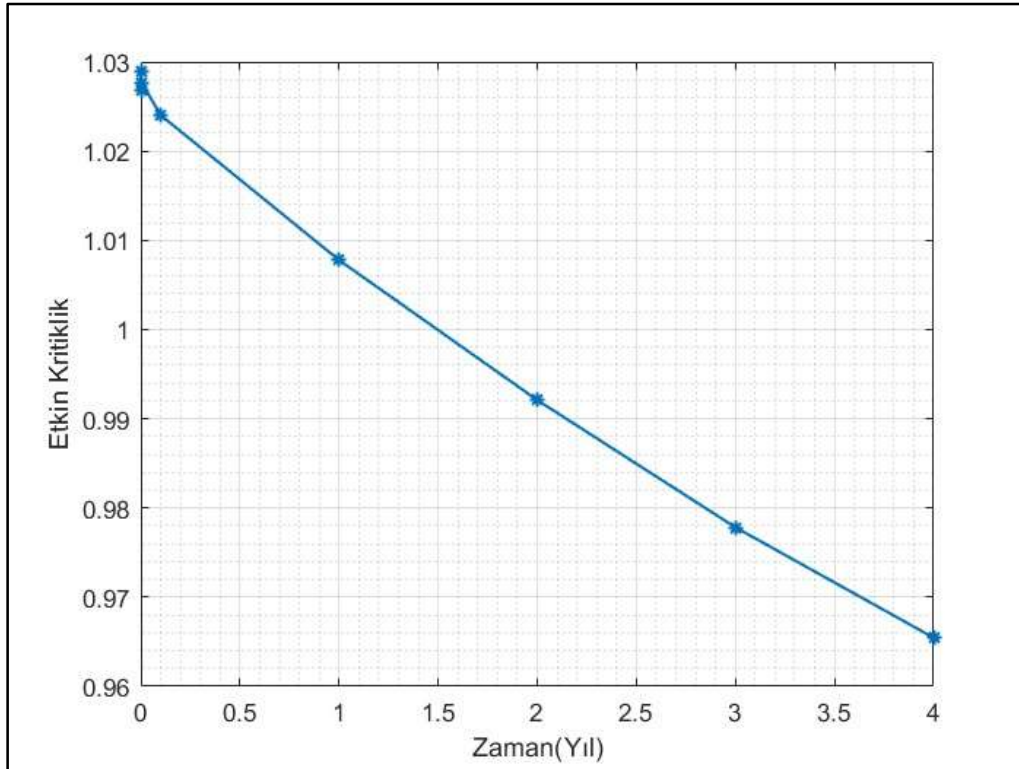
Şekil 5.29. (%65 Th+ %35 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütle değişimi



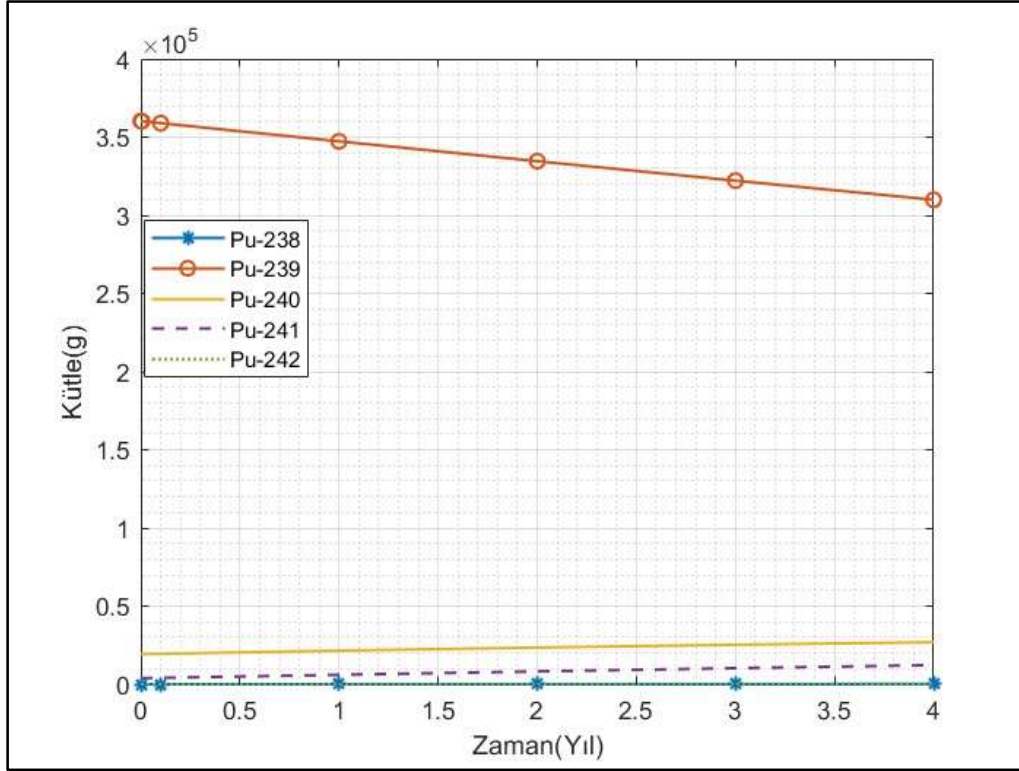
Şekil 5.30. (%65 Th+ %35 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütle değişimi

5.3.6. (% 70 Th, %30 SS-Pu)O₂ yakıtı

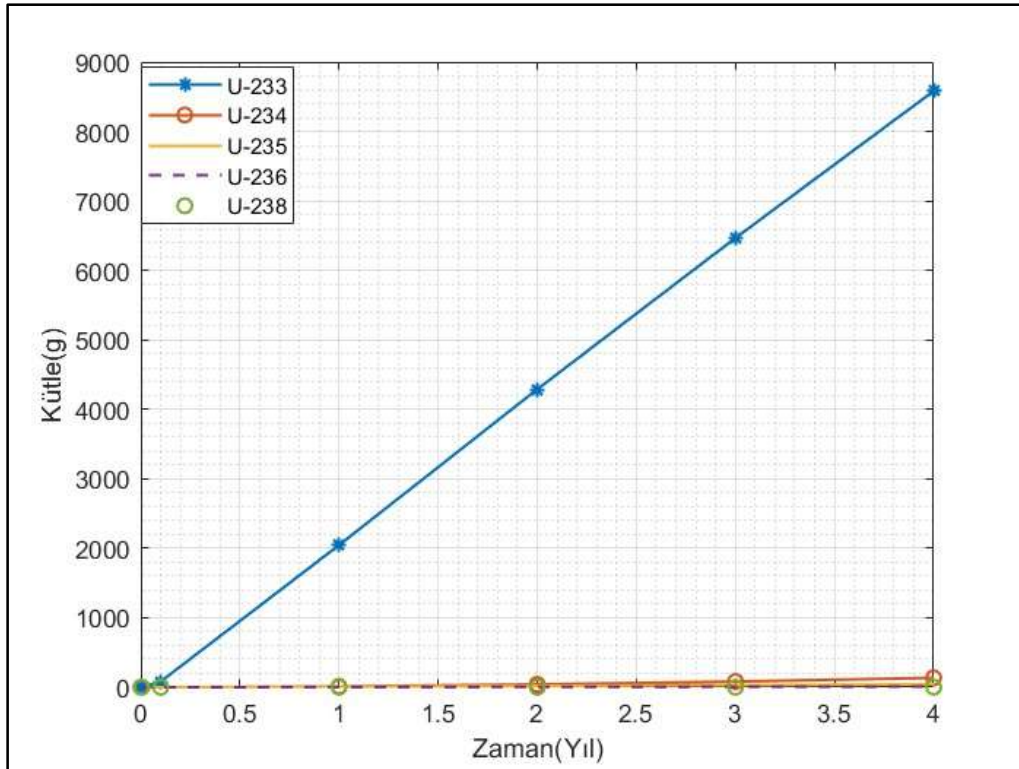
(%70 Th, %30 SS-Pu)O₂ karışımı yakıt kullanılmış ve reaktörün yaklaşık 1,5 yıl yakıt yüklemenden tam güçte çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bitiş zamanı yanma değeri(Discharge Burnup) yaklaşık 9,5 GWd/ton'dur. Ayrıca Pu ve U atomlarının zamana bağlı izotop değişimleri Şekil 5.32'de ve Şekil 5.33'te verilmiştir. Toryumun tükenmesi yaklaşık %0,5 dolaylarında gerçekleşmiştir Yakıttaki fisil izotop oranının hacimsel olarak bu denli düşmesi reaktörde artık toryum tükenmesinin bitme seviyelerine gelmesini göstermiştir. Reaktörün zamana bağlı kritiklik değişimi Şekil 5.31'de verilmiştir. Buradan HOLOS reaktöründe hacimsel olarak %70'e kadar Toryum kullanılabilirliğine ulaşılmıştır. Burada toryumun yanması yerine reaktörün tam yıl çalışma süresinin arttırılması gerektiğinden kullanılan grafit blokların yüksek kaliteli grafit seçilmesi sonucu çalışma süresi artacaktır. Bunun HTGR tipli reaktörlerde uygulanması ve akabinde ortaya çıkan sonuçlara ilgili çalışmadan ulaşılabilmektedir [21].



Şekil 5.31. (%70 Th+ %30 SS-Pu)O₂ Yakıtının zamana bağlı kritiklik değişimi



Şekil 5.32. (%70 Th+ %30 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı Pu izotoplarının kütle değişimi



Şekil 5.33. (%70 Th+ %30 SS-Pu)O₂ Yakıtı için zamana bağlı U izotoplarının kütle değişimi

Yapılan çalışma genel olarak değerlendirildiğinde; ilk olarak (Pu, Th)O₂ yakıtları değerlendirilecek olursa; artan Pu hacmi ile etkin kritiklik, etkin tam güç çalışma yılı ve yanan toryum miktarı artmaktadır. Dolayısıyla silah sınıfı Pu, reaktör sınıfı Pu yakıttan daha fazla Pu içerdiği için yukarıdaki üç madde ile uyumlu olarak silah sınıfı yakıtın daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. %90 SS-Pu ve %10 Th yakıt kullanıldığında reaktör çalışma süresinin 35 yıla kadar çıktığı ve yanma değeri 211 GWd/ton olarak hesaplanmış gözlemlenmiştir. Yakıt olarak %90 SS-Pu ve %10 Th kullanıldığında yakıttaki toryumun yüzde 10.96'sı tükenmiştir. Toryum yakıt kullanımı, jenerik araştırmaların amacı dahilinde başarılı bir şekilde gösterilmiştir. Yakıt olarak RS-Pu ve Th kullanıldığında Th elementinin kritikliğe yeterince katkı sağlamadığı görülmüştür. Bunun sebebi fisil maddenin az olmasından kaynaklıdır. Ayrıca her bir yakıt durumu için hacmen fertil yakıtın artmasıyla birlikte fisil yakıtın düşmesi eş zamanlı olduğu için toryum elementinin U-233'e dönüşmesi yeterince sağlanamamaktadır. Yakıt olarak SS-Pu ve Th kullanıldığında yakıtta hacimsel olarak % 70'e kadar toryum, yakıt olarak RS-Pu ve Th kullanıldığında yakıtta hacimce % 35'e kadar toryum kullanılabileceği gözlemlenmiştir. Yakıt olarak %90 SS-Pu ve %10 Th kullanıldığında 4 adet güç modülünün kritik altı olduğu yani diğer (Pu, Th)O₂ kullanıldığı durumlarda her bir güç modülünün kritik altı olduğu ve tasarıma aykırı bir durum olmadığı görülmüştür. Son olarak, (SS-Pu, Th)O₂ yakıtı uzun süre yakıt değişimi olmadan çalışmanın önünü açtığı için nihai atık bertarafı için birim enerji çıkışı başına nükleer atık malzemenin ciddi şekilde azaltılması sağlanmıştır. Fakat bu reaktörlerde silah sınıfı yakıtların bu denli yüksek hacimsel oranlarda kullanılması nükleer emniyet ve nükleer güvenlik açısından önerilmez. Diğer bir yandan bu yakıtın reaktörde kullanılması dünyadaki silah sınıfı Pu stoklarının tüketilmesi, nükleer silahsızlanma ve nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanılmasına dolaylı yolla katkı sağlamaktadır.

Entegre basınçlı su reaktörlerinden NuScale reaktörünün lisanslama işlemleri tamamlamıştır. Geleneksel basınçlı su reaktörlerine yenilikçi bir yaklaşımla değiştiren bu tasarım her güç ünitesi için ayrı ayrı türbin kullandığı için kapasite faktörünü arttırmaktadır. NuScale Güç Ünitesi 60 MW elektrik üretebilmektedir. Basınçlı su reaktörü teknolojisinin daha güvenli, daha küçük ve ölçeklenebilir bir versiyonunu kullanmak ve GW büyüklüğündeki nükleer tesislerin maliyetlerini düşürmek için tasarlanmıştır. Bir sahada 12 adede kadar modül kurulabilmektedir.

Dünyada taşınabilir reaktörler konusunda da büyük bir ilerleme vardır. Bu çalışmalardan biri Holos adlı reaktördür. Holos reaktörü HTGR tipindedir. Kara, deniz, hava yoluyla taşınıp bölgesel enerji sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu tip reaktörler bölgesel enerji sağlamanın yanında askeri garnizonlara, deniz üslerine de hizmet edebilmektedir. Bu reaktörde kullanılan çok katmanlı yakıt kürecikleri kendiliğinden güvenlidir. Çok katmanlı yapısında bulunan grafit tabakalar simetriden dolayı fisyon katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan kürecikler sinterlenmiş grafitin içerisinde kullanıldığı için ekstra moderasyon sağlamış dolayısıyla daha fazla güvenli hale getirilmiştir. Pirolitik karbon(PyC) katmanı, gaz halindeki fisyon ürünlerini lokalize etmek, doğrusal termal genişlemedeki tutarsızlıkları telafi etmek için kullanılmıştır. İlk difüzyon bariyeri olarak görülen Ti_3SiC_2 katmanı içerisindeki Ti elementi katı fisyon ürünlerinden kaynaklanan hasarlardan kürecikleri korumaktadır. Ti_3SiC_2 tabakası mükemmel mekanik ve termal özelliklere sahiptir ve katı fisyon ürünlerine göre ana yük taşıyan kaplama ve bir difüzyon bariyeri olmuştur. Yüzeydeki grafit matris ve SiC kaplama ile ek bir bariyer oluşturulmuştur.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, $(SS-Pu, Th)O_2$, $(RS-Pu, Th)O_2$ içeren $22 MW_{th}$ HOLOS reaktörünün nötronik analizi, 3 boyutlu heterojen çekirdek modeli ile gerçekleştirilmiştir. Pu ve Th içeren yakıtlar kullanılacağı için bu durumda moderasyonun artması amacıyla boş olan yakıt kanalları sinterlenmiş grafit ile doldurulmuş ve yakıt kanallarının dış yüzeylerine SiC malzemesinden oluşan bir nevi zarf görevi gören bir katman yerleştirilmiştir. Çünkü genellikle zarf malzemesi olarak kullanılan ZrC malzemesine göre daha küçük nötron yutulma kesitlerine sahiptir. Dolayısıyla reaktivite üzerinde aşırı bir olumsuz etkisi yoktur. Bu sinterlenmiş grafitin üzerine yakıt kürecikleri OpenMC kodu ile metotlar kısmında belirtildiği gibi rastgele bir şekilde dağıtılmıştır. Daha öncesinde Serpent kodunun ilgili rutini ile denenmiş fakat gözeneklilik oranı tutmadığı için yakın sonuçlar alınamamıştır. Çok katmanlı yakıt küreciklerinin kullanıldığı çalışmalarda gözenekliliğin önemi ortaya koyulmuştur. Bu tip çalışmalarda uygun algoritmalar seçilmediğinde kürecikler birbirlerine değebilmektedir. Dolayısıyla küreciklerin yakıt kanalı içerisindeki bu durumu toplam boşluk hacmini artmış bir şekilde göstermektedir. Bu da yakıt hacminin moderatör hacmine oranını etkilemektedir. Sonuç olarak yakıt küreciklerinin kullanıldığı çalışmalarda uygun algoritma kullanılması önemlidir.

Yakıt küreciklerindeki Ti_3SiC_2 katmanı içerisindeki titanyum elementinden dolayı ekstra bir dayanıklılık elde etmektedir. Bu da küreciklerin erimesine karşı fazladan bir önlem olarak görülmektedir. Bu tip küreciklerin yakıt olarak kullanıldığı çalışmalarda tüm kor homojen veya sonsuz hücre metotları gibi metotlar küreciklerdeki simetrik yapıyı elimine ettiği için çok da doğru sonuçlar vermemektedir. Sonsuz hücre metoduyla yapılan bir Monte-Carlo simülasyonu ile yanan toryum miktarı, 3 boyutlu heterojen çekirdek modeli ile yapılan bir çalışmadan daha fazla çıkmaktadır. Burada önemli diğer bir kısım ise çalışmalar yapılırken kullanılan Monte-Carlo yöntemidir. Nötronik kodlarda vazgeçilmez olarak tabir edebileceğimiz bu yöntem olasılık temellidir. Dolayısıyla bazı döngüleri içerisinde barındırmaktadır. Kritiklik hesaplanırken Monte-Carlo yöntemine dayalı Serpent kodu kullanılmış ve ortalama $+0.0015$ hata ile kritikliğe ulaşılmıştır. Bu hatayı azaltmak için Monte-Carlo simülasyonlarında kullanılan pasif döngü ve aktif döngü sayısı arttırılmalıdır. Ancak bu işlem süresini arttırmaktadır. Daha kısa sürede daha kesin sonuçlar hesaplanmak isteniyorsa daha güçlü işlemciler, daha fazla çekirdeğe sahip olan ve daha fazla ram

kapasitesi olan cihazlar gerekmektedir. Bu tür çalışmalarda genellikle paralel hesaplama sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışma simüle edilirken 10000 nötron 250 aktif döngü ve 20 tane pasif döngü kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan küreciklerin yakıt kanallarına dağılım dosyaları ayrı ayrı sisteme yüklendiği için gereken ram ihtiyacı da artmaktadır.

Yapılan nötronik analiz sonuçları ve tüm kor modelleme ile ilgili bilgiler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Reaktör tasarımı Serpent nükleer kodu kullanılarak modellenmiştir.
- Holos mikro nükleer reaktör koru orijinal yakıt UCO ile modellenmiş ve yaklaşık 3,5 yıl çalıştığı gözlenmiştir. Bu sonuç literatürdeki çalışmayı doğrulamıştır. [23]
- Yakıt kanalları sinterlenmiş grafit ile doldurulmuş ve yakıt kanallarının dış yüzeylerine SiC malzemesinden oluşan zarf görevi gören bir katman yerleştirilmiştir.
- Reaktör korunda (%10 Th+ %90 RS-Pu)O₂, (%30 Th+ %70 RS-Pu)O₂ ve (%35 Th+ %65 RS-Pu)O₂, yakıtları kullanılmıştır. Yanma değerleri sırasıyla 36,83, 12,81 ve 6,40 GWd/ton çıkmıştır. Yanma değerlerine karşılık gelen yaklaşık reaktör işletim zamanları sırasıyla 9, 2,5 ve 1 yıl çıkmıştır.
- Reaktör korunda (%10 Th+ %90 SS-Pu)O₂, (%30 Th+ %70 SS-Pu)O₂, (%50 Th+ %50 RS-Pu)O₂, (%60 Th+ %40 SS-Pu)O₂, (%65 Th+ %35 SS-Pu)O₂ ve (%70 Th+ %30 SS-Pu)O₂, yakıtları kullanılmıştır. Yanma değerleri sırasıyla 211,3, 131,6, 67,5, 32,0, 25,6 ve 9,5 GWd/ton çıkmıştır. Yanma değerlerine karşılık gelen yaklaşık reaktör işletim zamanları sırasıyla 32, 21, 11, 5,5, 3,5 ve 1,5 yıl çıkmıştır.

Ayrıca, HOLOS mikro nükleer reaktörü için yapılan bu çalışmalar dışında aşağıdaki çalışmalar önerilebilecektir.

- Farklı nötronik kod ve kütüphaneler kullanılarak karşılaştırılabilir.
- Farklı alternatif yakıtlar için nötronik analizlerde optimizasyon yöntemleri kullanılabilir.

- Ayrılabilir bir sistem olduğu için nötron sağlayıcıları ile sistemin çalıştırılması konusunda değerlendirmeler yapılabilir.
- Farklı reaktör materyalleri kullanılarak nötronik sonuçlar üzerine etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Şahin, S., Şahin, H. M., ve Acir, A. (2010). Criticality and burn up evolutions of the fixed bed nuclear reactor with alternative fuels. *Energy Conversion and Management*, 51(9), 1781-1787.
2. Şahin, S., Şahin, H. M., Acir, A., ve Al-Kusayer, T. A. (2009). Criticality investigations for the fixed bed nuclear reactor using thorium fuel mixed with plutonium or minor actinides. *Annals of Nuclear Energy*, 36(8), 1032-1038.
3. Acir, A., Coşkun, H., Şahin, H. M., ve Erol, Ö. (2011). Criticality and burnup analyses of a PBMR-400 full core using Monte Carlo calculation method. *Annals of Nuclear Energy*, 38(2-3), 298-301.
4. Şahin, H. M., Erol, Ö., ve Acir, A. (2012). Utilization of thorium in a gas turbine-modular helium reactor. *Energy Conversion and Management*, 63, 25-30.
5. Şahin, H. M., ve Erol, Ö. (2012). Utilization of thorium in a Gas Turbine-Modular Helium Reactor with alternative fuels. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 224-229.
6. Acir, A., ve Coşkun, H. (2012). Neutronic analysis of the PBMR-400 full core using thorium fuel mixed with plutonium or minor actinides. *Annals of Nuclear Energy*, 48, 45-50.
7. Zhu, G., Liu, S., Zou, Y., Yan, R., Tan, M., Kang, X., ve Dai, Y. (2019). Thorium utilization with pebble mixing system in fluoride salt-cooled High Temperature Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 114, 84-90.
8. Fang, Y. H., Li, X. X., Yu, C. G., Chen, J. G., ve Cai, X. Z. (2018). Fuel pebble optimization for the thorium-fueled Pebble Bed Fluoride salt-cooled high-temperature reactor (PB-TFHR). *Progress in Nuclear Energy*, 108, 179-187.
9. Zhu, G., Zou, Y., Xu, H., Dai, Y., Li, M., ve Yan, R. (2015). Uranium utilization with thorium blanket in Pebble Bed Fluoride salt-cooled high temperature reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 83, 374-386.
10. Chang, H., Yang, Y., Jing, X., ve Xu, Y. (2006). Thorium-based fuel cycles in the modular high temperature reactor. *Tsinghua Science and Technology*, 11(6), 731-738.
11. VoChang, H., Yang, Y., Jing, X., ve Xu, Y. (2006). Thorium-based fuel cycles in the modular high temperature reactor. *Tsinghua Science and Technology*, 11(6), 731-738.
12. György, H., ve Czifrus, S. (2016). The utilization of thorium in Generation IV reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 93, 306-317.
13. Leppänen, J., Pusa, M., Viitanen, T., Valtavirta, V., ve Kaltiaisenaho, T. (2015). The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*, 82, 142-150.

14. Romano, P. K., Horelik, N. E., Herman, B. R., Nelson, A. G., Forget, B., ve Smith, K. (2015). OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development. *Annals of Nuclear Energy*, 82, 90-97.
15. İnternet: MATLAB. URL: <https://ch.mathworks.com/help/matlab/>, Son Erişim Tarihi: 05.10.2022
16. İnternet: Small Nuclear Power Reactors. URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, Son Erişim Tarihi: 03.10.2022
17. İnternet: Russia's floating nuclear plant will power Arctic. URL: <https://www.thetimes.co.uk/article/fears-as-floating-chernobyl-heads-for-the-arctic-qlnql57zm>, Son Erişim Tarihi: 08.10.2022
18. Kessides, I. N., ve Kuznetsov, V. (2012). Small modular reactors for enhancing energy security in developing countries. *Sustainability*, 4(8), 1806-1832.
19. Shamanin, I. V., Grachev, V. M., Chertkov, Y. B., Bedenko, S. V., Mendoza, O. and Knyshev, V. V. (2018). Neutronic properties of high-temperature gas-cooled reactors with thorium fuel. *Annals of Nuclear Energy*, 113, 286-293.
20. Shamanin, I. V., Bedenko, S. V., Chertkov, Y. B. and Gubaydulın, I. D. M. (2015). Gas-cooled thorium reactor with fuel block of the unified design. *Nuclear Energy and Technology*, 1(3), 184-190.
21. Çıfci, A., ve Acır, A. (2023). Neutronic Assessment of High-Temperature Gas-Cooled Thorium Burner using Monte Carlo Calculation Method with Full Core Model. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 1-1.
22. Stauff, N. E., Lee, C. H., Shriwise, P., Wells, A. ve Filippone, C. (2021). *Neutronic Benchmark on Holos-Quad Micro-Reactor Concept*. In EPJ Web of Conferences, 247, 01006.
23. Stauff, N. E., Lee, C. H., Wells, A., ve Filippone, C. (2021). *Design optimization of the holos-quad micro-reactor concept*. In EPJ Web of Conferences, 247, 01005.
24. İnternet: The Holos Reactor: A Distributable Power Generator with Transportable Subcritical PowerModules. URL: <https://engrxiv.org/preprint/view/90/216>, Son Erişim Tarihi: 08.10.2022
25. İnternet: Liou, J. What are Small Modular Reactors (SMRs). URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>, Son Erişim Tarihi: 10.10.2022.
26. Moniz, E. (2011). Why we still need nuclear power: making clean energy safe and affordable. *Foreign Affairs*, 83-94.

27. İnternet: Small Isn't Always Beautiful: Safety, Security, and Cost Concerns about Small Modular Reactors. URL: <https://www.jstor.org/stable/resrep00070>, Son Erişim Tarihi: 10.10.2022.
28. İnternet: Cunningham: Small modular reactors provide path forward for nuclear power. URL: <https://www.americansecurityproject.org/nick-cunningham-featured-in-the-hill-on-smrs/>, Son Erişim Tarihi : 20.09.2021.
29. İnternet: Advanced Reactors Information System (ARIS). URL: <https://aris.iaea.org/sites/SMR.html>, Son Erişim Tarihi : 11.10.2022.
30. Hedayat, A. (2020). A review of advanced SMRs particularly iPWRs regarding safety features, economy issues, innovative concepts, and multi-purpose deployment. *Radiation Physics and Engineering*, 1(4), 29-53.
31. Park, K. B. (2011, October). *SMART: an early deployable integral reactor for multi-purpose applications*. In INPRO Dialogue Forum on Nuclear Energy Innovations: CUC for Small & Medium-sized Nuclear Power Reactors, Vienna, Austria 10-14.
32. İnternet: Molten Salt Reactors. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors.aspx>, Son Erişim Tarihi: 12.10.2022.
33. Joshi, J., ve Nayak, A. K. (Eds.). (2019). *Advances of computational fluid Dynamics in nuclear reactor design and safety assessment*. Cambridge: Woodhead Publishing.
34. Kópházi, J., Lathouwers, D., ve Kloosterman, J. L. (2009). Development of a three-dimensional time-dependent calculation scheme for molten salt reactors and validation of the measurement data of the molten salt reactor experiment. *Nuclear Science and Engineering*, 163(2), 118-131.
35. İnternet: Grabaskas, D., Heat-Pipe Microreactors. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1915/ML19150A609.pdf>, Son Erişim Tarihi: 17.10.2022.
36. Yan, B. H., Wang, C., ve Li, L. G. (2020). The technology of micro heat pipe cooled reactor: A review. *Annals of Nuclear Energy*, 135, 106948.
37. Gibson, M. A., Poston, D. I., McClure, P., Godfroy, T., Sanzi, J., ve Briggs, M. H. (2018). *The Kilopower Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY) nuclear ground test results and lessons learned*. In 2018 International Energy Conversion Engineering Conference (p. 4973).
38. İnternet: Liquid-metal reactors. URL: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/Liquid-metal-reactors>, Son Erişim Tarihi: 17.10.2022.
39. İnternet: URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_metal_cooled_reactor, Son Erişim Tarihi: 17.10.2022.

40. Chebac, R., Cammi, A., Ricotti, M. E., Sadeghi, K., Ghazaie, S. H., Sokolova, E. ve Fedorovich, E. (2021). *Dynamic Response of LFR in Cogeneration Mode*. In Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE 2021). SVN.
41. İnternet: High-temperature gas reactor. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_gas_reactor, Son Erişim Tarihi: 17.10.2022.
42. Masterson, R. E. (2017). *Introduction to nuclear reactor physics*. 6000 Broken Sound Parkway NW, CRC Press.
43. Tobochnik, J., ve Chapin, P. M. (1988). Monte Carlo simulation of hard spheres near random closest packing using spherical boundary conditions. *The Journal of chemical physics*, 88(9), 5824-5830.

EKLER

EK-1. Çok Katmanlı Yakıt Küreciklerinin Dağılımı için OpenMC kodu

```
from math import pi
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import openmc
import openmc.model

fuel = openmc.Material(name='Fuel')
fuel.set_density('g/cm3', 10.744)
fuel.add_nuclide('U235', 0.0672413793)
fuel.add_nuclide('U238', 0.277586207)
fuel.add_nuclide('O16', 0.517241379)
fuel.add_element('C', 0.137931034)

buff = openmc.Material(name='Buffer')
buff.set_density('g/cm3', 1.04)
buff.add_element('C', 1.0)
buff.add_s_alpha_beta('c_Graphite')

PyC1 = openmc.Material(name='PyC1')
PyC1.set_density('g/cm3', 1.882)
PyC1.add_element('C', 1.0)
PyC1.add_s_alpha_beta('c_Graphite')

SiC = openmc.Material(name='SiC')
SiC.set_density('g/cm3', 3.171)
SiC.add_element('C', 0.5)
SiC.add_element('Si', 0.5)

PyC2 = openmc.Material(name='PyC2')
PyC2.set_density('g/cm3', 1.882)
PyC2.add_element('C', 1.0)
PyC2.add_s_alpha_beta('c_Graphite')

graphite = openmc.Material()
graphite.set_density('g/cm3', 1.1995)
graphite.add_element('C', 1.0)
graphite.add_s_alpha_beta('c_Graphite')

spheres = [openmc.Sphere(R=r*1e-4)
            for r in [213., 313., 353., 388.]]
cells = [openmc.Cell(fill=fuel, region=-spheres[0]),
         openmc.Cell(fill=buff, region=+spheres[0] and -spheres[1]),
         openmc.Cell(fill=PyC1, region=+spheres[1] and -spheres[2]),
         openmc.Cell(fill=SiC, region=+spheres[2] and -spheres[3]),
```

EK-1. (devam) Çok Katmanlı Yakıt Küreciklerinin Dağılımı için OpenMC kodu

```
openmc.Cell(fill=PyC2, region+=spheres[3]])
triso_univ = openmc.Universe(cells=cells)

outer_radius = 428.*1e-4
cy=openmc.ZCylinder(x0=0.0, y0=0.0, r=0.7, boundary_type='reflective')
z1=openmc.ZPlane(z0=5.0, boundary_type='reflective')
z2=openmc.ZPlane(z0=395.0, boundary_type='reflective')
region = -cy and -z2 and +z1
centers = openmc.model.pack_spheres(radius=outer_radius,region=region,pf=0.4)
trisos = [openmc.model.TRISO(outer_radius, triso_univ, center) for center in
centers]
with open('rand.txt','w') as f:
    for xx in trisos:
        f.write(xx.translation)
        f.write('\n')
print('control')
```



Gazili olmak ayrıcalıktır