
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TORYUM NÜKLEER YAKITLI LAZER SÜRÜCÜLÜ BİR FÜZYON REAKTÖRÜNDE FİSİL YAKIT VE HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

Şulenur ASAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2020

Şulenur ASAL tarafından hazırlanan "TORYUM NÜKLEER YAKITLI LAZER SÜRÜCÜLÜ BİR FÜZYON REAKTÖRÜNDE FİSİL YAKIT VE HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Başkan: Doç. Dr. Serhat KARYEYEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Emre KOÇ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Başkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Tez Savunma Tarihi: 29.12.2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Şulenur ASAL

29.12.2020

TORYUM NÜKLEER YAKITLI LAZER SÜRÜCÜLÜ BİR FÜZYON REAKTÖRÜNDE FİSİL YAKIT VE HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Şulenur ASAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

ÖZET

Bu tez kapsamında LIFE füzyon reaktörü modifiye edilerek farklı soğutucu ve yakıt oranlarında hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. LIFE füzyon reaktöründe dört farklı mod (Mod ①: hacimsel olarak %5 oranında ThC, %95 flibe soğutucu; Mod ②: %10 ThC, %90 flibe, Mod ③: %5 ThC, %95 natural lityum, Mod ④: %10 ThC, %90 natural lityum) kullanılarak zamana bağlı nötronik analizi MCNP kodu ile yapılmıştır. Nötronik analiz sonucu trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), fisil yakıt üretimi (^{233}U) ve yakıt yanma oranı (BU) değerleri elde edilmiştir. Reaktörün tüm modlarda hidrojen üretim potansiyeli incelenirken, C++ kodu ile yazılan Nükleer Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı ara yüz programı kullanılmıştır. Hidrojen üretim potansiyeli incelenirken üç farklı hidrojen üretim metodu LIFE füzyon reaktörüne entegre edilmiştir; buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem. Hidrojen üretim analizi sonucunda termal güç oranı $(1-\psi)$, termal güç (P_{hpf}), hidrojen üretim miktarı ($\dot{m}_{H_2}$) ve verim (η_{hpf}) değerleri elde edilmiş, kullanılan dört farklı mod için karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda modifiye edilen LIFE füzyon reaktörünün çalışma süresi Mod ①,②,③ ve ④ için sırasıyla 11, 10, 23 ve 20 yıl olarak hesaplanmıştır. LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı hidrojen üretim potansiyelleri incelendiğinde en fazla hidrojen üretiminin Mod ② ile SMR yönteminde, en az ise Mod ③ ile S-I yönteminde olduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 92805
Anahtar Kelimeler : LIFE füzyon reaktörü, nükleer hidrojen, buhar metan reformasyonu, yüksek sıcaklıkta elektroliz, S-I döngülü termokimyasal yöntem
Sayfa Adedi : 71
Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

INVESTIGATION OF FISSILE FUEL AND HYDROGEN PRODUCTION POTENTIAL IN A LASER DRIVER FUSION REACTOR WITH THORIUM NUCLEAR FUEL

(M. Sc. Thesis)

Şulenur ASAL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

ABSTRACT

In this thesis, LIFE fusion reactor was modified and hydrogen production potential of the reactor was investigated by using different coolants and nuclear fuel ratios. Time dependent neutronic analysis was calculated with MCNP code using four different modes (Mode ①: 5 vol.% ThC, 95 vol.% Flibe; Mode ②: 10 vol.% ThC, 90 vol.% Flibe; Mode ③: 5 vol.% ThC, 95 vol.% natural lithium; Mode ④: 10 vol.% ThC, 90 vol.% natural lithium). As a result of neutronic analysis, tritium breeding ratio (TBR), energy multiplication factor (M), fissile fuel production (^{233}U) and burnup (BU) values were obtained. While investigating the hydrogen production potential of reactor for all modes, Nuclear Hydrogen Production Calculator interface program written with C ++ code was used. While examining hydrogen production potential, three different hydrogen production methods have been integrated to the LIFE fusion reactor; steam-methane reforming (SMR), high temperature electrolysis (HTE) and sulfur-iodine (S-I) cycled thermochemical method. As a consequence of hydrogen production analysis, thermal power fraction ($1-\psi$), thermal power (P_{hpf}), hydrogen production amount ($\dot{m}_{H_2}$) and efficiency (η_{hpf}) values were obtained and compared for four different modes used. At the end of the analysis, running time of modified LIFE fusion reactor were calculated as 11, 10, 23 and 20 years for Modes ①,②,③ and ④, respectively. When the time-dependent hydrogen production potentials of LIFE fusion reactor were examined, it was observed that the highest hydrogen production was in the SMR method with Mode ② and the least in the S-I method with Mode ③.

Science Code : 92805
Key Words : LIFE fusion reactor, nuclear hydrogen, steam methane reforming, high temperature electrolysis, S-I cycled thermochemical method
Page Number : 71
Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli yardım ve bilimsel katkılarıyla beni yönlendiren, tez çalışmam süresince tecrübelerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Adem ACIR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez jürimde bulunan saygıdeğer Doç. Dr. Serhat KARYEYEN ve Dr. Öğr. Üyesi Emre KOÇ hocalarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmamın başından sonuna kadar yanımda olan ve sıkıntılı anlarımda bana destek veren değerli arkadaşım Arş. Gör. İrem KARAASLAN'a teşekkür ederim.

Tüm hayatımda olduğu gibi, tez sürecimde de bana olan desteklerini ve sabırlarını esirgemeyen, bu günlere gelmemde büyük emeği olan, sevgili annem İlknur ASAL'a, babam Mustafa ASAL'a ve kardeşim Şeymanur ASAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 3

3. LIFE FÜZYON REAKTÖRÜ 7

4. NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİMİ 15

4.1. Genel Nükleer Hidrojen Üretimi 17

4.2. Nükleer Hidrojen Üretim Metotları 21

4.2.1. Buhar-metan reformasyonu (SMR) ile hidrojen üretimi 21

4.2.2. Yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ile hidrojen üretimi 26

4.2.3. Kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi ... 30

5. HESAPLAMA METOTLARI 35

5.1. Monte Carlo N Parçacık (MCNP) Kodu 35

5.2. Nükleer Hidrojen Üretimi Hesaplayıcısı Programı 36

6. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 41

6.1. Nötronik Hesaplamalar 41

6.1.1. Trityum üretim oranı (TBR) 41

6.1.2. Enerji çoğaltım faktörü (M) 43

6.1.3. Fisil yakıt üretimi (^{233}U) 45

Sayfa

6.1.4. Yakıt yanma oranı (BurnUp) 46

6.2. Hidrojen Üretim Potansiyeli Sonuçları 47

6.2.1. Buhar metan reformasyonu (SMR) ile hidrojen üretimi sonuçları 47

6.2.2. Yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ile hidrojen üretimi sonuçları 51

6.2.3. Kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi sonuçları 54

6.2.4. Hidrojen üretim metotlarının karşılaştırılması 56

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 61

KAYNAKÇA 65

ÖZGEÇMİŞ 71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. TRISO parçacığı özellikleri 11

Çizelge 4.1. Nükleer hidrojen üretimi için gerekli parametreler ve değerleri 20

Çizelge 4.2. Buhar-metan reformasyonu için reaksiyonların kullanımı tablosu 24

Çizelge 5.1. Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısında kullanıcıdan istenilen veriler ... 39

Çizelge 6.1. Hidrojen üretim metotlarının karşılaştırılması..... 57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. LIFE enerji santrali. (a)merkezi oda (b)lazer sürücüsü (c)güç dönüştürme sistemi 7

Şekil 3.2. LIFE füzyon reaktörü 8

Şekil 3.3. LIFE füzyon reaktörünün iç yapısı 9

Şekil 3.4. Vakum tankı içinde LIFE füzyon odası 10

Şekil 3.5. LIFE füzyon odasının dış çelik yapısı 10

Şekil 3.6. TRISO kaplama içeriği ve amacı 12

Şekil 3.7. Modifiye edilen LIFE füzyon reaktörü kesit görünümü 13

Şekil 4.1. Hidrojen üretim metotları 15

Şekil 4.2. Nükleer enerjiden hidrojen üretim metotları 16

Şekil 4.3. Nükleer hidrojen üretim tesisi genel akış şeması 17

Şekil 4.4. SMR prosesi şematik gösterimi 22

Şekil 4.5. LIFE füzyon reaktörü entegreli SMR metodu ile hidrojen üretim akış şeması 23

Şekil 4.6. Yüksek sıcaklıkta elektroliz mekanizması 26

Şekil 4.7. Yüksek sıcaklıkta elektroliz için gerekli enerji 27

Şekil 4.8. Elektroliz hücresi 28

Şekil 4.9. LIFE füzyon reaktörü entegreli HTE metodu ile hidrojen üretim akış şeması 30

Şekil 4.10. Kükürt-iyot termokimyasal çevrimin şematik gösterimi 32

Şekil 4.11. LIFE füzyon reaktörü entegreli S-I metodu ile hidrojen üretim akış şeması 33

Şekil 4.12. S-I döngülü termokimyasal çevrim için tahmini verim grafiği 34

Şekil 5.1. LIFE füzyon reaktörü 36

Şekil 5.2. Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı programı ana ekran görüntüsü 37

Şekil 5.3. Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı girdi dosyası örneği 38

Şekil 5.4. Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı sonuç dosyası örneği 39

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.1. Trityum üretim oranının zamana bağlı değişimi 43

Şekil 6.2. Enerji çoğaltım faktörünün zamana bağlı değişimi 44

Şekil 6.3. Zamana bağlı $^{232}Th(n,\gamma)^{233}U$ değişimi 45

Şekil 6.4. Zamana bağlı fisil yakıt (^{233}U) üretimi değişimi 46

Şekil 6.5. Zamana bağlı yakıt yanma oranı değişimi 47

Şekil 6.6. SMR metodu için zamana bağlı termal güç oranının değişimi 48

Şekil 6.7. SMR metodu için zamana bağlı termal güç değişimi 49

Şekil 6.8. SMR metodu için zamana bağlı hidrojen üretim miktarı değişimi 51

Şekil 6.9. HTE metodu için zamana bağlı termal güç oranının değişimi 52

Şekil 6.10. HTE metodu için zamana bağlı termal güç değişimi 53

Şekil 6.11. HTE metodu için zamana bağlı hidrojen üretim miktarı değişimi 53

Şekil 6.12. S-I metodu için zamana bağlı termal güç oranının değişimi 54

Şekil 6.13. S-I metodu için zamana bağlı termal güç değişimi 55

Şekil 6.14. S-I metodu için zamana bağlı hidrojen üretim miktarı değişimi 56

Şekil 6.15. Hidrojen üretim metotlarının verim değerleri 59

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\boldsymbol{a}$	Anot
$\boldsymbol{\alpha}$	Alfa parçacığı
$\boldsymbol{\alpha}$	Kısmi güç
$\boldsymbol{\beta}$	Isı yayılımı
$\boldsymbol{c}$	Katot
$\boldsymbol{D}$	Döteryum
$\boldsymbol{n}$	Nötron
$\boldsymbol{q}$	Buharlaşma
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk
$\boldsymbol{\mathcal{R}}$	1 kg hidrojen üretmek için gerekli olan enerji
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Orantı sabiti
$\boldsymbol{\mu}$	Elektrot aşırı gerilimi
$\boldsymbol{\upsilon}$	Molar kütle
$\boldsymbol{\psi}$	Elektriksel güç oranı
$	Dolar
γ	Gama
∅	Güç üretim verimliliği
$\boldsymbol{\Delta G}$	Gibbs serbest enerji
$\boldsymbol{\Delta H}$	Entalpi değişimi
$\boldsymbol{\Delta S}$	Entropi değişimi
°C	Santigrat derece
µm	Mikrometre
$\boldsymbol{(1-\psi)}$	Termal güç oranı
$\boldsymbol{C_f}$	Dönüşüm faktörü
$\boldsymbol{E_f}$	Fisyon başına enerji
$\boldsymbol{F}$	Faraday sabiti

Simgeler	Açıklamalar
F	Füzyon nötron kaynağı
g	Gram
GeV	Giga elektron volt
$\boldsymbol{HHV}$	Hidrojen üst ısıl değeri
$\boldsymbol{I}$	Akım yoğumluğu
$\boldsymbol{IR}$	Omik güç
h	Saat
Hz	Frekans (Hertz)
$\mathbf{k_{eff}}$	Etkin çoğaltma faktörü
keV	Kilo elektron volt
kg	Kilogram
MeV	Mega elektron volt
$\boldsymbol{M}$	Enerji çoğaltım faktörü
MJ	Mega joule
MPa	Mega pascal
MW	Mega watt
N	Newton
$\boldsymbol{\eta_{MCS}}$	MCS reaksiyonu verimi
$\boldsymbol{\eta_{SMR}}$	SMR reaksiyonu verimi
$\boldsymbol{\eta_{WGS}}$	WGS reaksiyonu verimi
$\boldsymbol{\eta_{ds}}$	Sürücü sistem verimi
$\boldsymbol{\eta_{gt}}$	Gaz türbini verimi
$\boldsymbol{\eta_{hpf}}$	Hidrojen üretim termal verimi
$\boldsymbol{\eta_{ihx}}$	Ara ısı değiştirici verimi
$\boldsymbol{\dot{m}}$	Kütlesel debi
$\boldsymbol{m_{fu}}$	Yakıt bölgesindeki parçalanabilir yakıt yükü
PF	Reaktör faktörü
$\boldsymbol{P_{aux}}$	Yardımcı sistem elektriksel gücü
$\boldsymbol{P_{cir}}$	Sirkülasyon elektrik gücü
$\boldsymbol{P_{ds}}$	Sürücü sistem elektriksel gücü
$\boldsymbol{P_e}$	Brüt elektrik gücü

Simgeler	Açıklamalar
P_{eh}	Hidrojen üretim elektriksel gücü
P_f	Füzyon güç çıktısı
P_{ge}	Elektrik üretimi için gerekli güç
P_h	Hidrojen üretim tesisinde kullanılacak termal güç
P_{hpf}	Hidrojen üretimi için gerekli toplam güç
P_i	Füzyon giriş gücü
P_{isf}	İzotop ayırma tesisi elektriksel gücü
P_n	Nötron parçacıklarından gelen füzyon gücü
P_{net}	Şebekeye giden elektriksel güç
P_{th}	Toplam termal güç
P_α	Alfa parçacıklarından gelen füzyon gücü
T	Sıcaklık
tM	Metrik ton
Q	Füzyon enerji oranı
T	Trityum
$T\Delta S$	Termal enerji girdisi
q_{tot}	Toplam reaksiyon enerjisi
x_{aux}	Güç oranı
x_{cir}	Sirkülasyon elektriksel güç oranı
x_{eh}	Elektriksel güç oranı
x_{isf}	Güç oranı
x_n	Nötron parçacıklarının enerji oranı
x_{net}	Net elektriksel güç oranı
x_α	Alfa parçacıklarının enerji oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
AHTR	Gelişmiş yüksek sıcaklıklı reactor
AS	Yardımcı sistem
BU	Yakıt yanma oranı
CANDU	Kanada Döteryum-Uranyum reaktörü

Kısaltmalar	Açıklamalar
cm	Santimetre
DS	Sürücü sistem
D-T	Döteryum-Trityum
FFHR	Force-Free Helical Reaktörü
HPC	Yüksek basınç kompresörü
HTE	Yüksek sıcaklıkta elektroliz
HTGR	Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı nükleer reactor
HTHX	Yüksek sıcaklık ısı değiştiricisi
HyS	Hibrid sülfür çevrimi
ICF	Atalet hapsedilme füzyon enerjisi
IHX	Ara ısı değiştirici
ISF	İzotop ayrıştırma sistemi
LIFE	Lazer ataletsel füzyon enerji reaktörü
LLNL	Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı
LPC	Düşük basınç kompresörü
LTHX	Düşük sıcaklık ısı değiştiricisi
m	Metre
MCNP	Monte Carlo N-Parçacık kodu
MCS	Mineral karbondioksit tutumu
MFE	Manyetik füzyon enerjisi
NIF	Ulusal Ateşleme Tesisi
PEM	Proton değişim membranlı yakıt pili
s	Saniye
S-I	Kükürt-iyot döngülü termokimyasal çevrim
SMR	Buhar metan reformasyonu
SOEC	Katı oksit yakıt pili
SOMBRERO	Katı Hareketli Üretici Füzyon Reaktörü
SS	Paslanmaz çelik
TBR	Trityum üretim oranı
TRISO	Tri yapısal izotropik yakıt
WGS	Su-gaz değişimi

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusunun bir sonucu olarak enerji talebi de sürekli artmaktadır. Enerji talebini karşılamak için kullanılan fosil yakıtların olumsuz çevresel etkileri olduğu bilinmektedir. Fosil yakıtların kullanımı ile atmosfere salınan sera gazı (CO_2, CH_4, CO, NO_2) miktarı artmakta ve dolayısıyla fosil yakıtlar küresel ısınmaya, ozon tabakasının incelmesine ve asit yağmurlarına sebep olmaktadır [1,2]. Tüm olumsuz etkilerine rağmen dünyadaki enerji ihtiyacının %86'sı fosil yakıtların yakılmasıyla karşılanmaktadır [3]. Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve neden olduğu olumsuz çevresel etkilerin yarattığı endişe dünyayı alternatif enerji kaynaklarının kullanımına yönlendirmiştir.

Fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılabilecek rüzgar, güneş, biokütle, jeotermal enerji gibi birçok yenilenebilir enerji kaynağı bulunmaktadır [4]. Tüm bu limitli yenilenebilir enerji kaynaklarına ek olarak hidrojen de alternatif bir enerji kaynağı olabilir. Hidrojen (H_2) evrende en çok bulunan elementtir ve fosil yakıtlar kullanılarak üretilmesi mümkün olduğu gibi yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji kullanılarak da üretilmesi mümkündür [5,6].

Günümüzde hidrojen üretiminin neredeyse tamamı doğal gaz ile gerçekleştirilmektedir. Doğal gaz kullanımı ile birlikte karbon dioksit salınımının arttığı göz önünde bulundurulur ise nükleer enerji hidrojen üretimi için iyi bir seçenek olacaktır. Hidrojen üretimi için fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kullanmak yerine nükleer enerji kullanımının avantajları bulunmaktadır. Nükleer enerji temiz bir enerji kaynağıdır, herhangi bir sera gazı salınımına sebep olmaz ve büyük miktarlarda hidrojen üretimine katkı sağlayabilir [7].

Bugün dünyada fisyon reaktörleri ticari olarak kullanılmaktadır, fakat füzyon reaktörleri henüz araştırma halindedir. Füzyon reaktörleri gelecekte enerji talebini karşılamak için önemli bir seçenek olarak görülmektedir. Füzyon, buhar elektrolizi, termokimyasal su ayrışımı ve biyokütle atıklarıyla buhar reformasyonu gibi hidrojen üretim metotları için uygun yüksek sıcaklıkta ısı sağlayabilir. Bu da füzyonun yenilenebilir enerji kaynaklarına ve hafif su güç reaktörlerine göre bir avantajıdır [8].

Nükleer enerji kullanılarak hidrojen üretilirken hem ısı hem de elektrik enerjisinden faydalanılabilir. Nükleer enerjiden hidrojen üretimi için birçok metot bulunmaktadır. Bu

metotlar karbon bazlı ya da karbonsuz olarak ikiye ayrılmaktadır. Nükleer hidrojen üretiminde, nükleer reaktörden elde edilen ısı ve elektrik, hidrojen üretim tesisinde girdi olarak kullanılmaktadır. Termokimyasal metotlar nükleer enerji santralinden elde edilen ısıyı girdi olarak kullanırken, yüksek sıcaklıkta elektroliz hem ısı hem de elde edilen elektrik enerjisini girdi olarak kullanmaktadır. Düşük sıcaklıkta elektroliz metodu ve reformasyon yöntemlerinde ise sadece elektrik enerjisi girdi olarak kullanılmaktadır [9].

2. LİTERATÜR TARAMASI

Nükleer hidrojen üretimi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu başlık altında tez kapsamındaki nükleer hidrojen üretimi ile ilgili literatür taraması verilmiştir.

Pinsky ve ark. [10], nükleer hibrid enerji sistemlerinde kullanılmak üzere çeşitli hidrojen üretim yöntemlerini incelemiştir. Çalışmalarında alkali su elektrolizi, proton değişim membranı yakıt pili (PEM), katı oksit yakıt pili (SOEC), termokimyasal sülfür-iyot (S-I), kalsiyum-bromür (Ca-Br) çevrimleri ve hibrid sülfür (HyS), bakır-klor (Cu-Cl) çevrimleri gibi elektrik ve ısı enerjisi kullanan hidrojen üretim yöntemleri üzerinde durmuşlardır. Bütün yöntemler için üç tip nükleer reaktöre göre (düşük, orta ve yüksek sıcaklıklı reaktörler) akış diyagramları oluşturup ticari olarak en yaygın olan hidrojen üretim metodu buhar-metan reformasyonu (SMR) ile karşılaştırmışlardır. Düşük sıcaklıklı reaktör kullanıldığında sadece alkali su elektrolizi ve PEM yakıt pili metotları ile hidrojen üretilebilmiştir. Üretilen hidrojen miktarları iki metot içinde yakındır. Orta sıcaklıklı reaktörler için tüm metotlar uygulanabilirdir ve SMR, SOEC ve Cu-Cl hariç diğer metotlarda düşük sıcaklıklı reaktöre göre daha fazla hidrojen üretimi olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek sıcaklıklı reaktörlerde ise bütün metotların çalışabileceğini belirtmişlerdir.

Yıldız ve Kazimi [7], nükleer ve hidrojen üretim tesislerini birleştirmek için çeşitli alternatifleri incelmişlerdir. Termokimyasal ve elektrokimyasal hidrojen üretim metotları için daha yüksek sıcaklıkların daha verimli olacağını vurgulamışlardır. 700°C ve daha yüksek sıcaklıklı reaktörler kullanımının hidrojen üretimi için daha uygun olacağını belirtmişlerdir. Hem nükleer santralin hem de hidrojen üretim tesisinin yüksek sıcaklıkta çalışmasının ısı transferi açısından bazı zorunluluklar getireceğini ve bunun da yeni tasarımların gerekliliğine sebep olacağını söylemişlerdir.

Forsberg [11], nükleer hidrojen üretim metotlarındaki gereksinimleri incelemiştir. Bu gereksinimler arasında, neredeyse sabit yüksek bir sıcaklıkta ısı tedarik edilmesi, hidrojen üretim metotları ile birlikte düşük basınçta bir arayüz sağlanması, hidrojenin trityum kontaminasyonundan kaçınılması, nükleer santralin kimyasal reaktörden izole edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Günümüzde kullanılan reaktörlerin geliştirilerek bu ihtiyaçlara

uygun hale getirilebileceğini söylemiştir. Gelişmiş yüksek sıcaklık reaktörü (AHTR) bu gereksinimlere uygun şekilde modifiye edilmiştir.

Ryland ve ark. [12], makalelerinde yüksek sıcaklıkta elektroliz ile gelişmiş CANDU reaktörünü entegre ederek tesisin hidrojen üretim potansiyelini teknik ve ekonomik açıdan araştırmışlardır. Reaktör elektroliz prosesi için hem termal enerji hem de elektrik enerjisi sağlamıştır. Tesiste hidrojen üretimi için ACR-100 reaktörü ile birlikte buhar elektrolizi kullanılırsa sistem kapasitesinin 275 000 Nm^3h^{-1} iken, geleneksel su elektrolizi kullanıldığında kapasitenin 232 000 Nm^3h^{-1} olduğunu belirtmişlerdir. Tesisin termal hidrojen verimliliği incelendiğinde %27 verime sahip geleneksel elektrolize göre verimin %33-34'e ulaştığını belirtmişlerdir.

Chikazawa ve ark. [13], hidrojen üretimi için gerekli termal enerjiyi sodyum soğutmalı bir reaktör aracılığıyla elde ederek membran reformasyonlu bir hidrojen üretim tesisi tasarlamışlardır. Tesiste kullanılan hidrojen üretim metodu buhar metan reformasyonudur (SMR). Çalışmalarında tasarlanan tesisin ekonomik açıdan değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuç olarak, hidrojen üretim maliyetinin yaklaşık 1,67 $/kg olduğunu ve 1,70 $/kg'lık ekonomik hedefe ulaştığını belirtmişlerdir. Daha verimli bir hidrojen ayırma membranı kullanarak inşaat maiyetlerinin düşürülebileceğini söylemişlerdir.

Demir [14], Katı Hareketli Üretici (SOMBRERO) Füzyon Reaktörünün SMR metodu ile hidrojen üretim potansiyelini incelemiştir. Ayrıca sisteme ısı geri kazanım cihazı entegre ederek hidrojen üretim miktarlarını karşılaştırmıştır. Yakıt fraksiyonunun artışı ile enerji çoğaltım katsayısı (M) artmış ve santralin termal verimi %76,1'den %89,7'ye ulaşmıştır. Isı geri kazanım cihazı entegresi ile 100,66 kg/sn olan hidrojen üretim miktarı 161,48 kg/sn değerine ulaşmıştır. SMR metodunun ısı geri kazanım cihazı entegresi ile birlikte daha fazla hidrojen ürettiği gözlemlenmiştir.

Acır ve Aktı [15], Lazer Ataletsel Füzyon Enerji Reaktörünün (LIFE) nötronik analizini yaparak reaktörün zamana bağlı hidrojen üretim potansiyelini incelemişlerdir. LIFE füzyon reaktöründe yakıt olarak %10 oranında TRISO kaplı minör aktinit kullanırken, soğutucu olarak %90 oranında flibe kullanmışlardır. Hidrojen üretim metodu olarak buhar metan reformasyonu (SMR), kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal çevrim ve yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) kullanılmış ve metotların hidrojen üretim potansiyelleri,

verimleri karşılaştırılmıştır. SMR metodu kullanılırken 3 farklı mod kullanılmıştır. Nötronik analiz sonucunda elde edilen enerji çoğaltım katsayısı (M), hidrojen üretim miktarını etkilemiştir. Sonuç olarak, SMR reaksiyon 1, SMR reaksiyon 2, SMR reaksiyon 3, S-I ve HTE metotları ile LIFE füzyon reaktöründe zamana bağlı hidrojen üretimi yapılabilmiş ve en iyi metot SMR reaksiyon 1 olarak belirlenmiştir. En az hidrojen üretimi ise S-I metodunda meydana gelmiştir.

Özışık ve ark. [16], eriyik tuz yakıtlı Force-Free Helical Reaktörünün (FFHR) hidrojen üretim potansiyelini ve fisil yakıt üretimini incelemişlerdir. İki farklı hidrojen üretim metodu kullanmışlardır. Bunlar; kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal çevrim ve yüksek sıcaklıkta elektrolizdir. Özışık ve ark. dört farklı molten salt karışımı kullanmıştır (A: saf flibe, B: flibe ve ThF_4 karışımı, C: flibe ve UF_4 karışımı ve flibe, D: ThF_4 ve UF_4 karışımı). Analizlerin sonucunda trityum üretim oranı bütün karışımlar için sürdürülebilir olmuştur. Fisil yakıt üretimi yılda 2-2.5 ton olmuştur. Sonuç olarak, FFHR reaktörü kullanılarak HTE metodu ile S-I metoduna göre daha fazla hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir.

Yamada ve ark. [17], FFHR reaktörünün çalışma tarzının teknik potansiyelini değerlendirmek için 1 GW elektrik gücüyle elektroliz metodu ile hidrojen üretimini incelemişlerdir. Günlük 700 ton gaz halinde hidrojen üretilebileceğini ve bu durumda 150 °C'de günde 6354 ton buhar gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak; FFHR füzyon santralinde elektrik ve hidrojenin birlikte üretiminin çekici bir yöntem olabileceği kanısına varmışlardır.

Orhan ve ark. [4], çalışmalarında nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarının Cu-Cl metodu ile hidrojen üretimini analiz etmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasından Cu-Cl çevrimi için en uygun olanlarını belirlemişlerdir. Hidrojen üretimi gerçekleştirilirken CO_2 emisyonu salınımı açısından kaynaklar incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynakları göz ardı edilebilecek miktarda CO_2 yaymıştır, kömür için 38 kg CO_2/kg H_2, petrol için 27 kg CO_2/kg H_2, doğal gaz için ise 18 kg CO_2/kg H_2. Gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretimi açısından sürdürülebilir ve düşük fiyatlı bir seçenek olduğunu belirtmişlerdir.

Wu ve Onuki [18], Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Nükleer Reaktör (HTGR) kullanarak termokimyasal iyot-kükürt döngülü hidrojen üretim metodunu incelemişlerdir. HTGR nükleer reaktöründen 1000°C'de gaz sağlayarak hidrojenin verimli şekilde üretileceğini belirtmişlerdir. Makalelerinde termokimyasal iyot-kükürt döngülü metodun hidrojen üretimi için verimli ve temiz bir seçenek olduğunu söylemişlerdir.

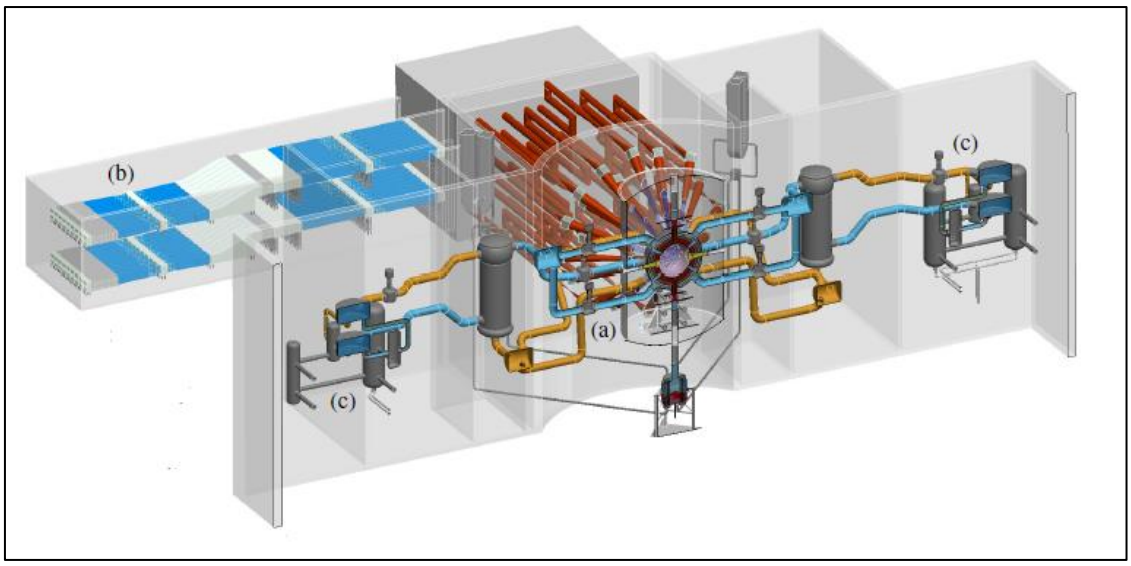
Bu başlık altında incelenen kaynaklar nükleer hidrojen üretimi analizinde statik bir analiz içerirken, bu tez kapsamında diğer çalışmalardan farklı olarak, nötronik analiz ve hidrojen üretim analizi zamana bağlı olarak yapılmıştır. Acır ve Aktı'nın [15] çalışmalarından farklı olarak minor aktinit kullanımı yerine nükleer yakıt olarak ThC kullanılmış ve hidrojen üretim potansiyelindeki farklılık incelenmiştir.

Bu tez kapsamında, modifiye edilen Lazer Ataletsel Füzyon Enerji Reaktörü (LIFE) kullanılarak farklı hidrojen üretim metotları ve farklı soğutucularla reaktörün hidrojen üretim potansiyelleri karşılaştırılmıştır. İlk olarak LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik analizi yapılmıştır. Nötronik hesaplamalar yapılırken MCNP nükleer kodu kullanılmıştır. Hesaplamalarda nükleer yakıt olarak TRISO kaplı toryum karbür (ThC) kullanılırken soğutucu olarak FLiBe ve natural lityum (NaLi) kullanılmıştır. Nötronik analiz sonucu enerji çoğaltım katsayısı (M), trityum üretim oranı (TBR), yakıt yanma oranı (Burnup) ve fisil izotop (^{233}U) üretim miktarı değerleri elde edilmiştir. Tüm nötronik sonuçlar dört farklı mod için hesaplanmış ve grafiklerle karşılaştırılmıştır. Modlar içerisinde iki farklı soğutucu ve iki farklı yakıt oranı kullanılmıştır; Mod ①: hacimsel olarak %5 oranında ThC, %95 flibe soğutucu içerir; Mod ②: %10 ThC, %90 flibe, Mod ③: %5 ThC, %95 natural lityum, Mod ④: %10 ThC, %90 natural lityum. Dört farklı mod için nötronik hesaplamalar sonucu elde edilen M değerine göre nükleer reaktörün hidrojen üretim potansiyeli üç farklı hidrojen üretim metodu için hesaplanmıştır. Hidrojen üretim metodu olarak, buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıklı elektroliz (HTE) ve kükürt-iyot (SI) döngülü termokimyasal yöntem kullanılmıştır. Hidrojen üretim miktarları, kullanılan termal güç ve hidrojen üretimi için gerekli elektriksel güç oranı değerlerini, tüm hidrojen üretim metotları için dört farklı modda karşılaştırılmış ve grafiklerle yorumlanmıştır.

3. LIFE FÜZYON REAKTÖRÜ

Dünyadaki artan enerji talebi ile endüstriyel enerji üretimi amacıyla füzyon enerjisi araştırmasına yönlenilmiştir. Füzyon enerjisi araştırması iki ana yaklaşım ile sürdürülmektedir. İlki, füzyon enerjisi üretmek için düşük yoğunluklu döteryum-trityum (D-T) plazmayı sınırlandırmak için güçlü manyetik alanların kullanıldığı manyetik füzyon enerjisidir (MFE). İkincisi ise, atalet hapsedilme füzyon enerjisidir (ICF). Atalet hapsedilme füzyon enerjisinde, D-T buz ve gaz karışımını içeren bir kapsülü sıkıştırmak için doğrudan veya dolaylı aydınlatma yoluyla lazer ışınları ya da ağır iyonlar kullanılmaktadır. Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı'ndaki (LLNL), Ulusal Ateşleme Tesisi (NIF) dünyanın en büyük ve en kuvvetli lazeridir. NIF füzyon enerjisini uygulanabilir bir enerji kaynağı haline getirme yolunda önemli bir adımdır [19,20].

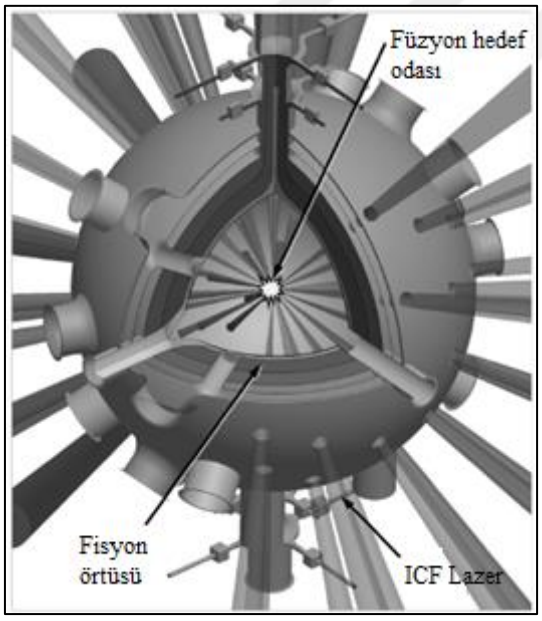
Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı bahsedilen füzyon-fisyon çalışmalarına ek olarak NIF geometrisine bağlı kalarak, Lazer Ataletsel Sınırlandırma Füzyon-Fisyon Motoru (LIFE) adlı yeni bir nükleer enerji sistemi geliştirmiştir [21–23]. LIFE füzyon reaktörü tasarımında, kullanılmış nükleer yakıtlar kullanılırken, şebekeye elektrik enerjisi sağlanmaktadır [21]. LIFE füzyon reaktörü, NIF benzeri füzyon performansı, diyot pompalı lazer teknolojisi, füzyon odası dahil her aşamada her hatla değiştirilebilir üniteler içeren bir tasarım ile geliştirilmiştir [24].



Şekil 3.1. LIFE enerji santrali. (a)merkezi oda (b)lazer sürücüsü (c)güç dönüştürme sistemi [25]

Füzyon hedeflerini imal edebilmek için LIFE enerji santrali içinde, ateşleme için bir lazer sürücüsü, füzyon vurumlarının gerçekleşeceği ve fisyon yakıtının bulunduğu bir merkezi oda, güç dönüştürme sistemi ve trityum depolama üniteleri bulunmalıdır. Şekil 3.1'de bir LIFE füzyon tesisi görülmektedir [25].

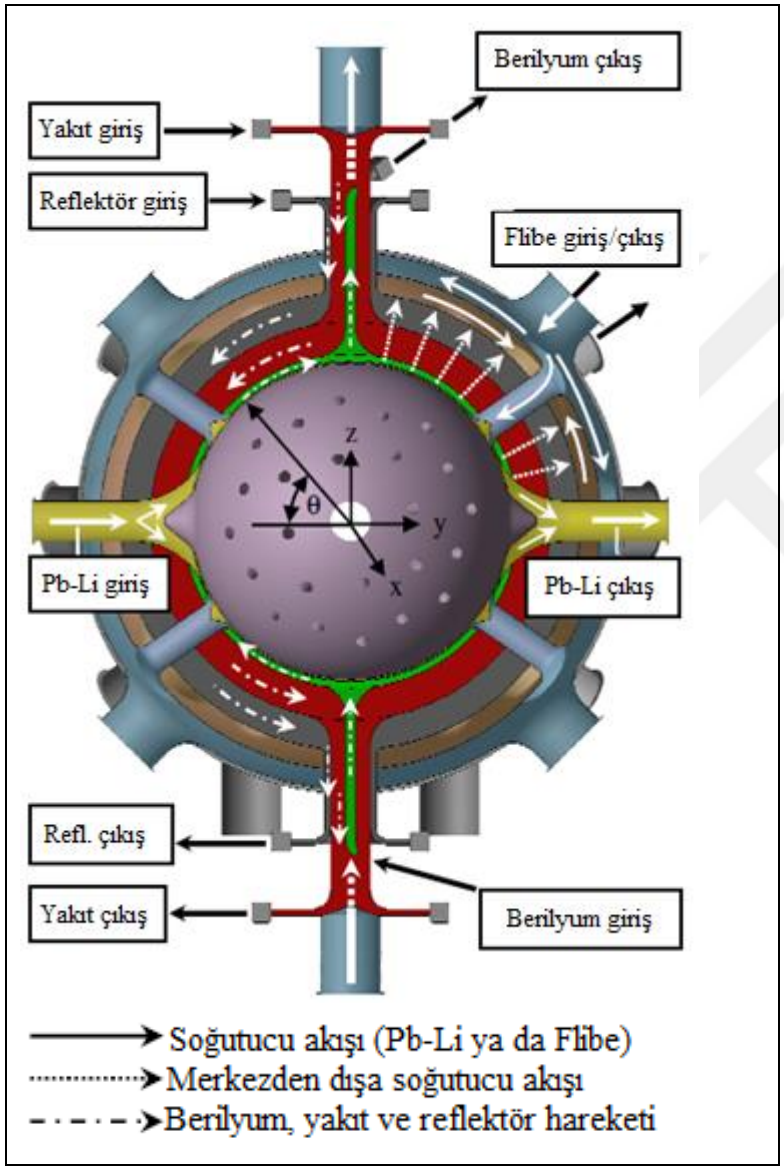
Şekil 3.2'de LLNL tarafından tasarlanan ve trityum oranı 1,4 değerine kadar ulaşabilen [26] LIFE füzyon reaktörü verilmiştir. Reaktör 2,5 m yarıçapında bir merkez füzyon hedef odası, etrafını saran bir orta cidar ve fisyon örtüsünden oluşmaktadır [21]. LIFE füzyon reaktörü NIF'e benzer bir geometrisi ve 500 MW füzyon ile sonuçlanan $D(T,n)\alpha$ reaksiyonları ile 13,3 Hz'de 37,5 MJ enerji üretmiştir. Bu da, 1,774x10^{20}'lik (14 MeV-n/s) sürekli nötron kaynağı kuvveti vermektedir [27]. Füzyon yakıtları direkt ya da dolaylı lazer ışınları ile yanmaktadır. LIFE füzyon reaktöründe ilk duvar ODS (oksit dispersiyonu ile güçlendirilmiş) ferritik çelikten oluşmaktadır ve 200-250 μm tungsten ile kaplıdır [21,23,25].



Şekil 3.2. LIFE füzyon reaktörü [21]

Şekil 3.3'te LIFE füzyon reaktörünün iç yapısı görülmektedir. Füzyon nötronları LIFE füzyon reaktöründe merkezden dışarıya doğru akmaktadır. D-T nötron kaynağından sonra ilk duvar ODS gelmektedir ardından gelen bölge, ^{6}Li zenginleştirmesi yapılan $Li_{17}Pb_{83}$ soğutucusundan oluşmaktadır. Uygun termal özellikleri sebebiyle seçilen $Li_{17}Pb_{83}$ soğutucusu ilk duvarı soğuturken aynı zamanda $Pb(n,xn)$ aracılığıyla nötron sayısını

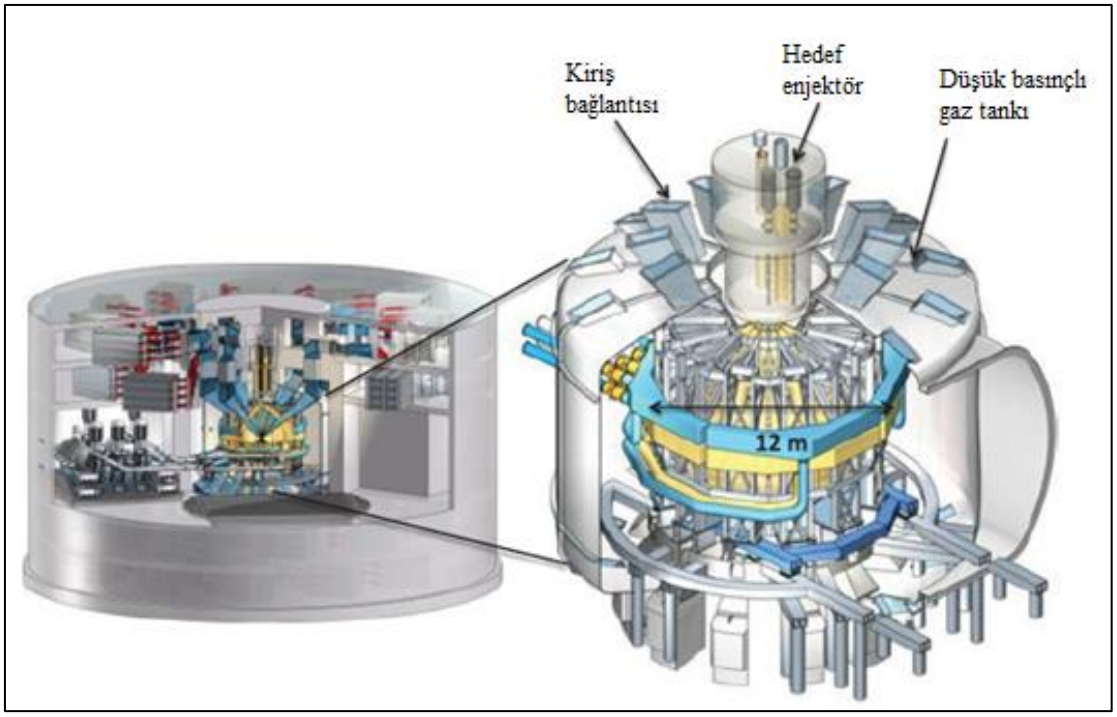
artırır ve $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$ aracılığıyla trityum üretimi gerçekleştirir. $Li_{17}Pb_{83}$ soğutucusunu ODS ferrit çeliği ve Be nötron çoğaltıcı bölge takip eder. Bu çoğaltıcı bölge ise %60 dolgu oranlı 1 cm Be çakıllarından oluşmaktadır. Kullanılan ikinci soğutucu, Flibe soğutucudur. Flibe soğutucu çok iyi bir trityum üreticisidir. En son ise yakıt bölgesinin tamamını çevreleyen bir reflektör bölgesi gelir [21].



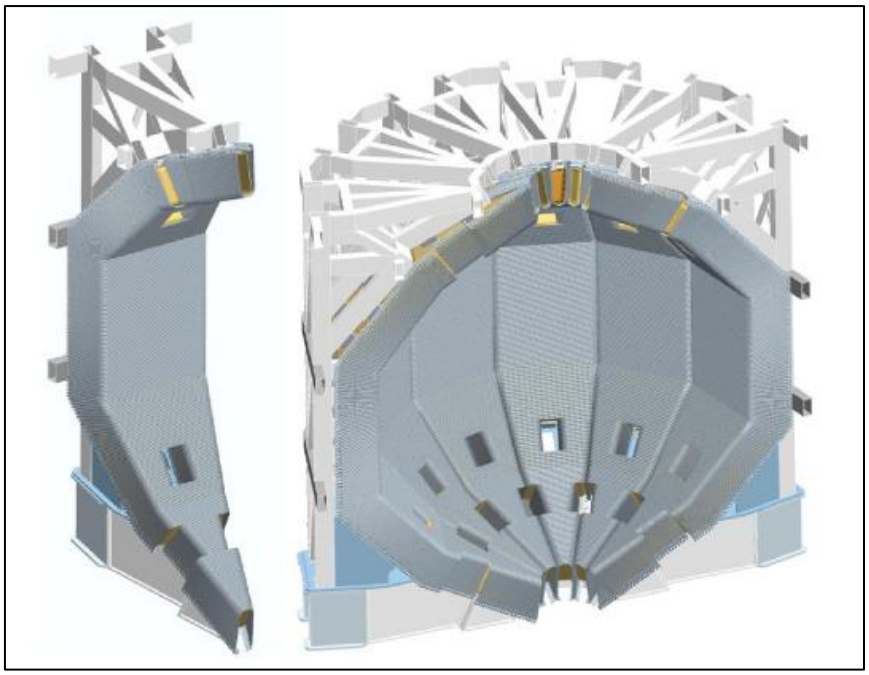
Şekil 3.3. LIFE füzyon reaktörünün iç yapısı [25]

LIFE füzyon reaktöründe, füzyon odası en önemli alt sistemdir ve tesis tasarımında önemli gereklilikler karşılanmalıdır. Ticari olarak temin edilebilecek malzemeler tercih edilmelidir. İyi bir termal verimlilik için yüksek sıcaklıklarda çalıştırılmalıdır. Örneğin %40 ve üstü termal verimlilik için T≥600°C olmalıdır. Önceki çalışmalardan kalan

kalıntılar temizlenmelidir (malzeme geri kazanımı≥99). Önceki çalışmalarda yakılanın yerine trityum üretilmelidir (trityum üretim oranı ≥1,08). 10-20 Hz'de çalışmalıdır. İlk duvar ve ara zırhlamalar periyodik olarak değiştirilmelidir [28,29]. Şekil 3.4'te vakum tankının içindeki LIFE Füzyon odası görülmektedir.



Şekil 3.4. Vakum tankı içinde LIFE füzyon odası [29]



Şekil 3.5. LIFE füzyon odasının dış çelik yapısı [26]

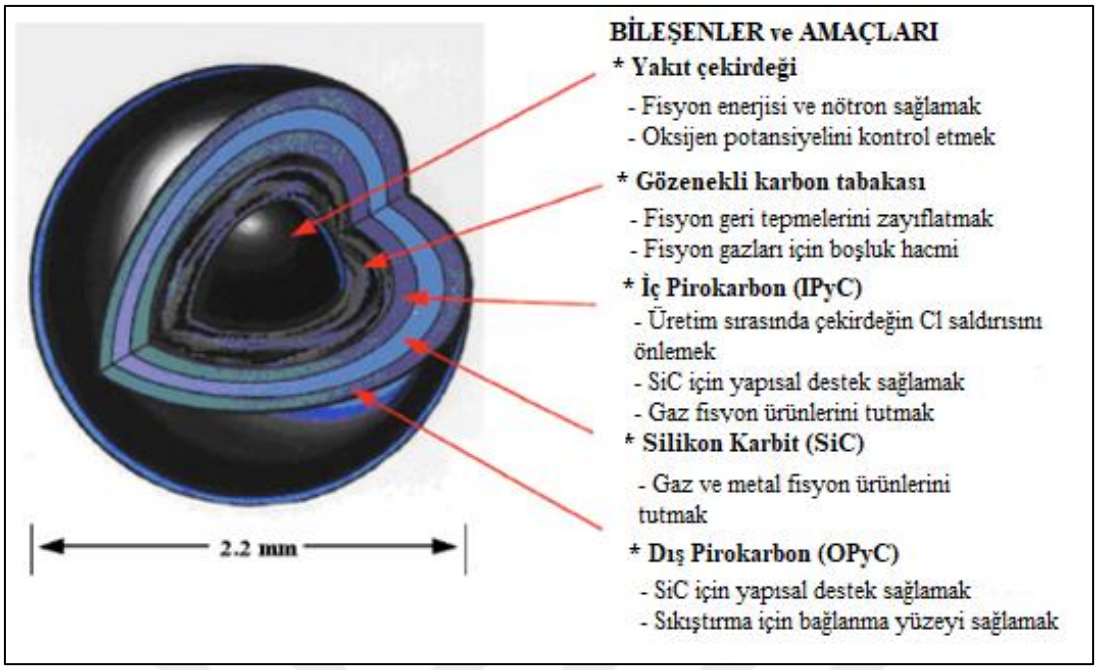
LIFE füzyon odası tasarımında, hazneye kiriş borusu bağlantıları, haznenin vakum bariyeri yoktur. Füzyon odası santral sahasına nakledilecek on iki adet özdeş bölümden oluşmaktadır. İlk duvar, paralel olarak döşenmiş ve blanketin yanlarına döşenmiş enjeksiyon ve ekstraksiyon borularından oluşmaktadır. Bu borular birkaç cm çapındadır. Soğutucu 515°C'de blankete girer ve soğutma kanallarından aşağıya doğru akar ve füzyon odasının altından yukarıya doğru 575°C'de çıkar [29]. Şekil 3.5'te LIFE füzyon reaktörü odasının dış çelik yapı ile desteklenen bağımsız modülleri görülmektedir [26].

LLNL'in tasarladığı LIFE füzyon reaktörü için iki farklı konseptte çalışılmıştır. İlkinde, çözünmüş uranyum içeren erimiş tuz kullanılmıştır. Erimiş tuz radyasyondan zarar görmemektedir, bu nedenle ağır ^{238}U atomlarının istenilen yüksek yakıt yanma seviyesine ulaşmasını sağlamaktadır. Erimiş tuz, maksimum erime yeteneği olan molce %73 LiF ve molce %27 UF_4 karışımından oluşmaktadır [30]. İkinci konsept ise, TRISO kaplı katı yakıt kullanılan tasarımdır [21,22]. Bu tez kapsamında da TRISO kaplı ThC yakıt olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.1'de yapısal özellikleri verilen TRISO parçacığının adı üçlü izotropik (triple isotropic) kaplama isminden gelmektedir. TRISO parçacığının merkezinde yakıt bulunurken çevresini saran üç eş merkezli küresel katman bulunur. Bu katmanlar içten dışa doğru; gözenekli karbon (C); fisyon gazlarının genişlemesi için hacim sağlar ve fisyon geri tepmelerini azaltır. Pirokarbon (iç katman), silikon karpit (SiC) katmanı için alt tabakayı ayarlar. SiC, gaz ve metal fisyon ürünlerini tutar ve mekanik direnci sağlar. Pirokarbon (dış katman) ise sıkıştırma için bir bağlanma yüzeyi oluşturarak hatalı SiC'e sahip parçacıklarda fisyon ürünleri için bariyer görevi görür [31]. Şekil 3.6'da TRISO parçacığı görülmektedir [32,33].

Çizelge 3.1. TRISO parçacığı özellikleri [31]

Katman	Dış yarıçap (μm)	Yoğunluk(g/cm^3)
Yakıt çekirdeği	150-100	-
Gözenekli karbon, C	300-250	1
Pirokarbon, C (iç katman)	335-285	1,85
Silikon karpit (SiC)	370-320	3,20
Pirokarbon, C (dış katman)	410-360	1,85



Şekil 3.6. TRISO kaplama içeriği ve amacı [19,32–34]

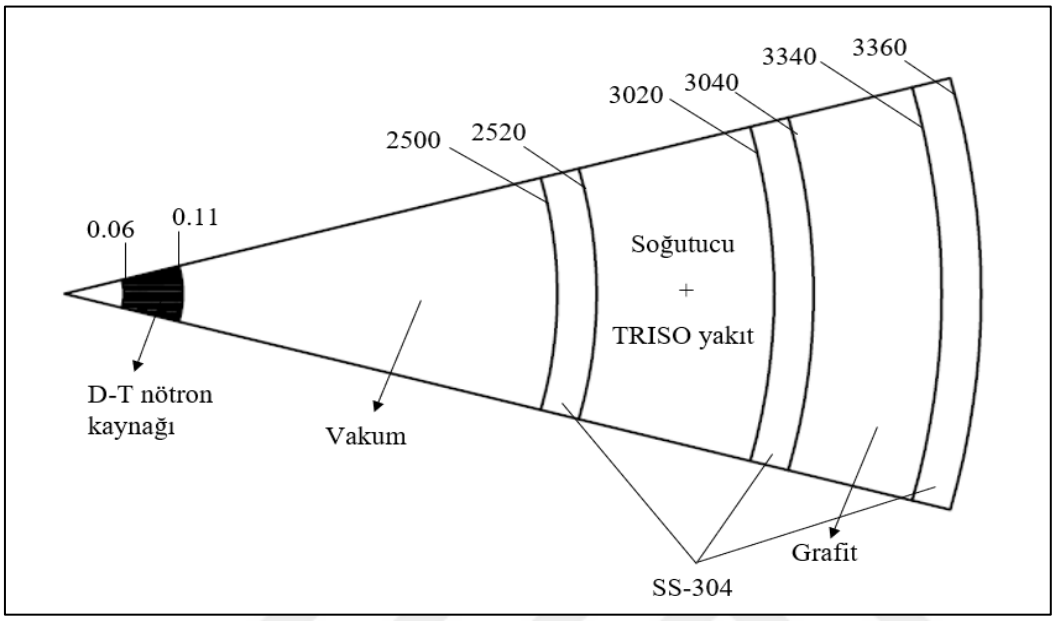
TRISO yakıtlar, bünyesindeki geçirgen karbon tabakaları ile merkezinde bulunan yakıtı meydana gelebilecek deformasyonlardan korur, yakıtın sebep olduğu fisyon gazları için yataklık yapar. TRISO parçacığı pirokarbon ve silikon karpit katmanları ile meydana gelecek fisyon ürünleri ve yakıtı koruyan bir tasarıma sahiptir [35].

Şekil 3.7'de modifiye edilen LIFE füzyon reaktörü için kesit görünümü verilmiştir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi merkezdeki siyah bölge D-T füzyon nötron kaynağıdır. D-T füzyon yakıt peleti ρ=600 g/cm^3 yoğunluğuna sıkıştırılır ki bu da kalınlığı 0,005 cm olan yakıt kabuğunun alan yoğunluğunu ρ=3 g/cm^2 yapar [20,36]. D-T füzyon kaynak reaksiyonu Eşitlik (3.1)'de verilmiştir [37].

$$^{2}\mathrm{D} + {}^{3}\mathrm{T} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He}\ (3{,}486\ \mathrm{MeV}) + n\ (14{,}1\ \mathrm{MeV}) \qquad (3.1)$$

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi füzyon odası 2 cm kalınlığında SS-304 çelik malzemeden yapılmış bir duvar ile çevrilidir. SS-304 duvar, füzyon reaksiyonu sonucunda meydana gelen yüksek sıcaklığa dayanıklıdır ve reaktördeki diğer bölgeleri plazmadan kaynaklanan elektromanyetik radyasyona karşı korumaktadır. 5 m çaplı füzyon reaktör boşluğu ilk duvara kadar vakumda tutulur. İlk SS-304 duvarının ardından soğutucu ve yakıt bölgesi gelir. Soğutucu ve yakıt bölgesi 2 cm kalınlığında SS-304 çelik duvar ile çevrilmiştir. Ardından 30 cm kalınlığındaki grafit reflektör ve 3. SS-304 duvar gelmektedir. Grafit

reflektör ile nötronlar yavaşlatılır yani üretim bölgesinden kaçan nötronların enerjileri düşürülür [20]. Modifiye edilen LIFE füzyon reaktörünün termal güç çıktısı 2000 MW ve füzyon güç girdisi ise 500 MW olarak alınmıştır [21,22,30].



Şekil 3.7. Modifiye edilen LIFE füzyon reaktörü kesit görünümü [20]

Modifiye edilen LIFE füzyon reaktöründe Be çoğaltıcı kullanılmamıştır. Bunun sebebi şu şekilde açıklanmaktadır. Hibrit reaktörler üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde, füzyon odası ile fisyon örtüsü arasındaki berilyum çoğaltıcısının nötron spektrumunu yumuşattığı ve bunun ilk duvarın hemen yakınında yerel fisyon ısısının pik yapmasına yol açacağı görülmüştür. Bu nedenle bir fisyon-füzyon (hibrit) reaktörde Be nötron çoğaltıcısı kullanımı önerilmemektedir. Ayrıca, fisil yakıt ^{233}U, füzyon nötron irradiyasyonu altında nötron çoğalmasına neden olmaktadır ve Be nötron çoğaltıcısı kullanımına ihtiyaç kalmamaktadır [20,36].

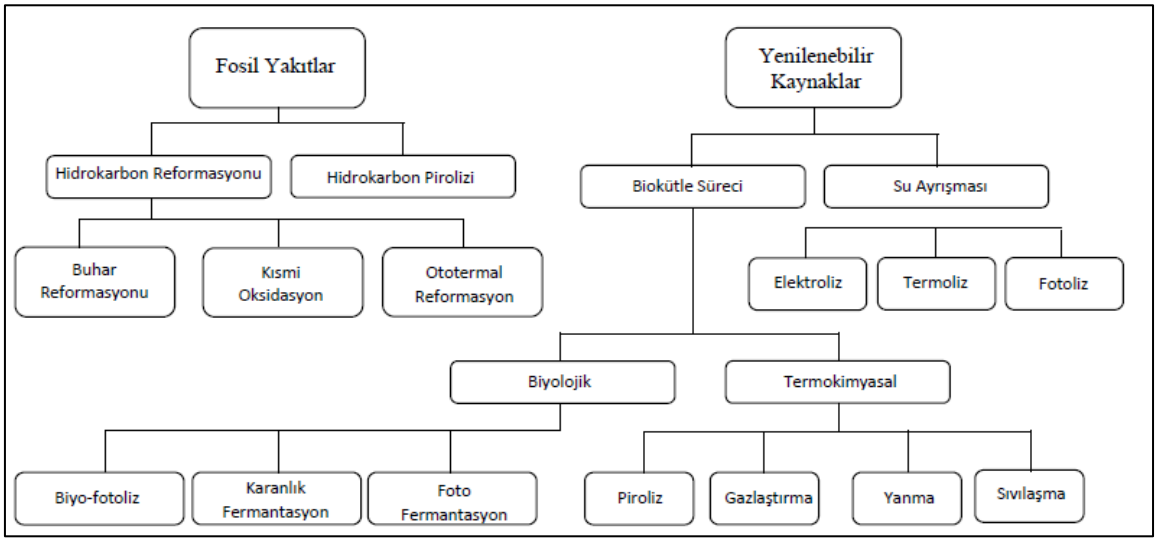
Bu tez kapsamında LIFE füzyon reaktöründe 4 farklı mod kullanılmış, soğutucu ve yakıt bölgesinde farklı hacimsel oranlarda yer almışlardır. Soğutucu olarak Flibe ve natural lityum, nükleer yakıt olarak ise TRISO kaplı toryum karbür (ThC) kullanılmıştır. Mod ①: hacimsel olarak %5 oranında ThC, %95 flibe soğutucu; Mod ②: %10 ThC, %90 flibe; Mod ③: %5 ThC, %95 natural lityum; Mod ④: %10 ThC, %90 natural lityum içermektedir.

4. NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİMİ

Hidrojen (H_2) dünyada en bol bulunan elementtir. Her zaman su, hidrokarbon ya da alkol gibi başka bir maddenin parçası olarak bulunan hidrojen diğer kimyasal elementlerle kolayca birleşmektedir [38].

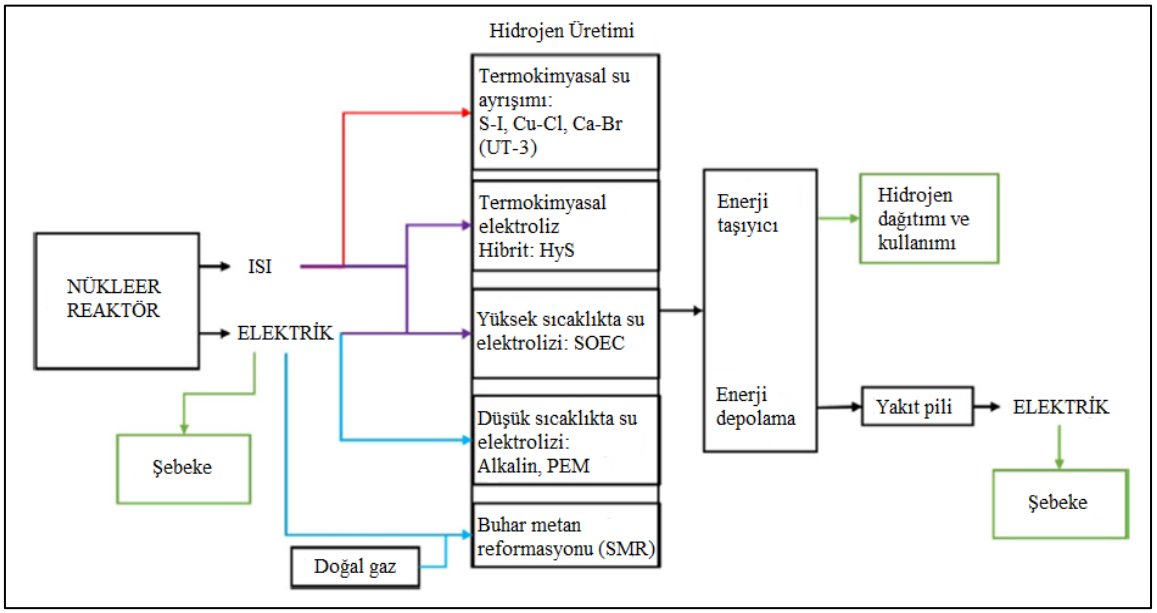
Hidrojen, okyanuslarda ve denizlerde su formunda, en bol bulunan maddedir. Neredeyse hiç kirlilik içermez. En hafif elementtir. Hidrojenin doğal üç izotopu bulunmaktadır; hidrojen, döteryum ve trityum. Hidrojen ve döteryum doğada ölçülebilir miktarlarda bulunmaktadır. Doğal hidrojenin %99,985'i hidrojen ve %0,015'i döteryumdur. Hidrojen gazı, diğer gazlara göre en yüksek termal hıza ve iletkenliğe ve en düşük viskoziteye ve yoğunluğa sahiptir. Hidrojenin, nispeten yüksek bir tutuşma sıcaklığı, çok düşük tutuşma enerjisi ve geniş bir yanma aralığı bulunmaktadır [39].

Hidrojen; nükleer, doğal gaz ve kömür, biyokütle, güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal enerji ve diğer yenilenebilir kaynaklar dahil olmak üzere çeşitli kaynaklar kullanılarak üretilebilir. Hidrojen üretiminde kullanılan kaynakların bu kadar çeşitli olması hidrojeni gelecek vadeden bir enerji taşıyıcısı yapmaktadır. Şekil 4.1'de hidrojen üretim metotları şematik olarak verilmiştir. Hidrojen üretimi, termal (doğal gaz reformu, yenilenebilir sıvı ve biyoil işleme, biyokütle ve kömür gazlaştırma), elektrolitik (çeşitli enerji kaynakları kullanarak su ayırma) ve fotolitik gibi farklı gruplar altında, çeşitli teknolojiler aracılığıyla gerçekleştirilebilir [38].



Şekil 4.1. Hidrojen üretim metotları [5]

Dünyada üretilen hidrojenin büyük bir kısmı, çoğunlukla metandan oluşan doğal gazdan elde edilmektedir. Hidrojenin toplu üretimi, metanın katalize edilmiş buhar reformasyonu ile gerçekleşmektedir [40]. Hidrojen üretimi için kullanılan doğal gaz ve diğer fosil kaynaklar tükenmektedir ve bununla birlikte, mevcut ticari hidrojen üretim süreçlerinde fosil yakıtların kullanımı ile karbondioksit açığa çıkmaktadır. Sonuç olarak hidrojen üretiminde kullanılan fosil yakıtlar, sera gazı emisyonlarının salınımı ve küresel ısınma gibi olumsuz çevresel koşullarına sebep olmaktadır. Nükleer enerjiden üretilen hidrojen bu olumsuz çevre koşullarını ve fosil kaynaklar hakkındaki endişeleri önleyebilir [41].

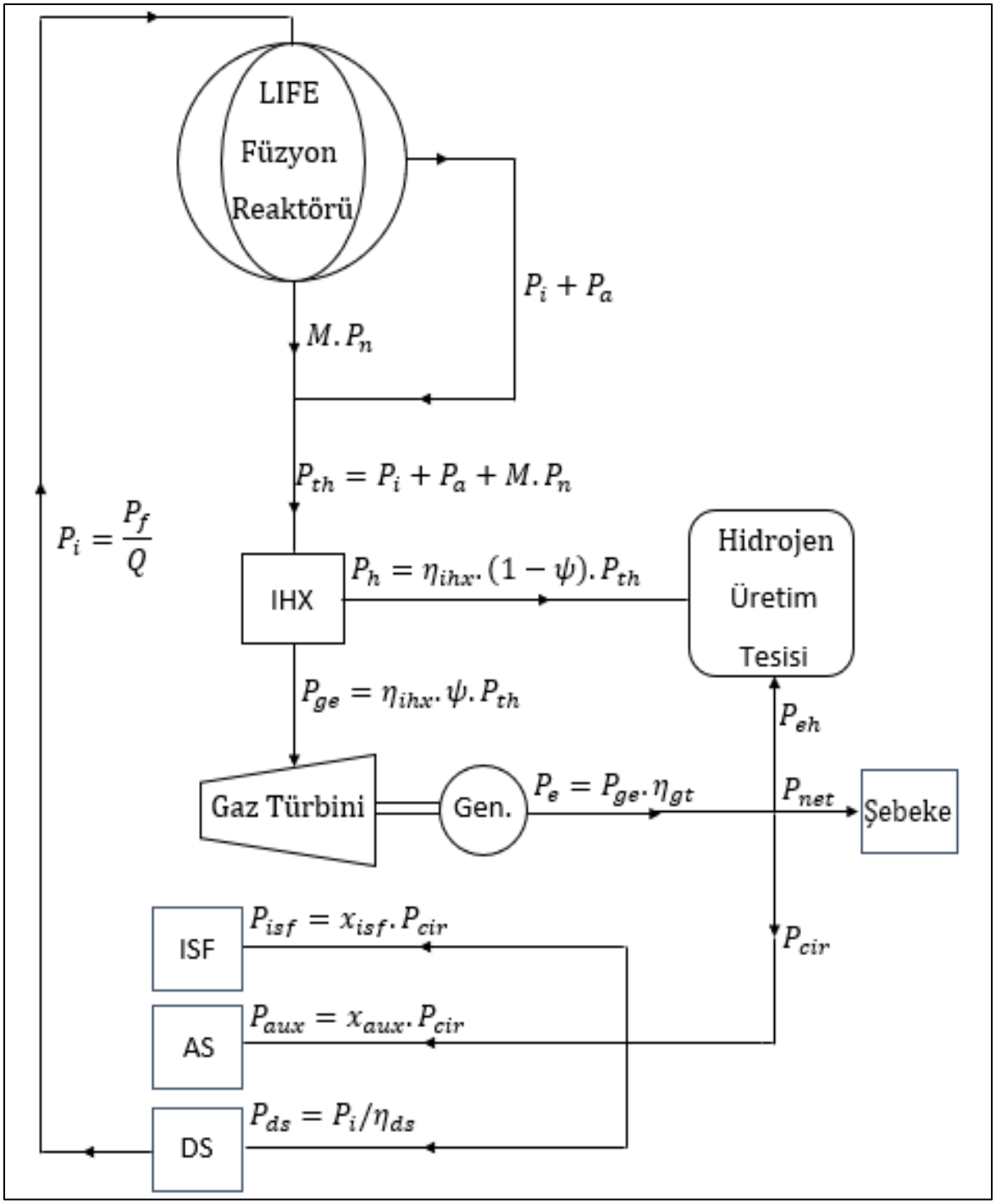


Şekil 4.2. Nükleer enerjiden hidrojen üretim metotları [10]

Şekil 4.2'de nükleer enerjiden hidrojen üretimi için çeşitli metotlar şema halinde verilmiştir. Nükleer enerjiden hidrojen üretimi birçok farklı yöntem ile gerçekleşmektedir. Nükleer enerjiden elde edilen ısı ve elektrik enerjisi hidrojen üretimi için kullanılmaktadır. S-I, Cu-Cl, Ca-Br döngülü termokimyasal çevrimler için nükleer reaktörden elde edilen ısı enerjisi girdi olarak kullanılmaktadır. Termokimyasal elektroliz ve yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemleri ile hidrojen üretimi için hem elektrik hem de ısı enerjisi girdisi gerekmektedir. Düşük sıcaklıkta elektroliz için sadece elektrik girdisi gerekmektedir. Buhar-metan reformasyonu için ise metan girdisi gerekmektedir.

4.1. Genel Nükleer Hidrojen Üretimi

Nükleer enerji santralinden elde edilen ısı ve elektrik enerjisi hidrojen üretimi için girdi olarak kullanılabilmektedir. Hidrojen üretimi için gerekli bu girdilerin nükleer reaktörden sonra izlediği yol Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde nükleer hidrojen üretimi için genel akış şeması görülmektedir.



Şekil 4.3. Nükleer hidrojen üretim tesisi genel akış şeması [15,16,42,43]

Şekil 4.3'te IHX, ara ısı değiştiriciyi; Gen, jeneratörü; ISF, izotop ayrıştırma sistemini; AS, yardımcı sistemi; DS ise sürücü sistemi ifade etmektedir.

Nükleer reaktörden elde edilen füzyon güç çıktısı (P_f) ve füzyon giriş gücünün (P_i) birbirine oranı füzyon enerji kazanım oranını (Q) vermektedir [42].

$$Q = \frac{P_f}{P_i} \tag{4.1}$$

Alfa parçacıklarından ve nötron parçacıklarından gelen füzyon güçleri Eşitlik (4.2) ve Eşitlik (4.3)'te verilmiştir [42].

$$P_\alpha = x_\alpha \cdot P_f \tag{4.2}$$

$$P_n = x_n \cdot P_f \tag{4.3}$$

Burada x_α ve x_n, alfa ve nötron parçacıklarının D-T reaksiyonlarındaki enerji oranlarını ifade etmektedir, sırasıyla değerleri 0,2 ve 0,8'dir. P_α, alfa parçacıklarından gelen füzyon gücünü, P_n, nötron parçacıklarından gelen füzyon gücünü, P_f ise füzyon güç çıktısını ifade etmektedir [42].

Füzyon giriş gücü (P_i), alfa parçacıklarından gelen füzyon gücü (P_α) ve nötron parçacıklarından gelen füzyon gücü (P_n), toplam termal güç (P_{th}) değerini vermektedir.

$$P_{th} = P_i + P_\alpha + M.P_n \tag{4.4}$$

$$P_{th} = \frac{P_f}{Q}[Q \cdot (x_\alpha + x_n \cdot M) + 1] \tag{4.5}$$

Tesisteki ara ısı değiştiriciden sonra termal güç ikiye ayrılmaktadır; elektrik üretimi için gerekli güç P_{ge} ve hidrojen üretim tesisinde kullanılacak termal güç P_h. Elektrik üretimi için gerekli güç Eşitlik (4.6)'da ve hidrojen üretimi için gerekli termal güç Eşitlik (4.7)'de verilmiştir [42].

$$P_{ge} = \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \tag{4.6}$$

$$P_h = \eta_{ihx} \cdot (1 - \psi) \cdot P_{th} \quad (4.7)$$

Eşitlik (4.6) ve (4.7)'de, η_{ihx} ara ısı değiştirici verimini, ψ, elektriksel güç oranını ve $(1 - \psi)$ ise termal güç oranını göstermektedir.

Gaz türbinine elektrik üretimi için gerekli güç olarak giren P_{ge} türbin çıkışında Eşitlik (4.8) haline dönüşmektedir. Burada η_{gt} tesiste kullanılan gaz türbininin verimini ifade etmektedir.

$$P_e = \eta_{gt} \cdot P_{ge} \quad (4.8)$$

Eşitlik (4.6) ve Eşitlik (4.8) kullanılarak ise brüt elektrik güç üretimi P_e elde edilmektedir.

$$P_e = \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (4.9)$$

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi gaz türbininden sonra brüt elektrik güç üretimi P_e, x_{net} elektriksel güç oranıyla şebekeye verilen P_{net} elektrik gücü, x_{cir} elektriksel güç oranıyla yeniden dolaşımdaki P_{cir} elektrik gücü ve x_{eh} elektriksel güç oranıyla hidrojen üretim tesisine gidecek P_{eh} elektrik gücü olarak üçe ayrılmaktadır. P_{net}, P_{cir} ve P_{eh} elektriksel güçleri Eşitlik (4.10)-(4.12) ile ifade edilmektedir [42].

$$P_{net} = x_{net} \cdot P_e = x_{net} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (4.10)$$

$$P_{cir} = x_{cir} \cdot P_e = x_{cir} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (4.11)$$

$$P_{eh} = x_{eh} \cdot P_e = x_{eh} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (4.12)$$

Ayrıca x_{net}, x_{cir} ve x_{eh} elektriksel güç oranlarının toplamı 1'e eşittir, $x_{net} + x_{cir} + x_{eh} = 1$. P_{cir} yeniden dolaşımdaki elektrik gücü ise üçe ayrılmaktadır; sürücü sistem elektriksel gücü P_{ds}; yardımcı sistem elektriksel gücü P_{aux} ve izotop ayırma tesisi elektriksel gücü P_{isf} [42].

$$P_{ds} = \frac{P_i}{\eta_{ds}} \quad (4.13)$$

$$P_{aux} = x_{aux} \cdot P_{th} \tag{4.14}$$

$$P_{isf} = x_{isf} \cdot P_{th} \tag{4.15}$$

Eşitlik (4.13)'te η_{ds}, sürücü sistem verimini ifade etmektedir.

Hidrojen üretimi için hem termal hem de elektriksel güce ihtiyaç olduğu bilinmektedir. Hidrojen üretimi için gerekli termal güç P_h ve elektriksel güç P_{eh} arasında aşağıdaki bağıntı kurulabilir, burada ε orantı sabitidir [16].

$$P_{eh} = \varepsilon \cdot P_h \tag{4.16}$$

Hidrojen üretimi için gerekli toplam güç, $P_{hpf} = P_{eh} + P_h$ aynı zamanda Eşitlik (4.17)'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_{hpf} = (1 + \varepsilon) \cdot P_h \tag{4.17}$$

Eşitlik (4.5)-(4.17) kullanılarak ψ elektriksel güç oranı elde edilebilir [42];

$$\psi = \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \cdot [\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} + \frac{\varepsilon}{[\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{th} \cdot x_{net}]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} \cdot [\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} \tag{4.18}$$

Eşitlik (4.5), (4.7) ve (4.17) kullanılarak hidrojen üretimi için gerekli toplam güç formülü aşağıdaki gibi düzenlenebilir [42].

$$P_{hpf} = (1 - \psi) \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \eta_{ihx} \cdot \frac{P_f}{Q} \cdot [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \tag{4.19}$$

Bölüm 4.1'de anlatılan nükleer hidrojen üretimi hesaplamaları yapılırken kullanılacak parametre değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Nükleer hidrojen üretimi için gerekli parametreler ve değerleri [16,42,44]

Parametre	Değer
Füzyon güç girdisi, $\boldsymbol{P_i}$	500 MW
Füzyon güç çıktısı, $\boldsymbol{P_f}$	2000 MW

Çizelge 4.1. (devam) Nükleer hidrojen üretimi için gerekli parametreler ve değerleri [16,42,44]

Parametre	Değer
Ara ısı değiştirici verimi, $\boldsymbol{\eta_{ihx}}$	0,8
Gaz türbini termal verimi, $\boldsymbol{\eta_{gt}}$	0,6
Sürücü sistem verimi, $\boldsymbol{\eta_{ds}}$	0,5
Alfa parçacıkları için enerji fraksiyonu, $\boldsymbol{x_a}$	0,2
Nötron parçacıkları için enerji fraksiyonu, $\boldsymbol{x_n}$	0,8
Füzyon enerji kazancı, $\boldsymbol{Q}$	4
Yardımcı sistem güç fraksiyonu, $\boldsymbol{x_{aux}}$	0,05
İzotop ayrıştırma sistemi güç fraksiyonu, $\boldsymbol{x_{isf}}$	0,05

Bu tez kapsamında bölüm 4.1.'de verilen genel nükleer hidrojen üretim formülleri buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıklı elektroliz (HTE) ve kükürt-iyot (SI) döngülü termokimyasal yöntemlerine uyarlanmıştır.

4.2. Nükleer Hidrojen Üretim Metotları

Bu bölümde, tez kapsamında LIFE füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim yöntemleri, buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıklı elektroliz (HTE) ve kükürt-iyot (SI) döngülü termokimyasal yöntem, hakkında bilgi verilecektir.

4.2.1. Buhar-metan reformasyonu (SMR) ile hidrojen üretimi

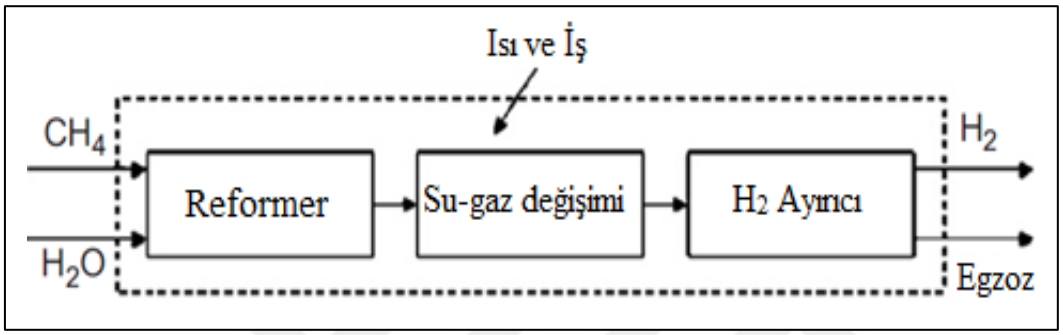
Fosil yakıtlar kullanılarak hidrojen üretim metotlarından birisi olan buhar-metan reformasyonu bir hidrokarbon reformasyonu tekniğidir. Hidrokarbon reformasyonu için genel reaksiyon ifadesi Eşitlik (4.20) ile verilmiştir [5,45].

Hidrokarbon reformasyonu;

$$\mathrm{C}_x\mathrm{H}_y + x\mathrm{H}_2\mathrm{O} \rightarrow x\mathrm{CO} + (x + \frac{1}{2}y)\mathrm{H}_2 \qquad (4.20)$$

Buhar-metan reformasyonu (SMR), ticari olarak en fazla kullanılan ve en çok gelişmiş hidrojen üretim teknolojisidir [10]. Buhar-metan reformasyonunda hidrojen üretim verimliliği %74-85 arasındadır [5].

SMR birden fazla basamaklı, birden fazla reaksiyondan oluşan, doğal gaz ya da diğer hidrokarbonlar ile buhar arasında gerçekleşen katalitik bir prosestir [46]. Şekil 4.4'te SMR prosesi için şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 4.4. SMR prosesi şematik gösterimi [47]

Şekil 4.5'te LIFE füzyon reaktörü entegreli SMR metodu ile hidrojen üretim tesisi görülmektedir. Bu tez kapsamında SMR metodu için üç farklı reaksiyon kullanılarak hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. İlk reaksiyon buhar-metan reformasyonu (SMR) reaksiyonudur. SMR reaksiyonu Eşitlik (4.21)'de verilmiştir. Buhar reformasyonu genellikle 700-850°C sıcaklıklarda ve 3-25 MPa basınç aralıklarında gerçekleşmektedir [48]. Ön arıtmaya tabi tutularak kirlilikten arınan metan reformera girer. Reformera gelen metan ve buhar üreticisi ile üretilen buhar ile reaksiyona girer. Bu işlem buhar-metan reformasyonu (SMR) olarak adlandırılır. SMR reaksiyonu sonucunda 1:3 oranında CO ve H_2 meydana gelir. SMR reaksiyonu ile yüksek miktarda karbon monoksit salınımı olduğu için, CO miktarını azaltmak üzere 300-400°C'de su gazı değişimi (WGS) olarak bilinen reaksiyon meydana gelir [45]. WGS reaksiyonunda karbon monoksit su ile reaksiyona girer, karbon dioksit (CO_2) ve hidrojen (H_2) meydana gelir. Eşitlik (4.22)'de su-gaz değişimi (WGS) reaksiyonu verilmiştir.

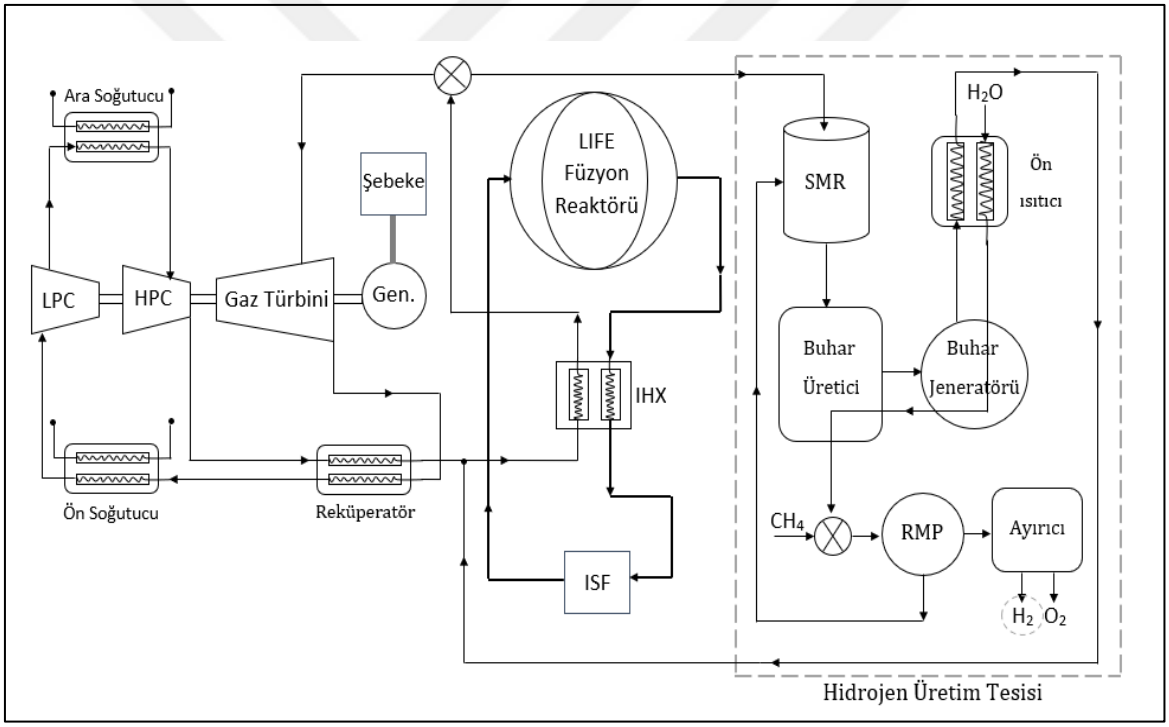
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ -206 kJ/mol SMR Reaksiyonu (4.21)

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ +41 kJ/mol WGS Reaksiyonu (4.22)

$CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2$ +90 kJ/mol MCS Reaksiyonu (4.23)

$CH_4 + 2H_2O + CaSiO_3 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2 + 4H_2$ -75 kJ/mol Net Reaksiyon (4.24)

WGS reaksiyonu sonucu ortaya çıkan karbondioksitin çevreye olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Karbondioksit emisyonu salınımını azaltmanın bir yolu ise CO_2 yakalamak ve onu yer altında veya mineral karbonatlar olarak kalıcı olarak depolamaktır. Mineral karbonatlaşma, gaz halindeki karbondioksit ile doğal olarak meydana gelen kalsiyum ya da magnezyum silikatlar ile reaksiyona girmesidir. Bu reaksiyon mineral karbondioksit tutumu (MCS) olarak adlandırılır. MCS reaksiyonu Eşitlik (4.23)'te verilmiştir [49,50]. Eşitlik (4.24)'te ise üç reaksiyon sonucundaki net reaksiyon yer almaktadır.



Şekil 4.5. LIFE füzyon reaktörü entegreli SMR metodu ile hidrojen üretim akış şeması [15,16,42]

Bu tez kapsamında buhar-metan reformasyonu metodu ile hidrojen üretimi potansiyeli incelenirken, reaksiyonların hidrojen üretimine olan etkisini incelemek için dört mod için de (Mod ①: %5 ThC, %95 flibe; Mod ②: %10 ThC, %90 flibe, Mod ③: %5 ThC, %95 natural lityum, Mod ④: %10 ThC, %90 natural lityum) reaksiyonlar üç farklı şekilde kullanılmıştır. İlk olarak, bütün reaksiyonlar (SMR + WGS + MCS) kullanılarak hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. İkinci olarak, mineral karbon tutumu reaksiyonu

kullanılmadan sadece iki reaksiyon (SMR + WGS) kullanılarak hidrojen üretim potansiyeli incelenmiş ve son olarak sadece tek reaksiyon (SMR) kullanılarak dört mod için reaktörün hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Çizelge 4.2'de buhar-metan reformasyonu ile hidrojen üretimi için kullanılan reaksiyonlar görülmektedir.

Çizelge 4.2. Buhar-metan reformasyonu için reaksiyonların kullanımı tablosu

Üç Reaksiyon	SMR + WGS + MCS
İki Reaksiyon	SMR + WGS
Bir Reaksiyon	SMR

Buhar-metan reformasyonu ile hidrojen üretimi prosesinde girdi olarak elektrik enerjisi kullanılmamaktadır. Yani Şekil 4.5'te görüldüğü üzere jeneratörde üretilen elektrik enerjisi SMR tesisine gönderilmemektedir. Bu sebepten dolayı güç orantı sabiti $\varepsilon = 0$ kabulü ile hidrojen üretim potansiyeli incelenebilir [14,15,42]. Eşitlik (4.19)'da ki genel güç formülü $\varepsilon = 0$ düzenlemesi ile SMR metodu için Eşitlik (4.25)'te verilmiştir.

$$P_{hpf}^{SMR} = (1 - \psi) \cdot \eta_{ihx} \cdot \frac{P_f}{Q} \cdot [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \tag{4.25}$$

Nükleer reaktörde üretilen tüm ısı ve elektrik enerjisinin tesiste kullanıldığı kabulü ile $x_{net} = 0$ olmaktadır. $x_{net} = 0$ ve $\varepsilon = 0$ kabulleri ile elektriksel güç oranı ψ Eşitlik (4.26)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$\psi^{SMR} = \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \cdot [\eta_{gt}]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} \cdot [\eta_{gt}]} \tag{4.26}$$

SMR, WGS ve MCS reaksiyonları için kütlesel debi hesabı Eşitlik (4.27)-(4.36)'da verilmiştir [42]. Burada $\dot{m}$ kütlesel debi; υ kimyasal bileşiklerin molar kütlelerini; η_{SMR} SMR reaksiyonunun verimini, η_{WGS} su gazı değişimi (WGS) reaksiyonunun verimini; η_{MCS} ise mineral karbon tutumu (MCS) reaksiyonunun verimini ifade etmektedir.

SMR reaksiyonu için kütlesel debi:

$$\dot{m}_{CH_4} = P_{hpf}^{SMR} / q_{tot} \tag{4.27}$$

$$\dot{m}_{H_2O-1} = \dot{m}_{CH_4} . \frac{\boldsymbol{v}_{H_2O}}{\boldsymbol{v}_{CH_4}} \quad (4.28)$$

$$\dot{m}_{CO} = \dot{m}_{CH_4} . \frac{\boldsymbol{v}_{CO}}{\boldsymbol{v}_{CH_4}} . \eta_{SMR} \quad (4.29)$$

$$\dot{m}_{H_2-1} = 3 \cdot \dot{m}_{CH_4} . \frac{\boldsymbol{v}_{H_2}}{\boldsymbol{v}_{CH_4}} . \eta_{SMR} \quad (4.30)$$

WGS reaksiyonu için kütlesel debi:

$$\dot{m}_{H_2O-2} = \dot{m}_{CO} . \frac{\boldsymbol{v}_{H_2O}}{\boldsymbol{v}_{CO}} \quad (4.31)$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_{CO} . \frac{\boldsymbol{v}_{CO_2}}{\boldsymbol{v}_{CO}} \cdot \eta_{WGS} \quad (4.32)$$

$$\dot{m}_{H_2-2} = \dot{m}_{CO} . \frac{\boldsymbol{v}_{H_2}}{\boldsymbol{v}_{CO}} \cdot \eta_{WGS} \quad (4.33)$$

MCS reaksiyonu için kütlesel debi:

$$\dot{m}_{CaSiO_3} = \dot{m}_{CO_2} . \frac{\boldsymbol{v}_{CaSiO_3}}{M_{CO_2}} \quad (4.34)$$

$$\dot{m}_{CaCO_3} = \dot{m}_{CO_2} . \frac{\boldsymbol{v}_{CaCO_3}}{M_{CO_2}} \cdot \eta_{MCS} \quad (4.35)$$

$$\dot{m}_{SiO_2} = \dot{m}_{CO_2} . \frac{\boldsymbol{v}_{SiO_2}}{\boldsymbol{v}_{CO_2}} \cdot \eta_{MCS} \quad (4.36)$$

Eşitlik (4.27)-(4.36)'da verilen verim değerleri, η_{SMR}, η_{WGS} ve η_{MCS} 0,90 kabul edilerek tüm hesaplamalar yapılmıştır. Toplam reaksiyon enerjileri, üç reaksiyon için $q_{tot} =$ 4,682 MJ/kg; iki reaksiyon için $q_{tot} = 10{,}330$ MJ/kg; bir reaksiyon için $q_{tot} = 11{,}764$ MJ/kg'dır [15,44].

Buhar-metan reformasyonu için toplam hidrojen üretimi Eşitlik (4.30) ve (4.33)'ten yararlanarak Eşitlik (4.37)'de ki denklem ile bulunur.

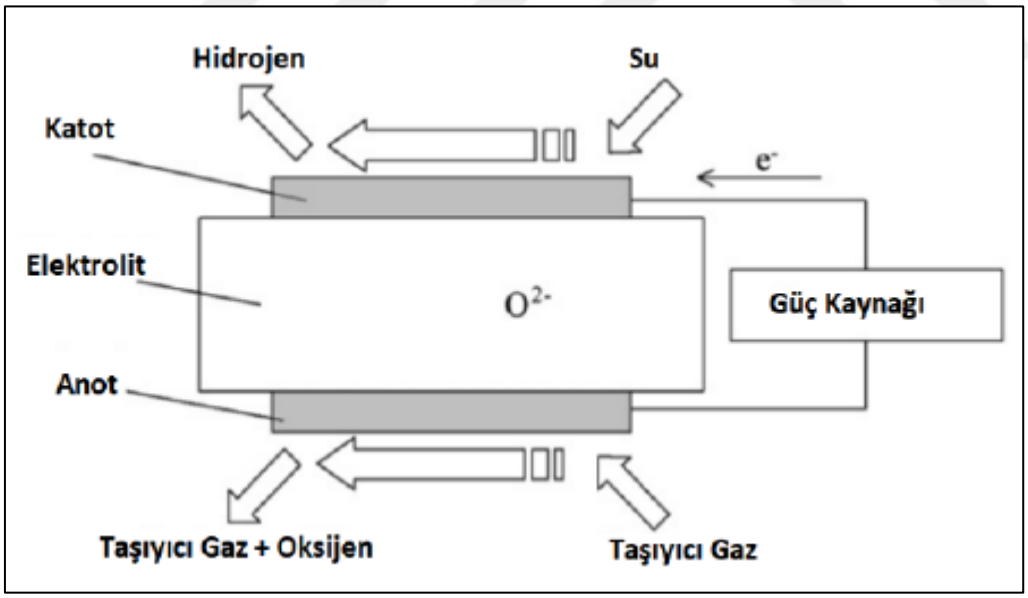
$$\dot{m}_{H_2-tot} = \dot{m}_{H_2-1} + \dot{m}_{H_2-2} \quad (4.37)$$

Hidrojen üretiminde önemli parametrelerden biri olan verim hesabı buhar-metan reformasyonu için hidrojenin ısıl değeri ile dışarıdan sisteme verilen gücün toplamının oranı ile hesaplanabilir. Sisteme verilen toplam güç, nükleer reaktörden elde edilen termal güç ve reaksiyona giren metanın (CH_4) ısıl değeri toplamına eşittir. Buhar-metan reformasyonu için termal verim Eşitlik (4.38)'de verilmiştir [42].

$$\eta_{hpf}^{SMR} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV_{H_2}}{\dot{m}_{CH_4} \cdot HHV_{CH_4} + P_{hpf}^{SMR}} \tag{4.38}$$

4.2.2. Yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ile hidrojen üretimi

Yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE), günümüzde ticari olarak kullanılan standart elektrolizden daha yüksek verimliliklere sahiptir [51]. HTE prosesinde 800°C sıcaklıklarda hidrojen üretim verimliliği %53'ün üzerinde seyretmektedir [52]. Yüksek sıcaklıkta elektroliz yönteminde düşük sıcaklıktaki su elektrolizine göre toplam enerji talebi buharlaşma ısısıyla azaltılmaktadır [53].



Şekil 4.6. Yüksek sıcaklıkta elektroliz mekanizması [54]

Şekil 4.6'da HTE mekanizması verilmiştir. Mekanizma bir elektrolit, anot ve katottan oluşmaktadır. Elektrolitin bir tarafına katot, diğer tarafına ise anot tutturulur. HTE reaksiyonunda su, elektroliz hücresine gaz fazında girmeden önce dış kaynaklı bir ısı ile ısıtılmaktadır. Buhar elektroliz hücresinin katoduna girer, Eşitlik (4.39)'da görüldüğü gibi

buhar katotta hidrojen ve oksijen iyonu olarak ayrışır. Katotta ayrılan hidrojen ürün olarak elektroliz hücresinden çıkar. Oksijen iyonu ise iletken elektrolit sayesinde anota taşınır. Eşitlik (4.40)'ta görüldüğü gibi oksijen iyonu ürün olarak geri kazanılır [52].

$$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O_2^- \quad (4.39)$$

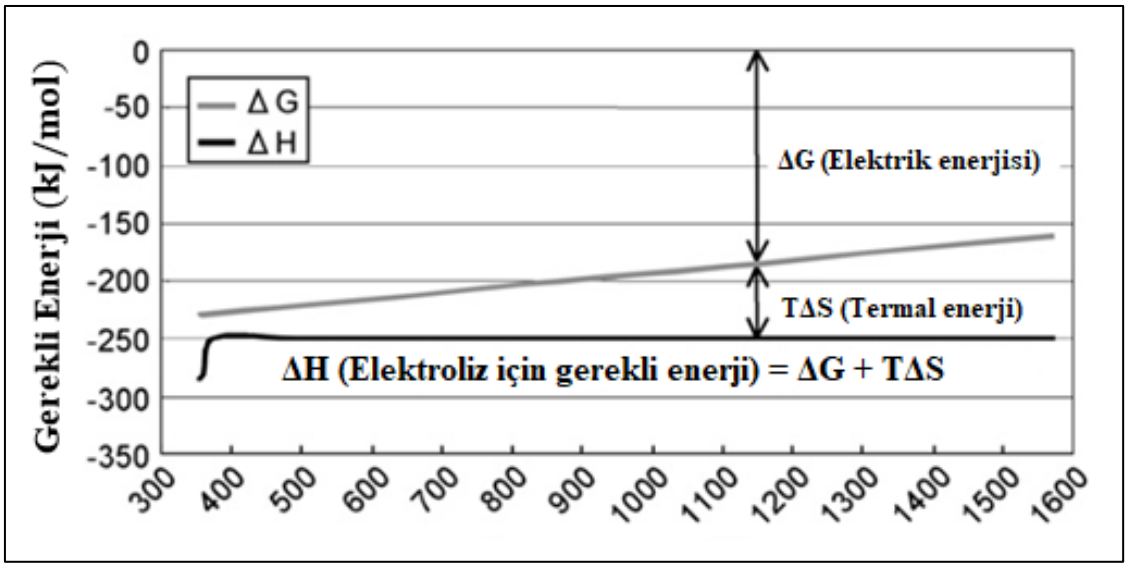
$$O_2^- \rightarrow 1/2\ O_2 + 2e^- \quad (4.40)$$

$$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2\ O_2 \quad (4.41)$$

HTE reaksiyonunda buharı hidrojen ve oksijene parçalamak için hem termal enerjiye hem de elektrik enerjisine ihtiyaç vardır, Eşitlik (4.42). Burada ΔH, hidrojen yanma ısısının negatifine eşittir ve entalpi değişimini gösterir. ΔG, Gibbs serbest enerji değişimini, ΔS, entropi değişimini gösterirken, T ise reaksiyonun sıcaklığını göstermektedir [52].

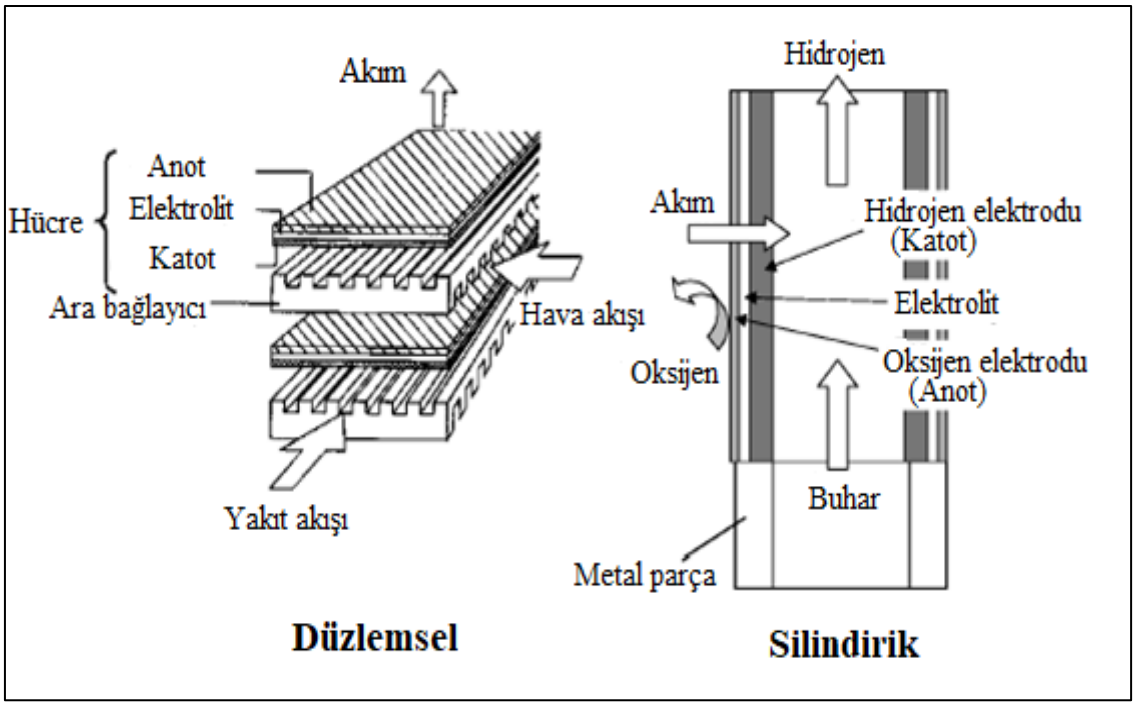
$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (4.42)$$

Elektroliz reaksiyonunda $T\Delta S$ termal enerji girişini sağlarken, ΔG elektriksel enerji girişini sağlamaktadır. Şekil 4.7'de verilen HTE reaksiyonu için gerekli enerji değişimi incelendiğinde, reaksiyon sıcaklığı T arttıkça, gerekli elektrik enerjisi ΔG Gibbs serbest enerjisinin azaldığı görülmektedir. Buradan yüksek sıcaklıkta elektrolizde, düşük sıcaklıktaki elektrolize göre daha az enerji girdisine ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.7. Yüksek sıcaklıkta elektroliz için gerekli enerji [52]

Tipik bir elektroliz hücresi Şekil 4.8'de görülmektedir. Elektroliz hücresinin silindirik ve düzlemsel çeşitleri bulunmaktadır. İlki, hava sızdırmazlığı sağlama konusunda üstündür, yani hidrojen elektrotu ve oksijen elektrotunun ayrılması konusunda daha iyidir fakat entegrasyon derecesi düşüktür (birim alanda etkili reaksiyon alanı düşüktür). İkincisi ise hava geçirmezliği konusunda çok daha iyidir [55].



Şekil 4.8. Elektroliz hücresi [55]

Elektroliz prosesinde hidrojen üretim verimliliğini hesaplamak için Eşitlik (4.43)'te verilen formül kullanılmaktadır [16,55].

$$\eta_{hpf} = \frac{HHV_{H_2}}{\frac{P_{eh}}{\emptyset} + P_h} \tag{4.43}$$

Burada, HHV hidrojenin bir molü için üst ısıl değeridir, $\emptyset$ güç üretim verimliliğidir, P_{eh} 1mol hidrojen üretmek için gerekli elektrik enerjisi, P_h ise gerekli termal enerjidir. Eşitlik (4.44) ve (4.45)'te termal enerji ve elektriksel enerji formülleri verilmiştir [55].

$$P_h = T\Delta S - 2 \cdot F \cdot I(IR + \mu_a + \mu_c) + q + \beta \tag{4.44}$$

$$P_{eh} = \Delta G + 2 \cdot F \cdot I(IR + \mu_a + \mu_c) + \alpha \tag{4.45}$$

Eşitlik (4.44) ve (4.45)'te verilen F Faraday sabitini (96485 coulomb/mol), I elektrolite verilen akım yoğunluğunu, IR omik gücü, μ elektrot aşırı gerilimini, a ve c indisleri sırasıyla anot ve katotu, q buharlaşma gizli ısısını, α kısmi gücü ve β ısı yayılımını ifade etmektedir [55].

Güç orantı sabiti dikkate alınırsa Eşitlik (4.43) aşağıdaki gibi düzenlenebilir [16,44].

$$\eta_{hpf}^{HTE} = \frac{(1+\varepsilon)\cdot\eta_{gt}}{\varepsilon+\eta_{gt}} \tag{4.46}$$

HTE prosesinde reaktörde üretilen elektrik enerjisi hidrojen üretim tesisinde kullanıldığı için güç orantı sabiti sıfır olarak kabul edilemez. Tesiste hidrojen üretiminin 900°C'de gerçekleştiği kabulü ile güç orantı sabiti $\varepsilon = 4$ olarak alınır [16,52] ve termal güç formülü Eşitlik (4.47)'de ki gibi düzenlenir.

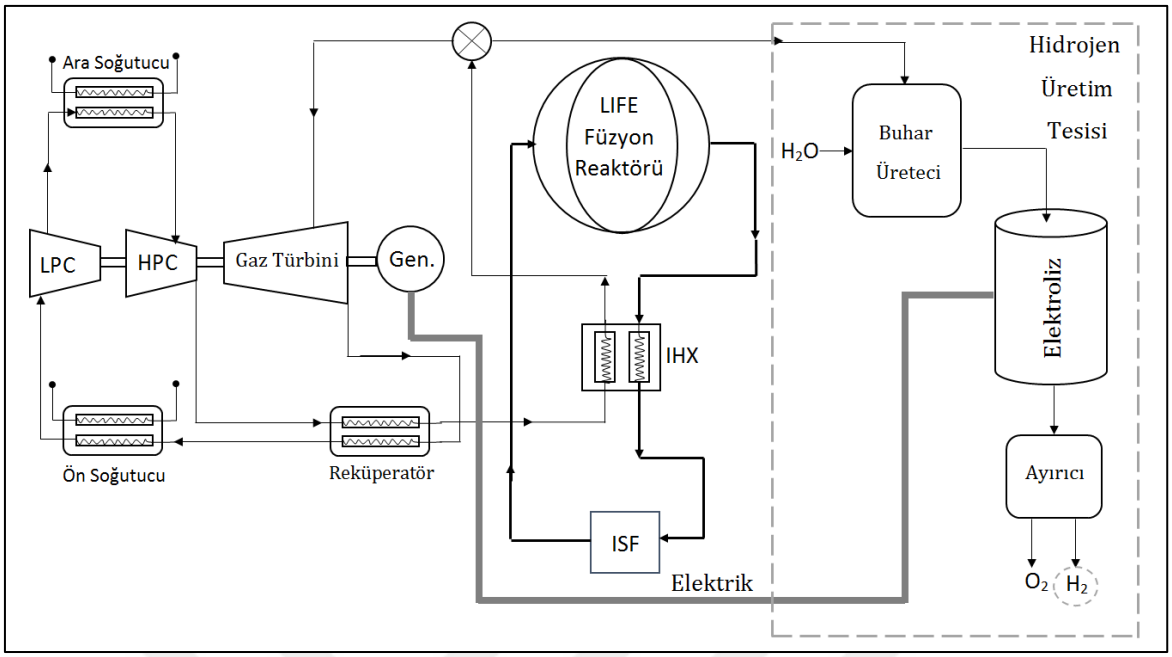
$$P_{hpf}^{HTE} = (1-\psi)\cdot(1+4)\cdot\eta_{ihx}\cdot\frac{P_f}{Q}\cdot[Q\cdot(x_a + x_n\cdot M)+1] \tag{4.47}$$

Şekil 4.9'da LIFE füzyon reaktörü entegreli HTE hidrojen üretim tesisi görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi reaktörde üretilen elektrik enerjisinin hepsinin hidrojen üretim tesisinde harcandığı kabul edilerek, $x_{net} = 0$ alınarak, elektriksel güç oranı Eşitlik (4.48) ile hesaplanmaktadır.

$$\psi^{HTE} = \frac{1}{\eta_{ihx}\cdot\eta_{ds}[Q\cdot(x_a+x_n\cdot M)+1]\cdot[\eta_{gt}+4]} + \frac{4}{[\eta_{gt}+4]} + \frac{x_{aux}+x_{isf}}{\eta_{ihx}\cdot[\eta_{gt}+4]} \tag{4.48}$$

Şekil 4.9'da görülen HTE hidrojen üretim tesisinde üretilen hidrojen miktarı Eşitlik (4.49)'da verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{m}_{H_2}^{HTE} = \frac{P_{hpf}^{HTE}}{HHV_{H_2}} \tag{4.49}$$



Şekil 4.9. LIFE füzyon reaktörü entegreli HTE metodu ile hidrojen üretim akış şeması [15,16,42]

4.2.3. Kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi

Kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem yüksek termal verimliliği ve düşük çevre kirliliği ile son 30 yıldır tasarlanan alternatifler arasında en ümit vadeden hidrojen üretim metodudur [56,57].

Kükürt-iyot termokimyasal döngüsü birçok avantaj sunmaktadır. Tüm proses sıvıları geri dönüştürülür ve tüm zararlı kimyasallar döngüde tutulur, yüksek sıcaklık (~ 900 °C) aşaması bu tezde de olduğu gibi bir nükleer veya güneş reaktörüne bağlanabilir [58].

İlk olarak 1970'lerde General Atomics tarafından geliştirilen S-I döngüsü [59,60] için verimlilik değeri %55'lere kadar ulaşmaktadır. S-I döngülü termokimyasal çevrim Eşitlik (4.50)-(4.52)'de belirtilen üç farklı kimyasal reaksiyondan oluşmaktadır [61].

$$2H_2O + I_2 + SO_2 \rightarrow H_2SO_4 + 2HI \quad (4.50)$$

$$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + \tfrac{1}{2}\, O_2 \quad (4.51)$$

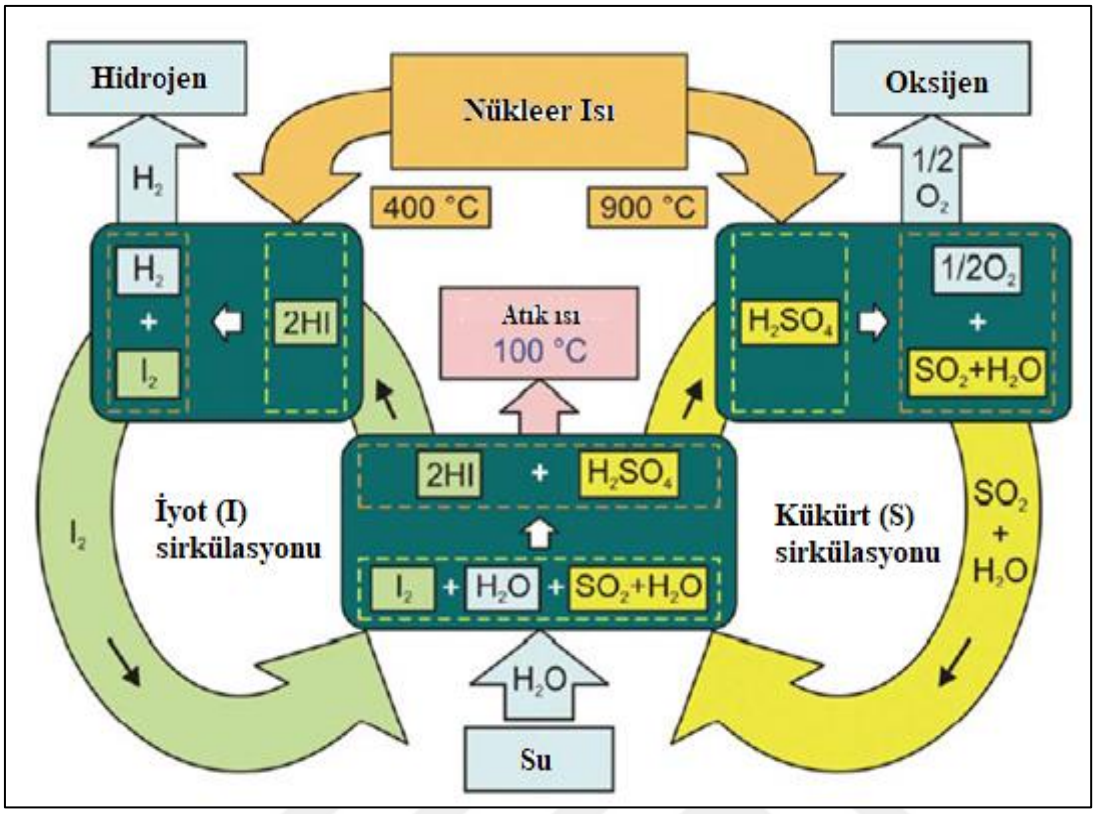
$$2HI \rightarrow I_2 + H_2 \quad (4.52)$$

Eşitlik (4.50)'de verilen reaksiyon Bunsen reaksiyonu olarak adlandırılan ekzotermik bir reaksiyondur. Reaksiyon 90 ila 140°C arasında gerçekleşmektedir [58]. Bunsen reaksiyonu S-I çevriminin önemli bir bölümünü temsil etmektedir. Reaksiyon ürünleri ve bileşimleri, sonraki reaksiyon aşamalarında enerji tüketimi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bunsen reaksiyonunun ekzotermik yapısından dolayı çevrimin bu bölümde harici bir ısı kaynağına ihtiyaç yoktur [53].

Eşitilik (4.51)'de verilen reaksiyon sülfürik asit ayrışma reaksiyonu olarak adlandırılmaktadır. S-I çevriminde sülfürik asit endotermik iki farklı aşamada ayrışmaktadır. İlk ayrıştırıcı, 300 ila 500°C arasındaki sıcaklıklarda H_2SO_4'ü SO_3 ve H_2O'ya parçalayan ayrıştırıcıdır. H_2SO_4 ağırlık olarak %90 konsantrasyondan daha büyük bir konsantrasyonda buharlaşmaktadır. İkinci olarak, SO_3 800 ila 900°C sıcaklık aralığında bir katalizör yardımı ile O_2 ve SO_2'ye ayrışmaktadır [53]. SO_3 ayrışma oranı, H_2SO_4 ayrışma bölümünün enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir [62].

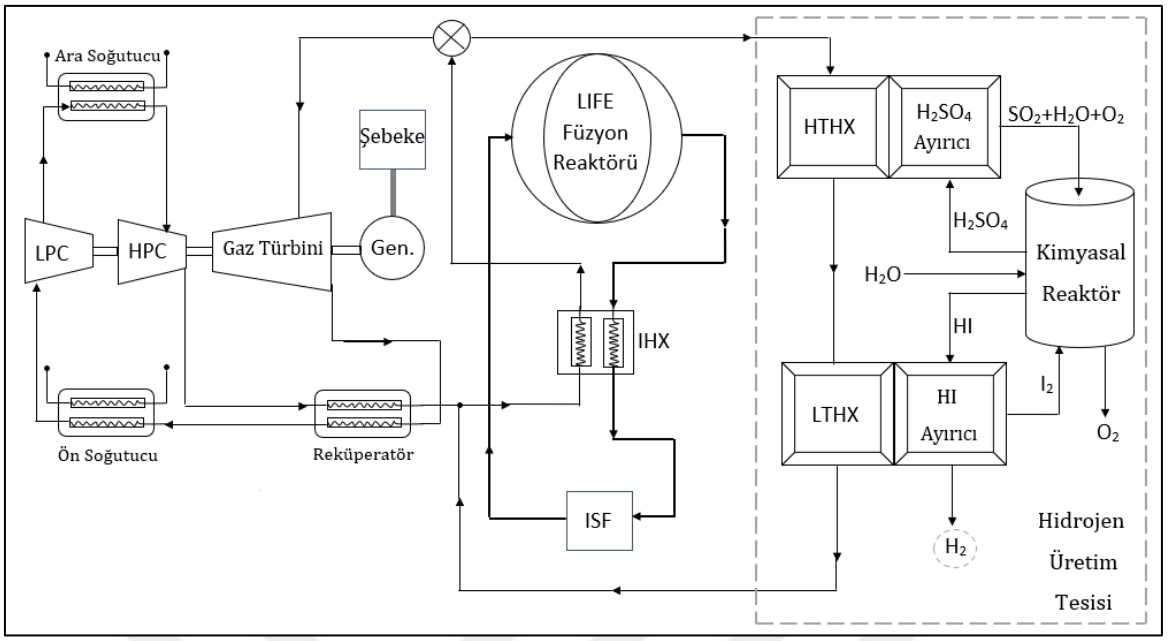
Eşitlik (4.52)'de verilen reaksiyon ise hidriodik asit ayrışma reaskiyonu olarak adlandırılmaktadır. Reaksiyon 100 ila 500°C arasında gerçekleşen endotermik bir reaksiyondur. Burada Bunsen reaksiyonundan gelen HI endotermik olarak I_2 ve H_2'ye ayrışmaktadır [58].

Şekil 4.10'da kükürt-iyot döngülü termokimyasal çevrimin şematik bir gösterimi verilmiştir. S-I çevrimi, nükleer ısı yardımıyla gerçekleşen iki farklı ayrışma reaksiyonu ve ekzotermik olan Bunsen reaksiyonu olarak üç farklı kısımda ele alınabilir. Bunsen reaksiyonu kısmında H_2O, SO_2 ve I_2 ile ekzotermik olarak reaksiyona girer. Reaksiyon sonucunda sıvı fazda iki ürün eldesi olur, H_2SO_4 ve HI. Ağırlıkça %57 sülfürik asit, bir dizi flaş buharlaştırıcıda konsantre edilir. Sülfürik asit nükleer ısı yardımıyla endotermik olarak reaksiyona girmek üzere H_2SO_4 ayrıştıcısına girer. Burada iki farklı endotermik aşama sonucunda H_2O, O_2 ve SO_2 ürün olarak çıkar, H_2O ve SO_2 ise tekrar kullanılmak üzere Bunsen reaktörüne gönderilir. Bunsen reaksiyonu sonucunda elde edilen diğer ürün 5 MPa'da saflaştırılmış sıvı HI ise HI ayrışma reaktöründe katalitik olarak ayrıştırılır. Hidrojen ürünü, bir sıvı gaz ayırıcıda I_2'nin çoğundan ve bir miktar HI'den ayrılır. Gaz halindeki H_2 ürünü daha sonra H_2O ile temizlenir ve elde edilen ürün saf hidrojen olur. I_2 tekrar kullanılmak üzere Bunsen reaktörüne gönderilir [58,63].



Şekil 4.10. Kükürt-iyot termokimyasal çevrimin şematik gösterimi [53]

Şekil 4.11'de bu tez kapsamında LIFE füzyon reaktörü entegreli S-I termokimyasal çevrim ile hidrojen üretilen tesisin şematik gösterimi verilmiştir. S-I döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretiminde gerekli olan ısı enerjisi nükleer reaktörden sağlanmaktadır. Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi LIFE füzyon reaktörünün ardından gelen ara ısı değiştirici yardımı ile ısı hem hidrojen üretimi için hidrojen üretim tesisine, hem de elektrik üretimi için jeneratöre iletilmektedir. Hidrojen üretim tesisinde elektrik girdisine ihtiyaç olmadığı için jeneratörde üretilen elektriğin tamamı şebekeye verilir, yani güç orantı sabiti $\varepsilon = 0$ kabul edilir.



Şekil 4.11. LIFE füzyon reaktörü entegreli S-I metodu ile hidrojen üretim akış şeması [15,16,42]

Şekil 4.11'de LPC, düşük basınç kompresörünü; HPC, yüksek basınç kompresörünü; HTHX, yüksek sıcaklık ısı değiştiricisini; LTHX ise düşük sıcaklık ısı değiştiricisini ifade etmektedir.

Güç orantı sabiti sıfır kabulü ile S-I döngülü termokimyasal yöntemde ihtiyaç duyulan termal güç Eşitlik (4.19) düzenlenerek Eşitlik (4.53)'te ki gibi olmaktadır [42].

$$P_{hpf}^{S-I} = (1-\psi)\cdot\eta_{ihx}\cdot\frac{P_f}{Q}\cdot[Q\cdot(x_a+x_n\cdot M)+1] \tag{4.53}$$

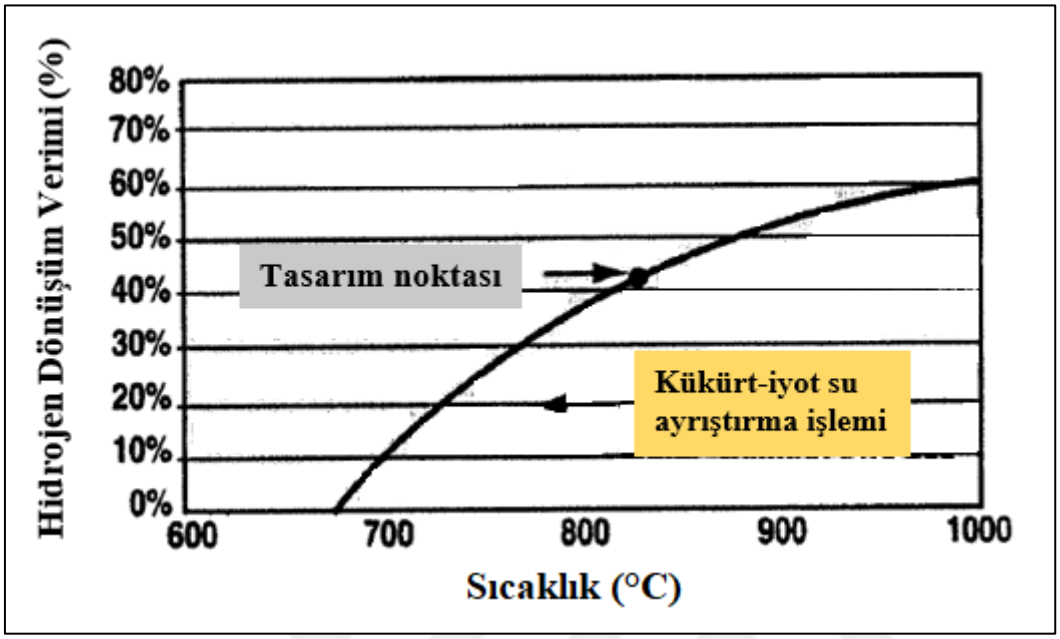
S-I döngülü termokimyasal yöntem için, $\varepsilon = 0$ düzenlemesi ve tesiste üretilen tüm elektrik ve ısının tesiste kullanıldığı varsayımı ($x_{net} = 0$) ile elektrik güç oranı ψ Eşitlik (4.54)'te ki denklem ile hesaplanabilir.

$$\psi^{S-I} = \frac{1}{\eta_{ihx}\cdot\eta_{ds}[Q\cdot(x_a+x_n\cdot M)+1]\cdot[\eta_{gt}]} + \frac{x_{aux}+x_{isf}}{\eta_{ihx}\cdot[\eta_{gt}]} \tag{4.54}$$

Şekil 4.11'de verilen tesiste üretilen hidrojen üretim miktarı Eşitlik (4.55)'te verilen denklem ile hesaplanır [16].

$$\dot{m}_{H_2}^{S-I} = \eta_{hpf}\cdot P_{hpf}^{S-I}\cdot\mathcal{R}^{-1} \tag{4.55}$$

Burada $\mathcal{R}$, 1 kg hidrojen üretmek için gerekli olan enerjiyi ifade etmektedir ve değeri 141,7 MJ/kg'dır [16].



Şekil 4.12. S-I döngülü termokimyasal çevrim için tahmini verim grafiği [64]

S-I döngülü termokimyasal yöntem için verim değeri Şekil 4.12'de ki grafikten 900°C için yaklaşık olarak 0.53 alınmaktadır [64].

5. HESAPLAMA METOTLARI

Bu tez kapsamında modifiye edilen LIFE füzyon reaktörünün nötronik analizi dört farklı mod için yapılmış ve her mod için LIFE füzyon reaktöründe hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Nötronik analiz sonucunda trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), fisil yakıt üretimi (^{233}U) ve yakıt yanma oranı (BU) değerleri elde edilmiştir. Nötronik analiz sonucu elde edilen M değeri kullanılarak hidrojen üretim tesisinde LIFE füzyon reaktörü için hidrojen üretimi araştırılmıştır. Ayrıca hidrojen üretim tesisinde ihtiyaç duyulan termal enerji ve elektrik enerjisi LIFE füzyon reaktöründen elde edilerek hidrojen üretim tesisinin kullanımına sunulmuştur. Hidrojen üretim potansiyeli incelenirken, termal güç oranı $(1-\psi)$, termal güç (P_{hpf}), hidrojen üretim miktarı $(\dot{m}_{H_2})$ ve verim (η_{hpf}) değerleri elde edilmiştir. Hidrojen üretim tesisinde üç farklı hidrojen üretim metodu kullanılmıştır. Bunlar; buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem. LIFE füzyon reaktörünün nötronik analizinde ENDF-V nötron veri kütüphanesine sahip Monte Carlo N Parçacık kodu (MCNP) kullanılmıştır. Hidrojen üretim potansiyeli ise nötronik sonuçlara entegre edilmiş C++ kodu ile yazılmış bir ara yüz programı kullanılarak incelenmiştir.

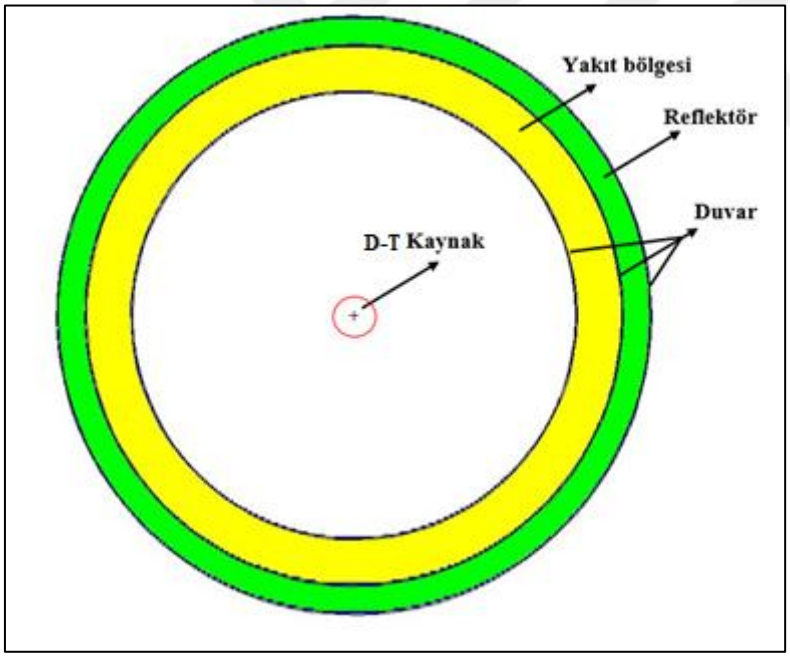
5.1. Monte Carlo N Parçacık (MCNP) Kodu

Monte Carlo metodu, Los Alamos Ulusal Laboratuvarında bilim adamlarının nükleer silah çalışmalarıyla ortaya çıkan bir yöntemdir. 1930'lardan sonra hızla gelişmiştir. Olasılık teorisine tabi olan metot rastgele sayıların kullanılarak bir probleme uygulanmasına dayanır [65,66].

MCNP, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı tarafından, nötron/foton/elektron ve birleşik nötron/foton/elektron hesaplamaları için tasarlanan bir koddur. MCNP ismi Monte Carlo N Parçacık kodundan gelmektedir. MCNP Monte Carlo kodu, 1970'lerden beri kritik güvenlik sorunlarının yüksek doğrulukta analizleri için kullanılmaktadır [67]. MCNP kodu spesifik kullanım alanları dışında, radyografi, tıbbi fizik, nükleer kritiklik güvenliği, radyasyondan korunma ve dizometri, radyasyon kalkanı, dedektör tasarımı, fisyon ve füzyon reaktörü tasarımı gibi birçok alanda da kullanılmaktadır [68–70].

Nötron enerji rejimi, tüm izotoplar için 10^{-11} MeV ila 20 MeV ve bazı izotoplar için 150 MeV'a kadardır, foton enerji rejimi 1 keV ila 100 GeV arasındadır. Elektron enerji rejimi ise 1 KeV ila 1 GeV arasındadır. Bölünebilir sistemler için etkin çoğaltma faktörü (k_{eff}) değerlerini hesaplaması da MCNP'nin standart bir özelliğidir [69].

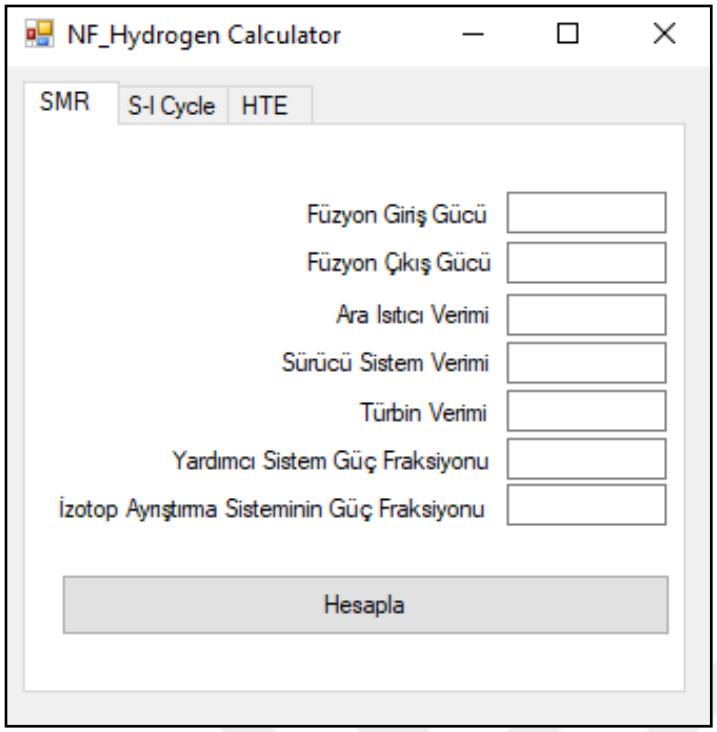
Nötronik analizi zamana bağlı hesaplayabilmek için ek bir programa ihtiyaç vardır. Tez kapsamında nötronik parametreleri zamana bağlı hesaplayan Acır'ın geliştirdiği bir program kullanılmıştır. Nötronik analiz döngü başına 100 000 nötron (nps) ile gerçekleştirilmiştir. Nötronik değerlendirmeler 27 günlük zaman aralığında ve %100'lük santral faktörü ile yapılmıştır [36,44]. Bunlara dayanarak MCNP kodu ve kullanılan ek ara yüz programı ile TBR, M, BU ve ^{233}U üretim değerleri zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.1'de MCNP kodu aracılığıyla çizilen modifiye edilmiş LIFE füzyon reaktörü geometrisi görülmektedir.



Şekil 5.1. LIFE füzyon reaktörü

5.2. Nükleer Hidrojen Üretimi Hesaplayıcısı Programı

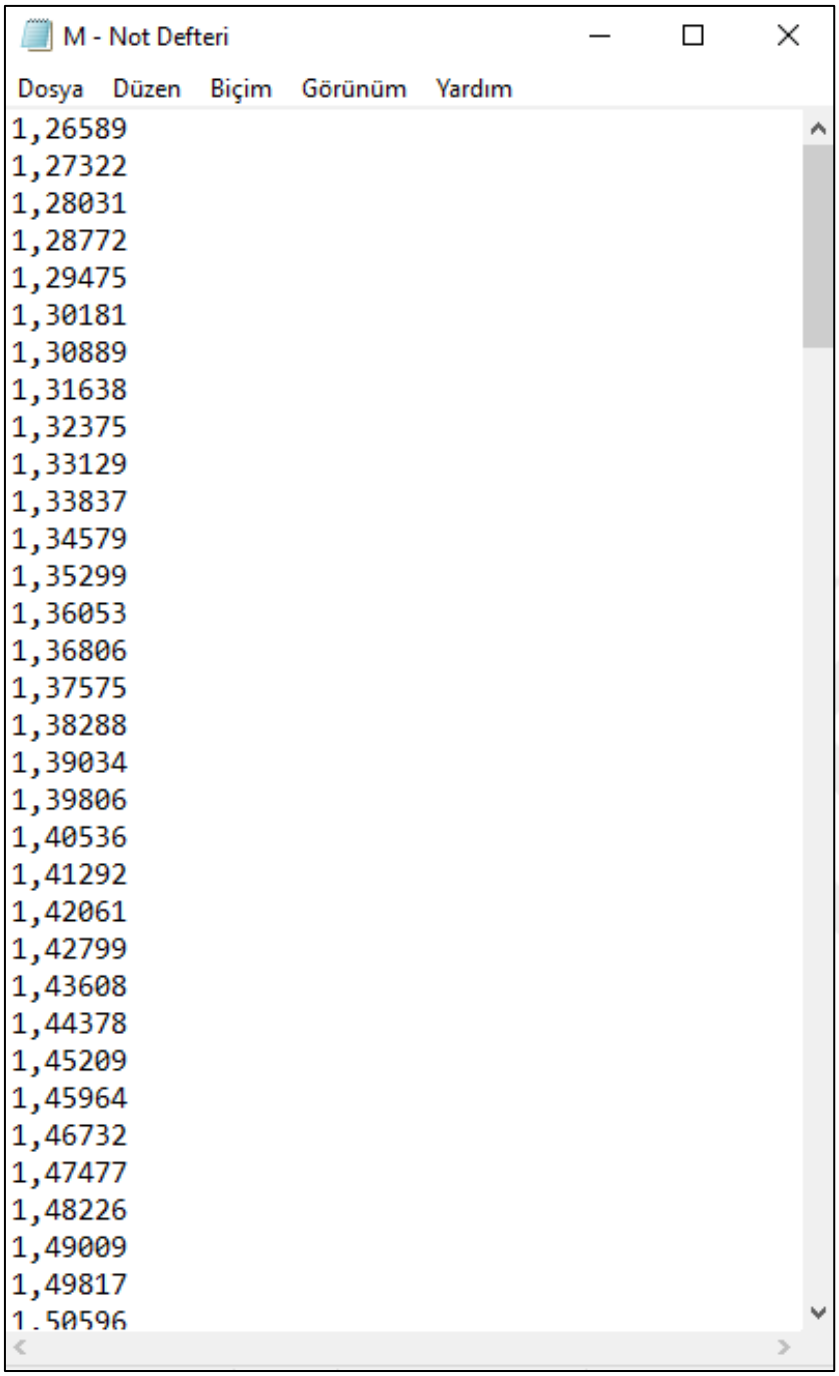
Modifiye edilen LIFE füzyon reaktöründe SMR, HTE ve S-I metotları ile hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Hidrojen üretim analizi yapılırken Visual Studio programında C++ tabanlı bir program kullanılmıştır. Kullanılan programın ana ekran görüntüsü Şekil 5.2'de verilmiştir.



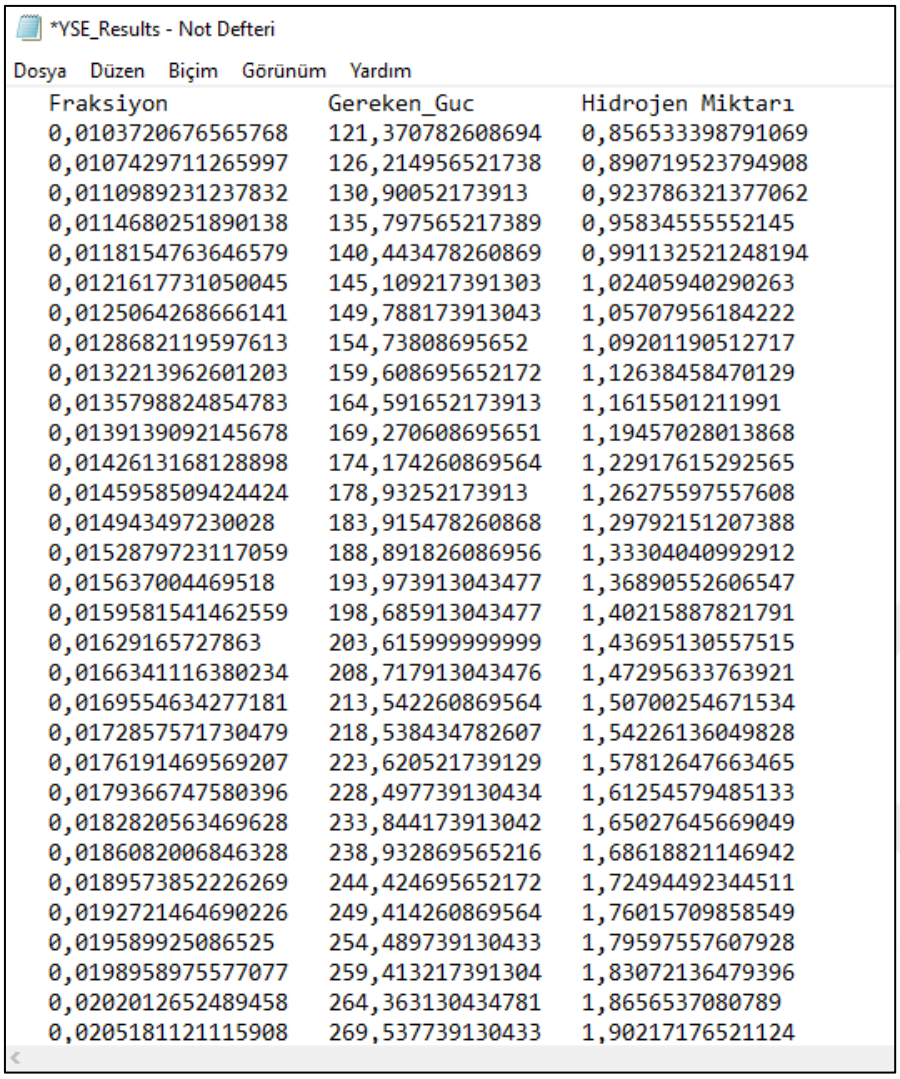
Şekil 5.2. Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı programı ana ekran görüntüsü

Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı, yapacağı tüm hesapları nötronik analiz sonucu elde edilen M değerine bağlı kalarak yapmaktadır. Bu sebeple program kullanılacağı zaman ilk adım LIFE füzyon reaktörüne ait M değerlerinin olduğu girdi dosyasını C klasörüne kaydetmektir. Şekil 5.3'te nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı için girdi dosyası örneği görülmektedir. Ardından C klasörüne kopyalanan hidrojen üretim hesaplayıcısı programı açılır, gelen ana ekran üzerinden hangi hidrojen üretim metodu kullanılacağı seçilir. Hidrojen üretim yöntemi seçildikten sonra ekranda istenen veriler girilir. Hesapla butonuna basılır.

Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı, girdi dosyasındaki M değerlerine göre termal güç oranı $(1-\psi)$, termal güç (P_{hpf}), hidrojen üretim miktarı $(\dot{m}_{H_2})$ ve verim (η_{hpf}) değerlerini hesaplar. Hesaplama sonuçları C klasörü içine txt uzantılı bir dosya olarak kaydedilir. Sonuç dosyası örneği Şekil 5.4.'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı girdi dosyası örneği



*YSE_Results - Not Defteri

Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım

Fraksiyon	Gereken_Guc	Hidrojen Miktarı
0,0103720676565768	121,370782608694	0,856533398791069
0,0107429711265997	126,214956521738	0,890719523794908
0,0110989231237832	130,90052173913	0,923786321377062
0,0114680251890138	135,797565217389	0,95834555552145
0,0118154763646579	140,443478260869	0,991132521248194
0,0121617731050045	145,109217391303	1,02405940290263
0,0125064268666141	149,788173913043	1,05707956184222
0,0128682119597613	154,73808695652	1,09201190512717
0,0132213962601203	159,608695652172	1,12638458470129
0,0135798824854783	164,591652173913	1,1615501211991
0,0139139092145678	169,270608695651	1,19457028013868
0,0142613168128898	174,174260869564	1,22917615292565
0,0145958509424424	178,93252173913	1,26275597557608
0,014943497230028	183,915478260868	1,29792151207388
0,0152879723117059	188,891826086956	1,33304040992912
0,015637004469518	193,973913043477	1,36890552606547
0,0159581541462559	198,685913043477	1,40215887821791
0,01629165727863	203,615999999999	1,43695130557515
0,0166341116380234	208,717913043476	1,47295633763921
0,0169554634277181	213,542260869564	1,50700254671534
0,0172857571730479	218,538434782607	1,54226136049828
0,0176191469569207	223,620521739129	1,57812647663465
0,0179366747580396	228,497739130434	1,61254579485133
0,0182820563469628	233,844173913042	1,65027645669049
0,0186082006846328	238,932869565216	1,68618821146942
0,0189573852226269	244,424695652172	1,72494492344511
0,0192721464690226	249,414260869564	1,76015709858549
0,019589925086525	254,489739130433	1,79597557607928
0,0198958975577077	259,413217391304	1,83072136479396
0,0202012652489458	264,363130434781	1,8656537080789
0,0205181121115908	269,537739130433	1,90217176521124

Şekil 5.4. Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı sonuç dosyası örneği

Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısı programında kullanıcıdan istenilen veriler için, bu tez kapsamında kullanılan değerler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Nükleer hidrojen üretim hesaplayıcısında kullanıcıdan istenilen veriler

Gerekli Parametreler	Kullanılan Değerler
Füzyon giriş gücü	500 MW
Füzyon çıkış gücü	2000 MW
Ara ısıtıcı verimi	0,8
Sürücü sistem verimi	0,5
Türbin verimi	0,6
Yardımcı sistem güç fraksiyonu	0,05
İzotop ayrıştırma sistemi güç fraksiyonu	0,05

6. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında LIFE füzyon reaktörü entegreli hidrojen üretim tesisi incelenmiştir. Tesis incelenirken ilk olarak MNCP kodu yardımıyla füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik hesaplamaları yapılmıştır. LIFE füzyon reaktörünün nötronik performansı incelenirken trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), yanma oranı (BU) ve fisil yakıt üretimi dört farklı mod için karşılaştırılmıştır. Reaktörün hidrojen üretim potansiyeli üç farklı hidrojen üretim metodu (buhar-metan reformasyonu, yüksek sıcaklıkta elektroliz ve kükürt-iyot döngülü termokimyasal yöntem) için araştırılmış ve aralarında karşılaştırılmıştır. Tesisin hidrojen üretim potansiyelleri zamana bağlı olarak termal güç oranı $(1-\psi)$, termal güç (P_{hpf}), hidrojen üretim miktarı $(\dot{m}_{H_2})$ ve verim (η_{hpf}) değeri açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca her hidrojen üretim metodu kendi içinde dört farklı yakıt-soğutucu modu için karşılaştırılmıştır.

6.1. Nötronik Hesaplamalar

Bu başlık altında LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik analiz sonuçları verilmiştir. Nötronik analiz, dört farklı mod için incelenip, modlar birbirleri ile karşılaştırılmış ve grafikler halinde yorumlanmıştır.

6.1.1. Trityum üretim oranı (TBR)

Trityum üretim oranı (TBR), modifiye edilmiş LIFE reaktörünün sürdürülebilirliğinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir. Füzyon sürücüsünün kendi kendini sürdürebilmesi için trityum üretim oranının 1,05'in üstünde olması (TBR>1,05) gerekmektedir. Hacimce %95 ve %90 oranlarında kullanılan flibe ve natural lityum soğutucular ve TRISO kaplı ThC başlangıçta homojen halde bulunmaktadır. Düşük ve yüksek enerjili nötronlar ^{6}Li ve ^{7}Li izotop reaksiyonlarıyla Eşitlik (6.1) ve (6.2)'de gösterildiği gibi elde edilmektedir [32,71,72].

$$^{6}\text{Li} + \text{n} \rightarrow \text{T}_{6} + \text{He} + 4{,}7484\ \text{MeV} \tag{6.1}$$

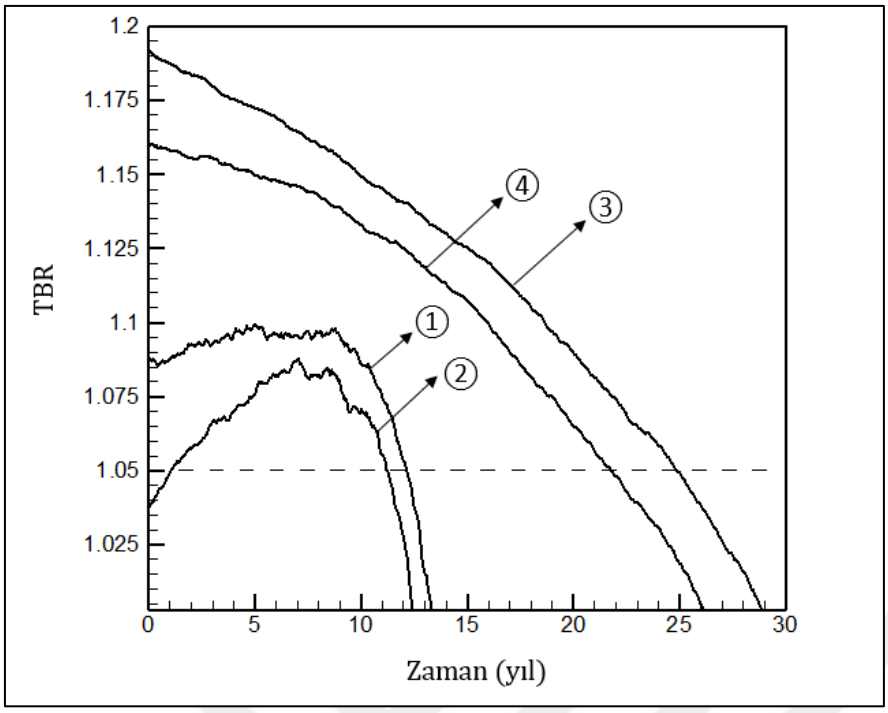
$$^{7}\text{Li} + \text{n} \rightarrow \text{T}_{7} + \text{He} + \text{n} - 2{,}467\ \text{MeV} \tag{6.2}$$

Trityum üretimi 14,1 MeV'luk nötron kaynağı ile flibe/natural lityum soğutucunun reaksiyona girmesi sonucunda meydana gelmekte ve ^{6}Li reaksiyonu sonucunda elde edilen T_6 ve ^{7}Li reaksiyonu sonucunda elde edilen T_7, toplam trityum üretim oranını vermektedir. Toplam trityum üretim oranı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$TBR = T_6 + T_7 \tag{6.3}$$

Burada, $T_6 = \iint \Phi \cdot \Sigma_{(n,\alpha)T}.dE.dV$ ve $T_7 = \iint \Phi \cdot \Sigma_{(n,n'\alpha)T}.dE.dV$ denklemleri ile hesaplanmaktadır [20].

Dört farklı mod için TBR değerleri Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Mod ①,②,③ ve ④ sırasıyla incelendiğinde, Mod ① ve ② için TBR başlangıç değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 1,08 ve 1,03 olduğu görülmektedir. Mod ① ve ②'de soğutucu olarak flibe kullanıldığı bilinmektedir. Şekil 6.1 incelendiğinde TBR değeri flibe soğutucu kullanılan modlar için ilk önce artmış daha sonra azalmıştır. Bunun sebebi, berilyumun bir nötron çoğaltıcı olmasıdır. Aynı soğutucu akışkanlar farklı yakıt oranları ile karşılaştırıldığında ise düşük yakıt oranı kullanılan modlarda (Mod ① ve ③) yüksek yakıt oranı kullanılan modlara (Mod ② ve ④) göre trityum üretim oranın daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. TBR değeri Mod ① için en yüksek 1,09 ve Mod ② için en yüksek 1,08 değerine ulaşmıştır. Soğutucu olarak natural lityum kullanılan Mod ③ ve ④ incelendiğinde TBR başlangıç değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 1,19 ve 1,15 olarak okunmaktadır. Zamana bağlı olarak TBR değerinin azalması fisyon reaksiyonunun artması ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 6.1. Trityum üretim oranının zamana bağlı değişimi

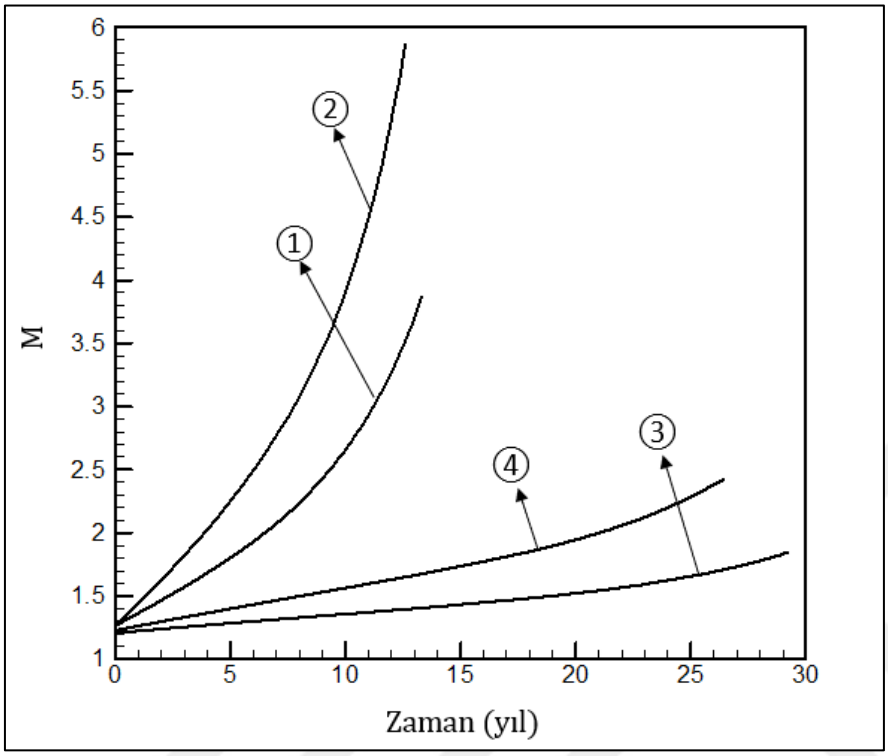
Her dört mod için reaktör çalışma süreleri TBR değerinin 1,05 sınırına ulaştığı zaman olarak kabul edilebilir. TBR değeri 1,05'in altına düştüğünde reaktör artık kendi kendini sürdüremez, çalışamaz. Şekil 6.1'de, Mod ①,②,③ ve ④ için çalışma sürelerinin sırasıyla 11, 10, 23 ve 20 yıl olduğu görülmektedir. Buna göre reaktör natural lityum soğutucu ile flibe soğutucuya göre daha fazla süre çalışmıştır.

6.1.2. Enerji çoğaltım faktörü (M)

Enerji çoğaltım faktörü M, reaktörün enerji üretimi olarak tanımlanabilir. Fisil yakıt oluşumu arttıkça fisyon reaksiyonu da artmaktadır. Fisyon reaksiyonunun artışına bağlı olarak, enerji çoğaltım faktörü artmaktadır. Bir fisyon reaksiyonunda açığa çıkan enerji miktarı yaklaşık olarak 200 MeV'tur. $^{6}Li(n,\alpha)T$ reaksiyonu başına salınan enerji miktarı 4,7484 MeV iken $^{7}Li(n,n'\alpha)T$ reaksiyonu başına emilen enerji miktarı 2,467 MeV'tur. Enerji çoğaltım faktörü Eşitlik (6.4) ile hesaplanmaktadır [19,20,36].

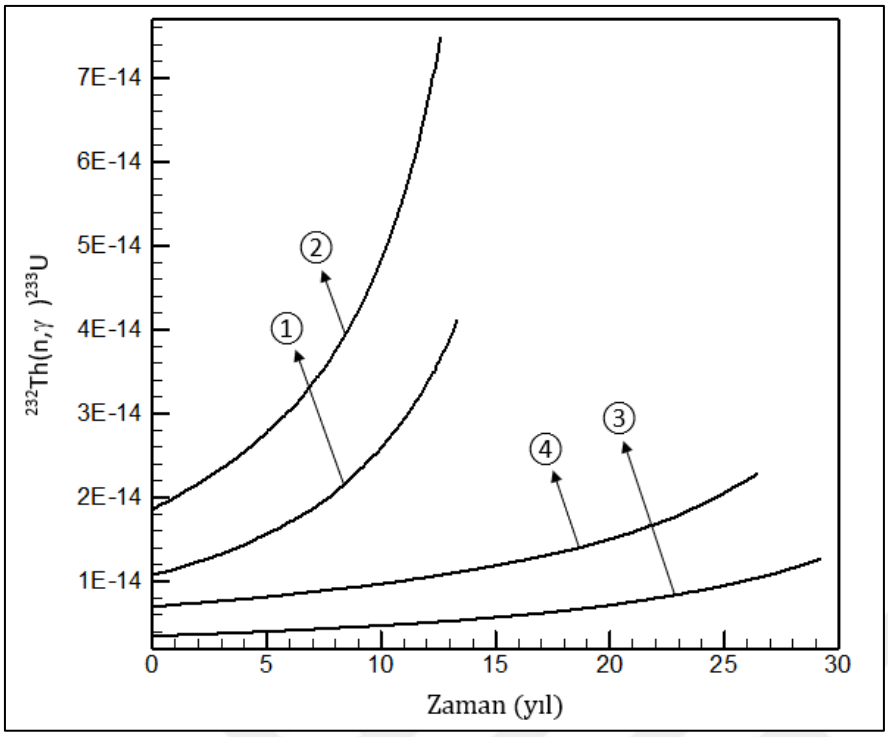
$$M = \frac{200\ \text{MeV}*<\Phi*\Sigma_f>+4{,}7484\ \text{MeV}*T_6-2{,}467\ \text{MeV}*T_7}{14{,}1\ \text{MeV}} + 1 \qquad (6.4)$$

Burada; $< \Phi * \Sigma_f > = \iint \Phi \cdot \sum_f dEdV$ toplam integral fisyon oranıdır. $T_6 = < \Phi \cdot \sum_{(n,a)T} >$ ve $T_7 = < \Phi \cdot \sum_{(n,n'a)T} >$ 'dir [19,36].



Şekil 6.2. Enerji çoğaltım faktörünün zamana bağlı değişimi

ThC yakıtlı LIFE füzyon reaktörünün dört farklı mod için enerji çoğaltım faktörü değişimi Şekil 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.2 incelendiğinde reaktörde soğutucu akışkan olarak flibe kullanıldığı zaman M değerlerinin natural lityuma göre daha yüksek seyrettiği gözlemlenmektedir. Bu farkın sebebi reaktörde fisil izotop (^{233}U) birikmesi ile daha fazla fisyon reaksiyonunun gerçekleşmesi olarak açıklanmaktadır. Natural lityum soğutucuda flibe soğutucuya göre lityum atomları ile daha fazla nötron absorbe edilmektedir. Şekil 6.3'te ^{232}Th(n,γ)^{233}U değişim grafiği verilmiştir. Grafikte de görülecektir ki flibe soğutucuda natural lityum soğutucuya göre daha fazla fisyon reaksiyonu meydana gelmiştir. Mod ①,②,③ ve ④ için M değeri başlangıçta sırasıyla 1,27, 1,26, 1,21 ve 1,23 iken; reaktör çalışma süreleri sonunda (sırasıyla 11, 10, 23, 20) yani TBR değeri 1,05'e ulaştığında, enerji çoğaltım faktörü Mod ① için 3,17; Mod ② için 4,42; Mod ③ için 1,62 ve Mod ④ için 1,98 olmuştur.



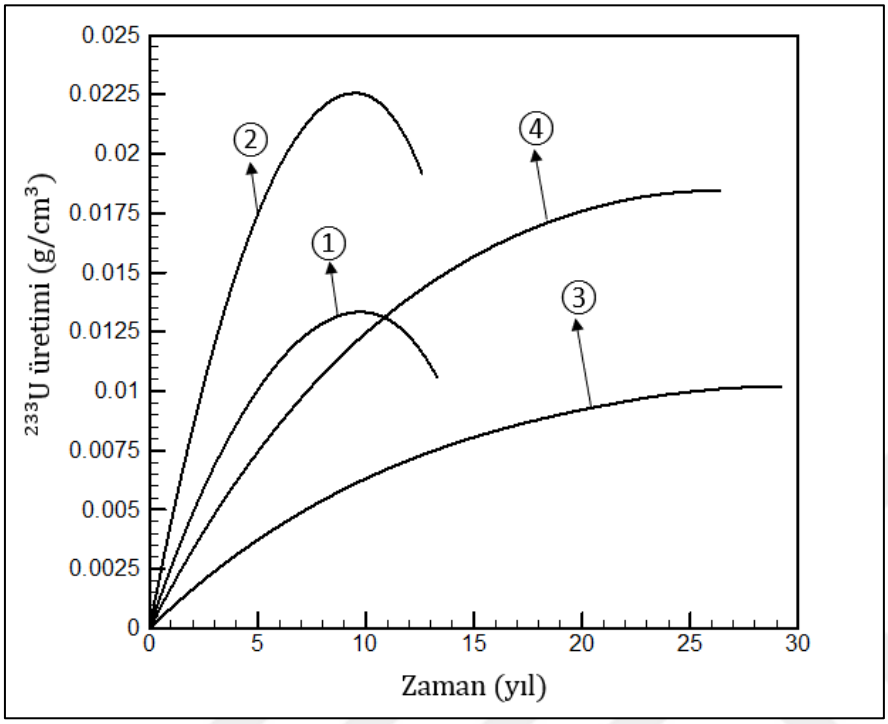
Şekil 6.3. Zamana bağlı $^{232}Th(n,\gamma)^{233}U$ değişimi

6.1.3. Fisil yakıt üretimi (^{233}U)

Reaktör çalışma süresi boyunca TRISO parçacığında fisil yakıt üretimi olmaktadır. Yakıt olarak kullanılan toryum, $^{232}Th(n,\gamma)^{233}U$ reaksiyonu aracılığıyla sürekli olarak fisil yakıt (^{233}U) üretmektedir. Şekil 6.4'te kullanılan modlar için fisil yakıt üretimi değişim grafiği görülmektedir.

Zamana bağlı fisil yakıt değişim grafiği incelendiğinde, flibe soğutucu akışkan kullanılan modlarda (Mod ① ve ②) ilk önce artış daha sonra ise çalışma süresi sonuna kadar bir azalma görülmektedir. Natural lityum kullanılan modlarda (Mod ③ ve ④) ise herhangi bir azalma olmaksızın reaktör çalışma süresi boyunca artmaktadır. Dört mod için maksimum ^{233}U yoğunluğunun Mod ②'de olduğu görülmektedir. Üretilen fisil yakıt değerleri sırasıyla 11, 10, 23, 20 yıllık reaktör çalışma süreleri içinde Mod ① için 0,0133 g/cm^3; Mod ② için 0,0225 g/cm^3; Mod ③ için 0,0098 g/cm^3 ve Mod ④ için 0,0177 g/cm^3 olarak gözlemlenmiştir. Aynı yakıt oranları incelendiğinde soğutucu akışkan flibe için ^{233}U üretiminin natural lityuma göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu farkın sebebi natural lityum soğutucuda Li atomları aracılığıyla nötronların absorbe edilmesi

olarak açıklanmaktadır. Aynı soğutucular incelendiğinde ise yakıt oranının artması ile birlikte fisil yakıt üretiminin de arttığı Şekil 6.4'te açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 6.4. Zamana bağlı fisil yakıt (^{233}U) üretimi değişimi

6.1.4. Yakıt yanma oranı (BurnUp)

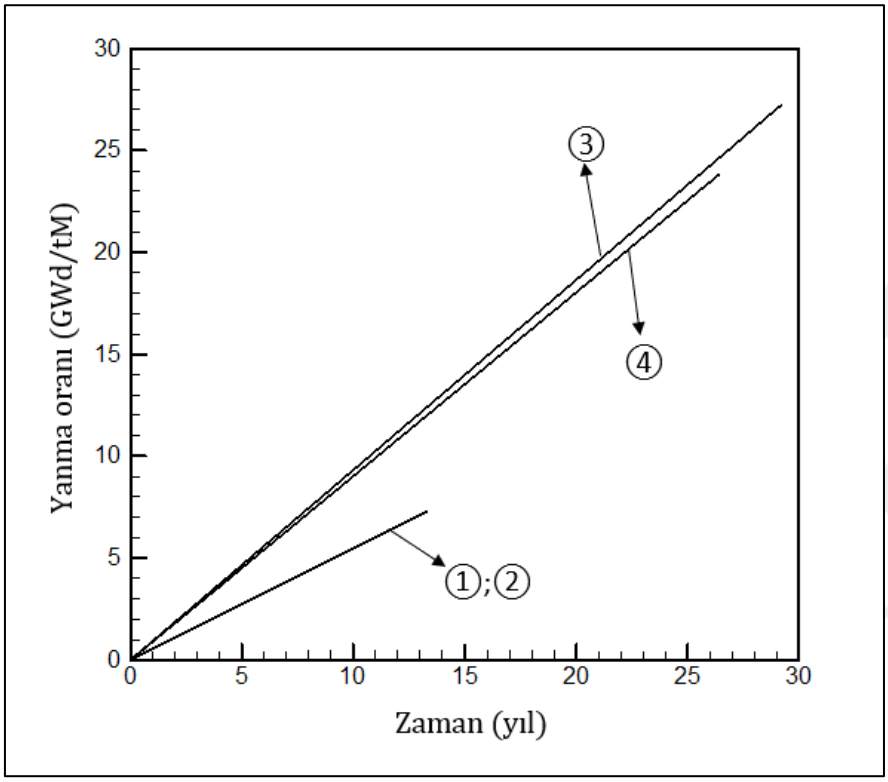
Yakıt yanma oranı, ağır metal yakıtın metrik tonu başına megawatt-gün (MWd/tM) olarak ifade edilen, yakıtın birim kütlesi başına üretilen enerji miktarını tanımlamaktadır [73]. Yakıt yanma oranı Eşitlik (6.5) kullanılarak hesaplanabilir [36,74].

$$BU = PF * \Delta t * E_f * F * C_f \iint \sum_f (E) * \phi(E) * dE * dV / m_{fu} \quad (6.5)$$

Burada; PF reaktör faktörüdür ve değeri 1'dir, fisyon başına enerji E_f dir ve değeri 200 MeV'dur, dönüşüm faktörü C_f ve değeri 1,6021×10^{-19} MWs/1MeV'dir, F füzyon nötron kaynağıdır ve değeri 1,774×10^{20}'dir (saniyede 14 MeV enerjili nötron) ve m_{fu} yakıt bölgesindeki fisyon yapabilen yakıt yüküdür [36,74].

TRISO parçacıklı flibe ya da natural lityum kullanılan modlar için yakıt yanma oranı değişimi Şekil 6.5'te verilmiştir. Şekil 6.5 incelendiğinde TBR>1,05 sınır değeri dikkate

alındığında tüm modlar için yakıt yanma oranının sürekli arttığı gözlemlenmektedir. Yakıt yanma oranı, Mod ① için 11 yıl çalışma süresi sonunda TBR değeri 1,05'e ulaştığında yanma oranı 6,4 GWd/tM değerine ulaşmıştır. Mod ② için 10 yıl çalışma süresi sonunda 5,9 GWd/tM, Mod ③ için 23 yıl sonunda 22 GWd/tM ve Mod ④ için 20 yıl sonunda 18 GWd/tM değerlerine ulaşmıştır. Yakıt yanma oranı fisil izotop üretimi arttıkça artmıştır.



Şekil 6.5. Zamana bağlı yakıt yanma oranı değişimi

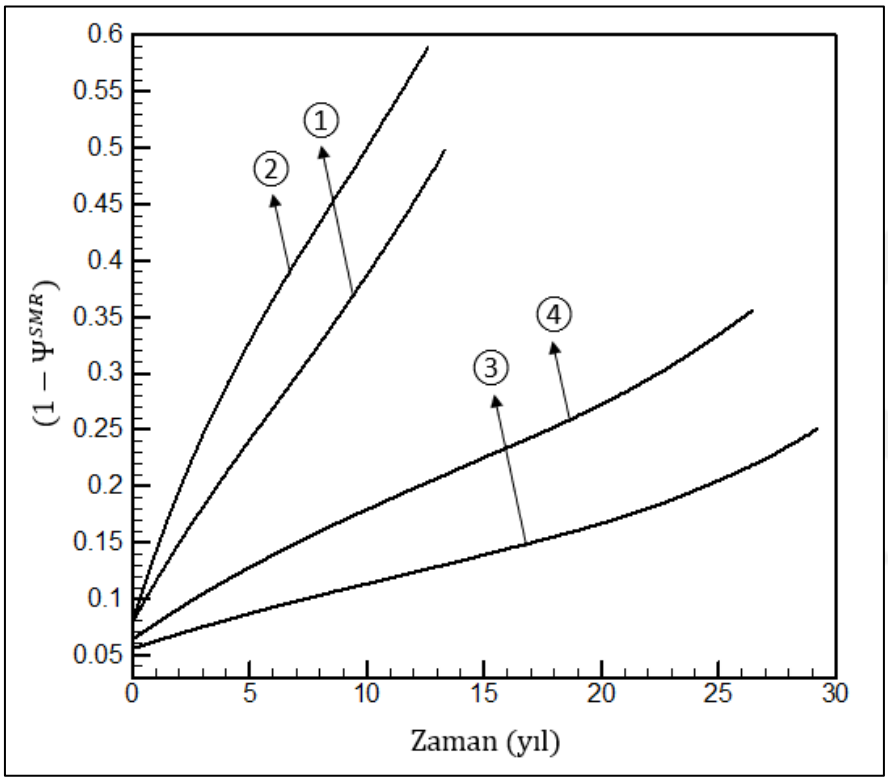
6.2. Hidrojen Üretim Potansiyeli Sonuçları

Bu başlık altında, zamana bağlı nötronik analizi yapılan LIFE füzyon reaktörünün 3 farklı metot için zamana bağlı hidrojen üretim potansiyeli incelenmiş, hidrojen üretim metotları kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Ayrıca her hidrojen üretim metodu içinde reaktörde kullanılan 4 farklı mod karşılaştırılmış, grafikler ile yorumlanmıştır.

6.2.1. Buhar metan reformasyonu (SMR) ile hidrojen üretimi sonuçları

LIFE füzyon reaktörü entegreli buhar-metan reformasyonu ile hidrojen üretim tesisi Bölüm 4.2.1'de detaylı olarak incelenmiştir.

Şekil 6.6'da SMR metodu için gerekli termal güç oranının $(1-\psi^{SMR})$ zamana bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde dört mod için de termal güç oranının arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi M enerji çoğaltım faktörünün artışına bağlıdır. M arttıkça termal güç oranı da artar. $1-\psi^{SMR}$ termal güç oranının Mod ①, ②, ③ ve ④ için TBR≥1.05 değerine ulaştığında sırasıyla 0,44; 0,53; 0,19 ve 0,28 olduğu gözlemlenmiştir.



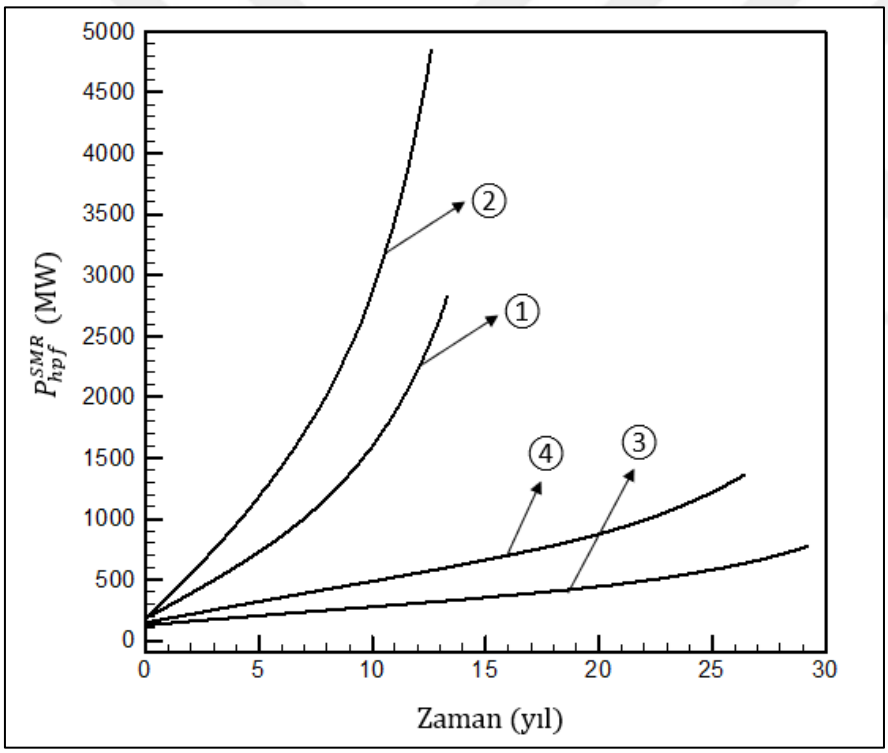
Şekil 6.6. SMR metodu için zamana bağlı termal güç oranının değişimi

Burada kullanılan yakıt oranlarına göre modlar karşılaştırılırsa, yakıt oranı arttıkça termal güç oranının da arttığı gözlemlenmiştir. %5 oranında ThC yakıt kullanılan modlara (Mod ① ve Mod ③) oranla %10 oranında ThC kullanılan modlarda (Mod ② ve Mod ④) termal güç oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Flibe ve natural lityum soğutucular karşılaştırılır ise flibe soğutucu kullanılan modlarda, natural lityum kullanılan modlara göre termal güç oranının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi SMR metodu ile hidrojen üretimi tesisi için gerekli termal güç LIFE füzyon reaktöründen sağlanmaktadır. Bu sebeple LIFE füzyon reaktöründen hidrojen

üretim tesisine gönderilen termal güç M enerji çoğaltım faktörüne göre zamana bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 6.7'de SMR metodu ile hidrojen üretimi için Eşitlik (4.25) ile hesaplanan SMR metodu için gerekli termal güç değişimi görülmektedir. Mod ① için P_{hpf}^{SMR} değeri başlangıçta 186 MW iken 11 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 2120 MW'a ulaşmıştır. Mod ② için P_{hpf}^{SMR} değeri başlangıçta 185 MW iken 10 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 3380 MW'a ulaşmıştır. Mod ③ için P_{hpf}^{SMR} değeri başlangıçta 126 MW iken 23 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 545 MW'a ulaşmıştır. Mod ④ için P_{hpf}^{SMR} değeri başlangıçta 146 MW iken 20 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 912 MW'a ulaşmıştır.



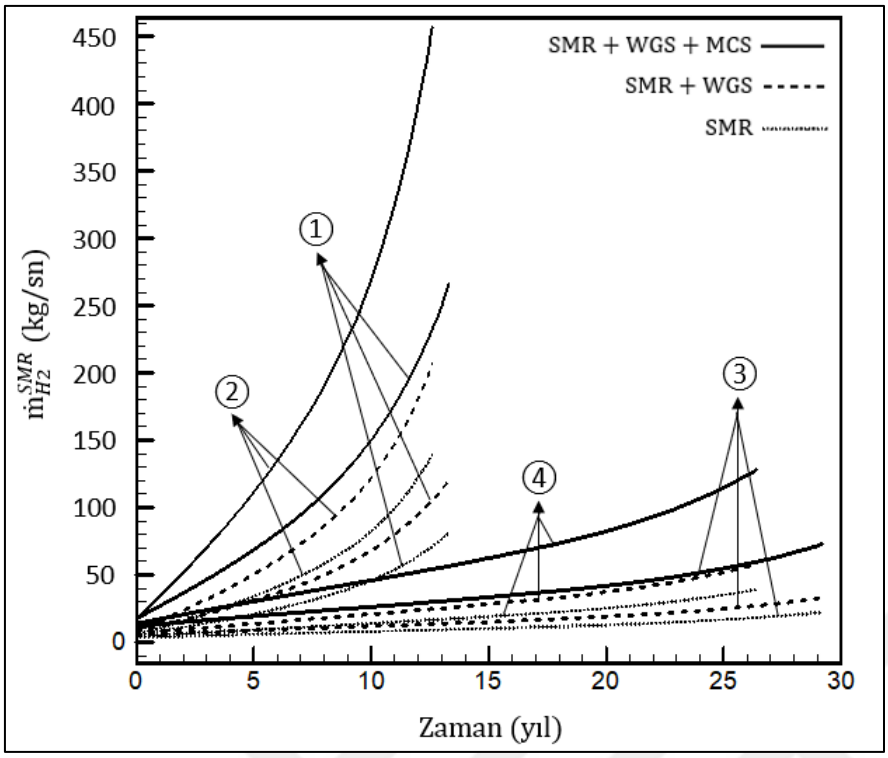
Şekil 6.7. SMR metodu için zamana bağlı termal güç değişimi

Dört mod için de yakıt oranlarına bağlı olarak hidrojen üretim tesisinin hidrojen üretimi için ihtiyaç duyduğu termal güç karşılaştırılırsa, yakıt oranı arttıkça termal güç değerinin arttığı gözlemlenmektedir; Mod ② > Mod ① ve Mod ④ > Mod ③.

Kullanılan soğutucuya göre modlar karşılaştırıldığında ise flibe soğutucu kullanılan modlarda, natural lityum kullanılan soğutucuya göre daha yüksek termal güç değerleri okunmaktadır. Bunun sebebi M enerji çoğaltım faktörünün flibe soğutucuda natural lityum

soğutucuya göre daha yüksek olması olarak açıklanabilir. Çünkü natural lityum soğutucuda flibe soğutucuya göre lityum atomları ile daha fazla nötron absorbe edilmektedir.

Şekil 6.8'de SMR metodu için Eşitlik (4.27)-(4.36)'da belirtilen reaksiyonlara göre hidrojen üretim miktarının zamana bağlı değişim grafiği verilmiştir. LIFE füzyon reaktörünün SMR metodu ile hidrojen üretim potansiyeli incelendiğinde en fazla hidrojen üretiminin üç reaksiyon (SMR+WGS+MCS) birden kullanıldığı durumda, en az hidrojen üretiminin ise bir reaksiyon (SMR) kullanıldığı durumda olduğu görülmüştür. Mod ① için reaktör çalışma süresi sonunda, üç reaksiyon (SMR+WGS+MCS) kullanıldığında ~200 kg/sn; iki reaksiyon (SMR+WGS) kullanıldığında ~91 kg/sn; bir reaksiyon (SMR) kullanıldığında ~61 kg/sn hidrojen üretimi olduğu gözlemlenmiştir. Mod ② için, üç reaksiyon kullanıldığında ~319 kg/sn; iki reaksiyon kullanıldığında ~144 kg/sn; bir reaksiyon kullanıldığında ~98 kg/sn hidrojen üretilmiştir. Mod ③ için, üç reaksiyon kullanıldığında ~51 kg/sn; iki reaksiyon kullanıldığında ~23 kg/sn; bir reaksiyon kullanıldığında ~16 kg/sn hidrojen üretilmiştir. Mod ④ incelendiğinde ise, üç reaksiyon kullanıldığında ~86 kg/sn; iki reaksiyon kullanıldığında ~39 kg/sn; bir reaksiyon kullanıldığında ise ~26 kg/sn hidrojen üretimi olduğu görülmüştür. Bütün modlar için üç reaksiyon birden (SMR+WGS+MCS) kullanıldığı durumlarda hidrojen üretiminin maksimum olduğu, minimum hidrojen üretiminin ise sadece SMR reaksiyonun kullanıldığı durumlarda olduğu gözlemlenmiştir. Hidrojen üretimi her mod ve her reaksiyon kullanımı için zamana bağlı olarak artmıştır.

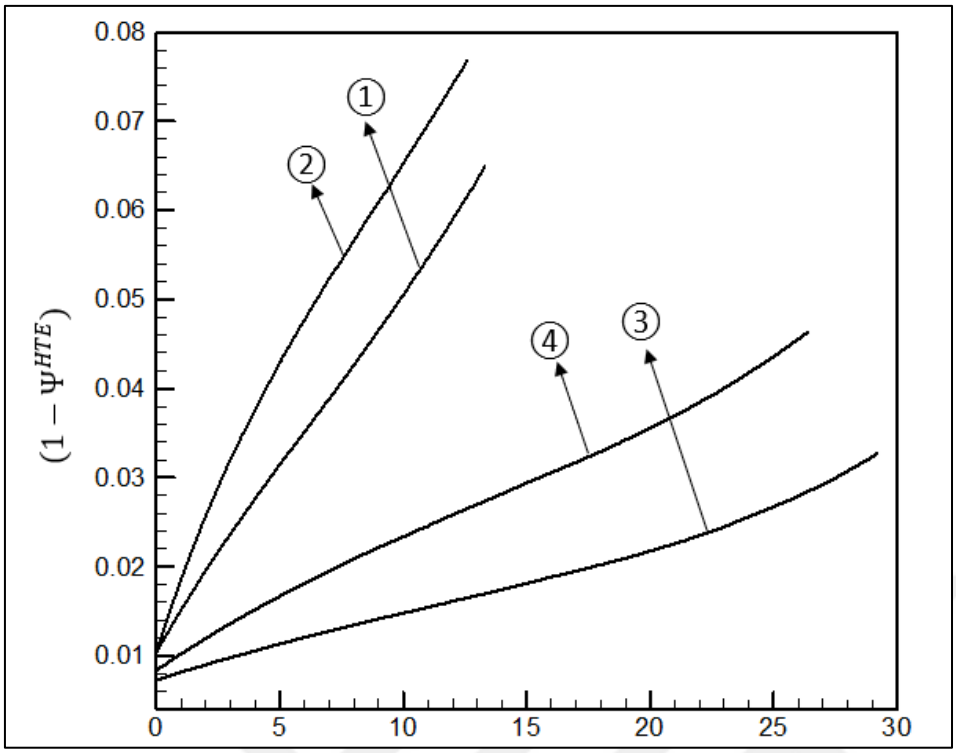


Şekil 6.8. SMR metodu için zamana bağlı hidrojen üretim miktarı değişimi

6.2.2. Yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ile hidrojen üretimi sonuçları

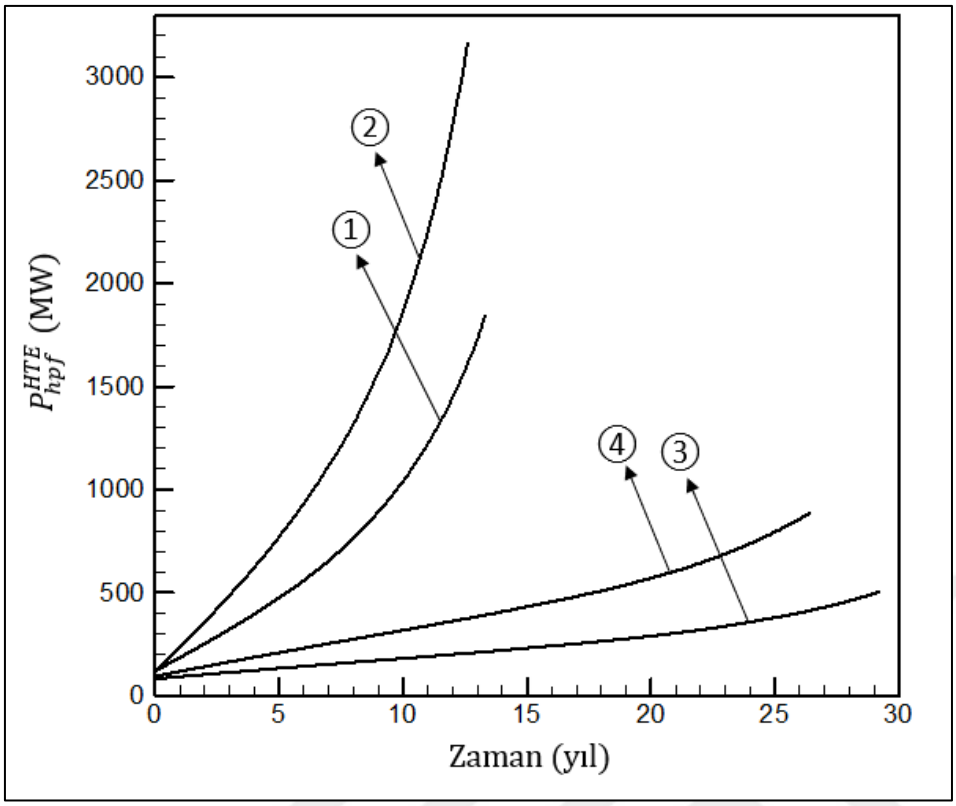
Bölüm 4.2.2'de LIFE füzyon reaktörü entegreli HTE ile hidrojen üretim tesisi incelenmiştir. Yüksek sıcaklıkta elektroliz metodu için $1 - \psi^{HTE}$ termal güç oranı değişim grafiği Şekil 6.9'da verilmiştir. Termal güç oranı $1 - \psi^{HTE}$, Mod ① için 11 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 0,05; Mod ② için 10 yıllık çalışma süresi sonunda 0,06; Mod ③ için 23 yıllık çalışma süresi sonunda 0,02 ve Mod ④ için 20 yıllık çalışma süresi sonunda 0,03 olarak hesaplanmıştır.

Modlar aynı yakıt oranları arasında kıyaslandığında, flibe soğutucu kullanılan modlarda (Mod ① ve ②) natural lityum kullanılan modlara (Mod ③ ve ④) göre termal güç oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı soğutucunun kullanıldığı modlar kendi arasında karşılaştırıldığında ise %5 olan ThC yakıt oranı %10'a yükseldiğinde hidrojen üretimi için gerekli termal güç oranının da arttığı gözlemlenmiştir.

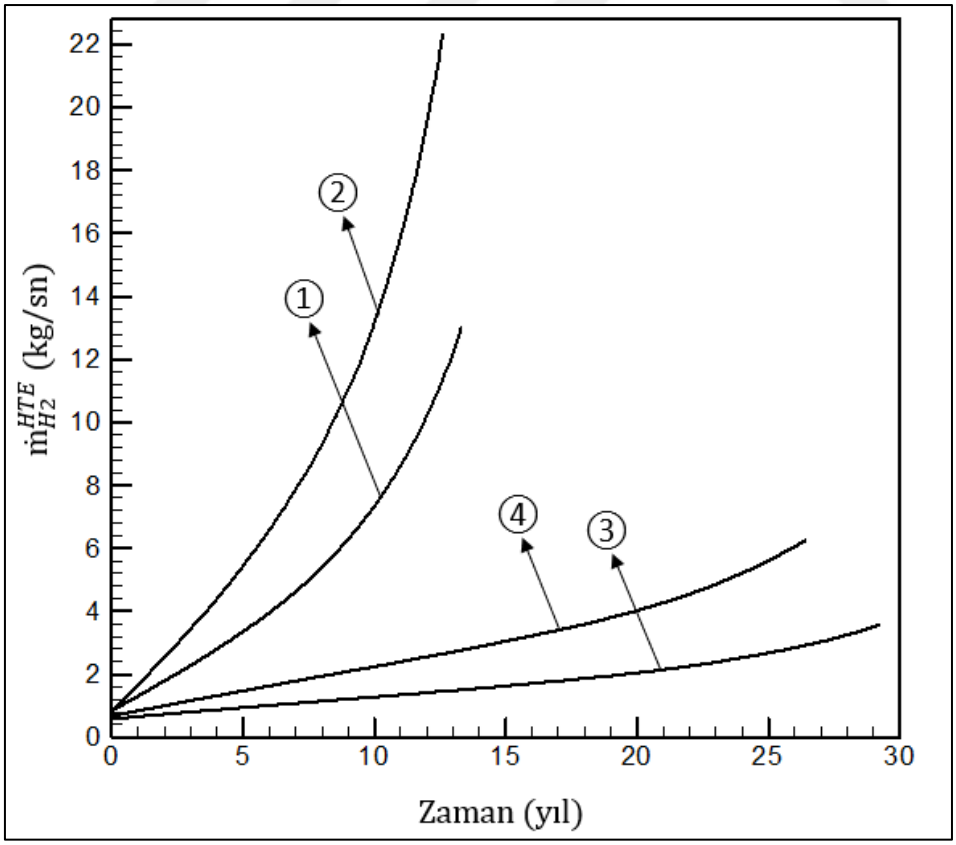


Şekil 6.9. HTE metodu için zamana bağlı termal güç oranının değişimi

Hidrojen üretimi için gerekli olan, LIFE füzyon reaktöründen sağlanan termal güç P_{hpf}^{HTE} değişimi HTE metodu için Şekil 6.10'da verilmiştir. Başlangıçta HTE metodu için gerekli termal güç Mod ①, ②, ③ ve ④ için sırasıyla 121 MW, 120 MW, 82 MW ve 95 MW iken TBR değeri 1.05'e ulaştığında termal güç P_{hpf}^{HTE} sırasıyla 1382 MW, 2204 MW, 355 MW ve 595 MW değerlerine ulaşmıştır. Termal güçteki bu artışın sebebi olarak M enerji çoğaltım faktöründeki artış gösterilebilir. LIFE füzyon reaktöründe enerji çoğaltım faktörü arttıkça termal güç oranı $1-\psi^{HTE}$, termal güç oranı arttıkça da hidrojen üretimi için gerekli termal güç artmaktadır. Modlar kendi içinde karşılaştırıldığında flibe soğutucuda natural lityuma göre daha fazla termal güç ihtiyacı olduğu gözlemlenmiştir. Yakıt oranı arttıkça da termal güç artmaktadır.



Şekil 6.10. HTE metodu için zamana bağlı termal güç değişimi

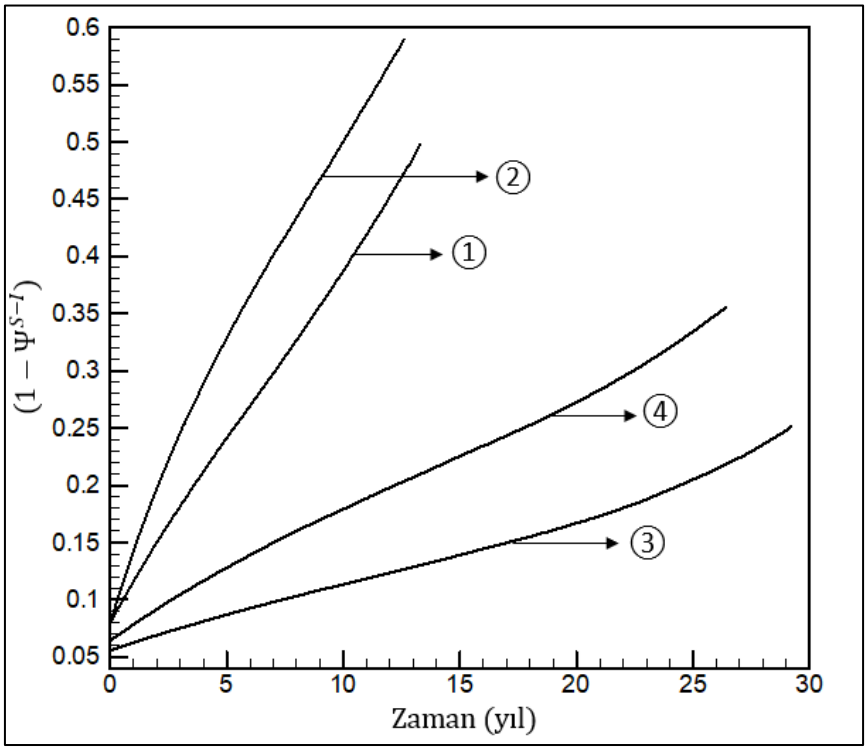


Şekil 6.11. HTE metodu için zamana bağlı hidrojen üretim miktarı değişimi

Hidrojen üretimi için gerek duyulan termal güç değeri arttıkça tesiste üretilen hidrojen miktarının da arttığı Şekil 6.11'de görülmektedir. Eşitlik (4.49) ile hesaplanan HTE metodu ile hidrojen üretim miktarı değerleri, Mod ①, ②, ③ ve ④ için reaktör çalışma süreleri sonunda sırasıyla ~ 10 kg/sn, 16 kg/sn, 3 kg/sn ve 4 kg/sn olarak hesaplanmıştır. Modlar kendi içinde incelendiğinde en fazla hidrojen üretimi %10 ThC yakıt oranı ile %90 flibe soğutuculu modda görülmüştür. En az hidrojen üretim miktarı ise %5 ThC yakıt ve %95 natural lityum soğutuculu modda gözlemlenmiştir. HTE metodu ile hidrojen üretimi sonuçları incelendiğinde modlar çoktan aza doğru Mod ② > Mod ① > Mod ④ > Mod ③ olarak sıralanmaktadır.

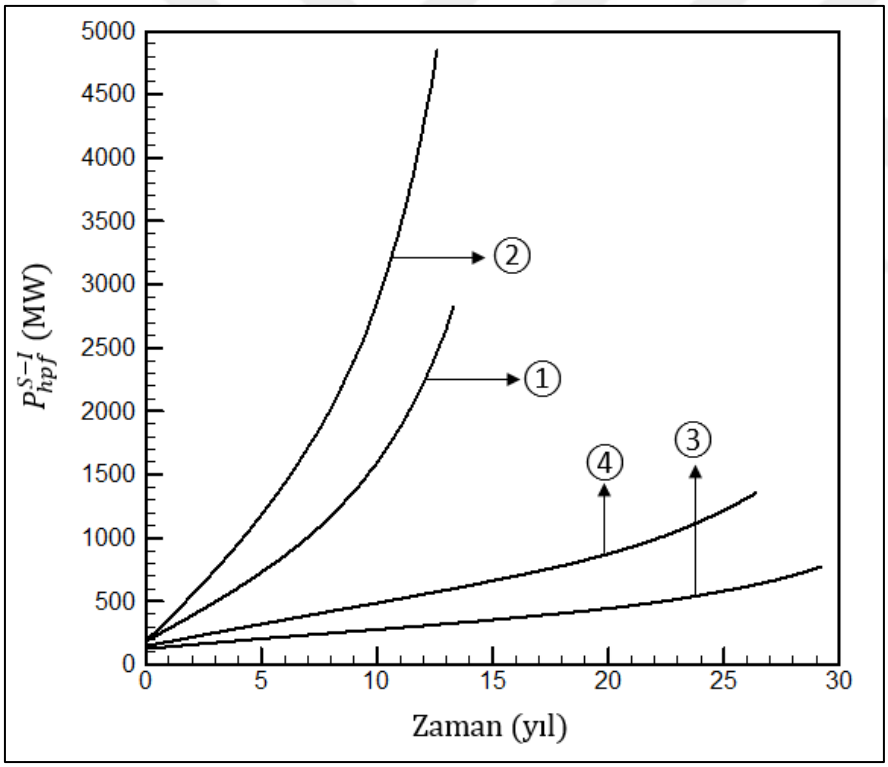
6.2.3. Kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi sonuçları

LIFE füzyon reaktörü entegreli S-I döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi tesisi Bölüm 4.2.3'te detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 6.12'de S-I döngülü termokimyasal yöntem için termal güç oranı $1 - \psi^{S-I}$ değişim grafiği verilmiştir. Termal güç oranı, 11 yıl çalışma süresi sonunda Mod ① için 0,44; 10 yıllık çalışma süresi sonunda Mod ② için 0,53; 23 yıllık çalışma süresi sonunda Mod ③ için 0,19 ve 20 yıllık çalışma süresi sonunda Mod ④ için 0,28 olarak okunmuştur.



Şekil 6.12. S-I metodu için zamana bağlı termal güç oranının değişimi

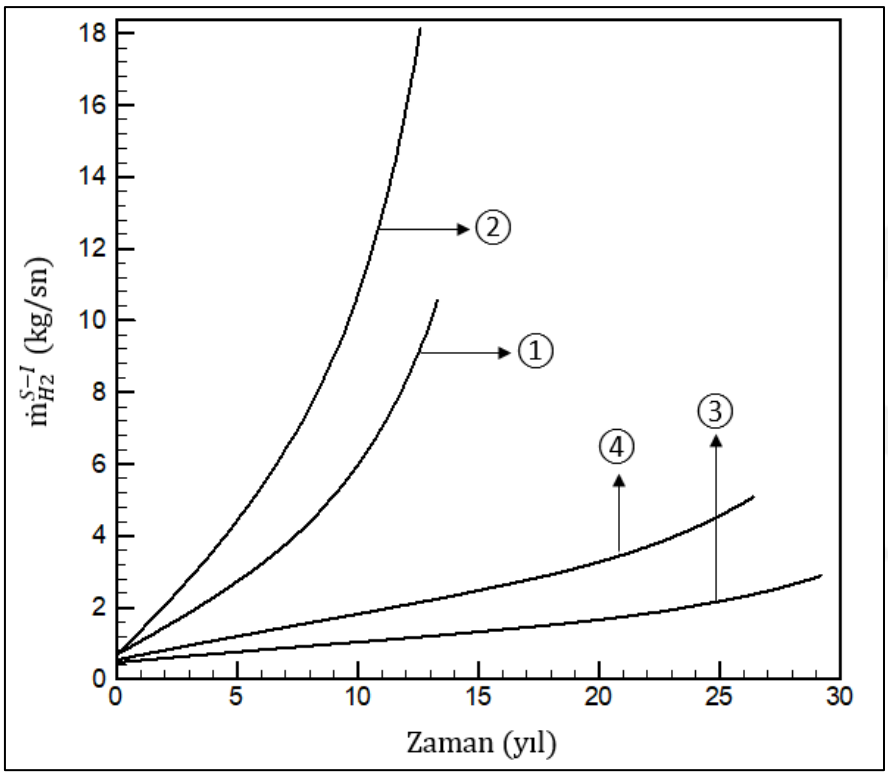
S-I metodu ile hidrojen üretimi için gerekli Eşitlik (4.53) ile hesaplanan termal güç değişim grafiği Şekil 6.13'te verilmiştir. Mod ① için başlangıçta 186 MW olan termal güç P_{hpf}^{S-I} değeri 11 yıl sonunda (TBR 1,05'e ulaştığında) 2120 MW değerine; Mod ② için başlangıçta 185 MW olan termal güç 10 yıl sonunda 3380 MW'a; Mod ③ için başlangıçta 126 MW iken 23 yıl sonunda 545 MW'a ve Mod ④ için başlangıçta 146 MW iken 20 yıl sonunda 912 MW'a ulaşmıştır. Enerji çoğaltım faktörü M zamana bağlı olarak arttıkça hidrojen üretimi için gerekli termal güçte M'e bağlı olarak artmıştır. Kullanılan soğutucular arasında bir karşılaştırma yapılırsa, flibe soğutucu kullanılan modlarda natural lityum soğutucu kullanılan modlara göre gerekli termal enerjinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı soğutucu kullanılan modlar kendi arasında karşılaştırıldığında nükleer yakıt oranı arttıkça gerekli termal gücün de arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.13. S-I metodu için zamana bağlı termal güç değişimi

Şekil 6.14'te S-I döngülü termokimyasal yöntem için zamana bağlı üretilen hidrojen miktarı değişimi verilmiştir. Hidrojen miktarının zamana bağlı arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi M enerji çoğaltım faktörünün artışına bağlanmaktadır. M arttıkça termal güç orantı sabiti $(1-\psi^{S-I})$, termal güç (P_{hpf}^{S-I}) ve dolayısıyla tesisin hidrojen üretim potansiyeli artmaktadır. Kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem kullanılarak

Mod ①, ②, ③ ve ④ için hidrojen üretim miktarları sırasıyla ~ 8 kg/sn, 13 kg/sn, 2 kg/sn, 3 kg/sn'dir. Modlar karşılaştırıldığında en fazla hidrojen üretiminin Mod ②'de en az üretimin ise Mod ③'te olduğu görülmektedir. İncelenen diğer hidrojen üretim metotlarında olduğu gibi S-I döngülü termokimyasal metotta da flibe soğutucu kullanılan modlarda natural lityum kullanılan modlara göre daha fazla hidrojen üretimi gerçekleşmiştir.



Şekil 6.14. S-I metodu için zamana bağlı hidrojen üretim miktarı değişimi

6.2.4. Hidrojen üretim metotlarının karşılaştırılması

Bu bölümde LIFE füzyon reaktörü entegreli hidrojen üretim tesisinin, buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal metot için hidrojen üretim potansiyelleri karşılaştırılacaktır. SMR, HTE ve S-I metotları ile hidrojen üretmek için gerekli olan termal güç ve termal güç oranı LIFE füzyon reaktörünün enerji çoğaltım faktörüne (M) bağlı olarak değişmektedir. M ise flibe ve natural lityum kullanılan ThC yakıtlı füzyon reaktörünün trityum ve fisyon oranına bağlı olarak değişmiştir. Reaktör çalışma süresi sonunda en yüksek M değeri, flibe soğutuculu %10 ThC yakıtlı Mod ②'de görülmüştür.

Çizelge 6.1. Hidrojen üretim metotlarının karşılaştırılması

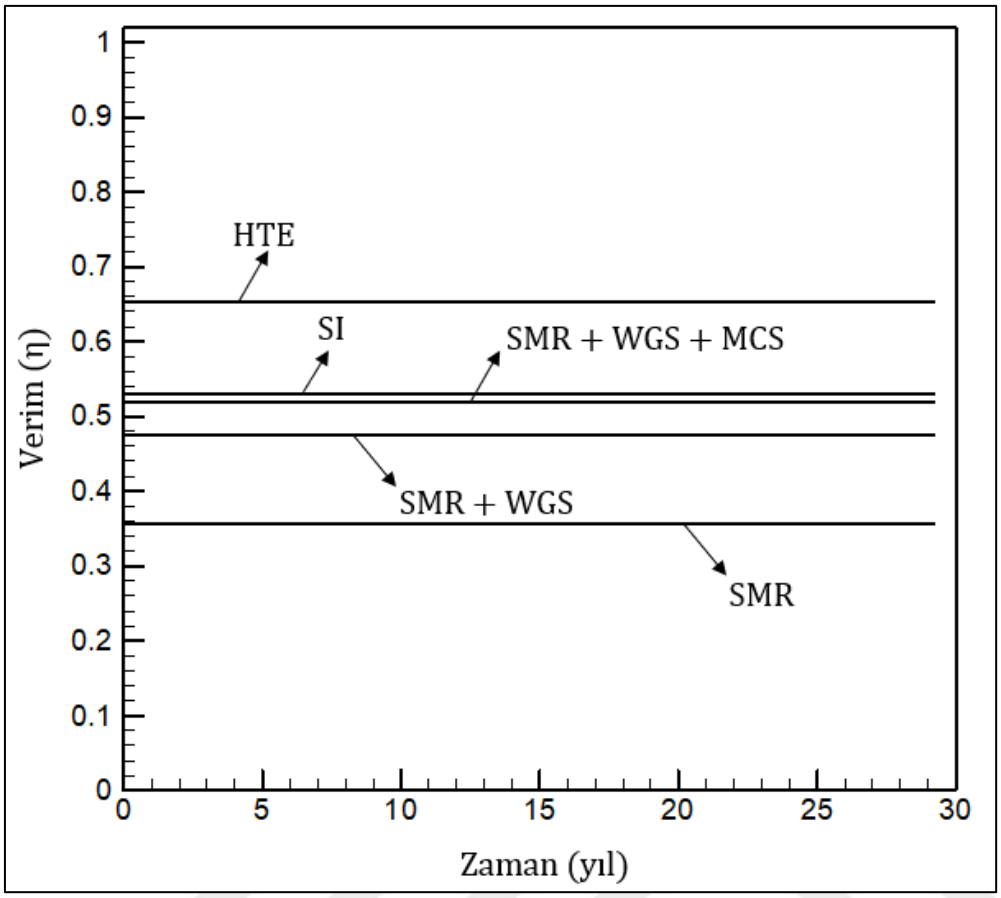
MOD	Çalışma Süresi (Yıl)	Hidrojen Üretim Metodu	Termal Güç Oranı 1-ψ	Termal Güç (MW)	Hidrojen Üretim Miktarı (kg/sn)
Mod ①	11	SMR+WGS+MCS			~ 200
		SMR+WGS	0,44	2120	~ 91
		SMR			~ 61
		HTE	0,05	1382	~ 10
		S-I	0,44	2120	~ 8
Mod ②	10	SMR+WGS+MCS			~ 319
		SMR+WGS	0,53	3380	~ 144
		SMR			~ 98
		HTE	0,06	2204	~ 16
		S-I	0,56	3380	~ 13
Mod ③	23	SMR+WGS+MCS			~ 51
		SMR+WGS	0,19	545	~ 23
		SMR			~ 16
		HTE	0,02	355	~ 3
		S-I	0,19	545	~ 2
Mod ④	20	SMR+WGS+MCS			~ 86
		SMR+WGS	0,28	912	~ 39
		SMR			~ 26
		HTE	0,03	595	~ 4
		S-I	0,28	912	~ 3

Çizelge 6.1'de kullanılan modlara göre hidrojen üretim metotları için termal güç, termal güç oranı ve hidrojen üretim miktarı değerleri verilmiştir. Mod ①'de SMR ve S-I metotları için P_{hpf}, 2120 MW olarak hesaplanırken, HTE metodu için 1382 MW olarak hesaplanmıştır. Mod ②'de SMR ve S-I için 3380 MW, HTE metodu için 2204 MW olarak hesaplanmıştır. Mod ③'te SMR ve S-I için 545 MW iken HTE için 355 MW hesaplanmıştır. Mod ④'te SMR ve S-I için 912 MW iken HTE için 595 MW hesaplanmıştır. Modlar kendi aralarında karşılaştırıldığında flibe soğutucu kullanılan modlarda, natural lityum kullanılan modlara göre P_{hpf} değerini daha yüksek olduğu

gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı soğutucu kullanılan modlar incelendiğinde, nükleer yakıt oranı arttıkça termal güç değerinde de artış görülmektedir. Hidrojen üretim metotları kendi içinde incelenirse, SMR ve S-I metotlarının HTE metoduna göre hidrojen üretimi için daha fazla termal güce ihtiyaç duyduğu açıktır.

Mod ① için metotlara göre hidrojen üretim miktarları ($\dot{m}_{H_2}$) SMR+WGS+MCS, SMR+WGS, SMR, HTE ve S-I için sırasıyla ~ 200, 91, 61, 10 ve 8 kg/sn olarak hesaplanmıştır. Mod ② kullanıldığında sırasıyla, ~ 319, 144, 98, 16 ve 13 kg/sn olarak hesaplanmıştır. Mod ③'te sırasıyla, ~ 51, 23, 16, 3 ve 2 kg/sn olarak; Mod ④'te ise sırasıyla ~ 86, 39, 26, 4 ve 3 kg/sn olarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.1 incelendiğinde görülecektir ki; her mod için en fazla hidrojen üretim miktarı SMR metodunda en az ise S-I metodunda görülmüştür. SMR metodu kendi içinde incelenirse en fazla hidrojen üretimi üç reaksiyonun (SMR+WGS+MCS) kullanıldığı durumda, en az üretimin ise bir reaksiyon (SMR) kullanıldığı durumda olduğu açıktır. Modlar kendi içinde karşılaştırılırsa, hidrojen üretim miktarları çoktan aza doğru Mod ②, Mod ①, Mod ④, Mod ③ şeklinde olmuştur. Termal güçte olduğu gibi hidrojen üretiminde de flibe soğutucu kullanılan modlarda natural lityum soğutucu kullanılan modlara göre daha fazla hidrojen üretimi gerçekleşmiştir. Aynı soğutucu kullanılan modlar karşılaştırıldığında ise nükleer yakıt (ThC) oranı arttıkça üretilen hidrojen miktarında artış olduğu görülmüştür.

Şekil 6.15'te tez kapsamında LIFE füzyon reaktörü ile entegreli olarak kullanılan hidrojen üretim metotlarının hidrojen üretim verim değerleri verilmiştir. Verim değerleri zamana bağlı olarak sabit bir yol almıştır. En yüksek verimin HTE metodunda olduğu grafikte görülmektedir. En düşük verim değeri ise bir reaksiyon kullanılan SMR metodundadır. SMR+WGS+MCS, SMR+WGS, SMR, HTE, S-I metotları için verim değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 0,52; 0,47; 0,35; 0,65 ve 0,53 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.15. Hidrojen üretim metotlarının verim değerleri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında LIFE füzyon reaktörü modifiye edilmiş ve MCNP nükleer kod yardımıyla zamana bağlı nötronik performansı incelenmiştir. Nötronik performans incelenirken reaktör için dört farklı yakıt-soğutucu modu kullanılmıştır. Nötronik analiz sonucu TBR, M, fisil yakıt üretimi ve yakıt yanma oranı değerleri tüm modlar için elde edilmiştir. Modifiye edilen LIFE füzyon reaktörüne hidrojen üretim tesisi entegre edilerek üç farklı hidrojen üretim metodu için M değerine bağlı hidrojen üretim performansı analiz edilmiştir. Hidrojen üretim analizleri, Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı aracılığıyla yapılmıştır. Tez kapsamında hidrojen üretim metodu olarak, buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem kullanılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- ✓ Mod ①, ②, ③ ve ④ için başlangıç trityum üretim oranı (TBR) değerleri sırasıyla 1,08; 1,03; 1,19 ve 1,15 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ LIFE füzyon reaktörü Mod ①, ②, ③ ve ④ için TBR 1,05 değerine ulaşana kadar sırasıyla 11, 10, 23 ve 20 yıl kendi başına çalışmaya devam etmiştir.
- ✓ Enerji çoğaltım faktörü (M) değerleri reaktör çalışma süreleri sonunda Mod ①, ②, ③ ve ④ için sırasıyla 3,17; 4,42; 1,62 ve 1,98 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ ^{233}U fisil yakıt üretimi, Mod ①, ②, ③ ve ④ için sırasıyla maksimum 0,0133 g/cm^3; 0,0225 g/cm^3; 0,0098 g/cm^3 ve 0,0177 g/cm^3 değerine ulaşmıştır.
- ✓ Yakıt yanma oranı (BU) Mod ① için 11 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 6,4 GWd/tM; Mod ② için 10 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 5,9 GWd/tM; Mod ③ için 23 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 22 GWd/tM; Mod ④ için 20 yıllık reaktör çalışma süresi sonunda 18 GWd/tM değerine ulaşmıştır.
- ✓ Reaktörde yakıt-soğutucu oranı olarak Mod ① kullanıldığında, SMR+WGS+MCS, SMR+WGS, SMR, HTE ve S-I yöntemlerinde sırasıyla yaklaşık 200 kg/sn, 91 kg/sn, 61 kg/sn, 10 kg/sn ve 8 kg/sn hidrojen üretilmiştir.
- ✓ Reaktörde yakıt-soğutucu oranı olarak Mod ② kullanıldığında, SMR+WGS+MCS, SMR+WGS, SMR, HTE ve S-I yöntemlerinde sırasıyla yaklaşık 319 kg/sn, 144 kg/sn, 98 kg/sn, 16 kg/sn ve 13 kg/sn hidrojen üretilmiştir.

- ✓ Reaktörde yakıt-soğutucu oranı olarak Mod ③ kullanıldığında, SMR+WGS+MCS, SMR+WGS, SMR, HTE ve S-I yöntemlerinde sırasıyla yaklaşık 51 kg/sn, 23 kg/sn, 16 kg/sn, 3 kg/sn ve 2 kg/sn hidrojen üretilmiştir.
- ✓ Reaktörde yakıt-soğutucu oranı olarak Mod ④ kullanıldığında, SMR+WGS+MCS, SMR+WGS, SMR, HTE ve S-I yöntemlerinde sırasıyla yaklaşık 86 kg/sn, 39 kg/sn, 26 kg/sn, 4 kg/sn ve 3 kg/sn hidrojen üretilmiştir.
- ✓ LIFE füzyon reaktöründe flibe soğutucu kullanıldığında natural lityum soğutucuya göre hidrojen üretim potansiyelinin daha iyi olduğu görülmüştür.
- ✓ Tez kapsamında kullanılan modlar kendi aralarında karılaştırıldığında bütün hidrojen üretim metotları için hidrojen üretim miktarı çoktan aza doğru Mod ②, Mod ①, Mod ④ ve Mod ③ şeklinde olmuştur.
- ✓ Modlar içinde nükleer yakıt (ThC) oranı arttıkça hidrojen üretim potansiyelinin arttığı gözlemlenmiştir.
- ✓ Hidrojen üretim yöntemleri kendi aralarında karşılaştırıldığında, en iyi performans az termal güç kullanarak fazla hidrojen üretimi ile SMR metodunda olduğu görülmüştür.
- ✓ Kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem hidrojen üretim yöntemleri arasında tüm modlar için, en fazla termal gücü kullanarak en az hidrojen üretimini gerçekleştirmiştir.
- ✓ SMR metodu kendi içindeki durumlarda en fazla hidrojen üretimini üç reaksiyon (SMR+WGS+MCS) birden kullanıldığı durumda, en az hidrojen üretimini ise bir reaksiyon (SMR) kullanıldığı durumda üretmiştir.
- ✓ En iyi hidrojen üretim potansiyeli Mod ② ile SMR+WGS+MCS yönteminde görülmüştür. En kötü hidrojen üretim potansiyeli ise Mod ③ ile S-I yönteminde görülmüştür.

Tez kapsamında modifiye edilen LIFE füzyon reaktörü nötronik analizi iyi performans sergilemiştir. LIFE füzyon reaktörü entegreli hidrojen üretim tesisinde üç farklı hidrojen üretim metodu ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında incelenen LIFE füzyon reaktör entegreli hidrojen üretim tesisinde daha fazla hidrojen üretimi olması için, farklı soğutucular kullanılabilir, farklı nükleer yakıtlar kullanılabilir, nükleer yakıt oranlarında değişiklik yapılabilir, daha farklı hidrojen üretim metotları kullanılabilir, LIFE füzyon reaktörünün geometrisinde yeni modifiyeler yapılabilir.

Sonuç olarak, modifiye edilen LIFE füzyon reaktörü her mod için iyi bir nötronik performans sergilemiş, uzun yıllar kendi kendini sürdürebilmiştir. Kullanılan nükleer yakıtın (ThC) nükleer hidrojen üretimi için iyi bir yakıt olduğu görülmüştür. Tez kapsamında incelenen tüm hidrojen üretim yöntemleri LIFE füzyon reaktörü ile iyi bir performans sergilemiş ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. LIFE füzyon reaktörü entegreli hidrojen üretim tesisi için hidrojen üretimini SMR metodunun üç reaksiyonlu (SMR+WGS+MCS) durumunun en iyi seçenek olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek verim değerine rağmen fazla termal güç kullanarak az hidrojen üreten yöntem S-I döngülü termokimyasal yöntem olmuştur. Tez kapsamında kullanılan dört mod ve üç farklı hidrojen üretim yöntemi ile birlikte, nükleer hidrojen üretiminde yüksek sıcaklık, nükleer yakıt seçimi, nükleer yakıtın kullanım oranı, soğutucu seçimi, hidrojen üretim metodu gibi parametrelerin önemi ortaya çıkmıştır.

KAYNAKÇA

1. Dawood, F., Anda, M. and Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869.

2. Veziroğlu, T. N. and Şahin, S. (2008). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management*, 49, 1820–1831.

3. Brown, L. C. Besenbruch, G.E., Funk, J.F. and Showalter, S.K. (2002). High efficiency generation of hydrogen fuels using thermochemical cycles and nuclear power. *General Atomics*, 2000, 1–18.

4. Orhan, M.F., Dinçer, İ. and Rosen, M.A. (2012). Investigation of an integrated hydrogen production system based on nuclear and renewable energy sources: a new approach for sustainable hydrogen production via copper–chlorine thermochemical cycles. *International Journal of Energy Research*, 36, 1388–1394.

5. Nikolaidis, P. and Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597–611.

6. El-Emam, R. S. and Dincer, İ. (2012). Nuclear-assisted hydrogen production. In R. Meyers (Editor). *Encyclopedia of sustainability science and technology*. Larkspur, California: Springer.

7. Yildiz, B. ve Kazimi, M. S. (2006). Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 77–92.

8. Konishi, S. (2005). Potential fusion market for hydrogen production under environmental constraints. *Fusion Science and Technology*, 47(4), 1205–1209.

9. Yan, X. L. and Hino, R. (Eds.). (2011). *Nuclear hydrogen production handbook*. Florida: CRC Press, 47-49.

10. Pinsky, R., Sabharwall, P., Hartvigsen, J. ve O'Brien, J. (2020). Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems. *Progress in Nuclear Energy*, 123, 103317.

11. Forsberg, C. W. (2003). Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(10), 1073–1081.

12. Ryland, D. K., Li, H. ve Sadhankar, R. R. (2007). Electrolytic hydrogen generation using CANDU nuclear reactors. *International Journal of Energy Research*, 31, 1142–1155.

13. Chikazawa, Y., Konomura, M., Uchida, S. ve Sato, H. (2005). A feasibility study of a steam methane reforming hydrogen production plant with a sodium-cooled fast reactor. *Nuclear Technology*, 152(3), 266–272.

14. Demir, N. (2013). Hydrogen production via steam-methane reforming in a SOMBRERO fusion breeder with ceramic fuel particles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(2), 853–860.

15. Acır, A. and Aktı, S. (2019). Investigation of hydrogen production potential of the LASER inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(45), 24867–24879.

16. Özişik, G., Demir, N., Übeyli, M. and Yapici, H. (2010). Hydrogen production via water splitting process in a molten-salt fusion breeder. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(14), 7357–7368.

17. Yamada, S., Sagara, A., Imagawa, S. and Motojima, O. (2009). Study on hydrogen production from steam electrolysis in LHD-type power reactor FFHR. *Fusion Engineerging and Design*, 84(7–11), 1997–2001.

18. Wu, X. and Onuki, K. (2005). Thermochemical water splitting for hydrogen production utilizing nuclear heat from an HTGR. *Tsinghua Science and Technoogy*, 10(2), 270–276.

19. Şahin, S., Khan, M. J. and Ahmed, R. (2011). Fissile fuel breeding and minor actinide transmutation in the life engine. *Fusion Engineerging and Design*, 86(2–3), 227–237.

20. Acır, A. (2013). Neutronic analysis of the laser inertial confinement fusion-fission energy (LIFE) engine using various thorium molten salts. *Journal of Fusion Energy*, 32(6), 634–641.

21. Kramer, K. J., Latkowski, J., Abbott, R. P., Boyd, J.K., Powers, J.J. and Seifried, J.E. (2008). Neutron transport and nuclear burnup analysis for the Laser Inertial Confinement Fusion-Fission Energy (LIFE) Engine. *Fusion Science and Technology*, 56(2), 625-631.

22. Kramer, K. J., Meier, W. R., Latkowski, J. F. ve Abbott, R. P. (2011). Parameter study of the LIFE engine nuclear design. *Energy Conversion and Management.*, 51(9), 1744–1750.

23. Moses, E. I., Rubia, T.D., Storm, E., Latkowski, J.F., Farmer, J.C., Abbott, R.P., Kramer, K.J., Peterson, P.F., Shaw, H.F. ve Lehman II, R.F. (2017). A sustainable nuclear fuel cycle based on laser ınertial fusion energy. *Fusion Science and Technology*, 56(2), 547–565.

24. İnternet: Archive Today. Why LIFE? Advanteges of LIFE Approach. URL: https://archive.is/20150404171900/https://life.llnl.gov/why_life/life_advantages.php#selection-177.0-195.98, Son Erişim Tarihi: 30.12.2020.

25. Abbott, R. P., Kramer, K. J., Latkowski, J. and Morris, K. (2008). Thermal and mechanical design aspects of the LIFE engine. *Fusion Science and Technology*, 56(2), 618-624.

26. Meier, W. R., Dunne, A. M., Kramer, K. J., Reyes, S. and Anklam, T. M. (2014). Fusion technology aspects of laser inertial fusion energy (LIFE). *Fusion Engineerging and Design*, 89(9–10), 2489–2492.

27. Şahin, S., Şahin, H. M. and Acır, A. (2012). Utilization of reactor grade plutonium as energy multiplier in the life engine. *Fusion Science and Technology*, 61(1), 216–221.

28. Latkowski, J. F., Abbott, R.P., Aceves, S., Anklam, T., Cook, A.W., DeMuth, J., Divol, L., El-Dasher, B., Farmer, J.C., Flowers, D., Fratoni1, M., Heltemes, T., Kane, J, Kramer, K.J., Kramer, R., Lafuente, A., Loosmore, G.A., Morris, K.R., Moses, G.A., Olson, B., Pantano, C., Reyes, S., Rhodes, M., Sawicki, R., Scott, H., Tabak, M. and Wilks, S. (2010). Chamber design for the Laser Inertial Fusion Energy (LIFE) Engine. *Fusion Science and Technology*, 60, 54–60.

29. Kramer, K. J., Latkowski, J. F., Abbott, R. P., Anklam, T. P., Dunne, A. M., El-Dasher, B. S., Flowers, D. L., Fluss, M. J., Lafuente, A., Loosmore, G. A., Morris, K. R., Moses, E. and Reyes, S. (2013). *Fusion technologies for Laser Inertial Fusion Energy (LIFE).* EPJ Web Conferences, 59, 1–4.

30. Moir, R. W., Shaw, H. F., Caro, A., Kaufman, L., Latkowski, J.F., Powers, J. and Turchi, E. A. (2009). Molten salt fuel version of Laser Inertial Fusion Fission Energy (LIFE). *Fusion Science and Technology*, 56, 632–640.

31. Talamo, A., Gudowski, W. ve Venneri, F. (2004). The burnup capabilities of the Deep Burn Modular Helium Reactor analyzed by the monte carlo continuous energy code MCB. *Annals of Nucear Energy*, 31(2), 173–196.

32. Şahin, S., Şarer, B., and Çelik, Y. (2014). Neutronic investigations of a laser fusion driven lithium cooled thorium breeder. *Progress of Nuclear Energy*, 73, 188–196.

33. Şahin, S., Şahin, H. M. and Acır, A. (2010). Utilization of TRISO fuel with reactor grade plutonium in CANDU reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 240(8), 2066–2074.

34. Labar, M.P., Shenoy, A.S., Simon, W.A. and Campbell, E.M. (2004). The gas turbine modular helium reactor. *Nuclear Energy*, 43(3), 165-175.

35. Taşkolu, H. ve Acır, A. (2013). Bir hibrit reaktörde TRISO kaplamalı candu nükleer yakıt atıklarının nötronik analizi. *Politeknik Dergisi,* 16(4), 129–133.

36. Acır, A., and Baysal, E. (2018). Monte Carlo calculations of the incineration of plutonium and minor actinides of laser fusion inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine. *Plasma Science and Technology*, 20, 1-7.

37. Morse, E. (2020). *Nuclear fusion*. California: Elsevier Inc, 1-9.

38. Kalamaras, C. M. ve Efstathiou, A. M. (2013). Hydrogen production technologies: Current state and future developments. *Conferans Papers in Energy*, 2013, 1–9.

39. Yalçin, S. (1989). A review of nuclear hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 14(8), 551–561.

40. Momirlan M. ve Veziroglu, T. N. (2002). Current status of hydrogen energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 141–179.

41. Schultz, K. R., Brown, L. C., Berenbruch, G. E. and Hamilton, C. J. (2003). *Large-scale production of hydrogen by nuclear energy for the hydrogen economy*. National Hydrogen Association Annual Conference, Washington.

42. Genç, G. (2010). Hydrogen production potential of APEX fusion transmuter fueled minor actinide fluoride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), 10190–10201.

43. Asal, Ş. and Acır, A. (Baskıda). Uranyum yakıtlı bir lazer sürücülü füzyon reaktöründe (LIFE) nötronik performansın hidrojen üretimine etkisi. *Journal of Polytechnic*.

44. Aktı, S. (2019). *Life füzyon reaktörünün hidrojen üretim potansiyelinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 43-52.

45. Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L. and Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139, 244–260.

46. Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F. and Servili, S. (2008). Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: A review. *Energy*, 33(4), 554–570.

47. Simpson A. P. and Lutz, A. E. (2007). Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 4811–4820.

48. Özışık, G. (2012). *Nükleer Hidrojen üretimi ve üretilen hidrojenin polimer elektrolit membranlı yakıt hücrelerinde uygulaması*. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 14-19.

49. Prigiobbe, V., Hänchen, M., Werner, M., Baciocchi, R. ve Mazzotti, M. (2009). Mineral carbonation process for CO_2 sequestration. *Energy Procedia*, 1(1), 4885–4890.

50. Lackner, K. S., Wendt, C. H., Butt, D. P., Joyce, E. L. ve Sharp, D. H. (1995). Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*, 20(11), 1153–1170.

51. Henderson, A. D. and Taylor A. (2005). *Nuclear Production of Hydrogen*, Third Information Exchange Meeting Oarai, Japan, 73-77.

52. Fujiwara, S., Kasai, S., Yamauchi, H., Yamada, K., Makino, S., Matsunaga, K., Yoshino, M., Kameda, T., Ogawa, T., Momma, S. and Hoashi, E. (2008). Hydrogen production by high temperature electrolysis with nuclear reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 50(2–6), 422–426.

53. Hori, M. (2001). Hydrogen production using nuclear energy. *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*, 43(10), 30.

54. Acır, A. ve Aktı, S. (2019). LIFE Füzyon Reaktöründe Yüksek Sicaklikta Elektroliz Yöntemi İle Hidrojen Üretimi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 1–8.

55. Kasai, S., Fujiwara, S., Yamada, K., Ogawa, T., Matsunaga, K., Yoshino, M., Hoashi, E. and Makino, S. (2009). Nuclear hydrogen production by high-temperature electrolysis. *Atomic Energy Society of Japan*, 8(2), 122–141.

56. Ying, Z., Zhang, Y., Zheng, X., Dou, B. and Cui, G. (2019). Simulation study on the microscopic characteristics of electrochemical Bunsen reaction in the sulfur – iodine cycle for renewable hydrogen production. *Applied Thermal Engineering*, 152(February), 437–444.

57. Lanchi, M., Ceroli, A., Liberatore, R., Marrelli, L. and Maschietti, M. (2009). S – I thermochemical cycle : A thermodynamic analysis of the HI – H_2O – I_2 system and design of the HI_x decomposition section. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(5), 2121–2132.

58. Mandal, S. and Jana, A. K. (2019). Simulating reactive distillation of HIx (HI e H 2 O e I 2) system in Sulphur-Iodine cycle for hydrogen production. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(2), 279-286.

59. Zhang, P., Chen, S. Z., Wang, L. J. and Xu, J. M. (2010). Overview of nuclear hydrogen production research through iodine sulfur process at INET. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(7), 2883–2887.

60. Chang, J., Kim, Y., Lee, K.Y., Lee, Y.W., Lee, W.J., Noh, J.M., Kim, M.H., Lim, H.S., Shin, Y.J., Bae, K.K. and Jung, K.D. (2007). A study of a nuclear hydrogen production demonstration plant. *Nuclear Engineering and Technology*, 39(2), 111–122.

61. Park, J., Ifaei, P., Ba-alawi, A. H., Safder, U. and Yoo, C. (baskıda). Hydrogen production through the sulfur e iodine cycle using a steam boiler heat source for risk and techno-socio-economic cost (RSTEC) reduction. *International Journal of Hydrogen Energy*.

62. Ying, Z., Wang, Y., Zheng, X., Geng, Z. ve Dou, B. (2019). Experimental study and development of an improved sulfur-iodine cycle integrated with HI electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1-13.

63. Oztürk, I. T., Hammache, A. and Bilgen, E. (1995). An improved process for H2SO4 decomposition step of the sulfur-iodine cycle. *Energy Conversion and Management.*, 36(1), 11–21.

64. Brown, L. C., Lentsch, R. D., Besenbruch, G. E. and Schultz, K. R. (2003). Alternative flowsheets for the sulfur-iodine thermochemical hydrogen cycle, *General Atomics*, 35(20), 1-19.

65. Hançerlioğulları, A. (2006). Monte carlo simülasyon metodu ve mcnp kod sistemi. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 14(2), 545–556.

66. Şeker, G. (2019). *Monte carlo tekniği kullanilarak bir füzyon-fisyon hibrit reaktöründe bazi akişkan malzeme optimizasyonlari için üç boyutlu nötronik hesaplamalar.* Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 32-34.

67. Brown, F., Kiedrowski, B., Bull, J., Goorley, T., Hughes, G. and James, M. (2011). Advances in the Development & Verification of MCNP5 & MCNP6. 836.

68. Brown, F. (2012). MCNP Monte Carlo & Parallel Computing. 836, 6–11.

69. Briesmeister, J. F. (2000). A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, LA-13709M, Los Alamos National Laboratory, MCNP.

70. İnternet: Los Alamos National Laboratory. MCNP 5. Abstract. URL: https://mcnp.lanl.gov/, Son Erişim Tarihi: 30.12.2020.

71. Şahin, S. and Al-Eshaikh, M. (1987). Fission power flattening in hybrid blankets using mixed fuel. *Fusion Science and Technology*, 12(3), 395–408.

72. Şahin, S. (1990). Power flattening in a catalyzed deuterium-deuterium fusion-driven hybrid blanket using nuclear waste actinides. *Nuclear Technology*, 92(1), 93–105.

73. Bakir, G., Genç, G. and Yapici, H. (2016). Time-dependent neutronic analysis of a power-flattened gas cooled accelerator driven system fuelled with thorium, uranium, plutonium, and curium dioxides TRISO particles. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2016, 1-11.

74. Şahin, S., Şahin, H. M. and Acır, A. (2012). LIFE hybrid reactor as reactor grade plutonium burner. *Energy Conversion and Management*, 63, 44–50.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ASAL, Şulenur

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 08.09.1996, Ankara

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 (555) 473 83 95

e-mail : sulenurasal@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Müh.	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Müh.	2018
Lise	Ankara Kurtuluş Anadolu Lisesi	2014

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Müh.	Araştırma Görevlisi
2018-2019	ÜNTES Isıtma Klima Soğutma San. Tic. A.Ş.	Dış Ticaret Satış Asistanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Asal, Ş. ve Acır, A. (Baskıda). Uranyum yakıtlı bir lazer sürücülü füzyon reaktöründe (LIFE) nötronik performansın hidrojen üretimine etkisi. *Politeknik Dergisi*.

2. Acır, A. ve Asal, Ş. (Baskıda). Investigation of the hydrogen production of a laser fusion driver thorium breeder using various coolants. *Journal of Hydrogen Energy*.

Hobiler

Film izlemek, fotoğraf çekmek.



GAZİ GELECEKTİR...