**T.C.**
**ERCİYES ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

# FÜZYON-FİSYON HİBRİD REAKTÖRÜNDE NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİMİ

**Hazırlayan**
**Gizem BAKIR**

**Danışman**
**Prof. Dr. Hüseyin YAPICI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2013**
**KAYSERİ**

**T.C.**
**ERCİYES ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

# FÜZYON-FİSYON HİBRİD REAKTÖRÜNDE NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİMİ

**(Yüksek Lisans Tezi )**

**Hazırlayan**
**Gizem BAKIR**

**Danışman**
**Prof. Dr. Hüseyin YAPICI**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2013-4488 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Temmuz 2013**
**KAYSERİ**

# BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Gizem BAKIR
İmza :

“Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Nükleer Hidrojen Üretimi” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Gizem BAKIR

Danışman
Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı
Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Prof. Dr. Hüseyin YAPICI danışmanlığında **Gizem BAKIR** tarafından hazırlanan "**FÜZYON-FİSYON HİBRİD REAKTÖRÜNDE NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİMİ**" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında **yüksek lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ:**

Danışman : Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Üye : Prof. Dr. Ali PINARBAŞI

Üye : Doç. Dr. Gamze GENÇ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 16/07/2013 tarih ve 2013/31-20 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

16 / 07 / 2013

Prof. Dr. Kazım KEŞLİOĞLU

Enstitü Müdürü

# TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım süresince çalışmalarımın başarılı bir şekilde yürümesi için her türlü olanağı sağlayarak deneyimleriyle ve üstün bilgi birikimiyle her türlü konuda yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Hüseyin YAPICI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım sırasında bilgi birikimleriyle çalışmalarıma eleştirileriyle, sabırla yön veren hocalarım Sn. Doç. Dr. Gamze GENÇ ve Yrd. Doç. Dr. Gülşah ÖZIŞIK' a, tez çalışmam boyunca bilgi paylaşımlarını eksik etmeyen, maddi, manevi her türlü desteklerinden ötürü hocalarım, Sn. Doç. Dr. Serdar GENÇ ve Sn. Yrd. Dr. Nesrin KAYATAŞ Demir'e, tez çalışmalarım sırasında bana destek veren değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Burcu ÇİÇEK, Arş. Gör. Halil Hakan AÇIKEL, Arş. Gör. Mehmet Fatih KAYA, Gökhan ÖZKAN, Nil AYDIN ve Seda ÖZTOPUZ'a teşekkür ederim.

Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FYL-2013-4488) teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince beni her zaman teşvik eden, destekleyen ve yanımda olan çok değerli aileme sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Gizem BAKIR
Kayseri, Temmuz 2013

# FÜZYON-FİSYON HİBRİD REAKTÖRÜNDE NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİMİ

**Gizem BAKIR**
**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2013**

**Danışman: Prof. Dr. Hüseyin YAPICI**

## ÖZET

Bu tez çalışmasında hibrit reaktörde minör aktinitlerin yanma/dönüşüm oranları incelenerek elde edilen enerjiden hidrojen üretimi araştırıldı. Yakıt olarak PWR-$UO_2$ kullanılmış yakıtının dönüşüm potansiyeli incelenmiştir. Hibrit reaktörü D-T füzyon sürücülü reaktör olup 1 $MW/m^2$'lik ilk duvar nötron yükü oluşturmaktadır. 3 boyutlu nötronik hesaplamalar sürekli tesir kesiti veri kütüphanesi kullanılarak MCNP4B Monte Carlo kodu ile gerçekleştirildi. Hibrit reaktörün yakıt bölgesi için 5 ayrı yakıt geliştirildi. $ThO_2$-$UO_2$, $ThO_2$-$NpO_2$ ve $ThO_2$-$AmO_2$ yakıtlarındaki $UO_2$, $NpO_2$ ve $AmO_2$'nin hacimsel oranları sırasıyla %0'dan %100'e kadar %10'ar adımlarla arttırılarak nötronik performans incelendi. $ThO_2$-$PuO_2$ ve $ThO_2$-$CmO_2$ yakıtlarında ise %0'dan %10'a kadar %1'er adımlarla yakıtın hacimsel oranı arttırılarak nötronik performans incelendi. Minör aktinit ve major aktinitlerin yakıt oranı arttıkça yakıt dönüşümünün arttığı gözlemlendi. Ayrıca enerji çoğalım katsayısı konveksiyonel reaktöre göre çok daha yüksek bulunmuştur. Hibrit reaktörden elde edilen enerji ile nükleer hidrojen üretim potansiyeli araştırıldı. Farklı hidrojen üretim metotları incelendi ve araştırma sonucunda buhar metan reformasyonu ile hidrojen üretiminin daha yüksek olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Hibrit Reaktör, Aktinitlerin Dönüştürülmesi, Fisil Yakıt Üretimi, Nükleer Hidrojen Üretimi, Buhar-Metan Reformasyonu, Yüksek Sıcaklıklı Elektroliz, S-I Termokimyasal Yöntem

# NUCLEAR HYDROGEN PRODUCTION IN FUSION-FISSION HYBRID REACTOR

**Gizem BAKIR**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**M. Sc. Thesis, June 2013**

**Supervisor: Prof. Dr. Hüseyin YAPICI**

## ABSTRACT

In this thesis study, burning / conversion rates of the minor actinides in the hybrid reactor are investigated and also the hydrogen production is examined from the obtained energy. First, PWR-$UO_2$ spent fuel Y / D potential of the fuel were investigated. Hybrid reactor is a D-T fusion driver reactor and it constitutes the first wall neutron load. Three-dimensional calculations were performed using constant cross section data library and MCNP4B Monte Carlo code. Five different fuel were developed for hybrid reactor region. Volumetric rates of fuels for $UO_2$-$ThO_2$, $NpO_2$-$ThO_2$ and $AmO_2$-$ThO_2$, the neutronic performance was investigated by raising with 10% steps, increasing from 0% to 100% respectively. Also, $PuO_2$-$ThO_2$ and $CmO_2$-ThO2- fuels were investigated the neutronic performance of volumetric rates of fuels by raising with 1% steps from 0% to 10%. The Increased fuel conversion was observed with increasing ratio of minor and major actinides. Also, it had a much higher energy multiplication factor according to conventional reactor. Nuclear hydrogen production potential was investigated by the energy derived from hybrid rector. Different methods of hydrogen production were investigated and hydrogen production was found to be much higher by steam-methane reforming.

**Keywords:** Hybrid Reactor, Actinide Transmutation, Fısıl Fuel Production, Nucleer Hydrogen Production, Steam-Methane Reformation, High Temperature Electrolysis, S-I Thermochemical Methods

# İÇİNDEKİLER

## FÜZYON-FİSYON HİBRİD REAKTÖRÜNDE NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİMİ

Sayfa
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI ..... ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI ..... iii
KABUL VE ONAY SAYFASI ..... iv
ÖNSÖZ ..... v
ÖZET ..... vi
ABSTRACT ..... vii
İÇİNDEKİLER ..... viii
KISALTMALAR VE SİMGELER ..... xi
TABLOLAR LİSTESİ ..... xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... xiv

**Giriş ..... 1**

**1. BÖLÜM**

**NÜKLEER ATIKLAR VE FÜZYON-FİSYON SÜRÜCÜLÜ HİBRİT REAKTÖRLER**

**1.1.Nükleer Reaksiyonlar ..... 3**
**1.2.Nötron Madde Etkileşimi ..... 7**
**1.3.Reaksiyon Enerjisi ..... 8**
**1.4.Enerji Çoğalım Katsayısı (M) ve Trityum Üretim Oranı (TBR) ..... 10**
**1.5.Nükleer Atıklar. ..... 10**
**1.6.Nükleer Atıkların Oluşumu. ..... 10**
**1.6.1.Fisyon Ürünlerinin Oluşumu ..... 10**
**1.6.2.Transuranyum Elementlerinin Oluşumu ..... 11**
**1.7.Atık Dönüştürme ..... 11**
**1.7.1.Minör Aktinitlerin Yakılması/Dönüştürülmesi ..... 12**
**1.7.2.Fisyon Ürünlerinin Dönüştürülmesi ..... 12**

**1.7.2.1.Termal Reaktörde Atıkların Dönüştürülmesi ..... 13**
**1.7.2.2.Hızlı Reaktörde Atıkların Dönüştürülmesi..... 13**
**1.7.2.3.Füzyon Sürücülü Reaktörde Atıkların Dönüştürülmesi ..... 14**
**1.7.2.4.Hibrit Sistemlerde Atıkların Dönüştürülmesi ..... 15**
**1.8.Füzyon-Fisyon Sürücülü Hibrit Reaktör Yapısı ..... 16**

## 2. BÖLÜM

## NÜKLEER ENERJİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ

**2.1.Giriş ..... 19**
**2.2.Hidrojen ..... 20**
**2.3.Hidrojen Üretim Metotları..... 21**
**2.3.1.Buhar Metan Reformasyonu..... 22**
**2.3.2.Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz..... 22**
**2.3.3.Sülfirik Asit-İyot Çevrimi (S-I Çevrimi)..... 24**
**2.4.Hidrojen Enerjisinin Kullanım Alanları..... 25**
**2.5.Füzyon Sürücülü Sistemde Termal Güç Akışı ..... 25**
**2.6.Füzyon Sürücülü Sistemde Hidrojen Üretimi ..... 27**
**2.7.Nükleer Hidrojen Üretimi Üzerine Yapılan Çalışmalar ..... 28**

## 3. BÖLÜM

## SAYISAL HESAPLAMALAR

**3.1.Blanket Geometrisi..... 31**
**3.2.Hesaplama Metodu ..... 33**
**3.3.Fiziksel Parametrelerin Hesaplanması ..... 36**
**3.3.1.Enerji Çoğalım Katsayısı..... 36**
**3.3.2.Nötron Akısı ve Reaksiyon Oranı..... 36**

**3.4.Sayısal Sonuçlar ..... 37**

**3.4.1.Fisyon Reaksiyon Yoğunluğu ..... 37**
**3.4.2.n,γ Reaksiyon Yoğunluğu ..... 41**
**3.4.3.Trityum Üretim Yoğunluğu ..... 54**
**3.4.4.Nötron Çoğalım Oranı ..... 59**
**3.4.5.Nötron Kaçağı Oranı ..... 60**
**3.4.6.Fisyon Nötron Çoğalım Oranı ..... 61**
**3.4.7.Fisyon Oranının Değişimi ..... 62**
**3.4.8.n,γ Reaksiyon Oranı ..... 63**
**3.4.9.Trityum Üretim Oranı (TBR) ..... 68**
**3.4.10.Blanket Enerji Çoğalım Katsayısı ..... 69**
**3.4.11.Hidrojen Üretimi ..... 70**

## 4. BÖLÜM

## TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

**4.1.Hibrit Reaktördeki Yakıt Dönüşümü ve Nötronik Performans Sonuçları ..... 72**
**4.2.Nükleer Hidrojen Üretimi Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar ..... 73**

**KAYNAKLAR ..... 74**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 79**

# KISALTMALAR VE SİMGELER

**Kısaltmalar**

| **Sembol** | **Anlamı** | **Birimi** |
|---|---|---|
| AHTR | İleri Yüksek Sıcaklıklı Reaktör | -- |
| DD | Döteryum-Döteryum | -- |
| DT | Döteryum-Trityum | -- |
| FR | Hızlı Reaktör | -- |
| FÜ | Fisyon Ürünü | -- |
| FSS | Füzyon-Sürücülü Sistem | -- |
| HTE | Yüksek Sıcaklıklı Elektroliz | -- |
| HTGR | Yüksek Sıcaklıklı Gaz Reaktörü | -- |
| HTR | Yüksek Sıcaklıklı Reaktör | -- |
| HTSE | Yüksek Sıcaklıklı Buhar Elektrolizi | -- |
| HTTR | Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutuculu Reaktör | -- |
| IAEA | Uluslar arası Atom Enerjisi Acentesi | -- |
| ID | İlk Duvar | -- |
| JAEA | Japonya Atom Enerjisi Ajansı | -- |
| LWR | Hafif Sulu Reaktör | -- |
| MA | Minör Aktinit | -- |
| MOX | Karışmış Oksit | -- |
| Q | Enerji Kazanımı | -- |
| P | Güç | (Watt) |
| PWR | Basınç Sulu Reaktör | (MW) |
| $\Re$ | Üst Isıl Değer | (MJ/kg) |
| RB | Reflektör Bölgesi | -- |
| S-I | Sülfür-İyot | -- |
| TRU | Transuranik Elementler | -- |
| TÜB | Trityum Üretim Bölgesi | -- |
| VHTR | Çok Yüksek Sıcaklıklı Reaktör | -- |
| YB | Yakıt Bölgesi | -- |
| YSA | Yüksek Seviyeli Atık | -- |

Semboller

| | | |
|---|---|---|
| C | Işık hızı | (m/s) |
| P | Yoğunluk | ($kg/m^3$) |
| M | Enerji Çoğalım Katsayısı | -- |
| M | Kütle | (kg) |
| )N | Atomik Yoğunluk | ($atom/cm^3$) |
| $N_0$ | Avagadro Sayısı [$6.023.10^{23}$ ] | (atom/mol) |
| $R_x$ | x-Reaksiyon Oranı | (reaksiyon/s) |
| $T_{1/2}$ | Yarı Ömür | |
| $T_6$ | $^6$Li (n,α)T reaksiyonundan elde edilen trityum üretim oranı | -- |
| $T_7$ | $^6$Li (n,n',α)T reaksiyonundan elde edilen trityum üretim oranı | -- |
| α | Alfa Partikülü | -- |
| β | Kazanç Oranı | -- |
| ΔT | Ayrılık Zaman Aralığı | -- |
| Φ | Saniyedeki Füzyon Nötronu Sayısı | (n/sn) |
| Σ | Mikroskopik Tesir Kesiti | (barn) |
| ξ | Elektrik Güç Yüzdesi | -- |
| H | Verim | -- |
| Λ | Bozunma Sabiti | -- |

Alt indisler

| | | |
|---|---|---|
| Aux | Destek Sistemi | -- |
| Cir | Sirkülasyon | -- |
| Ds | Sürücü Sistem | -- |
| Eh | Hidrojen Üretimi için Elektirik | -- |
| F | Fisyon | -- |
| H | Hidrojen | -- |
| İhx | Ara Isı Eşenjörü | -- |
| Th | Termal | -- |

# TABLOLAR LİSTESİ

**Tablo 1.1..Fisyondan elde edilen enerjinin dağılımı [2] .....5**

**Tablo 3.1. PWR-UO2 yakıt karışımında aktinit yüzde oranları [54].....27**

**Tablo 3.2. Hibrit reaktörün bölgeleri ve yakıt kompozisyonları.....37**

**Tablo 3.3. Malzeme yoğunlukları [gr/cm$^3$] .....39**

# ŞEKİLLER LİSTESİ

**Şekil 1.1. Fisyon reaksiyon şeması [1] ..... 4**

**Şekil 1.2. Fertil-fisil dönüşümü şeması ..... 5**

**Şekil 1.3. Nükleer füzyon reaksiyonu [3] ..... 6**

**Şekil 1.4. Hibrit blanketin yapısı ..... 16**

**Şekil 1.5. Yakıt çubukları ..... 17**

**Şekil 2.1. Hidrojen üretiminin genel şeması ..... 21**

**Şekil 2.2. Hidrojen üretimi metodları ..... 21**

**Şekil 2.3. Yüksek sıcaklıklı elektroliz prosesi ..... 22**

**Şekil 2.4. Elektroliz proses şeması ..... 23**

**Şekil 2.5. Sülfür-iyot proses ..... 24**

**Şekil 2.6. FSS hidrojen üretimi akış şeması [34] ..... 26**

**Şekil 3.1. Hibrit blanketin tek boyutlu kesit görüntüsü ..... 32**

**Şekil 3.2. TRU çekirdeklerine ait nötron yakalama ve sonrasında meydana gelen bozunma reaksiyonları ..... 35**

**Şekil 3.3. Yakıt 1 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 37**

**Şekil 3.4. Yakıt 2 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 38**

**Şekil 3.5. Yakıt 3 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 39**

**Şekil 3.6. Yakıt 4 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 40**

**Şekil 3.7. Yakıt 5 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 41**

**Şekil 3.8. Yakıt 1 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 232Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 42**

**Şekil 3.9. Yakıt 1 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 238U n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 43**

**Şekil 3.10. Yakıt 2 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 232Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 44**

**Şekil 3.11. Yakıt 2 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 237Np n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 45**

**Şekil 3.12. Yakıt 3 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 232Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 46**

**Şekil 3.13. Yakıt 3 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 239Pu n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 47**

**Şekil 3.14. Yakıt 3 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 240Pu n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 48**

**Şekil 3.15. Yakıt 4 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 232Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 49**

**Şekil 3.16. Yakıt 4 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 241Am n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 50**

**Şekil 3.17. Yakıt 4 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 243Am n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi ..... 51**

**Şekil 3.18. Yakıt 5 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 232Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi .....52**

**Şekil 3.19. Yakıt 4 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 244Cm n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi .....53**

**Şekil 3.20. Yakıt 4 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki 245Cm n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi .....54**

**Şekil 3.21. Yakıt 1 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki trityum üretim yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi .....55**

**Şekil 3.22. Yakıt 2 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki trityum üretim yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi .....56**

**Şekil 3.23. Yakıt 3 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki trityum üretim yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi .....57**

**Şekil 3.24. Yakıt 4 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki trityum üretim yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi .....58**

**Şekil 3.25. Yakıt 5 için silindirik ve küresel yakıt bölgesindeki trityum üretim yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi .....59**

**Şekil 3.26. Yakıt 1-5 için minöraktinitdioksit,UO2 ve PuO2 karışım yüzdesine göre blankette nötron çoğalım oranının değişimi .....60**

**Şekil 3.27. Yakıt 1-5 için minöraktinitdioksit,UO2 ve PuO2 karışım yüzdesine göre blanketteki nötron kaçağı oranının değişimi .....61**

**Şekil 3.28. Yakıt 1-5 için minöraktinitdioksit,UO2 ve PuO2 karışım yüzdesine göre blanketteki fisyon nötron çoğalım oranının değişimi .....62**

**Şekil 3.29. Yakıt 1-5 için minöraktinitdioksit,UO2 ve PuO2 karışım yüzdesine göre blanketteki fisyon oranının değişimi .....63**

**Şekil 3.30. Neptünyumdioksit yüzdesine göre blanketteki 237Np n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 64**

**Şekil 3.31. Uranyumdioksit yüzdesine göre blanketteki 238U n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 64**

**Şekil 3.32. Plütonyumdioksit yüzdesine göre blanketteki 238Pu n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 65**

**Şekil 3.33. Plütonyum yüzdesine göre blanketteki 239Pu n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 65**

**Şekil 3.34. Amerikyumdioksit yüzdesine göre blanketteki 242Am n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 66**

**Şekil 3.35. Küryumdioksit yüzdesine göre blanketteki 242Cm n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 66**

**Şekil 3.36. Küryumdioksit yüzdesine göre blanketteki 244Cm n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 67**

**Şekil 3.37. Küryumdioksit yüzdesine göre blanketteki 246Cm n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 67**

**Şekil 3.38. Toryumdioksit yüzdesine göre blanketteki 232Th n,γ reaksiyon oranının değişimi ..... 68**

**Şekil 3.39. Minör aktinitdioksit,UO2 ve PuO2 yüzdesine göre blanketteki TBR oranı değişimi ..... 69**

**Şekil 3.40. Minör aktinitdioksit,UO2 ve PuO2 yüzdesine göre blanketteki enerji çoğalım katsayısı oranı değişimi ..... 70**

**Şekil 3.41. Enerji çoğalım katsayısına göre hidrojen üretimi değişimi ..... 7**

# GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyılda dünya nüfusunun artışı ve endüstrileşme sürecinden dolayı Dünya'da ve Türkiye'de hızla artan enerji ihtiyacı olmuştur ve bilinen enerji kaynakları hızla tükenmektedir. Bu sebepten dolayı yeni enerji kaynakları üzerine araştırmalar yapılmıştır. Ve yapılan araştırmalar sonucu enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımına yönelmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Enerji ihtiyacı giderilirken bir diğer önemli konuysa çevreyle uyumlu enerji kaynaklarına yönelmektir. Bundan dolayı hidrojen enerjisine olan ilgi artmıştır. Hidrojenin yüksek miktarlarda enerji sağlayıp çevre dostu olmasından dolayı geleceğin enerjisi olduğu düşünülmektedir. Hidrojen doğada bulunmayıp ikincil bir enerji kaynağıdır. Bu sebeple çeşitli yöntemlerle hidrojen elde edilir. Hidrojen üretiminde yüksek sıcaklık ve enerji sağladığından dolayı nükleer enerji çok sık kullanılmaktadır. Nükleer enerji yüksek verimlilikte enerji sağlayacaktır fakat ABD'de Three Mile Islant (L929) ve Rusya'da Chernobyl (1986) olaylarından sonra nükleer enerji kullanımında güvenlik önlemleri almak istenilmiştir. ABD'de ve Rusya'da yaşanan olaylardan bu yana geçen 20 yılda nükleer enerji üretimini Uluslararası Enerji Ajansına (International Atomic Energy Agency, IAEA) göre güvenlik konularında önemli adımlar atılmıştır. Ve yeni nesil teknolojilere geçilmiştir.

Nükleer enerji için beklenen potansiyel teknolojik gelişmeler doğrudan rektörle ilgilidir. Nükleer teknolojinin kullanılmasıyla büyük miktarda radyoaktif atık oluşmaktadır. Dünya ülkeleri bu problemi ortadan kaldırmak için büyük bir caba harcamaktadır. Nükleer reaktörlerde üretilen füzyon ürünleri ve transüronik elementler potansiyel nükleer atıkların başlıcalarıdır. Dünya'da bazen birçok ülkenin nükleer atık sorunu için bulduğu çözüm nükleer atıkların yer altı depolarda depolanmasıdır. Fakat atıkların uzun

yıllar boyunca depolanamaması ve tam olarak güvenli olmamasından dolayı sıkıntılı bir çözümdür. Bundan dolayı daha yenilikçi yaklaşım düşünülmektedir. Bu yenilikçi yaklaşım uzun ömürlü atıkların ömrünü kısaltmak ya da karalı izotoplara çevirmektir.

Bu tezin amacı füzyon sürücülü bir sistemin kullanılmış yakıt kullanarak yakıt dönüşümünü sağlamak ve ayrıca reaktörden elde edilen ısı ve elektrik ile farklı hidrojen üretim metotları kullanarak hidrojen üretim potansiyelini araştırmaktır. Bu amaç ile nükleer hidrojen üretiminde uygulaması olan buhar metan reformasyonu, yüksek sıcaklıklı elektroliz ve sülfür-iyot çevrimi üzerine çalışmalar gerçekleştirildi. Bu çalışmalar sonucunda enerji çoğalım katsayısı, yakıt geçleştirme miktarı ve hidrojen üretim miktarları tespit edilmiştir.

# 1. BÖLÜM

# NÜKLEER ATIKLAR VE FÜZYON-FİSYON SÜRÜCÜLÜ HİBRİT REAKTÖRLER

## 1.1. Nükleer Reaksiyonlar

Kararlı yapıya sahip atomlar dışarıdan müdahale ile istenen herhangi bir atoma dönüştürülemezler. Bazı kararlı olmayan atomlar dışarıdan müdahale ile dışarıdan müdahale periyodik cetveldeki başka bir atoma dönüştürülebilirler. Dönüşüm sonrası ilk kütleye göre kütle kaybı oluşacaktır. Oluşan kütle farkının ışık hızının karesi katı kadar nükleer enerji oluşur ve şu şekildedir:

$$E=\Delta m \cdot c^2 \tag{1.1}$$

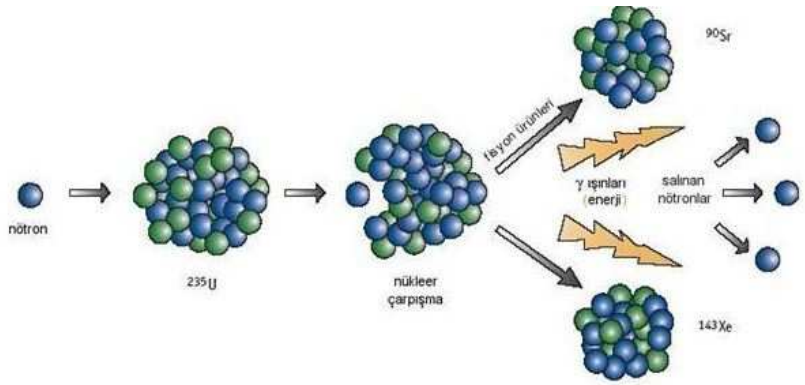
Denklem (1.1)'de $\Delta m$= kütle kaybı c=ışık hızı şeklinde açıklanmıştır.

Çekirdeği oluşturan proton ve nötronların kütleleri toplamı çekirdeğin gerçek kütlesinden büyüktür. Çekirdeği ayırmak için büyük bir enerji gerekir ve bu enerji çekirdek oluşumunda dışarı atılır. Çekirdeği parçalamak için verilmesi gereken bu enerjiye bağ enerjisi denir.

Nükleer reaksiyonlar meydan gelirken gerekli olan 4 temel kanun aşağıdaki gibidir.

-Nükleonların korunumu
-Yüklerin korunumu
-Momentum korunumu
-Kütle ve enerji korunumu

a) **Fisyon (çekirdek bölünmesi) reaksiyonu:** Ağır ve kararsız yapıya sahip $^{233}U$, $^{235}U$, $^{239}Pu$ ve $^{241}Pu$ gibi radyoaktif çekirdeklerin bir nötron yakalaması sonucu iki hafif çekirdek ve enerji oluşturmasına fisyon denir. Fisyon sonucu 2-3 nötron ve 200 MeV'lik enerji çıkar. Bu nötronların enerjileri ortalama 2-3 MeV'dir. Fisyon reaksiyonunu Şekil 1.1'de verilmiştir.




Şekil 1.1. Fisyon reaksiyon şeması [1]

Fisyon sonucu elde edilen enerjinin dağılımı Tablo 1.1'deki gibidir.

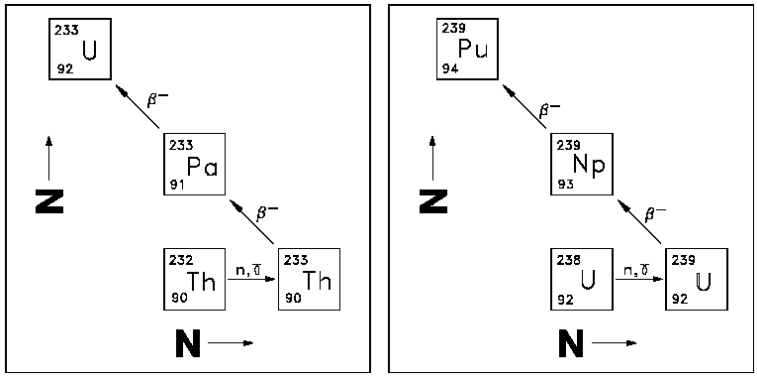
Tablo 1.1. Fisyondan elde edilen enerjinin dağılımı [2]

| | |
|---|---|
| Fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi | 165±5 MeV |
| Hızlı gama ışıması | 7±1 MeV |
| Nötronun kinetik enerjisi | 5±0.5 MeV |
| Ürün bozulmasından oluşan beta parçacığı | 7±1 MeV |
| Ürün bozulmasından oluşan alfa parçacığı | 7±1 MeV |
| Ürün bozulmasından oluşan nötronlar | 10 MeV |
| TOPLAM | 200±6 MeV |

Fisyon yakıtları ikiye ayrılır.

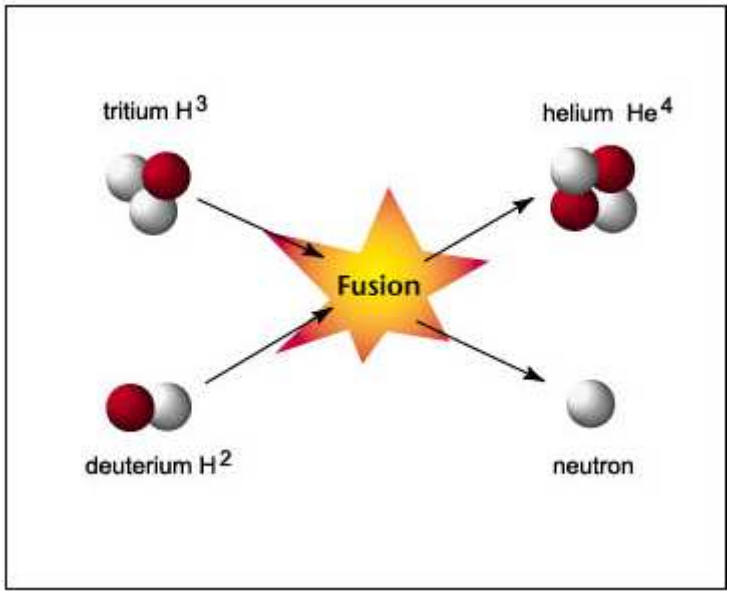
- Termal nötronlarla (En≤0025) parçalanabilen fisil yakıtlar ($^{233}U$, $^{235}U$, $^{239}Pu$ ve $^{241}Pu$)
- Hızlı nötronlarla parçalanabilen yakıtlardır. “Fertil-Fisil” dönüşümüyle fisil yakıtlara dönüşebilen fertil yakıtlar. Fertil yakıtlar ($^{232}Th$, $^{238}U$, $^{240}Pu$, $^{242}Pu$)

Fertil yakıtlar nötron yakalaması sonucunda bir seri radyoaktif bozunma ile fisil yakıtlara dönüşürler. Fertil-fisil dönüşüm şeması Şekil 1.2’de ki gibidir.




Şekil 1.2. Fertil-fisil dönüşüm şeması

b) **Füzyon (çekirdek kaynaması) reaksiyonu:** Fisyondaki ağır çekirdeğin bölünerek kararlı hale gelmesi durumunun tersine hafif çekirdeklerin birleşerek daha kararlı bir çekirdeğe dönüşmesi reaksiyonudur.Şekil 1.3’te füzyon reaksiyonu verilmiştr. Reaksiyon sırasında açığa çıkan enerjiye füzyon enerjisi denir. 2 adet temel füzyon reaksiyonu vardır.




Şekil 1.3. Nükleer füzyon reaksiyonu [3]

- <u>D-D (Döteryum-Döteryum) füzyon reaksiyonu:</u> Bu reaksiyon iki döteryum çekirdeğinin doğrudan reaksiyona girmesiyle oluşan füzyon reaksiyonudur. Denklem (1.2) ve (1.3)'de gösterildiği şekilde meydana gelir.

$$ {}_1^2D + {}_1^2D \rightarrow {}_1^3T + {}_1^1H + 4.03MeV(\%50) \quad (1.2) $$

$$ {}_1^2D + {}_1^2D \rightarrow {}_2^3He + {}_0^1n + 3.27MeV(\%50) \quad (1.3) $$

D-D reaksiyonu 48 KeV (1 eV yaklaşık olarak 11600 K'tır)'luk yüksek bir sıcaklıkta meydana gelir. Döteryum deniz suyunda bulunduğundan dolayı kolaylıkla elde edilebilir.

- <u>D-T (Döteryum-trityum) füzyon reaksiyonu:</u> Bir döteryum ve bir trityum çekirdeğinin reaksiyonu sonucu ortaya çıkan füzyon reaksiyonudur. Ve denklem (1.4)' te gösterildiği gibi meydana gelir.

$$ {}_1^2D + {}_1^3T \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n + 17.6MeV \quad (1.4) $$

D-T reaksiyonu için 4.4 KeV'luk bir sıcaklık gerekmektedir. Reaksiyon sonucu 17.6 MeV'lik büyük bir enerji çıkar. Bu reaksiyonun tesit kesiti büyüktür. Döteryum deniz suyunda kolaylıkla elde edilebilen hidrojenin doğal bir izotopudur. Ancak, trityum hidrojenin yapay bir izotopu olduğundan dolayı lityumun nötronla etkileşmesi sonucu meydana gelir. $T_6$ ve $T_7$ trityum üretim oranlarıdır ve trityum doğada bulunmadığı için aşağıdaki reaksiyonlarla üretilir.

$$^{6}Li + n \rightarrow T + He + .4.784 MeV \qquad (1.5a)$$

$$^{7}Li + n \rightarrow T + He + n' - 2.467 MeV \qquad (1.5b)$$

Bu reaksiyonlar sonucu elde edilen $T_6$ ve $T_7$ 'nin toplam trityum üretim oranını verir.

**1.2. Nötron-Madde etkileşimi**

Nötronun çekirdekle etkileşme ihtimaline "tesir kesiti" denilir. Bir nötronun bir çekirdekle reaksiyon yapma ihtimaline mikroskobik tesir kesiti ( σ ) denir. Bir nötronun N adet çekirdekle reaksiyon yapma ihtimaline makroskopik tesir kesiti denir ve birimi 1/cm dır. Nötronun çekirdek ile etkileşimi ya saçılma ya da absorbsiyon reaksiyonlarıyla olacaktır.

1-Saçılma reaksiyonları
-Elastik saçılma
-İnelastik saçılma

2-Absorbsiyon reaksiyonları
-Radyoaktif yakalama
-Tanecik yayımlanması ile bozunma
-Fisyon

Birim zamanda bozunan atom miktarına bozunma sabiti denir. Radyoaktif çekirdeklerin her biri farklı oranda bozunurlar yani bozunma sabitleri de kendilerine özgüdür. Radyoaktif maddenin atomlarından zaman biriminde bozunan miktarı o anda var olan atomların sayısı ile orantılıdır. Bu ilkeye Radyoaktiflik tabii yasası denir.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \tag{1.6}$$

t=0 anında atomların sayısı $N_0$ olmak üzere herhangi bir t anında kalan atomların sayısı (N) denklem (1.7)'den elde edilir.

$$N=N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \tag{1.7}$$

Bir radyoaktif çekirdeğin miktarının yarısının bozunmasında geçen süreye yarı ömür denilmektedir ve $T_{1/2}$ ile gösterilir. Yarı ömür atomun kararlılığını ifade eder. Yarı ömür ile kararlılık doğru orantılıdır ve dolayısıyla yarı ömür arttıkça karalılıkta artar. Bu ifadeye göre başlangıçta çekirdek sayısı No olan radyoaktif çekirdek sayısının yarıya düşmesi durumunda $N=N_0/2$ olacaktır. Denklem (1.7)' deki bilgiye göre düzenleyecek olursak

$$\frac{N_O}{2} = N_O \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \tag{1.8}$$

şeklinde olur. (1.8) denklemiyle $T_{1/2}$ 'ye göre düzenlenirse Eş. ( 1.9) elde edilir:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \tag{1.9}$$

**1.3. Reaksiyon Enerjisi**

Nükleer reaksiyonlar kütle enerji korunumu kuralına göredir. Reaksiyon sonrası kütle-enerji toplamı reaksiyon öncesi kütle-enerji toplamına eşittir. Herhangi bir nükleer reaksiyonu denklem (1.10)'deki gibi gösterirsek

$$A+B \rightarrow C+D \tag{1.10}$$

Kütle enerji konumuna göre bu reaksiyon enerji eşdeğer hesabı yapılabilir. Buna göre reaksiyona giren A ve B taneciklerinin durgun kütle enerjileri ile kinetik enerjilerinin toplamı C ve D taneciklerinin durgun kütle enerjileri ile kinetik enerjileri toplamına

eşitleyerek hesaplanılır. Bu ifadeyi kütle enerji korunmasına göre düzenleyecek olursak denklem (1.11)'daki şekilde ifade edilebilir.

$$E_A + E_B + m_A \cdot c^2 + m_B \cdot c^2 \rightarrow E_C + E_D + m_C \cdot c^2 + m_D \cdot c^2 \qquad (1.11)$$

Burada E kinetik enerjiyi ve m durgun enerjiyi göstermektedir. Denklem düzenlendiğinde:

$$(E_C + E_D) - (E_A + E_B) \rightarrow [(m_A + m_B) - (m_C + m_D)] \cdot c^2 \qquad (1.12)$$

Şeklinde yazılabilir. Denklem (1.12)'den de görüldüğü gibi taneciklerin reaksiyon öncesi ve sonrası kinetik enerji farkı taneciklerin önceki ve sonrası durgun kütle enerjileri farkına eşittir. Bu reaksiyondaki taneciklerin kinetik enerjileri arasındaki farka reaksiyon enerjisi (Q) denir.

$$Q = [(m_A + m_B) - (m_C + m_D)] \cdot c^2 \qquad (1.13)$$

veya

$$Q = \Delta m \cdot c^2 \qquad (1.14)$$

şeklinde ifade edilir. (1.14) denkleminde Q pozitif bir değer ise ekzotermik bir reaksiyondur. Yani taneciklerin kinetik enerjisinde net bir artış vardır. Q değeri negatif ise endotermik reaksiyondur. Yani taneciklerin kinetik enerjisinde net bir azalış vardır [4].

### 1.4. Enerji çoğalım katsayısı (M) ve Trityum üretim oranı (TBR)

Reaktörde elde edilen toplam enerjinin nötronun enerjisine oranıdır. Enerji çoğalım katsayısı (M) füzyon reaktörünün en önemli parametrelerinden biridir ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$M = (R_F \cdot E_f + 4.784 \cdot T_6 - 2.467 \cdot T_7 + 14.1)/14.1 \qquad (1.15)$$

Denklemdeki $R_F$ füzyon reaksiyon oranı, $E_f$'nin değeri yaklaşık 200 MeV olup füzyon başına enerjidir.

### 1.5. Nükleer Atıklar

Nükleer reaktörde yakıtlar yakıldıktan sonra enerji elde edilmesine rağmen nükleer atıklarda oluşmaktadır. Bu atıklar reaktördeyken uzun süre ışınım yaparlar ve dolayısıyla çevreye zarar verecek kadar radyoaktiftirler. Kararsız bir atom çekirdeğinin daha kararlı bir atom oluşturmak üzere bozunmasına radyoaktiflik denir. Radyoaktif atıklar özellikler atığın radyoaktivitesine, yarı ömürlerine, fiziksel durumuna (katı, sıvı veya gaz), yayılan radyasyon türüne göre çeşitli sınıflara ayrılabilir. Radyasyonun çok iyi zırhlanması açısından bu yakıtın derin su havuzlarında tutulması gerekir. Radyoaktif atıklar günlük hayatta birçok yerde oluşabilir. Bunların başlıcaları nükleer yakıt tesisleri, tıp, metalurji, kimya endüstrisi, biyoloji ve tarım alanlarıdır.

### 1.6. Nükleer Atıkların Oluşumu

Nükleer atığın iki temel bileşeni vardır. Bunlar fisyon ürünleri (FÜ) ve transuranyum (TRU) elementleridir.

#### 1.6.1. Fisyon Ürünlerinin Oluşumu

Uranyum gibi ağır kararsız bi yakıtın nötron yutmasıyla oluşan fisyon reaksiyonu sonucu iki hafif çekirdeğe bölünür ve oluşan hafif çekirdeklere fisyon ürünü denir.

Fisyon ürünleri aşırı nötrona sahip olmalarından (kararsız) beta ve gama yaymalarına neden olur.

Fisyon sonucu oluşan fisyon ürünlerinin kütle numaraları 60 ile 170 aralığındadır. Fisyon ürünleri fisyon reaksiyonu hemen sonrasında kararsızdır(aşırı nötrona sahiptir) β ve γ ışıması veya tanecik yayılımı ile bozunması sonucu kararlı elementlere dönüşürler.

### 1.6.2. Transuranyum Elementlerinin Oluşması

TRU'lar aktinitlerin nötron yakalama reaksiyonu yapması sonucu oluşur. $^{238}U$'un nötron yakalama reaksiyonu Denklem (1.16)'te verilmiştir.

$$n + {}^{238}U \rightarrow {}^{239}U \rightarrow {}^{239}Np + \beta \rightarrow {}^{239}Pu + \beta \qquad (1.16)$$

.

Amerikyum iki şekilde meydana gelir. Denklem (1.17)'de görüldüğü gibi $^{241}Pu$'un β bozunması yapması sonucu ve denklem (1.18)'da görüldüğü gibi $^{242}Pu$'un nötron yakalaması sonucu meydana gelir.[5].

$$( {}^{241}Pu \rightarrow {}^{241}Am + \beta ) \qquad (1.17)$$

$$( n + {}^{242}Pu \rightarrow {}^{243}Pu \rightarrow {}^{243}Am + \beta ) \qquad (1.18)$$

## 1.7. Atık Dönüştürme

Kullanılmış yakıtın %96,4'ü yeniden yakıt olarak kullanılabilen değerli yakıtlardır. Kalan %3,6'sı fisyon ürünleridir. Değerli fertil yakıtlarında fisyon ürünlerinin de dönüştürülmesi gerekir. Değerli fertil yakıtlar fisil yakıtlara dönüşürken; uzun ömürlü fisyon ürünlerinin de ömürleri kısaltılıp kararlı hale gelecektir.

Radyoaktif bir izotopun radyasyona maruz bırakılarak daha kararlı izotoplar oluşması işlemine dönüştürme denir. Radyoaktif izotopların dönüşümünde en verimli yöntem nötron absorbsiyonudur.

Rutherfort ve ark. [6] 1917'de elementlerin yapay dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Alfa taneciklerinin nitrojene bombardımanı sonucu, nitrojen oksijen ve protona dönüşmüştür.

$$\alpha + {}^{14}N \rightarrow {}^{17}O + {}^{1}p \tag{1.18}$$

### 1.7.1. Minör Aktinitlerin Yakılması/Dönüştürülmesi

Minör aktinit (MA) periyodik cetvelde aktinyum serisinde Plütonyumdan sonra gelen elementlerdir. Yani plütonyum dışındaki TRU' lardır. TRU elementlerine minör aktinit denir. Minör aktinitler neptünyum, amerikyum, küriyum, berkelyum, kaliforniyum, einsteniyum ve fermiyum içerir ve kullanılmış yakıttaki en önemli izotoplardır.

MA çekirdeği bir nötron yutması sonucunda ya fisyon yapar ya da yapmaz. Fisyon yapma tesir kesiti fisyon yapmama tesir kesitinden daha büyüktür. Reaktörde MA'ların dönüştürülmesi amaçlandığı için dönüşüm ihtimalinin fisyon yapma ihtimalinden büyük olması istenir. Çünkü fisyon sonucu reaktörde daha fazla MA oluşacaktır. Bunun yanı sıra Dönüştürme reaksiyonları sonucunda fertil-fisil dönüşümü gerçekleşmektedir.

### 1.7.2. Fisyon ürünlerinin dönüştürülmesi

Uzun ömürlü fisyon ürünlerinin nötron yakalama reaksiyonları ile kısa ömürlü ve daha kararlı bir hale gelir. Fisyon ürünleri yüksek seviyeli atıklardan (YSA) yüksek arıtma reaktörüyle tek tek ayrılması gerekir. Füzyon reaktörü veya spallasyon nötron kaynağından üretilen nötron akımı ile fisyon ürünlerinin dönüşümü sağlanabilir [7].

Var olan nükleer reaktör dönüşüm işlemleri gerçekleştirildiğinde kor güvenlik önlemleri uygulamakta tesislerin günlük çalışması, dönüştürme ve yakma alanlarının olmaması gibi birçok engel ortaya çıkar [8].

Temel olarak nötron kaynağıyla dönüşüm yapan sistemler şunlardır:

- Termal Reaktörler
- Hızlı Reaktörler

- Fisyon-füzyon Hibrit Reaktörleri

### 1.7.2.1 Termal Reaktörlerde atıkların dönüştürülmesi

Birçok araştırmacı hafif su reaktörleri (LWR) kullanarak MA'ların dönüştürülmesini önermiştir. LWR'ler de $^{237}$Np ve $^{241}$Am dönüştürülürken ilaveten uranyum zenginleştirilmesi gerekir. Çünkü fisyon reaksiyonları ile üretilen nötronlardan daha çok dönüştürme için nötronlar gerekir ve nötron balansı negatiftir.

Termal reaktörde verimli bir dönüşüm sağlamak için Np, Am, Cs gibi MA'larının nötron yakalama reaksiyonlarıyla termal enerji aralığından yakalanan tesir kesitlerinin yüksek olmasından yumuşak nötron spektrumları uygundur [9-10]. Tekeda ve Yokoyoma [11] termal reaktörde MA dönüştürülmesine nötron spektrumunun etkisini çeşitli moderatör/yakıt oranları için yanma hesapları yaparak gerçekleştirmiştir. Yumuşak spektrumda kullanılması sonucu daha ağır aktinitlerin birikmesine neden olmuştur. Sert spektrumlu yakıt hücrelerini kullanmak MA dönüştürülmesinde daha faydalıdır [12-15].

Uzun ömürlü fisyon ürünleri nötron yakalama reaksiyonlarıyla kararlı çekirdeklere dönüştürülebilir. Uzun ömürlü fisyon ürünlerinde termal nötronla reaksiyon ihtimali hızlı nötron reaksiyon ihtimalinden daha büyüktür. Ancak verimli bir dönüştürme için yüksek akılı termal reaktör kullanılmalıdır [16]. Mochida ve Yamashita [17] Np, Am, I ve Tc elementlerini U ve Pu elementleriyle birlikte kullanıp LWR'lerde yeniden işlenmelerini araştırmıştır. Dönüştürmede nötron balansı negatifliğinden dolayı ilave nötron oluşturması amacıyla zenginleştirilmiş uranyum kullanmak gerektiği görülmüştür.

### 1.7.2.2. Hızlı Reaktörlerde atıkların dönüştürülmesi

Fisyon ihtimalinden dolayı çekirdeklerin nötronları hızlı nötron spektrumunda önemlidir. Hızlı reaktörlerde daha iyi nötron ekonomisi sağlanır. Çünkü hızlı nötron spektrumunda fisyon yapma ihtimali daha fazladır.

Hızlı reaktörde (FR) sert nötron spektrumu ve yüksek akım olduğundan dolayı yavaşlatılmış hedeflerle MA'lar optimum şekilde dönüştürülebilir [8]. Hızlı üreten reaktörlerde (FBR) pozitif nötron balansı olur ve MA'lar direk fısyon yaptıkları için MA'ları dönüşümü LWR'lere göre daha fazladır [18].

Wakabayashi ve Higona [19] MA ve UÖFÜ dönüşümünü incelemişler ve sonuç olarak MA ve UÖFÜ' nin dönüşümde hızlı reaktörün çok iyi bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür.

Broeters ve arka [20] uranyum ötesi izotopların yakılmasını termal ve hızlı reaktörlerde incelemişlerdir.

Wakabayashi [21] MA ve UÖFÜ dönüşümünü HR' de incelemiş ve sonuçta hızlı reaktörün MA ve UÖFÜ' nin iyi bir dönüşüm sağladığını ve gelecekte çevresel sıkıntıları da önemli ölçüde azaltacağını da göstermişlerdir.

#### 1.7.2.3. Füzyon Sürücülü Reaktörlerde atıkların dönüştürülmesi

Bu reaktörler sera gazlarını yayması ve radyoaktif kazalara sebep olmaması sebebiyle ilgi çeken bir enerji kaynağıdır. Döteryum-Trityum (D-T) veya Döteryum-Döteryum (D-D) füzyon reaksiyonlu reaktörlerinde fisyon ve füzyon özelliklerin bir arada görüldüğü yerdir. Nötron kaynağı füzyon reaksiyonlarıyla elde edilen hibrit reaktör kritik altı reaktörlerdir ve dolayısıyla güvenlidirler .Hibrit reaktörün füzyon reaksiyonu ile oluşan nötronlarının blankette bulunan fertil malzemelerin ($^{238}U$, $^{232}Th$ gibi) tarafından yakalanmasıyla fısıl malzemelere ($^{239}Pu$, $^{233}U$ gibi) dönüşür. Hibrit sistemde yüksek enerjili nötron kullanılır ve İlaveten nötron üretilir. Ve bu sayede çoğalım faktörü 2'den büyük olurken, fisyon arttığından üretilen güç artacak ve aktinitlerin yakalanması da sağlanmış olur.

Füzyon reaksiyonu ile yüksek enerjili nötronlar oluşur ve blanketin içine girer. Blankette MA'lar, UÖFÜ'nun çekirdekleri ve nötron yakalama reaksiyonları ile bozunur ve dönüşürler. Blanketteki fisil malzemelerin fısyon reaksiyonu sonucunda nötron çoğalır. Bunun yanı sıra LWR'lerin kullanılmış yakıtı termal bir reaktörde kullanmak üzere dönüştürmesi de avantajlarındandır.

Yapılan araştırmalar sonucunda füzyon enerjisinin güvenilir ve çevre için sorun oluşturmayan bir enerji kaynağı olduğu görülmüştür. YSA'nın füzyon sürücülü reaktörde dönüştürülmesi birçok araştırmacının çalıştığı bir konudur.

#### 1.7.2.4. Hibrit Sistemlerde atıkların dönüştürülmesi

Yapıcı ve ark.[22] PROMETHEUS reaktöründe uzun ömürlü fisyon ürünlerinin dönüşüm potansiyelleri ve fisil yakıt üretim analizi incelenmiştir. Bu araştırmalar sonucunda etkili fisil üretim ve etkili UÖFÜ dönüşümü olduğu görülmüştür.

Gohar [23] eriyik tuz füzyon blanketin de kullanılmış yakıt ve uranyum ötesi elementlerin yok etme potansiyelini araştırmıştır. Çalışma sonucunda kullanılmış nükleer yakıt ve uranyum ötesi elementlerin yok edilmesi probleminde tam ve etkili bir çözüm elde edilmiştir.

Yapıcı [24] D-T füzyon sürücülü reaktörde minör aktinitlerin yanma ve dönüşüm oranları araştırılmıştır. TRU elementleri ve MA'ların iyi bir dönüşüm potansiyel olduğu ve trityum reaktörün kendini besleyecek kadar üretildiği görülmüştür.

Şahin ve ark.[25] toryum fisyon-füzyon üreticisinde doğal $UO_2$ ile birlikte fertil yakıt karışımı ve LWR kullanılmış yakıt kullanarak fisil yakıt üretimi araştırılmıştır. Bu araştırmada 4 farklı soğutucu seçilmiştir. Bunlar basınçlı helyum/flibe**,** doğal lityum $Li_{17}Pb_{83}$ 'tür Ve 2 farklı MOX yakıt kompozisyonu seçilmiştir. Sonuç olarak iyi bir dönüşüm gerçekleştirilip fisil yakıt üretimi gerçekleştirilmiştir.

Slacey [26] D-T TOKOMAK füzyon nötron kaynağında yakıt dönüştürme potansiyelini araştırmıştır. Çalışmalar sonucunda iyi bir dönüştürme potansiyeli olduğu görülmüştür.

Serikov ve ark [27] füzyon güç reaktöründe uzun ömürlü minör aktinitlerin dönüştürülmesini araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda trityum üretiminin iyi bir potansiyele sahip olduğu ve aktinit dönüştürülmesinin yüksek olduğu görülmüştür.

Yapıcı ve ark [28] PROMETHEUS-H füzyon reaktöründe PWR (basınçlı su reaktörü) kullanılmış yakıtından çıkarılan MA çekirdeklerinin yakılması ve dönüştürülmesi

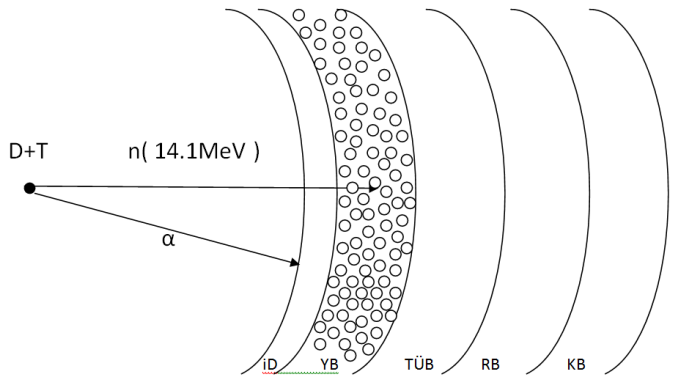
araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda MA'ların daha çok çekirdek değiştirmeleriyle dönüştürüldükleri gösterilmiştir. Enerji çoğalım katsayısının da yüksek olduğu görülüp, MA çekirdeklerinin yarı ömürleri etkili bir şekilde azaltılmıştır.

### 1.8. Füzyon-fisyon sürücülü hibrit reaktörlerin yapısı

Nükleer reaktörlerden büyük miktarda enerji elde edilirken aynı zamanda nükleer atıklarda oluşmaktadır. Nükleer reaktörde oluşan bu atıkların giderilmesi için çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Bunlardan biri de füzyon-fisyon hibrit reaktörleridir. Bu reaktörlerde nükleer atıklar kullanılırken aynı zamanda nükleer reaktörler için gerekli yakıt da üretilmektedir. Böylece hem nükleer atık problemine çözüm üretilmiş hem de nükleer yakıt elde yakıt elde edilmiş olacaktır. Bu reaktörde fertil yakıtlar ($^{238}U$, veya $^{232}Th$ ) fertil-fisil dönüşümü sonucunda fisil yakıtlara dönüşür ve kısmen de füzyon sonucu enerji açığa çıkar. Bu reaktörler fisyon ve füzyon reaksiyonları bir arada gerçekleştirildikleri için hem yakıt üretimi hem enerji üretimi yapabilmektedirler.

Hibrit reaktörde fertil-fisil dönüşümü sonucunda üretilen fisil yakıtın uygun yöntemlerle termal reaktöre aktarılması büyük avantaj sağlar. Ayrıca bu reaktörde blanket kritik altı çalıştığından dolayı yüksek güvenlik faktörüne sahiptir. Ayrıca, nükleer atıklardan fisil yakıtlar üretilebilmektedir.

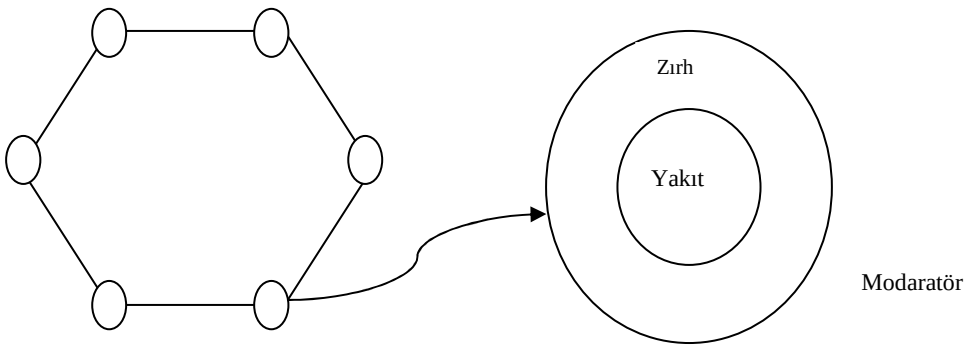
Hibrit blankette fisyon/füzyon ve üretim reaksiyonları olur. Bu reaksiyonlar blanketin katmanlarından meydana gelir. Şekil 1.4'de örnek blanketin katmanları gösterilmiştir.




Şekil 1.4. Hibrit blanketin yapısı

**İlk Duvar (İD):** İlk duvar füzyon reaksiyonu sonucu oluşan yüksek sıcaklığa dayanıklı bir malzemeden meydana gelir. Genellikle paslanmaz çelik, karbon kompozit veya silisyum karbür kullanılır. İlk duvar plazmadan kaynaklanan elektromanyetik radyasyon ve yüklü tanecik bombardımanından blanketin diğer katmanlarını (ilk duvardan sonra gelen bütün katmanları) korumalıdır.

**Yakıt Bölgesi (YB):** Bu bölgede Şekil 1.5' de görüldüğü gibi yakıt çubukları bulunmaktadır. Bu bölge de kullanılmış yakıtın gençleştirilmesi ve fertil yakıtın fisil yakıta dönüştürülmesi sağlanabilir. Ayrıca yakıt bölgesinde minör aktinitler verimli bir şekilde değerli fisil yakıtlara dönüştürülürken, uzun ömürlü fisyon ürünlerinin ömürleri kısaltılıp kararlı hale getirilebilir.




Şekil 1.5. Yakıt çubukları

**Trityum Üretim Bölgesi (TÜB):** Genellikle lityum oksit, flibe veya lityumdan meydana gelir. D-T füzyon sürücüsü için gerekli olan trityum bu katmanda üretilir.

**Reflektör Bölgesi (RB):** Bu bölge trityum üretim bölgesinin arkasında olabileceği gibi yakıt bölgesinin de arkasında olabilir. Malzeme olarak genellikle grafit kullanılır. Bu bölgede blanketten kaçan nötronlar geri blankete yansıtılır. Bunun için seçilen malzemenin saçılma tesir kesiti absorbe tesir kesitinden çok daha büyük olmalıdır.

**Kalkan Bölgesi (KB):** Blanket dışarısına nötron sızıntısını engellemek için kullanılan bir bölgedir. Yüksek nötron absorbe etme özelliğinden dolayı $B_4C$ (bor karbür) kullanılır.

# 2. BÖLÜM

# NÜKLEER ENERJİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ

## 2.1. Giriş

Giderek artan nüfus ile enerji ihtiyacı artmıştır. Birçok araştırmacı yeni enerji kaynakları araştırmaktadır. Enerji kaynağı ararken temiz yenilenebilir olması istenmektedir. Çevre dostu enerji kaynaklarından biri olan hidrojen enerji potansiyeli yüksektir. Hidrojen doğada serbest halde bulunmayıp bileşik halinde bulunduğundan dolayı birincil enerji kaynağı değildir. Biyokütle, hidrokarbonlar ya da sudan üretilmektedir. Hidrojen üretimi için nükleer, rüzgar veya güneş gibi enerji kaynakları kullanılabilir. Hidrojen üretimi için yüksek sıcaklıklar gerektiğinden dolayı nükleer enerji hidrojen üretiminde iyi bir seçim olacaktır. Son zamanlarda, nükleer enerji kullanarak en geçerli hidrojen üretim teknolojisi suyu elektrik enerjisi kullanarak oksijen ve hidrojene ayıran geleneksel elektrolizdir. Bugün kullanılan reaktörlerin en yaygın tipi olan Hafif Su Reaktörleri (LWR), hidrojen, elektrik veya her ikisini üretebilir. Elektroliz maliyeti düşürüyorken ve fosil yakıtları maliyeti artıyorken, elektrik üreten nükleer kullanarak suyun elektrolizi ile hidrojenin nükleer üretimi artan bir şekilde çekici olmaktadır. Ancak, daha uzun bir sürede (yaklaşık 2020 den sonra) en ümit verici nükleer hidrojen üretim teknolojisi muhtemelen gelişmiş, yüksek ısılı gaz reaktörlerde üretilen yüksek sıcaklıkları kullanacaktır.

Mevcut LWR teknolojisi yaklaşık %25 genel bir verimlilikle elektroliz yoluyla hidrojen üretmek için elektrik meydana getirebilir. Ancak, önerilen gelişmiş HTGR (yüksek sıcaklıklı gaz reaktörleri) çok daha etkili olarak (%50'ye yakın) elektrik ve hidrojen üreterek daha yüksek sıcaklıklar da çalışır. Bu gelişmiş reaktörler potansiyel

olarak bugün Birleşik Devletlerde kullanılan mevcut LWR'lere daha üstün birçok avantaja sahiptir.
Elektroliz gibi, her iki teknoloji suyu hidrojen ve oksijene ayırır. Her iki teknoloji de ekonomik, çıkan serbest hidrojen için yüksek ısılı sıcaklığı kullanır.

Nükleer bir reaktörde, uranyum atomunun bölünmesi ile ısı oluşur. Bu ısı yararlı bir iş yapmak için daha sonra reaktörün dışına ısıyı taşıyabilen bir soğutucu sıvıyı ısıtmak için kullanılabilir. Bir Hafif Su reaktöründe (LWR, en yaygın kullanılan), soğutma sıvısı daha sonra bir türbin çeviriminde, akım oluşturmak ve elektrik üretmek için kullanılmış olan sudur. Yüksek Sıcaklıkta Gaz Soğutuculu Reaktörler (HTGR'ler) geleneksel Hafif Su Reaktörlerine (LWR) bir alternatifi önerir. HTGR'ler reaktörde nükleer fisyon reaksiyonundan ısıyı kullanan diğer ekiplere kadar ısı transfer etmek için helyum gazını kullanır. Isı elektrik oluşturmak için bir gaz türbinine sürerek veya akım meydana getirerek benzer fonksiyonlar oluşturabilir veya hidrojen oluşumu için kullanılabilir. Bir soğutucu olarak, helyum sıvı soğutuculardan (genel olarak su) daha yüksek ıslarda çalışabilir. Bu reaktörün daha çok daha yüksek verimlilikte çalışmasına izin verir ve yüksek ısılı elektroliz ve termo-kimyasal su ayrışması gibi gelişmiş hidrojen üretme teknolojileri için ısı gereksinimini sağlar [30].

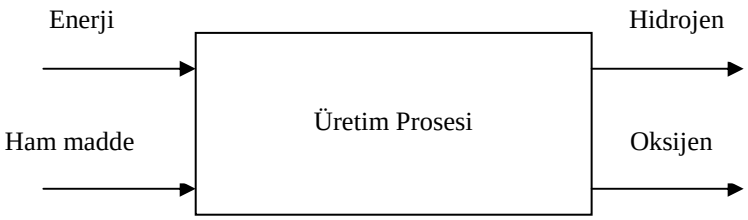
Nükleer hidrojen üretiminde füzyon enerjisi daha verimli olduğu için umut verici bir enerji çeşididir. Füzyon reaktöründe kritik altı çalışan blanket ile bir dış bir nötron kaynağı ile başlatıldığı için kontrollü çalışmaktadır ve dolayısıyla güvenlidir. Füzyon reaktöründe hem yakıt dönüşümü ve üretimi sağlanıp hem de enerji elde edilmektedir. Ayrıca trityum üretimi de füzyon reaktöründe gerçekleşebilir.

## 2.2. Hidrojen

Hidrojen evrende çok bulunan bir elementtir. Hidrojen evrende plazma ve atomik halde bulunabilir. Plazma halinde elektrik iletkenliği ve ışık yayılımına sahiptir. Hidrojen doğada bileşik olarak bulunur. Su en çok bilinen hidrojen bileşiği olup doğada bol bulunduğundan dolayı hidrojen de tükenmez sayılabilecek enerji taşıyıcı olarak görülmektedir. Ayrıca hidrojen çevreye zarar vermediği için geleceğin enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir.

## 2.3. Hidrojen Üretim Metotları

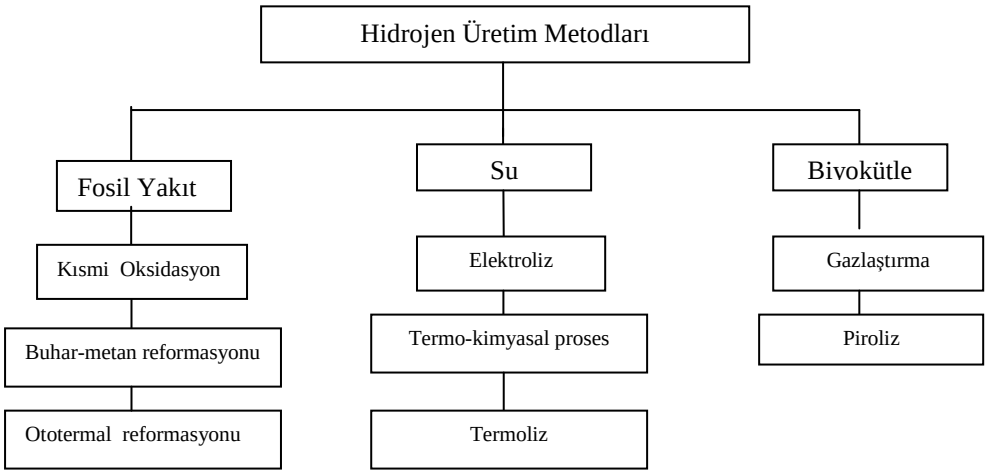
Şekil 2.1'de hidrojen üretiminin genel şeması verilmiştir.




Şekil 2.1. Hidrojen üretiminin genel şeması

Hidrojen üretimi sırasında kaynak olarak hidrokarbonlar veya su kullanılabilirken, birincil enerji kaynağı olarak ise güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer fisyon veya füzyon enerji kullanılabilir.

Hidrojen nükleer enerji kaynağıyla üretilirse büyük miktarda hidrojen elde edilecektir. Şekil 2.2'de hidrojen üretim metotları gösterilmiştir.




Şekil 2.2 Hidrojen üretim metotları

### 2.3.1. Buhar Metan Reformasyonu

Hidrokarbonların buhar ile reformasyonu hidrojen üretiminde ekonomik ve verimli bir yöntemdir. Buhar metan reformasyonu işlemi, yüksek sıcaklıklarda (700-850 $^0$C arasında) ve 3-25 MPa basınçta meydana gelmektedir. Buhar reformasyon işlemleri şekil 6'da olduğu gibidir ve buhar metan reformasyon reaksiyon genel formülasyonu şöyledir:

$$CH_4+H_2O \rightarrow CO+3H_2 \quad \Delta h=-206{,}16 kJ/mol \ (750\text{-}800^0C) \tag{2.1}$$

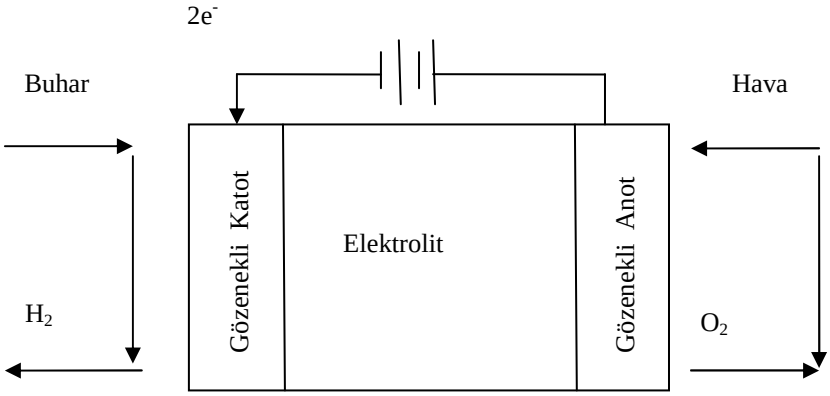
$$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2 \quad \Delta h= +41 kJ/mol \ (350^0C) \tag{2.2}$$

$$CH_4+2H_2O \rightarrow CO_2+4H_2 \quad \Delta h=-165.16 \ kJ/mol \tag{2.3}$$

Hidrokarbonlardan hidrojen üretiminde genel formülasyonda görüldüğü gibi iki reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonun ilk adımında hidrokarbonların reformasyonu işlemi meydana gelmektedir. Bu adımda, $H_2$ ve karbonmonoksit (CO) karışımı sentetik bir gaz meydana gelir. İkinci adımdaysa bir katalizör aracılığıyla ilk adımda üretilen CO buharla (350 ºC'deki) reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucu hidrojen ve karbondioksite oluşmaktadır [31].

### 2.3.2. Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz

Bu sistemde gözenekli yapıya sahip anot ve katot elektrotları olup, elektroliz hücresi de elektrolitlerden oluşmaktadır. Bu mekanizma şekil 2.3'deki gibidir.




Şekil 2.3. Yüksek sıcaklıklı elektroliz prosesi

800-900$^0$C'de çok iyi ısıtılmış buhar katoda girer ve katot da elektrik ile $H_2$ ve $O^{-2}$'ye ayrılır. Hidrojen molekülleri katot boyunca ilerlerken, negatif oksijen molekülleri anoda ilerler. $H_2$ üretim reaksiyonu aşağıdaki gibidir.

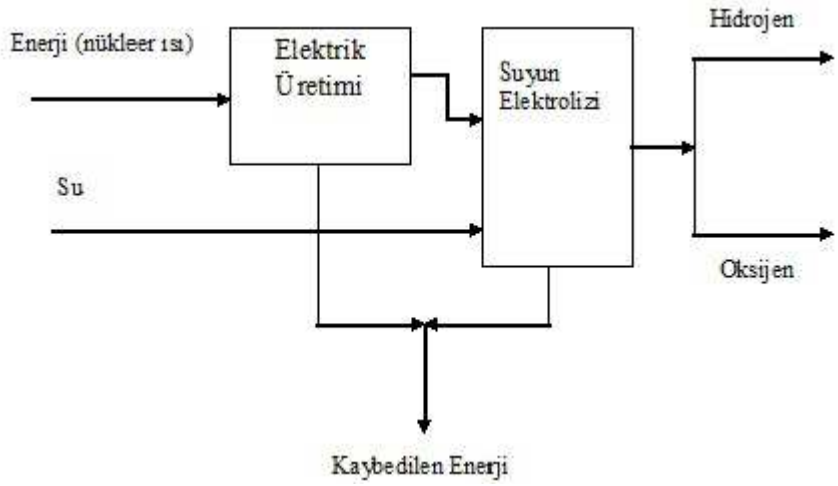
$$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{-2} \quad (2.4a)$$

$$O^{-2} + 1/2O_2 + 2e^- \quad (2.4b)$$

$$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2\ O_2 \quad (2.4c)$$

Bu işlem nükleer enerjiyle hidrojen elde etmede bir yöntem olarak düşünülebilir, çünkü bu sistem ya mevcut olan nükleer santralle ya da yüksek verimli yeni bir nükleer santralle birleştirilebilir. Nükleer enerjiden elektrolizle hidrojen üretimi proses şeması Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Bu teknoloji eski ve kurulu bir teknoloji olmasına rağmen, geniş santrallerde düşük verimliliklerinden dolayı uygulanamayacağı düşünülür. Yüksek sıcaklıkta buhar elektrolizinde (HTSE) yaklaşık %50 verim olabilir fakat sıcaklık 900$^o$C'nin üzerinde olması gerekir.

Füzyon reaktörünün yüksek sıcaklıkta ısı ürettiği takdirde, HTSE teknolojisinin hidrojen üretiminde kullanılması mümkündür. Bu teknoloji hem düşük direnç kaybından dolayı verimlidir hem de suyun ayrıştırılması için nükleer reaktörde üretilen ısıdan faydalanılır [31].




Şekil 2.4. Elektroliz proses şeması

### 2.3.3. Sülfürik Asit-İyot Çevrimi (S-I Çevrimi)

Su, hidrojen ve oksijene bir veya daha fazla periyodik termal sürücülü kimyasal reaksiyonlar tarafından ayrılır. Yüksek sıcaklık çevriminde ısı kaynağı için gereken sıcaklık genellikle 900 $^{o}$C'nin altındadır. Termokimyasal çevrimde verim kazancı Carnot çevrimi prensibine uyar. Yani yüksek sıcaklıkta yüksek verim olur.

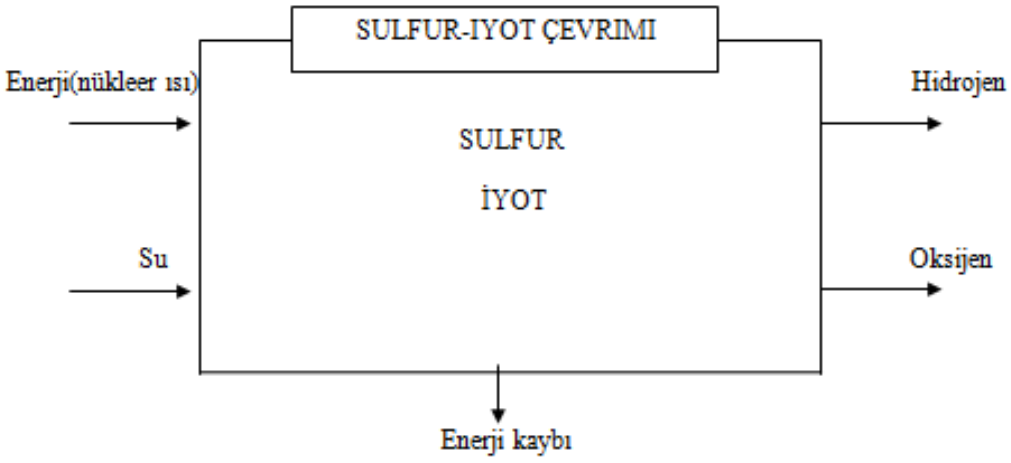
Sülfür iyot (S-I) çevrimi termokimyasal çevrime örnektir ve en iyi termokimyasal çevrimdir. Termokimyasal çevrimi Şekil 2.5'de olduğu gibidir ve S-I çevriminde meydana gelen 3 kimyasal reaksiyon şu şekildedir;

$$SO2 + I2 \longrightarrow H_2SO_4 + 2HI \ (120^{o}C) \qquad (2.5a)$$

$$H_2SO_4 \longrightarrow SO_2 + 1/2O_2 \ \ (850^{o}C) \qquad (2.5b)$$

$$HI \longrightarrow I2 + H2 \ (450^{o}C) \qquad (2.5c)$$

Sülfirik asitin ayrışma reaksiyonu 700$^{o}$C'nin üstündeki sıcaklıklarda başlar ve 850$^{o}$C'nin üstündeki sıcaklıklarda daha verimlidir. Bu reaksiyonlar endodermiktir ve yüksek füzyon sıcaklığı tarafından yüksek sıcaklık ısısı sağlanılabilir [31].




Şekil 2.5. Sülfür-iyot prosesi

Yukarıda bahsedilen 3 üretim yöntemiyle de nükleer enerjiden hidrojen üretimi yapılabilir. Nükleer reaktörden elde edilen enerji ve ısı sayesinde su veya hidrokarbonlardan bu yöntemlerin herhangi biri ile hidrojen elde edilebilir. Nükleer reaktörde enerji çoğalım katsayısının artmasıyla hidrojen üretimi de orantılı bir şekilde artacaktır.

## 2.4. Hidrojen Enerjisinin Kullanım Alanları

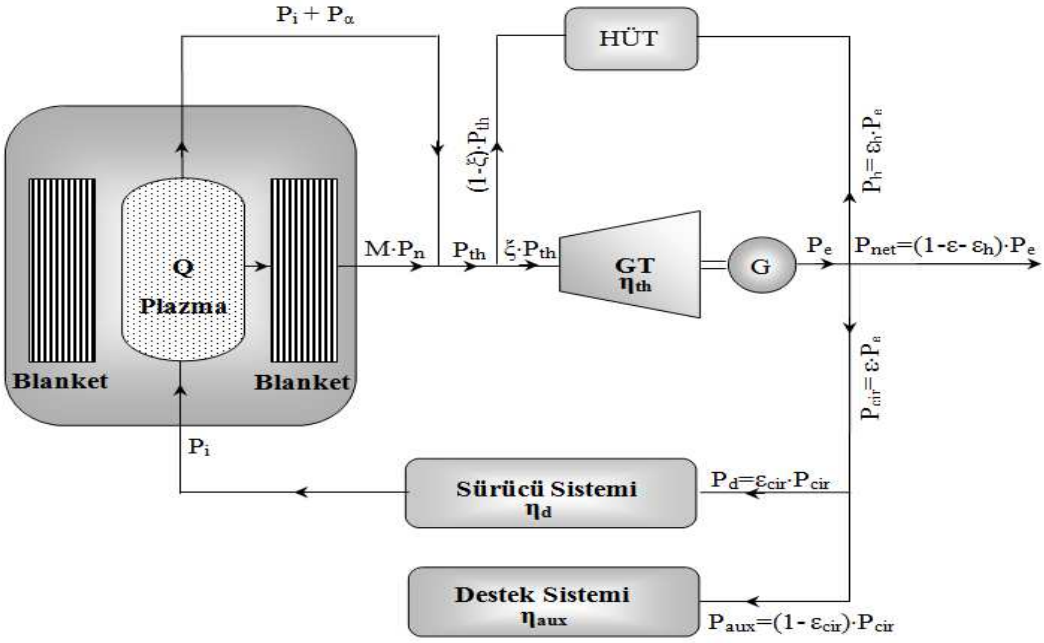
Hidrojen günümüzde hali hazırda birçok alanda kullanılmaktadır. Sanayi ve taşıtlarda kullanımı en çok bilinen kullanım alanlarıdır. Ayrıca uzay araçlarında da hidrojen yakıt olarak kullanılmaktadır. Hidrojenin etkili bir şekilde depolanırsa hidrojen yakıt olarak birçok alanda güvenli bir şekilde kullanılabilir.

İçten yanmalı motor teknolojisi veya türbin teknolojisinin yanı sıra çok daha verimli yakıt hücreleri de hidrojenden güç elde etmek için kullanılır. Şimdiden yakıt hücresi teknolojisi verimi %65 gibi büyük oranlara sahiptir [32].

Hidrojen verimli ve çevre dostu olması gibi avantajlarından dolayı taşıtlarda yakıt olarak kullanılması istenilmektedir. Birçok araştırmacı bu teknolojinin geliştirilmesi için çalışmaktadır. Fakat en az 20 yıllık süre sonunda hidrojenin taşıtlarda benzin yerine kullanılacağı tahmin edilmektedir [33].

## 2.5. Füzyon Sürücülü Sistemde Termal Güç Akışı

Hidrojen üretimi yapan füzyon sürücülü bir sistemin (FSS) güç akış şeması Şekil 2.6’da görülmektedir.




Şekil 2.6. FSS hidrojen üretimi için akış şeması [34]

Hibrit reaktörler kritik altı koşullarda güvenli bir şekilde düşük füzyon enerji kazancında (Q) çalışmaktadır. Füzyon enerji kazancı füzyon enerji güç çıktısının [$P_f$ (MeV)] füzyon güç girdisine [$P_i$ (MeV)] oranıdır ($Q= P_f/P_i$). Fisyon-Füzyon hibrit reaktörün ekonomik olması için kazancının yaklaşık 2 olması gerekmektedir (Q=2).

$$Q= P_f/P_i \tag{2.6a}$$

$$P_\alpha = f_\alpha \cdot P_f \tag{2.6b}$$

$$P_n = f_n \cdot P_f \tag{2.6c}$$

Denklemlerdeki $f_n$ nötron enerji yüzdesi olup $f_\alpha$ yüklü parçacıkların enerji yüzdesidir. D-T füzyon plazması için $f_\alpha$ =0.2 ve $f_n$ =0.8 olup, D-D plazması içinse $f_\alpha$ =0.617 ve $f_n$=0.383 değerlerindedir [34].

$$P_{th} = P_i + \mathbf{P}_\alpha + M \cdot P_n \tag{2.6d}$$

Denklem (3.1a-c)'yi denklem (3.1d)'de yerine yazacak olursak yeni denklem aşağıdaki gibi olacaktır.

$$P_{th} = P_i \cdot [1+ (f_\alpha + f_n \cdot M) \cdot Q] \cdot \eta_{ihx} \qquad (2.6e)$$

Denklemde Q enerji kazancı oranı, M enerji çoğalım oranı ve $\eta_{ihx}$ ısı eşanjorü verimidir. $\eta_{ihx}$ ‘ın değeri 1 olarak varsayılmaktadır.

## 2.6. Füzyon Sürücülü Sistemde Hidrojen üretimi

Füzyon sürücülü bir sistemde buhar-metan reformasyonu, yüksek sıcaklıklı elektroliz ve termokimyasal yöntem ile elde edilen hidrojen ($m_{H2}$) miktarı termal güç ($P_{th}$) ve sürenin parametrelerine bağlı olarak Özışık ve ark. tarafından eşitlik (2.6f), (2.6g) ve (2.6h)’da gösterildiği gibi ifade edilmiştir [33-36].

*Buhar-Metan Reformasyonu ile Hidrojen Üretim miktarı:*

$$m_{H_2} = \eta_{bmr} \cdot \frac{P_f}{Q} \cdot [[1 + (f_\alpha + f_n \cdot M) \cdot Q] - \frac{1}{\eta_{th} \cdot \eta_d \cdot \varepsilon_{cir} \cdot \varepsilon}] \cdot \frac{M_{H_2}}{q_{net}} \qquad (2.6f)$$

*Yüksek Sıcaklıklı Elektroliz Yöntemi İle Hidrojen Üretim miktarı:*

$$m_{H_2} = \frac{P_f}{Q} \cdot [1+(f_\alpha + f_n \cdot M) \cdot Q] \cdot (1+f_{eh})] \cdot [1 - [\frac{1}{\eta_d \cdot \varepsilon_{cir} \cdot [1+(f_\alpha + f_n \cdot M) \cdot Q] \cdot (\eta_{th} + f_{eh})} + \frac{f_{eh}}{(\eta_{th} + f_{eh})}]] \cdot \frac{M_{H_2} \cdot n}{\Delta H} \qquad (2.6g)$$

*Termokimyasal Yöntem ile Hidrojen Üretim miktarı:*

$$m_{H_2} = \frac{P_f}{Q} \cdot [[1 + (f_\alpha + f_n \cdot M) \cdot Q] - \frac{1}{\eta_{th} \cdot \eta_d \cdot \varepsilon_{cir} \cdot \varepsilon}] \cdot \Re^{-1} \qquad (2.6h)$$

## 2.7. Nükleer hidrojen üretimi üzerine yapılan çalışmalar

Hidrojenin büyük miktarlarda üretilmesi için en ideal birincil enerji kaynağı nükleer enerjinin bir çeşidi olan füzyon enerjisidir. Yüksek verimli ve temiz bir yöntem olduğu için nükleer enerjiden hidrojen üretimi birçok araştırmacı tarafından araştırılmaktadır.

Özışık ve ark. [37] eriyik tuz yakıt karışımına dayanan serbest güçlü helisel bir reaktörde hidrojen ve fisil yakıt üretimini analiz etmişlerdir. Reaktörlerde trityumun kendi kendine yeteceği kadar üretildiği ve enerji çoğalım katsayısının konveksiyonel reaktöre göre arttığı ( 1.35'ten 4.47'ye ) görülmüştür. Araştırma sonucunda fisil yakıt ve hidrojen üretimi yüksek bulunmuştur. Ayrıca yüksek sıcaklıklı elektrolizde ki hidrojen üretiminin S-I çevrimiyle hidrojen üretimine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Patel ve ark. [38] HTR (yüksek sıcaklıklı reaktör)'de S-I çevrimi yöntemiyle hidrojen üretimini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda elektrik ve hidrojen üretimi önemli ölçüde gerçekleştirilmiştir.

Yamawaki ve ark [39] nükleer enerjiden hidrojen üretimi üzerine çalışmışlardır. Çalışmaları sonucunda nükleer enerjiden hidrojen üretiminin hem çevreci hemde ekonomik olduğunu görmüşlerdir.

Forsberg [40] hidrojen üretiminde nükleer enerjinin önemi hakkında bir çalışma yapmıştır. Nükleer enerjiden hidrojen üretiminin diğer hidrojen üretim yöntemlerine göre çok daha avantajlı olduğunu belirlemiştir.

Takaeuchi ve ark [41] biyokütleden hidrojen üretiminde ısı kaynağı olarak nükleer enerji kaynağını kullanmışlardır. Basit deneyler ve nümerik analizlerle biyokütle ayrışmasını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda elektrik ve hidrojen üretimi yüksek miktarlarda bulunmuştur. Ayrıca bu yöntemle biyokütle atıklarının azalmasına da katkı sağlanmıştır.

Fujukawa ve ark. [42] JAEA (Japonya Atom Enerjisi Acentesi) yüksek sıcaklıklı mühendislik test reaktörünü geliştirmişlerdir. Bu reaktörde ta güç ve yüksek soğutucu

akışkan sıcaklığı elde edilmişler (950$^{o}$C) ve elektrik enerjisi üretmişlerdir. Elde edilen elektrik enerjisi ile başarılı bir şekilde hidrojen üretimini gerçekleştirmişlerdir.

Sakaba ve ark [43] HTTR(Yüksek Sıcaklıklı Gaz-Soğutuculu Reaktör)'de S-I çevrimi yöntemiyle hidrojen üretiminde termal verimliliği değerlendirmişlerdir. Termal verimlilik ve hidrojen üretimi yüksek bulunmuştur.

Genç [44] çeşitli eriyik tuz yakıt karışımları için APEX(Advanced Power EXtraction) füzyon reaktöründe minör aktinit dönüşümü ve hidrojen üretimi potansiyeli araştırılmıştır. APEX füzyon reaktöründe eriyik tuz yakıt karışımı kullanılmasıyla yüksek nötron performansı ve yüksek miktarda hidrojen üretiminin yanı sıra aktinşt dönüşümü de verimli olmuştur.

Fujiwara [45] HTE (Yüksek Sıcaklıklı Elektroliz) reaktöründe hidrojen üretimi üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada santral verimliliği incelenmiştir ve santral verimliliğinin yüksek sıcaklıklı gaz soğutucusuyla bağlantılı olduğu belirlenmiştir. Bu deneylerde ki hidrojen üretim oranı teorik hesaplamalarla uyumlu olduğu görülmüş ve başarılı bir şeklide hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bolthrunis ve ark. [46] yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörden elde edilen enerjiyle hidrojen üretimini araştırmışlardır. Hidrojen üretim metotlarından buhar metan reformasyonunu kullanmışlardır. Araştırma sonucunda hidrojen üretimi gerçekleştirildiği görülmüştür.

Verfonder [47] konveksiyonel hafif sulu reaktörler için hidrojen üretimini araştırmışlardır. Düşük sıcaklıklı elektroliz yöntemiyle hidrojen üretildiği görülmüştür.

İmasaka ve ark. [48] helisel tip bir reaktörde hidrojen üretimini araştırdı. Çalışmalar sonucunda başarılı bir şekilde elektrik ve hidrojen üretimi elde edilmiştir.

Kimura ve ark. [49] füzyon enerjisiyle biyokütleden hidrojen üretimini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda nükleer enerjiden hidrojen üretiminin diğer yöntemlere göre daha verimli olduğu görülmüştür.

Yıldız ve ark.[50] nükleer enerjiden hidrojen üretimi potansiyelini araştırmıştır. Çalışma sonucunda termokimyasal ayrışma ve elektroliz için yüksek sıcaklık gerektiği ve yüksek sıcaklığında nükleer enerjiden elde edilebileceğinden dolayı nükleer hidrojen üretiminin avantajlı olduğu vurgulanmıştır.

Konishi ve ark [51] füzyon enerjisi kullanarak biyokütleden hidrojen üretimini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda nükleer enerjiden hidrojen üretiminin gerçekleştiği görülmüştür.

Crosbie [52] nükleer hidrojen üretimini diğer hidrojen üretim yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Nükleer enerjinin çevreci, fosil yakıta bağımlı olmaması, yüksek sıcaklık ve verimlilik elde edilmesi gibi özelliklerinden dolayı avantajlı olduğu düşünülmüştür. Ayrıca S-I çevriminin en verimli metot olduğu görülmüştür.

Forsberg [53] çeşitli nükleer reaktörler için hidrojen üretim potansiyelini araştırmıştır. AHTR (İleri yüksek sıcaklıklı reaktör) ve VHTR (çok yüksek sıcaklıklı reaktör) ‘nin yüksek miktarda hidrojen üretim potansiyeli olduğu görülmüştür.

# 3. BÖLÜM

# SAYISAL HESAPLAMALAR

## 3.1. Blanket Geometrisi

Füzyon sürücülü reaktörlerde yakıt dönüşümü için hızlı nötronlar gerekmektedir. Füzyon reaksiyonu ile elde edilen hızlı nötronlar kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesini sağlarlar. Kullanılmış yakıt olarak seçilen PWR-$UO_2$'de aktinitlerin atomsal yüzde oranları şu şekildedir.

Tablo 3.1. PWR-$UO_2$ yakıt karışımlarında aktinit yüzde oranları[54]

| PWR-$UO_2$ içerisindeki aktinit yüzdeleri | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $UO_2$ | | $NpO_2$ | | $PuO_2$ | | $AmO_2$ | | $CmO_2$ | |
| $^{234}U$ | 0.000121 | $^{237}Np$ | 1 | $^{238}Pu$ | 0.24306 | $^{241}Am$ | 0.346284 | $^{242}Cm$ | 0.120081 |
| $^{235}U$ | 0.008259 | | | $^{239}Pu$ | 0.584321 | $^{242}Am$ | 0.003122 | $^{243}Cm$ | 0.00177 |
| $^{236}U$ | 0.004379 | | | $^{240}Pu$ | 0.239815 | $^{243}Am$ | 0.650594 | $^{244}Cm$ | 0.822507 |
| $^{238}U$ | 0.987241 | | | $^{241}Pu$ | 0.112401 | | | $^{245}Cm$ | 0.050019 |
| | | | | $^{242}Pu$ | 0.039158 | | | $^{246}Cm$ | 0.005625 |
| Toplam | 1 | Toplam | 1 | Toplam | 1 | Toplam | 1 | Toplam | 1 |

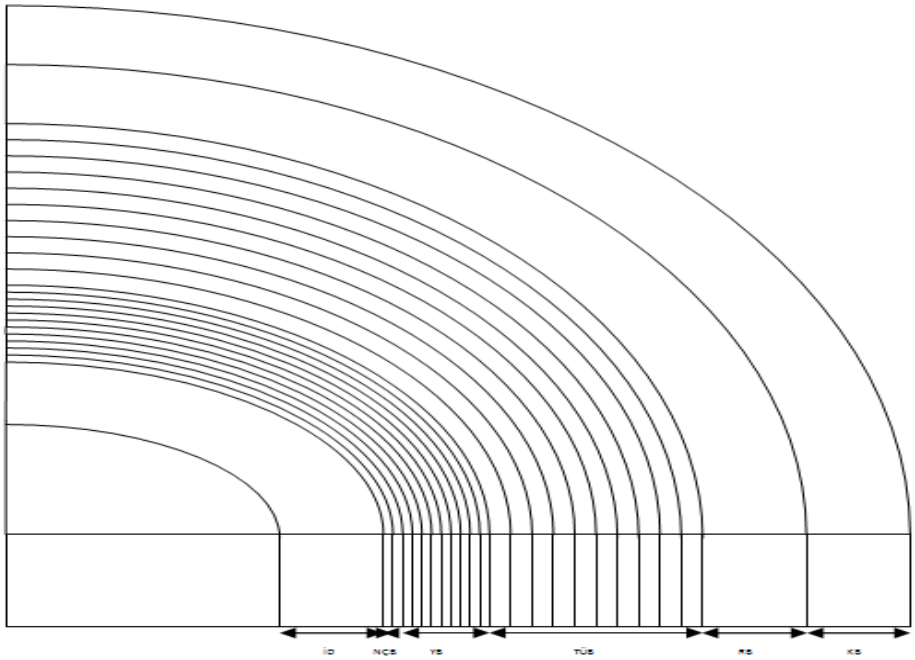
Blanketin yakıt bölgesine $ThO_2$-$UO_2$, $ThO_2$-$Np0_2$, $ThO_2$-$PuO_2$, $ThO_2$ -$AmO_2$, $ThO_2$-$CmO_2$, yakıt karışımları ayrı ayrı koyularak incelenmiştir ve 5 farklı yakıt karışımı oluşturulmuştur.

**Yakıt 1:** $ThO_2$ -$UO_2$ yakıt karışımda U'nun yakıt dönüşüm oranına etkisini anlamak için U'nun hacimsel oranı %0'dan %100'e kadar %10'ar adımlarla arttırıldı.
**Yakıt 2:** $ThO_2$ -NpO yakıt karışımda yine Np'un yakıt dönüşüm oranına etkisini anlamak için Np'un hacimsel oranı %0'dan %100'e kadar %10'ar adımlarla arttırıldı.

**Yakıt 3:** $ThO_2$ -$PuO_2$ yakıt karışımda Pu'un yakıt dönüşüm oranına etkisini anlamak için Pu'un hacimsel oranı %0'dan %10'e kadar %1'er adımlarla arttırıldı.

**Yakıt 4:** $ThO_2$ -$AmO_2$ yakıt karışımda Am'un yakıt dönüşüm oranına etkisini anlamak için Am'un hacimsel oranı %0'dan %100'e kadar %10'ar adımlarla arttırıldı

**Yakıt 5:** $ThO_2$ -$CmO_2$ yakıt karışımda Cm'un yakıt dönüşüm oranına etkisini anlamak için Cm'un hacimsel oranı %0'dan %10'e kadar %1'er adımlarla arttırıldı.
Kullanılmış yakıtın gençleştirilmesinin yapıldığı ve trityum üretiminin kendi kendine üreten tez kapsamında tasarlanan hibrit blanket şekil 3.1'de gösterilmiştir.




Şekil.3.1 Hibrit blanketin tek boyutlu kesit görüntüsü ( İD=İlk Duvar, NMB=Nötron Çoğalım Bölgesi, TÜB=Trityum Üretim Bölgesi, RB=Reflektör Bölgesi, KB=Kalkan Bölgesi)

Hibrit reaktörde her bölgenin malzeme kompozisyonları Tablo 3.2'de malzeme yoğunlukları ise Tablo 3.3.'te verilmiştir.

Tablo 3.2. Hibrit reaktörün bölgeleri ve yakıt kompozisyonları

| Bölge | Malzeme | Boyut [cm] | Yüzde [%] |
|---|---|---|---|
| Boşluk | Vakum | 100 | |
| İD | $S_iC$ | 3 | 100 |
| NÇB | Be | 2 | 100 |
| TÜB | $Li_2O$ | 40 | 80 |
| | He | | 20 |
| RB | C(Grafit) | 10 | 100 |
| KB | $B_4C$ | 10 | 100 |

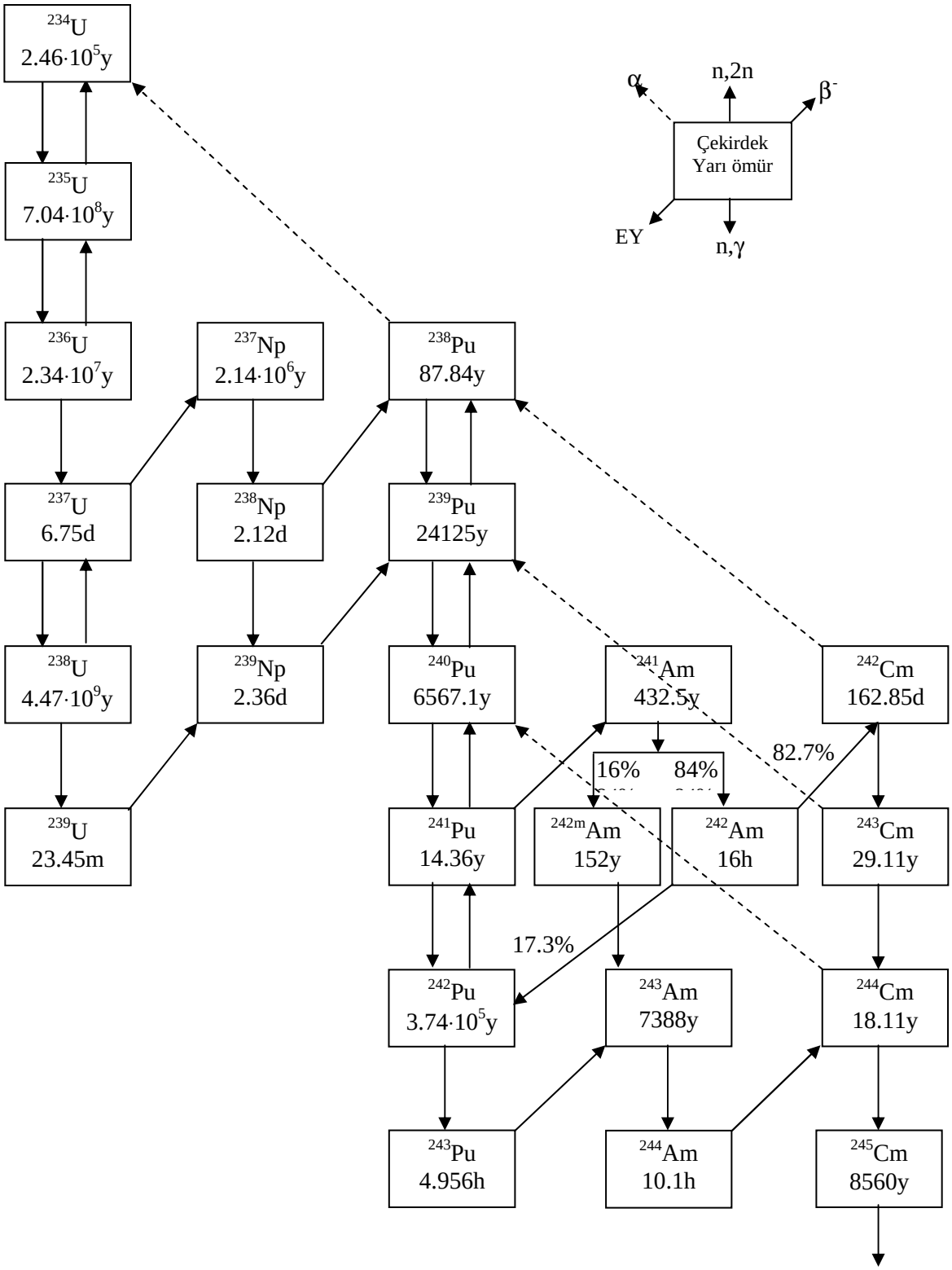
Tablo 3.3. Malzeme yoğunlukları [gr/cm$^3$]

| He | $Li_2O$ | C | $B_4C$ | SiC | $ThO_2$ | $UO_2$ | $CmO_2$ | $NpO_2$ | $PuO_2$ | $AmO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.1786 | 2.013 | 2.26 | 2.52 | 3.21 | 9.88 | 10.5 | 10.55 | 11.1 | 11.44 | 11.68 |

## 3.2. Hesaplama Metodu

3 boyutlu nötronik hesaplamalar MCNP4B Monte Carlo kodu [55] ile sürekli enerji tesir kesiti veri kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirildi. Nükleer araştırmacılar tarafından geniş çapta kabul edilen ve kullanılan bu kod farklı malzemeler ve geometrik konfigürasyonlarda ki nötron transportunun eş zamanlı simülasyonu için uygun olan en güçlü kodlardan biridir. Nötronik hesaplamalar 14.1 MeV'lik 1 füzyon nötronları için yapıldı. $0.444 \cdot 10^{14}$ n/cm$^2$s füzyon nötronu (14.1 MeV) akısı 1MW/m$^2$ 'lik ilk duvar nötron yükü (ısısı) oluşturmaktadır.

Nötronik hesaplamaların daha hassas olabilmesi için Şekil 3.1’ de görüldüğü gibi yakıt bölgesi ve trityum üretim bölgesi on eşit parçaya bölünerek hesaplamalar yapılmıştır. Bilindiği gibi, nötronik değerler ilk duvardan itibaren yarıçap ile azalma eğilimi göstermektedir. Bu karakteristik hibrit blanketin genel bir özelliğidir. TRU çekirdeklerine ait nötron yakalama ve meydana gelen bozunma reaksiyonları Şekil.3.2’de ki gibidir.




Şekil 3.2. TRU çekirdeklerine ait nötron yakalama ve sonrasında meydana gelen bozunma reaksiyonları

## 3.3. Fiziksel Parametrelerin Hesaplanması

### 3.3.1. Enerji Çoğalım Katsayısı

Blanketin en önemli parametrelerinden biri olan enerji çoğalım katsayısı; (M) blankette meydana gelen toplam nükleer enerjinin, füzyon nötronu enerjisine oranı olarak tanımlanır. Enerji çoğalım katsayının denklemi denklem (1.15)'deki gibidir.

### 3.3.2. Nötron Akısı ve Reaksiyon Oranı

Bir yönde birim zamandan birim alandan geçen nötron sayısına nötron akısı denir ve nötron yoğunluğunun gradyan ile ters orantılıdır Bir reaktör korunda nötronlar tüm yönlerde hareket ederler. Nötron yoğunluğu (nötron/$cm^3$) ve nötron hızı V (cm/sn) olmak üzere birim zamanda tüm yönlerden birim alanı etkileyen nötronların sayısını belirleyen nötron akısı $\Phi$ ile gösterilir.

$$\Phi = n \cdot V \tag{3.1}$$

Nötron akısının birimi nötron/sn-$cm^2$ olup, hıza ve enerjiye bağlıdır. N yoğunlukta çekirdekleri ihtiva eden bir ortam, nötron akısına maruz kalırsa çekirdek ile nötronlar arasındaki etkileşim reaksiyon oranı şöyledir;

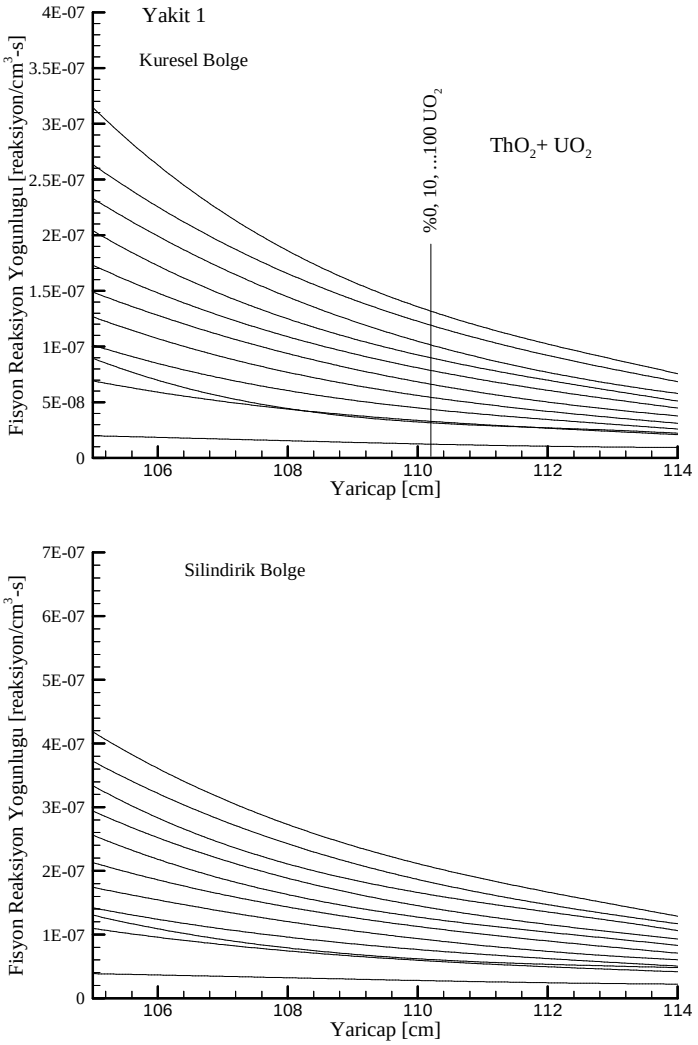
$$R = \Phi \cdot N \cdot \sigma \tag{3.2}$$

Burada $\sigma$, göz önüne alınan reaksiyonun mikroskopik tesir kesitidir. (örneğin saçılma, absorbsiyon v.b gibi). Bu denklem özel bir reaksiyona giren nötronların sayısını basit olarak gösterir.

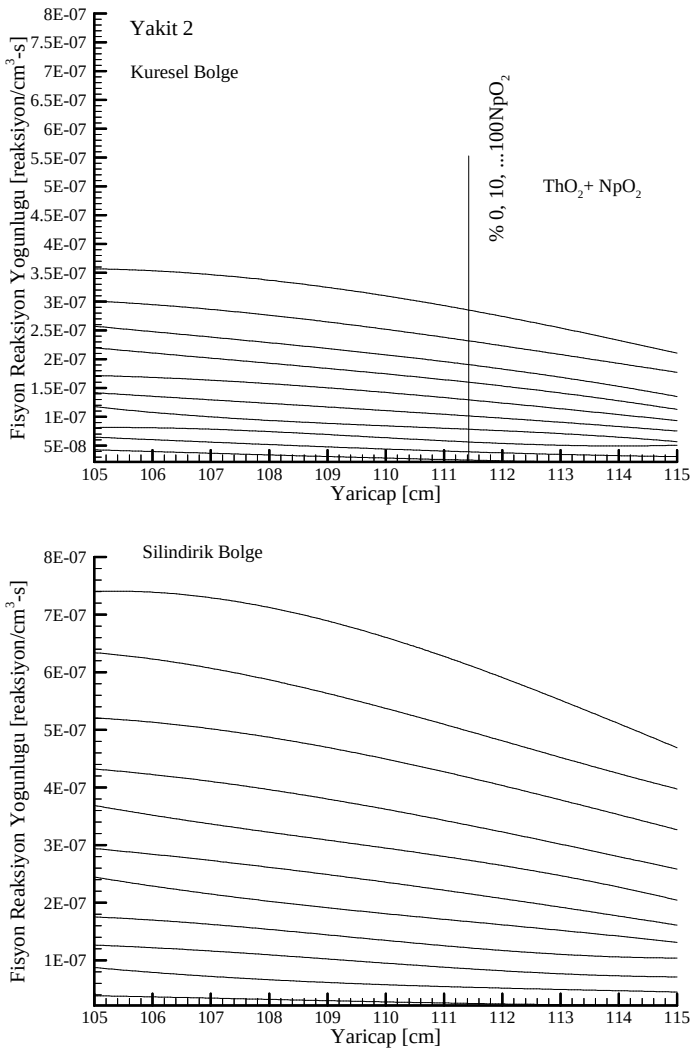
## 3.4. Sayısal Sonuçlar

### 3.4.1. Fisyon Reaksiyon Yoğunluğu

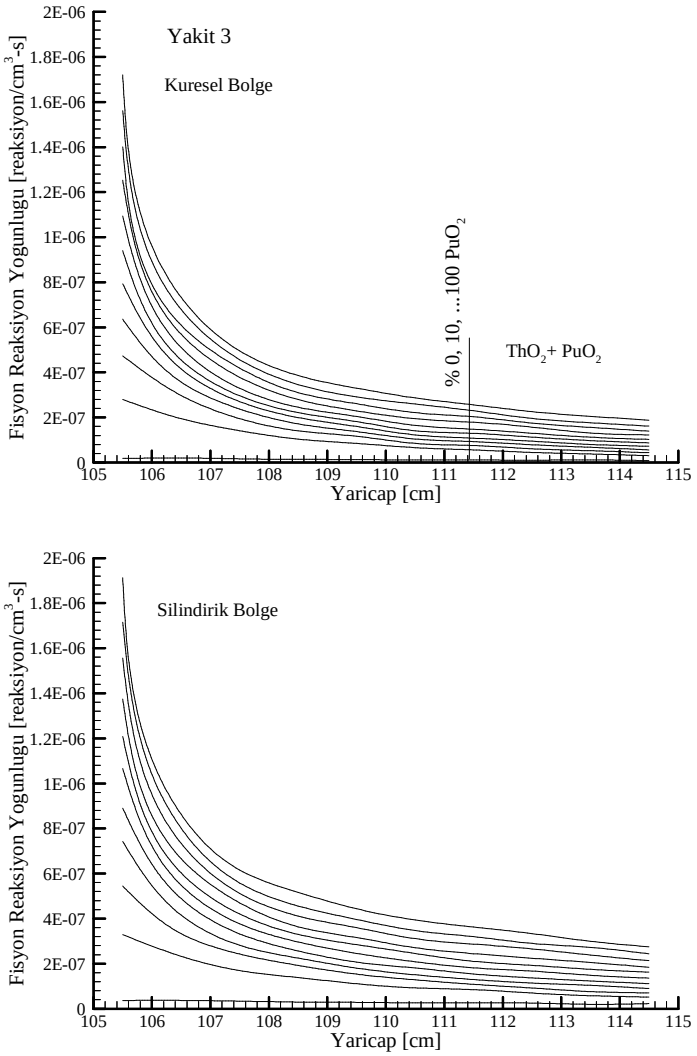
Yakıt 1-5 için Şekil 3.3-3.7'de yakıt bölgelerindeki fisyon reaksiyon yoğunlukları sırasıyla görülmektedir. Tüm modellerde fisyon reaksiyon yoğunlukları minör aktinitdioksit, $UO_2$ ve $PuO_2$ oranının artmasıyla arttığı görülürken; yarıçapın artmasıyla ise azaldığı şekillerde görülmektedir. Ayrıca fisyon reaksiyon yoğunluğu silindirik yakıt bölgesinde küresel yakıt bölgesine göre daha fazla olduğu görülmektedir.



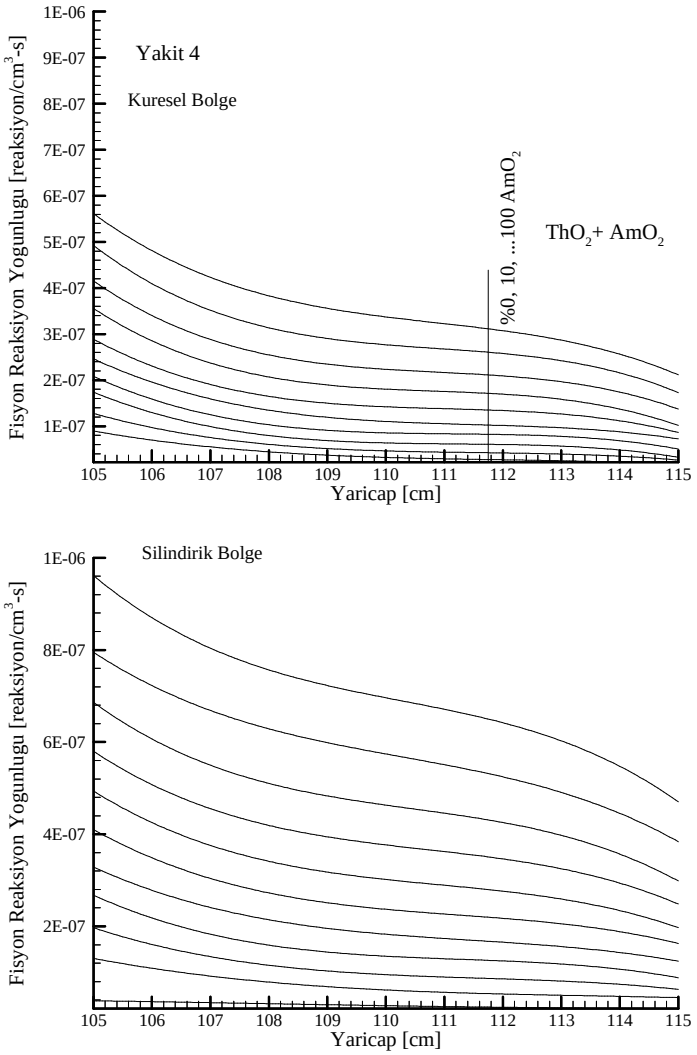

Şekil 3.3. Yakıt 1 için silindirik ve küresel yakıt bölgelerindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi



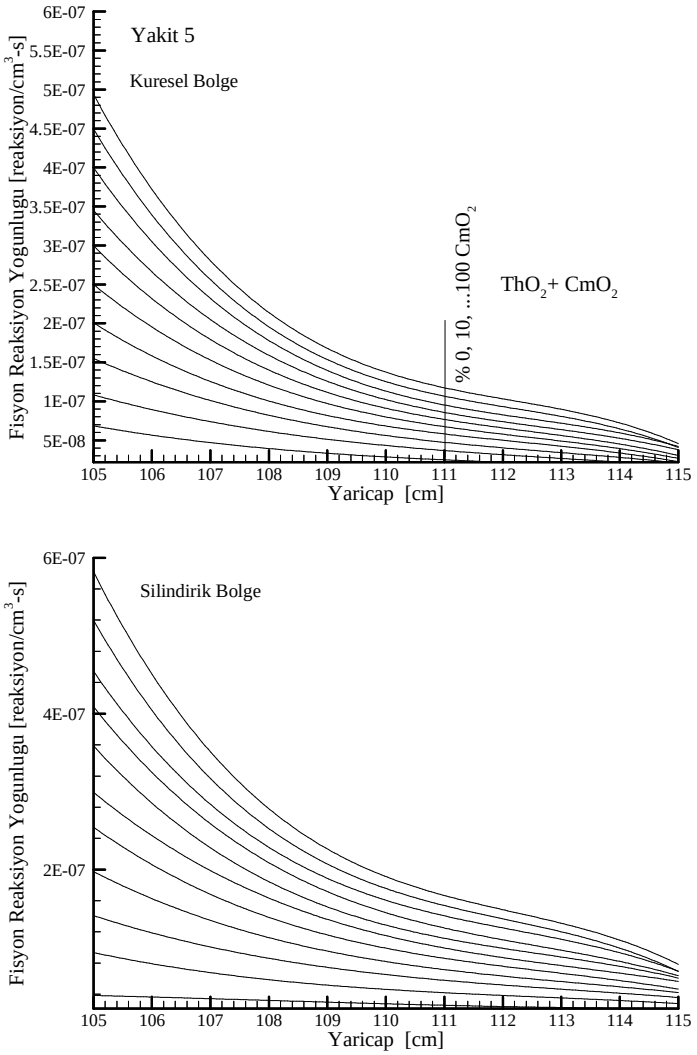

Şekil 3.4. Yakıt 2 için silindirik ve küresel yakıt bölgelerindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi




Şekil 3.5. Yakıt 3 için silindirik ve küresel yakıt bölgelerindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi



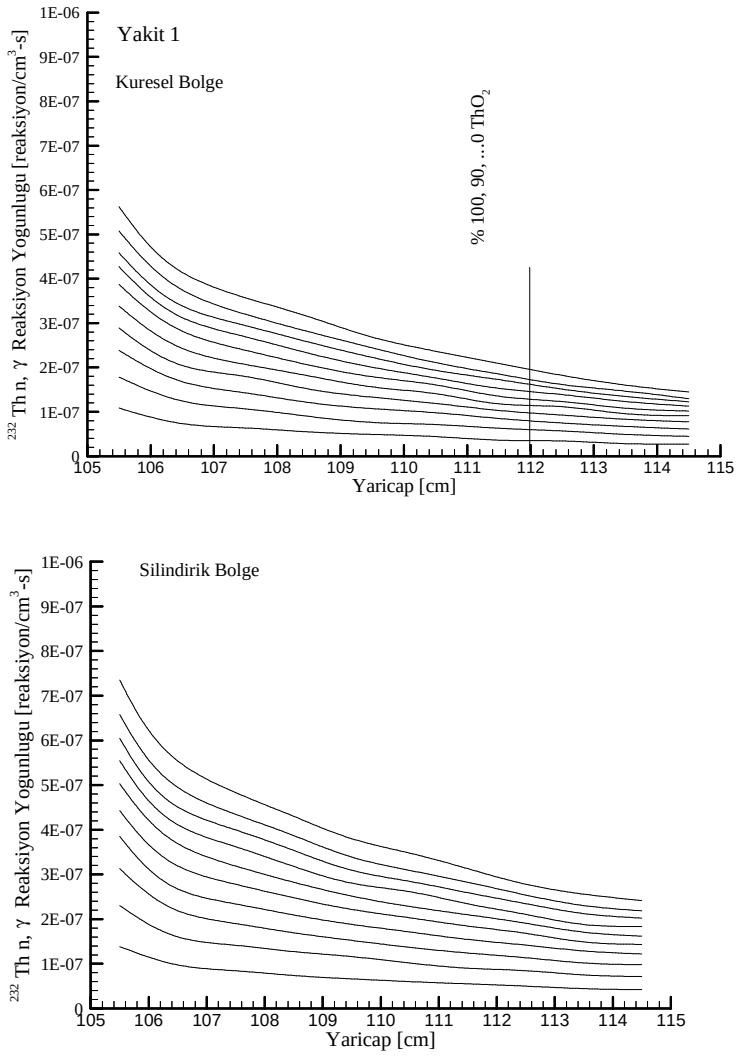

Şekil 3.6. Yakıt 4 için silindirik ve küresel yakıt bölgelerindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi



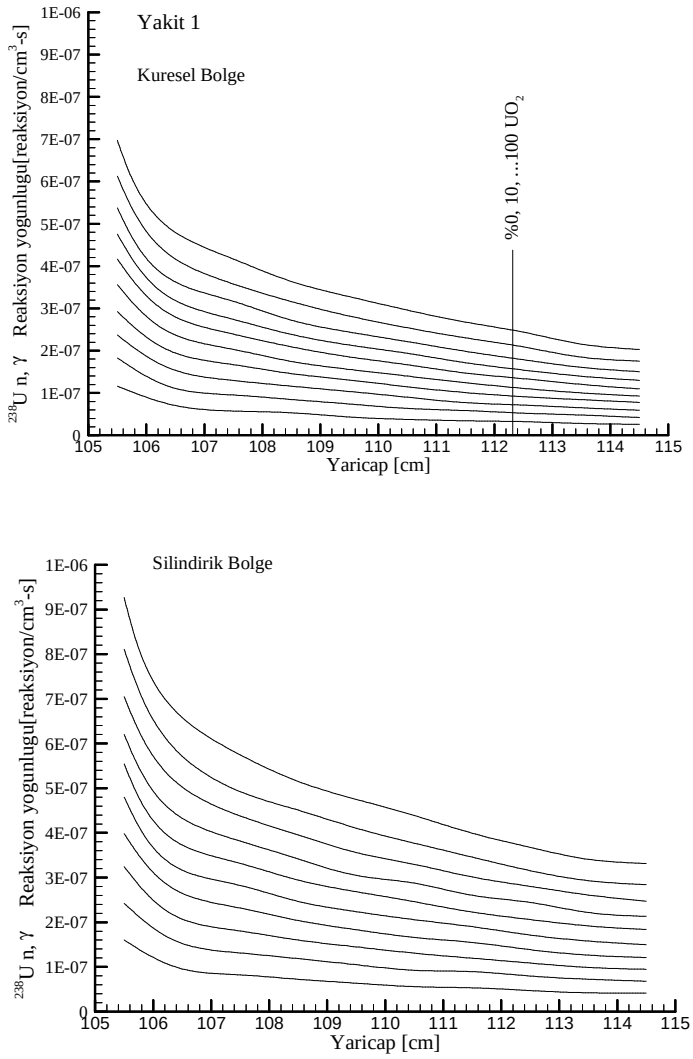

Şekil 3.7. Yakıt 5 için silindirik ve küresel yakıt bölgelerindeki fisyon reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

### 3.4.2. n,γ Reksiyon Yoğunluğu

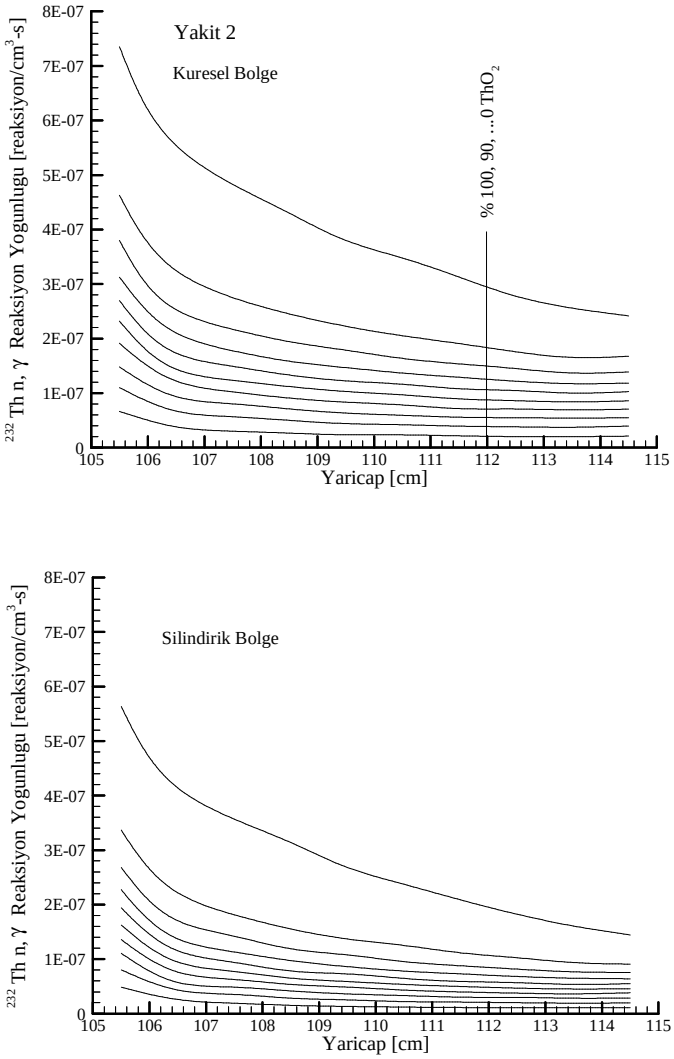
Küresel ve silindirik yakıt bölgelerinde minör aktinitdioksitlerin, $UO_2$ ve $PuO_2$'in çeşitli hacimsel oranlarında yaptıkları n,γ reaksiyon yoğunluk değişimi yakıt 1-5 için sırasıyla Şekil 3.8- Şekil 3.20 arasındaki şekillerde görüldüğü gibidir. Şekillerde görüldüğü gibi n,γ reaksiyon yoğunlukları minör aktinitdioksit, $UO_2$ ve $PuO_2$'in hacim oranları arttıkça artıyorken, yarıçap arttıkça azalmaktadır. Ayrıca silindirik yakıt bölgesindeki n,γ reaksiyon yoğunlukları silindirik yakıt bölgesindekine göre daha fazladır.



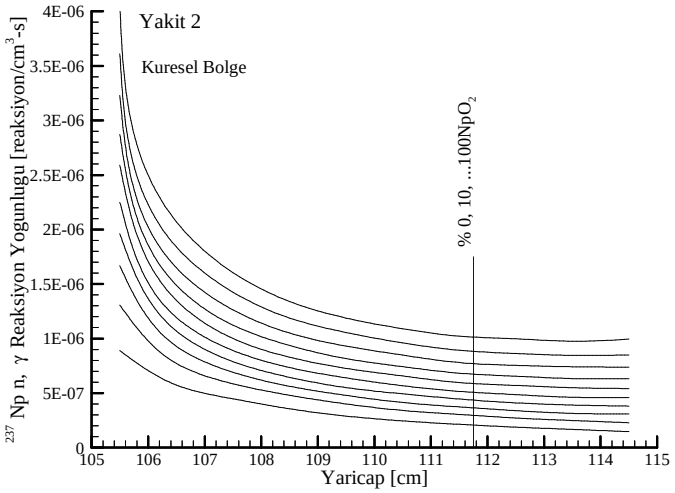

Şekil 3.8. Yakıt 1 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{232}$Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

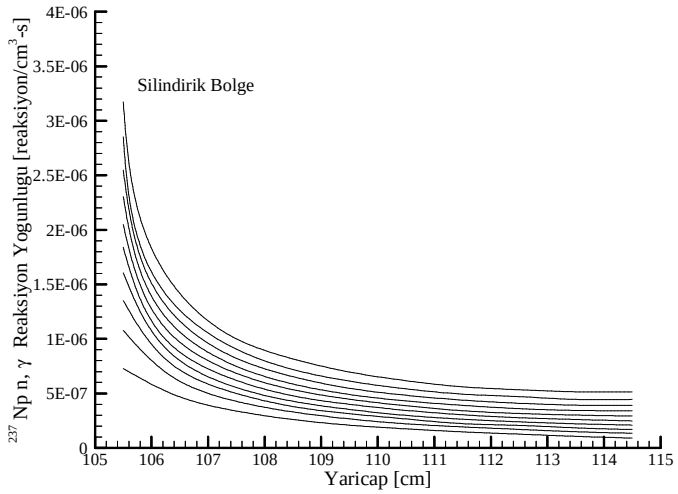



Şekil 3.9. Yakıt 1 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{238}$U n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

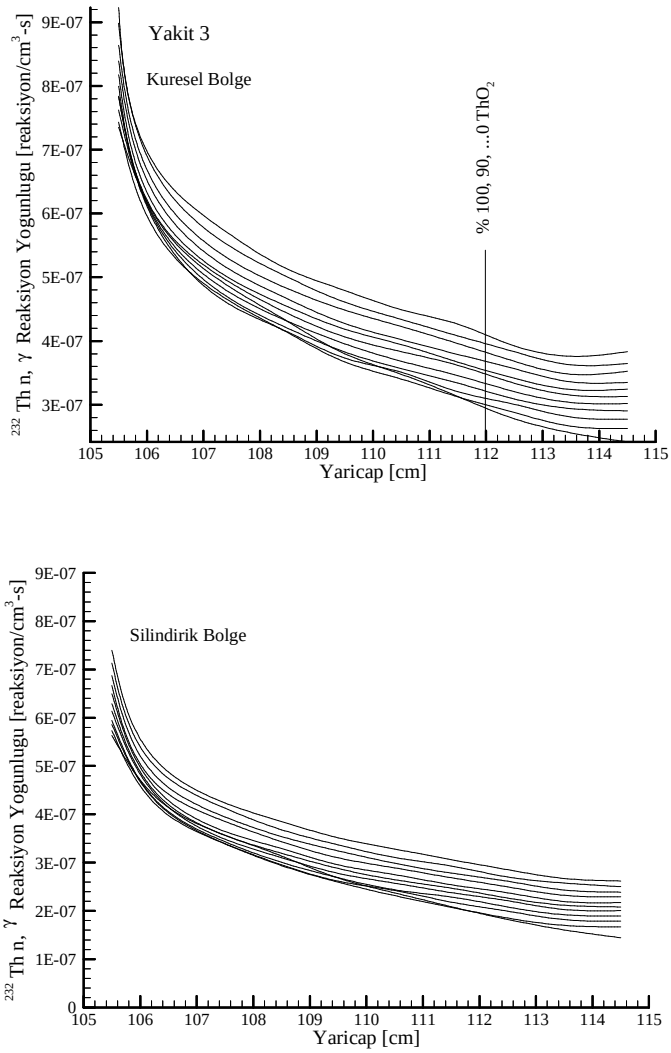



Şekil 3.10. Yakıt 2 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{232}$Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

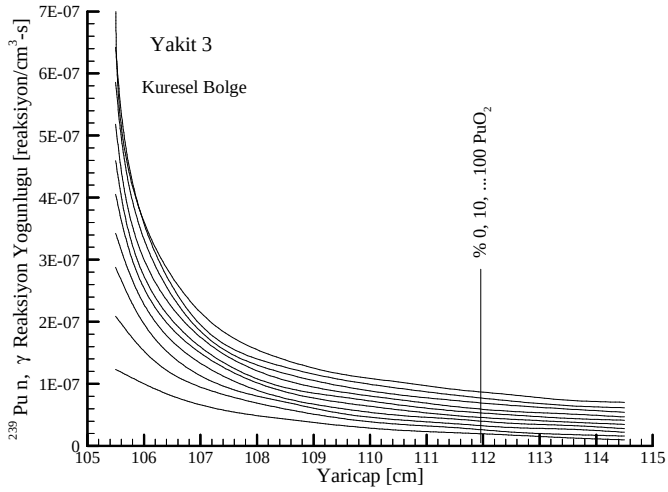


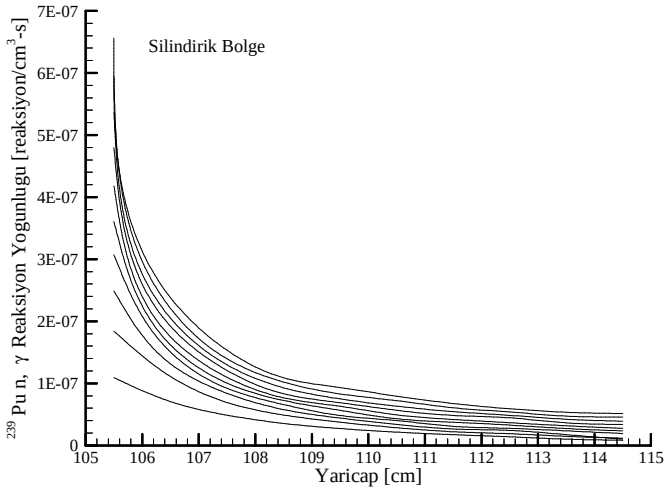




Şekil 3.11. Yakıt 2 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{237}$Np n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

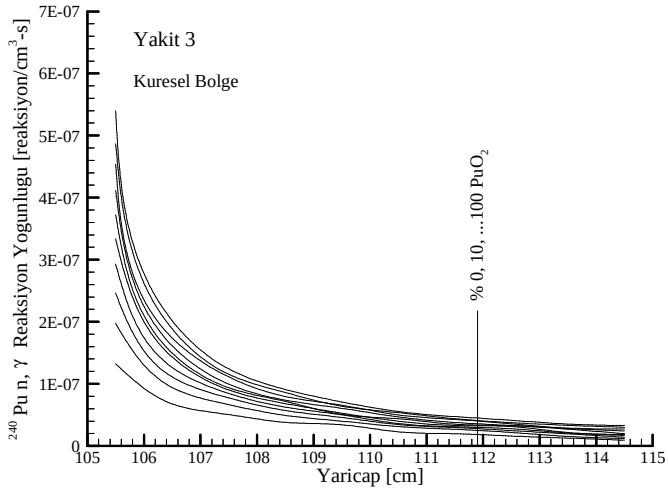


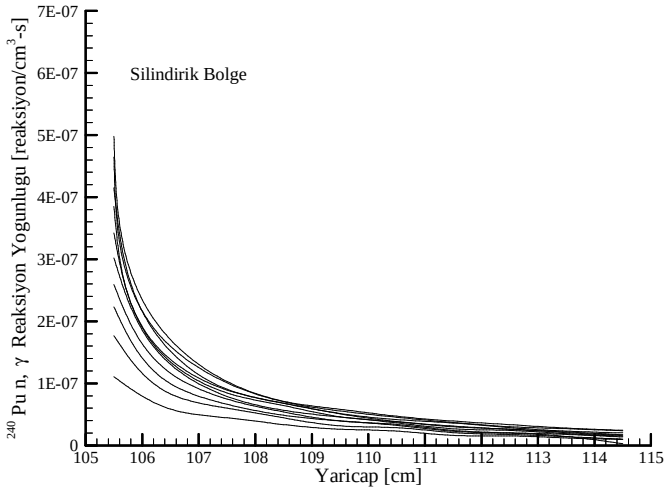

Şekil 3.12. Yakıt 3 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{232}$Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi



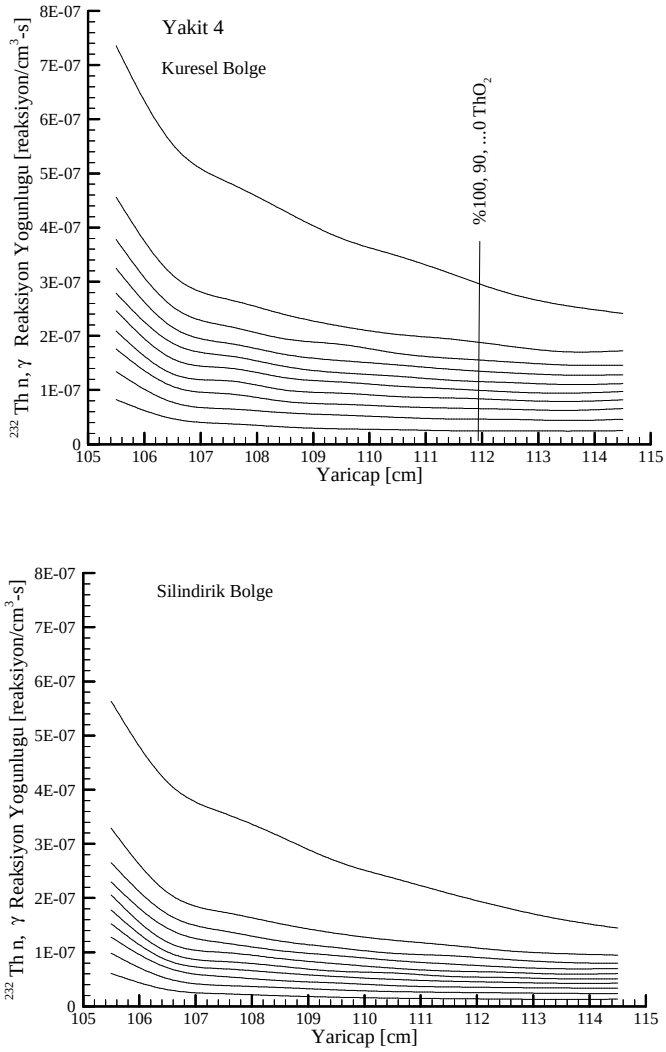




Şekil 3.13. Yakıt 3 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{239}$Pu n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

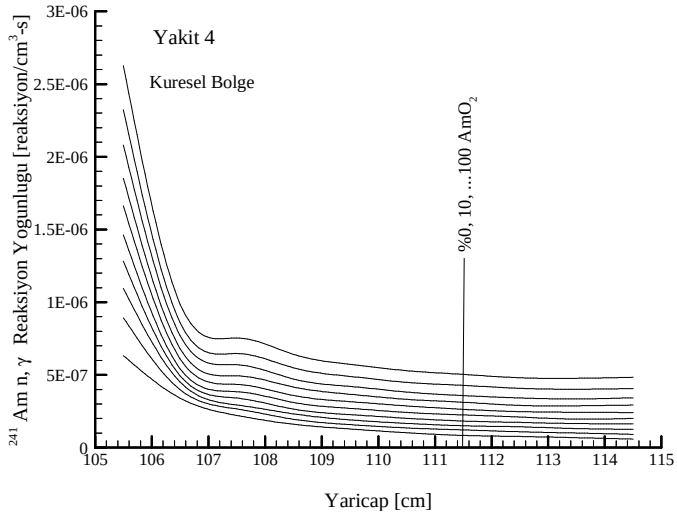


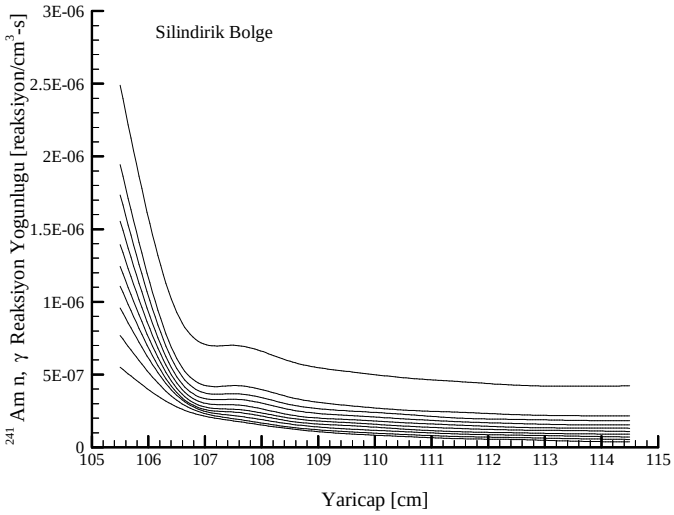




Şekil 3.14. Yakıt 3 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{240}$Pu n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

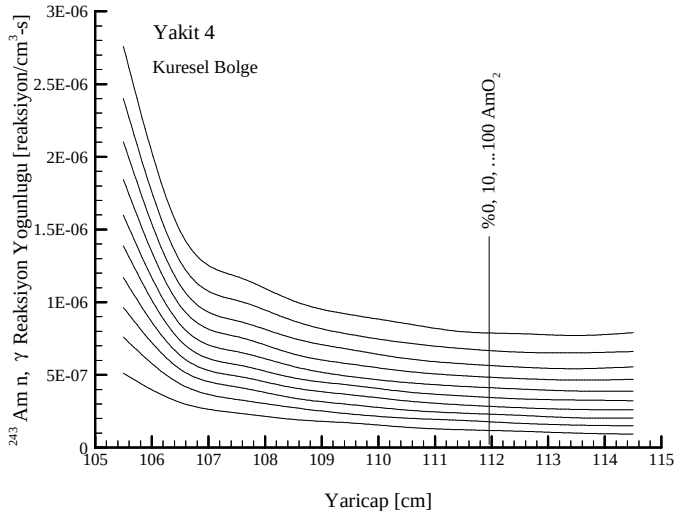


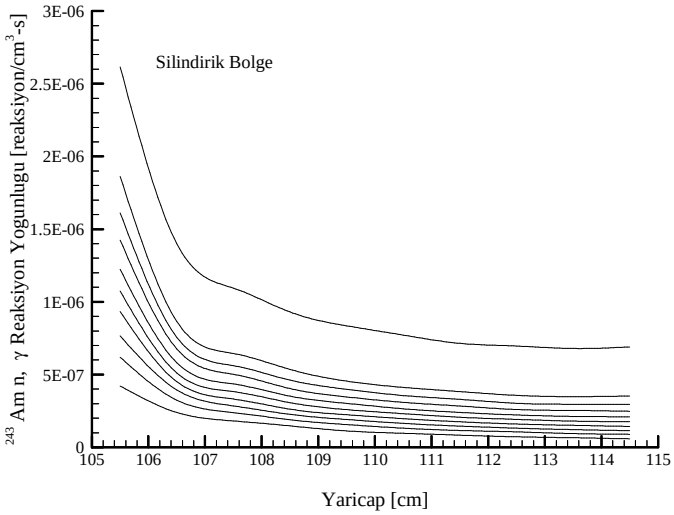

Şekil 3.15. Yakıt 4 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{232}$Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi



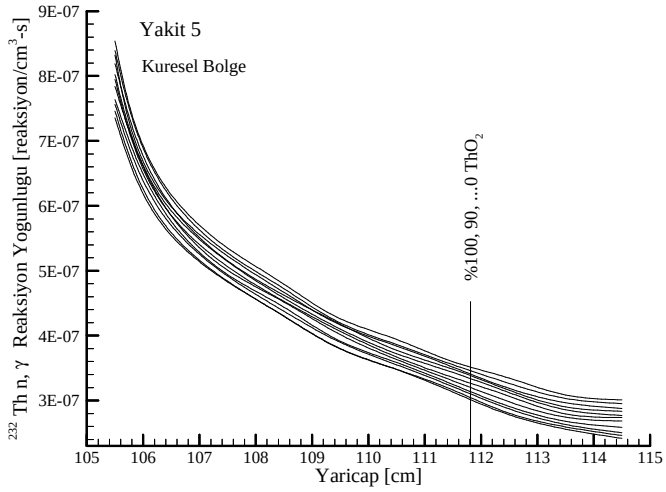



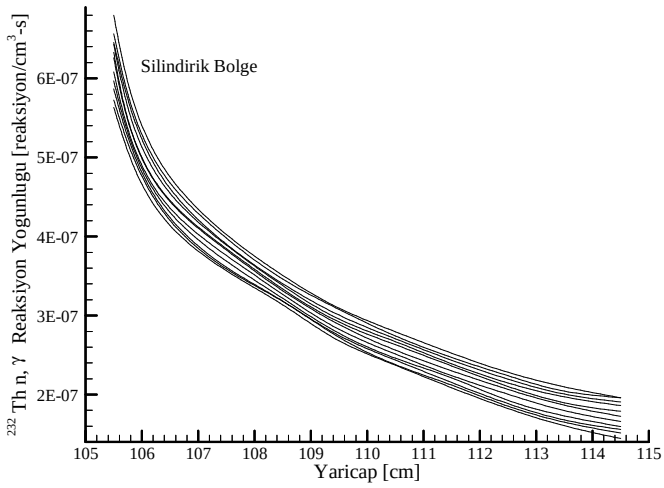

Şekil 3.16. Yakıt 4 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{241}$Am n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi



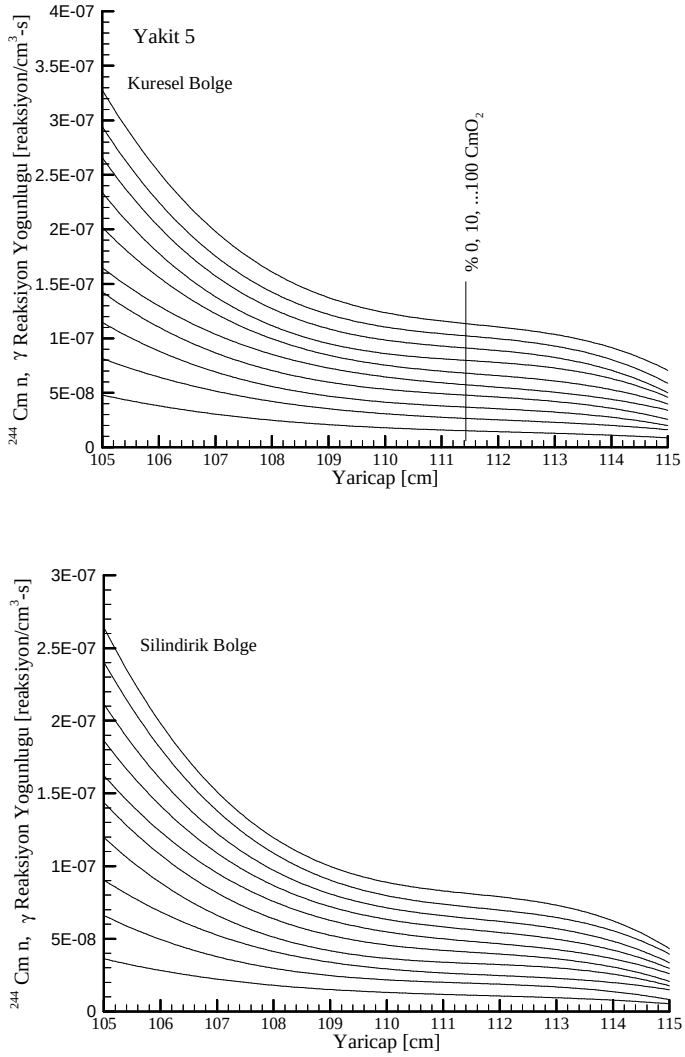




Şekil 3.17. Yakıt 4 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{243}$Am n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

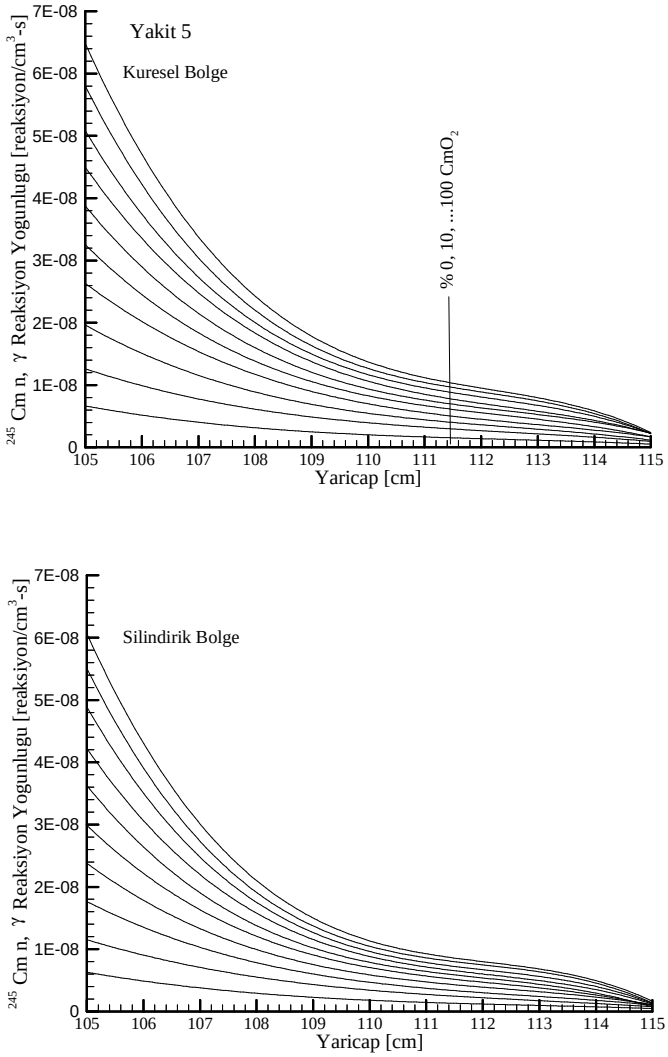



Şekil 3.18. Yakıt 5 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{232}$Th n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi




Şekil 3.19. Yakıt 5 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{244}$Cm n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

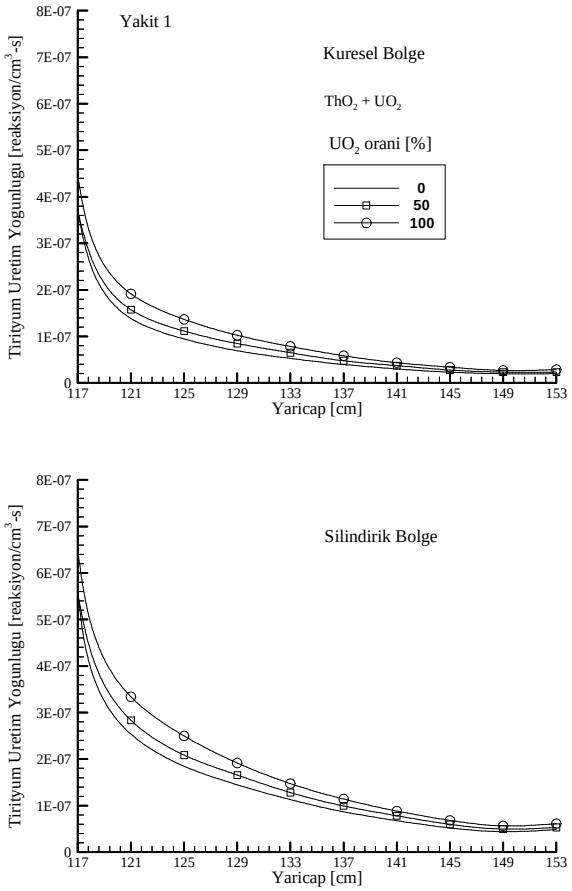



Şekil 3.20. Yakıt 5 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki $^{245}$Cm n,γ reaksiyon yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

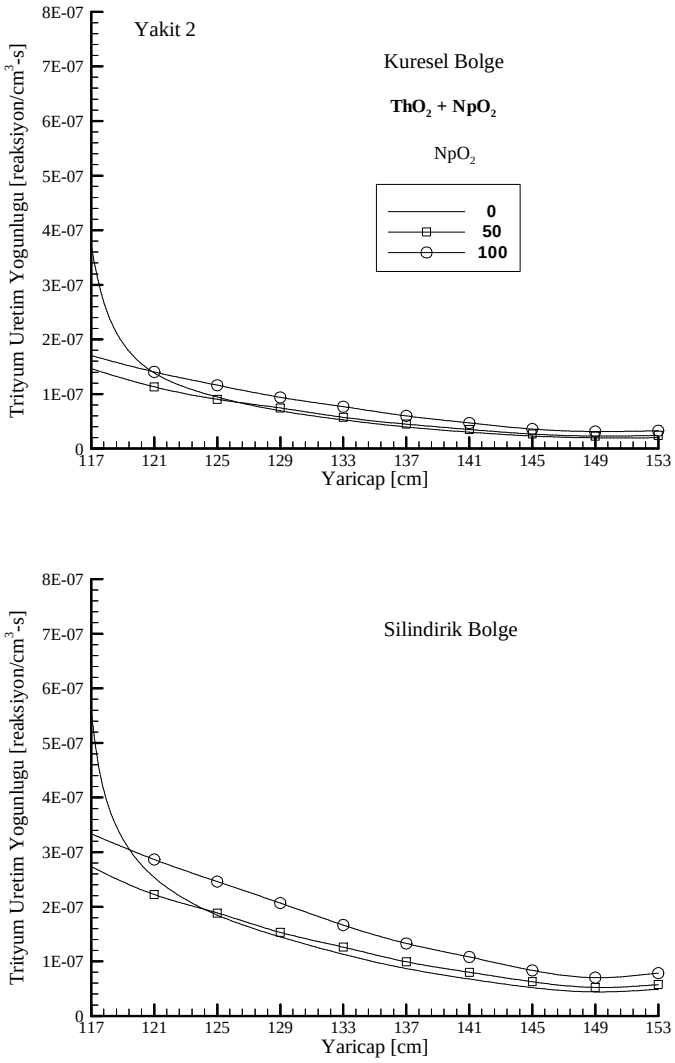
### 3.4.3. Trityum Üretim Yoğunluğu

Yakıt 1-5 için sırasıyla Şekil 3.21-3.25'de yakıt bölgelerindeki trityum üretim yoğunluklarının değişimi sırasıyla görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi Model 1,3 ve 5 için trityum üretim yoğunluğu minör aktinitdioksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$'in oranı arttıkça artarken, yarıçap arttıkça azalmaktadır. Model 2 ve 4' te trityum üretim bölgesinin başlangıcında toryum, neptünyum ve amerikyuma göre daha fazla fisyon nötronları oluşturması ve dolayısıyla trityum artmaktadır. Trityum üretim bölgesinin

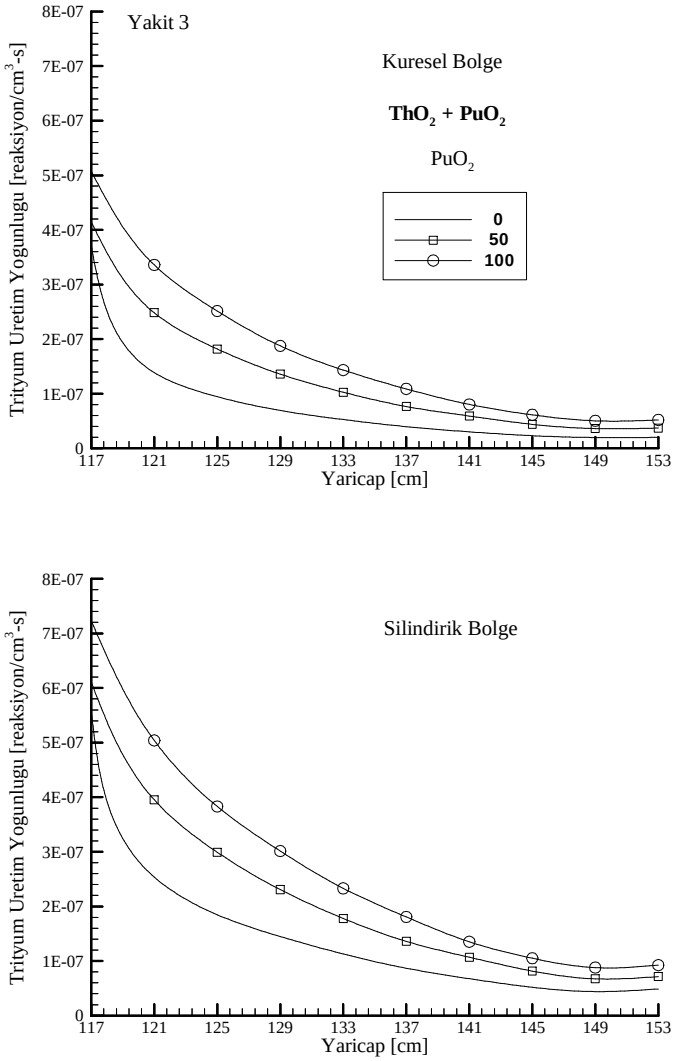
daha sonraki bölgelerin de ise neptünyum ve amerikyum etkisi azalmaktadır. Ayrıca silindirik bölgelerdeki trityum üretim yoğunlukları küresel bölgelerdekine göre daha fazladır.



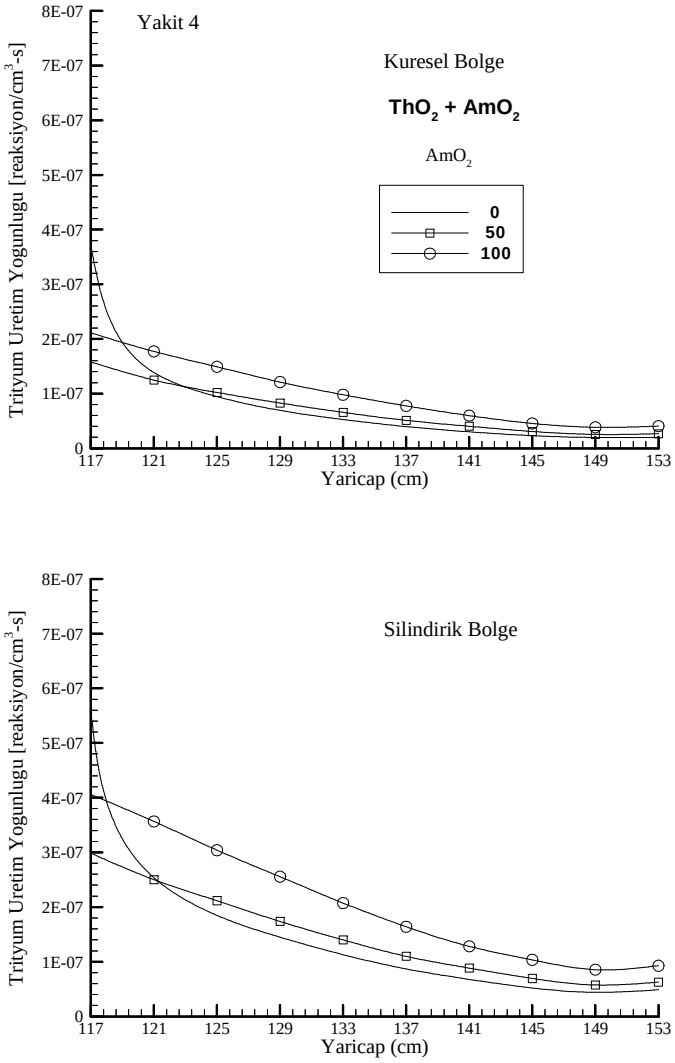

Şekil 3.21. Yakıt 1 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki trityum üretimi yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi



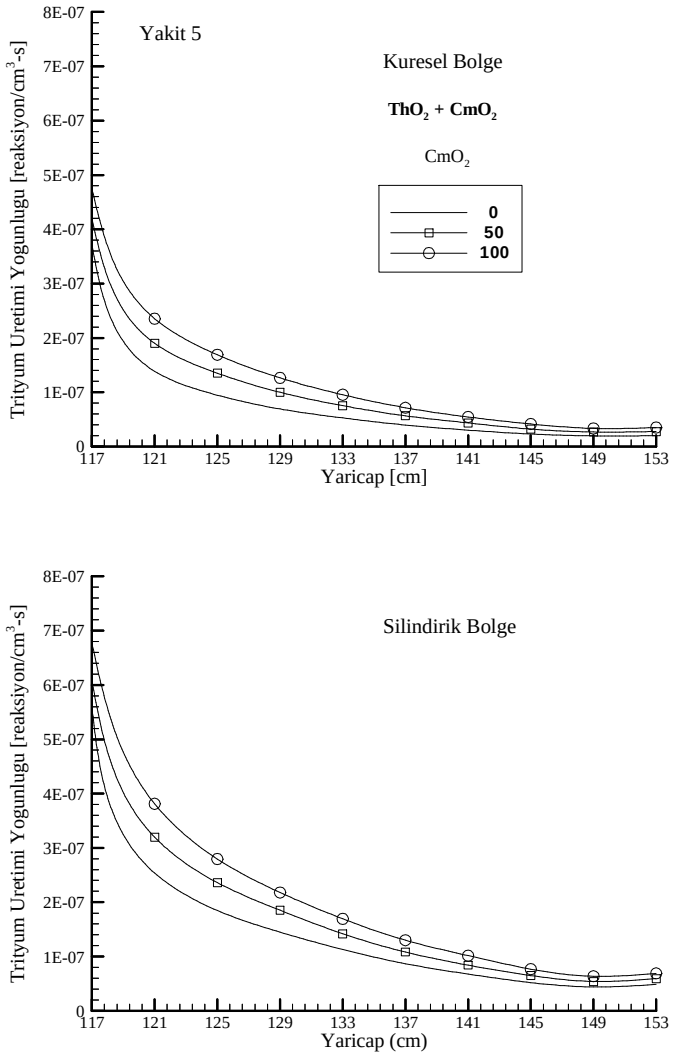

Şekil 3.22. Yakıt 2 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki trityum üretimi yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi




Şekil 3.23. Yakıt 3 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki trityum üretimi yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi



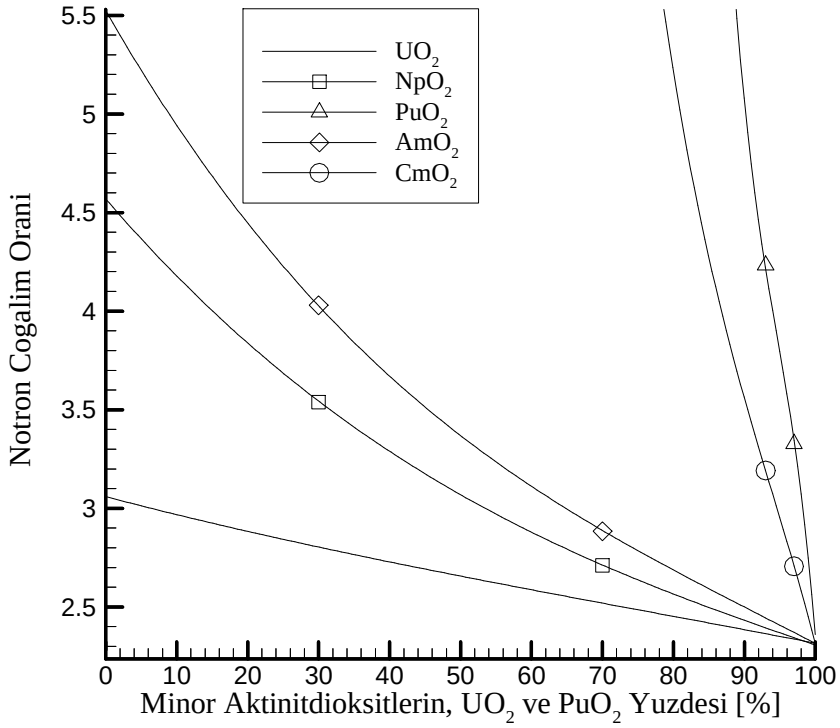

Şekil 3.24. Yakıt 4 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki trityum üretimi yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi




Şekil 3.25. Yakıt 5 için küresel ve silindirik yakıt bölgesindeki trityum üretimi yoğunluklarının yarıçapa göre değişimi

### 3.4.4. Nötron Çoğalım Oranı

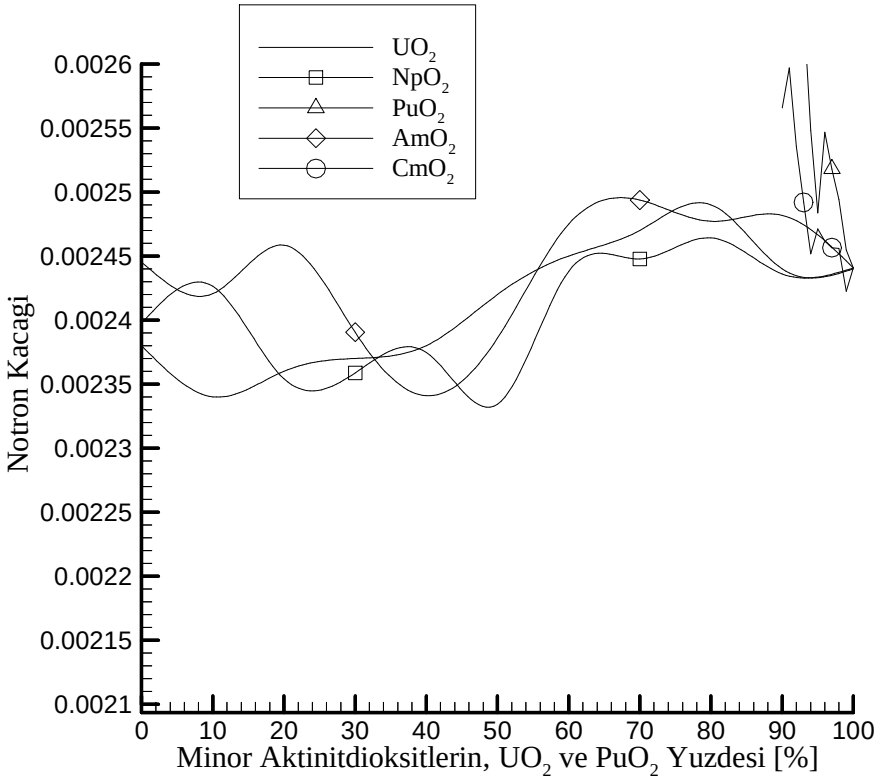
Yakıt 1-5 için Şekil 3.26'da minör aktinit oksitlerim karışım yüzdesine göre nötron çoğalım oranının değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi nötron çoğalım oranının en yüksek olduğu karışım $PuO_2$-$ThO_2$ yakıt karışımıdır. Nötron çoğalımının en düşük olduğu karışım ise $UO_2$-$ThO_2$ yakıt karışımıdır. Tüm modellerde minör aktinit oranı arttıkça nötron çoğalımı azaldığı görülmektedir.




Şekil 3.26. Yakıt 1-5 için minör aktinitdioksit,$UO_2$ ve $PuO_2$ karışım yüzdesine göre blanketteki nötron çoğalım oranının değişimi

### 3.4.5. Nötron Kaçağı

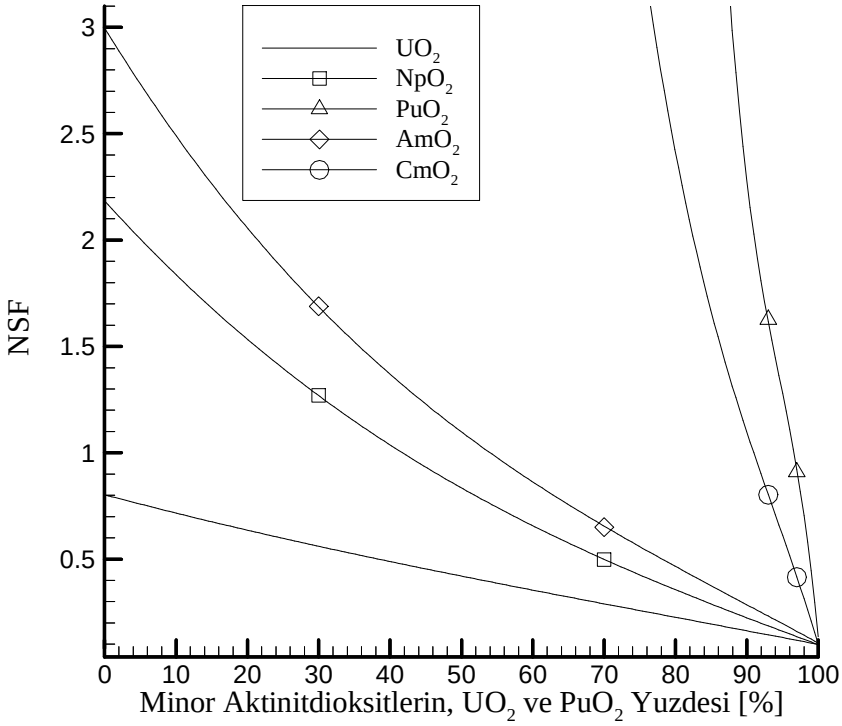
Yakıt 1-5 için Şekil 3.27'de minör aktinitdioksit,$UO_2$ ve $PuO_2$ karışım yüzdesine göre blanketeki nötron kaçağı gösterilmiştir. Nötron kaçağı yakıt oranına göre değişken bir durum göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm modellerde minöraktinitoksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$'nin karışım oranı %100 olduğu zaman nötron kaçağı yaklaşık 0.00245 olmaktadır.




Şekil 3.27. Yakıt 1-5 için minör aktinitdioksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$ karışım yüzdesine göre blanketteki nötron kaçağı oranının değişimi

### 3.4.6. Fisyon Nötron Çoğalım Oranı

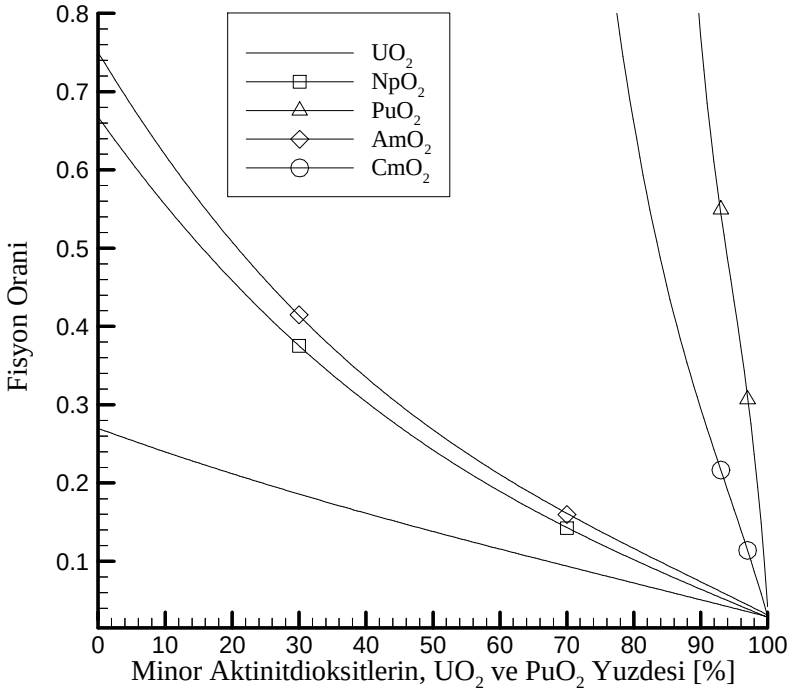
Yakıt 1-5 için Şekil 3.28'de minör aktinit oksitlerim karışım yüzdesine göre fisyon nötron çoğalım oranının değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi fisyon nötron çoğalım oranının en yüksek olduğu karışım $PuO_2$-$ThO_2$ yakıt karışımıdır. Nötron çoğalımının en düşük olduğu karışım ise $UO_2$-$ThO_2$ yakıt karışımıdır. Tüm modellerde minör aktinitdioksit,$UO_2$ ve $PuO_2$ oranı arttıkça nötron çoğalımı azaldığı görülmektedir.




Şekil 3.28. Yakıt 1-5 için minör aktinitdioksit,$UO_2$ ve $PuO_2$ karışım yüzdesine göre blanketteki fisyon nötron çoğalım oranının değişimi

### 3.4.7. Fisyon Oranının Değişimi

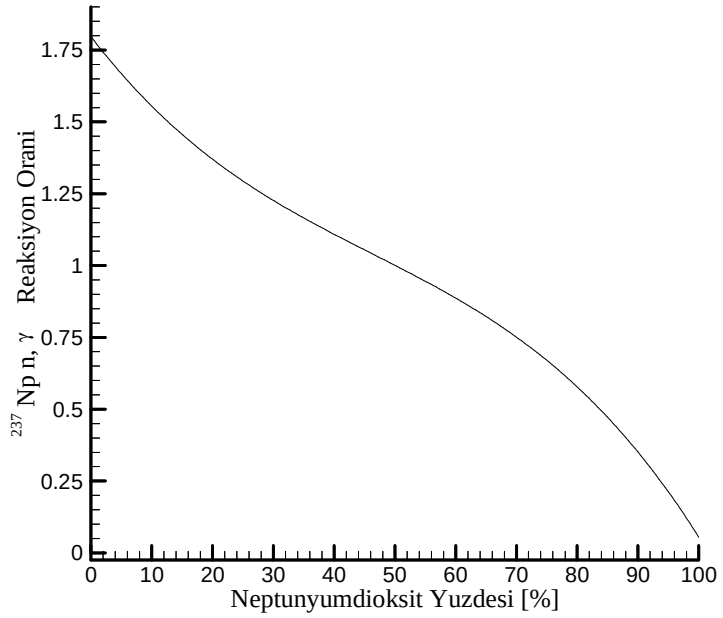
Yakıt 1-5 için Şekil 3.29'da minör aktinitdioksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$'in karışım yüzdesine göre fisyon oranının değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi fisyon oranının en yüksek olduğu karışım $PuO_2$-$ThO_2$ yakıt karışımıdır. Yakıt karışımları arasında en yüksek fisyon tesir kesitine $PuO_2$ sahip olduğundan dolayı en yüksek fisyon oranına da $PuO_2$ sahip olacaktır. Aynı şekilde yakıt karışımları arasında en düşük fisyon tesir kesitine $UO_2$ sahip olduğundan dolayı Şekil 5.28 de görüldüğü gibi en düşük fisyon oranına da $UO_2$ sahiptir. Tüm modellerde minör aktinitdioksitlerin,$PuO_2$ ve $UO_2$ oranı arttıkça fisyon oranının azaldığı görülmektedir.



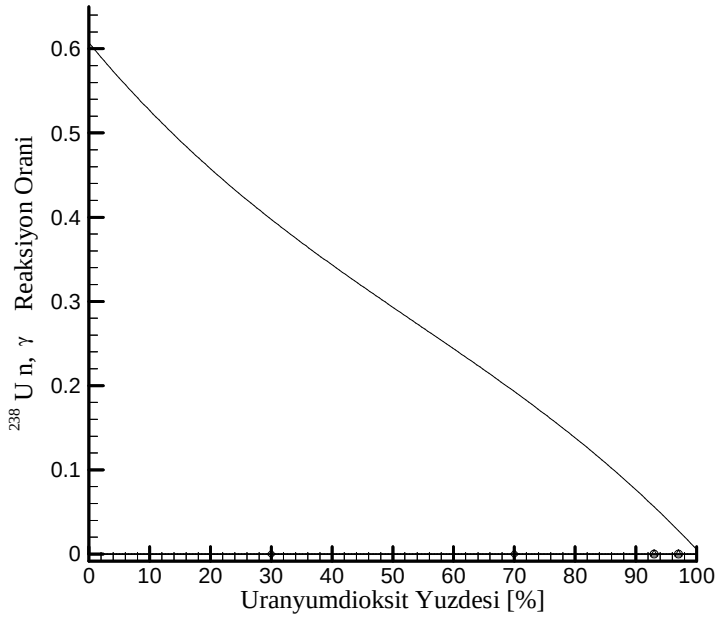

Şekil 3.29. Yakıt 1-5 için minör aktinitdioksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$ karışım yüzdesine göre blanketteki fisyon oranının değişimi

### 3.4.8. n,γ Reaksiyon Oranı

Yakıt 1-5 için sırasıyla Şekil 3.30-3.37'de minör aktinitdioksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$ karışım yüzdesine göre n,γ reaksiyon oranı değişimi görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi minör aktinitdioksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$ yüzdesi artıkça n,γ reaksiyon oranı azalmaktadır. Şekil 5.38'de toryum yüzdesine göre $^{232}Th$ reaksiyon oranı verilmiştir ve şekilde görüldüğü gibi toryum yüzdesi arttıkça n,γ reaksiyon oranı artmaktadır.

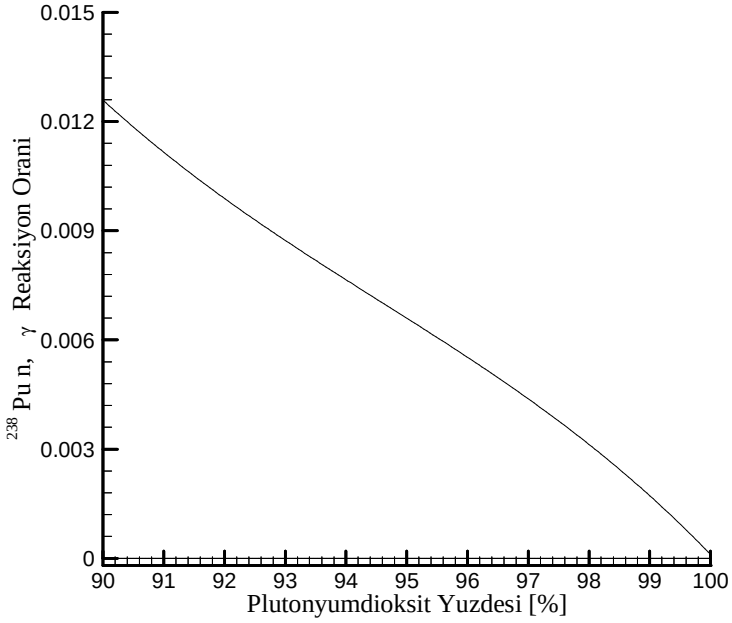



Şekil 3.30. Neptünyumdioksit yüzdesine göre blanketteki $^{237}$Np n,γ reaksiyon oranının değişimi

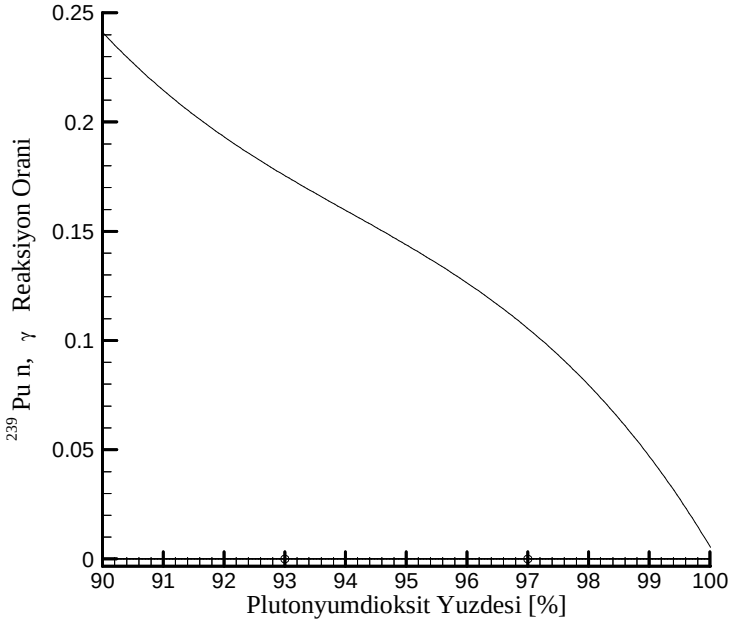



,

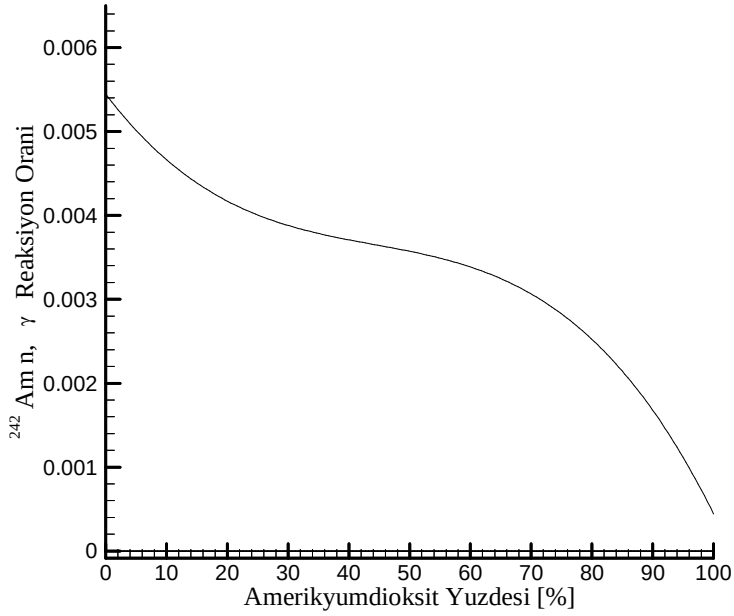
Şekil 3.31. Uranyumdioksit yüzdesine göre blanketteki $^{238}$U n,γ reaksiyon oranının değişimi



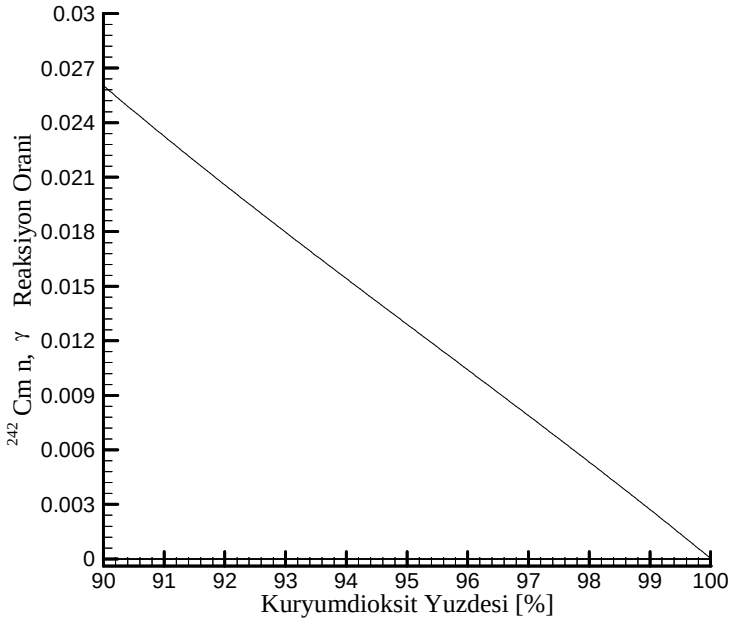

Şekil 3.32. Plütonyumdioksit yüzdesine göre blanketteki $^{238}$Pu n,γ reaksiyon oranının değişimi



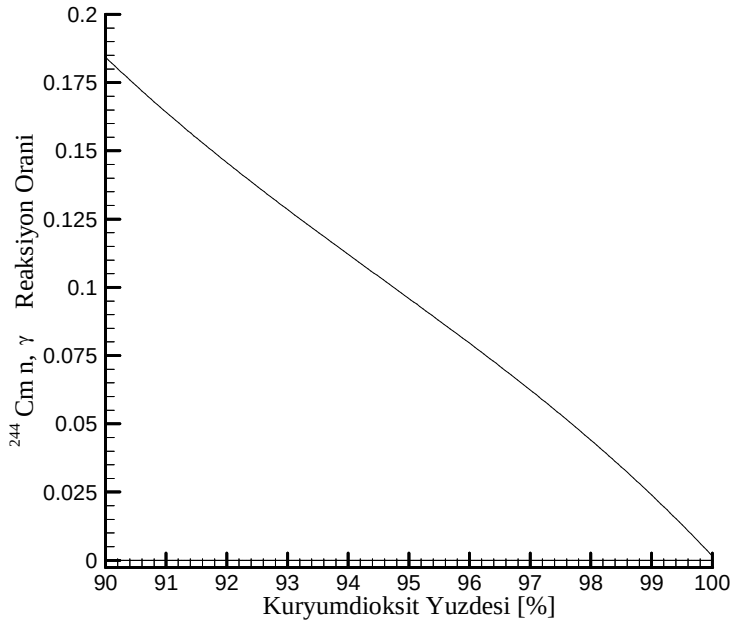

Şekil 3.33. Plütonyum yüzdesine göre blanketteki $^{239}$Pu n,γ reaksiyon oranının değişimi



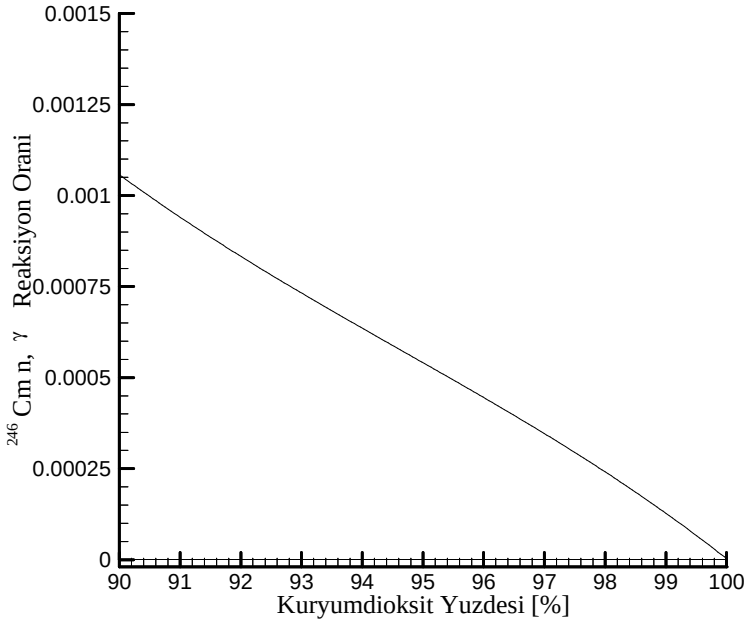

Şekil 3.34. Amerikyumdioksit yüzdesine göre blanketteki $^{242}$Am n,γ reaksiyon oranının değişimi



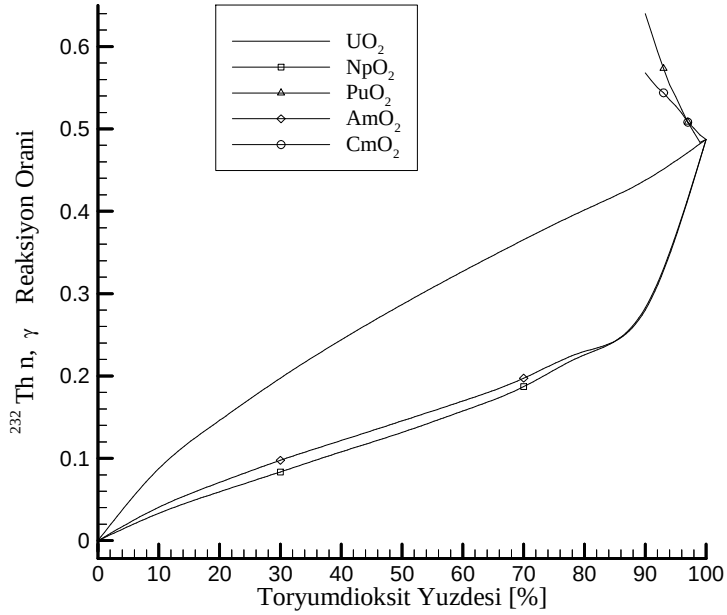

Şekil 3.35. Küryumdioksit yüzdesine göre blanketteki $^{242}$Cm n,γ reaksiyon oranının değişimi




Şekil 3.36. Küryumdioksit yüzdesine göre blanketteki $^{244}$Cm n,γ reaksiyon oranının değişimi



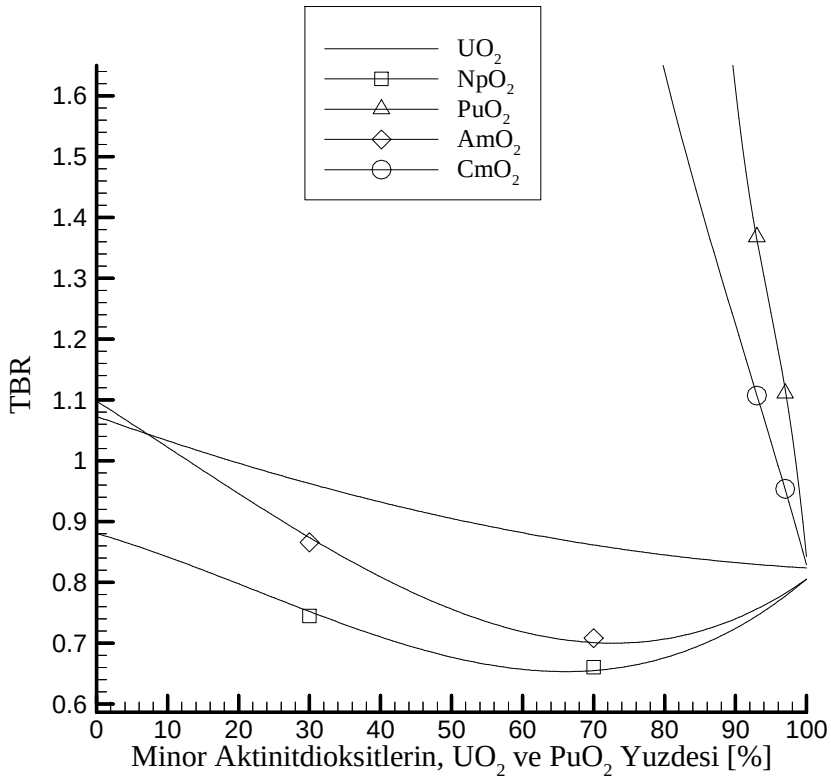

Şekil 3.37. Küryumdioksit yüzdesine göre blanketteki $^{246}$Cm n,γ reaksiyon oranının değişimi




Şekil 3.38. Toryumdioksit yüzdesine göre blanketteki $^{232}$Th n,γ reaksiyon oranının değişimi

### 3.4.9. Trityum Üretim Oranı (TBR)

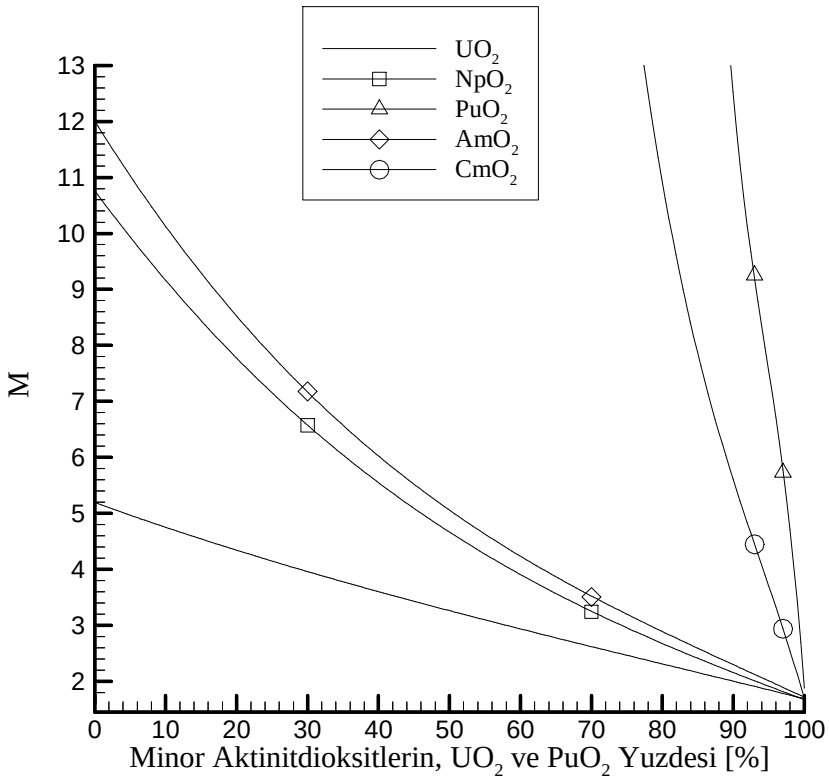
Şekil 3.39'da TBR'nin minör aktinitdioksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$ yüzdelerine göre değişimi görülmektedir. TBR'nin 1.1'den büyük olan değerlerinde blanket trityum açısından kendi kendine yeterli olacaktır. Bu durum $NpO_2$ ve $AmO_2$ 'li karışımlarda trityum açısından kendi kendine yeterli olmadığı görülmektedir.




Şekil 3.39. Minör aktinitdioksit,$UO_2$ ve $PuO_2$ yüzdesine göre blanketteki TBR oranı değişimi

### 3.4.10. Blanket Enerji Çoğalım Katsayısı

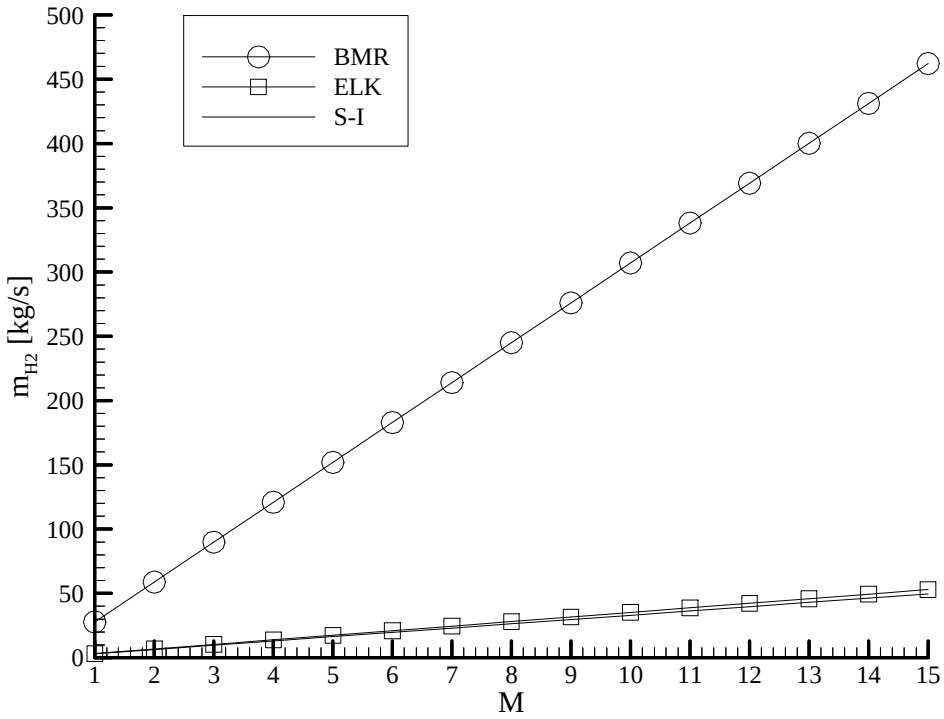
Yakıt 1-5 için Şekil 3.40'ta minör aktinitdioksitlerin,$UO_2$ ve $PuO_2$'in karışım yüzdesine göre blanketteki enerji çoğalım katsayısının değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi enerji çoğalım katsayısı en yüksek olduğu karışım $PuO_2$-$ThO_2$ yakıt karışımıdır. Yakıt karışımları arasında en yüksek fisyon oranı ve trityum üretimine $PuO_2$ sahip olduğundan dolayı en yüksek enerji çoğalım katsayısına da $PuO_2$ sahip olacaktır. Aynı şekilde yakıt karışımları arasında en düşük fisyon oranı ve trityum üretimine $UO_2$ sahip olduğundan dolayı Şekil 3.40 da görüldüğü gibi en düşük enerji çoğalım katsayısna da $UO_2$ sahiptir. Tüm modellerde minör aktinitdioksitlerin,$PuO_2$ ve $UO_2$ oranı arttıkça enerji çoğalım katsayısının azaldığı görülmektedir.




Şekil 3.40. Minör aktinitdioksit,$UO_2$ ve $PuO_2$ yüzdesine göre blanketteki enerji çoğalım katsayısı oranı değişimi

### 3.4.11. Hidrojen Üretimi

Buhar metan reformasyonu hesaplamaların da denklem (2.6f) kullanılmıştır. Denklem 3.2i için $\eta_{smr}$=0.80, $\varepsilon$=1 , $q_{net}$=165kj/kmol ve $M_{H2}$=0.002 kJ/mol olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Elektroliz hesaplamalarında denklem (2.6g) kullanılmıştır. Hesaplamalar yapılırken denklem 3.3g'de n=1, $f_{eh}$=4,$\Delta$H=kJ ve $M_{H2}$=0.002 kJ/mol olarak kabul edilmiştir. S-I çevrimi hesaplamalarında denklem (2.6h) kullanılmıştır ve $\Re$=240 mJ/kg olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar da denklem (2.6f) , (2.6g) ve (2.6h) için $P_f$=1000 MW, $f_n$=0.8, $f_\alpha$=0.2 , Q=20, $\eta_{th}$=0.50, $\eta_d$=0.50, $\varepsilon_{cir}$=0.6 olarak kabul edilmiştir. Ayrıca enerji çoğalım katsayısı 1'den 15'e kadar 1'er adımlarla artırılarak hidrojen üretiminin değişimi araştırılmıştır. Şekil 3.41'de enerji çoğalım katsayılarına göre hidrojen üretiminin değişimi gösterilmiştir.




Şekil 3.41. Enerji çoğalım katsayısına göre hidrojen üretimi değişimi

Şekil 3.41'de buhar metan reformasyonuyla, elektroliz ve S-I çevrimiyle üretilen hidrojen miktarlarının enerji çoğalım katsayısına göre değişimi görülmektedir. Bu şelide görüldüğü gibi enerji çoğalım katsayısı arttıkça hidrojen üretimi de artmaktadır. Ayrıca en fazla hidrojen üretimi buhar metan reformasyonunda olduğu görülmektedir. S-I çevrimiyle elde edilen hidrojen üretimi ve elektrolizle elde edilen hidrojen üretimi miktarı birbirine çok yakın olmasına rağmen elektroliz ile hidrojen üretimi yönteminde biraz daha fazla hidrojen üretildiği şekil 3.41'den görülmektedir.

# 4. BÖLÜM

# TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

Nükleer reaktörler de enerjisi elde edilirken, yüksek seviyeli nükleer atıklar da oluşmaktadır. Bu atıklar TRU ve fisyon ürünleridir. Hibrit reaktörlerde bu aktinitler nötron yakalama reaksiyonları sonucunda fisyon yapabildikleri gibi değerli fisil yakıtlara da dönüştürülebilir. Bu tez çalışmasında hibrit reaktörde aktinitlerin dönüşümü gerçekleştirilirken, bir yandan da hibrit reaktörden fisyon sonucu elde edilen enerji ve ısı ile çeşitli hidrojen üretim metotları kullanılarak ele alınan blankette hidrojen üretim potansiyeli araştırıldı.

## 4.1.Hibrit Reaktördeki Yakıt Dönüşümü ve Nötronik Performans Sonuçları

-Füzyon-fisyon hibrit reaktöründe aktinitlerin yakma/dönüştürme potansiyelini araştırmak için 5 farklı yakıt oluşturuldu. (Yakıt 1,2,3,4 ve 5) Bu yakıtların yakıt hacimsel oranları $UO_2$-ThO ,$NpO_2$- $ThO_2$ ve $AmO_2$- $ThO_2$ için %0'dan %100'e arttırılırken; $PuO_2$-$ThO_2$ ,$CmO_2$- $ThO_2$ için %0'dan %10'a arttırıldı. Çalışma sonucunda aktinit dönüşümü gerçekleştirildi.

-Hibrit reaktörde oluşturulan modellerin nötronik performansları araştırıldı ve araştırma sonucu enerji çoğalım katsayısı oldukça yüksek bulunmuştur.

-Hibrit reaktörde trityum reaktörün kendi kendine yetecek kadar üretildiği görülmüştür.

-Füzyon reaksiyonu sonucu oluşan 14.1 MeV'lik yüksek enerjili nötron oluşmaktadır. Yüksek enerjili bu nötron blankette fisyon reaksiyonu yapması sonucunda enerji katlanarak çoğalmaktadır.

## 4.2.Nükleer Hidrojen Üretimi Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

-Füzyon sürücülü sistemde hidrojen üretim potansiyelinin çok yüksek olduğu görülmüştür.

-Nükleer enerji kullanarak buhar-metan reformasyonu, yüksek sıcaklıklı elektroliz ve S-I termokimyasal yöntemler incelendi ve S-I termokimyasal yöntem ve yüksek sıcaklıklı elektrolizin verimli olduğu görülmüştür.

-Buhar-metan reformasyonunda en fazla hidrojen üretimi olduğu görülmüştür.

-Nükleer hidrojen üretiminde yüksek sıcaklıklı elektroliz yoluyla hidrojen üretimi sonucunda büyük miktarda hidrojen üretilmektedir. Ve yüksek sıcaklıklı elektroliz ile hidrojen üretimin de, S-I termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimine göre az da olsa daha fazla hidrojen üretildiği görülmüştür.

**KAYNAKLAR**


1. Web Sayfası www.taek.gov.tr (Erişim tarihi: Temmuz 2013)
2. Web Sayfası http://nuclearweaponarchive.org/Library/Fission.html (Erişim tarihi: Temmuz 2013)
3. Web Sayfası http://www.atomicarchive.com/Fusion/ (Erişim tarihi: Temmuz 2013)
4. Genç, G., 2008, İleri Teknoloji Sistemlerin Minör Aktinid ve Uzun Ömürlü Fisyon Ürünlerini Yakma/Dönüştürme Potansiyellerinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 147 s.
5. Rutherford, E., 1920, Bakerian Lecture: Nuclear Constitution of the Atoms, **Proceedings of the Royal Society A, 97** (1):374.
6. Cockroft, J.D., Walton, 1932, Experiments with High Velocity Positive Ions-(I) Further Developments in the method of obtaining High Velocity Positive Ions, **Proceedings of the Royal Society A**, 619-625.
7. Baetslé, L., H., Wakabayashi, T., Sakurai, S., 1999. First Phase P&T Systems Study: Status and Assessment Report on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, OECD/NEA
8. Gudowski, W.,1999. Accelerator-driven Transmutation Projects: The Importance of Nuclear Physics Research for Waste Transmutation, **Nuclear Physics A, 654** (1):436-457.
9. Iwasaki, T., Hirakawa, N., 1995. Transmutation of Minor Actinide in Well Thermalized Neutron Field and Application of Advanced Neutron Source (ANS), **Journal of Nuclear Science and Technology, 32** (1):8-17.
10. Salvatores, M., Slessarev, I., Uenatsu, M.,1994. A Global Physics Approach to Radioactive Nuclei Transmutation, **Nuclear Science and Engineering**, **116** (1), 1-18.
11. Tekeda, T., Yokoyama, K., 1997, **Study on Neutron Spectrum for Effective Transmutation of Minor Actinides In Thermal Reactors, Annals of Nuclear Energy, 24** (9):705-719.
12. T. HAYASE, et al., Core Design Study for Actinide Burning LMFBRs, *International Conference on the Physics of Reactors, Marseille, pIII-1,April 23-27, ,1990,, France.*

13. Masumı, R., Aoyama, M., Yamashita, J., 1995.Minor Actinide Transmutation in BWR Cores for Multi-Recycle Operation with Less Minor Actinides-to-Fissile Plutonium Amount Ratio, **Journal of Nuclear Science and Technology**, **32** (10):965-970.
14. Mukaiyama,T., et al., R&D Strategy For Partitioning & Transmutation Under Omega. Programme And Neutron Science Project Of Jaeri, *International Conference on the Physics of Reactors, Operation, Design and Computation, Vol.1 (97), 23-27 April 1990, France.*
15. NEA, 1994. Overview of Physics Aspects of Different Transmutation Concepts, NEA/Nsc/Doc,(94) 11.
16. NEA, 2002, Accelerator-Driven Systems (ADS) and Fast Reactor(FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, OECD/NEA.
17. Fujimura, K., Kawashima, K., Actinide Burning Ultralong-Life FBR Core Concepts, *Proc. Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, FR'91, Kyoto, Japan.*
18. Fujimura, K., Kawashima, K., October 28-November 01,1991. Actinide Burning Ultralong-Life FBR Core Concepts, *Proc. Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, FR'91,October 28-November 01, 1991. Kyoto, Japan.*
19. Wakabayashi, T., Higano, N.,1998. Study on MA and FP Transmutation in Fast Reactonrs, **Progress in Nuclear Energy, 32** (3–4):555–562.
20. Broeters,C.H.M, Kiefhaber, E., and Wiese, H.W., 2000, Burning Transuranium Isotopes in Thermal and Fast Reactors, **Nuclear Engineering and Design, 202** (2-3):157-172
21. Wakabayshi, T., 2002, Transmutation Characteristica of MA and LLFP in a Fast Reactor, **Progress in Nuclear Energy ,40** (3-4): 457-463
22. Yapıcı, H., Özışık, G., 2008. Modification of PROMETHEUS Reactor as a Fusion Breeder and Fission Product Trasmuter**, Journal of Fusion Enegy, 27** (4): 256-270.
23. Gohar,Y., 2001. Flibe Blanket Concept for Transmuting Transuranic Elements and Long Lived Fission Products, **Fusion Technology, 39** (1):535-540.
24. Yapıcı,H.,2003, Study on Transmutation of Minor Actinides Discharged from High Burn-up PWR-MOX Spent Fuel in the Force-Free Helical Reactor, **Annals of Nuclear Energy, 30** (4): 413-436

25. Şahin,S., Yapıcı, H., Şahin, n., 2001. Neutronic Performance of Proliferation Hardened Thorium Fusion Breeders, **Fusion Engineering and Design, 54** (1): 63-77.

26. Stacey,W.M., 2001. Capabilities of a DT Tokamak Fusion Neutron Source for Driving a Spent Nuclear Fuel Transmutation Reactor, **Nuclear Fusion, 41** (2):135-154.

27. Serikov, A., Shatalov, G., Sheludjakov, S., Shpansky, Y., Vasiliev, N., 2002, Possibility of Fusion Power Reactor to Transmutate Minor Actinides of Spent Nuclear Fuel , **Fusion Engineering and Design, 63-64** (1), 93-99.

28. Yapıcı. H., Genç, G., Demir, N., Çeper, B., 2004. Minor Actinide Transmutation Potential of Modified PROMETHEUS Fusion Reactor, **Journal of Fusion Energy, 23** (2), 121-135.

29. Web Sayfası www.fchea.org, (Erişim Tarihi: Temmuz 2013)

30. Yan, X.L, Hino, R., Nuclear Hydrogen Production (Fusion Reactor Hydrogen Production), CRC Press, Taylor-Francis Group, Japan Atomic Energy Agency, Florida, USA, 377 s.

31. Kavak , K. ,2005. Dünya'da ve Türkiye'de enerji verimliliği ve Türk sanayisinde enerji verimliliğinin incelenmesi. Devlet Planlama Teşkilatı Raporu Yayın No:2689. Ankara

32. Web Sayfası http://www.scelik.tr.gg/Hidrojenin-Depolanması.htm,(Erişim tarihi= haziran 2013

33. Özışık, G., Demir, N., Yalçın, Ş., Kahraman, N., Yapıcı, H., A Parametric Study On Hydrogen Production Via Steam-Methane Reforming In Fusion-Driven Systems, *ULTBK'09 17. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 24-27 Haziran 2009, Sivas.*

34. Özışık, G., 2012, Nükleer Hidrojen Üretimi ve Üretilen Hidrojenin Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücrelerinde Uygulaması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 197 s.

35. Özışık, G., Demir, N., Yapıcı, H., Kahraman, N., Yalıçın, Ş., A Parametric Study On Hydrogen Production From Sulfur-Iodine Cycle In Fusion-Driven Systems, *International Conference on Hydrogen Production, May 3-6, Oshawa, Canada*

36. Özışık, G., Demir. N., Yapıcı, H., Füzyon Sürücülü Ssitemlerde Yüksek Sıcakliklı Elektroliz Yoluyla Hidrojen Üretimi Üzerine Parametrik Çalışma, *IV. Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi (UHK 2009) ve Sergisi, 15-16 Ekim, Kocaeli*.
37. G. Özışık, N.Demir, M. Übeyli , H.Yapıcı, Hydrphen production via water splitting process in a molten-salt fusion breeder, *İnternetional Journal of Hydrogen Energy, 7357-7368,2010*
38. Patel G. A., Maheshwari N. K., Vijayan P. K., Sinha R. K., A Study on Sulfur-Iodine(S-I) Thermochemical Water Splitting Process for Hydrogen Production from Nuclear Heat, Reactor Engineering Division,Bhabha Atomic Research Center, Mumbai 40085
39. Yamawaki M., Nishihara T., Inagaki Y., Minato K., Oigawa H., Onuki K., Hino R., Ogawa M., 2007 , Application of nuclear energy for environmentally friendly hydrogen generation, **International Journal of Hydrogen Energy** ,**12** (14), 2719 – 2725,
40. Forsberg C.W., Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor, **International Journal of Hydrogen Energy**, **28** (10) 1073-1081,
41. Takeuchi Y., Yamamoto Y., Konishi S., Hydrogen production from biomass using high temperature, Kyoto University, Kyoto 611-0011, 202 s.
42. Fujukawa T., Hayashı H., Nakazawa T., Kawasaki K., Sakaba N., Achievement of reactor-outlet coolant temperature of 950oC in HTTR, **Journal of Nuclear Science and Tecnology 41** (12),1245-1254,2004
43. Sakaba N., Onuiki K., Kunitom K., 2007 , Conceptual design of hydrogen production system with thermochemical water-splitting iodine-sulphur process utilizing heat from the high temperature gas-cooled reactor HTTR, **International Journal of Hydrogen Energy**, **32** (17) 4160-4169.
44. G Genç., 2010, Hydrogen production potential of APEX fusion transmuter fueled minor actinide fluoride, **International Journal of Hydrogen Energy**, **15** (19) , 10190-10201.
45. Fujiwara S., Kasai S., Yamauchi H., Yamada K., Makino S., Matsunaga K., Yoshino M., Kameda T., Ogawa T., 2006 , Momma S., Hoashi E., Hydrogen production by high temperature electrolysis with nuclear reactor, **Progress in Nuclear Energy**, **50** (2-6), 422-426,

46. Bolthrunis., C.O., Kuhr, R.W. Finan, A.E., 2006. Using a PBMR to heat a steam-methane reformer: *techology and ecomics, 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, October 1-4, Johannesburg, South Africa.*
47. Verfondern, K., 2007. Nuclear energy for hydrogen production, in der Helmholtz-Gemeinschaft, Forschungszentrum Jülich, 199 s.
48. Imasaka, K., Li, D., 2007. An approach to hydrogen production by inertial fusion enegy. **Laser and Particle Beams**,**25** (5):99-105
49. Kimura, H., Takeuchi, Y., Yamamoto, Y., Konishi, S., Hydrogen Production From Biomass Using Nuclear Fusion Energy, *Insitute of Advanced Energy, September 2005 , Kyoto Univ., Gokasho Uji, Kyoto Univercity*
50. Yıldız, B., Kazimi, M.S., 2003. Nuclear Energy Options for Hydrogen and Hydrogen-Based Liquid Fuels Production, Massachusetts Institute of Technology. Center for Advanced Nuclear Energy Systems. Nuclear Energy and Sustainability Program, no**:** MIT-NES;TR-001.
51. Konishi, S., Hasegawa, N., Yamamoto, Y., March 7,2008. Hydrogen Production from Biomass with fusion heat-its feasibility and impact, Japan-US workshop on Fusion Power Plants and Related Advanced Tecnologies.
52. Crosbic, L.M., January 6,2003. Hydrogen Production by Nuclear Heat, MPR Associates Inc. Engineers, 17 s.
53. Forsberg, C.W., 2008, Hydrogen production process requirements and nuclear reactor options. Oak Ridge National Laboratory, managed by UT-Battelle, LLC, fort he U.S. Department of Energy Under Contract DE-AC05-00OR222725, American Institute of Chemical Engineers 3 Park Ave, New York, NY 10016-5991, 158 s.
54. Nuclear Energy Agency Organisation for Economic and Co-Operation Development,2000, Calculations of Different Transmutation Concepts,An International Benchmark Exercise, 11s.
55. Briesmeister, J.F.,1997, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B. LA-12625-M (Los Alamos National Laboratory), 1024 s.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Gizem BAKIR

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 9 Mart 1988, Sivas

Medeni Durumu: Bekâr

Tel: +90 0 346 219 10 10

email: gbakir@cumhuriyet.edu.tr

Yazışma Adresi: Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

İmalat Mühendisliği Bölümü, 58140, SİVAS

## EĞİTİM

| Derece | Kurum | Mezuniyet Tarihi |
|---|---|---|
| Yüksek Lisans | Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü | -- |
| Lisans | Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği | 2011 |
| Lise | Özel Bilgi Anadolu Lisesi | 2005 |

## İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görev |
|---|---|---|
| 2013- Halen | Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü | Araştırma Görevlisi |

## YABANCI DİL

İngilizce