



**LİFE FÜZYON REAKTÖRÜNÜN HİDROJEN ÜRETİM
POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ**

Samet AKTI

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2019

Samet AKTI tarafından hazırlanan “LIFE FÜZYON REAKTÖRÜNÜN HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ” 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

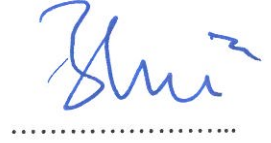
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Kurtuluş BORAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Özgür EROL

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Başkent Üniversitesi

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



Tez Savunma Tarihi: 04/02/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Samet AKTI

04/02/2019

LIFE FÜZYON REAKTÖRÜNÜN HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Samet AKTI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2019

ÖZET

Bu tez kapsamında hidrojen üretimi için gereken yüksek ısı ihtiyacının karşılanması için ele alınan lazer sürücülü LIFE füzyon reaktöründe buhar metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve S-I termokimyasal çevirim yöntemleri kullanılarak zamana bağlı hidrojen üretim potansiyeli ve reaktörün nötronik performansı incelenmiştir. Zamana bağlı nötronik hesaplamalarda nötron transport kodu MCNP kullanılmıştır. Modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün yakıtı minör nükleer atıklar ve soğutucu olarak ise FLiBe seçilmiştir. Nötronik hesaplamalarda trityum üretimi (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), yakıt yanma değeri (BU) ve fisil yakıt yoğunluk değişimi değerleri hesaplanmıştır. Nötronik hesaplamalardan elde edilen zamana bağlı M yardımı ile SMR, HTE ve S-I hidrojen üretim yöntemleri kullanılarak hidrojen üretimi için gerekli toplam güç ve bu toplam güce bağlı olarak değişen hidrojen üretim miktarı bu tez kapsamında geliştirilen Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı kodu ile hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda ele alınan modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün kendi kendine çalışmasını sürdürebilmesi için gerekli olan $TBR > 1,05$ koşulunu 10 yıl süre boyunca karşıladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca LIFE füzyon reaktörünün bu 10 yıl süresince her üç yöntemle hidrojen ürettiği ve en çok hidrojenin SMR yöntemi kullanılarak elde edildiği belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 92805
Anahtar Kelimeler : LIFE füzyon reaktör, hidrojen üretimi, buhar metan reformasyonu
yüksek sıcaklıkta elektroliz, S-I termokimyasal çevirim
Sayfa Adedi : 87
Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

INVESTIGATION OF HYDROGEN PRODUCTION POTENTIAL OF LIFE FUSSION REACTOR

(M. Sc. Thesis)

Samet AKTI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2019

ABSTRACT

In this thesis, time-dependent neutronic performance and hydrogen production potential were investigated by using vapor methane reforming (SMR), high temperature electrolysis (HTE) and S-I thermochemical conversion methods in the LIFE fusion reactor with laser driver which was taken to meet the high heat requirement for hydrogen production. Neutron transport code MCNP is used in time dependent neutronic calculations. The fuel of the modified LIFE fusion reactor with laser driver is selected as minor nuclear waste and the FLiBe as a coolant. Tritium production (TBR) and energy reproduction factor (M), fuel burnup value (BU) and fissile fuel density change values are calculated in neutronic calculations. The total power required for the production of hydrogen by SMR, HTE and S-I methods with the help of M from Neutron calculations is calculated by the Nuclear Fusion-Hydrogen Generation Calculator code developed in this thesis. Moreover, using same program, hydrogen production that depends on the total power and M, was investigated in the time-dependent LIFE fusion reactor. As a result of the calculations, it was determined that this reactor met $TBR > 1.05$ condition for 10 years and TBR and M values decreased with time. In addition, it was determined that LIFE fusion reactor produced hydrogen by all three methods during these 10 years and most hydrogen was obtained by using SMR method.

Science Code : 92805

Key Words : LIFE fusion reactor, hydrogen production, vapor methane reforming, high temperature electrolysis, S-I thermochemical cycle

Page Number : 87

Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin başlangıcından itibaren değerli bilgilerini ve tecrübelerini esirgemeyen, tez çalışmamın her aşamasında her türlü yardımı veren yüksek lisans tezimin danışmanı olan çok değerli hocam Prof. Dr. Adem ACIR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez jürimde olarak tezime olumlu katkılar sağladıkları için değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Kurtuluş BORAN'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özgür EROL'a teşekkür ederim.

Uydu platform mühendisi olarak çalıştığım "Türk Havacılık Uzay Sanayii" şirketinde Uydu Yer Sistemleri Müdürlüğü görevini icra eden Sayın Ergün TOPALOĞLU'na ve Yer Sistemleri Uydu Operasyon Şefi Sayın Oğuz Demir TÜZÜN'e verdiği desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı kodunun geliştirilmesinde yardımlarını benden esirgemeyen sevgili kayın biraderim Mert Kadir BÜLBÜN'e teşekkür ederim.

Hayatımdaki başarılarımda, yenilgilerimde, sevinçlerimde, hüznlerimde hep yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bugüne gelmemi onların sabrına borçlu olduğum sevgili annem Saadet AKTI'ya ve babam Şakir AKTI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca beni yönlendiren, başarılarımla gururlanan, başarısızlıklarımda beni motive eden ve yüksek lisans eğitimime başlamada bana öncülük eden sevgili ablam Dr. Nisa Nur AKTI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman olduğu gibi bu süreçte de desteği, ilgisi ve sabrı ile beni motive eden hayat ortağım sevgili eşim Burcu Bülbün AKTI'ya ve tez yazım süresince babam benimle oynamıyor diyerek mola vermeme sağlayan canım oğlum Emir Mete AKTI'ya sonsuz teşekkürler ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. NÜKLEER ENERJİ VE NÜKLEER REAKTÖR FİZİĞİ	5
2.1. Nükleer Enerji ve Temel Kavramlar	5
2.1.1. Nükleer enerji.....	5
2.1.2. Temel parçacıklar.....	5
2.1.3. Çekirdeğin iç yapısı	5
2.1.4. Kütle eksikliği ve nükleer bağlanma enerjisi	6
2.1.5. Atomik yoğunluk	7
2.2. Nükleer Reaksiyonlar.....	7
2.2.1. Fisyon reaksiyonu	8
2.2.2. Füzyon reaksiyonu	10
2.2.3. Nükleer reaksiyonların enerjisi	12
2.3. Nötron Etkileşimleri.....	13
2.4. Nötron Difüzyon ve Transport Teorileri.....	14
2.4.1. Nötron difüzyon teorisi	14
2.4.2. Nötron transport teorisi	16
3. LIFE FÜZYON REAKTÖRÜ	19

Sayfa

4. HİDROJEN VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ	25
4.1. Hidrojen	25
4.2. Hidrojenin Önemi	25
4.3. Hidrojen Üretim Yöntemleri	26
4.3.1. Termal prosesler	27
4.3.2. Elektroliz	32
4.3.3. Fotoliz	35
4.4. Hidrojen Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları	36
4.5. Hidrojenin Kullanım Alanları	36
5. NÜKLEER ENERJİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ	37
5.1. Buhar Metan Reformasyonu Yöntemi ile Hidrojen Üretimi	40
5.2. İyot – Kükürt (S-I) Döngülü Termokimyasal Yöntem ile Hidrojen Üretimi	44
5.3. Yüksek Sıcaklıklı Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi	47
6. HESAPLAMA METODU	51
6.1. MCNP Kodu	51
6.2. Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı Programının Yapısı	52
7. SAYISAL SONUÇLAR	57
7.1. Nötronik Performans	57
7.1.1. Tritiyum üretim oranı	57
7.1.2. Enerji çoğaltım faktörü	58
7.1.3. Yakıt yanma oranı	58
7.1.4. Fisil yakıt yoğunluk değişimi	60
7.2. Hidrojen Üretim Potansiyeli	61
7.2.1. SMR yöntemi ile hidrojen üretimi	61
7.2.2. S-I yöntemi ile hidrojen üretimi	65
7.2.3. HTE yöntemi ile hidrojen üretimi	67

	Sayfa
7.2.4. SMR, S-I ve HTE yöntemlerinin karşılaştırılması.....	69
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73
EKLER.....	79
EK-1. Hidrojen üretim tesislerinin güç akış diyagramları	80
EK-2. Akış şemaları.....	84
EK-3. Ekran görüntüleri.....	85
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Filyon sonucu elde edilen toplam enerji ve dağılımı	9
Çizelge 3.1. Modifiye LIFE reaktör geometrisi bileşenlerinin özellikleri.....	23
Çizelge 3.2. Modifiye LIFE reaktörün TRISO kaplamalı yakıtın bileşimi	24
Çizelge 3.3. Modifiye LIFE reaktörün güç parametreleri.....	24
Çizelge 4.1. Farklı kaynakların dünyadaki mevcut hidrojen üretimine katkısı	26
Çizelge 4. 2. SMR reaksiyonları	28
Çizelge 5.1. SMR, WGS ve MCS prosesleri için kütle akış oran denklemleri.....	42
Çizelge 5.2. SMR modları ve açıklamaları.....	43
Çizelge 6.1. SMR yöntemi için programa aktarılan parametreler ve açıklamaları.....	54
Çizelge 6.2. S-I yöntemi için programa aktarılan parametreler ve açıklamaları	55
Çizelge 6.3. HTE yöntemi için programa aktarılan parametreler ve açıklamaları	56
Çizelge 6.4. Hidrojen üretim hesabında kullanıcı girdisi olarak ele alınan parametreler.....	56

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Filyon reaksiyonu.....	8
Şekil 2.2. Zincir reaksiyonu	9
Şekil 2.3. D-T füzyon reaksiyonu şematik gösterimi	11
Şekil 3.1. LIFE reaktör yapısı	19
Şekil 3.2. Vakum tankının içinde LIFE füzyon odası ve santral	20
Şekil 3.3. LIFE reaktör füzyon odası tasarımı	21
Şekil 3.4. Modifiye edilmiş LIFE reaktör kesit görünümü.....	22
Şekil 3.5. Modifiye edilmiş LIFE reaktör geometrisi	22
Şekil 4.1. Hidrojen üretiminin genel şeması.....	26
Şekil 4.2. Hidrojen üretim teknolojilerinin akış şeması.....	27
Şekil 4.3. SMR prosesi şematik gösterim	28
Şekil 4.4. Biokütleden hidrojen üretimi genel proses gösterimi.....	31
Şekil 4.5. Kükürt iyodür (S - I) döngüsü ile hidrojen üretim akış şeması	32
Şekil 4.6. Bir alkalın elektroliz hücresinin çalışma prensibi	34
Şekil 5.1. Nükleer enerjiden hidrojen üretiminin potansiyel yolları.....	37
Şekil 5.2. Kükürt-İyot prosesine genel bakış	44
Şekil 5.3. Tahmini S-I proses hidrojen üretim verimliliği - tepe proses sıcaklığı	47
Şekil 5.4. HTE reaksiyonunun genel mekanizması	47
Şekil 5.5. HTE reaksiyonu için gereken enerjiyi	48
Şekil 6.1. Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı ana ekran.....	53
Şekil 7.1. Zamana bağılı trityum üretim oranı değişimi	57
Şekil 7.2. Zamana bağılı enerji çoğaltım oranı değişimi	58
Şekil 7.3. Zamana bağılı yanma oranı değişimi.....	59
Şekil 7.4. Fisil izotopların zamana bağılı yoğunluk değişimi.....	60
Şekil 7.5. SMR tesisinin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin zamanla değişimi	61

Şekil	Sayfa
Şekil 7.6. SMR sisteminin termal güç oranının zamana bağlı değişimi	62
Şekil 7.7. SMR sisteminde her mod için zamana bağlı hidrojen üretimi	62
Şekil 7.8. SMR sisteminde her mod için CH ₄ 'ün zamana bağlı değişimi	63
Şekil 7.9. SMR sisteminde her mod için CO ₂ 'nin zamana bağlı	64
Şekil 7.10. SMR sisteminde her mod için zamana bağlı verim değişimi	64
Şekil 7.11. S-I tesisinin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin zamanla değişimi.....	65
Şekil 7.12. S-I sisteminin termal güç oranının zamana bağlı değişimi.....	66
Şekil 7.13. S-I sisteminin zamana bağlı hidrojen üretimi.....	66
Şekil 7.14. HTE tesisinin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin zamana bağlı değişimi	67
Şekil 7.15. HTE sisteminin termal güç oranının zamana bağlı değişimi.....	68
Şekil 7.16. HTE sisteminin zamana bağlı hidrojen üretimi	68
Şekil 7.17. HTE hidrojen üretim yönteminin zamana bağlı verim değişimi	69
Şekil 7.18. SMR, S-I ve HTE hidrojen üretim oranlarının karşılaştırılması.....	70
Şekil 7.19. SMR, S-I ve HTE yöntemlerinin verimlerinin karşılaştırılması.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
\$	Dolar
kg	Kilogram
m	Kütle
A	Çekirdeğin atomik kütlesi
N	Çekirdeğin nötron sayısı
Z	Çekirdeğin kütle numarası
r	Çekirdeğin yarıçapı
p	Proton
n	Nötron
d	Döteryum
γ	Gama Işınımı
eV	Elektron volt
KeV	Kilo elektron volt
MeV	Mega elektron volt
Δ	Kütle Eksikliği
M_p	Proton Kütlesi
M_n	Nötron Kütlesi
M_A	Çekirdeğin Kütlesi
B	Bağlanma Enerjisi
S_n	Nötron Ayırma Enerjisi
S_p	Proton Ayırma Enerjisi
c	Işık Hızı
N	Atomik yoğunluk
p	Malzeme yoğunluğu
N_a	Avagadro sayısı
k_∞	Sonsuz ortam çoğaltma faktörü
k_{eff}	Etkin çoğaltma faktörü

Simgeler**Açıklamalar**

η	Termal nötron başına fisyon nötronlarının sayısı
ε	Hızlı fisyon faktörü
p	Rezonans kaçma olasılığı
f	Termal kullanım faktörü
l_t	Termal nötron kaçığı
l_f	Hızlı nötron kaçığı
T_P	Gelen parçacık kinetik enerji
T_R	Kalan çekirdek kinetik enerji
T_X	Yayılan parçacık kinetik enerji
m_T	Hedef parçacık kütle enerjisi
m_R	Kalan çekirdek kütle enerjisi
m_X	Yayılan parçacık kütle enerjisi
Q	Reaksiyon Q değeri
σ_s	Saçılma olasılığı tesir kesiti
σ_a	Yutulma olasılığı tesir kesiti
σ_{es}	Elastik saçılma olasılığı tesir kesiti
σ_{ins}	Elastik olmayan saçılma olasılığı tesir kesiti
σ_c	Yutulma olasılığı tesir kesiti
σ_f	Fisyon olasılığı tesir kesiti
σ_t	Toplam tesir kesiti
J	Nötron akım yoğunluğu
D	Difüzyon parametresi
V	Hacim
t	Zaman
$\emptyset$	Akı
Σ	Makroskopik tesit kesiti
E	Enerji
θ	Nötron üretim oranı
L	Nötron kaçak oranı
S	Nötron kaynağı
MW	Mega watt

Simgeler**Açıklamalar****MJ**

Mega joule

Hz

Frekans

°C

Santigrat derece

 α

Alfa parçacığı

g

Gram

kg

Kilogram

cm

Santimetre

kWh

Kilowatt saat

V

Voltaj

I

Akım

 P_{th}

Termal güç

 P_i

Füzyon güç girdisi

 P_α

Alfa parçacıklarından gelen füzyon gücü

 P_n

Nötron parçacıklarından gelen füzyon gücü

M

Enerji çoğaltım faktörü

 x_n

Nötron parçacıklarının enerji oranı

 x_α

Alfa parçacıklarının enerji oranı

Q

Füzyon enerji kazancı

 ψ

Elektriksel güç oranı

(1- ψ)

Termal güç oranı

 P_e

Brüt elektrik gücü

 P_h

Termal güç

 η_{ihx}

Ara ısıtıcı verimini

 η_{gt}

Gaz türbinin termal verimi

 x_{eh}

Elektriksel güç payı

 P_{eh}

Elektrik gücü

 x_{net}

Net elektriksel güç payı

 P_{net}

Net elektrik gücü

 x_{cir}

Sirkülasyon elektriksel güç payı

 P_{cir}

Sirkülasyon gücü

 P_{ds}

Sürücü sistemi gücü

Simgeler**Açıklamalar**

η_{ds}	Sürücü sistemi verimi
P_{aux}	Yardımcı sistem gücü
x_{aux}	Yardımcı sistem güç oranı
P_{isf}	İzotop ayrıştırma sistemi gücü
x_{isf}	İzotop ayrıştırma sistemi güç oranı
ε	Elektriksel güç orantı sabiti
P_{hpf}	Hidrojen üretim sisteminin gücü
μ	SMR hidrojen üretim yöntemi molar kütle
ν	WGS hidrojen üretim yöntemi molar kütle
ξ	MCS hidrojen üretim yöntemi molar kütle
$\dot{m}$	Kütle akış oranı
Q_{tot}	Toplam reaksiyon enerjisi
$\mathcal{R}$	1 kg hidrojen üretmek için gerekli olan enerji
ΔH	Entalpi değişimi
ΔG	Gibbs serbest enerji
ΔS	Entropi değişimi
$T\Delta S$	Termal enerji girdisi
HHV	Yüksek ısıtma değeri
C_f	Dönüşüm faktörü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AUX	Yardımcı
BU	Yanma oranı
CANDU	Kanada Döteryum-Uranyum reaktörü
DS	Sürücü sistemi
D-T	Döteryum-Trityum
ENDF-V	Hesaplanan Nükleer Veri Dosyası
GT	Gaz türbini
HPF	Hidrojen üretim tesisi
HTE	Yüksek sıcaklıklı elektroliz
HTGR	Yüksek sıcaklıkta gaz soğutmalı reaktör

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ICF	Ataletsel sınırlandırma füzyonu
IHX	Ara ısı değıştirici
İSP	İzotop ayrıştırma tesisi
LIFE	Lazer Atalet Füzyon Enerji
MCNP	Monte Carlo N-Parçacık Kodu
MCS	Mineral CO ₂ tutumu
MEA	Membran elektrot kompleksi
PEC	Foto elektrokimyasal
PEM	Polimer elektrolit membran
POX	Kısmi oksidasyon
PWR	Basınçlı Su Reaktörü
S-I	Sülfür İyot termokimyasal döngü
SMR	Buhar-Metan Reformasyonu
SPE	Katı polimer elektrolit
SR	Metan Reformasyonu
TBR	Trityum üretim oranını
TRISO	Tri yapısal izotropik yakıt parçacıkları
WGS	Su-Gaz Kayması

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ve az gelişmiş ülkelerin gelişmeye başlaması ile birlikte enerji ihtiyacı da artmaktadır. Bu enerji ihtiyacı dünyada bulunan çeşitli enerji kaynaklarından karşılanır. Kömür, doğal gaz, ham petrol, nükleer enerji ve çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılan en temel enerji kaynaklarıdır. Kömür, ham petrol ve doğal gaz fosil yakıtlar olarak sınıflandırılır. Fosil yakıtlar küresel iklim değişikliğine sebep olan ve sera gazlarından birisi olarak kabul edilen karbondioksit emisyonuna neden olmaktadır [1-2].

Dünyanın ihtiyaç duyduğu enerjinin %86'sının fosil yakıt kaynaklarından tedarik edildiği göz önüne alındığında, fosil yakıtların nükleer enerji gibi daha az kirliliğe neden olan ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilen birincil enerji kaynakları ile değiştirilmesi gerekmektedir. Doğada serbest halde bulunmayan ve bu nedenle birincil enerji kaynakları arasında yer almayan hidrojen, enerji potansiyelinin yüksek olmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının arasında yer alır [3].

Hidrojen, elektrik enerjisi ile birlikte enerji kaynaklarından bağımsız ve kalıcı bir enerji sistemi oluşturarak dünyanın enerji ihtiyacını karşılayabilir. Elektrikten üretilip ve elektrığe dönüştürülmesinde yüksek verime sahip olması, üretimi için dünyada bol bulunan suyun kullanılması, yenilenebilir bir yakıt olması, gaz halinde-sıvı halinde ve metal hibrit formunda saklanabilmesi, taşınabilirliği ve çevre dostu olması gibi özellikleri hidrojeni ideal bir enerji taşıyıcısı yapar. Ayrıca, toplumun ve sanayinin mevcut ve gelecekteki enerji gereksinimlerini karşılamak için alternatif kaynakların kullanımını kolaylaştırmaya yardımcı olabilmektedir [4-5].

Hidrojen, nükleer, doğal gaz ve kömür, biokütle ve diğer yenilenebilir kaynaklar dâhil olmak üzere çeşitli kaynaklar kullanılarak üretilmektedir. Çevre dostu seçeneklerin başında yenilenebilir enerji kaynakları yer almaktadır. Fakat yenilenebilir enerji kaynaklarından sürdürülebilir büyük ölçekli hidrojen üretimi gerçekleştirmek önemli bir zorluktur. Fosil yakıtların da sera gazı ürettiği göz önüne alındığında, hidrojen üretimi için nükleer enerjinin kullanılması ön plana çıkmaktadır. Nükleer enerjiden hidrojen üretimi Karbondioksit yaymamasından ve büyük ölçekli hidrojen üretimine katkı sağlamasından dolayı avantaja sahiptir [6-7].

Nükleer enerjiden hidrojen üretiminde karbon bazlı ve karbonsuz hidrojen üretim yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerin ihtiyaç duyduğu enerji, radyasyon enerjisinden, fisyon / füzyon reaktörlerinden elde edilen ısı ve/veya nükleer enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisinden karşılanır. Radyasyondan elde edilen enerji suyun radyolizi yönteminde kullanılırken, nükleer santrallerden elde edilen elektrik ve ısı enerjisi çeşitli hidrojen üretim yöntemlerinde kullanılmaktadır. Hidrojen üretim yöntemlerinden yüksek sıcaklıkta elektroliz ve hibrit termokimyasal döngüler nükleer enerjiden elde edilen hem elektrik enerjisini hem de ısı enerjisini kullanırken, geleneksel su elektrolizi yöntemi elektrik enerjisini, termokimyasal döngüler, doğal gazın reformasyonu ve biokütlenin veya kömürün gazlaştırılması yöntemlerinde ise ısı enerjisi kullanılmaktadır. Doğal gazın reformasyonu ve biokütlenin veya kömürün gazlaştırılması yöntemleri ile karbon bazlı hidrojen üretilirken, diğer yöntemler ile karbonsuz hidrojen üretilmektedir [8].

Son yıllarda nükleer enerjiden hidrojen üretimi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Forsberg [9], alternatif hidrojen üretim metotlarının nükleer enerjiye uyumlu olması için ihtiyaç duyulan gereksinimleri incelemiştir. Bu gereksinimlerin, sabit bir yüksek sıcaklık tedariki, hidrojen üretim prosesleri ile düşük basınçlı bir ara birim sağlanması, nükleer santralin hidrojen üretim tesisinden izole edilmesi ve hidrojen ürününün trityum kontaminasyonundan kaçınılması olarak belirlemiştir ve bu gereksinimleri karşılayacak reaktör tipinin yüksek sıcaklık reaktörü olarak seçmiştir.

Yıldız ve Kazimi [10], termal enerjiden hidrojen enerjisine dönüşüm verimliliğini incelemek üzere, birbirine bağlı çeşitli nükleer ve hidrojen üretim teknolojilerini incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda, daha yüksek sıcaklıkların daha verimli termokimyasal ve elektrokimyasal hidrojen üreten reaksiyonlar sağlayacağını vurgulamışlardır. Ayrıca, reaktör soğutma suyu sıcaklığını 700 °C veya daha üzerinde üretebilen nükleer teknolojilerin hidrojen üretim için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Brown ve ark. [11], enerji kaynağı olarak ileri nükleer güç santrallerinden elde edilen yüksek sıcaklıktaki ısıyı kullanarak sudan hidrojen üretilmesini sağlayan termokimyasal süreçlerden biri olan Sülfür-İyot döngüsünün verimliliğini ve hidrojen üretim maliyetini analiz etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, Sülfür-İyot (S-I) döngüsünü, hidrojeni verimli ve ekonomik bir şekilde üretme olasılığı en yüksek olan termokimyasal döngü olarak seçmişlerdir.

Wu ve Onuki de. [12], yüksek sıcaklıkta gaz soğutmalı reaktörden (HTGR) elde edilen ısıyı kullanarak S-I döngüsünün kapalı döngü operasyonunu, süreç iyileştirmelerini ve yapı malzemelerini değerlendirmişlerdir. S-I döngüsünden hidrojen üretimini laboratuvar ortamında denemiş ve sonuçlardan S-I süreci için kapalı döngü işleminin uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Sürecin iyileştirilmesi adına S-I döngüsünün verimini incelemişler ve verimi arttırmak adına HI bileşiğinin ayrıştırılması ve damıtılması için sürecin verimli bir şema içermesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. S-I döngüsündeki en önemli ortamı sülfürik asidin kaynatıldığı ortam olarak belirtmişlerdir.

Ryland ve ark. [13], katı oksit elektrolitik hücreleri kullanarak, elektrik ve termal enerji kaynaklı yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemini CANDU reaktöründe incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda suyun elektrolizi için yüksek sıcaklıklar kullanıldığında yaklaşık 850 °C, elektrik enerjisine olan bağımlılığın azaldığını ve çevrimin termal verimliliğinin arttığını belirtmişlerdir.

Chikazawa ve ark. [14], hidrojen üretim yöntemlerinden biri olan Buhar Metan Reformasyonu için Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör kullanarak oluşturulan hidrojen üretim tesisini tasarlamışlar ve ekonomik potansiyelini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda hidrojen üretim maliyetinin yaklaşık 1,67 \$/kg olduğunu, inşaat maliyetinin daha verimli hidrojen ayrıştırma membranları kullanılarak düşürülebileceğini ve buhar metan reformasyon yönteminin yüksek ekonomik potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Demir [15], SOMBRERO füzyon reaktöründe buhar-metan reformasyonu yönetimi kullanarak hidrojen üretimini incelemiştir. Çalışmasının sonucu olarak ele aldığı reaktörün hidrojen üretimine elverişli olduğunu ve sisteme ısı geri kazanım sisteminin entegrasyonu ile üretilen hidrojen miktarının artacağını belirtmiştir.

Görüldüğü üzere, nükleer enerjiden hidrojen üretimi için literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar genel olarak farklı nükleer enerji kaynağından yararlanarak hidrojen üretiminin incelenmesi, üretilen hidrojenin maliyetinin analizi, nükleer enerji tabanlı hidrojen üretimi için sistem geliştirilmesi ve geliştirilen sistemde uygulanan hidrojen üretim yöntemlerinin belirlenmesi, bu yöntemlerin nükleer enerjiye uyumluluğu ve verimliliği, nükleer enerjiden üretilen hidrojenin maliyet analizi üzerine gerçekleşmiştir. Bu tez çalışmasının amacı, Lazer Atalet Füzyon Enerji (LIFE) Reaktörünün zamana bağlı

nötronik performansını incelemek ve reaktörden elde edilen ısı ve elektrik enerjisinden yararlanarak Buhar-Metan Reformasyonu (SMR) , Yüksek Sıcaklıkta Elektrolizi (HTE) ve Sülfür İyot Çevirimi (S-I) yöntemleri ile zamana bağlı hidrojen üretim potansiyelini analiz etmek ve analiz sonucunda üretilen hidrojen miktarına ve verimine bağlı olarak LIFE reaktörlerinde kullanılabilecek en iyi hidrojen üretim yönteminin belirlenmesidir. Böylece bu çalışma literatüre, enerji kaynağı olarak nükleer füzyon enerjisini kullanan SMR, HTE ve S-I metotları için daha gerçekçi bir yaklaşım sunarak, zamana bağlı hidrojen üretim analiz yöntemini katmış olacaktır.



2. NÜKLEER ENERJİ VE NÜKLEER REAKTÖR FİZİĞİ

2.1. Nükleer Enerji ve Temel Kavramlar

2.1.1. Nükleer enerji

Bir atomun çekirdeğindeki protonları ve nötronları bağlayan enerjiye nükleer enerji denir. Başka bir ifade ile bir atomun çekirdeğindeki protonları ve nötronları birbirine bağlayan enerjidir [16].

2.1.2. Temel parçacıklar

Elektronlar, $m_e = 9,10954 \times 10^{-31}$ kg'lık bir durağan kütleye sahip olmakla beraber $1,60219 \times 10^{-19}$ coulombs yük taşırlar. Pozitif yüklü ve negatif yüklü olmak üzere iki tip elektron vardır. Negatif yüklü elektronlara negatronlar denilirken, pozitif yüklü elektronlara pozitron denmektedir. Protonlar, $m_p = 1,67265 \times 10^{-31}$ kg'lık bir durağan kütleye sahiptir. Yük olarak ise elektron yüküne eşit büyüklükte pozitif yük taşırlar. Nükleer enerjide kullanılmayan negatif yüklü protonlar da bulunmaktadır. Nötronlar elektriksel olarak yüksüzdür ve kütlesi $m_n = 1,67495 \times 10^{-27}$ kg'dır. Kararlı bir yapıya sahip olmayan nötron sadece çekirdeğe bağlandığı zaman kararlı hale gelir. Nötronun protona bozunumu, negatif bir elektron ve bir anti-nötrino emisyonuyla, ortalama olarak yaklaşık 12 dakika sürer. Kinetik enerjisine göre üç farklı tipte nötron mevcuttur, bunlar sırasıyla termal, yavaş ve hızlı nötronlardır. Elektromanyetik dalgalarla ilişkili parçacıklara foton denir. Bu parçacığın durağan kütlesi ve yükü yoktur. Vakum ortamında ışık hızı ile hareket etmektedir. Belirli çekirdeklerin bozunumu sonucu ortaya çıkan kütsüz ve yüksüz parçacıklara nötrino denir. En az altı tür nötrino vardır, bunlardan sadece ikisi (elektron nötrinolar ve elektron anti-nötrino olarak adlandırılır) nükleer enerjide önemlidir [17].

2.1.3. Çekirdeğin iç yapısı

Hidrojen çekirdeği hariç olmak üzere, tüm çekirdekler protonlardan ve nötronlardan oluşur. Çekirdekdeki proton sayısı, atom numarası Z 'ye eşittir. Periyodik sistemde, tüm elementler atom numaralarıyla sıralanır. $N = A - Z$ çekirdeğin nötron sayısıdır. Burada A elementi nükleon sayısıdır, başka bir ifade ile sayısıdır.

Belirli bir elementin tüm atomlarının çekirdeğindeki proton sayıları aynı fakat nötron sayıları farklı ise bu çekirdeklere izotop denir. İzotopların doğal bolluğu farklılık gösterebilmektedir. Bazı izotoplar doğal olarak meydana gelmez, ancak nükleer reaksiyonlar yoluyla laboratuvarlarda üretilebilirler [18].

2.1.4. Kütle eksikliği ve nükleer bağlanma enerjisi

Düşük enerjili bir nötron ve proton döteron oluşturmak için birleştiğinde hidrojen (H_2) çekirdeği ve 2,23 MeV'luk gama-ışını ortaya çıkar ve döteron yaklaşık 1,3 keV'lik bir enerji ile hafifçe geri teper. Söz konusu tepkime Eş. 2.1'de gösterilmiştir [17].



Bu tepkime nötr atomlar açısından $^1H + n \rightarrow ^2H + \gamma$ olarak ifade edilir.

Gama ışını tepkime bölgesinden kaçar ve döteronu geride bırakır. Döteronun kütlesi nötronun ve protonun toplam kütesinden küçüktür. Fakat enerji ve kütle korunumu yasası gereği eşit olmak zorundadır. Burada belirtilmiş olan döteron ve onun bileşenli nükleonları arasındaki kütle farkı döteronun kütle eksikliği olarak adlandırılır. Benzer şekilde, tüm çekirdeklerin kütleleri, içinde yer alan nötronların ve protonların kütlelerinin toplamından biraz daha küçüktür. İşte bu fark kütle eksikliği olarak adlandırılır. Rasgele bir çekirdek için kütle eksikliği Eş. 2.2'de gösterildiği gibi formülize edilir [17].

$$\Delta = ZM_p + NM_n - M_A \quad (2.2)$$

M_A çekirdeğin kütesini ifade etmektedir ve Eş. 2.2 şu şekilde yazılabilir,

$$\Delta = Z(M_p + m_e) + NM_n - (M_A + Zm_e) \quad (2.3)$$

$M_p + m_e$ ifadesi doğal hidrojen atomunun kütesine eşit iken, $M_A + Zm_e$ atomun kütesine eşittir. Yukarıdaki denklem tekrar düzenlenir ise kütle eksikliğin formülü Eş. 2.4'de verilmiştir.

$$\Delta = ZM(^1H) + NM_N - M \quad (2.4)$$

Δ enerji birimlerinde ifade edildiğinde, çekirdeğin kendi nükleonlarına ayrılması için gerekli olan enerjiye eşit olur. Bu enerji, çekirdeğin bir arada tutulduğu enerjiyi temsil ettiğinden, sistemin bağlanma enerjisi olarak adlandırılır [17].

Bağlanma Enerjisi “B” ile gösterilir ve Eş.2.5’de verilen formülden hesaplanır;

$$B = [Zm(^1\text{H}) + NM_n - m(^A\text{X})]c^2 \quad (2.5)$$

Genellikle diğer yararlı ve ilginç özellikler, nötron ve proton ayırma enerjileridir. Nötron ayırma enerjisi, S_n , çekirdekten bir nötron çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı iken çekirdekten bir proton çıkarmak için gerekli olan enerji miktarına proton ayırma enerjisi S_p denir [19].

2.1.5. Atomik yoğunluk

Atomik yoğunluk (N), bir maddenin birim hacminde bulunan atom sayısıdır ve Eş. 2.6 ile hesaplanmaktadır.

$$N = p N_a / A \quad (2.6)$$

Eş. 2.6’da, p malzemenin yoğunluğunu, N_a Avagadro Sayısını ve A ise izotopun atom kütlelerini temsil etmektedir. Bir maddenin birim hacminde bulunan molekül sayısına molekül yoğunluğu denir ve molekül ağırlama (M_A) bağlı olarak Eş. 2.7 ile hesaplanmaktadır [17].

$$N = p N_a / M_A \quad (2.7)$$

2.2. Nükleer Reaksiyonlar

X Çekirdeği ve Y temel parçacığı arasındaki etkileşim süreçlerine veya çekirdek yapısının değiştiği iki çekirdek arasındaki etkileşim süreçlerine nükleer reaksiyon denir [18].

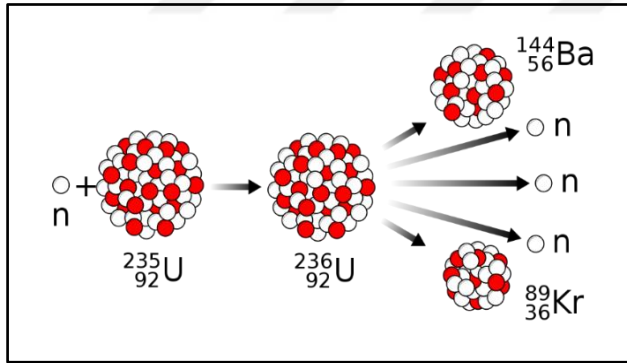
Tipik bir nükleer reaksiyon Eş. 2.8’de verildiği gibi yazılır,



Burada a hızlandırılmış parçacık, X hedef çekirdek ve Y ve b ise reaksiyon ürünleridir. Genellikle, Y hedefte duran ve doğrudan gözlenemeyen ağır ürün iken, b ise gözlemlenebilen ve ölçülen hafif parçacıktır. Genellikle, Y hedefte duran ve doğrudan gözlenemeyen ağır bir ürün olacaktır, b ise tespit edilebilen ve ölçülebilen hafif bir parçacıktır. Genel olarak a ve b nükleon veya hafif parçacık olabilirken, bazen de b gama ışını olabilmektedir. b ürününün gama ışını olması durumunda reaksiyona “radyasyon yakalama” denir [19]. Nükleer reaksiyonların en önemlileri fisyon ve füzyon reaksiyonlarıdır [18].

2.2.1. Fisyon reaksiyonu

Tabiatta doğal olarak bulunan ve en ağır element olarak kabul edilen uranyumun nötron bombardımanına uğraması sonucunda kararsız hale gelerek iki farklı çekirdeğe dönüştüğünü fark eden Meitner ve Frisch, 1939 yılında bu olaya fisyon adını vermişlerdir. Fisyon, ağır ve kararsız yapıya sahip radyoaktif çekirdeklerin bir nötron yakalaması sonucu iki hafif çekirdek ve enerji oluşturmasıdır [19]. Şekil 2.1’de fisyon reaksiyonu gösterilmiştir [20].



Şekil 2.1. Fisyon reaksiyonu [20]

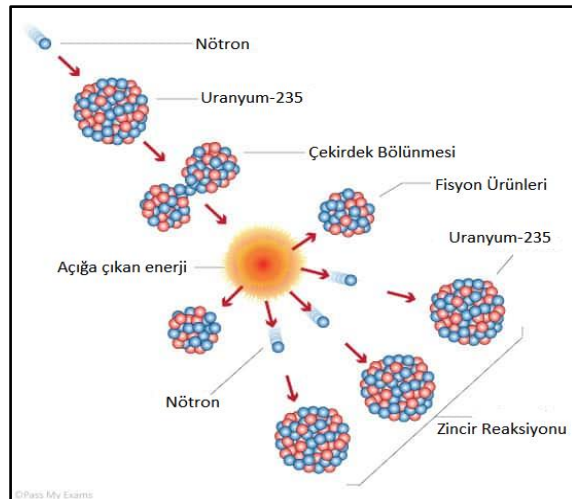
Nötronla etkileşime girip fisyon reaksiyonu gerçekleştirme yeteneğine sahip olan yakıtlara fisil yakıtlar denmektedir. Fisil yakıtlar doğal fisil yakıtlar ve yapay fisil yakıtlar olarak iki ayrılmıştır. Doğal fisil yakıtlar doğada bulunabilirken, yapay fisil yakıtlar doğada bulunmayıp diğer izotopların nötronla etkileşimi sonucu açığa çıkarlar. Fisil yakıtların haricinde nötronlarla etkileşime girip fisyon reaksiyonu gerçekleştirmeyen fakat fisil yakıtlara dönüşen fertil yakıt olarak adlandırılan izotoplar mevcuttur. Ağır çekirdeklerden ^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U ve ^{241}Pu fisil yakıt olarak kullanılabilirken, ^{232}Th , ^{234}U , ^{238}U ve ^{240}Pu fertil yakıt olarak kullanılabilir [19].

Fisyon reaksiyonu sonucunda ortaya fisyon ürünleri, gama ışıması ve nötronlar açığa çıkmaktadır. Fisyon ürünlerinden biri büyük kütle numarasına diğer ise küçük kütle numarasına sahiptir ve kütle numaraları 95 ila 139 arasındadır. Fisyon sonucunda ortaya çıkan nötronlar ani nötronlar ve gecikmiş nötronlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Nötron açısından zengin olan fisyon ürünleri 10^{-16} saniye içinde nötron yayınlarlar, bu yayınladıkları nötronlara ani nötron adı verilirken, bir süre sonra beta bozunumu yaparak gecikmiş nötron adı verilen nötronları yayınlarlar. Gecikmiş nötronlar nükleer reaktörler açısından kritik öneme sahiptirler, çünkü bu nötronlar aracılığı ile reaktörlerin kontrolü sağlanmaktadır [19]. Çizelge 2.1’de fisyon reaksiyonu sonucunda elde edilen enerjinin dağılımı verilmiştir [21].

Çizelge 2.1. Fisyon sonucu elde edilen toplam enerji ve dağılımı [21]

Fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi	165 ± 5 MeV
Hızlı gama ışıması	7 ± 1 MeV
Nötronun kinetik enerjisi	$5 \pm 0,5$ MeV
Beta parçacığı	7 ± 1 MeV
Alfa parçacığı	7 ± 1 MeV
Nötronlar	10 MeV
Toplam	$200 \text{ MeV} \pm 6 \text{ MeV}$

Fisyon reaksiyonlarının en önemli özelliğinden birisi de zincirleme olarak fisyon reaksiyonlarını gerçekleştirmesidir. Zincir reaksiyonu, fisyon sonucu serbest kalan nötronların ortamda bulunan diğer fisyon çekirdeklerine çarparak fisyon reaksiyonunun devamlılığını sağlayan ve bu şekilde kendi kendini devam ettirebilen fisyon reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır [19]. Şekil 2.2’de zincir reaksiyonu gösterilmiştir [22].



Şekil 2.2. Zincir reaksiyonu [22]

Zincir reaksiyonları nükleer reaktörleri temsil eden çoğaltma faktörünün belirlenmesinde çok büyük bir role sahiptir. Çünkü çoğaltma faktörü zincir reaksiyonunda bir fisyon sonucu oluşan nötron sayısının bir önceki fisyon reaksiyonunda yutulan nötron sayısını temsil etmektedir. Çoğaltma faktörü sonsuz ortam çoğaltma faktörü (k_{∞}) ve etkin çoğaltma faktörü (k_{eff}) olarak ikiye ayrılır. Reaktörün kritikliğini belirlemede çoğaltma faktörleri kullanılmaktadır. Eğer sonsuz ortam çoğaltma faktörü (k_{∞}) 1'den küçük ise reaktör kritik altı durumunda, 1'e eşit ise kritik durumda ve 1'den büyük ise süper kritik durumdadır. Alt kritik durumda, nötron sayısı zamanla azalmaktadır ve zincir reaksiyonu kendi kendini sürdürememektedir. Kritik durumda, nötron popülasyonunda bir değişim olmaz ve zincir reaksiyonu kendi kendini sürdürebilmektedir. Süper kritik durumda, zincir reaksiyonu kendi kendini idame ettirmek için gerekenden daha fazla nötron üretir.

Sonsuz ortam çoğaltma faktörü dört çarpan formülü olarak adlandırılan ve Eş 2.9'da verilmiş olan formül kullanılarak hesaplanır [23].

$$k_{\infty} = \eta \varepsilon p f \quad (2.9)$$

Eş 2.9'da verilen η parametresi fisyon yapan termal nötron başına ortalama fisyon nötronlarının sayısını temsil ederken, ε parametresi hızlı fisyon faktörünü, p parametresi rezonans kaçma olasılığını ve f parametresi de termal kullanım faktörünü temsil etmektedir. Gerçek reaktör sistemlerinde termal nötron kaçağı (l_t) ve hızlı nötron kaçağı (l_f) bulunduğundan dolayı dört çarpan formülü yerine altı çarpan formülü kullanılmaktadır ve bu formül Eş 2.10'da verilmiştir [23].

$$k = \eta \varepsilon p f (1 - l_t)(1 - l_f) \quad (2.10)$$

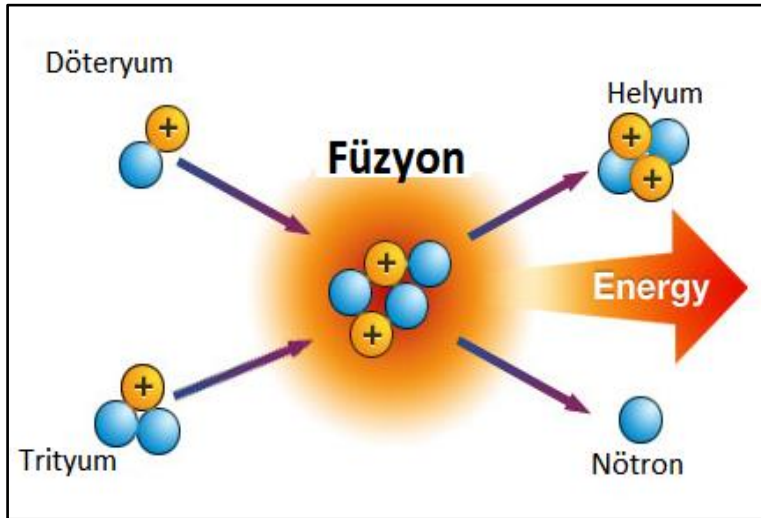
2.2.2. Füzyon reaksiyonu

Nükleer reaksiyonların sonucu olarak, iki hafif çekirdeğin birleşerek daha ağır ve kararlı izotop oluşturmaya füzyon denir. Güneşin ve yıldızların sahip olduğu büyük gücün temelinde füzyon bulunmaktadır. Protonların döteryum içine füzyonu, ekzotermik reaksiyon zincirinin ilk adımı olarak gösterilir. Füzyon reaksiyonu sonucunda oluşan ürünün kütlesi füzyona giren çekirdeklerin kütesinden küçüktür, bu kütle farkından dolayı enerji açığa çıkmaktadır [24].

Farklı türlerde füzyon reaksiyonu bulunmaktadır. Ayrıca, nükleer füzyon için laboratuvar koşullarında mümkün olan reaksiyonlar araştırılmıştır ve aşağıdaki reaksiyonlar yoluyla döteronların ve tritonların füzyonun gerçekleşebileceği bulunmuştur [25].



Hidrojenin izotoplarından olan döteryum (^2H) ve trityum (^3H) arasındaki reaksiyon en düşük enerjide en büyük tesir kesitine sahiptir ve bu durum döteryum ve trityum reaksiyonlarını enerji üreten sistemler için en umut verici aday yapar. Döteryum-Trityum (D-T) reaksiyonu Eş. 2.15’de verilmiş olup [24], şekil 2.3’de ise şematik olarak gösterilmiştir [26].



Şekil 2.3. D-T füzyon reaksiyonu şematik gösterimi [26]

Enerji üreten bir sistemde kullanılacak olana füzyon yakıtının bol bulunması önemlidir. Bu konuda döteryum füzyon yakıtı olarak kullanımda ön plana çıkmaktadır, çünkü Döteryum, su içinde $3,3 \times 10^{-5}$ 'lik bir ağırlık oranı ile doğal olarak meydana gelmektedir. Okyanusların suyu göz önüne alındığında, statik enerji aralığı çok büyüktür. Trityum ise kararsız bir

radioaktif izotoptur ve Eş. 2.16'da verildiği üzere 12,3 yıllık bir yarı ömür ile ^3He iyonuna bozunur [24].



Trityum kararsız bir karaktere sahip olduğundan doğada önemli miktarda bulunmaz. Fakat lityumun nötronla etkileşime girerek meydana gelen nükleer reaksiyonlar tarafından üretilmektedir [24]. Lityum 'un nötron birleşip sonucunda trityum oluşturduğu nükleer reaksiyonlar Eş. 2.17 ve 2.18'de verilmiştir. Bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan T_6 ve T_7 'nin toplamı trityum üretim oranını (TBR) vermektedir [24].



2.2.3. Nükleer reaksiyonların enerjisi

Nükleer reaksiyonlarda enerji dengesi önemlidir. Nükleer reaksiyonlar için enerji denge denklemi Eş. 2.19 ile hesaplanır.

$$m_P c^2 + T_P + m_T c^2 = m_R c^2 + T_R + m_X c^2 + T_X \quad (2.19)$$

Eş. 2.19'da, m_P : gelen parçacığın kütle enerjisi, m_T : hedef parçacığın kütle enerjisi, m_R : kalan çekirdeğin kütle enerjisi, m_X : yayılan parçacığın kütle enerjisi, T_P : Gelen parçacığın kinetik enerjisi, T_R : Kalan çekirdeğin kinetik enerjisi ve T_X : Yayılan parçacığın kinetik enerjisi ifade etmektedir.

Reaksiyonun Q değeri, oluşan ürünlerin arasındaki kütle enerjilerinin farkıdır ve Eş. 2.20 ile hesaplanır.

$$Q = [m_P + m_T - (m_X + m_R)] c^2 = T_X + T_R - T_P \quad (2.20)$$

Eğer reaksiyonun Q değeri pozitif ise reaksiyon ısıveren olarak tanımlanırken, Q değeri negatif ise reaksiyon ısıalan olarak tanımlanır. Bir nükleer reaksiyonun ortaya çıkması için gerekli ama yeterli olmayan koşul $Q + T_P > 0$ 'dır. Ayrıca hem ürünlerin hem de reaktiflerin

kütleleri biliniyorsa, Q değeri kütle eksikliği kullanılarak Eş. 2.21 ile hesaplanabilir:

$$Q = \Delta (fırlatılan) + \Delta (hedef) + \sum \Delta (ürünler) \quad (2.21)$$

Q değeri nükleer reaksiyonda reaktiflerin ve ürünlerin kütle veya kinetik enerjilerinin ölçülmesiyle elde edilebilir [27].

2.3. Nötron Etkileşimleri

Nötronlar elektriksel olarak yüksüz başka bir ifade ile nötr oldukları için atomların elektronlarından veya çekirdeğin pozitif yükünden etkilenmezler. Dolayısıyla nötronlar atomun elektron bulutundan hiç bir şekilde etkilenmeden direkt olarak çekirdeğe ulaşırlar. Kısacası nötronlar atom ile değil çekirdek ile etkileşirler [17].

Nötronlar farklı enerjilere sahip olduklarından dolayı çekirdek ile saçılma ve yutulma olmak üzere farklı reaksiyona girerler. Çarpışma reaksiyonları elastik saçılma ve elastik olmayan saçılma olarak ikiye ayrılmıştır. Elastik saçılmada nötron sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmını çekirdeğe aktarır çekirdeğin yapısını değiştirmeden geliş doğrultusundan saparak başka doğrultuda hareket ederken, elastik olmayan saçılmada ise nötron çekirdeğin içine girer, çekirdeğin yapısını değiştirir, sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmını çekirdeğe aktarır, çekirdeği farklı açı ve kinetik enerji ile terk eder ve çekirdek ise aldığı fazla enerjiyi gama ışını yayarak bırakır. Nötronun çekirdek içinde yutulması ise ısınımlı yakalama $X(n,\gamma)Y$, nötron yayınlaması $X(n,2n)Y$, yüklü tanecik yayınlaması $X(n,\alpha)Y$ ve fisyon $X(n,2,4n)Y$ olmak üzere dört yolla gerçekleşir [28].

Nötron çekirdek ile bazen etkileşime girer bazen de girmez, dolayısıyla nötronun çekirdek ile etkileşimi ihtimaller üzerine kurulmuştur. Bu ihtimaller ise tesir kesiti olarak adlandırılan olasılıklara bağlıdır. Tesir kesiti, parçacığının hedef çekirdek ile reaksiyona girme olasılığı olarak tanımlanır. Makroskobik ve mikroskobik olmak üzere iki tür tesir kesiti bulunmaktadır. Nötronun çekirdekler ile hangi tür etkileşime gireceği mikroskobik tesir kesitleri ile belirlenir. Toplam tesir kesiti σ_t olarak gösterilir ve Eş. 2.22'den hesaplanır.

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a = \sigma_{es} + \sigma_{ins} + \sigma_c + \sigma_f \quad (2.22)$$

Eş. 2.22’de verilen σ_s saçılma olasılığını, σ_a ise yutulma olasılığını temsil etmektedir. Ayrıca saçılma olasılığı elastik saçılma olasılığı σ_{es} ve elastik olmayan saçılma olasılığı σ_{ins} olarak ikiye ayrılırken, yutulma olasılığı da yakalama olasılığı σ_c ve fisyon olasılığı σ_f olmak üzere ikiye ayrılır [28].

2.4. Nötron Difüzyon ve Transport Teorileri

Nükleer reaktör tasarımı yapılırken serbest nötronların birim zaman ve hacim başına katettiği toplam uzunluk, kısaca nötron akısı dikkate alınmaktadır. Nötron akı dağılımının belirlenmesi zor olduğu için Nötron Difüzyon ve Transport Teorileri geliştirilmiştir. Nötron Difüzyon Teorisi nötron akı dağılımının yaklaşık olarak belirlenmesinde kullanılırken, Transport Teorisi nötron akı dağılımının hassas olarak belirlenmesinde kullanılır. Fakat bu iki teorisinin geliştirilmesi sonucu ortaya çıkan denklemler karmaşık bir yapıya sahip olduğu için sayısal çözümlerinin el ile yapılması çok zordur. Bu zorluktan dolayı nükleer reaktörlerin nötronik performansını hesaplayan birçok bilgisayar kodu geliştirilmiştir [28]. Bu tez kapsamında, LIFE reaktörün nötronik performansı incelenirken bu iki teori temel alınmış olup sayısal çözümlerinde MCNP bilgisayar kodu kullanılmıştır. Bu bölümde anlatılanlar sayesinde MCNP bilgisayar kodu ile gerçekleştirilen hesapların teorik temelleri verilmiş olacaktır.

2.4.1. Nötron difüzyon teorisi

Nükleer reaktör fiziğinin temel görevi, bir nükleer reaktörün çeşitli bölgelerinde kullanılan malzemeler ile etkileşime giren nötronların gerçekleştirdiği farklı reaksiyonların oranlarını hesaplamaktır. Bu hesaplama, nükleer kesitlerin ve bunların enerji bağımlılığının ve nötronların uzaydaki ve reaktördeki enerji dağılımı hakkında bilgi gerektirir. Nötron dağılımı fisyon kaynağındaki nötron dağılımına ve nötronların kaynaktan uzaklaştıkça atom çekirdeği ile yaşadıkları etkileşimlerine bağlı olan nötron kaynak dağılımına bağlıdır. Nükleer reaktörlerde nötron dağılımının en basit ve en yaygın kullanılan matematiksel tanımı, nötron difüzyon teorisi ile sağlanır.

Nötron difüzyon teorisi, nükleer reaktörlerin önemli özelliklerinin birçoğunu açıklayan, nötron enerji spektrumu ile ilişkili önemli etkileri ele alan ve nötron transport teorisi ile bağlantılı olarak ortaya çıkan karmaşıklığı gideren bir matematiksel tanımdır. Bu teoride

bütün nötronların aynı etkin hıza sahip olduğu ve enerjilerindeki değişim etkilerinin göz önüne alınmadığı varsayılmıştır. Böyle bir sadeleştirme ile nötron enerji dağılımı üzerinde enine kesitlerin ortalamasının alınmasına olanak sağlanmıştır. Daha basit bir sadeleştirme daha yapılarak ortamın başlangıçta tekdüze olarak olduğu kabul edilmiştir [29]. Nötron difüzyon teorisi geliştirilirken Fick Kanunu esas alınmıştır ve bu kanundan yararlanarak nötronun yoğunluğunun yüksek olduğu yerden düşük olduğu yere doğru hareket ettiği ön görülmüştür. Bu hareket sırasında birim zamanda birim alandan geçen nötron sayısı önem arz etmektedir ve nükleer reaktör fiziğinde bu sayı nötron akım yoğunluğu (J) olarak adlandırılmaktadır.

Nötron akım yoğunluğunda nötronun hareket yönü dikkatte alınır. x yönünde hareket eden nötronların akım yoğunluğu (J_x) Eş. 2.23 ile elde edilmektedir. Eş. 2.23’de geçen D ifadesi difüzyon parametresini ifade etmektedir.

$$J_x = -D (d\phi/dx) \quad (2.23)$$

Nötron difüzyon teorisinde nötron balansı önemlidir. Nötron balans denklemi oluşturulurken bir V hacmi ele alınmış olup bu hacimdeki nötron sayısının zamanla değişimi Eş. 2.24 ile verilmiştir.

$$\partial n(r,t)/\partial t = S(r,t) - \Sigma_a(r)\phi(r,t) - D\nabla^2\phi(r,t) \quad (2.24)$$

$\partial n(r,t)/\partial t$ ifadesi V hacmi içindeki nötron sayısının zamanla değişimini, $S(r,t)$ hacim içinde üretilen nötron sayısını, $\Sigma_a(r)\phi(r,t)$ hacim içinde soğrulan nötron sayısını ve $D\nabla^2\phi(r,t)$ ise hacim içinden kaçan nötron sayısını temsil etmektedir. Eş. 2.24 nötron akısı cinsinden (nötron sayısı ve nötron hızının çarpımı) ifade edilirse nötron difüzyon denklemi Eş. 2.25’deki gibi olur;

$$\partial n(r,t)/v\partial t = S(r,t) - \Sigma_a(r)\phi(r,t) - D\nabla^2\phi(r,t) \quad (2.25)$$

Nötron difüzyon denkleminin çözümü için iki yaklaşım geliştirilmiştir. Birincisi, sayısal çözümlerinde sonlu farklar yöntemini kullanan ayrıklaştırma yöntemidir. Diğer ise sayısal çözümlerinde sonlu elemanlar yöntemi, sentez yöntemi ve düğüm yöntemini kullanan seri gösterim yöntemidir [30].

2.4.2. Nötron transport teorisi

Nötron transport teorisi 100 yıldan daha eski bir tarihe sahiptir. 1872 yılında L. Boltzmann, mikroskobik moleküllerin bir ortamda taşınması için koruma ifadesini elde etti. Nötronlar, fotonlar ve diğer bazı partiküller için partikül taşıma denklemleri veya Boltzmann denklemleri olarak bilinen benzer koruma denklemleri türetilmiştir. Nötron transport denklemi, bir ortamda nötron transport işlemini incelemek için kullanılan temel denklemdir ve nötron transport denklemini türetirken transport problemlerini basitleştirmek için nötronların nokta olarak kabul edildiği, nötronların nötr olmasından dolayı nokta çarpışmaları arasında düz çizgiler halinde ilerlediği, nötron-nötron etkileşimlerinin ihmal edildiği, çarpışmaların anlık olduğu, malzemenin izotropik olduğu, incelenen materyallerin nükleer özelliklerinin ve kompozisyonlarının aksi açıkça belirtilmediği sürece bilinen ve zamandan bağımsız olduğu ve sadece nötron yoğunluğu dağılımının beklenen veya ortalama değeri göz önünde bulundurulduğu olmak üzere varsayımlar yapılmıştır [31].

Nötron taşınımı çalışmalarındaki temel ilke nötron sayısının korunmasıdır. Bu ilke nötron açısıl yoğunluğunun zaman içindeki değişim oranının nötron üretim oranından kaçan ve uzaklaştırılan nötron oranının çıkartılmasıyla elde edileceği anlamındadır. Kararlı durumda bir sistemde zamanla nötron açısıl yoğunluğundaki değişim oranı, $\partial n / \partial t$, sıfırdır [31].

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \text{Üretim Oranı } (\theta) - \text{Kaçak Oranı } (L) - \text{Uzaklaştırma Oranı } (R) \quad (2.26)$$

Eş. 2.26'da üretim oranı (θ) için üç adet nötron kaynağı bulunmaktadır. Birincisi, gelen nötronun E' enerjisinden ve X' yönünden E enerjisine ve X yönüne saçıldıktan sonra oluşan nötronları ifade eden θ_s , ikincisi fisyon kaynağı θ_f ve üçüncüsü ise kendiliğinden bir fisyon kaynağı, doğal radyoaktif kaynak ve diğerleri gibi bağımsız yabancı kaynaktır S . Böylece üretim oranı θ Eş. 2.27 ile ifade edilir [31];

$$\begin{aligned} \theta = \theta_s + \theta_f + S = & dV dE d\Omega \left[\int_0^\infty dE' \int_{\Omega'}^A \Sigma_s(r, E') f(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \right. \\ & \phi(r, E', \Omega', t) d\Omega' + \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_0^\infty dE' \int_{\Omega'}^A v \Sigma_f(r, E') \\ & \left. \phi(r, E', \Omega', t) d\Omega' + S(r, E, \Omega, t) \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

burada $f(r, E^l \rightarrow E, \Omega^l \rightarrow \Omega)$ saçılma fonksiyonun ifade etmektedir. Nötron kaçağı oranı, birim hacim başına elementsel hacime (dV) giren nötron sayısı ile elementsel hacimden (dV) çıkan nötron sayısı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır ve Eş. 2.28 ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} L &= \phi(r_0 + (s + ds)\Omega, E, \Omega, t) dA dE d\Omega - \phi(r_0 + s\Omega, E, \Omega, t) dA dE d\Omega \\ &= \frac{d\phi(r_0 + s\Omega, E, \Omega, t)}{ds} dV dE d\Omega = \Omega \cdot \nabla \phi dV dE d\Omega \end{aligned} \quad (2.28)$$

Nötronlar, dV içerisinde absorbe edilerek ve E enerjisi ve X yönünden başka bir enerji alanına ve yönüne saçılarak uzaklaştırılır. Uzaklaştırma oranı EŞ. 2.29'dan hesaplanır.

$$R = (\Sigma_s + \Sigma_a) \phi(r, E, \Omega, t) dV dE d\Omega = \Sigma_t \phi(r, E, \Omega, t) dV dE d\Omega \quad (2.29)$$

Eş 2.27, 2.28 ve 2.29 Eş. 2.26'ya yerleştirilip düzenlendiğinde sırasıyla kararlı durum nötron transport denklemi Eş 2.30 ve zamana bağlı nötron transport denklemi Eş. 2.31 elde edilir [31].

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \phi + \Sigma_t(r, E) \phi &= \int_0^\infty dE^l \int_{\Omega^l}^A \Sigma_s(r, E^l) f(r, E^l \rightarrow E, \Omega^l \rightarrow \Omega) \phi(r, E^l, \Omega^l, t) d\Omega^l \\ &+ \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_0^\infty dE^l \int_{\Omega^l}^A v \Sigma_f(r, E^l) \phi(r, E^l, \Omega^l, t) d\Omega^l + S(r, E, \Omega, t) \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\phi(r, E, \Omega, t) = \int_0^\infty \exp \left[- \int_0^l \Sigma_t(r - l'\Omega, E) dl' \right] \phi(r - l\Omega, E, \Omega, t - \frac{l}{v}) dl \quad (2.31)$$

Nötron transport denklemini çözmek için sınır ve başlangıç koşulları gereklidir. Yaygın olarak kullanılan sınır şartları aşağıdaki gibidir [31]:

- i. Nötron açısal akısı, denklemin uygulandığı bölgelerde sonlu ve negatif olmayan bir gerçek sayı olmalıdır.
- ii. Nötron açısal akısı, ara yüzde kaynak yoksa iki farklı ortam arasındaki sınır boyunca süreklidir.
- iii. Dış yüzey sınır koşulları (yani açık sınır koşulları) iki türe ayrılabilir: Birincisi, dış bölgelerden hiçbir nötron girmezse veya bir nötron yüzeyden çıktıktan sonra geri dönemezse, o zaman yüzey, nötron açısal akısının sıfır olduğu serbest bir yüzey olarak adlandırılır. Örneğin, vakumu karşılayan dışbükey bir yüzey. İkincisi, belirli bir gelen nötron akısına sahip bir kaynak yüzeydir. Genellikle, meydana gelen akı, kaynak yüzey

serbest bir yüzey olarak muamele görerek, hayali bir yüzey kaynağı olarak ele alınır.

- iv. Örtük sınır koşulları, gelen ve giden nötron akıları arasındaki ilişkiye göre üç tipe ayrılabilir. Birincisi, bir yönden gelen nötron akısı, simetri sisteminin simetri düzleminde görünen yansıtıcı sınır üzerinde yansıtılan doğrultuda giden nötron akısına eşittir. İkincisi, albedo sınırındaki olay akısının, bilinen bir izotropik albedoya ($\alpha(E)$) eşit olmasıdır. $\alpha = 1.0$ olan özel durumda, tüm giden parçacıklar “geri yansıtıldığından” yansıtıcı sınır koşulu olarak adlandırılır. Üçüncüsü, bir yüzey elemanı üzerinden V hacmine geçen tüm parçacıklar, beyaz sınır üzerinde izotropik bir dağılımla geri döner.

Zamana bağlı nötron transport denklemini çözmek için, başlangıç koşulu ise Eş 2.32’de verilmiştir [31];

$$\phi(r, E, \Omega, t)|_{t=0} = \phi_0(r, E, \Omega)$$

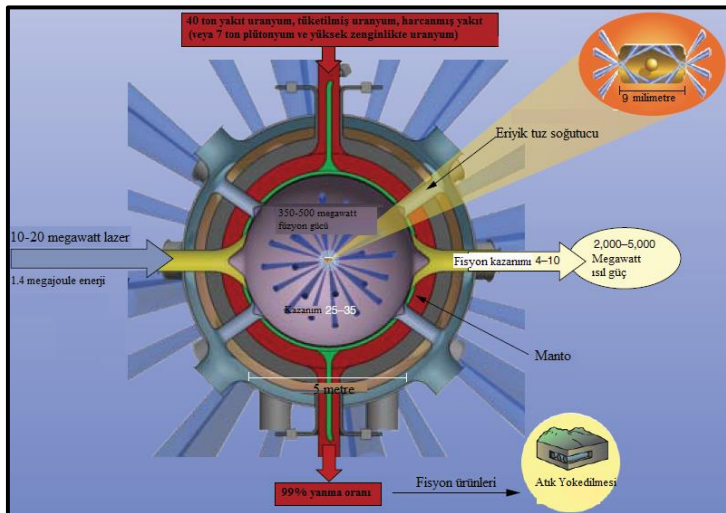
(2.32)

3. LIFE FÜZYON REAKTÖRÜ

Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı, enerji üretmek ve nükleer atıkları yakmak için LIFE adlı bir hibrit füzyon-fisyon nükleer enerji sistemi tasarlamıştır. Bu tasarımda kritik olmayan bir fisyon blanketi oluşturmak için füzyon odasını çevreleyen Ataletsel Sınırlandırma Füzyonu (ICF) kullanmıştır. ICF füzyon ürünü bir nokta nötron kaynağını andırır ve birden fazla soğutucu, çarpan, moderatör ve bölünebilir yakıt tabakası içeren kompakt, küresel şekilli bir oda sağlar. Bu geometri sayesinde, füzyon nötron kaynağı bir fisyon blanketi tarafından muhafaza edilmiş olur [32].

LIFE reaktörlerde yakıt zenginleştirilme veya yeniden işleme proseslerine ihtiyaç yoktur. LIFE reaktörlerde fertil yakıtın fisil yakıtta dönüşüm işlemi gerçekleşir ve bu dönüşüm sırasında fertil yakıt yakılır. Bu işlemler sırasında reaktör kritik altı olarak çalışır. LIFE reaktörlerde yakıt olarak ise tükenmiş uranyum, kullanılmış nükleer yakıtlar ve toryum ve nükleer silahlardan elde edilen Pu kullanılabilir [32].

Ataletsel sınırlandırma füzyon tasarımının en iyi örneği şekil 3.1’de tasarımı verilen, Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarının geliştirmiş olduğu lazer ataletsel füzyon enerji (LIFE) reaktörüdür [33].

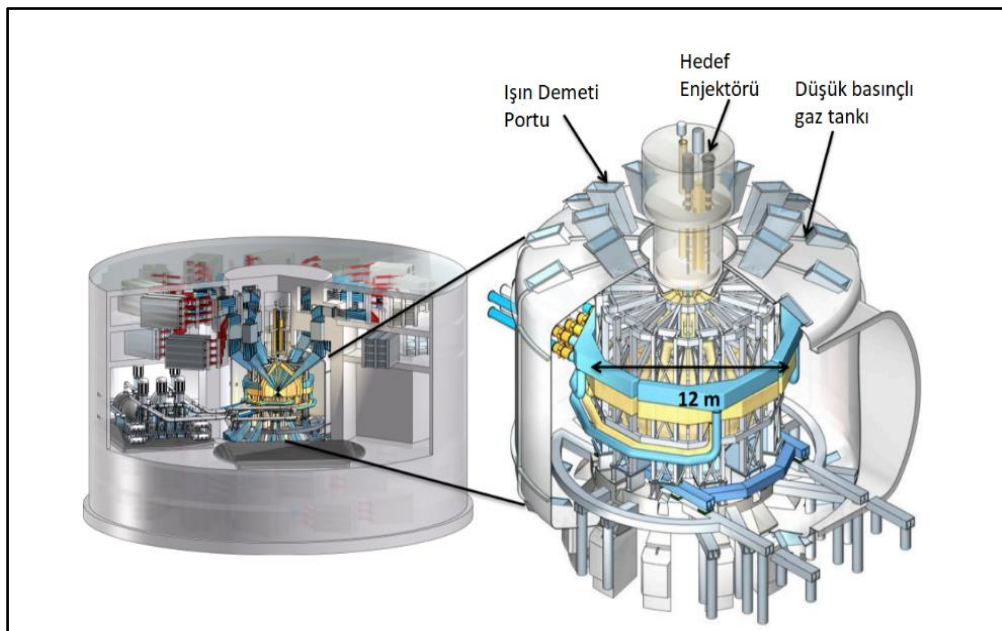


Şekil 3.1. LIFE reaktör yapısı [33]

Bu bölümde Lawrence Livermore National Laboratoru tarafından tasarlanmış olan Lazer Atalet Füzyon Enerji Reaktörleri hakkında genel bilgiler verilerek, daha sonra MCNP 5.1.4

kodu ve ENDF-V nötron kütüphanesi kullanılarak geliştirilen ara yüz programı ile zamana bağlı nötronik performansının incelendiği ve bu nötronik performansa bağlı olarak geliştirilen Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı programı ile hidrojen üretim potansiyelinin ele alındığı modifiye edilmiş LIFE reaktörün geometrisi, bileşenleri ve sayısal hesaplamalarda kullanılacak olan reaktör verileri verilmiştir. Ele alınan LIFE reaktör nükleer atıkların yanma performansını artırmaya yönelik modifiye edilerek geliştirilmiştir.

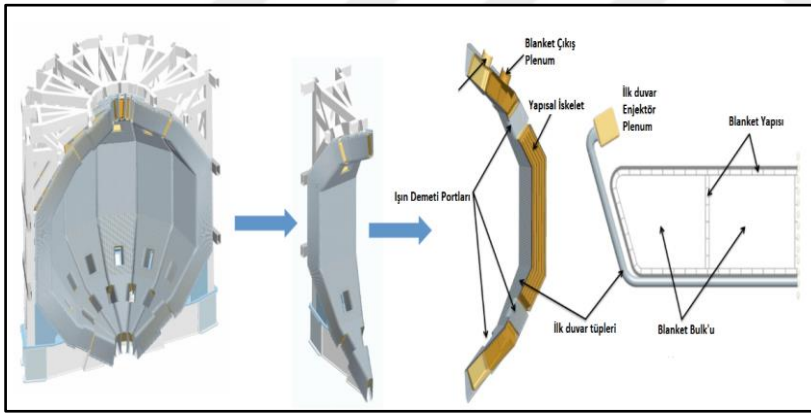
Lazer Ataleti Füzyon Enerji (LIFE) Reaktörü, saf bir füzyon makinesi olarak veya bir füzyon-fisyon hibriti olarak oluşturulabilen lazer tabanlı bir enerji sistemidir [35]. LIFE füzyon reaktörü Lawrence Livermore National Laboratoru tarafından lazer sürücülü bir füzyon reaktörü göz önüne alınarak tasarlanmıştır [34]. Bu tasarımda LIFE reaktörünün, sistem entegrasyonunun tam gösterimini mümkün kılmak ve tesis operasyonlarının performans zarfını genişletmek için hızlandırılmış malzeme testinin yapılacağı platformu sağlamak adına 1000 MW'a kadar füzyon gücüne sahip olacağı belirtilmiştir [36]. LIFE reaktörde potansiyel nötron kaynağı olarak fisyon blanketini harekete geçiren yeni geliştirilmiş olan Ataletsel Sınırlandırma Füzyonu (ICF) kullanılmaktadır. ICF füzyon ürünü bir nokta nötron kaynağına benzemektedir. ICF, 500 MW'lık füzyon ile sonuçlanan $D(T,n)\alpha$ reaksiyonlarından elde edilen enerji ile yaklaşık 13,3 Hz'de 37,5 MJ enerji üretir [32]. Şekil 3.2'de, füzyon operasyon binası içine yerleştirilmiş bir füzyon reaktörünün iç kısmı, vakum haznesinde bulunan füzyon odasını içerecek şekilde gösterilmiştir [36].



Şekil 3.2. Vakum tankının içinde LIFE füzyon odası ve santral [36]

Füzyon odası LIFE reaktörün en önemli alt sistemidir ve bu yüzden mekaniksel tasarımı önem arz etmektedir. Füzyon odasının modüler olması, odanın ışın demeti bağlantısı olmaması, hem birinci duvarda hem de blankette ana soğutucu olarak sıvı lityum kullanılabilmesi gibi bir kaç özelliğe sahiptir.

Şekil 3.3'de ilk duvarı, blanketi ve destek yapılarının içerisine yerleştirilmiş olan LIFE füzyon odasının yarı kesiti gösterilmektedir. Füzyon odası, elektrik santraline sevk edilecek on iki adet aynı fabrika yapımı bölümden oluşur. Bu modüller, bakım bölümünde bulunan dört soğutma manifolduna bağlı üç modül grubu ile destek çerçevesine monte edilir. Daha sonra, tamamen dolu olan oda, manifold başına sadece iki soğutma borusunun, vakum kabına ve koruyucu duvarına giren ana soğutucu besleme borularına (toplam sekiz) bağlanmasını gerektiren nihai kurulum için motor bölümüne taşınır. Birinci duvar, paralel olarak döşenmiş ve blanket'in yanlarına monte edilmiş enjeksiyon ve tahliye borulardan oluşur. 515 °C'de blanket'a giren soğutucu, blanket'in soğutma kanallarından aşağı doğru akar, füzyon odasının altından döner ve sonunda 575 °C'de çıkar [36].



Şekil 3.3. LIFE reaktör füzyon odası tasarımı [36]

Bu tez kapsamında ele alınan modifiye edilmiş LIFE reaktör elektrik enerjisi üretmek ve minör nükleer atıklarının yanma performansını iyileştirmek amacı ile tasarlanmıştır [34]. Modifiye edilen LIFE reaktör çoğaltıcı/yavaşlatıcı bir ortamla ve bir fisyon blanketi ile çevrili, 2.5m yarıçapındaki bir merkezi füzyon hedef odasından oluşmaktadır. Şekil 3.2'de tez kapsamında zamana bağlı nötronik performansının inceleneceği ve bu nötronik performansa bağlı hidrojen üretim potansiyelinin ele alındığı modifiye edilmiş LIFE reaktörün kesit görünüşü verilirken, Şekil 3.4 ise modifiye edilmiş LIFE reaktörün geometrisi verilmiştir [37].

Üçüncü bölge yakıt bölgesidir. Yakıt bölgesinde % 90 hacimsel FLiBe soğutucu ve % 10 hacimsel TRISO kaplamalı minör nükleer atıklar bulunmaktadır. TRISO kaplaması yüksek sıcaklık rektörleri için geliştirilen yeni bir tip yakıt yapısıdır [39] ve özellikleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir [40].

Çizelge 3.1. Modifiye LIFE reaktör geometrisi bileşenlerinin özellikleri [39,40,42]

TRISO kaplama elemanın özellikleri [40]	
Özellik	Değer
Yakıt çekirdekleri çapı	0,024 cm
Kaplama katmanları malzemeleri (içten dışa)	C/C/SiC/C
Katman Kalınlıkları	95/49/35/40 μm
Katman Malzeme Yoğunlukları	1.05/1.9/3.18/1.90 g cm^{-3}
Li ₂ BeF ₄ (FLiBe) soğutucu özellikleri [39]	
Özellik	Değer
Ergime noktası (°C)	459
Yoğunluk (g/cm^3)	2
Li yoğunluk (g/cm^3)	0,28
Üretim özelliği	Nötron çoğaltımı gerekli
Kimyasal kararlılık	Kararlı
Trityum katkısı	Düşük
Reflektör elemanın özellikleri [42]	
Özellik	Değer
Ergime noktası (°C)	3800
Yoğunluk (g/cm^3)	1,76

Minör aktinit izotopları ve bu izotoplar için birim PWR başına kg/yıl cinsinden kütleleri de Çizelge 3.2’de verilmiştir [41]. Ayrıca Li₂BeF₄ (FLiBe) soğutucu özellikleri Çizelge 3.1’de yer almaktadır [42]. Yakıt bölgesinde reaktörün çalışması için gerekli trityum üretimi, düşük enerjili nötronlar ⁶Li ve yüksek enerji nötronlar ⁷Li reaksiyonları ile elde edilmektedir [43].

Dördüncü bölge ise grafitten oluşan reflektör bölgesidir. Grafitin nötronları yavaşlatma oranı oldukça yüksektir Bu bölgenin amacı üretim bölgelerinden kaçan yüksek enerjili nötronların enerjisini düşürmektir [34]. Grafitin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir [42].

Modifiye edilen LIFE reaktörde potansiyel nötron kaynağı olarak fisyon blanketini harekete geçiren yeni geliştirilmiş olan Ataletsel Sınırlandırma Füzyonu (ICF) kullanılmaktadır. ICF

füzyon ürünü bir nokta nötron kaynağına benzemektedir. ICF, 500 MW'lık füzyon ile sonuçlanan $D(T, n)\alpha$ reaksiyonlarından elde edilen enerji ile yaklaşık 13,3 Hz'de 37,5 MJ enerji üretir [32]. Çizelge 3.3'de modifiye edilen LIFE reaktörün güç parametreleri verilmiştir [44].

Çizelge 3.2. Modifiye LIFE reaktörün TRISO kaplamalı yakıtın bileşimi [41]

İzotoplar	^b Minör aktinitler (birim PWR başına kg kütle / yıl)
Np-237	15.1
Pu-238	16.1
Pu-239	205
Pu-240	120
Pu-241	72.7
Pu-242	41.6
Am-241	6
Am-243	21.8
Cm-244	15.6
Cm-245	1.74
^b Basınçlı su reaktörü, plütonyum geri kazanımlı yakıt, 1000-MWe reaktör, %80 kapasite faktörü, 33 MWd / kg,% 32,5 termal verim,	

Çizelge 3.3. Modifiye LIFE reaktörün güç parametreleri [44]

Parametre Adı	Değer
Termal Güç	2000 MW
Füzyon Gücü	500 MW
Birincil Soğutucu	FLiBe
TRISO paketleme oranı	0,30
İlk duvarın iç yarıçapı	2,5 m

4. HİDROJEN VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

4.1. Hidrojen

Hidrojen bir proton ve bir elektrondan oluşan evrendeki en basit elementtir. Hidrojen evrende bol bulunabilen bir element olmasının yanında Dünya’da en fazla bulunan üçüncü elementtir. Önemli miktarda hidrojen gazı dünyamızda veya atmosferimizde bulunmamaktadır. Bunun yerine kararlı bileşikler oluşturmak adına diğer elementler ile reaksiyona girerler. Hidrojen en çok suda ve fosil yakıtlarda bulunmaktadır, dolayısıyla dünyamızda hidrojenin kaynağı sınırsız olarak kabul edilmektedir [45].

Hidrojen kömür ve gaz gibi birincil bir enerji kaynağı değildir. Bir enerji taşıyıcısıdır. Başlangıçta, farklı geleneksel birincil enerji taşıyıcılarına ve kaynaklarına dayalı olan mevcut enerji sistemleri kullanılarak üretilmektedir. Daha uzun vadede, yenilenebilir enerji kaynakları, hidrojen üretimi için en önemli kaynak haline gelecektir. Rejeneratif hidrojen, nükleer kaynaklardan ve fosil bazlı enerji dönüşüm sistemlerinden üretilen hidrojen ve CO₂ emisyonlarının güvenli bir şekilde depolanması (tutulması) tamamen karbonsuz enerji yollarıdır [46].

Bir hidrojen molekülü, iki hidrojen atomundan oluşur. Hidrojen, oda sıcaklığında renksiz ve kokusuz en hafif gazdır. Hidrojen sıvı ve gaz halinde elde edilebilmektedir. Sıvılaştırılmış hidrojen çok düşük kaynama noktasına (–252,88 °C) sahiptir. Ancak sıvılaştırılmış halde bile, hala çok hafiftir. Yoğunluğu yaklaşık 0.07 g/cm³’tür. Hidrojenin döteryum ve trityum olmak üzere iki izotopu vardır. Trityum radyoaktiftir ve 12,26 yıllık yarı ömrü olan çok düşük enerjili ışınları yayar. İzotoplar, farklı fiziksel özelliklere ve oldukça benzer kimyasal özelliklere sahiptir. Hidrojen oksijenle çok kolay bir şekilde reaksiyona girer ve sonucunda su oluşturur. Bu, bir enerji aracı olarak hidrojenin kullanılmasını mümkün kılar. Hidrojenin bazı organik bileşiklerle reaksiyonları hidrojen depolamak ve taşımak için kullanılabilir [47].

4.2. Hidrojenin Önemi

Enerji canlıların yaşamsal ihtiyaçlarını karşılaması için gereken en önemli ihtiyaçtır. Bu ihtiyacın karşında birçok ülke enerji kaynağı seçimi, enerjinin sürekliliği, üretimi, dönüştürülmesi, verimi ve temizliliği başta olmak üzere politikalar geliştirmiştir. Fosil

yakıtlar dünya enerji ihtiyacının çoğunu karşılarsa da zamanla tükenecek olmaları büyük bir sorundur. Bu sorundan dolayı dünya alternatif enerji kaynakları aramaktadır. Alternatif enerji kaynaklarının başında hem yenilenebilir hem de bolluğu dikkate alındığında hidrojen enerjisi büyük önem arz etmektedir [48].

4.3. Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanılmasının en büyük avantajı, fosil yakıtlardan, yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş, rüzgâr, hidro, jeotermik, biokütle) ve nükleer enerji gibi tüm birincil enerji kaynaklarından faydalanarak üretilebilir olmasıdır. Özellikle, hidrokarbonlar, su ve hatta bazı organik maddeler gibi hidrojen atomları içeren herhangi bir maddeden üretilebilmektedirler. Çizelge 4.1’de farklı kaynakların dünyadaki mevcut hidrojen üretimine katkısı, her bir ham madde için kullanılan mevcut teknolojilerle birlikte özetlenmektedir [49].

Çizelge 4.1. Farklı kaynakların dünyadaki mevcut hidrojen üretimine katkısı [49]

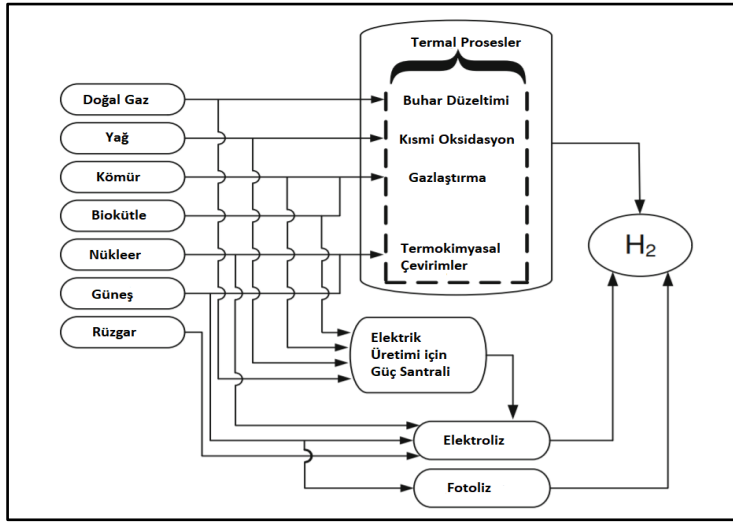
Ham Malzeme	Teknoloji	Yüzde
Metan	Katalitik buhar reformu	48
Rafineri yağı	Kısmi Oksidasyon	30
Kömür	Gazlaştırma	18
Su	Elektroliz	4

Hidrojen üretiminde kimyasal, biyolojik, elektrolitik, fotolitik ve termo - kimyasal gibi çeşitli verimli teknolojiler kullanılabilmektedir. Her teknoloji farklı bir gelişim aşamasındadır ve her biri benzersiz fırsatlar, faydalar ve zorluklar sunar. Ham maddenin bulunabilirliği, teknolojinin olgunlaşması, piyasa uygulamaları ve talep, politika sorunları ve maliyetler, hidrojen üretimi için çeşitli seçeneklerin seçimini etkilemektedir [50-51]. Şekil 4.1’de hidrojen üretiminin genel şeması verilmiştir [45].



Şekil 4.1. Hidrojen üretiminin genel şeması [45]

Hidrojen herhangi bir hidrokarbon yakıtından üretilir, çünkü bu yakıtlar hidrojen içerir. Hidrojen ayrıca çeşitli biyolojik malzemelerden ve sudan da üretilir. “Su ayırma” sürecine elektroliz denir ve bilinen en eski elektrokimyasal süreçtir. Elektroliz 1920'lerin sonlarından kalma ilk ticari teknolojidir. 1960'larda, hidrojenin endüstriyel üretimi, bugüne kadar hidrojen üretiminin ana kaynağı olan fosil bazlı bir ham maddeye doğru yavaş yavaş kaymıştır. Günümüzde genellikle buhar metan dönüşümüyle üretilir, fakat aynı zamanda elektroliz yoluyla ve klor-alkali üretimi gibi bazı endüstriyel işlemlerin bir yan ürünü olarak da üretilmektedir [50-51]. Farklı kaynak seçenekleriyle ilişkili hidrojen üretim yöntemleri aşağıdaki şekil 4.2’de gösterilmiştir [49].



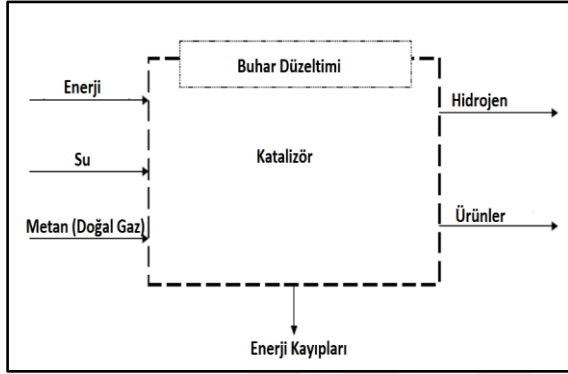
Şekil 4.2. Hidrojen üretim teknolojilerinin akış şeması [49]

4.3.1. Termal prosesler

Termal Prosesler, hidrojen üretmek için kullanılan kimyasal reaksiyonların ihtiyacı olan termal enerjinin kullanıldığı proseslerdir. Bu proseslerde su veya hidrokarbon gibi moleküler yapısında hidrojen bulunduran kaynaklar reaktif olarak kullanılmaktadır. Hidrojen üretim verimini arttırmak amacıyla katalizörler veya kimyasal bileşikler kullanılabilir [45]. Bu prosesin dezavantajı çok yüksek miktarda karbonmonoksit üretmesidir. Bu sebepten dolayı çeşitli reaksiyonlar vasıtasıyla karbonmonoksit'i karbondioksit'e dönüştürmek için kimyasal reaktörler kullanılmaktadır. Buhar metan reformasyonu, hidrokarbon kısmi oksidasyon, ototermal reformasyon, kömür gazlaştırma, biokütle gazlaştırma, ve termokimyasal yöntemler ile hidrokarbon yakıtlardan hidrojen gazı üretmek mümkündür [6].

Buhar metan reformasyonu (SMR)

Buhar reformasyonu (SR), hidrojen üretimi için yaygın olarak kullanılan bir termokimyasal işlemdir. İşlem, metan gazının veya biyogazın veya çöp gazı gibi diğer metan akımlarının, hidrojen ve karbon dioksit üretmek için bir katalizör varlığında buharla reaksiyona girmesi işlemidir. Şekil 4.3’de prosesin genel şeması verilmiştir [45].



Şekil 4.3. SMR prosesi şematik gösterim [45]

SMR yönteminde iki ana reaksiyon bulunmaktadır. Birincisi, bir düzeltim reaksiyonu, yüksek ölçüde endotermiktir ve yüksek sıcaklıkta bir katalizör ile meydana gelir. İkinci reaksiyon, kayma reaksiyonudur ve ekzotermiktir. Daha sonra bir ayırma işlemi gerçekleştirilir. Bu ayırma işlemindeki amaç karbondioksiti çıkartıp ve hidrojeni arındırmaktır. Bu reaksiyonlar ve entalpileri Çizelge 4.2’de verilmiştir [45].

Çizelge 4.2. SMR reaksiyonları [45]

Adım	Reaksiyon Denklemi	Ad	ΔH
1	$CH_4 + O_2 \rightarrow CO + 3H_2$	Düzeltilim	205,82
2	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	Kaydırma Reaksiyonu	-41,17
3	Ayırma Aşaması		-

SMR reaksiyonları, yüksek sıcaklıklarda ($500^\circ C$ ’nin üzerinde) çalışan endotermik reaksiyonlardır. Buhar metan reformu (SMR) yaklaşık $800-900^\circ C$ sıcaklıklarda bir kimyasal reaktörde ve bir demir veya nikel katalizörünün varlığında 2,5 ila 5 MPa arasındaki basınçlarda gerçekleşir [52].

Fosil yakıtlarla beslendiğinde, günümüzde hidrojen üretiminin en ekonomik metodudur. Isı genellikle metan fazlasının yakılmasıyla sağlanır. Bu hem reaktan hem de hidrojenin bir kısmının kaybına neden olur. Buhar reformasyon prosesleri için tipik termal verimlilik yaklaşık % 70'dir [53].

SMR'nin olumsuz yönü oluşan hidrojen gazının saflığının düşük olmasıdır. CO₂, alkaline fırçalama ile çıkarılır, ya bir amin solüsyonu ya da bir rejeneratif kostik solüsyon ile reaksiyona sokulur ve nihayet hidrojen bakımından zengin gaz düşük ısılarla soğutulur ve saflaştırılır [50].

Hidrokarbon kısmi oksidasyon

Otomobil yakıt hücreleri ve diğer bazı ticari uygulamalar için hidrojen üretiminde hidrokarbonların kısmi oksidasyonu (POX) önerilmektedir. Gazlaştırılan ham madde, metan ve biyogaz olabilmektedir. POX, katalitik olmayan bir süreçtir. Ham madde oksijen varlığında ve 1300–1500 °C sıcaklık aralığındaki ve 3-8 MPa basınç aralığındaki buhar ile gazlaştırılır. SMR ile kıyaslandığında daha çok CO üretimi meydana gelmektedir. Dolayısıyla bu işlem CO 'nun buhar ile H₂ ve CO₂'ye dönüştürülmesiyle tamamlanmaktadır. Eş. 4.1, 4.2 ve 4.3'de belirtilmiş olan bu reaksiyonlar tek tek reaksiyon ürünleri arasındaki dengenin korunmasına katkıda bulunur [6].



Ototerml reformasyon

Ototerml reformasyon, hem buhar reformu hem de kısmi oksidasyonun birleşimi olan ekzotermiktir bir reaksiyondur. Reaktörden çıkış sıcaklığı 950 ila 1100 °C arasındadır ve gaz basıncı 100 bar'a kadar yüksek olabilir. Üretilen CO, su-gaz kayma reaksiyonu yoluyla H₂'ye dönüştürülür. Ototerml reformasyon dış ısı gerektirmemesinden ve SMR'den daha basit ve daha ucuz olmasından dolayı avantaja sahiptir [51].

Kömür gazlaştırma

Diğer bir önemli termal yöntem, şu anda endüstriyel anlamda elektrik üretmek için de kullanılan gazlaştırma işlemidir. Bu teknoloji aynı zamanda hidrojen üretiminde kullanılan en eski yöntemdir. Bu yöntem aracılığı ile kömür, petrol veya biokütle karışımları gibi her türlü organik malzemeden hidrojen elde edilebilmektedir. Bu yaklaşıma olan ilgi, kömürün dünya çapında mevcut olması ve nispeten ucuz fosil yakıt olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır [49].

Gaz karbon dönüşümünü maksimize etmek için prosesin yüksek sıcaklıkta gerçekleşmesi tercih edilmektedir, böylece önemli miktarlarda char, katran ve fenollerin oluşumu önlenir. Karbonun karbonmonoksit ve hidrojene dönüştürüldüğü Eş. 4.4’de verilmiştir.

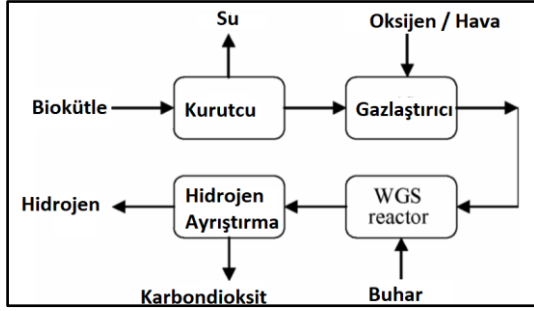


Bu reaksiyon endotermik olduğundan ek ısı gereklidir. Karbonmonoksit, su-gaz kaydırma reaksiyonu yoluyla CO₂ ve H₂’ye dönüştürülür. Kömürden hidrojen üretimi ticari olarak olgunlaşmıştır, ancak metan gazından hidrojen üretiminden daha karmaşıktır [51].

Biokütle gazlaştırma

Biokütleden hidrojen üretimi sahip olduğu avantajlar sebebiyle hidrojen üretim ekonomisinin gerçekleşmesini hızlandırabilecektir. Biokütleden hidrojen üretiminin temel avantajı yenilenebilir olması ve nötr CO₂ etkisine sahip olmasıdır. Hidrojen üretiminde geleneksel tarım ürünleri, özel enerji ürünleri, tarım ve ormancılıktan elde edilen artıklar gibi çeşitli biokütle kaynakları kullanılabilir. Biokütle kaynakları kimyasal bileşimde, enerji içeriğinde, kül ve nem içeriğinde büyük farklara sahiptir. En iyi ve en ekonomik ham maddenin seçimini sağladığı için, bu farklılıklar avantajdır [54].

Biokütlerdeki hidrojen içeriğinin diğer kaynaklara göre düşük olmasından ve yüksek oksijen içeriğine sahip olması nedeni ile enerji içeriğinin de düşük olması nedeni ile yüksek verime ihtiyaç duyulmaktadır. Biokütleden hidrojen üretim için en yaygın olarak uygulanan termokimyasal proses yolu, Şekil 4.4’de gösterilen Su-Gaz Kayması (WGS) ile birleştirilmiş gazlaştırmadır.



Şekil 4.4. Biokütleden hidrojen üretimi genel proses gösterimi [54]

Ototermik gazlaşmayı sağlamak için ıslak biokütle için ilk aşamada kurutmadır. Gazlaştırma, akışkan yataklı reaktörlerde 600-1000 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen yüksek oranlı bir pirolizdir. Gazlaştırıcıda üretilen sentez gazları esas olarak H₂, CO, ayrıca CO₂ ve H₂O içerir. WGS reaktöründe, Eş. 4.5’de reaksiyon boyunca CO H₂’ye dönüştürülür;



Son adım H₂’nin CO₂ ve sudan ayrılmasıdır. Biyokimyasal dönüşüm teknolojileri, genellikle bakteriler ve enzimler olmak üzere mikroorganizmaları içeren oldukça karmaşık biyokimyasal reaksiyon sistemlerine dayanmaktadır [54].

Termokimyasal yöntemler

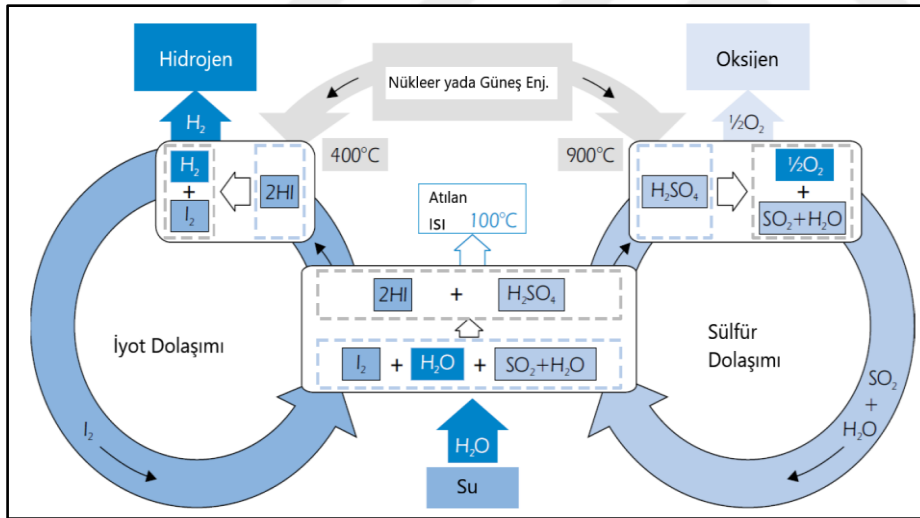
Yüksek sıcaklıkta bir termal kaynağı kimyasal enerjiye dönüştürme suyun termolizi yöntemi ile gerçekleşmektedir. Bu proses, birincil kaynak ile ilişkili ısının, ara adımlar olmaksızın, hidrojene dönüştürülmesi için doğrudan bir yolu temsil eder. Yüksek verimliliğin sadece yüksek sıcaklık enerjisi üreten birincil kaynakların kullanılarak elde edilebilmesi bu yöntem için bir kısıtlamadır. Isı atımı ve termal yönetim ile ilgili problemler ile birlikte, suyu sadece ısıyla ayırmak için gerekli olan çok yüksek sıcaklıklar yöntemin uygulanmasındaki zorluklardır. Bu problemler, çok adımlı termokimyasal süreçlere dayanan daha karmaşık bir su ayrıştırma kavramının pratik gelişimini gerektirir [49].

Bu yaklaşım, su ayrıştırma sıcaklığını 1200 °C’den daha düşük bir değere indirgeyen kimyasal reaktiflerin üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşım, su ayrıştırma sıcaklıklarını 1200 °C’den daha düşük olan ticari olarak geçerli bir değere indirgeyebilen çeşitli kimyasal reaktiflerin özellikleri üzerine kurulmuştur. Genel olarak bu proses en az iki adımdan

oluşmaktadır. Eşitlik 4.6 ve 4.7’de verilmiş olan X jenerik kimyasal maddeyi ifade etmektedir ve denge reaksiyonu Eşitlik 4.8’de verilmiştir [49-51].



Literatürde, nükleer veya yoğunlaşan güneş enerjisinden gelen yüksek sıcaklık enerjisinden potansiyel olarak faydalanabilecek birçok termokimyasal döngü önerilmiştir. Özellikle iyot-kükürt reaksiyonu oldukça caziptir. Termo kimyasal prosesin bir örneği şekil 4.5’de verilen kükürt iyodür (S- I) döngüsüdür. Bu işlemlerle % 50’in üzerinde verimlilik ve bu verimlilik kapsamında hidrojen üretim maliyetlerinde büyük düşüş beklenmektedir [51].



Şekil 4.5. Kükürt iyodür (S - I) döngüsü ile hidrojen üretim akış şeması [51]

4.3.2. Elektroliz

Enerji santralleri tarafından üretilen elektrik enerjisinin fazlasını bir hidrojen taşıyıcısına depolama olanağı, enerji üretimi ve kullanımının genel verimliliğini optimize etmek için cazip bir potansiyel çözümü temsil etmektedir. Bu fikir, üretilen elektrik enerjisinin fazlalığını hidrojen molekülünün kimyasal enerjisine dönüştürebilen bir teknolojiyi gerektirir. Bu teknoloji elektroliz olarak bilinmektedir [49].

Elektroliz, bir elektrik akımının varlığında suyun oksijen ve hidrojene dönüştüğü süreçtir. Suyun ayrıştırılması endotermik bir proses olmasından dolayı enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan (rüzgâr ve hidro jeneratörler, güneş panelleri, nükleer santraller) elektrikle beslenir. Şu anda, bu yöntemle üretilen hidrojen, çok saf hidrojenin gerekli olduğu alanlarla sınırlıdır. Bu yöntem fosil yakıtlardan hidrojen üretim yöntemlerine göre daha maliyetli olmasına rağmen hem çevreye zarar vermez hem de yenilenemez enerji kaynaklarının tükenmesine neden olmazlar. Termokimyasal elektroliz, alkali su elektroliz, proton değişim membran elektrolizi ve yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemleri hidrojen gazı üretmek mümkündür [55-56].

Termokimyasal elektroliz

Gelecek vaat eden hidrojen üretim yöntemlerinin başında suyun elektrolizi yöntemi gelmektedir. Dünyada üretilen hidrojenin yaklaşık %4'ü bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Suyun elektrolizi yönteminin temel prensibi suyu hidrojene ve oksijene dönüştürmektir. Bu yöntem ilk olarak 1980'da ticari anlamda kullanılmıştır [6].

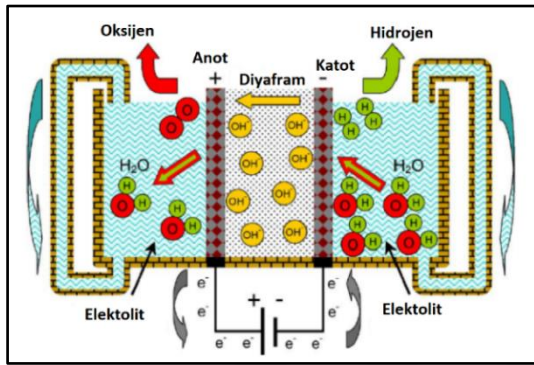
Kısaca suyun elektrolizi, suyun elektrik enerjisinin uygulanmasıyla hidrojen ve oksijene ayrıldığı bir işlemdir ve Eş. 4.9'da gösterilmiştir. 25 °C'de ve 1 atmosfer basınç altında 1 kg hidrojen üretmek için yaklaşık 39 kWh elektrik ve 9 litre suya ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde bu değerler değişik sayılarda bulunabilmektedir [51].



Elektroliz hücresi, elektrolitik hidrojen üretim sisteminin temel elemanıdır. Elektroliz modülünü oluşturmak için hücreler paralel veya seri olarak bağlanır. V_{cell} ve I_{cell} her bir hücrenin sırasıyla voltajı ve akımıdır. V_M ve I_M ise modülün volt ve akım yaşıdır. Elektroliz modülü paralel bağlanan hücreler tarafından oluşturulduğunda, her bir hücrenin elektrotları karşılık gelen güç kaynağı terminallerine bağlanır. Her elektrotun tek bir polariteye sahip olduğu bu konfigürasyon, monopolar olarak adlandırılır. Diğer taraftan, modül seri olarak bağlanmış hücrelerden oluştuğunda, aynı akım hücreler boyunca akar. Bu durumda, her bir elektrotun, ilk ve son olanlar hariç, iki polaritesi pozitif ve negatiftir. Bu konfigürasyon bipolar olarak adlandırılmıştır [51].

Alkali su elektrolizi

Şekil 4.6’da alkali su elektroliz yönteminin genel çalışma prensibi gösterilmiştir. Alkali su elektroliz yönteminde gaz geçirmeyen bir diyaframla ayrılmış iki elektrot bulunan bir hücre bulunmaktadır. Bu düzenek iyonik iletkenliği artırma adına yoğunlaştırılmış KOH çözeltisi olan bir sıvı elektrolit içeresine daldırılır. Ayrıca KOH çözeltisi yerine NaOH ve NaCl çözeltilerinde kullanılabilir. Bu sistemin çalışma sıcaklığı yaklaşık 65 ila 100 °C arasındadır.



Şekil 4.6. Bir alkalın elektroliz hücresinin çalışma prensibi [51]

Alkali elektroliz hücresinde gerçekleşen reaksiyonlar Eş. 4.10, 4.11 ve 4.12’de verilmiştir.



Elektroliz işlemi oda sıcaklığında gerçekleşir. İşlem ekolojik olarak temizdir çünkü hiçbir sera gazı oluşmaz ve üretilen oksijen başka endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir [6,51].

Proton değişim membran elektrolizi

Bu yöntem aynı zamanda polimer elektrolit membran (PEM) veya katı polimer elektrolit (SPE) olarak adlandırılır. Sınırlı üretim kapasiteleri, kısa ömürleri ve nispeten yüksek

maliyetli olmasından dolayı PEM elektrolizörleri üreten çok az şirket vardır. PEM elektrolizörlerinde, elektrolit gaz geçirmez ince (kalınlığın 0,2 mm altında) polimerik zardır. PEM yakıt hücrelerinde, su elektrolizi için en yaygın kullanılan membran nafion'dur.

PEM elektrolizörlerinin modülleri bipolar konfigürasyondadır. Anot, katot ve membran olarak adlandırılan membran elektrot kompleksi (MEA) denilen bir yapı oluşturur. Elektrotlar tipik olarak platin veya iridyum gibi soy metallerden oluşur.

Anotta, su, membran boyunca katoda dolaşan oksijen, elektron ve proton üretmek üzere oksitlenir (Eş. 4.13). Katotta, katot gazı manifolduna doğru kabarcık oluşturarak hidrojen üretilir (Eş. 4.14). PEM elektrolizörleri, düşük ölçekli üretim uygulamaları için ticari olarak temin edilebilir [51].



Yüksek sıcaklıkta elektroliz

Yüksek sıcaklıkta ayrıştırma işlemi sadece çok yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 3000°C) meydana gelir. Suyun yaklaşık %10'u bu sıcaklıkta ayrışabilirken geri kalanı ise dönüşüme gönderilir. Bu işlem için gereken yüksek sıcaklığın düşürülmesi için Cu - Cl döngüsü, S - I çevrimi gibi termo kimyasal döngüler geliştirilmiştir [57].

4.3.3. Fotoliz

Hidrojen üretiminin yeni bir yolu olan fotoliz umut verici verimlilik ve maliyetler sergilemesine rağmen hala deneysel gelişim aşamasındadır. Bu yöntemde güneş enerjisini emen ve aynı zamanda su molekülünün oksijen ve hidrojene doğrudan ayrışması için gerekli voltajı yaratan yarı iletken bir cihaz olan foto elektrot kullanılır. Ayrıca su elektrolizi için foto elektrokimyasal (PEC) ışık toplama sistemi kullanılır. Yarı iletken foto elektrot, güneş ışınlarına maruz kalan sulu bir elektrolit içine daldırılırsa, hidrojeni ve oksijeni oluşturan reaksiyonları desteklemek için yeterli elektrik enerjisi üretmektedir. Hidrojen üretilirken, oksijen oluşumu için gereken serbest elektronlar elektrolite salınır. Reaksiyon, yarı iletken malzemenin tipine ve güneş yoğunluğuna bağlıdır [6].

4.4. Hidrojen Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Hidrojenin üretimi için gereken enerji kaynaklarının sınırlı olmaması, yüksek verimle elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi, fosil yakıtlara oranla yaklaşık %39 daha verimli olması, depolanabilirliğinin kolay olması, taşınım maliyetinin elektriğe nazaran daha ucuz olması ve en önemlisi çevre dostu olması hidrojenin temel avantajlarıdır. Hidrojenin enerji üretiminde kullanılabilmesi için saf olması gerekliliği, gaz halde çok fazla yer kaplaması ve bu nedenle sıvı olarak depolanmak zorunda olması, yakıt olarak kullanımdaki zorluklar hidrojenin temel dezavantajlarıdır [58].

4.5. Hidrojenin Kullanım Alanları

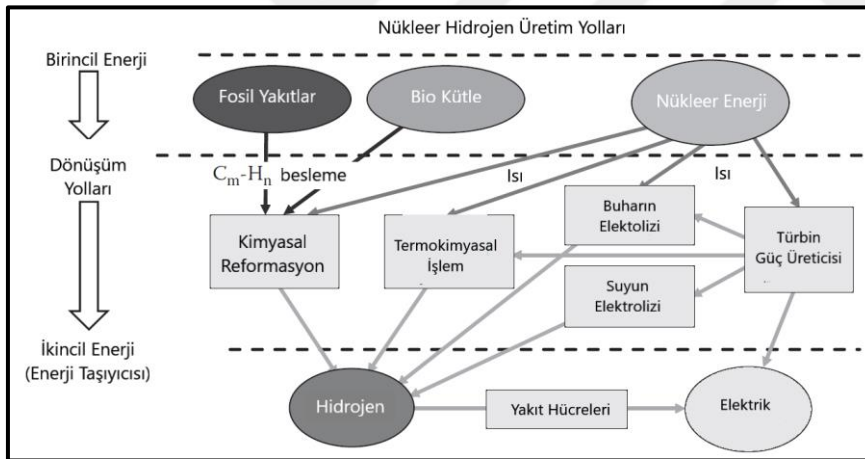
Elektrik enerjisinden farklı olarak hidrojenin taşınabilir ve depolanabilir olması dünyanın enerji ihtiyacının karşılanması adına çok büyük bir avantaj sağlamakla beraber, geniş bir alanda kullanımına imkân vermektedir. Hidrojen başlıca ulaşım, endüstri, ev ve ofislerde kullanılabilmektedir. Örneğin evlerde kullanılmakta olan hava gazı aslında hidrojen ve karbonmonoksidin bir karışımıdır. Hava taşıtlarında kullanımı yaygındır. Ayrıca sanayide, petrolün rafine edilmesinde, amonyak ve metanol üretiminde, metalürji ve gıda sektörlerinde geniş olarak hidrojenden faydalanılmaktadır. Uzay mekiği roketlerinin yakıtı da hidrojendir [59].

Eğer hidrojen etkili ve verimli bir depolama yöntemi ile depolanırsa, yakıt olarak kullanılabilmektedir. Hidrojenden güç elde etmek adına içten yanmalı motor teknolojisi, türbin teknolojisi ve yakıt hücreleri kullanılmaktadır. Bu teknolojilerden en verimlisi %65 gibi bir oranla yakıt hücresi teknolojisidir [60].

5. NÜKLEER ENERJİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ

Nükleer enerji, geleneksel fosil yakıt yanmalarına kıyasla minimum sera gazı emisyonuna sahiptir ve büyük ölçekli hidrojen üretimine uyarlanabileceği gibi birçok nedenden dolayı hidrojen üretimi için cazip bir enerji kaynağıdır [61]. Nükleer enerjinin, hidrojen üretimine yüksek verimlilik, düşük kirlilik, dağıtım kolaylığı ve ekonomiklik gibi çeşitli avantajlar sağlayan benzersiz bir çözüm sunduğu aşikârdır [45].

Şekil 5.1’de nükleer enerjiden hidrojen üretiminin potansiyel yolları gösterilmiştir. Şekil 5.1’de gösterildiği üzere, hidrojen üretim yöntemlerinden suyun elektrolizi, buharın elektrolizi ve termokimyasal prosesler nükleer elektrik ve hidrojen kojenerasyonuna ihtiyaç duyar. Ayrıca, iki enerji taşıyıcısının, suyun elektrolizi ve yakıt hücresi yolları ile birbirine dönüştürülebilir olduğu da görülmektedir [62].



Şekil 5.1. Nükleer enerjiden hidrojen üretiminin potansiyel yolları [62]

Şekil 5.1’den görüleceği üzere hidrojen üretimde nükleer enerjiden elde edilen ısı ve elektrik hidrojen üretim yöntemlerinin dış enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır ve kimyasal reformasyon, termokimyasal işlemler, elektroliz ve yakıt hücreleri yöntemleri kullanarak nükleer enerjiden hidrojen üretmek mümkündür. Kimyasal reformasyonda, karbonun veya hidrokarbonların nükleer enerjiden elde edilen ısı ile girdiği net endotermik kimyasal reaksiyonlarına dayanır. Suyun elektrolizinde ise su molekülleri nükleer enerji kullanarak hidrojen ve oksijene bölünürken, gelişmiş elektroliz, elektroliz aşamasından önce nükleer ısı ile suyu yüksek sıcaklıktaki buhara yükseltir ve bu da hidrojen üretimi için termal verimin iyileştirilmesine yol açar. Termokimyasal işlem, su ve reaktif olarak diğer tüm kimyasalları

kullanan bir dizi kimyasal reaksiyondan oluşur. Nükleer enerji, saf veya hibrit bir termokimyasal süreci yönlendirir. Belirtilen bu dört yol yenilenebilir, su veya biokütle kaynaklarını ham madde olarak kullanmaktadır ve nükleer enerjinin sürdürülebilirlik hedefi ile tutarlıdır [62].

Hidrojen üretiminde füzyon reaktöründen elde edilen termal güç önem arz etmektedir. Hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu termal gücü hesaplayabilmek için sistemin genel güç akış diyagramını çıkartmak gereklidir [63]. Bir füzyon reaktörlü hidrojen üretim sistemi için genel güç akış şeması EK-1 şekil 1.1’de verilmiştir [64].

EK-1 şekil 1.1’den de görüleceği üzere, hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu termal güç ara ısıtıcının verimine ve elektrik güç oranına (ψ) bağlıdır. Dolayısıyla füzyon reaktöründen elde edilen termal güç Eş. 5.1’de verilen formül ile hesaplanır [65];

$$P_{th} = P_i + P_\alpha + MP_n \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1’de P_i füzyon güç girdisini, P_α alfa parçacıklarından gelen füzyon gücünü, P_n nötron parçacıklarından gelen füzyon gücünü ve M ise reaktörün enerji çoğaltım faktörünü göstermektedir [65].

Bir D-T füzyon reaksiyonu 14,1 MeV enerjili nötron ve 3,5 MeV enerjili helyum üretmektedir. Dolayısıyla toplam füzyon enerjisi 17,6 MeV’dir. Füzyon gücü nükleer füzyon reaksiyonlarının sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu füzyon gücünün bir kısmı alfa parçacıklarında bulunan füzyon güç oranından gelirken, kalan kısmı nötron parçacıklarından gelmektedir.

Nötron parçacıklarından gelen füzyon gücü, P_n Eş. 5.2’de ve alfa parçacıklarından gelen füzyon gücü, P_α Eş. 5.3’de verilmiştir [65].

$$P_n = x_n + P_f \quad (5.2)$$

$$P_\alpha = x_\alpha + P_f \quad (5.3)$$

Eş. 5.2 ve 5.3’de verilen x_n nötron parçacıklarının enerji oranını (D-T reaksiyonlarında 0,8) belirtirken, x_α alfa parçacıklarının enerji oranını (D-T reaksiyonlarında 0,2) belirtmektedir.

Füzyon enerji kazancı, Q , füzyon enerji güç çıktısının P_f , füzyon güç girdisine P_i oranıdır ve Eş. 5.4 ile hesaplanır [38].

$$Q = P_f / P_i \quad (5.4)$$

Eş. 5.2, 5.3 ve 5.4, Eş. 5.1’de yerine koyulup düzenlenir ise füzyon reaktöründen elde edilen temel güç, P_{th} , Eş. 5.5 ile ifade edilir [65].

$$P_{th} = \frac{P_f}{Q} * [1 + (x_\alpha + x_n * M) * Q] \quad (5.5)$$

Eş. 5.5’de verilen füzyon reaktöründen elde edilen termal güç ψ elektriksel güç oranı ile elektrik üretimi için brüt güç P_e (Eş. 5.6) ve hidrojen üretimi için $1-\psi$ elektriksel güç oranı ile termal güç (P_h) olarak iki kısma ayrılır [65].

$$P_e = \psi * \eta_{ihx} * \eta_{gt} * P_{th} \quad (5.6)$$

$$P_h = (1 - \psi) * \eta_{ihx} * P_{th} \quad (5.7)$$

Eş. 5.6 ve 5.7’de yer alan η_{ihx} ara ısıtıcı verimini ve Eş. 5.6’da yer alan η_{gt} ise gaz türbinin termal verimidir. Ayrıca gaz türbininden elde edilen P_e , hidrojen üretimi için gerekli ve x_{eh} elektriksel güç payına sahip P_{eh} elektrik gücü, x_{net} net elektriksel güç payına sahip P_{net} net elektrik gücü ve reaktörün kendi kendine yetmesi için gerekli ve x_{cir} elektriksel güç payına sahip P_{cir} yeniden dolaşımdaki elektrik gücü olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır ve elektriksel güç paylarının toplamı 1’e eşittir [65].

$$P_{eh} = x_{eh} * \psi * \eta_{ihx} * \eta_{gt} * P_{th} \quad (5.8)$$

$$P_{net} = x_{net} * \psi * \eta_{ihx} * \eta_{gt} * P_{th} \quad (5.9)$$

$$P_{cir} = x_{cir} * \psi * \eta_{ihx} * \eta_{gt} * P_{th} \quad (5.10)$$

x_{cir} elektriksel güç payına sahip P_{cir} yeniden dolaşımdaki elektrik gücü ise sürücü sisteminin elektriksel gücü ($P_{ds} = P_i / \eta_{ds}$), yardımcı sistem (pompa, soğutma vb.) için elektrik gücü ($P_{aux} = x_{aux} * P_{th}$) ve izotop ayırma tesisi için elektrik gücü ($P_{isf} = x_{isf} *$

P_{th}) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. EK-1 şekil 1.1’de görüldüğü üzere, hidrojen üretim tesisi hem termal güce hem de elektrik gücüne ihtiyaç duymaktadır. Hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu elektriksel güç ε orantı sabiti ile termal enerjiyle orantılı olabilmektedir. Eş. 5.11’de elektriksel güç ile termal güç arasında bağıntı verilmiştir [65].

$$P_{eh} = \varepsilon * P_h \quad (5.11)$$

Dolayısıyla hidrojen üretimi için ayrılan toplam güç P_{hpf} , Eş. 5.12’de verildiği gibidir.

$$P_{hpf} = (1 + \varepsilon) * P_h \quad (5.12)$$

Eş. 5.5 ile 5.12 arasındaki formül kullanılarak ψ elektriksel güç oranı için türetilen ifade Eş. 5.13’de verilmiştir [65].

$$\psi = \frac{1}{\eta_{ihx} * \eta_{ds} [Q * (x_a + x_n * M) + 1] * [\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} * x_{net}]} + \frac{\varepsilon}{[\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{th} * x_{net}]} + \frac{x_{aux} + x_{isp}}{\eta_{ihx} * [\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} * x_{net}]} \quad (5.13)$$

Eş. 5.5 ve 5.6 Eş. 5.12’ye yerleştirilip düzenlenir ise, P_{hpf} Eş. 5.14’de verilen şekilde yazılabilir [65].

$$P_{hpf} = (1 - \psi) * (1 + \varepsilon) * \eta_{ihx} * \frac{P_f}{Q} * [Q * (x_a + x_n * M) + 1] \quad (5.14)$$

Spesifik olarak, nükleer enerji kullanılarak hidrojenin endüstriyel üretimi için bölüm 4’de belirtilen buhar metan reformasyonu, yüksek sıcaklıkta elektroliz ve S-I su ayrıştırma döngüsü kullanılmaktadır [45]. Bu tez kapsamında da yukarıda belirtilen spesifik yöntemler kullanılmıştır.

5.1. Buhar Metan Reformasyonu Yöntemi ile Hidrojen Üretimi

Bölüm 4’de belirtildiği üzere, buhar metan reformasyonu işlemi, hafif hidrokarbon olan metanın buhar ile reaksiyona girerek hidrojen açısından zengin bir gaz karışımı elde edilmesiyle sonuçlanan katalitik ayrışmadır [52].

Metan ilk önce ön arıtmaya tabi tutularak kirlilikten arındırılır. Daha sonra reformasyon işlemi için reformer’a gelir. Reformer’da nükleer enerjiden elde edilen ısı kullanılarak,

Çizelge 5.1 adım 1’de verilen reaksiyon meydana gelir ve sonucunda CO ve H₂ oluşur. CO çevre kirliliğine yol açan bir gaz olmasından dolayı su ile reaksiyona sokularak CO₂ dönüşümü sağlanır ve bu dönüşüm sırasında ortaya yine H₂ çıkar. Meydana gelen hidrojen gazları saflaştırılmak üzere saflaştırıcıya gelir ve burada saflaştırılarak süreç tamamlanmış olur [66].

Bu tez kapsamında, Buhar Metan Reformasyonu için gereken enerji LIFE füzyon reaktöründen elde edilen ısı enerjisidir ve LIFE füzyon reaktörü ile entegre olmuş SMR hidrojen üretim tesisinin genel akış diyagramı EK-1 şekil 1.2’de gösterildiği gibidir [45,63].

EK-1 şekil 1.2 incelendiğinde, LIFE reaktörden elde edilen toplam termal güç ikiye ayrılmaktadır. Elde edilen bu termal gücün bir kısmı elektrik üretimi için generatöre giderken, kalan kısım ise hidrojen üretmek amacı ile ara ısı değiştiriciden (IHX) geçerek SMR tesisine gönderilmektedir [63].

SMR tesisinde gerçekleşen hidrojen üretim prosesinde elektrik enerji kullanılmamaktadır. Başka bir ifade ile generatörden üretilen elektrik SMR tesisine gönderilmeyeceği için güç orantı sabiti $\varepsilon = 0$ ’dır [41]. Dolayısıyla SMR tesisinin hidrojen üretimi için ihtiyaç duyduğu toplam güç P_{hpf} , Eş. 5.14’ün $\varepsilon = 0$ düzenlemesi ile Eş.5.15’deki gibi olur.

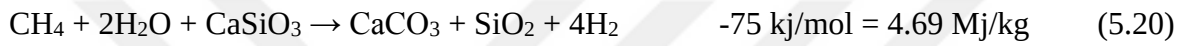
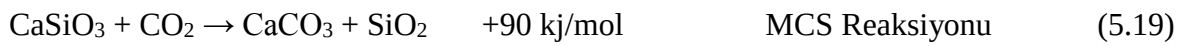
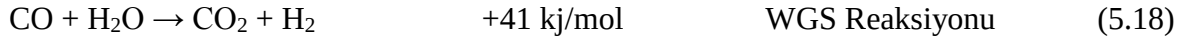
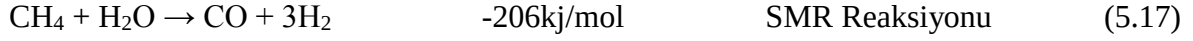
$$P_{hpf}^{SMR} = (1 - \psi) * \eta_{ihx} * \frac{P_f}{Q} * [Q * (x_a + x_n * M) + 1] \quad (5.15)$$

ψ elektriksel güç oranı ise Eş. 5.13’ün $\varepsilon = 0$ düzenlemesi ve üretilen tüm ısı ve elektriğin hidrojen üretim sürecinde ve tesiste tüketildiği varsayımı ($x_{net} = 0$) ile Eş.5.16’daki gibi olur.

$$\psi^{SMR} = \frac{1}{\eta_{ihx} * \eta_{ds} [Q * (x_a + x_n * M) + 1] * [\eta_{gt}]} + \frac{x_{aux} + x_{isp}}{\eta_{ihx} * [\eta_{gt}]} \quad (5.16)$$

SMR prosesinde, metan öncelikle hidrojen ve karbonmonoksit oluşan bir sentez gazı üretmek üzere 800-900 °C’de buharla reaksiyona girer. Bu reaksiyon Eş. 5.17’de verilmiştir. Daha sonra ilk adımda üretilen karbonmonoksit hidrojen ve karbondioksit oluşturmak üzere bir katalizör yardımıyla buharla reaksiyona sokulur. Bu reaksiyon su-gaz değişimi (WGS) olarak bilinen reaksiyondur ve Eş. 5.18’de verilmiştir. WGS reaksiyonlarında salınan CO₂ miktarını azaltmak için, karbon dioksit tutulması, karbon tutulması ve depolanması ya da

yeniden kullanımı gerekmektedir. Bu sebepten dolayı üçüncü bir adım olarak sisteme “Mineral CO₂ tutumu” (MCS) olarak adlandırılan karbondioksit tutma reaksiyonu sisteme dâhil edilmiştir ve bu reaksiyon Eş. 5.19 verilmiştir. Bu gerçekleşen kimyasal reaksiyonların sonucunda oluşan balans denklemi ise Eş. 5.20’de verilmiştir [6].



Eş. 5.17, 5.18 ve 5.19 da verilen reaksiyonlardaki kimyasal bileşiklerin kütle akış oranları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çizelge 5.1’de verilen denklemlerde yer alan η_{smr} buhar metan reformasyon prosesinin verimini, μ SMR prosesinde yer alan kimyasal bileşiğin molar kütlelerini, η_{wgs} su-gaz değişim prosesinin verimini, v WGS prosesinde yer alan kimyasal bileşiğin molar kütlelerini, η_{mcs} mineral CO₂ tutum prosesinin verimini ve ξ MCS prosesinde yer alan kimyasal bileşiğin molar kütlelerini ifade etmektedir [64].

Çizelge 5.1. SMR, WGS ve MCS prosesleri için kütle akış oran denklemleri

Buhar Metan Reformasyon (SMR) prosesi için	
$\dot{m}_{CH_4} = P_{hpf}^{SMR} / q_{tot}$	(5.21)
$\dot{m}_{H_2O-1} = \mu_{H_2O-1} * \dot{m}_{CH_4}$	(5.22)
$\dot{m}_{CO} = \mu_{CO} * \dot{m}_{CH_4} * \eta_{smr}$	(5.23)
$\dot{m}_{H_2-1} = 3 * \mu_{H_2-1} * \dot{m}_{CH_4} * \eta_{smr}$	(5.24)
Su-Gaz Değişim (WGS) prosesi için	
$\dot{m}_{H_2O-2} = v_{H_2O-2} * \dot{m}_{CO}$	(5.25)
$\dot{m}_{H_2-2} = v_{H_2} * \dot{m}_{CO} * \eta_{wgs}$	(5.26)
$\dot{m}_{CO_2} = v_{CO_2} * \dot{m}_{CO} * \eta_{wgs}$	(5.27)
Mineral CO ₂ Tutumu (MCS) prosesi için	
$\dot{m}_{CaSiO_3} = \xi_{CaSiO_3} * \dot{m}_{CO_2}$	(5.28)
$\dot{m}_{CaCO_3} = \xi_{CaCO_3} * \dot{m}_{CO_2} * \eta_{mcs}$	(5.29)
$\dot{m}_{SiO_2} = \xi_{SiO_2} * \dot{m}_{CO_2} * \eta_{mcs}$	(5.30)

Bu tez kapsamında, SMR yöntemi ile modifiye edilmiş LIFE füzyon reaktörünün hidrojen üretim potansiyelinin incelenmesi adına üç mod belirlenmiştir. Birinci mod üç reaksiyonda gerçekleştiği, başka bir ifade ile SMR, WGS ve MCS reaksiyonlarının sırayla gerçekleştirildiği yapılandırmadır. Birinci mod için yapılan kütle akış oranı hesabı çizelge 5.1'deki bütün denklemler kullanılmaktadır. İkinci mod SMR ve WGS reaksiyonlarının sırayla gerçekleştirildiği iki reaksiyonlu yapılandırmadır. İkinci mod için yapılan kütle akış oranı hesabı çizelge 5.1'de verilen Eş. 5.21-5.27 arasındaki denklemler kullanılmaktadır. Üçüncü mod ise SMR'nin tek başına gerçekleştiği tek reaksiyonlu yapılandırmadır. Birinci mod için yapılan kütle akış oranı hesabı çizelge 5.1'de verilen Eş. 5.21-5.24 arasındaki denklemler kullanılmaktadır. Açıklanan bu modlar çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. SMR modları ve açıklamaları

Mod	Gerçekleşen Reaksiyonlar	Kütle Akış Hesabı Eşitlikleri	Toplam Reaksiyon
1	SMR + WGS + MCS	Eş. 5.21-Eş. 5.22-Eş. 5.23-Eş. 5.24-Eş. 5.25-Eş. 5.26-Eş. 5.27 Eş. 5.28-Eş. 5.29-Eş. 5.30	4,682 MJ/kg
2	SMR + WGS	Eş. 5.21-Eş. 5.22-Eş. 5.23-Eş. 5.24 Eş. 5.25-Eş. 5.26-Eş. 5.27	10,33 MJ/kg
3	SMR	Eş. 5.21-Eş. 5.22-Eş. 5.23-Eş. 5.24	11,764 MJ/kg

Eş. 5.17, 5.18 ve 5.19 da verilen reaksiyonlar incelendiği hidrojen üretimi sadece SMR ve WGS prosesinde oluşmaktadır. Dolayısıyla Eş. 5.24 ve 5.26 kullanılarak sistemin ürettiği toplam hidrojen miktarı Eş.5.31 ile hesaplanır ve bu eşitlik her üç mod için geçerlidir [63].

$$\dot{m}_{H_2-tot} = \dot{m}_{H_2-1} + \dot{m}_{H_2-2} \quad (5.21)$$

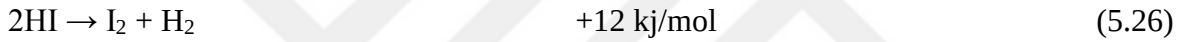
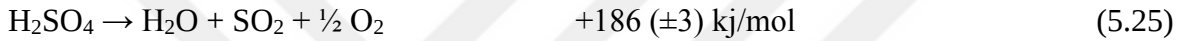
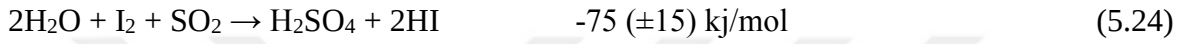
Hidrojen üretim prosesinde diğer önemli parametrelerden birisi ise η_{th} termal verimdir. Termal verim, hidrojenin ısıtma değerinin, yakıtın ısıtma değerinin ve işleme eklenen dış enerjinin toplamına oranı olarak tanımlanır [67] ve SMR prosesi için termal verim Eş. 5.32'de verilirken, sistemin toplam verimi ise Eş. 5.33'de verilmiştir.

$$\eta_{hpf} = \frac{\dot{m}_{H_2} HHV_{H_2}}{\dot{m}_{CH_4} HHV_{CH_4} + P_{hpf}^{bmr}} \quad (5.22)$$

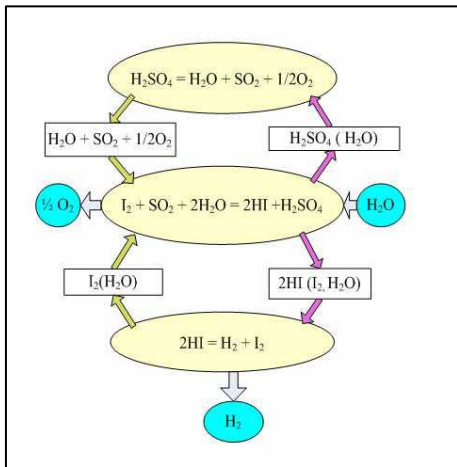
$$\eta_{sys} = \frac{\dot{m}_{H_2} HHV_{H_2}}{\dot{m}_{CH_4} HHV_{CH_4} + P_f} \quad (5.23)$$

5.2. İyot – Kükürt (S-I) Döngülü Termokimyasal Yöntem ile Hidrojen Üretimi

Bölüm 4’de belirtildiği gibi, termokimyasal çevrimler bir dizi kimyasal reaksiyon kullanarak suyun ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Bu ayrışma doğrudan suyun ayrışmasına göre daha düşük sıcaklık kullanarak hidrojen ve oksijen üretimi sağlamaktadır. S-I döngüsü bu kapsamda son 20 yılda önerilen alternatifler arasında hidrojen üretimi için en umut verici termokimyasal yöntemdir. S-I döngüsü, temel olarak üç farklı sıcaklık seviyesinde (düşük, orta ve yüksek sıcaklık) gerçekleştirilen üç kimyasal reaksiyondan oluşmuştur ve bu reaksiyonlar Eş. 5.34, 5.35 ve 5.36’da verilmiştir [68].



Eşitlik 5.34 Bunsen reaksiyonu olarak adlandırılan ekzotermik bir reaksiyondur. 20 °C ila 100 °C’de kendiliğinden meydana gelmektedir. Belirli reaktant konsantrasyonlarında, fazla miktarda iyot içeren, HI içermeyen bir H₂SO₄ bileşiğinin oluşmasını sağlayan iki asit ürünü arasında meydana gelen reaksiyondur. Eşitlik 5.35 sülfürik asidin ayrışma reaksiyonudur ve endotermiktir. 800 °C ila 900 °C’de arasında meydana gelmektedir. Eşitlik 5.36 ise hidrolik asit ayrışma reaksiyonudur ve endotermiktir. 300 °C ila 450 °C’de arasında meydana gelmektedir [69].



Şekil 5.2. Kükürt-İyot prosesine genel bakış [69]

Şekil 5.2’de S-I döngü sisteminin genel görünüşü verilmiş olup, döngüde oluşan H_2O , H_2 ve O_2 açıkça belirtilmiştir. S-I prosesi üç kesimde gerçekleşir. Birinci kesim, Bunsen reaksiyonunun gerçekleştiği kesimdir. Bu kesimde, kesim II ve III için H_2SO_4 ve HI üretimi ve ayrışması gerçekleşir ayrıca bu aşamada O_2 de ayrılmaktadır. Kesim III'den gelen geri dönüşümlü I_2 , karşı akım reaktöründe bölüm II'den gelen su ve SO_2 ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında kendiliğinde meydana gelir. Reaksiyonun sonucunda H_2SO_4 ve HI olmak üzere iki asit çözeltisi meydana gelir. Bu çözeltiler farklı yoğunlukta düşük yoğunluk fazı ve yüksek yoğunluk fazı olmak üzere iki faza sahiptir. Düşük yoğunluk fazında, tüm H_2SO_4 asidi, ağırlıkça yaklaşık % 50 konsantrasyonda I_2 ve SO_2 içermemektedir. Yüksek yoğunluklu fazı, H_2O çözeltisinde tüm HI miktarlarını ve ayrıca az miktarda SO_2 içermektedir. Her iki faz ayrıdır. H_2SO_4 fazının erimiş iyot ve SO_2 ile reaksiyona sokulmasıyla H_2SO_4 konsantrasyonu ağırlıkça yaklaşık % 57'ye yükseltilir. Daha sonra bir miktar su içeren sülfürik asit, konsantrasyon ve ayrışma için kesim II'ye aktarılır. HI, H_2O , I_2 ve SO_2 içeren düşük faz, bütün SO_2 'yi yok eden ve daha sonra saflaştırma ve HI ayrımı için kesim III'e aktarılan bir gaz giderme adımına aktarılır. Ve daha sonra oksijeni ayrıştırmak için, kesim II'nin SO_3 ayrışma reaksiyonundan gelen SO_2 ile karıştırılır ve buradan reaktöre geçer. Reaktörde, SO_2 , I_2 ve H_2O ile reaksiyona sokularak uzaklaştırılırken reaktörden oksijen elde edilir. Ama elde edilen oksijen az miktarda da olsa iyot içerir. İyodun giderilmesi için bir fırçalama kolonu kullanılır. Daha sonra saf oksijen elde edilmiş olur [69].

II. Kesim H_2SO_4 konsantrasyonunun ve ayrışmasının yapıldığı aşamadır. Konsantrasyon, ayrışmadan önce gerçekleşmesi gereken önemli bir kısımdır. Ağırlık olarak % 57 oranında sülfürik asit, bir dizi buharlaştırıcı ve ayırıcıda konsantre edilir. Daha sonra H_2O ve SO_3 'e ayrıştırılır ve SO_3 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de SO_2 ve O_2 'ye ayrıştırılır. Buradaki reaktörde nükleer enerji kullanılmaktadır. Reaksiyona girmemiş H_2SO_4 kesim I'e gönderilmeden önce, SO_2 ve O_2 'nin gaz karışımı H_2O 'dan ayrılır. Bu kesimde yüksek ısıya ihtiyaç vardır ve reaksiyon yaklaşık $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ yüksek sıcaklıkta gerçekleşmektedir [70].

Kesim III, HI ayrıştırma ve HI ayırma adımı olmak üzere iki adımdan oluşur. HI ayrıştırma adımı, HI kesim I'den gelen HI- I_2 - H_2O çözeltisinden ayrıştırılır. Bu aşamada, I_2 'nin %95'ini çözeltiden uzaklaştırmak için konsantre bir fosforik asit kullanılır. HI, H_2O , H_2SO_4 ve bazı I_2 içeren çözelti, H_2O 'nin çoğunun fosforik asit ile kaldığı ve H, I_2 ve çok az miktarda H_2O 'nin buhar olarak uzaklaştırıldığı bir ekstraksiyon damıtma kolonuna aktarılır. Buhar daha sonra yoğunlaşmak ve ayrılmak için soğutulur. HI ayrıştırma basamağından 5 Mpa'da

saflaştırılmış sıvı bir ayrıştırma reaktörüne pompalanır. Daha sonra, içinde yaklaşık 300 °C'de katalitik olarak ayrışır. Reaksiyondan sonra, saf hidrojen üretimini elde etmek için başka bir ayırma yapılmalıdır. Hidrojen ürünü, bir sıvı gaz ayırıcısında I_2 ve bir miktar HI'dan ayrılır. Ardından gaz halindeki H_2 ürünü, H_2O ile temizlenir. Son olarak, saf hidrojen bu aşamada elde edilen üründür ve I_2 Kesim I'e geri döner [69].

Bu tez kapsamında, S-I Döngüsü ile hidrojen üretimi için gereken enerji LIFE füzyon reaktöründen elde edilen enerjisidir ve LIFE füzyon reaktörü ile entegre olmuş S-I Döngülü hidrojen üretim tesisinin genel akış diyagramı EK-1 şekil 1.3'de gösterildiği gibidir [63,71].

EK-1 şekil 1.3 incelendiğinde, LIFE reaktörden elde edilen toplam termal güç ikiye ayrılmaktadır. Elde edilen bu termal gücün bir kısmı elektrik üretimi için generatöre giderken, kalan kısım ise hidrojen üretmek amacı ile ara ısı değiştiriciden (IHX) geçerek S-I Döngü tesisine gönderilmektedir [63].

S-I Döngü tesisinde gerçekleşen hidrojen üretim prosesinde elektrik enerjisi kullanılmamaktadır. Başka bir ifade ile generatörden üretilen elektrik S-I Döngü tesisine gönderilmeyeceği için güç orantı sabiti $\varepsilon = 0$ 'dır [41]. Dolayısıyla S-I Döngü tesisinin hidrojen üretimi için ihtiyaç duyduğu toplam güç P_{hpf} , Eş. 5.14'ün $\varepsilon = 0$ düzenlemesi ile Eş. 5.37'deki gibi olur.

$$P_{hpf}^{S-I} = (1 - \psi) * \eta_{ihx} * \frac{P_f}{Q} * [Q * (x_a + x_n * M) + 1] \quad (5.27)$$

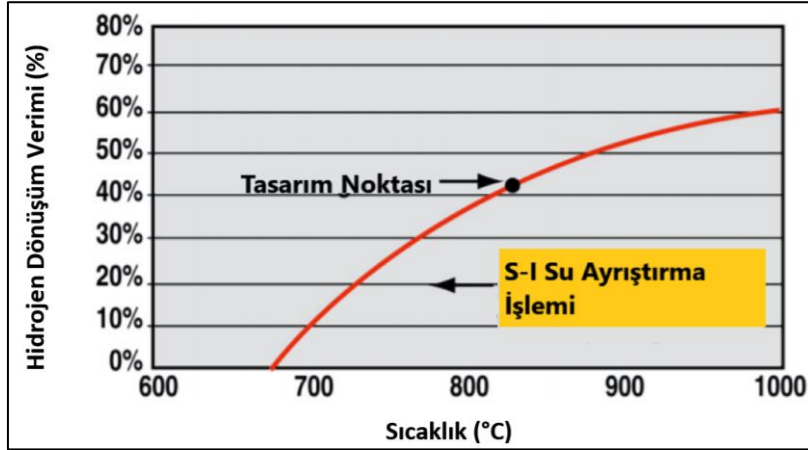
ψ elektriksel güç oranı ise Eş. 5.13'ün $\varepsilon = 0$ düzenlemesi, üretilen tüm ısı ve elektriğin hidrojen üretim sürecinde ve tesiste tüketildiği varsayımı ($x_{net} = 0$) ile Eş. 5.38'deki gibi olur.

$$\psi^{S-I} = \frac{1}{\eta_{ihx} * \eta_{ds} [Q * (x_a + x_n * M) + 1] * [\eta_{gt}]} + \frac{x_{aux} + x_{isp}}{\eta_{ihx} * [\eta_{gt}]} \quad (5.28)$$

S-I Döngülü hidrojen üretim tesisinden elde edilen hidrojen miktarı ise Eş. 5.39'de verilen denklemden hesaplanır [63].

$$\dot{m}_{H_2} = \eta_{hpf} * P_{hpf}^{S-I} * \mathcal{R}^{-1} \quad (5.29)$$

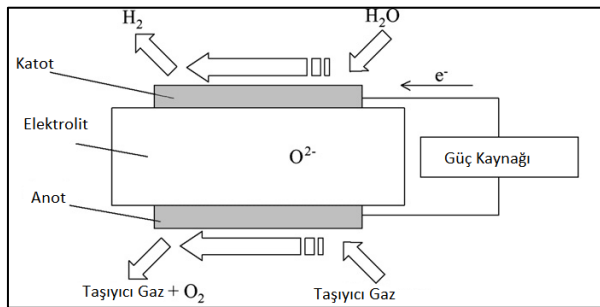
Denklem 5.39’de yer alan $\mathcal{R}$ 1 kg hidrojen üretmek için gerekli olan enerjidir ve 141,7 MJ/kg değerindedir[10]. Prosesin verimi ise Şekil 5.3’de verilen grafikten 900 °C için yaklaşık 0,51 olarak okunmaktadır [72].



Şekil 5.3. Tahmini S-I proses hidrojen üretim verimliliği - tepe proses sıcaklığı [72]

5.3. Yüksek Sıcaklıklı Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi

Bölüm 4’de belirtildiği gibi, elektroliz hücresi, elektrolit, katot (hidrojen elektrotu) ve anottan (oksijen elektrotu) oluşur. Elektrolitin bir tarafına katot ve diğer tarafına anot takılıdır. Şekil 5.4’de yüksek sıcaklıklı elektroliz (HTE) reaksiyonunun genel mekanizması gösterilmiştir [73].



Şekil 5.4. HTE reaksiyonunun genel mekanizması [73]

HTE reaksiyonda, su elektroliz hücresine buhar olarak girmeden önce dış ısı ile ısıtılır. Eş. 5.40’da tarif edildiği gibi buharı hidrojen ve oksijen iyonuna parçalayan elektroliz hücresinin katoduna buhar verilir. Hidrojen hidrojen ürünü olarak çıkartılır ve oksijen iyonu, oksijen iyonu iletkenliğine sahip elektrolit yoluyla anoda taşınır. Oksijen iyonu, Eş. 5.41’de

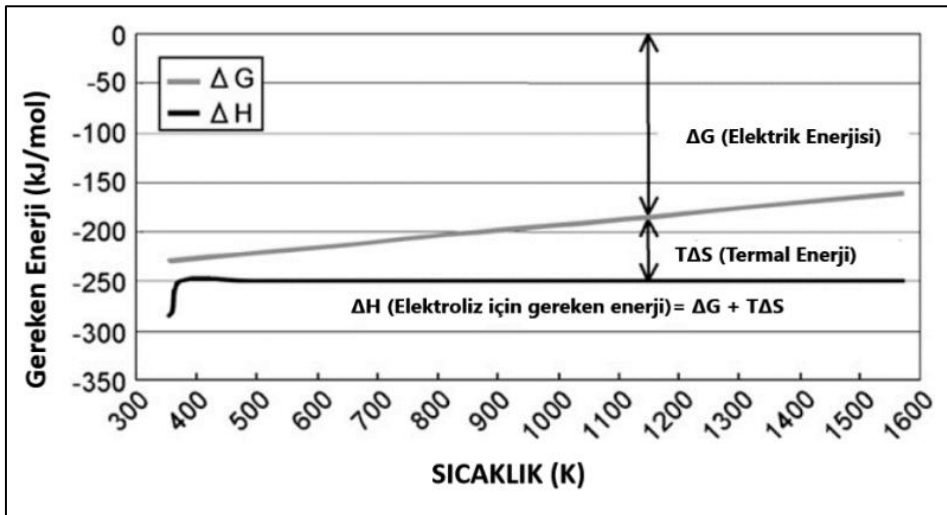
gösterildiği gibi anotta oksijen ürünü olarak geri kazanılır. Eş. 5.40 ve 5.41’de tarif edilen HTE reaksiyonları Eş. 5.42’de özetlenmiştir. Eş. 5.42 HTE reaksiyonun suyun hidrojene ve oksijene ayrıştırılması ile ilgili olduğunu göstermektedir [73].



HTE prosesinde buharı hidrojene ve oksijen ayırmak için termal enerjiye ve elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Bu iki enerjinin enerji girdi oranı Eş. 5.43’de verilmiştir.

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (5.33)$$

Eş. 5.43’de yer alan ΔH hidrojen yanma ısısının negatifine eşit olan entalpi değişimini, ΔG Gibbs serbest enerji değişimini, ΔS Eş. 5.43’de belirtilen reaksiyonun entropi değişimini ve T reaksiyon sıcaklığını belirtmektedir. Elektroliz reaksiyonunda, $T\Delta S$ termal enerji girdisini ve ΔG elektrik enerji girdisini temsil etmektedir. Şekil 5.5’de HTE reaksiyonu için gereken enerjiyi göstermektedir. Bu şekilde reaksiyon sıcaklığının artmasına uygun olarak ΔG ’nin azaldığı ve $T\Delta S$ ’in ise arttığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıktaki elektroliz, düşük sıcaklıktaki diğer elektroliz ile karşılaştırıldığında daha az enerji girişi gerektirmektedir [73].



Şekil 5.5. HTE reaksiyonu için gereken enerjiyi [73]

Bu tez kapsamında, HTE ile hidrojen üretimi için gereken enerji LIFE füzyon reaktöründen elde edilen enerjisidir ve LIFE füzyon reaktörü ile entegre olmuş HTE hidrojen üretim tesisinin genel akış diyagramı EK-1 şekil 1.4’de gösterildiği gibidir [63,71].

EK-1 şekil 1.4 incelendiğinde, LIFE reaktörden elde edilen toplam termal güç ikiye ayrılmaktadır. Elde edilen bu termal gücün bir kısmı elektrik üretimi için generatöre giderken, kalan kısım ise hidrojen üretmek amacı ile ara ısı değiştiriciden (IHX) geçerek HTE tesisine gönderilmektedir. HTE tesisinde gerçekleşen hidrojen üretim prosesinde gerekli olan elektrik enerjisi ise generatörde üretilen elektrik enerjisinden sağlanmaktadır. Başka bir ifade ile generatörden üretilen elektrik HTE tesisine gönderileceği için güç orantı sabiti $\varepsilon=4$ ’dür [41]. Dolayısıyla HTE tesisinin hidrojen üretimi için ihtiyaç duyduğu toplam güç P_{hpf} , Eş. 5.14’ün $\varepsilon = 4$ düzenlemesi ile Eş.5.44’deki gibi olur.

$$P_{hpf}^{HTE} = (1 - \psi) * (1 + \varepsilon) * \eta_{ihx} * \frac{P_f}{Q} * [Q * (x_a + x_n * M) + 1] \quad (5.34)$$

ψ elektriksel güç oranı ise Eş. 5.13’ün $\varepsilon = 4$ düzenlemesi, üretilen tüm ısı ve elektriğin hidrojen üretim sürecinde ve tesiste tüketildiği varsayımı ($x_{net} = 0$) ile Eş. 5.45’deki gibi olur.

$$\psi^{HTE} = \frac{1}{\eta_{ihx} * \eta_{ds} [Q * (x_a + x_n * M) + 1] * [\eta_{gt} + \varepsilon]} + \frac{\varepsilon}{[\eta_{gt} + \varepsilon]} + \frac{x_{aux} + x_{isp}}{\eta_{ihx} * [\eta_{gt} + \varepsilon]} \quad (5.35)$$

HTE hidrojen üretim tesisinden elde edilen hidrojen miktarı ise Eş. 5.46’da verilen denklemden hesaplanırken, HTE prosesi için termal verim Eş. 5.47 ile hesaplanır [66].

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{P_{hpf}^{HTE}}{HHV_{H_2}} \quad (5.36)$$

$$\eta_{hp}^{HTE} = \frac{(1 + \varepsilon) * \eta_{gt}}{\varepsilon + \eta_{gt}} \quad (5.37)$$



6. HESAPLAMA METODU

Bu tez kapsamında, modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik performansı ve buhar metan reformasyonu (SMR), S-I termokimyasal çevrim ve yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) yöntemleri kullanılarak reaktörün zamana bağlı hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Bu kapsamda ele alınan hidrojen üretim yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu enerji, modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktöründen elde edilmiştir. Bu enerji, Eş. 5.14’de görüldüğü üzere, bölüm 3.1’de özellikleri ve yapısı verilen modifiye edilmiş LIFE füzyon reaktörünün nötronik performansına bağlı olarak zamanla değişmektedir. Dolayısıyla, ele alınan LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik performansının hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama kapsamında MCNP 5.1.4 nükleer koduna entegre edilmiş ara yüz kodu ve ENDF-V nötron kütüphanesi kullanılmıştır. MCNP 5.1.4 nükleer koduna entegre edilmiş ara yüz kodu vasıtasıyla gerçekleştirilen nötronik hesaplamalarda zamana bağlı trityum üretimi oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), yakıt yanma oranı (BU) ve fisil yakıt yoğunluk değişim değerleri hesaplanmıştır. Nötronik hesaplamalardan elde edilen M, SMR, S-I ve HTE hidrojen üretim yöntemleri ile hidrojen üretim hesaplarında kullanılan, sırasıyla Eş. 5.13 ve 5.14’de formülize edilen, ψ elektriksel güç oranı ve hidrojen üretimi için ayrılan toplam gücün (P_{hpf}) hesaplarında kullanılmıştır. Modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktör esaslı oluşturulan hidrojen üretim sistemlerinin zamana bağlı hidrojen üretim potansiyelleri, bu tez kapsamında geliştirilen ve SMR, S-I ve HTE hidrojen üretim yöntemlerini kullanan Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı ara yüz programı gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün nötronik performansının gerçekleştirildiği MCNP 5.1.4 kodu ve bu tez kapsamında geliştirilen füzyon reaktörlerinde SMR, S-I ve HTE hidrojen üretim yöntemleri ile hidrojen üretim analizi gerçekleştiren Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcı ara yüz programının yapısı anlatılacaktır.

6.1. MCNP Kodu

Monte Carlo N Parçacık kodu olarak bilinen MCNP kodu Los Alamos Ulusal Laboratuvarı tarafından, nötron, foton, elektron veya birleşik nötron/foton/elektron transport problemlerini çözmek için hazırlanmıştır ve radyasyondan korunma ve dozimetri, radyasyon kalkını, radyografi, nükleer tıp, nükleer güvenlik, detektör tasarımı ve analizi, hızlandırıcı

tasarımı, fisyon ve füzyon reaktörü tasarımı gibi spesifik uygulama alanlarında kullanılmaktadır [74].

Kodun çalışması, birinci ve ikinci derece yüzeyler ve dördüncü derece eliptik tori ile sınırlandırılmış geometrik hücrelerde üç boyutlu bir malzeme konfigürasyonunu temel almaktadır [74]. MCNP kodunun, fisil sistemler için k_{eff} hesaplama, nükleer enerji ve atom veri kütüphanesi bulundurma, kodda değişiklik yapmadan çeşitli kaynak koşullarını değiştirmeye izin verme ve kullanıcıya parçacık akımı, akısı ve enerjisi ile ilgili çeşitli işlemler yapmasına izin verme gibi birçok yeteneği ve özelliği mevcuttur [75].

MCNP kodunun çalışması kullanıcıların oluşturduğu girdi dosyasına ve hücre kartı, yüzey kartı ve veri kartı olmak üzere üç ana karta dayanmaktadır. Kullanıcı girdi dosyası, problemin geometrisini, problemde kullanılan malzemelerin tanımlarını, seçilen malzemelerin tesir kesiti bilgilerini içeren nükleer veri kütüphanesini, nötron/foton veya elektron kaynağının yerinin ve karakteristiğinin tanımını ve istenilen verileri kayıt altına alacak tally tipini içermektedir [76]. Ayrıca nötron akılarının enerji gruplarına göre kaydedildiği enerji kartı da girdi dosyası olarak kullanılabilir. Enerji kartı ile 30 grup, 238 grup gibi hesaplamalar yapılabilir. Bu tez kapsamında enerji grubu 30 gruplu olarak seçilmiştir [77].

MCNP kodu, transport denklemini zamandan bağımsız olarak çözebildiği için nötronik parametreleri zamana bağlı olarak çözmek adına ek bir programa ihtiyaç vardır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen zamana bağlı nötronik hesaplamalarda Acir'in geliştirdiği ara yüz kod kullanılmıştır. Bu ara yüz kod vasıtasıyla zamana bağlı trityum üretim oranı, zamana bağlı enerji çoğaltım faktörü, yakıt yanma oranı ve zamana bağlı fisil izotop yoğunluk değişimleri hesaplanabilmektedir. Bu parametreler hesaplanırken ara yüz programı 27 günlük zaman aralığı ve %100 santral faktörünü ele alır [37].

6.2. Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı Programının Yapısı

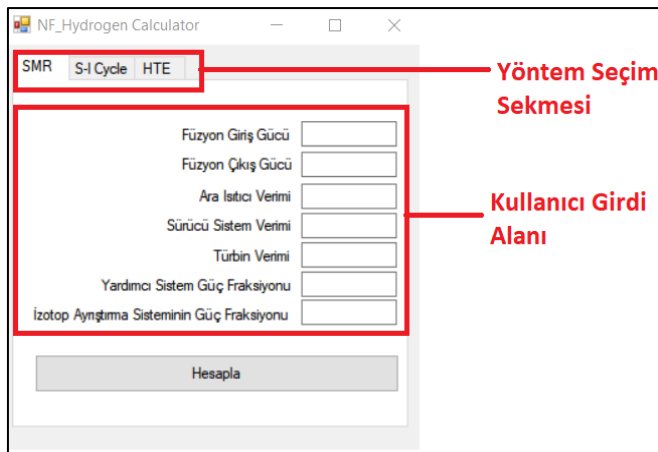
Bu tez kapsamında, lazer sürücülü LIFE füzyon reaktöründe zamana bağlı hidrojen üretim potansiyelinin incelenmesi adına bölüm 5'de açıklanan SMR, S-I ve HTE yöntemlerinde verilen eşitliklerin çözümünü kolaylaştırmak ve farklı füzyon reaktör tiplerinde bu üç yöntemi kullanarak hidrojen üretim potansiyelini araştırmak için C# tabanlı, Nükleer

Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı adlı uygulama Visual Studio programında geliştirilmiştir. Programın geliştirilmesi sürecinde esas alınan algoritma EK-2 şekil 2.1’de verilmiştir.

Geliştirilen programın çalışması özet olarak şu şekildedir: programın ilk adımı SMR, S-I ve HTE hidrojen üretim yöntemlerinden kullanılması istenilen yöntemi seçmektir. Bu seçimi yapabilmek için şekil 6.1’de gösterilmiş olan ve programın üst kısmında yer alan sekmeler kullanılır. Hesaplama yapılmak istenilen yöntem seçildikten sonra, kullanıcı girdileri girilerek hesapla butonu ile seçilen hidrojen üretim yöntemine ait hesaplamalar gerçekleşir. Hesaplama sırasında, C klasöründe M.txt adıyla yer alan ve hidrojen üretim hesaplamalarında kullanılan zamana bağlı MCNP ara yüz kod sonuç çıktı dosyası otomatik olarak okutulur.

Hesaplama ilk olarak MCNP ara yüz kod ile hesaplanan enerji çoğaltım faktörüne (M) bağlı olan ve Eş. 5.13’de belirtilen ψ elektriksel güç oranının hesabı ile başlar. Gerçekleştirdiği bu hesabı Eş. 5.14’de verilmiş olan, P_{hpf} , hidrojen üretimi için ayrılan toplam gücün hesabında kullanır.

Ayrıca programda, Eş. 5.13’de yer alan $\eta_{ihx}, \eta_{ds}, \eta_{gt}, x_{net}, x_{aux}$ ve x_{isp} parametrelerinin değerleri, oluşturulacak farklı sistemlerin analizi gerçekleştirmek üzere, kullanıcı girdisi olarak ayarlanmıştır. Hesaplanan P_{hpf} ile $\dot{m}_{H_2}$ hidrojen kütle akış oranı ve buradan da η_{hp} hidrojen üretim tesisinin verimini hesaplamaktadır. Hesaplama sonuçları txt uzantılı dosya olarak bilgisayarın C klasörüne kayıt edilir.



Şekil 6.1. Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı ana ekran

Birinci sekmede yer alan SMR yöntemi ile hidrojen üretimi hesabı bölüm 5.1’de belirtilmiş olan 3 mod için gerçekleştirilmektedir. Bu hesaplamalar için programa entegre edilen eşitlikler, sabitler ve kullanıcı girdileri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. SMR yöntemi için programa aktarılan parametreler ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
P_{hpf}^{SMR}	Eş. 5.15 programa entegre edilerek hesaplanır.
ψ^{SMR}	Eş. 5.16 programa entegre edilerek hesaplanır.
x_a	0,2 olarak programa entegre edilmiştir.
x_n	0,8 olarak programa entegre edilmiştir.
Q	Eş. 5.4 programa entegre edilerek hesaplanır.
P_f, P_i	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
M	MCNP ara yüz kodu ile hesaplanan zamana bağlı M sonuçlarını içeren dosyadan çağrılmaktadır.
η_{ihx}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
η_{ds}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
η_{gt}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
x_{aux}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
x_{isp}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
$\dot{m}_{H_2}$	Çizelge 5.2’de yer alan eşitlikler entegre edilmiştir.
q_{tot}	4,682 MJ olarak programa entegre edilmiştir.
μ_{H_2O}	18,01528 g/mol olarak programa entegre edilmiştir.
η_{smr}	0,9 olarak programa entegre edilmiştir.
v_{H_2}	2,01588 g/mol olarak programa entegre edilmiştir.
v_{CO_2}	44,01 g/mol olarak programa entegre edilmiştir.
μ_{CO}	28,01 g/mol olarak programa entegre edilmiştir.
ξ_{CaSiO_3}	172,24 g/mol olarak programa entegre edilmiştir.
ξ_{CaCO_3}	100,0869 g/mol olarak programa entegre edilmiştir.
ξ_{SiO_2}	60,08 g/mol olarak programa entegre edilmiştir.
η_{WGS}	0,9 olarak programa entegre edilmiştir.
η_{MCS}	0,9 olarak programa entegre edilmiştir.
HHV_{H_2}	141,7 MJ/kg olarak programa entegre edilmiştir.
HHV_{CH_4}	55,5 MJ/kg olarak programa entegre edilmiştir.
η_{hpf}	Eş. 5.32 programa entegre edilerek hesaplanır.

Sonuçlar C sürücüsüne txt formatında kayıt edilir. Sonuç dosyalarında her bir mod için zamana bağlı güç değişimi, zamana bağlı termal enerjinin oranı, her modda kullanılan bileşiğin kütle oranı değişimi ve sistemin verimi yer almaktadır.

İkinci sekme S-I çevrimi yöntemi ile füzyon reaktöründe hidrojen üretim potansiyelinin incelenmesine ayrılmıştır. S-I yöntemi ile hidrojen üretimi için programa entegre edilen eşitlikler, sabitler ve kullanıcı girdileri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. S-I yöntemi için programa aktarılan parametreler ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
P_{hpf}^{S-I}	Eş. 5.37 programa entegre edilerek hesaplanır.
ψ^{S-I}	Eş. 5.38 programa entegre edilerek hesaplanır.
x_a	0,2 olarak programa entegre edilmiştir.
x_n	0,8 olarak programa entegre edilmiştir.
Q	Eş. 5.4 programa entegre edilerek hesaplanır.
P_f, P_i	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
M	MCNP ara yüz kodu ile hesaplanan zamana bağlı M sonuçlarını içeren dosyadan çağrılmaktadır.
η_{ihx}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
η_{ds}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
η_{gt}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
x_{aux}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
x_{isp}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
$\dot{m}_{H_2}$	Eş. 5.39 programa entegre edilerek hesaplanır.
$\mathcal{R}$	141,7 MJ/kg olarak programa entegre edilmiştir.
η_{hpf}	0,53 olarak programa entegre edilmiştir.

Sonuçları C sürücüsüne txt formatında kayıt edilir. Sonuç dosyalarında her bir mod için zamana bağlı güç değişimi, zamana bağlı termal enerjinin oranı, hidrojenin kütle oranı değişimi yer almaktadır.

Üçüncü sekme HTE yöntemi ile füzyon reaktöründe hidrojen üretim potansiyelinin incelenmesine ayrılmıştır. HTE yöntemi ile hidrojen üretimi için programa entegre edilen eşitlikler, sabitler ve kullanıcı girdileri Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Bu tez kapsamında geliştirilen Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı programında kullanıcı girdisi olarak girilen $\eta_{ihx}, \eta_{ds}, \eta_{gt}, x_{aux}, x_{isp}, P_f$ ve P_i değerleri aşağıdaki Çizelge 6.4’de belirtilen değerler kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Yukarıda belirtilen bilgiler doğrultusunda Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı (NF-Hydrogen Production Calculator) programı sonuçlarının ekran görüntüsü EK-3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. HTE yöntemi için programa aktarılan parametreler ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
P_{hpf}^{HTE}	Eş. 5.44 programa entegre edilerek hesaplanır.
ψ^{HTE}	Eş. 5.45 programa entegre edilerek hesaplanır.
x_a	0,2 olarak programa entegre edilmiştir.
x_n	0,8 olarak programa entegre edilmiştir.
Q	Eş. 5.4 programa entegre edilerek hesaplanır.
P_f, P_i	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
M	MCNP ara yüz kodu ile hesaplanan zamana bağlı M sonuçlarını içeren dosyadan çağrılmaktadır.
ϵ	4 olarak programa entegre edilmiştir.
η_{ihx}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
η_{ds}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
η_{gt}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
x_{aux}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
x_{isp}	Kullanıcı girdisi olarak programda ayarlanmıştır
$\dot{m}_{H_2}$	Eş. 5.46 programa entegre edilerek hesaplanır.
$\mathcal{R}$	141,7 MJ/kg olarak programa entegre edilmiştir.
η_{hpf}	Eş. 5.47 programa entegre edilerek hesaplanır.

Çizelge 6.4. Hidrojen üretim hesabında kullanıcı girdisi olarak ele alınan parametreler

Parametre	Değer
η_{ihx}	0,8
η_{ds}	0,5
η_{gt}	0,6
x_{aux}	0,05
x_{isp}	0,05
P_i	500 MW
P_f	2000 MW

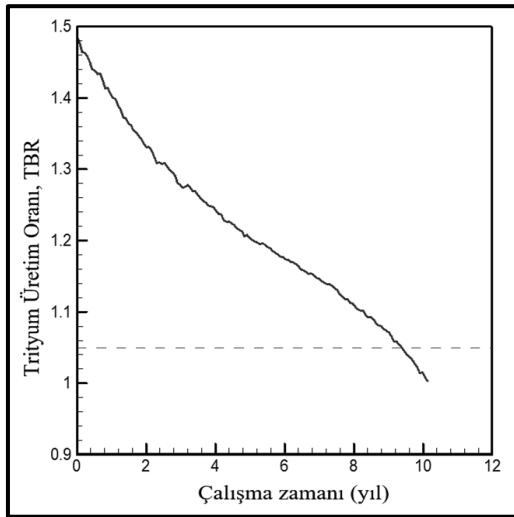
7. SAYISAL SONUÇLAR

Lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik performansının ve hidrojen üretim potansiyelinin analiz edilmesine adına, öncelikle modifiye edilen LIFE reaktör ele alınıp MCNP nükleer kod yardımıyla TBR, M, yanma oranı ve minör aktinitlerin dönüşümleri zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. SMR, S-I ve HTE hidrojen üretim metotları kullanılarak üç adet sistem geliştirilmiştir ve bu sistemlerin hidrojen üretim potansiyelinin analizi kapsamında ise zamana bağlı P_{hpf} , $\dot{m}_{H_2}$ ve verim hesabı Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar her üç yöntem için karşılaştırılmıştır.

7.1. Nötronik Performans

7.1.1. Trityum üretim oranı

LIFE füzyon reaktöründe füzyon reaksiyonlarının devamlılığı için trityum üretimi gerçekleştirilmektedir. Bölüm 3.1’de belirtildiği üzere bu üretim yakıt bölgesindeki soğutucu akışında ve trityum üretim bölgesinde gerçekleşmektedir.



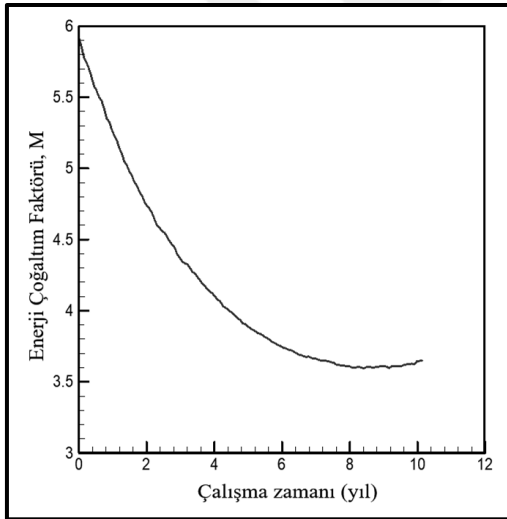
Şekil 7.1. Zamana bağlı trityum üretim oranı değişimi

Şekil 7.1’de ele alınan LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı trityum üretim oranı değişimi gösterilmektedir. Şekil 7.1 incelendiği zaman TBR’nin başlangıçta 1,48 değerine sahip olduğu ve zamanla azalarak 0,954 değerine düştüğü görülmektedir. Bu azalmanın nedeni

yakıt bölgesinde ve trityum üretim bölgesinde oluşan füzyon nötronlarının zamanla azalmasıdır. Reaktörün kendi kendine çalışmasını sürdürebilmesi için gerekli olan TBR değeri (1,05) ele alındığı ise reaktörün yaklaşık 10 sene kendi kendine çalışabileceği gözükmektedir.

7.1.2. Enerji çoğaltım faktörü

Reaktörün enerji girdisi ile enerji çıktısı arasında ilişki enerji çoğaltım faktörü ile belirlenmektedir. LIFE füzyon reaktöründe M değeri temel olarak fisyon reaksiyonlarına bağlıdır. Şekil 7.2’de ele alınan LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı M değişimi gösterilmektedir. Ayrıca $TBR > 1.05$ reaktör çalışması için sınır değer dikkate alındığından dolayı yaklaşık 10 senelik M değişimi şekil 7.2’de gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Zamana bağlı enerji çoğaltım oranı değişimi

Şekil 7.2 incelendiği zaman M'nin başlangıçta 5.91 olduğu ve yaklaşık 10 yıl sonra $TBR=1,05$ iken değerinin 3,65 olduğu görülmektedir. Bu azalmanın nedeni ise yakıt bölgesinde minör nükleer atıkların zaman bağlı olarak kütleli olarak tüketimine ve bunun sonucunda fisyon reaksiyonlarının azalmasına bağlıdır.

7.1.3. Yakıt yanma oranı

Birincil nükleer yakıt kaynağından elde edilen enerjinin miktarına yakıtın yanma oranı (BU) denir. Yakıtta orijinal olarak bulunan ağır metalin metrik tonu veya kilogramı başına

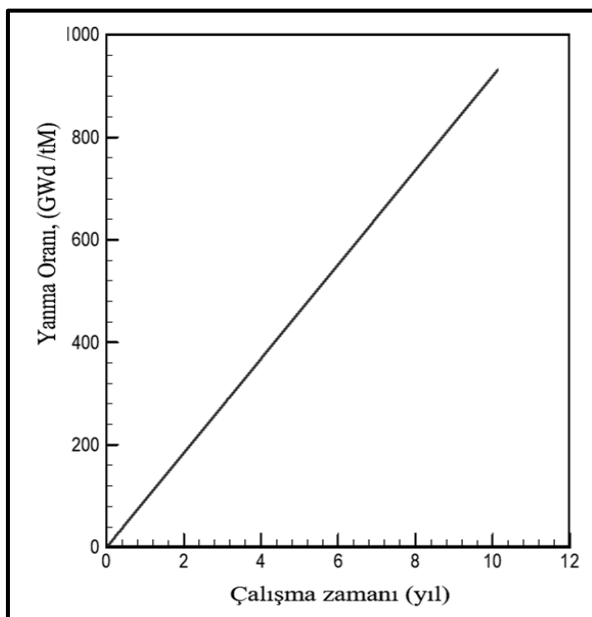
megawatt-gün (MW-gün/t veya MW-gün/kg) olarak ifade edilir [17]. LIFE reaktörün içindeki yakıtın harcanması sonucunda yeni yakıt yüklenmesi gerektiğinden, kullanılmış yakıtın reaktörde kalma zamanının yeni yakıt yükleme zamanına etkisinden ve bunun sonucunda yeni yakıttan ve atık miktarından kazanç sağlanabilmesinden ötürü, LIFE reaktörlerinde yüksek yanma oranı değerleri elde edilmek istenir.

Bu tez kapsamında lazer sürücülü LIFE reaktörü için zamana bağlı BU değişimi, 14 MeV nötron kaynağı altında hesaplanmıştır. Yakıt yanma oranı hesabında kullanılan formül Eş. 7.1'de verilmiştir [78].

$$BU = PF * \Delta t * E_f * F * C_f \iint \sum_f(E) * \phi(E) * dE * dV / m_{fu} \quad (7.1)$$

Eş. 7.1'de PF santral faktörüdür ve değeri 1'dir, E_f fisyon başına enerjidir ve değeri 180 MeV'dur, C_f dönüşüm faktörüdür ve değeri $1,6021 \times 10^{-19}$ MWs / 1MeV'dir, F füzyon nötron kaynağıdır ve değeri $1,774 \times 10^{20}$ 'dir (saniyede 14 MeV enerjili nötron) ve m_{fu} bölünebilir bölgedeki bölünebilir yakıt yüküdür [37].

Şekil 7.3'de ele alınan LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı yakıt yanma oranı gösterilmektedir. Ayrıca TBR>1.05 reaktör çalışması için sınır değer dikkate alındığından dolayı yaklaşık 10 senelik yakıt yanma oranı değişimi şekil 7.3'de gösterilmektedir.

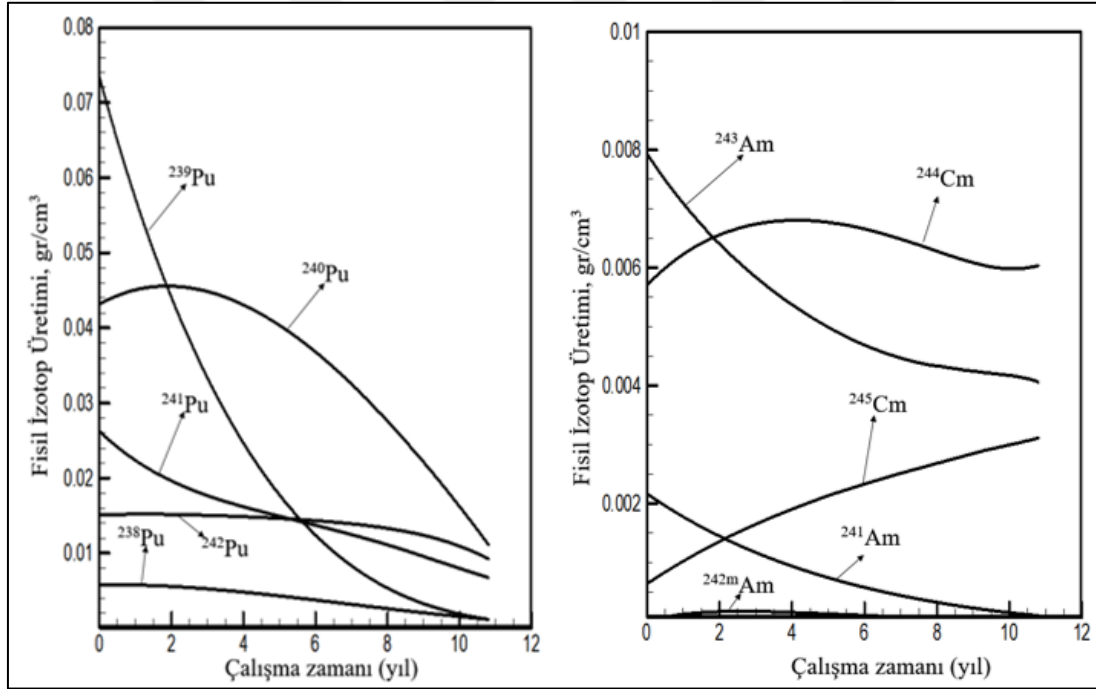


Şekil 7.3. Zamana bağlı yanma oranı değişimi

Şekil 7.3 incelendiği zaman yakıt yanma oranının zamanla arttığı görülmektedir. Başlangıçta sıfır olan BU değeri yaklaşık 10 yıl sonra $TBR = 1,05$ iken değerinin 931,9 olduğu görülmektedir. Bu artışın nedeni fisyon yapabilen yakıt miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır.

7.1.4. Fisil yakıt yoğunluk değişimi

Bölünebilir izotoplar blanket işlem süresi boyunca TRISO parçacığında sürekli üretilmektedir. TRISO parçacığında bulunan minör aktinitler radyoaktif bozunuma ve nötron etkileşimine maruz kalırlar. Blanket çalışma süresi boyunca bölünebilir yakıt izotoplarının değişimi şekil 7.4’de gösterilmiştir.



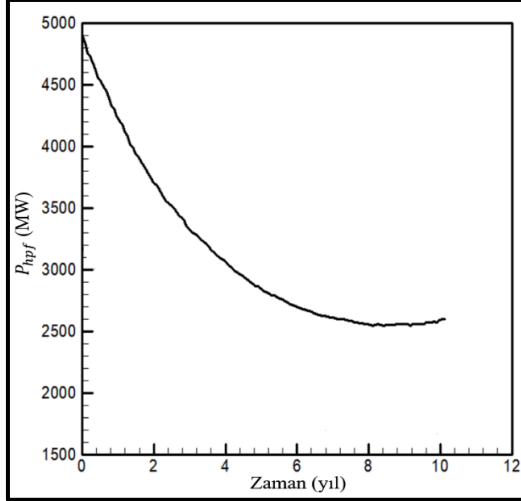
Şekil 7.4. Fisil izotopların zamana bağlı yoğunluk değişimi

Şekil 7.4’de gösterildiği üzere, yüksek kaliteli fisil yakıt olan Pu^{239} ‘un yoğunluğu hızlı bir düşüş göstermiştir. Bu düşüşün sebebi, Pu^{239} yanma sırasında fisyon uğraması ve nötron yakalamasıdır. İlk fisil izotopun radyoaktif dönüşümü ile blanket’in oluşturduğu ana yakıt izotopları ve BU değerlerinin artmasıyla ilişki olan ^{243}Am , ^{244}Cm ve ^{245}Cm izotopları oluşturulmuştur. Bu izotoplar enerji üretimine ek katkıda bulunurlar. Ayrıca, şekil 7.4’de gösterildiği üzere, ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am ve ^{244}Cm blanket operasyon süresince boyunca azalma gösterirken, ^{245}Cm ’un birikim hızında bir artış söz konusudur.

7.2. Hidrojen Üretim Potansiyeli

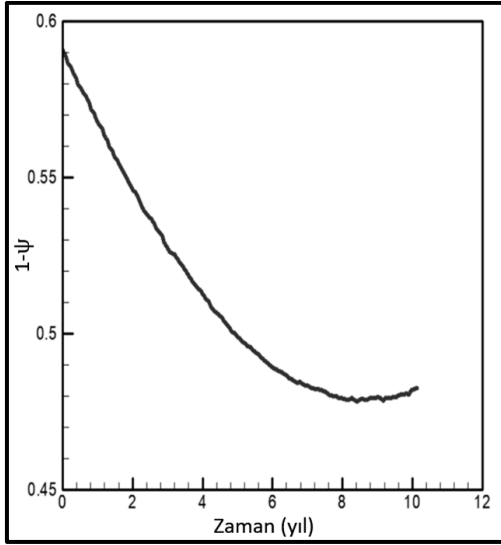
7.2.1. SMR yöntemi ile hidrojen üretimi

Bölüm 5.1’de ele alındığı üzere, lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün SMR yöntemi ile hidrojen üretim potansiyeli incelenmesi adına kurulan sistem incelenmiştir. Sisteme bakıldığı zaman, SMR tesisinin ihtiyaç duyduğu termal güç P_{phf}^{SMR} LIFE füzyon reaktöründen tedarik edilmektedir. LIFE füzyon reaktöründen elde edilen termal güç zamanla değişen enerji çoğaltım oranı M ’e göre değişim göstermektedir, dolayısıyla SMR hidrojen üretim tesisine sağlanan termal güç M ’e bağlı olarak zamanla değişmektedir. Bu değişim üretilen hidrojen miktarını da etkilemektedir. Şekil 7.5’de SMR prosesinde hidrojen üretimi için gereken termal gücün zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekil 7.5’de görüldüğü üzere, P_{phf}^{SMR} ’nin zamanla azaldığı görülmektedir. Başlangıçta 4897 MW olan aktarılan termal güç yaklaşık 10 sene sonra $TBR \approx 1,05$ ’e geldiğinde 2600 MW değerine gelmiştir. Bu azalmanın sebebi enerji çoğaltım faktörünün (M) zamanla azalmasından kaynaklanmaktadır.



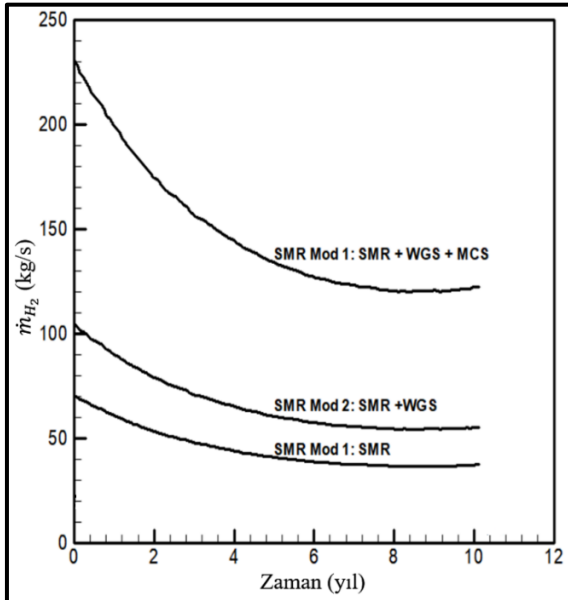
Şekil 7.5. SMR tesisinin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin zamanla değişimi

Şekil 7.6’de SMR hidrojen üretim tesisinin LIFE füzyon reaktöründen elde edilen toplam güçten ihtiyaç duyduğu termal gücün sağlanması ile ilişkili olan $(1-\psi)$ termal güç oranının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 7.6 incelendiği zaman $(1-\psi)$ termal güç oranı başlangıçta 0,59 iken zamanla azalarak $TBR \approx 1,05$ ’e geldiğinde 0,48 değerine geldiği görülmektedir. Bu azalışın sebebi $(1-\psi)$ termal güç oranının M enerji çoğaltım faktörüne bağlı olmasıdır ve M ’deki azalışın sonucu olarak $(1-\psi)$ termal güç oranı da azalmıştır.



Şekil 7.6. SMR sisteminin termal güç oranının zamana bağlı değişimi

Ele alınan sistemin hidrojen üretim oranı SMR + WGS + MCS reaksiyonlarının oluşturduğu Mod 1, SMR + WGS reaksiyonlarının oluşturduğu Mod 2 ve SMR reaksiyonunun oluşturduğu Mod 3 için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu kapsamda her mod sonucu için gerçekleştirilen hesaplamalara bağlı olan hidrojen üretim oranı incelenmiş olup sonuçlar Şekil 7.7'deki grafikte gösterilmiştir.

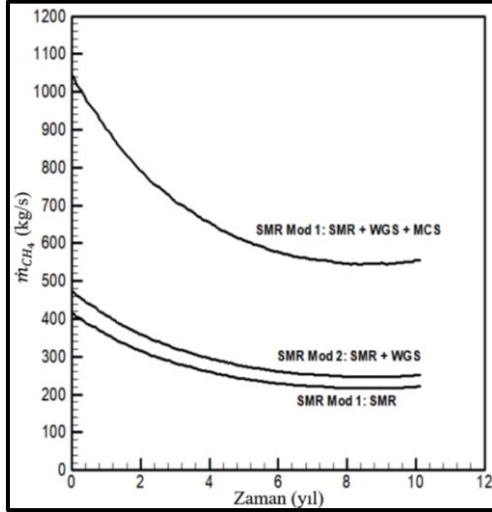


Şekil 7.7. SMR sisteminde her mod için zamana bağlı hidrojen üretimi

Şekil 7.7'de verilen grafikten görüleceği üzere her üç mod için saniyede üretilen hidrojen miktarı zamana bağlı olarak azalış göstermektedir. Mod 1 (SMR+WGS+MCS) sonucunda

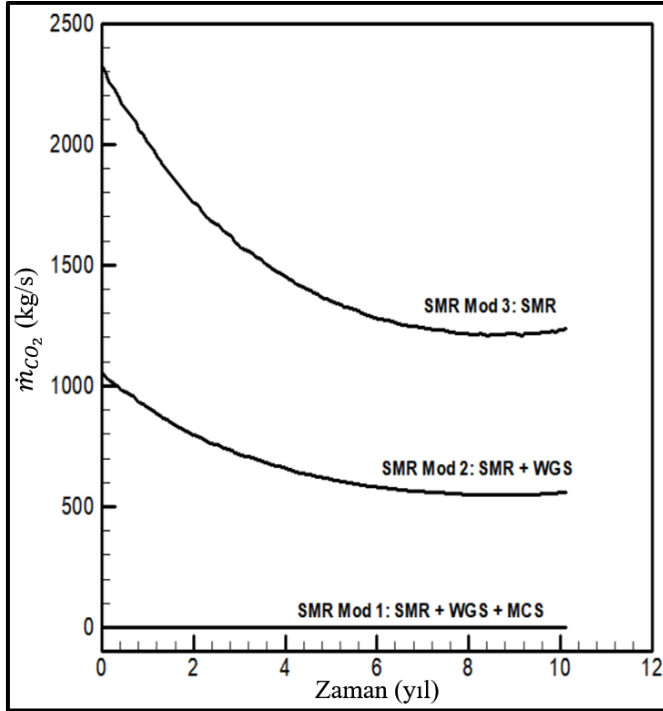
oluşan hidrojen üretim oranı başlangıçta 230 kg/sn iken $TBR \approx 1,05$ 'e geldiğinde 122,5 kg/sn'dir. Mod 2 (SMR+WGS) sonucunda oluşan hidrojen üretim oranı başlangıçta 104 kg/sn iken $TBR \approx 1,05$ 'e geldiğinde 55,5 kg/sn'dir. Mod 1 (SMR) sonucunda oluşan hidrojen üretim oranı başlangıçta 70 kg/sn iken $TBR \approx 1,05$ 'e geldiğinde 37 kg/sn'dir. Her modda gözlemlenen azalışın sebebi şekil 7.8'de gösterildiği üzere SMR prosesinde hidrojen üretimi için gerekli olan CH_4 kütle akış oranının azalmasıdır. Başka bir ifade ile sisteme giren CH_4 miktarındaki azalma hidrojen üretim oranını etkilemektedir.

Şekil 7.8'den görüleceği üzere, SMR yöntemi ile hidrojen üretiminde ihtiyaç duyulan CH_4 miktarı zamanla azalmaktadır. Mod 1 için ihtiyaç duyulan CH_4 kütle akış oranı başlangıçta 1046 kg/s iken çalışma zamanı sonunda 555 kg/s'dir. Mod 2 için ise ihtiyaç duyulan CH_4 kütle akış oranı başlangıçta 474 kg/s iken çalışma zamanı sonunda 251 kg/s'dir. Mod 3 için bu değerler sırasıyla 416 kg/s ve 221 kg/s'dir. Her mod için bu azalışın sebebi SMR yönteminin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin (P_{phf}^{SMR}) zamanla azalmasıdır. P_{phf}^{SMR} azaldığı için sistemin ihtiyaç duyduğu CH_4 miktarı da azalacaktır.



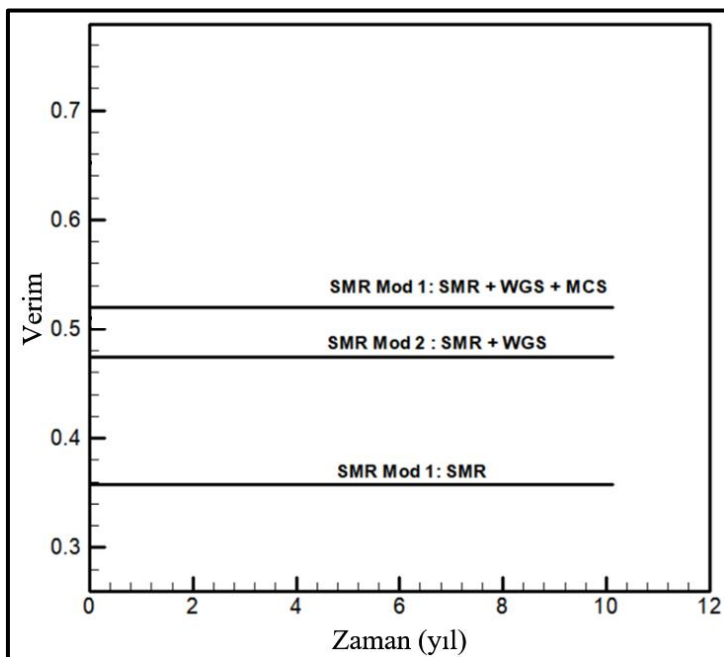
Şekil 7.8. SMR sisteminde her mod için CH_4 'ün zamana bağlı değişimi

Temiz hidrojen elde etmek için ele alınan sistemin karbondioksit üretim oranı Mod 1, Mod 2 ve Mod 3 için incelenmiştir. Bu kapsamda her mod için gerçekleştirilen hesaplamalara bağlı olan CO_2 üretim oranı incelenmiş olup sonuçlar şekil 7.9'daki grafikte gösterilmiştir. Şekil 7.9'da görüleceği üzere MCS reaksiyonu içeren Mod 1'de karbondioksit üretimi olmazken Mod 2 ve Mod 3'de çok yüksek oranlarla karbondioksit üretimi mevcuttur. Bu sonuç MCS reaksiyonunun ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.9. SMR sisteminde her mod için CO₂'nin zamana bağlı

Ayrıca Mod 1, Mod 2 ve Mod 3 için hidrojen üretim tesis verimi hesaplanmış olup Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Şekil 7.10'da görüldüğü üzere her mod'un verimi sabittir. En yüksek verime yüzde 52 ile Mod 1 sahip iken, en düşük verime yüzde 35,7 ile Mod 3 sahip olup, Mod 2'nin verimi ise yüzde 47,5'dir.

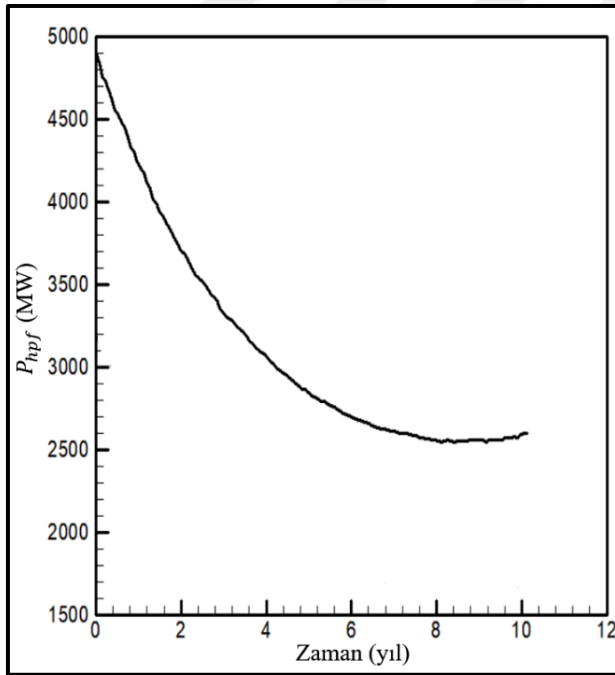


Şekil 7.10. SMR sisteminde her mod için zamana bağlı verim değişimi

7.2.2. S-I yöntemi ile hidrojen üretimi

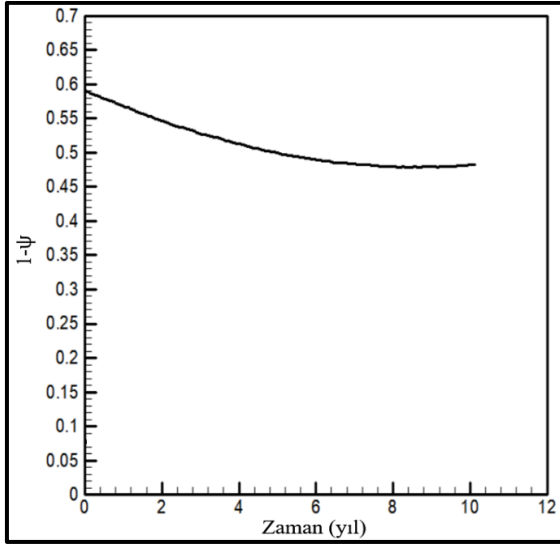
Bölüm 5.2’de ele alındığı üzere, lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün S-I döngüsü yöntemi ile hidrojen üretim potansiyeli incelenmesi adına kurulan sistem incelenmiştir. Sisteme bakıldığı zaman, S-I tesisinin ihtiyaç duyduğu termal güç P_{phf}^{S-I} LIFE füzyon reaktöründen tedarik edilmektedir. LIFE füzyon reaktöründen elde edilen termal güç zamanla değişen enerji çoğaltım oranı M ’e göre değişim göstermektedir, dolayısıyla SMR sistemindeki gibi S-I hidrojen üretim tesisine sağlanan termal güç M ’e bağlı olarak zamanla değişmektedir. Bu değişim üretilen hidrojen miktarını da etkilemektedir.

Şekil 7.11’de S-I prosesinde hidrojen üretimi için gereken termal gücün zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekil 7.11 incelendiğinde P_{phf}^{S-I} ‘nin M ’nin zamanla azalışından dolayı azaldığı görülmektedir. Başlangıçta 4897 MW olarak aktarılan termal güç, TBR’nin zamanla azalmasından kaynaklı olarak düşüş gösteren M parametresine bağlı olarak, yaklaşık 10 sene sonra $TBR \approx 1,05$ ’e geldiğinde 2600 MW değerine gelmiştir.



Şekil 7.11. S-I tesisinin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin zamanla değişimi

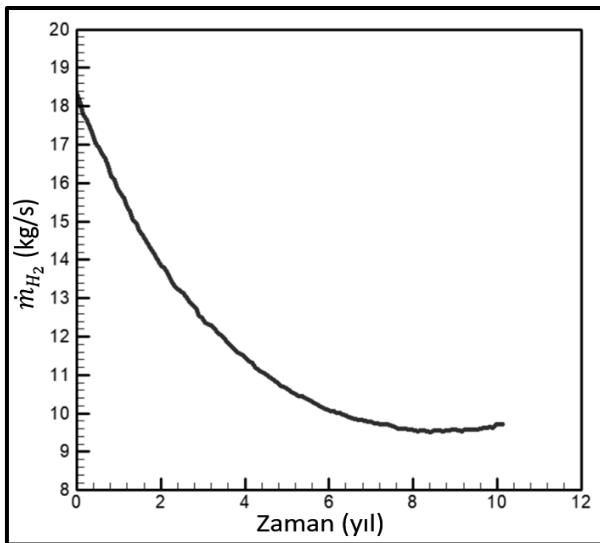
Şekil 7.12’de ise S-I hidrojen üretim tesisinin LIFE füzyon reaktöründen elde edilen toplam güçten ihtiyaç duyduğu termal gücün sağlanması ile ilişkili olan $(1-\psi)$ termal güç oranının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 7.12. S-I sisteminin termal güç oranının zamana bağlı değişimi

Şekil 7.12 incelendiği zaman $(1-\psi)$ termal güç oranı başlangıçta 0,59 iken zamanla azalarak $TBR \approx 1,05$ 'e geldiğinde 0,48 değerine geldiği görülmektedir. Bu azalışın sebebi $(1-\psi)$ termal güç oranının M enerji çoğaltım faktörüne bağlı olmasıdır ve M'deki azalışın sonucu olarak $(1-\psi)$ termal güç oranı da azalmıştır.

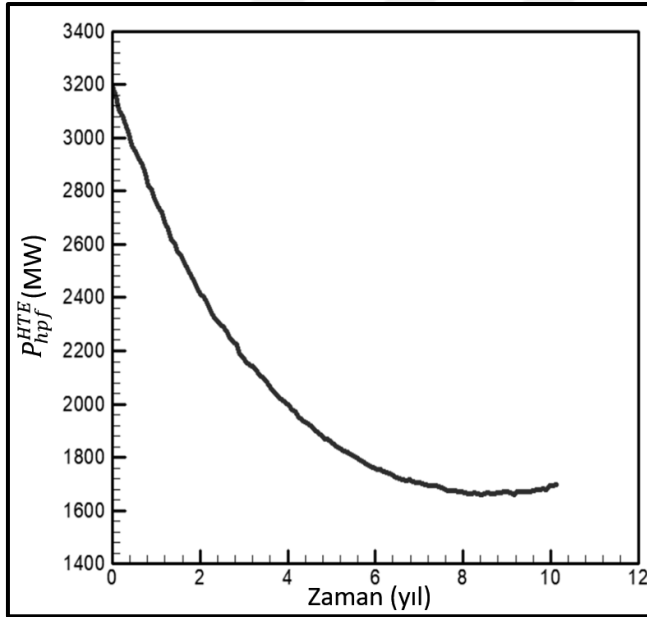
Şekil 7.13 ise S-I termokimyasal yöntemi kullanılarak elde edilen hidrojen üretim oranı gösterilmiştir. Bu grafikten görüleceği üzere hidrojen üretim oranı başlangıçta 18,31 kg/sn iken $TBR \approx 1,05$ 'e geldiğinde 9,72 kg/sn'dir. Hidrojen üretim oranındaki bu azalış P_{phf}^{S-I} azalışından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.13. S-I sisteminin zamana bağlı hidrojen üretimi

7.2.3. HTE yöntemi ile hidrojen üretimi

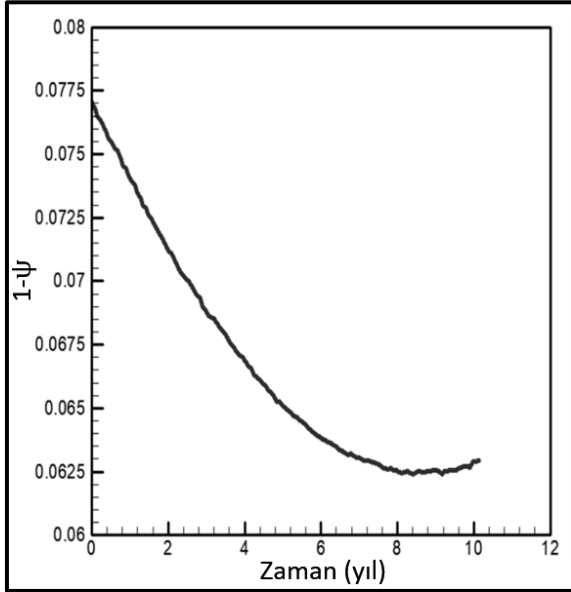
Bölüm 5.3’de ele alındığı üzere, lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün HTE yöntemi ile hidrojen üretim potansiyeli incelenmesi adına kurulan sistem incelenmiştir. Sisteme bakıldığı zaman, HTE tesisinin ihtiyaç duyduğu termal güç P_{phf}^{HTE} LIFE füzyon reaktöründen tedarik edilmektedir. LIFE füzyon reaktöründen elde edilen termal güç zamanla değişen enerji çoğaltım oranı M ’e göre değişim göstermektedir, dolayısıyla SMR sistemindeki gibi HTE hidrojen üretim tesisine sağlanan termal güç M ’e bağlı olarak zamanla değişmektedir. Bu değişim üretilen hidrojen miktarını da etkilemektedir. Şekil 7.14’de enerji çoğaltım oranının değişimine karşı HTE prosesinde hidrojen üretimi için gereken termal gücün değişimi gösterilmiştir. Şekil 7.14 incelendiğinde P_{phf}^{HTE} ‘nin M ’nin zamanla azalışından dolayı azaldığı görülmektedir. Başlangıçta 3193 MW olarak aktarılan termal güç, TBR’nin zamanla azalmasından kaynaklı olarak düşüş gösteren M parametresine bağlı olarak, yaklaşık 10 sene sonra $TBR \approx 1,05$ ’e geldiğinde 1696 MW değerine gelmiştir.



Şekil 7.14. HTE tesisinin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin zamana bağlı değişimi

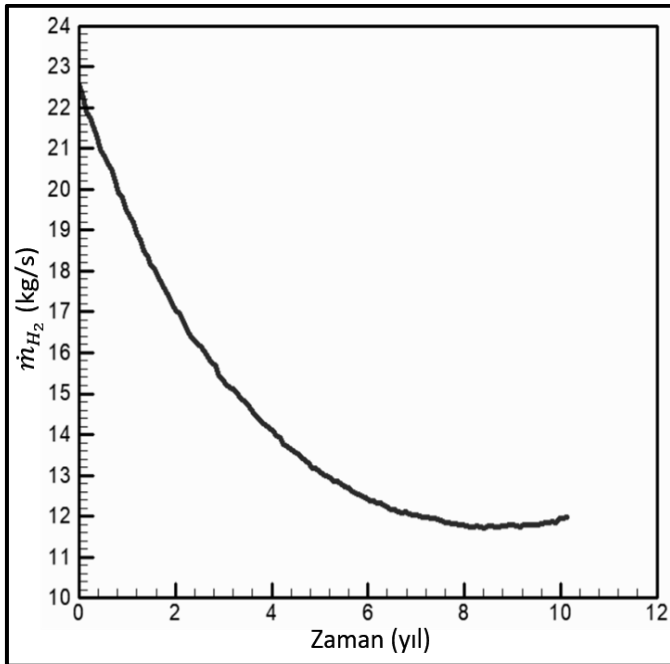
Şekil 7.15’de ise HTE hidrojen üretim tesisinin LIFE füzyon reaktöründen elde edilen toplam güçten ihtiyaç duyduğu termal gücün sağlanması ile ilişkili olan $(1-\psi)$ termal güç oranının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 7.16 incelendiği zaman $(1-\psi)$ termal güç oranı başlangıçta 0,077 iken zamanla azalarak $TBR \approx 1,05$ ’e geldiğinde 0,062 değerine geldiği görülmektedir. Bu azalışın sebebi $(1-\psi)$ termal güç oranının M enerji çoğaltım

faktörüne bağlı olmasıdır ve M'deki azalışın sonucu olarak $(1-\psi)$ termal güç oranı da azalmıştır.



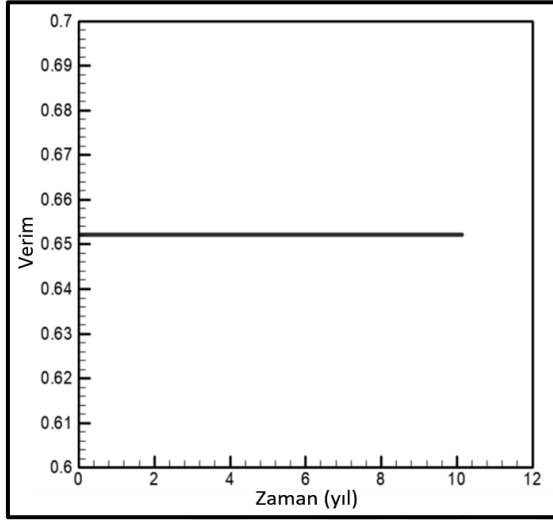
Şekil 7.15. HTE sisteminin termal güç oranının zamana bağlı değişimi

Ele alınan sisteminin hidrojen üretim oranı 7.16'daki grafikte gösterilmiştir. Şekil 7.16'dan görüleceği üzere hidrojen üretim oranı başlangıçta 26,5 kg/sn iken $TBR \approx 1,05$ 'e geldiğinde 14,55 kg/sn'dir.



Şekil 7.16. HTE sisteminin zamana bağlı hidrojen üretimi

Ayrıca HTE hidrojen üretim tesis verimi şekil 7.17’de gösterilmiştir ve verim % 65 olarak sabittir.

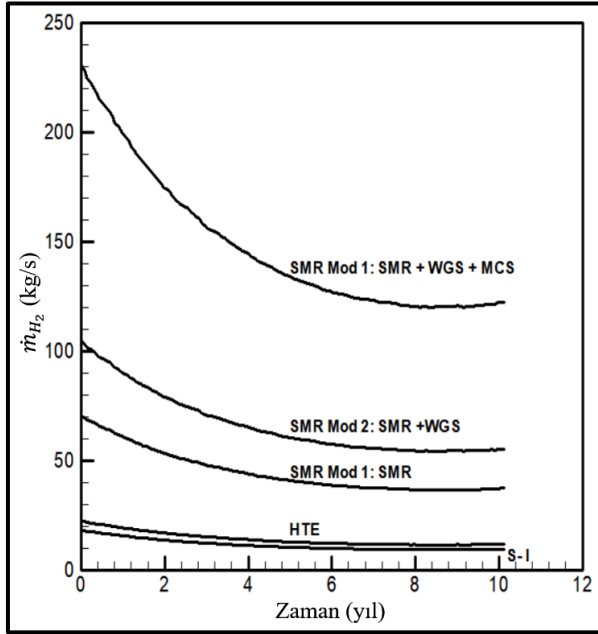


Şekil 7.17. HTE hidrojen üretim yönteminin zamana bağlı verim değişimi

7.2.4. SMR, S-I ve HTE yöntemlerinin karşılaştırılması

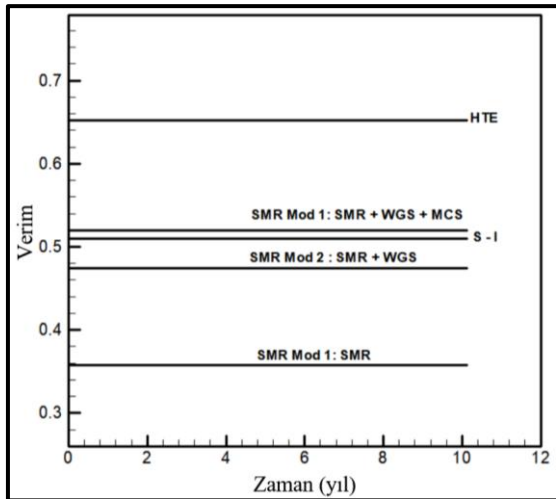
Modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı hidrojen üretim potansiyeli SMR, S-I ve HTE yöntemleri ele alınarak incelenmiştir. Bu yöntemlerin her biri için ayrı ayrı olarak LIFE reaktörden elde edilen enerjinin değişimine bağlı olarak ihtiyaç duydukları enerji miktarı belirlenmiştir. Bu hesaplamalarda LIFE reaktörün M parametresinin önemli olduğu gözlemlenmiştir. M parametresinin zamanla azalması hidrojen üretim tesisine aktarılan enerjinin azalmasına neden olmuştur. Ele alınan üç yöntemden S-I döngüsü başlangıçta 4897 MW ile en fazla enerji kullanan yöntem olmasına rağmen başlangıçta saniyede 18,31 kg hidrojen üreterek en az hidrojen üretimine sahip yöntem olarak dikkat çekmektedir. SMR yönteminde ise 3 farklı mod incelenmiştir. SMR yönteminde en fazla hidrojen üretim potansiyeli birinci moddan elde edilmektedir. Bunun sebebi ise WGS ve MCS reaksiyonlarının hidrojen üretimine katkı sağlamasıdır. En az hidrojen üretim potansiyeli ise üçüncü modda bulunmaktadır. HTE yönteminde ise en dikkat çekici durum $(1-\psi)$ termal güç oranının diğer yöntemlere göre çok düşük olmasıdır. Bu durumun sebebi, SMR ve S-I döngü yöntemlerin termal enerji kullanması ve HTE yönteminin elektrik enerjisini daha baskın olarak kullanmasıdır. Her üç yönteminde $TBR > 1,05$ koşulunun sağlandığı 10 yıl boyunca hidrojen ürettiği sayısal sonuçlardan görülmektedir ve her üç yöntemin zamana bağlı hidrojen üretim oranı şekil 7.18’de

gösterilmektedir. Şekil 7.18’de görüleceği üzere en yüksek hidrojen üretim oranı SMR yönteminin Mod 1 yapılandırmasına ait iken, en düşük hidrojen üretim oranı ise S-I termokimyasal yöntemine aittir.



Şekil 7.18. SMR, S-I ve HTE hidrojen üretim oranlarının karşılaştırılması

Şekil 7.19’da ise hidrojen üretim yöntemlerinin zamana bağlı verim değişimi gösterilmiştir. SMR yöntemine göre çok düşük hidrojen üretim potansiyeline sahip olan HTE yönteminin veriminin en yüksek değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüksek verimliliğin sebebi HTE yönteminin termal enerji yerine elektrik enerjisi kullanmasıdır.



Şekil 7.19. SMR, S-I ve HTE yöntemlerinin verimlerinin karşılaştırılması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik performansı ve bu performansa bağlı olarak nükleer enerjiden hidrojen üretmek için kullanılan SMR, S-I ve HTE yöntemleri kullanılarak modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik performansının analizinde MCNP koduna ek olarak ara yüz kodu kullanılarak nötronik veriler elde edilirken, lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı hidrojen üretim potansiyeli ise bu tez kapsamında geliştirilen Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı programı ile incelenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Füzyon reaksiyonlarının devamlılığını sağlayan trityumun üretim oranının zamanla 1,48 değerinden 0,954 değerine düştüğü gözlemlenmiştir.
- Reaktörün kendi kendine çalışmasını sürdürebilmesi için geçerli olan $TBR > 1,05$ koşulu göz önüne alındığında reaktör yaklaşık 10 sene kendi kendine çalışabilmektedir. Özet olarak reaktörün ömrü yaklaşık 10 yıl olarak hesaplanmıştır.
- TBR'nin zamanla azalışı enerji çoğaltma faktörünü etkilemiştir ve dolayısıyla M değeri zamanla 5,91'den 3,65'e kadar azalmıştır.
- Yakıt yanma oranı, fisyon yapabilen yakıt miktarının azalmasından kaynaklı olarak zamanla 0'dan 931,9'a kadar artmıştır.
- TRISO parçacığının içinde sürekli üretilen bölünebilir izotopların yoğunluk değişimi kapsamında, yüksek kaliteli fisil yakıt olan Pu^{239} yanma sırasında fisyon uğraması ve nötron yakalamasından dolayı yoğunluğunun çok hızlı bir şekilde düştüğü, ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am ve ^{244}Cm yoğunlukları yakıt yanma oranının zamanla artmasından kaynaklı olarak reaktör çalışma süresi boyunca azalım gösterirken ^{245}Cm 'un birikim hızında artma sonuçlarına ulaşılmıştır.
- Modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktörünün zamana bağlı nötronik performansına bağlı olarak hidrojen üretim potansiyeli en fazla olan hidrojen üretim yöntemi, 230,7 kg/s hidrojen üretim oranı ile Mod 3 yapılandırılmalı SMR yöntemidir.
- SMR yöntemi ile hidrojen üretiminde ihtiyaç duyulan CH_4 miktarı zamanla azalmasının sebebi, SMR yönteminin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin (P_{phf}^{SMR}) zamanla azalmasıdır.
- SMR yöntemi ile hidrojen üretiminde, temiz hidrojen elde etmek adına MCS reaksiyonu

kullanılmalıdır.

- S-I termokimyasal döngüsü ile hidrojen üretiminin en yüksek verime sahip olmasına karşı, en fazla enerji kullanan ve en az hidrojen üreten yöntemdir.
- HTE ile hidrojen üretimi termal enerjiden çok elektrik enerjisi kullanmaktadır.
- SMR, S-I ve HTE hidrojen üretim yöntemleri ile modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE füzyon reaktöründe hidrojen üretilmektedir.

Yukarıda belirtilen sonuçlara dayanarak bu tez çalışması kapsamında aşağıda maddeler halinde belirtilmiş olan önerilerin hidrojen üretimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

- Daha fazla hidrojen üretmek adına, farklı oranlarda yakıt bileşimi kullanarak nükleer reaktörün çalışma zamanı daha uzun sürelerle getirilmelidir.
- Daha fazla hidrojen üretmek adına, farklı soğutucu çeşitleri kullanılmalıdır.
- Daha fazla hidrojen üretmek ve verimin artırılması adına, hidrojen üretim sisteminin tasarımında kullanılan ara ısı değiştirici, yardımcı sistemlerin ve sürücü sisteminin elemanlarının seçiminde daha yüksek verime sahip elemanlar seçilmelidir.
- Hem nötronik performansı hem de buna paralel olarak hidrojen üretim potansiyelini arttırmak için reaktörlerde çeşitli modifikasyonlar denenmelidir.
- Nükleer enerjiden hidrojen üretiminin sadece füzyon enerjisinden değil fisyon enerjisinden de gerçekleştirilebileceğini gösteren çalışmalar yapılarak literatüre kazandırılmalıdır.

Özetle sonuç olarak bu tez kapsamında, modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE reaktör sisteminin hidrojen üretim potansiyelinin çok yüksek olduğu görülmüştür. Modifiye edilmiş lazer sürücülü LIFE reaktör sisteminde hem verimlilik hem de hidrojen üretim kapasitesi açısından en iyi yöntemin Mod 1 yapılandırılmalı buhar-metan reformasyonu olduğu ortaya çıkmıştır. Nükleer hidrojen üretiminde yüksek sıcaklıkta elektroliz ve S-I termokimyasal yöntem ile de hidrojen üretildiği görülmüştür. Ayrıca hidrojen üretim yöntemlerinde yüksek termal enerji ve elektrik enerjisi kullandığında üretilen hidrojen miktarının artacağı ve bu kapsamda ele alınan nükleer reaktörün yüksek sıcaklıklarda çalışması gerektiği ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

1. Hand, T. W. (2008). *Hydrogen production using geothermal energy*, Master Thesis, Mechanical Engineering of Utah State University, Utah, 39.
2. Mohapatra, S. (2012). Hydrogen Production Technologies with Specific Reference to Biomass. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2(3), 416-420.
3. Besenbuch, G. E., Brown, L. C., Funk, J. F. ve Sowalter, S. K. (2000, 2-3 October). *High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels using nuclear power*. The First Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, Paris, France.
4. Sherif, S. A., Barbir, F., ve Veziroglu, T. N. (2003). Principles of hydrogen energy production, storage ve utilization. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 62, 46-63.
5. Larsen, R., Wang, M., Wu, Y., Vyas, A., Santini, D., ve Mintz, M. (2005). Might Canadian oil sands promote hydrogen production for transportation? Greenhouse gas emission implications of oil sands recovery and upgrading. *World Resource Review*, 17(2), 220-242.
6. Kalamaras, C. M., ve Efstathiou, A. M. (2013). Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. *Hindawi Publishing Corporation Conference Papers in Energy*, 2013, 1-9.
7. Ozbilen, A. Z. (2010). *Life cycle assessment of nuclear-based hydrogen production via thermochemical water splitting using a copper-chlorine (Cu-Cl) cycle*, Doctoral dissertation, Faculty of Engineering and Applied Science University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, 17.
8. Meyers, R. (2018). *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Nuclear Assisted Hydrogen Production*. New York: Springer, 1-11.
9. Forsberg, C. W. (2003). Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(10), 1073-1081.
10. Yildiz, B., ve Mujid, S. K. (2006). Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(1), 77-92.
11. Brown, L. C., Besenbruch, G. E., Lentsch, R. D., Schultz, K. R., Funk, J. F., Pickard, P. S., ve Showalter, S. K. (2003). High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power. *General Atomics , Final Technical Report for the Period August 1, 1999 through September 30, 2002*, 1-40.
12. Wu, X., ve Onuki, K. (2005). Thermochemical water splitting for hydrogen production utilizing nuclear heat from an HTGR. *Tsinghua Science and Technology*, 10(2), 270-276.
13. Ryland, D. K., Li, H., ve Sadhankar, R. R. (2007). Electrolytic hydrogen generation using CANDU nuclear reactors. *International Journal of Energy Research*, 31(12), 1142-1155.

14. 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.
15. 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.
16. İnternet: Genesis Energy. Nuclear Energy. *Electrocity*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.electrocity.co.nz%2Fimages%2Ffactsheets%2FNuclear%2520Energy.pdf+%&date=2019-03-05>. Son Erişim Tarihi: 05.03.2019.
17. Lamarsh, J. R., Baratiá A. J. (2015). *Nükleer mühendisliğe giriş*. (Çev. Editörü. H. O. Zabunoğlu). Ankara: Palme Yayıncılık. 7-250.
18. Nikiforov Yu.M., Skorenky Yu.L., Ternopil (2011). *Modern physics Textbook*. Ternopil: TNTU, 102.
19. Krane, K., S. (2002). *Nükleer fizik 2.cilt*. (Çev. Editörü. B. Şarer). Ankara: Palme Yayıncılık. 65-529.
20. İnternet: Mike Run. Nuclear Fission. *Wikimedia*. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fcommons.wikimedia.org%2Fwiki%2FFile%3ANuclear_fission_reaction.svg&date=2019-03-05. Son Erişim Tarihi: 05.03.2019.
21. İnternet: Nuclear Weapon Archive. Fission Summary. *Nuclear weapon archive*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fnuclearweaponarchive.org%2FLibrary%2FFission.html&date=2019-03-05>. Son Erişim Tarihi: 05.03.2019.
22. İnternet: Nuclear Chain Reaction. *Nuclear-power.net*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.nuclear-power.net%2Fnuclear-power%2Freactor-physics%2Fnuclear-fission-chain-reaction%2F&date=2019-03-05>. Son Erişim Tarihi: 05.03.2019.
23. W. M. Stacey (2001). *Nuclear Reactor Physics*. New Jersey: John Wiley and Sons. 3-87.
24. Harms, A. A., Kingdon, D. R., Schoepf, K. F., ve Miley, G. H. (2000). *Principles of fusion energy: an introduction to fusion energy for students of science and engineering*. Singapore: World Scientific Publishing Company. 3-12.
25. Sadowski, M. (2005). Nuclear fusion-energy for future. *Nukleonika*, 50, 53-58.
26. İnternet: Fusion. Fusion for energy. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Ffusionforenergy.europa.eu%2Funderstandingfusion%2F&date=2019-03-05>. Son Erişim Tarihi: 05.03.2019.
27. Loveland, W. D., Morrissey, D. J., ve Seaborg, G. T. (2017). *Modern nuclear chemistry*. New Jersey: John Wiley and Sons. 250.

28. Tunç, G. (2017). *Toryumun Ve Çeşitli Nükleer Yakıtların Performanslarının Bir Füzyon-Fisyon Reaktör Sisteminde Nötronik Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 27-39.
29. Stacey, W. M. (2018). *Nuclear reactor physics*. New Jersey: John Wiley and Sons. 43.
30. Reuss, P. (2012). *Neutron physics*. Les Ulis: EDP sciences. 109.
31. Wu, Y. (2017). *Fusion Neutronics*. Singapore: Springer. 21-64.
32. Kramer, K. J., Latkowski, J. F., Abbott, R. P., Boyd, J. K., Powers, J. J., ve Seifried, J. E. (2009). Neutron transport and nuclear burnup analysis for the laser inertial confinement fusion-fission energy (LIFE) engine. *Fusion Science and Technology*, 56(2), 625-631.
33. Moses, E. I., de la Rubia, T. D., Storm, E., Latkowski, J. F., Farmer, J. C., Abbott, R. P., ve Lehman, R. F. (2009). A sustainable nuclear fuel cycle based on laser inertial fusion energy. *Fusion Science and Technology*, 56(2), 547-565.
34. 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.
35. Latkowski, J. F., Abbott, R. P., Aceves, S., Anklam, T., Cook, A. W., DeMuth, J., ... ve Fratoni, M. (2011). Chamber design for the laser inertial fusion energy (LIFE) engine. *Fusion Science and Technology*, 60(1), 54-60.
36. Kramer, K. J., Latkowski, J. F., Abbott, R. P., Anklam, T. P., Dunne, A. M., El-Dasher, B. S., ve Morris, K. R. (2013). Fusion technologies for Laser Inertial Fusion Energy (LIFE). *EPJ Web of Conferences*, 59, 11001.
37. Acır A., ve 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(7), 075601.
38. Acır, A., ve Aktı, S. (Baskıda). LIFE Füzyon Reaktöründe Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1).
39. Taşkolu, H., ve Acır, A. (2013). Bir Hibrit Reaktörde Triso Kaplamalı Candu Nükleer Yakıt Atıklarının Nötronik Analizi. *Politeknik Dergisi*, 16(4), 129-133.
40. Serfontein, D. E., Mulder, E. J., ve Reitsma, F. (2014). Optimisation of deep burn incineration of reactor waste plutonium in a PSMR DPP-400 core. *Nuclear Engineering and Design*, 271, 99-105.
41. Manson, B., Pigford, T. H., ve Levi, H. W. (1981). *Nuclear chemical engineering*. New York: McGraw-Hill. 370.
42. Gohar, Y., ve Smith, D. L. (2000). Multiplier, moderator, and reflector materials for advanced lithium–vanadium fusion blankets. *Journal of nuclear materials*, 283, 1370-1374.

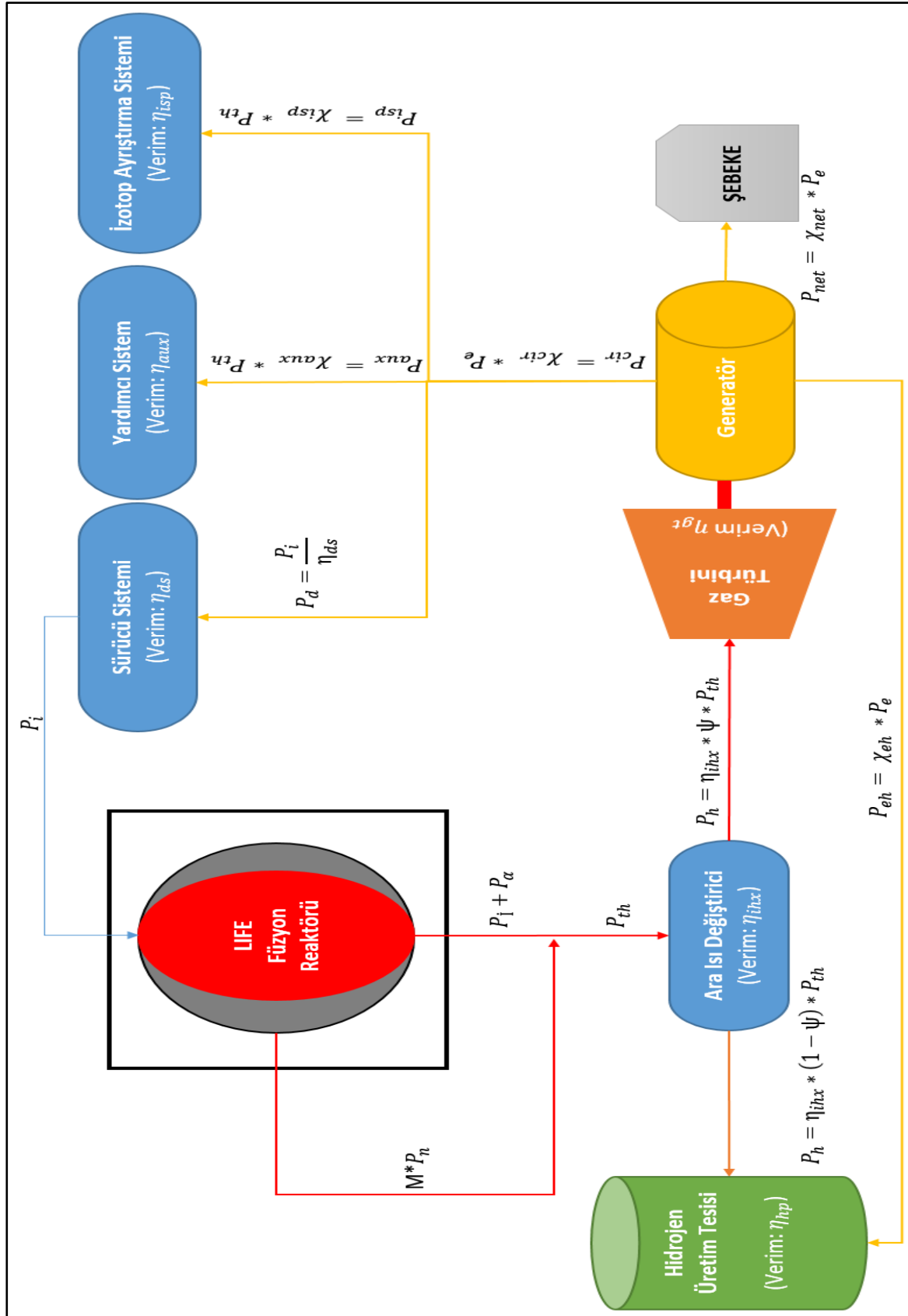
43. Acır, A. (2007). ThO₂ Yakıtlı Bir Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Farklı Reflektör Malzemelerin Nötronik Performansa Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 10(3), 263-270.
44. Moir, R. W., Shaw, H. F., Caro, A., Kaufman, L., Latkowski, J. F., Powers, J., ve Turchi, P. E. A. (2009). Molten salt fuel version of laser inertial fusion fission energy (LIFE). *Fusion Science and Technology*, 56(2), 632-640.
45. Crosbie, L. M., ve Chapin, D. (2003, 15-19 September). *Hydrogen production by nuclear heat*. GENES4/ANP2003, Kyoto, Japan.
46. EU Commission. (2006). *Hydrogen Energy and Fuel Cells, A vision of our future*. Luxembourg: European Communities. 10.
47. Tokio, O. (2007). *Energy Carriers And Conversion Systems With Emphasis On Hydrogen Vol 1*. Abu Dhabi: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). 50-55.
48. A. Barın (2011, 1-2 Aralık). *Dünyada ve Türkiyede Hidrojen Enerjisi Önemi ve Uygulamaları*. IV. Ulaşım Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul.
49. Corbo, P., Migliardini, F., ve Veneri, O. (2011). *Hydrogen fuel cells for road vehicles*. Berlin: Springer Science and Business Media. 1-32
50. Lipman, T. (2011). An overview of hydrogen production and storage systems with renewable hydrogen case studies. *Clean energy states Alliance*, 32-49.
51. Ramchandra, B., Clemens, A., Trudewind, P. Z. (2012). Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Methods. *Journal of Cleaner Production*, 85, 151-163.
52. Verfondern, K. (Editor). (2007). *Nuclear energy for hydrogen production Vol 58*. Jülich: Reihe Energietechnik/Energy Technology. 91-110
53. Padró, C. E. G., ve Putsche, V. (1999). *Survey of the economics of hydrogen technologies*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory. 2-6
54. Ptasinski, K. J. (2008). Efficiency analysis of hydrogen production methods from biomass. *International Journal of Alternative Propulsion*, 2(1), 39-49.
55. Georgescu, S. (2006). A framework for simulating the diffusion of innovations and its applications in modeling the transition to the hydrogen society. *Operations research as a management science research*, 52(10), 652-656.
56. McHugh, K. (2005, February). *Hydrogen production methods*. MPRWP-0001, MPR Associates Inc, Washington DC.
57. Rivera-Tinoco, R., Mansilla, C., Werkoff, F., ve Bouallou, C. (2008). Techno-economic study of hydrogen production by High Temperature Electrolysis coupled with an EPR, SFR or HTR–Water steam production and coupling possibilities. *International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications*, 1(3), 249-266.
58. Şenaktaş, B. (2005). *Hidrojen Enerjisi, Üretimi Ve Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 15-16.

59. Polat, C., ve Kılınç, N. (2007). The birth, growth, and share of a new market in the world and in Turkey: Hydrogen energy and hydrogen technology products market. *Journal of Human Sciences*, 4(2), 1303–5134.
60. Bakır, G. (2013). *Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Nükleer Hidrojen Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 25-28.
61. Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954-1971.
62. Yan, X. L., ve Hino, R. (Eds.). (2016). *Nuclear hydrogen production handbook*. Florida: CRC Press. 48-49
63. Özışık, G. (2012). *Nükleer Hidrojen Üretimi ve Üretilen Hidrojenin Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücrelerinde Uygulanması*, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 37-64.
64. Ozisik, G., Demir, N., Yalcin, S., Kahraman, N., ve Yapici, H. (2009, 3-6 May). A parametric study on hydrogen production from sulfur-iodine cycle in fusion-driven systems. International Conference on Hydrogen Production, Oshawa.
65. Genç, G. (2010). Hydrogen production potential of APEX fusion transmuted fueled minor actinide fluoride. *International journal of hydrogen energy*, 35(19), 10190-10201.
66. Kothari, R., Buddhi, D., ve Sawhney, R. L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 553-563.
67. Lutz, A. E., Bradshaw, R. W., Keller, J. O., ve Witmer, D. E. (2003). Thermodynamic analysis of hydrogen production by steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(2), 159-167.
68. Lanchi, M., Ceroli, A., Liberatore, R., Marrelli, L., Maschietti, M., Spadoni, A., ve Tarquini, P. (2009). S–I thermochemical cycle: A thermodynamic analysis of the HI–H₂O–I₂ system and design of the HIx decomposition section. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(5), 2121-2132.
69. Öztürk, I. T., Hammache, A., ve Bilgen, E. (1995). An improved process for H₂SO₄ decomposition step of the sulfur-iodine cycle. *Energy conversion and management*, 36(1), 11-21.
70. Brown, L.C. (2007, 4-9 November). *Evolution of the sulfur–iodine flowsheet*. AIChE Annual Meeting, Salt Lake City.
71. Richards, M., Shenoy, A., Schultz, K., Brown, L., Harvego, E., McKellar, M., ve Handa, N. (2006). H₂-MHR conceptual designs based on the sulphur–iodine process and high-temperature electrolysis. *International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications*, 1(1), 36-50.
72. Brown, L. C., Lentsch, R. D., Besenbruch, G. E., Schultz, K. R., ve Funk, J. E. (2003, 30 March-3 April). *Alternative flowsheets for the sulfur-iodine thermochemical hydrogen cycle*. 2003 Spring National Meeting of AIChE, New Orleans.

73. Fujiwara, S., Kasai, S., Yamauchi, H., Yamada, K., Makino, S., Matsunaga, K., ve Hoashi, E. (2008). Hydrogen production by high temperature electrolysis with nuclear reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 50(2-6), 422-426.
74. İnternet: Los Alamos National Laboratory. MCNP. *mcnp.lanl*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fmcnp.lanl.gov&date=2019-03-05>. Son Erişim Tarihi: 05.03.2019
75. Briesmeister, J. F. (2000). *MCNPTM-A general Monte Carlo N-particle transport code. Version 4C, LA-13709-M*. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2.
76. Goorley, T. (2004). *Criticality calculations with MCNP5*. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2-10.
77. MCNP, A. (2003). *General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory*. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2-20.
78. Sommer, C. M., Stacey, W. M., Petrovic, B., ve Stewart, C. L. (2013). Transmutation Fuel Cycle AnalHTEs of the SABR Fission-Fusion Hybrid Burner Reactor for Transuranic and Minor Actinide Fuels. *Nuclear Technology*, 182(3), 274-28

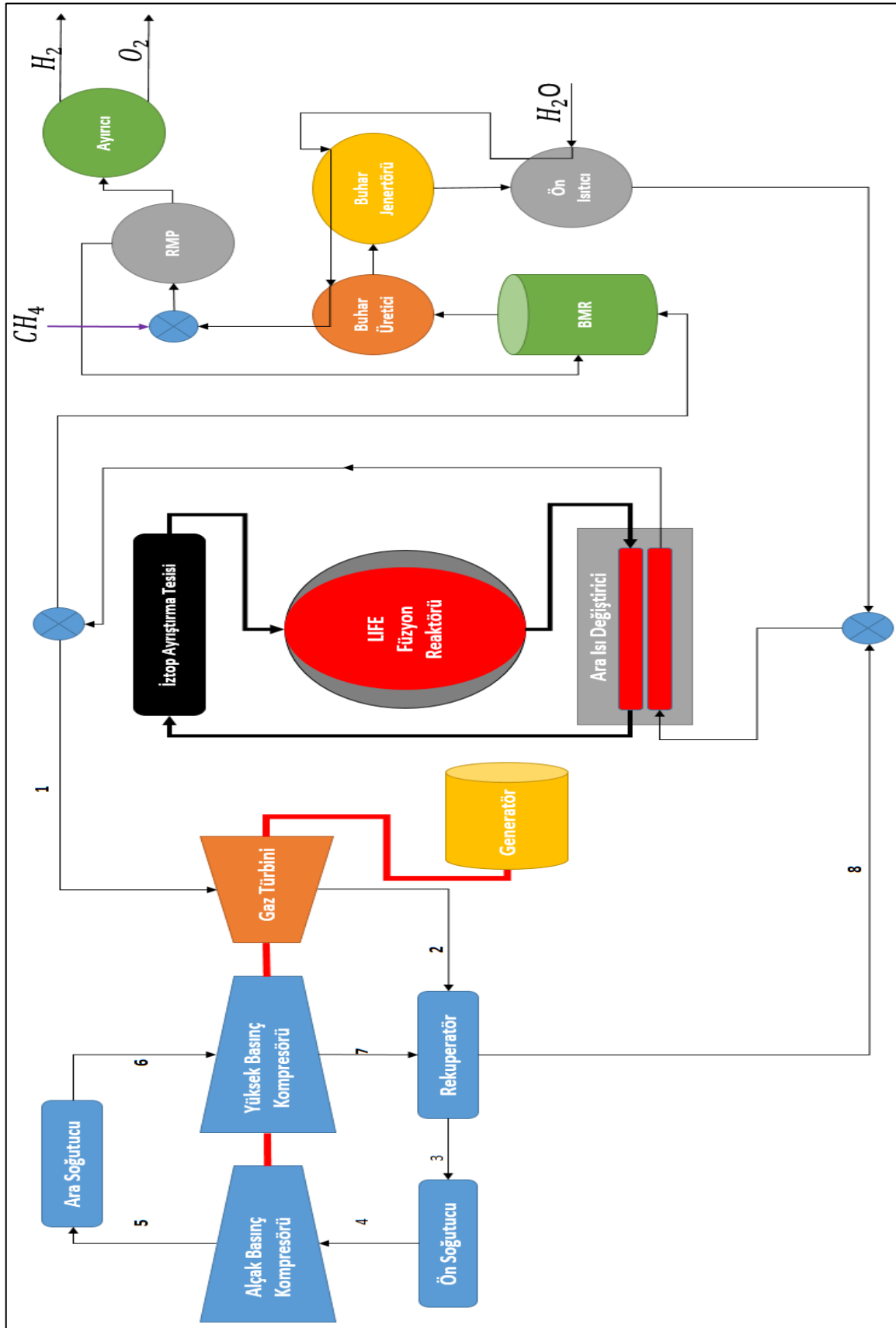


EK-1. Hidrojen üretim tesislerinin güç akış diyagramları



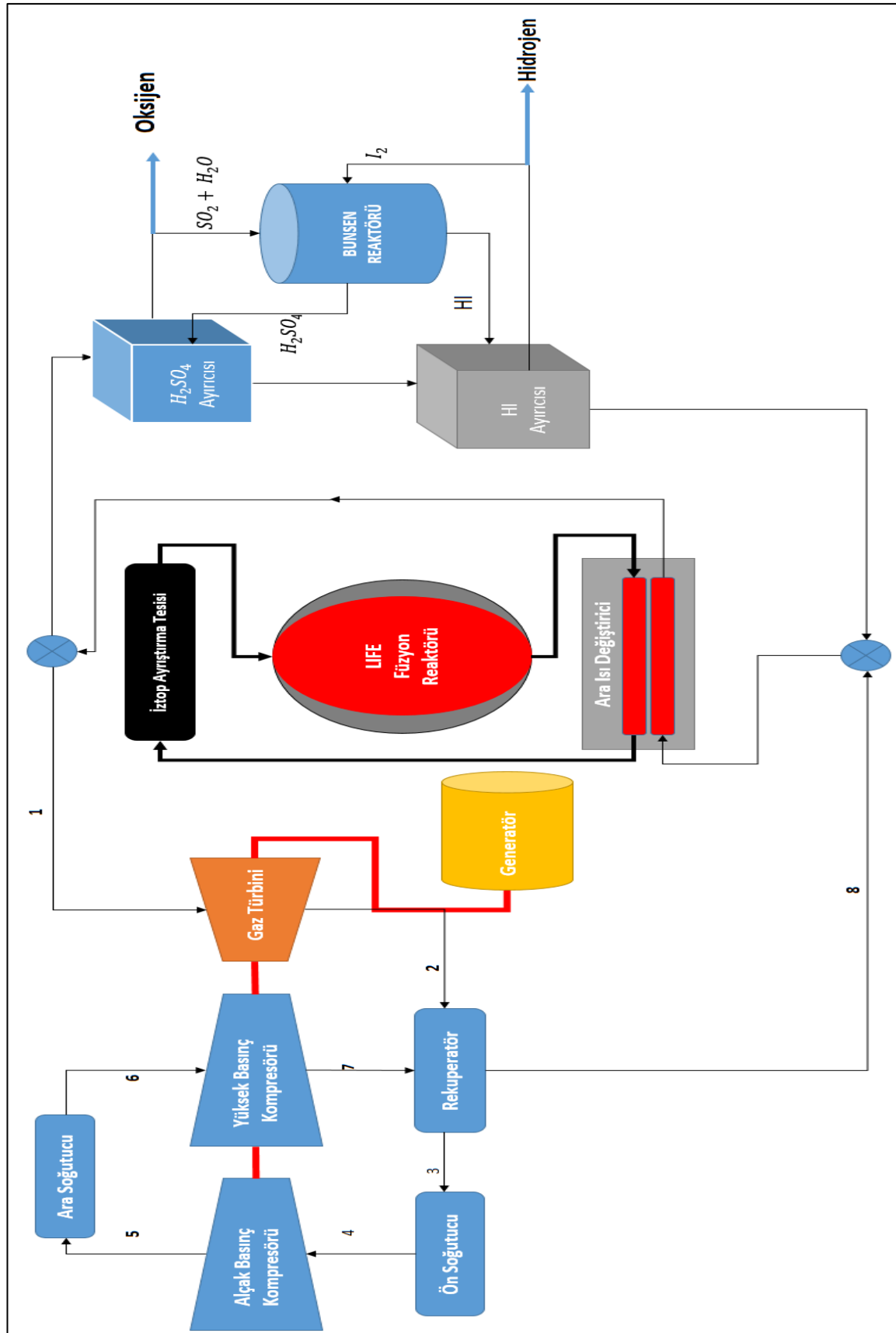
Şekil 1.1. Füzyon reaktörlü hidrojen üreten sistemin genel güç akış diyagramı [64]

EK-1. (devam) Hidrojen üretim tesislerinin güç akış diyagramları



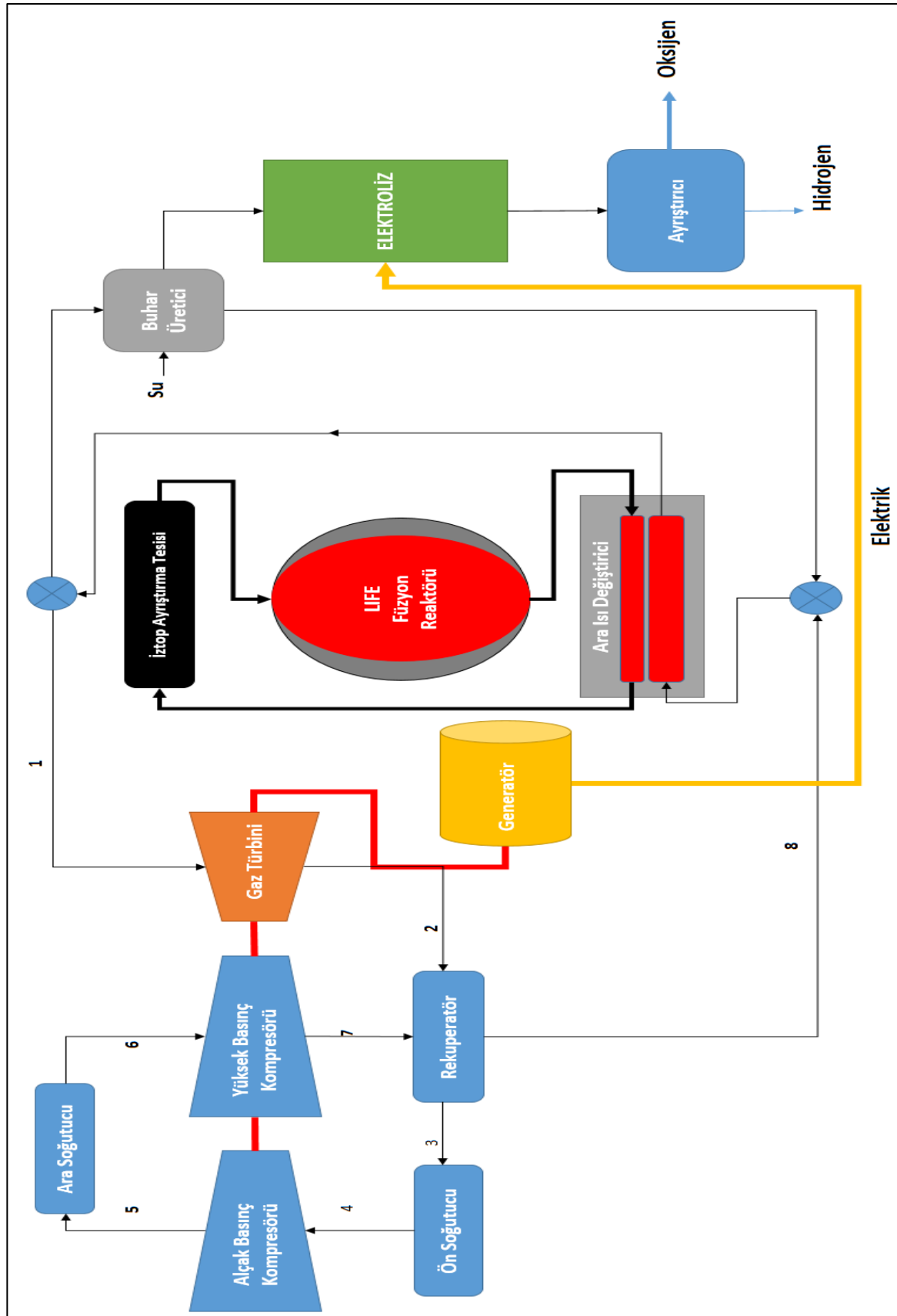
Şekil 1.2. Buhar metan reformasyonu ile hidrojen üreten sistemin akış diyagramı [45,64]

EK-1. (devam) Hidrojen üretim tesislerinin güç akış diyagramları



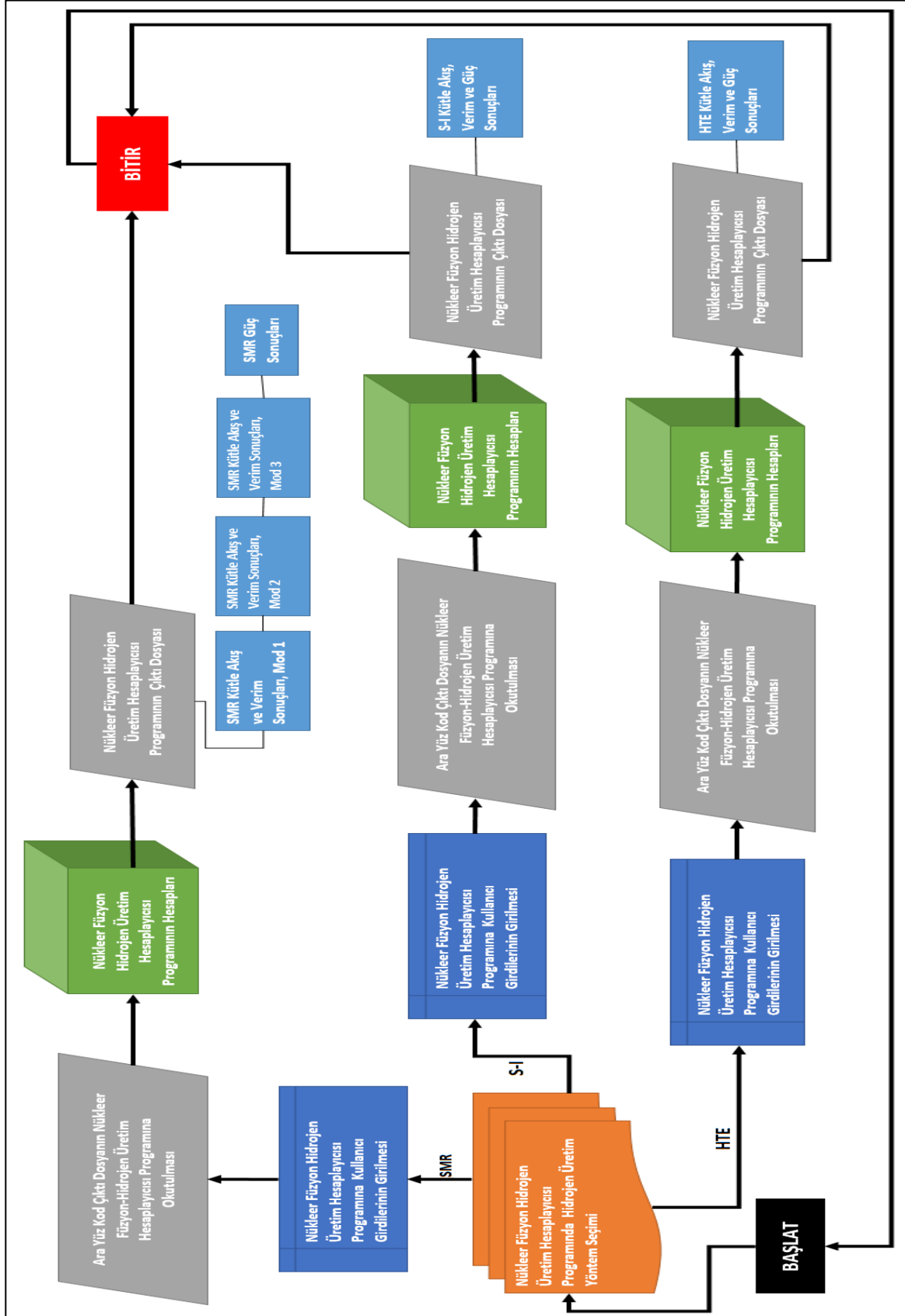
Şekil 1.3. S-I döngüsü ile hidrojen üreten sistemin akış diyagramı [63,71]

EK-1. (devam) Hidrojen üretim tesislerinin güç akış diyagramları



Şekil 1.4. HTE ile hidrojen üreten sistemin akış diyagramı [63, 71]

EK-2. Akış şemaları



Şekil 2.1. Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı akış şeması

Şekil 3.1. Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı SMR yöntemi sonuç çıktısı

EK-3. (devam) Ekran görüntüleri

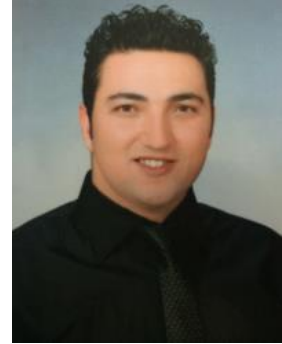
S-I_Sonuc - Notepad		
File Edit Format View Help		
Fraksiyon	Gereken Enerji	Hidojen Miktarı
0,694822270199007	5761,0616	21,5480779675371
0,692937289345211	5692,0552	21,2899735779817
0,690523151367412	5605,527733333333	20,9663352058339
0,689400175927291	5565,967733333333	20,8183690802164
0,687905542363508	5513,977866666667	20,6239115690426
0,685967475560197	5447,666133333334	20,375886031522
0,683845326766793	5376,446666666667	20,1095041166784
0,682702335997573	5338,675466666667	19,9682286332628
0,681027646900969	5284,059733333333	19,7639496024465
0,680209142355298	5257,674933333333	19,6652626299694
0,678085998839424	5190,1592	19,4127337755822
0,675652510272757	5114,376	19,1292821453776
0,674788695473062	5087,876533333333	19,0301662855799
0,672752768483349	5026,231733333333	18,799596462009
0,671033890404337	4975,056	18,6081840508116
0,669839975006942	4939,968	18,4769445306987
0,667627068169483	4875,903733333333	18,2373251846624
0,666049190718632	4830,977333333333	18,0692871324394
0,663696503789067	4765,124266666667	17,8229771442014
0,662723188976613	4738,269333333333	17,7225317337097
0,660801937651473	4685,912533333333	17,5267017831099
0,659620026897326	4654,126933333333	17,4078142178311
0,657655781076035	4601,999466666667	17,2128420418725
0,656451616856885	4570,466133333333	17,0948980286991
0,654671509041755	4524,427466666667	16,922699769466
0,653374614160893	4491,311733333333	16,7988371112679
0,651428598466718	4442,280266666667	16,6154448929664
0,650014379425528	4407,134933333333	16,4839909291931
0,649218234081212	4387,526933333333	16,4106511973653
0,647710649409714	4350,741866666667	16,2730641449071
0,645568893916068	4299,245066666667	16,080450849212
0,64353609634735	4251,1768	15,9006612844037
0,642685059893666	4231,282133333333	15,8262493342743
0,641599630323857	4206,101333333333	15,7320656786638
0,641003056006231	4192,3528	15,6806420889203
0,639527302784607	4158,617866666667	15,5544634391908
0,637972071768771	4123,484	15,4230523641496
0,636712271973466	4095,333333333333	15,3177605269348
0,635699172365478	4072,893066666667	15,2338272782875
0,633204809236725	4018,380533333333	15,0299342460598
0,631970084915837	3991,777866666667	14,9304323876735
0,630556800586749	3961,632	14,8176779110798

Şekil 3.2. Nükleer Füzyon-Hidrojen Üretim Hesaplayıcısı S-I yöntemi sonuç çıktısı

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKTI, Samet
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 27.06.1985, Çorum
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (546) 458 57 48
 Faks : 0 (312) 811 14 25
 e-mail : sametakti@hotmail.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Müh	Devam Ediyor
Lisans	Hacettepe Üniversitesi / Nükleer Enj. Müh.	2012
Lise	Çankırı Süleyman Demirel Fen Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	TUSAŞ	Uydu Mühendisi
2015-2018	TÜRKSAT A.Ş.	Uydu Kontrol Müh.
2012-2015	Park Termik Çayırhan Termik Santrali	Türbin Bakım Müh.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Acır, A., ve Akti, S. (Baskıda). LIFE Füzyon Reaktöründe Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1).

Hobiler

Spor, Kitap, Sinema



GAZİ GELECEKTİR..