



**FÜZYON-FİSYON BİR HİBRİD REAKTÖRDE H_2S -CI TERMOKİMYASAL
ÇEVİRİMİYLE HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ**

Ali KURNAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
NÜKLEER BİLİMLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2025

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.

Ali KURNAZ

22/05/2025

FÜZYON-FİSYON BİR HİBRİD REAKTÖRDE HyS-Cl TERMOKİMYASAL ÇEVİRİMİYLE HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ali KURNAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2025

ÖZET

Bu çalışma, doğal lityum soğutmalı ve UO_2 yakıtlı bir füzyon-fisyon hibrid reaktörde, HyS-Cl termokimyasal çevrimi kullanılarak hidrojen üretim potansiyelini incelemektedir. LiH ve Li_2C_2 bileşenlerini içeren blanket geometrileriyle tasarlanan reaktörde, nötron transport denklemlerine dayalı S_8-P_3 çözümleme yöntemiyle SCALE4.4a nötronik kodu kullanılarak temel performans parametreleri hesaplanmıştır. Tritiyum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), fisyon oranları, yanma oranları, fissil yakıt üretimi, termal güç oranı ($1-\psi$), toplam termal güç (P_{hpf}) ve hidrojen üretim hızı (\dot{m}_{H_2}) gibi parametreler, 5 MW/m^2 nötron duvar yükü altında 48 aylık işletim süreci boyunca değerlendirilmiştir. LiH blanket geometrisinde TBR 1,20562'den 1,25335'e, M 2,11404'ten 2,61708'e, \dot{m}_{H_2} ise 12,46 kg/s'den 15,88 kg/s'ye yükselmiştir. Li_2C_2 geometrisinde ise TBR 1,23166'dan 1,27653'e, M 2,10909'dan 2,57544'e, \dot{m}_{H_2} ise 12,43 kg/s'den 15,60 kg/s'ye ulaşmıştır. Yanma oranları LiH'de 79,80 GWd/tU, Li_2C_2 'de 77,78 GWd/tU olarak ölçülmüştür.

Bilim Kodu : 91704

Anahtar Kelimeler : Füzyon, fisyon, HyS-Cl, termokimyasal döngü, hidrojen, LiH, Li_2C_2 , trityum, enerji, yanma oranı, fissil, termal güç, nötron

Sayfa Adedi : 65

Danışman : Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU

INVESTIGATION OF HYDROGEN PRODUCTION POTENTIAL IN A FUSION-
FISSION HYBRID REACTOR USING THE HyS-Cl THERMOCHEMICAL CYCLE

(M. Sc. Thesis)

Ali KURNAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2025

ABSTRACT

This study investigates the hydrogen production potential in a natural lithium-cooled, UO_2 -fueled fusion-fission hybrid reactor utilizing the HyS-Cl thermochemical cycle. The reactor, designed with LiH and Li_2C_2 blanket geometries, employs the SCALE4.4 neutronics code with the $\text{S}_8\text{-P}_3$ method based on neutron transport equations to calculate key performance parameters. Parameters such as tritium breeding ratio (TBR), energy multiplication factor (M), fission rates, burn-up rates, fissile fuel production, thermal power fraction ($1-\psi$), total thermal power (P_{hpf}), and hydrogen production rate (\dot{m}_{H_2}) were evaluated over a 48-month operation period under a 5 MW/m^2 neutron wall load. In the LiH blanket geometry, TBR increased from 1.20562 to 1.25335, M from 2.11404 to 2.61708, and \dot{m}_{H_2} from 12.46 kg/s to 15.88 kg/s. In the Li_2C_2 geometry, TBR rose from 1.23166 to 1.27653, M from 2.10909 to 2.57544, and \dot{m}_{H_2} from 12.43 kg/s to 15.60 kg/s. Burn-up rates reached 79.80 GWd/tU for LiH and 77.78 GWd/tU for Li_2C_2 .

Science Code : 91704

Key Words : Fusion, fission, HyS-Cl, thermochemical cycle, hydrogen, LiH, Li_2C_2 , tritium, energy, burn-up, fissile, thermal power, neutron

Page Number : 65

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sürecinde bana destek olan ve katkı sağlayan herkese sonsuz teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Öncelikle, tez çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren, değerli bilgiler ve yönlendirmeleriyle bana rehberlik eden kıymetli danışmanım Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU'na minnettarım. Sayesinde, bilimsel anlamda çok şey öğrendim ve kendimi geliştirme fırsatı buldum. Ayrıca, bu süreçte bana yol gösteren ve akademik bakış açımı genişleten değerli hocam Prof. Dr. Adem ACIR'a da şükranlarımı sunarım. Onun katkıları, çalışmalarımnda önemli bir rehberlik sağladı.

Bu zorlu süreçte bana en büyük destekçi olan arkadaşım Serkan SİVRİKAYA'ya teşekkür ediyorum. Kendisi, her zaman yanımda oldu, moral verdi ve çalışmalarımnda bana cesaret aşıladı. Destekleri olmasaydı, birçok zorluğun üstesinden gelmem çok daha güç olurdu.

Ayrıca, bana hep destek veren ve sabırla her türlü zorluğu birlikte aşmamıza yardımcı olan sevgili eşim Tuğçe Nur KURNAZ'a teşekkür ederim. Onun sevgisi ve sabrı, bu yolculukta bana güç verdi.

Ve tabii ki, hayatımda her zaman en büyük dayanağım olan, bana sevgiyle, güçle ve öğütlerle hayatı anlatan annem Nursel KURNAZ'a ve babam Mehmet KURNAZ'a teşekkür ediyorum. Onların değerli destekleri, sevgi dolu yaklaşımları sayesinde bu süreçte her zaman ayakta kalmayı başardım.

Herkese sonsuz teşekkürlerimi sunar, katkılarınızın unutulmayacağını bilmenizi isterim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. MATERYAL VE METOT	11
3.1. Füzyon-Fisyon (Hibrid) Blanket Geometrisi.....	11
3.2. Nötron Difüzyon ve Transport Teorileri	16
3.2.1. Nötron transport teorisi.....	16
3.2.2. Nötron difüzyon teorisi.....	18
3.3. Hidrojen Üretim Teorisi	21
3.3.1. Termal gücün dağılımı.....	24
3.3.2. Gaz türbininden elektrik gücü üretimi.....	24
3.3.3. Yeniden dolaşımdaki elektrik gücü dağılımı	25
3.3.4. Hidrojen üretimi için güç ilişkisi	25
3.4. Nükleer Enerjiden Hidrojen Üretim Metotları	27
4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Nötronik Analiz	33

	Sayfa
4.1.1. Tritiyum üretimi (TBR)	33
4.1.2. Enerji çoğaltım faktörü (M)	35
4.1.3. Filyon tepkimeleri	37
4.1.4. Yanma oranları (Burn up).....	39
4.1.5. Fissil yakıt üretimi	51
4.2. Hibrid Reaktör ve Hidrojen Üretim Potansiyeli.....	48
4.3. Termokimyasal Çevrimlerin Hidrojen Üretim Verimlerinin Karşılaştırılması ...	53
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Nötronik hesaplamalarda kullanılan atomik yoğunluklar	12
Çizelge 3.2. TRISO yakıt parçacıklarının fiziksel özellikleri	13
Çizelge 3.3. Nükleer hidrojen üretimi için gerekli parametreler ve değerleri	26
Çizelge 3.4. Hibrid sülfür-klor çevriminin termokimyasal shomate verileri	29
Çizelge 4.1. 5 MW/m ² nötron duvar yükü altında farklı katı trityum üreticine bağlı trityum üretimi	33
Çizelge 4.2. 5 MW/m ² nötron duvar yükü altında oluşan fisyon oranları	39
Çizelge 4.3. 5 MW/m ² nötron duvar yükü altında gözlemlenen izotopların zamana bağlı değişimi	43
Çizelge 4.4. Farklı termokimyasal çevrimlerle hidrojen üretim miktarlarının literatürle karşılaştırılması	51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Westinghouse çevrimi – basitleştirilmiş model	7
Şekil 2.2 Entegre sistemin Aspen Plus modeli ve çok kademeli yeniden ısıtma rankine çevrimi	8
Şekil 3.1. Blanket geometrisinin kesit görünümü (cm).	11
Şekil 3.2 TRISO yapısının genel gösterimi	13
Şekil 3.3. CFETR füzyon reaktör blanket geometrisi.....	16
Şekil 3.4. Toroidal geometri ve torus kabuğu	21
Şekil 3.5. Füzyon-fisyon hibrid reaktör ve entegre edilmiş hidrojen üretim tesisinin genel akış şeması	22
Şekil 3.6. Hibrid sülfür-klor çevrimi termokimyasal akış şeması.....	27
Şekil 4.1. LiH blanket geometrisinde trityum üretim oranı (TBR) değişimi.....	34
Şekil 4.2. Li ₂ C ₂ blanket geometrisinde trityum üretim oranı (TBR) değişimi	35
Şekil 4.3. LiH blanket geometrisinde enerji çoğaltım faktörü (M) değişimi.....	36
Şekil 4.4. Li ₂ C ₂ blanket geometrisinde enerji çoğaltım faktörü (M) değişimi	37
Şekil 4.5. Fisyon süreci genel gösterimi	38
Şekil 4.6. LiH blanket geometrisinde yanma oranı (BU) değişimi.....	40
Şekil 4.7. Li ₂ C ₂ blanket geometrisinde yanma oranı (BU) değişimi	40
Şekil 4.8. LiH blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-238).....	44
Şekil 4.9. LiH blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-235, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240).....	44
Şekil 4.10. LiH blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-236, Pu-239, Pu-242, Am-241, Am-242, Am-243, Cm-244, Cm-245)...	45
Şekil 4.11. Li ₂ C ₂ blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-238)	46
Şekil 4.12. Li ₂ C ₂ blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-235, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240).....	46

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Li ₂ C ₂ blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-236, Pu-239, Pu-242, Am-241, Am-242, Am-243, Cm-244, Cm-245)...	47
Şekil 4.14. LiH blanket geometrisinde termal güç oranı (1 – ψ) zamana bağlı değişimi.....	48
Şekil 4.15. Li ₂ C ₂ blanket geometrisinde termal güç oranı (1 – ψ) zamana bağlı değişimi.....	49
Şekil 4.16. LiH blanket geometrisinde toplam termal güç (P_{hpf}) zamana bağlı değişimi	49
Şekil 4.17. Li ₂ C ₂ blanket geometrisinde toplam termal güç (P_{hpf}) zamana bağlı değişimi.....	50
Şekil 4.18. LiH blanket geometrisi üzerine entegre hidrojen üretim tesisinde üretilen hidrojen miktarının (\dot{m}_{H_2}) zamana bağlı değişimi	50
Şekil 4.19. LiH blanket geometrisi üzerine entegre hidrojen üretim tesisinde üretilen toplam hidrojen miktarı (mega ton- t) zamana bağlı değişimi.....	51
Şekil 4.20. Li ₂ C ₂ blanket geometrisi üzerine entegre hidrojen üretim tesisinde üretilen hidrojen miktarının (\dot{m}_{H_2}) zamana bağlı değişimi	51
Şekil 4.21. Li ₂ C ₂ blanket geometrisi üzerine entegre hidrojen üretim tesisinde üretilen toplam hidrojen miktarı (mega ton- t) zamana bağlı değişimi.....	52
Şekil 4.22. Farklı çevrimler için hidrojen üretim verimliliği karşılaştırması	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

^{241}Am

Amerikyum-241

^{243}Am

Amerikyum-243

$\text{Cl}_2(\text{g})$

Klor gazı

^{12}C

Karbon-12

^{13}C

Karbon-13

CO

Karbon monoksit

CO_2

Karbon dioksit

CuCl

Bakır(I) klorür

ε

Orantı sabiti

$\text{FeCl}_2(\text{s})$

Katı demir (II) klorür

$\text{FeCl}_3(\text{s})$

Katı demir (III) klorür

$\text{FeCl}_3(\text{l})$

Sıvı demir (III) klorür

$\text{H}_2(\text{g})$

Hidrojen gazı

$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$

Su buharı

$\text{H}_2\text{S}(\text{g})$

Hidrojen sülfür gazı

$\text{HCl}(\text{g})$

Hidrojen klorür gazı

HI

Hidrojen iyodür

H_2SO_4

Sülfürik asit

I_2

İyot

^6Li

Lityum-6

^7Li

Lityum-7

M

Enerji çoğaltım faktörü

MgCl_2

Magnezyum klorür

MgO

Magnezyum oksit

\dot{m}

Kütleli debi (kg/s)

η_{ihx}

Ara ısı değiştiricisinin verimliliği

η_{ds}

Sürücü sistem verimliliği

Simgeler**Açıklamalar**

η_{gt}	Gaz türbininin verimliliği
$\eta_{overall}$	Sistem verimliliği
η_{rec}	Alıcı verimliliği
Na_2CO_3	Sodyum karbonat
Na_2UO_4	Sodyum uranyum oksalat
$\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$	Sodyum diuranyum heptoksit
$\text{O}_2(\text{g})$	Oksijen gazı
P_a	Alfa parçacıklarından elde edilen füzyon gücü
P_{aux}	Yardımcı sistem elektrik gücü
P_{cir}	Yeniden dolaşıma giren elektrik gücü
P_{ds}	Sürücü sistem elektrik gücü
P_e	Brüt elektrik gücü
P_{eh}	Hidrojen üretim tesisine yönelen elektrik gücü
P_f	Füzyon güç çıktısı
P_{ge}	Türbinin toplam enerji girdisi
P_{hpf}	Toplam termal güç (MW)
P_i	Füzyon giriş gücü
P_{isf}	İzotop ayırma tesisi elektrik gücü
P_n	Nötronlardan gelen füzyon gücü
P_{net}	Şebekeye aktarılan elektrik gücü
P_{th}	Toplam termal güç
^{238}Pu	Plütonyum-238
^{239}Pu	Plütonyum-239
^{240}Pu	Plütonyum-240
^{241}Pu	Plütonyum-241
^{242}Pu	Plütonyum-242
Q	Füzyon enerji kazanım oranı
\dot{Q}_{abs}	Alıcıda emilen enerji
$\text{S}(\text{s})$	Katı kükürt
$\text{S}_2(\text{g})$	Kükürt gazı
SiC	Silisyum karbür
SnO	Kalay (II) oksit

Simgeler**Açıklamalar**

SnO₂	Kalay (IV) oksit
SO₂	Sülfür dioksit
SO₃	Sülfür trioksit
²³²Th	Toryum-232
ThO₂	Toryum dioksit
²³³U	Uranyum-233
²³⁴U	Uranyum-234
²³⁵U	Uranyum-235
²³⁶U	Uranyum-236
²³⁸U	Uranyum-238
UO₂	Uranyum dioksit
<i>x_a</i>	Alfa parçacıklarının enerji fraksiyonu
<i>x_{aux}</i>	Yardımcı güç fraksiyonu
<i>x_{cir}</i>	Yeniden dolaşıma giren elektriksel güç oranı
<i>x_{eh}</i>	Hidrojen üretim tesisine yönelen elektriksel güç oranı
<i>x_{isf}</i>	İzotop ayırma tesisi için güç fraksiyonu
<i>x_n</i>	Nötronların enerji fraksiyonu
<i>x_{net}</i>	Şebekeye aktarılan elektriksel güç oranı
ZnO	Çinko oksit
(1-ψ)	Termal güç oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

APEX	Gelişmiş güç çekimi
AS	Yardımcı sistem
CFETR	Çin Füzyon Mühendislik Test Reaktörü
cm	Santimetre
COOL	Soğutma
Cu-Cl	Bakır-klor termokimyasal döngü
D-D	Döteryum-Döteryum
D-T	Döteryum-Trityum
DEMO	Avrupa Demo Füzyon Reaktörü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DS	Sürücü sistemi
Fe-Cl	Demir klorür termokimyasal döngü
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
FFHR	Kuvvetsiz Helisel Reaktör
FLiBe	Lityum, berilyum ve florür karışımı
FLiNaBe	Lityum, sodyum, berilyum ve florür karışımı
g/cm³	Yoğunluk (gram/santimetre küp)
g/dak	Dakika başına gram
Gen	Jeneratör
Gt	Giga ton
GWd/tU	Ton uranyum başına giga watt-gün
GWP	Küresel ısınma potansiyeli
HTR-PM	Yüksek Sıcaklıklı Reaktör- Kürecik Yataklı Modül
HyS	Hibrid kükürt döngüsü
HyS-Cl	Hibrid kükürt-klor termokimyasal döngü
IHX	Ara ısı değiştirici
IPyC	İç pirolitik karbon
ISF	İzotop ayrıştırma sistemi
K	Kelvin
kg/s	Saniye başına kilogram
kgCO₂eq/kgH₂	Kilogram hidrojen başına karbon dioksit eşdeğeri
kWh	Kilowatt-saat
L	Litre
LIFE	Lazer Ataletsel Füzyon-Fisyon Reaktörü
LiH	Lityum hidrit
Li₂C₂	Lityum karbür
m	Metre
Mt	Megaton
m/s	Metre/saniye
MCNP	Monte Carlo N-Parçacık kodu
MeV	Mega elektron volt
Mg-Cl	Magnezyum klorür termokimyasal döngü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

MHD	Manyetik hidrodinamik
MW	Mega Watt
O/U	Oksijen/Uranyum oranı
OPyC	Dış pirolitik karbon
PACER	Kontrollü Enerji Reaksiyonları Geliştirme Programı
PyC	Pirolitik karbon
S-I	Kükürt-iyot termokimyasal döngü
SCWR	Süper Kritik Su Soğutmalı Reaktör
SiC	Silisyum karbür
SMR	Küçük Modüler Reaktör
SOMBRERO	Katı Hareketli Üretici Füzyon Reaktörü
SS-304	Paslanmaz çelik 304
TBR	Tritiyum üretim oranı
TRISO	Tri yapısal izotropik yakıt
UTC	Uranyum Tabanlı Termokimyasal Döngü
V-Cl	Vanadyum-klor termokimyasal döngü
WCLL	Su Soğutmalı Lityum Kurşun
\$/kWh	Kilowatt-saat başına Amerikan Doları
$10^{24}/\text{cm}^3$	Atomik yoğunluk
(n,γ)	Nötron yakalama tepkimesi

1. GİRİŞ

Enerji, canlıların yaşamını ve gelişimini şekillendiren temel bir unsurdur. Dünya tarihi boyunca, ateşin keşfinden sanayi devrimine kadar insanlar önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Günümüzde tarım, hayvancılık ve barınma gibi temel ihtiyaçlar, teknolojinin sunduğu imkanlarla birleşerek daha konforlu yaşam alanları oluşturmaktadır. Tüm bunların temelinde ise yüksek enerji tüketimi bulunmaktadır. Gün geçtikçe tüketim artarken, kaynaklar hızla tükenmektedir. Bu koşullar altında, çevreye zarar veren baskın fosil yakıtlar yerine alternatif enerji kaynakları öne çıkmaktadır.

Bu dönüşüm, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji üretiminde sürdürülebilir bir geleceği hedeflemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve hibrid sistemlerin kullanımı, enerji talebini karşılamada yenilikçi çözümler sunmaktadır. Özellikle, ileri teknolojilere dayalı enerji üretim yöntemleri, sınırlı kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanıyarak, insanlığın yaşam kalitesini uzun vadede destekleyebilir.

Hidrojen, enerji geçişinde temel bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmakta ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin geleceğinde kilit bir rol üstlenmektedir. Fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılan hidrojen, sıfır emisyonlu bir yakıt olarak çevresel etkileri azaltmakta ve yenilikçi enerji çözümleri sunmaktadır. Küçük ölçekli güç üretiminden büyük ölçekli kimyasal enerji ihracatına kadar geniş bir alanda etkin bir şekilde uygulanmaktadır. İkincil bir enerji kaynağı olan hidrojen, yenilenebilir enerji, nükleer enerji ve fosil yakıtlardan elde edilmektedir [1, 2]. Enerji sistemlerinin dönüşümünde önemli bir konuma sahip olan hidrojenin entegrasyonu yoğun bir şekilde araştırılmaktadır [3]. Son kullanımda karbon emisyonu üretmemesine karşın, üretim sürecinin temizliği ve enerji kaynaklarının niteliği, hidrojenin gerçek anlamda temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilmesi için belirleyici bir etkiye sahiptir [4, 5]. Hidrojen teknolojilerinin maliyeti, verimliliği ve dayanıklılığı, hidrojen ekonomisinin rekabet gücünü artırmak için geliştirilmesi gereken temel unsurlardır [3].

Hidrojen üretimi, fosil yakıtların gazlaştırılması ve reformasyonu yanı sıra yenilenebilir enerji ve nükleer enerji kaynaklarıyla etkin bir şekilde gerçekleştirilmektedir [1, 4].

Hidrojen depolama, sıkıştırma ve sıvılaştırma gibi geleneksel yöntemlerin ötesinde, metal hidritler ve kimyasal dönüşüm gibi yenilikçi yaklaşımlarla uygulanmaktadır [5]. Nükleer enerjiyle hidrojen üretimi, geleneksel yöntemlerin çevresel sorunlarını çözerek daha sürdürülebilir bir alternatif sunmakta ve elektrik üretiminde nükleer enerjinin tamamlayıcısı olarak öne çıkmaktadır [6, 7]. IV. Nesil nükleer reaktörler ve Küçük Modüler Reaktör (SMR) tasarımlarındaki ilerlemeler, hidrojen üretimini güçlendirmektedir [7]. Buhar metan reformasyonu yönteminde ortalama emisyon $11 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kgH}_2$ olarak hesaplanmıştır. Nükleer enerjiyle suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi, karbon ayak izini belirgin bir şekilde azaltmaktadır. Ortalama emisyon değeri $0,41 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kgH}_2$ olarak hesaplanmış olup, çevresel açıdan daha avantajlı bir seçenek sunmaktadır [8].

Bu çalışmada, lityum soğutuculu ve UO_2 yakıtlı bir fisyon-füzyon hibrid nükleer reaktör incelenmiş, nötronik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hibrid reaktöre entegre edilen hidrojen üretim ünitesinde hibrid kükürt klorür (HyS-Cl) termokimyasal döngüsüyle kullanılarak hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Nükleer enerjinin, sahip olduğu yüksek sıcaklık kapasiteleri sayesinde termokimyasal süreçlerle entegrasyonu, sürdürülebilir ve düşük karbonlu hidrojen üretimi açısından büyük bir fırsat sunmaktadır. Bu bağlamda, geliştirilen reaktör tasarımının termal verimliliği, enerji dönüşüm süreçleri ve üretilen hidrojen miktarı değerlendirilerek, nükleer destekli hidrojen üretiminin teknik ve ekonomik fizibilitesi ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, özellikle hibrid nükleer reaktörlerin entegre hidrojen üretim sistemi ile hibrid kullanım potansiyelini oluşturduğu ve hidrojen üretim teknolojileri için önemli bir temel teşkil ettiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, nükleer enerji kaynaklı hidrojen üretimi üzerine yapılan bu araştırma, temiz enerji, enerji arz güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik uygulanabilirlik açısından literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Hidrojen üretimi, nükleer enerji alanında yoğun bir şekilde araştırılan kilit bir yöntemdir. Nükleer enerjiyle üretilen elektrik suyun elektrolizini desteklerken, reaktörlerden elde edilen yüksek sıcaklıktaki termal enerji termokimyasal döngüler için gereken ısıyı sunmaktadır. Termokimyasal süreçler, yüksek sıcaklık reaksiyonlarıyla hidrojen üretimini enerji verimliliği ve düşük karbon emisyonlarıyla öne çıkarmaktadır. Nükleer enerjiyle hidrojen üretimi, sürdürülebilir enerji dönüşümünün temelini oluşturmaktadır. Termokimyasal proseslerle hidrojen üretimi, enerji üretimi dahil birçok endüstriyel alanda temiz ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Literatürde, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre hidrojen üretimine yönelik çalışmalar bulunmakta olup, aşağıda bu literatür çalışmaları detaylandırılmıştır.

Yılmaz ve Selbaş [9], güneş enerjisi destekli kükürt-iyot (S-I) termokimyasal çevriminin hidrojen üretiminde yüksek potansiyel sunduğunu ortaya koyarak, çevrimin enerji ve ekserji verimliliklerini analiz etmiştir. S-I çevriminin termodinamik performansı değerlendirilmiş; çevrimin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %43,85 ve %62,39, tüm sistemin ise %32,76 ve %34,56 olarak hesaplanmıştır.

Ying ve arkadaşları [10], kükürt-iyot (S-I) çevriminin enerji kaynaklarıyla entegre edilerek hidrojen üretiminde yüksek verim sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmalarında, HI-I₂-H₂O elektroliziyle entegre edilmiş gelişmiş S-I çevrimini inceleyerek, sistemin enerji ve ekserji verimliliklerini sırasıyla %15,3-31,0 ve %32,8 olarak hesaplamışlardır. En yüksek ekserji yıkımı, 1110 K sıcaklıktaki H₂SO₄ ayrışma aşamasında ortaya çıkmış ve bu aşamanın ekserji verimliliği %23,7 olarak hesaplanmıştır.

Acır ve Özkaya [11], PACER füzyon blanket geometrisinin nötronik performansı ve hidrojen üretim potansiyelini incelemiştir. Monte Carlo (MCNP) yöntemiyle yapılan nötronik hesaplamalarda, %2 minör aktinit florür yakıtı FLiBe soğutucuya karıştırılarak 1000 MW elektrik üretimi analiz edilmiştir. Başlangıçta trityum üretim oranı (TBR) 1,27, enerji çoğaltım faktörü (M) 3,3 olarak hesaplanmış; TBR, 7 yıl boyunca >1,05 seviyesinde kalarak reaktörü sürdürülebilir kılmıştır. İşletim sonunda yanma oranı ~800 GWd/tM'ye ulaşmıştır. Hidrojen üretiminde, demir klorür (Fe-Cl) ve magnezyum klorür (Mg-Cl)

(seçenek I) ve (Mg–Cl) (seçenek II) termokimyasal döngüleri değerlendirilmiştir. Fe–Cl döngüsünde termal g oranı ($1 - \psi$) 0,6494, toplam termal güç (P_{hpf}) 5298,8 MW, hidrojen üretimi ~534,65 kg/yıl; Mg–Cl (seçenek I) için sırasıyla 0,131, 3608,43 MW, ~1236,82 kg/yıl; Mg–Cl (seçenek II) için ise 0,095, 3488,925 MW, ~806,03 kg/yıl olarak hesaplanmıştır.

Safari ve Dinçer [12], inko oksit (ZnO), kükürt-iyot (S-I), demir-klor (Fe-Cl), magnezyum-klor (Mg-Cl), bakır-klor (Cu-Cl) ve hibrid kükürt (HyS-S) termokimyasal döngülerini enerji ve ekserji verimliliği, hidrojen üretim maliyeti ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) açısından karşılaştırmıştır. Vanadyum-klorür döngüsü %77 ile en yüksek ekserji verimliliğine ulaşırken, kükürt-iyot ve hibrid kükürt döngüleri sırasıyla 0,48 ve 0,50 kg CO₂ eq/kg H₂ GWP değerleriyle en düşük çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Asal ve Acır [13], Lazer Ataletsel Sınırlama Füzyon-Fisyon (LIFE) reaktörünün hidrojen üretimi ve nötronik analizini incelemiştir. Reaktörün bakır-klor (Cu–Cl), kobalt-klor (Co–Cl) ve kükürt-iyot (S–I) termokimyasal döngüleriyle entegre hidrojen üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. Monte Carlo N-Parçacık Kodu ile statik nötronik hesaplamalar yapılarak optimum işletim koşulları belirlenmiş; tristrktrel izotropik (TRISO) kaplı toryum karbür (ThC) yakıtı, doğal lityum ve FLiNaBe soğutucuları kullanılmıştır. Trityum retim oranı ve enerji çoğaltım faktörü (M) hesaplanmış; M’ye bağlı olarak termal g oranları, toplam termal g ve hidrojen üretim miktarları elde edilmiştir. Cu–Cl döngüsü en yüksek hidrojen miktarını (9,00 kg/s), Co–Cl döngüsü en düşük miktarı (4,80 kg/s), S–I döngüsü ise 7,36 kg/s üretmiştir.

Farsi ve arkadaşları [14], hidrojenin 2050 yılına kadar küresel enerji talebinin %18’ini, ulaşım ihtiyaçlarının %20–25’ini karşılayabileceğini ve karbon dioksit emisyonlarını yılda 6 Gt azaltabileceğini belirtmiştir. 2019’da hidrojen talebinin yaklaşık 70 milyon ton olduğu, ek olarak 45 milyon tonluk talebin saf olmayan hidrojen formlarına yönelik olduğu bildirilmiştir.

Farsi ve arkadaşları [15], laboratuvar ölçeğinde entegre bakır-klor (Cu–Cl) termokimyasal çevrimiyle hidrojen üretimini incelemiş; sistemin saatte 100 L hidrojen ürettiğini, enerji ve ekserji verimliliklerinin sırasıyla %11,6 ve %34,9 olduğunu hesaplamıştır.

Çakıroğlu ve arkadaşları [16], güneş enerjisi tabanlı kobalt-klor (Co-Cl) termokimyasal döngüsünün hidrojen üretimini (\dot{m}_{H_2}) gri ilişkisel analizle optimize etmiştir. Aylık ışıma ortalaması (143,8 kWh), rüzgâr hızı (5 m/s), alıcı yüksekliği (8 m), alıcı yarıçapı (3 m) ve heliostat sayısı (850) parametreleriyle, alıcıda emilen enerji (\dot{Q}_{abs}) 50,2 GW, alıcı verimliliği (η_{rec}) %64,1, sistem verimliliği ($\eta_{overall}$) %22,2 ve hidrojen üretimi (\dot{m}_{H_2}) 122,59 ton/ay olarak hesaplanmıştır.

Razi ve arkadaşları [17], bakır-klorür (Cu-Cl) termokimyasal döngüsünü termodinamik açıdan analiz etmiştir. Cu-Cl prosesinin bileşenleri enerji ve ekserji açısından değerlendirilmiş, Aspen Plus yazılımıyla modellenen sistemde termoliz reaktörünün en yüksek ekserji kaybına sahip olduğu belirlenmiştir. Sistemin genel enerji verimliliği %6,8, ekserji verimliliği %10,4 olarak hesaplanmıştır.

Özcan ve Dinçer [18], geleneksel üç adımlı Mg-Cl döngüsüne alternatif olarak, hidroliz reaksiyonundan kuru HCl'yi yakalamak ve döngü performansını artırmak için yeni bir dört adımlı Mg-Cl döngüsünü incelemiştir. MgCl₂'nin doğrudan hidrolizi yerine, MgO ve HCl üreten bir ara adım eklenmiş; bu ürün, çözünme reaktöründe kuru HCl ve ince MgO'ya ayrıştırılmıştır. Hidroliz adımından sonra kuru HCl gazını yakalamak için bir ayırma süreci geliştirilmiştir.

Özcan ve Dinçer [19], farklı bir çalışmada, dört adımlı Mg-Cl döngüsünün ısı gereksinimlerini analiz ederek geleneksel üç adımlı Mg-Cl döngüsüyle karşılaştırmıştır. Elektriksel iş tüketiminin azaltılmasının, döngünün ekserji verimliliğini artırdığı ve su elektrolizi ile üç adımlı konfigürasyona kıyasla daha uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Kuru HCl yakalama sürecinin, döngüyü su elektrolizine göre %13 daha verimli kıldığı ve termodinamik açıdan üç adımlı yapıdan üstün olduğu vurgulanmıştır.

Balta ve arkadaşları [20], magnezyum-klor (Mg-Cl) termokimyasal döngüsünün hidrojen üretimi için enerji ve ekserji analizlerini incelemiştir. Parametrik bir yaklaşımla, döngü performansının çevresel sıcaklık ve işletim koşullarına bağlı değişimleri araştırılmıştır. Mg-Cl döngüsünün, sırasıyla %63,63 enerji ve %34,86 ekserji verimlilikleriyle yüksek potansiyel sunduğu belirlenmiştir.

Teymouri ve arkadaşları [21], güneş enerjisinin sürekliliğini desteklemek için magnezyum-klor (Mg-Cl) termokimyasal döngüsüyle hidrojen üretimini incelemiştir. Hidrojenin metana dönüştürüldüğü yeni bir entegre sistem önerilmiş; Mg-Cl döngüsünün enerji verimliliği %26,25, ekserji verimliliği %59,88 olarak hesaplanmıştır. Metan üretimiyle sistemin enerji verimliliği %7,04, ekserji verimliliği ise %60,28 olarak belirlenmiştir.

Safari ve Dinçer [22], demir-klor (Fe-Cl) termokimyasal döngüsünü hidrojen üretimi için incelemiştir. Aspen Plus yazılımıyla yapılan modellemede, sıcaklık, basınç ve buhar besleme oranının ürünler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Basıncın üretim oranlarına etkisi sınırlı kalırken, sıcaklık artışının oksijen ve manyetit üretimini artırdığı, ancak hidrojen üretimini azalttığı belirlenmiştir.

Balta ve arkadaşları [23], bakır-klor (Cu-Cl), magnezyum-klor (Mg-Cl), demir-klor (Fe-Cl) ve vanadyum-klor (V-Cl) termokimyasal döngülerinin verimlerini karşılaştırmıştır. Isı ve/veya elektrikle çalışan bu döngülerin enerji ve ekserji verimlilikleri analiz edilmiş; V-Cl döngüsünün %40'ın üzerinde verimlilikle en yüksek performansı gösterdiği ve düşük sıcaklık döngüleri arasında en umut verici seçenek olduğu belirlenmiştir.

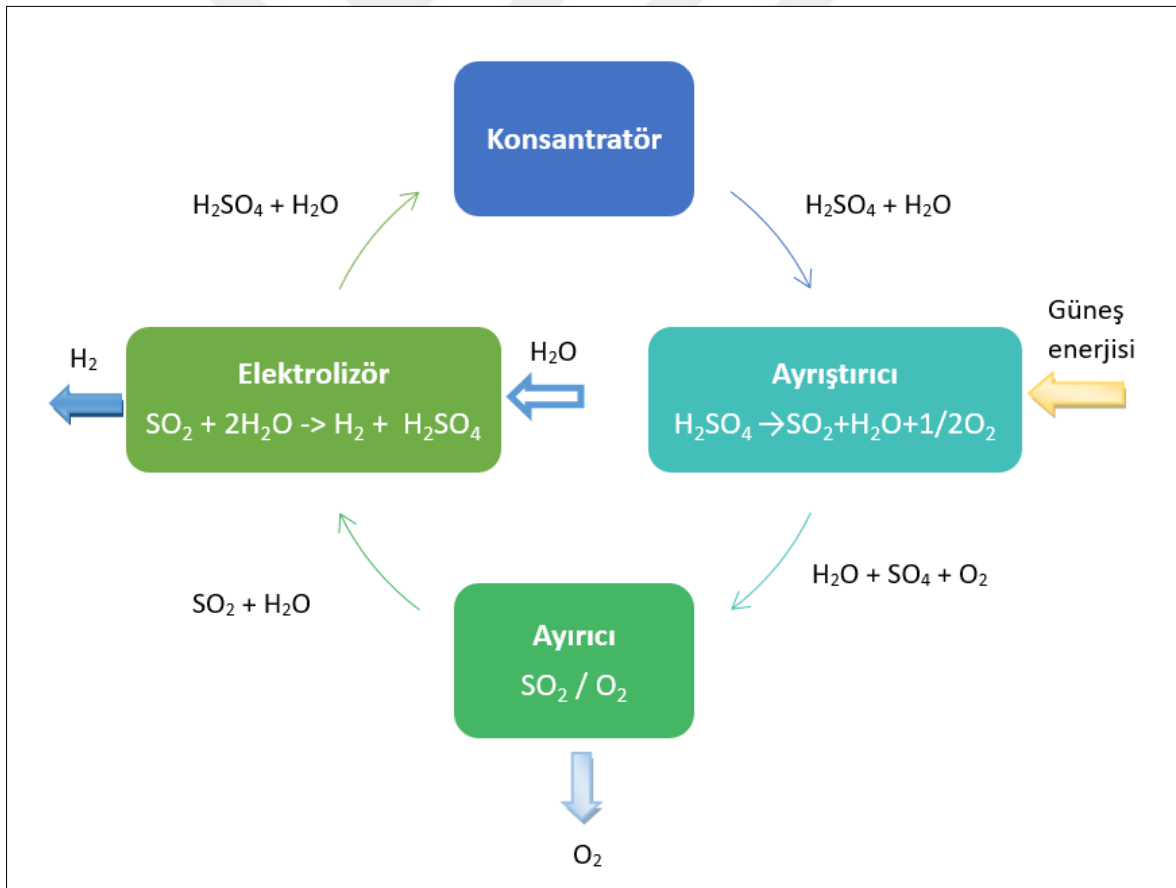
Müller ve Steinfield [24], ZnO'nun termal ayrışması için bir güneş kimyasal reaktörünü modellemiştir. Deneysel verilerle doğrulanan model, 1900 K reaktör sıcaklığında, 12 g/dak ZnO ayrışma hızıyla güneş-kimyasal enerji verimliliğinin %14'e ulaştığını göstermiştir. Verimlilik sıcaklık artışıyla yükselmiş, ancak reaktörün durağanlaşma sıcaklığına yaklaştıkça azalmıştır.

Steinfield [25], güneş enerjisiyle hidrojen üretimi için iki aşamalı bir termokimyasal döngüyü incelemiş ve ekserji verimliliğini analiz etmiştir. İkinci kanun analizi, güneş alıcı-reaktörle gerçekleştirilen süreçte maksimum ekserji verimliliğinin %29 olduğunu ortaya koymuştur. Büyük ölçekli bir kimyasal tesis için yapılan ekonomik değerlendirme, yıllık 61 milyon kWh hidrojen üretimiyle güneş hidrojeninin maliyetinin 0,13-0,15 \$/kWh arasında olduğunu ve elektroliz gibi yenilenebilir enerji yöntemlerine karşı rekabetçi olabileceğini göstermiştir.

Loutzenhiser ve arkadaşları [26], Zn/ZnO redoks reaksiyonlarıyla H₂ ve/veya CO üretimi için iki aşamalı güneş enerjili termokimyasal döngüleri kapsamlı bir şekilde incelemiştir.

Döngü, (1) yoğunlaştırılmış güneş enerjisiyle ZnO'nun Zn ve O₂'ye endotermik ayrışması ve (2) Zn'nin H₂O/CO₂ ile ekzotermik oksidasyonu ile H₂/CO üretimini içermektedir; oluşan ZnO ilk adıma geri dönmektedir. Çalışma, güneş enerjisi teknolojilerindeki gelişmeleri ve yaşam döngüsü analizini değerlendirmiştir.

Lassouane [27] yaptığı çalışmada, hibrid kükürt (HyS) döngüsü veya Westinghouse döngüsünün, tam ölçekli güneş enerjisi ile hidrojen üretimi için ana adaylardan biri olduğunu belirtmiştir (Şekil 2.1). İki adımlı ve yalnızca sıvı reaktör kullanan bu döngü, SO₃'ün 800 °C üzerindeki sıcaklıklarda SO₂ ve O₂'ye ayrışmasını gerektirir. Ayrışan SO₂, elektrolizörde oksitlenerek H₂SO₄ üretilir ve hidrojen sağlar. Çalışma, kükürt asidi ayrışma adımına odaklanmıştır; güneş enerjisinin kullanımını ve sıcaklık ile basıncın SO₃'ün SO₂'ye dönüşümündeki termodinamik etkilerini incelemiştir.



Şekil 2.1. Westinghouse çevrimi – basitleştirilmiş model [28].

transferiyle sınırlı bir süreç olduğu belirlenmiştir. Elektroliz adımı, 80 °C’de 2.0 M CuCl çözeltisiyle 50 L/saat hidrojen üretimi sağlanmış ve bu adım laboratuvar ölçeğinde başarıyla entegre edilmiştir.

Aimei ve arkadaşları [33], Uranyum Tabanlı Termokimyasal Döngü’yü (UTC), güvenliği ve yüksek verimliliği nedeniyle diğer döngülere üstün bir alternatif olarak değerlendirmiştir. Na₂CO₃ kullanılarak yüksek verimli hidrojen üretimi sağlanmış; reaksiyonun kimyasal dönüşüm oranının Na₂CO₃ kütlesiyle doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Na₂UO₄, Na₂U₂O₇ yerine ilk ürün olarak elde edilmiş ve döngü, hızlı reaksiyon hızı ve yüksek verimliliğiyle avantaj sunmuştur.

Forsberg ve arkadaşları [34], suyun termokimyasal döngüyle hidrojen üretimi için yeni bir uranyum döngüsü (UTC) geliştirmiştir. En yüksek sıcaklığı 700°C’nin altında olan bu döngü, yüksek sıcaklıklı nükleer reaktörler ve bazı güneş sistemleriyle uyumludur. Sürecin kimyasal uygulanabilirliği ortaya konmuş, ancak mühendislik ve ekonomik fizibilitesi için ek araştırmalara ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Mao ve arkadaşları [35], iki aşamalı termokimyasal döngüyle hidrojen üretimini incelemiştir. Yüksek sıcaklıklı reaktörlerin ısısını doğrudan kullanan bu yöntem, enerji verimliliğini artırarak sanayi ölçeğinde hidrojen üretimi için potansiyel sunmaktadır. Metal oksit katalizörlerinin özellikleri, reaksiyon ısı kaynakları ve kimyasal reaktörler analiz edilmiş; ZnO/Zn, SnO₂/SnO, seryum ve demir bazlı oksitler arasında özellikle katkılı seryum oksitler ile demir bazlı oksitlerin yüksek redoks aktivitesi ve çevrim stabilitesiyle öne çıktığı belirlenmiştir.

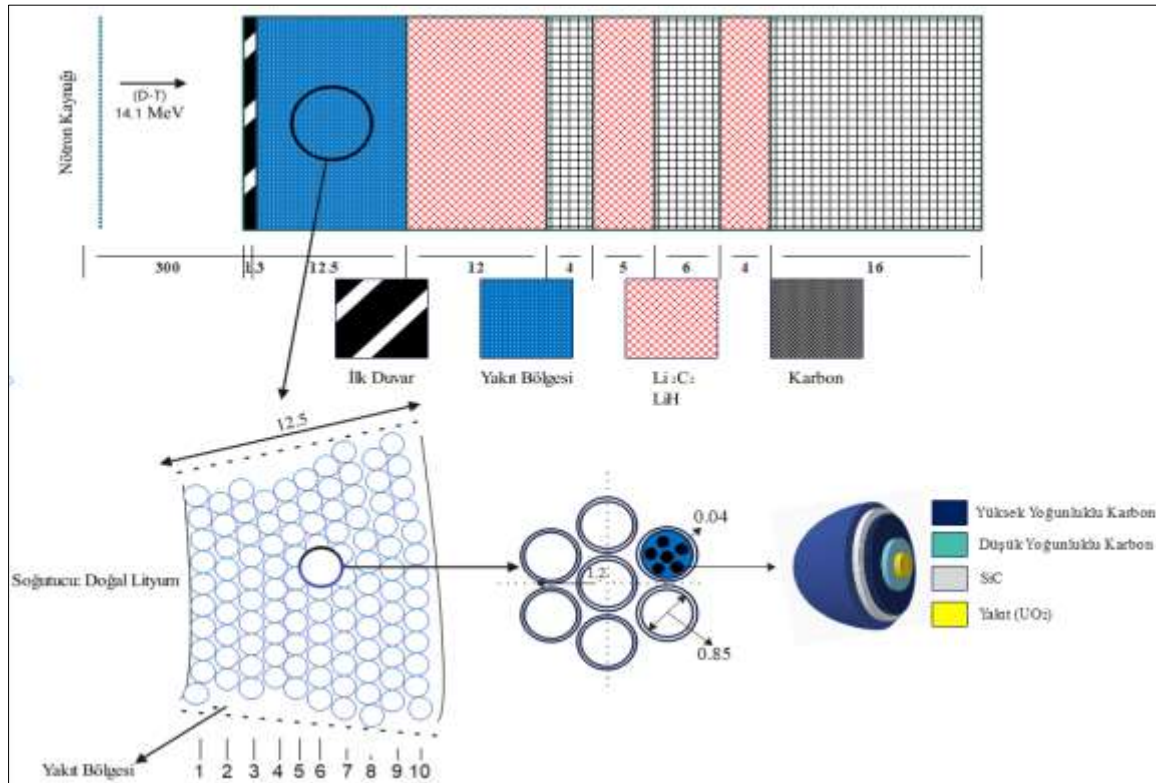
Bu tez kapsamında, doğal lityum soğutmalı ve UO₂ yakıtlı bir hibrid reaktörde, HyS-Cl termokimyasal döngüsüyle hidrojen üretim potansiyelini değerlendirmek için yenilikçi bir çalışma yürütülmüştür. LiH ve Li₂C₂ bileşenlerini içeren bir hibrid reaktörde, nötron transport denklemlerine dayalı S₈-P₃ çözümlenme yöntemiyle SCALE4.4 nötronik kodu kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalarla trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), yanma oranı ve fissil yakıt üretim oranları belirlenmiştir. Enerji çoğaltım faktörüne bağlı olarak, hibrid reaktöre entegre HyS-Cl döngüsüyle termal güç fraksiyonu, tesisin enerji gereksinimi ve hidrojen üretim kapasitesi incelenmiştir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Füzyon-Fisyon (Hibrid) Blanket Geometrisi

Füzyon-fisyon hibrid reaktörlerinde, D-T veya D-D füzyon nötron kaynağı, yüksek enerjili nötronlar üreterek reaktörün merkezinde yer alır. Bu kaynağın çevresine, belirli kalınlıklarda fertil ve fissil yakıtlar, lityum üreteçler ve yansıtıcılar konumlandırılır. Yüksek enerjili nötronlar, UO_2 , ThO_2 veya nükleer atık yakıtlarla etkileşime girerek enerji üretimini sağlar. Fertil yakıtlar (^{238}U veya ^{232}Th), reaksiyon sürecinde fissil yakıtlara (^{239}Pu ve ^{233}U) dönüşürken, yüksek enerjili nötronlarla fisyon yaparak enerji üretimine katkıda bulunur. [36]. Zincirleme reaksiyonlar sırasında yeni fissil izotoplar oluşur. Hibrid reaktörlerin öne çıkan avantajlarından biri, ticari nükleer reaktörlerin nükleer atıklarından olan aktinitleri yüksek verimle yakabilmesidir [36]. Bu tezde kullanılan hibrid reaktör modeli Şekil 3.1’de sunulmuştur. Reaktörün merkezine D-T füzyon nötron kaynağı yerleştirilmiş olup, bu kaynağı oluşturan nötron reaksiyonu aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.1. Blanket geometrisinin kesit görünümü (cm)

Blanket geometrisinde ilk duvar malzemesi olarak 1,3 cm kalınlığında SS-304 kullanılmıştır. İlk duvarın hemen ardında, TRISO kaplamalı UO₂ yakıtlı bölgeden oluşan bir sandviç yapı yer alır. Yakıt bölgesini, LiH ve Li₂C₂ içeren katı trityum üretici bölge ve üç grafit (C) bölgesi çevreler. Katı trityum üreteçleri trityum üretimine katkı sağlarken, grafit malzemesi nötronların geri yansımalarını destekler. Yakıt bölgesinde soğutucu olarak doğal lityum tercih edilmiştir. Reaktörde kullanılan atomik yoğunluklar Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Nötronik hesaplamalarda kullanılan atomik yoğunluklar [37, 38]

	Malzeme	İzotop	Atomik yoğunluk (10 ²⁴ /cm ³)
İlk Duvar	SS-304	C	7,873×10 ⁻⁴
		Si	6,734×10 ⁻⁴
		Cr	1,728×10 ⁻²
		Fe	5,926×10 ⁻²
		Ni	8,055×10 ⁻³
Yakıt Bölgesi	Doğal uranyum (²³⁵ U: %0,7, ²³⁸ U: %99,3).	²³⁵ U	2,111×10 ⁻²
		²³⁸ U	1,45×10 ⁻⁴
		¹⁶ O	4,82×10 ⁻³
Trityum Üretim Bölgesi (Ayrı olarak)	LiH (%100) (⁶ Li: %7,5, ⁷ Li: %92,5)	⁶ Li	3,30×10 ⁻³
		⁷ Li	4,74×10 ⁻²
		H	5,87×10 ⁻²
	Li ₂ C ₂ (%100)	⁶ Li	2,47×10 ⁻³
		⁷ Li	3,55×10 ⁻²
		C	3,29×10 ⁻²
Reflektör	Karbon (¹² C: %98,9, ¹³ C: %1,1)	¹² C	1,128.10 ⁻¹
		¹³ C	1,25.10 ⁻³

Katı trityum üreteçleri arasında Li_2C_2 , yüksek basınç altında bile elastik özellikleriyle malzeme stabilitesini koruduğu için tercih edilmiştir. Yaygın bir yansıtıcı olan grafit (C), üstün yansıtma özelliği nedeniyle mantoda kullanılmak üzere seçilmiştir. Reaktör yakıt bölgesinde yer alan TRISO yakıt parçacıklarının fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. TRISO yakıt parçacıklarının fiziksel özellikleri [37]

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	$D_{\text{iç}}$ kısım (cm)	$D_{\text{dış}}$ kısım (cm)	Hacim (cm^3)	Kütle (gr)
UO_2	10,5	0	0,158	0,002065237	0,021684988
PYC (porous)	1	0,158	0,176	0,000789306	0,000789306
PYC (dense)	1,8	0,176	0,18	0,000199085	0,000358353
SiC	3,17	0,18	0,2	0,001135162	0,003598464
OPyC	1,8	0,2	0,22	0,001386489	0,002495680
Ort. küre	6,3099629		0,22	0,00418879	0,026431111

TRISO yakıt parçacığı, yoğun iç pirolitik karbon (IPyC), kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle oluşan silisyum karbür (SiC) ve dış pirolitik karbon (OPyC) katmanlarından oluşur [39].



Şekil 3.2 TRISO yapısının genel gösterimi [40]

Uranyum dioksit (UO_2), %92–97 teorik yoğunlukla sinterlenmiş silindirik peletler şeklinde kullanılan en yaygın nükleer yakıttır. Yüksek erime noktası ($2800^\circ C$), su soğutmalı reaktörlerde kimyasal kararlılığı ve kaplama malzemeleriyle uyumluluğu, UO_2 'nin başlıca özelliklerindedir. Stokiyometrik sapmalar, termal iletkenliği ($500^\circ C$ ile erime arasında 63–73 W/cm) ve erime noktasını düşürür, mukavemeti azaltır ve ışınlama davranışını karmaşıktırır. Örneğin, O/U oranı 2,25'e ulaştığında erime noktası $2500^\circ C$ 'ye gerileyebilir. UO_2 üretimi, saflaştırma, hidrojenle indirgeme, peletleme ve sinterleme süreçlerini kapsar; bu süreçlerdeki teknikler, peletlerin performansını ve reaktör koşullarına uygunluğunu doğrudan belirler [41].

Pirolitik karbon (PyC), yüksek sıcaklıklarda uçucu hidrokarbonların pirolitik reaksiyonuyla tabakalı olarak biriken bir malzemedir. Üstün mekanik özellikleri, PyC'yi havacılık mühendisliği ve termonükleer füzyon gibi alanlarda ara yüzey malzemesi olarak değerli kılar [42]. İç pirolitik karbon (IPyC), karbon tabakasının iç katmanını oluşturur ve yakıtın iç kısmında koruyucu bir bariyer olarak görev yaparak radyoaktif çekirdeklerin sızmasına karşı ek koruma sağlar.

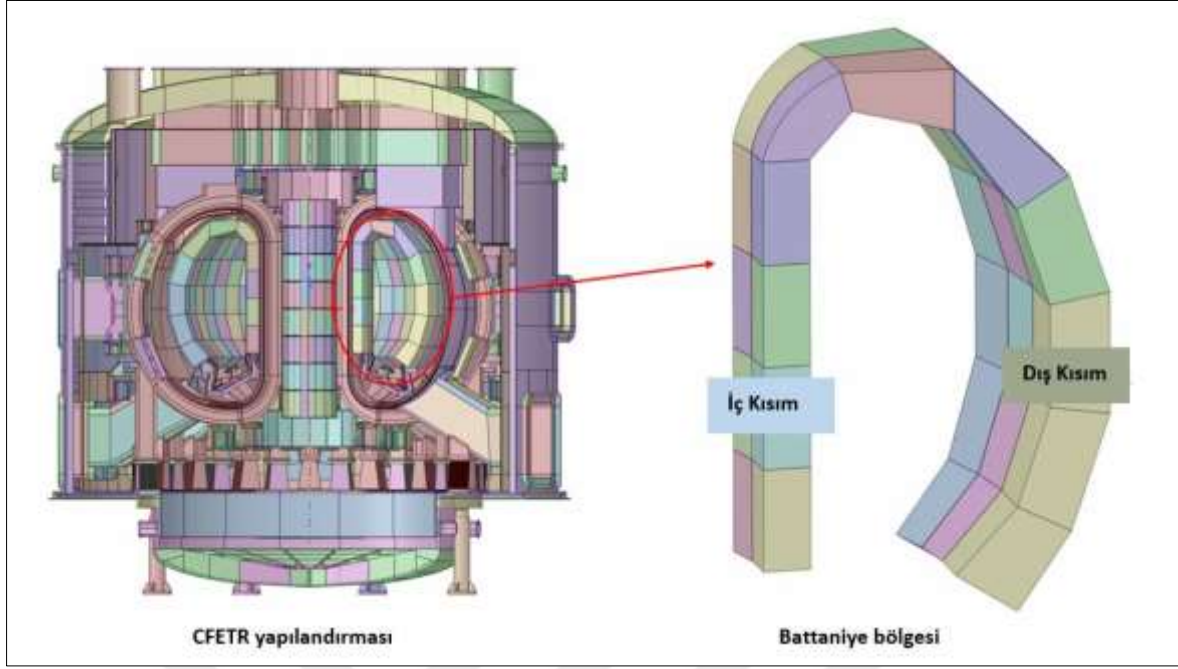
Her katman, kendine özgü işlevleriyle öne çıkar. İç pirolitik karbon (IPyC), çekirdek malzemenin boyut değişimlerine uyum sağlayarak çekirdek ile silisyum karbür (SiC) arasındaki reaksiyonları engeller, fisyon gazı basıncını dengeleyerek fisyon ürünü geri tepme etkisini absorbe eder. Yüksek elastisite modülü, sürünme direnci, ışınlama stabilitesi ve geçirimsiz yapısıyla silisyum karbür tabakası, parçacığın boyutlarını korurken fisyon ürünlerini etkin bir şekilde hapseder [43]. SiC, yakıt çubukları ve diğer nükleer bileşenlerde yüksek termal iletkenlik, mekanik dayanıklılık ve korozyon direnci sunar; nükleer reaktörlerde yakıt çubuklarını çevreleyen koruyucu bir kaplama olarak kullanılır.

Dış pirolitik karbon (OPyC), yakıt çubuğunun dış yüzeyine uygulanan karbon bazlı bir kaplama olup, yüksek sıcaklıklarda kimyasal reaksiyonları önleyerek dayanıklılığı artırır ve radyoaktif sızıntıları engeller. Genellikle grafit ve pirolitik karbon içeren OPyC, yakıt çubuğunun güvenilirliğini destekler.

Lityum içeren blanketler, füzyon reaktörlerinde hem soğutucu akışkan hem de trityum üretim kaynağı olarak kritik bir rol oynar. Yüksek ısı kapasitesi ve termal iletkenliğiyle

etkin soğutma sağlayan sıvı metal lityum, döteryum-trityum (D-T) füzyon reaksiyonları için trityum üretme kapasitesine sahiptir. Ancak, reaktör çekirdeğinde plazmayı hapsetmek için kullanılan güçlü manyetik alan, sıvı lityum akışıyla etkileşime girerek manyetik hidrodinamik (MHD) basınç düşüşüne neden olur. Bu etki, özellikle manyetik alanın giriş ve çıkış bölgelerinde belirginleşir ve soğutma sistemi tasarımında temel bir sınırlama olarak öne çıkar [44]. Lityum soğutmalı reaktör tasarımlarında termal ve yapısal analizler büyük önem taşır. Örneğin, Avrupa Demo Füzyon Reaktörü (DEMO) için geliştirilen Su Soğutmalı Lityum Kurşun (WCLL) üreme mantosu tasarımında, termal streslerin yapısal kriterleri karşılamadığı saptanmıştır. Bu nedenle, klasik sonlu elemanlar yöntemi (FEM) yerine daha kapsamlı termofluid-dinamik ve yapısal analiz yaklaşımları önerilmektedir [45].

Lityum soğutmalı reaktörlerin nötronik tasarımı, reaktivite kontrolü ve güvenlik parametrelerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Örneğin, mikro nükleer reaktör tasarımlarında lityum ısı boruları ve uranyum nitür yakıt kullanılarak çekirdek nötronik açıdan güvenli hale getirilmiştir [46]. DEMO reaktöründe ise trityum üretimi ve koruma etkinliği gibi performans kriterleri nötronik analizlerle değerlendirilmiştir [45]. Lityum soğutmalı reaktörlerde soğutma sistemlerinin tasarımı, ısı transfer verimliliği ve basınç düşüşü gibi parametrelerin optimizasyonunu gerektirir. Örneğin, Çin Füzyon Mühendislik Test Reaktörü (CFETR) için geliştirilen COOL mantosunda, manifold tasarımı ve giriş/çıkış borularının konumları iyileştirilerek basınç düşüşü azaltılmış, kütle akış dağılımı daha homojen hale getirilmiştir [47] (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. CFETR füzyon reaktör blanket geometrisi [47]

3.2. Nötron Difüzyon ve Transport Teorileri

Nötron difüzyon ve transport teorileri, nükleer reaktörlerde nötronların davranışını anlamak ve modellemek için kullanılan temel yaklaşımlardır. Bu teoriler, nötronların mekânsal ve enerjik dağılımlarını tahmin etmek için farklı matematiksel modeller sunar.

3.2.1 Nötron transport teorisi

Nötron transport teorisi, nötronların bir ortamda yayılımını ve etkileşimini tanımlayan temel bir yaklaşımdır. Nötronların mekânsal dağılımını ve enerji spektrumunu belirlemek için kullanılan bu teori, genellikle Boltzmann denklemiyle ifade edilir [48, 49, 50].

Nükleer reaktörlerde nötronların mekânsal ve zamansal dağılımını modellemek için nötron taşınım denklemi uygulanır. Bu denklem, belirli bir hacimdeki nötron kazanç ve kayıplarını dengeleyerek sistemin davranışını analiz etmeyi amaçlar. Hacim içindeki toplam nötron sayısının zamana bağlı değişimi, kazanç ve kayıpların farkına bağlıdır [51]:

$$\frac{d}{dt} \left[\int_V n(r, E, \Omega, t) d^3r \right] dE d\hat{\Omega} = V' \text{deki kazanç} - V' \text{den kayıp} \quad (3.2)$$

Burada, $n(r, E, \Omega, t)$ nötron yoğunluğunu, r, E, Ω ve t sırasıyla konum, enerji, açı ve zamanı temsil eder.

Kazanç mekanizmaları üç ana bileşenden oluşur. İlk olarak, fisyon reaksiyonlarıyla yeni nötronlar üretilir. İkinci olarak, dışarıdan gelen nötronlar hacme katılarak nötron yoğunluğunu artırır. Üçüncü olarak, farklı enerji ve yönlerde saçılan nötronlar, belirli bir enerji ve yön aralığında hacme katkı sağlar [51].

Nötron kayıpları ise iki temel süreçten kaynaklanır. Nötronlar, reaktör yüzeyinden sızarak sistemden çıkabilir. Ayrıca, çarpışmalarla enerji veya yön değiştiren nötronlar, belirli bir enerji ve yön aralığında izlenemediği için kayıp sayılır [51].

Genel nötron taşınım denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \hat{\Omega} \nabla n + \mathbf{v} \Sigma_t n(r, E, \hat{\Omega}, t) = \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \mathbf{v}' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \hat{\Omega}', \hat{\Omega},) n(r, E', \hat{\Omega}', t) + s(r, E, \hat{\Omega}, t) \quad (3.3)$$

Nötron taşınım denklemi birkaç temel özellikte dikkat çeker. İlk olarak, bağımlı değişken $n(r, E, \hat{\Omega}, t)$ ile yedi bağımsız değişkeni ($r = x, y, z; E; \hat{\Omega} = \theta, \phi; t$) içeren doğrusal bir denklemdir. Burada r konumu, E enerjiyi, $\Omega = \theta$ açığı ve t zamanı temsil eder. Uzay ve zaman türevlerinin yanı sıra açı ve enerji üzerinden integraller içerdiğinden, bu denklem “integrodiferansiyel” olarak adlandırılır [51].

Türevlerin varlığı, açısal yoğunluk için uygun başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanmasını gerektirir. Denklemde yalnızca bir zaman türevi yer aldığından, başlangıç koşulu, tüm konumlar, enerjiler ve yönler için açısal yoğunluğun başlangıç değerinin belirlenmesi şeklinde seçilebilir [51].

$$\text{Başlangıç koşulu: } n(r, E, \hat{\Omega}, 0) = n_0(r, E, \hat{\Omega}), \text{ tüm } r, E, \hat{\Omega} \quad (3.4)$$

Sınır koşulları, incelenen probleme göre değişiklik gösterir. Örneğin, açıklayıcı bir senaryo olarak, reaktörün sonsuz bir vakumla çevrili olduğu ve dışarı sızan bir nötronun sisteme geri dönmeyeceği varsayılabilir. Daha kesin bir ifadeyle, sistem geometrisi, yüzeyden dışarı

çıkan bir nötronun başka bir noktadan yüzeye geri girmesini engelleyen bir yapıya sahip olarak tanımlanır. Bu durumda, uygun sınır koşulu, dışarıdan sisteme nötron girişi olmadığını belirtir; yani yüzeydeki açısız nötron yoğunluğu, içeri yönelen tüm açılar için sıfırdır [51].

$$n(r_s, E, \hat{\Omega}, t) = 0, \text{ eğer } \hat{\Omega} \cdot \hat{e}_s < 0, S \text{ üzerinde tüm } r_s \text{ için} \quad (3.5)$$

Nükleer fisyon kaynaklarını içeren genişletilmiş formda, fisyon sonucu üretilen nötronların kaynağı, $x(E)$ fisyon spektrumu ve $\nu(E')$ fisyon başına nötron sayısı ile tanımlanır. Bu doğrultuda fisyon kaynağı şu şekilde ifade edilir:

$$S_f(r, E, \hat{\Omega}, t) = \frac{x(E)}{4\pi} \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \nu(E') \Sigma_f(E') \phi(r, E', \hat{\Omega}', t) \quad (3.6)$$

Burada $x(E)$ fisyon spektrumunu; $\nu(E')$ bir fisyonun ürettiği nötron sayısını; $\Sigma_f(E')$ fisyon kesitini ve $\phi(r, E', \hat{\Omega}', t)$ açısız akışı temsil eder.

Nötron taşınım denklemi, yedi bağımsız değişkenli ($x, y, z, E, \theta, \phi, t$) bir integrodiferansiyel denklem olup, doğrudan analitik çözümü oldukça güçtür. Ancak, özel durumlarda sadeleştirilmiş çözümler elde edilebilir [51]. Denklem çözümü, nötronların mekânsal ve enerjik dağılımlarının karmaşıklığı ile etkileşim kesitlerinin ayrıntılı bağımlılıkları nedeniyle dijital bilgisayarlar gerektirir. Reaktör analizlerinde sıkça tercih edilen nötron difüzyon teorisi, nötron taşınımını yaklaşık olarak modelleyerek daha basit ve hesaplanabilir denklemler sunmayı hedefler (Duderstadt and Hamilton, 1976: 111-153).

3.2.2 Nötron difüzyon teorisi

Nötron difüzyon teorisi, nötron akısının mekânsal gradyanına orantılı olduğunu öngören Fick yasasına dayanır. Bu yaklaşım, nötronların gaz molekülleri gibi hareket ettiğini varsayar ve genellikle homojen ortamlar ile zayıf absorpsiyon koşullarında geçerlidir [50].

Reaktör içinde herhangi bir konumda, yüzey alanı S olan bir V kontrol hacmi seçildiğinde, bu hacimdeki nötron popülasyonunun zamanla değişimi ayrıntılı olarak incelenebilir.

Belirli bir anda V hacmi içindeki toplam nötron sayısı, hacim üzerinden integral alınarak hesaplanır [51].

$$\int_V d^3r N(r, t) = \int_V d^3r \frac{1}{v} \phi(r, t) \quad (3.7)$$

Burada $N(r, t)$ nötron yoğunluğunu, $\phi(r, t)$ nötron akısını ve v ortalama nötron sayısını temsil eder.

Buna göre, V hacmi içindeki nötron sayısının zamana bağlı değişim hızı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d}{dt} \left[\int_V d^3r \frac{1}{v} \phi(r, t) \right] = \int_V d^3r \frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = V \text{ içindeki üretim} - V \text{ içindeki soğurma} - V' \text{ den net kaçış} \quad (3.8)$$

Kazanç ve kayıp terimleri için matematiksel ifadeler şu şekilde yazılabilir. Nötron kaynak yoğunluğu $S(r, t)$ olarak tanımlandığında, V içindeki üretim şöyle ifade edilir [51]:

$$V \text{ içindeki üretim} = \int_V d^3r S(r, t) \quad (3.9)$$

V hacmindeki herhangi bir noktada soğurma hız yoğunluğu, $\Sigma_a(r) \phi(r, t)$ olarak ifade edildiğinden, V içindeki toplam soğurma şu şekilde yazılabilir [51]:

$$V \text{ içindeki soğurma} = \int_V d^3r \Sigma_a(r) \phi(r, t) \quad (3.10)$$

V hacminden dışarıya veya içeriye sızan nötronları tanımlayan terim biraz daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Nötron akım yoğunluğu $J(r, t)$ olarak alındığında, r_s konumundaki küçük bir dS yüzey elemanından geçen nötron geçiş hızı $J(r_s, t) \cdot dS$ şeklinde ifade edilir. Böylece, V hacminin yüzeyinden geçen toplam net sızıntı şu şekilde hesaplanır [51]:

$$V' \text{ den net kaçış} = \int_S dS \cdot J(r, t) \quad (3.11)$$

Parçacıklar, fiziksel olarak yüksek yoğunluklu bölgelerden düşük yoğunluklu bölgelere, yoğunluk gradyanının tersi yönünde bir hızda hareket etme eğilimindedir. Bu ilişki matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir [51]:

$$J(r, t) \cong -D(r)\nabla\phi(r, t) \quad (3.12)$$

Burada, orantı sabiti $D(r)$ difüzyon katsayısı olarak tanımlanır ve bu ilişki Fick Kanunu olarak bilinir.

Difüzyon yaklaşımı, nötron akım yoğunluğunu nötron akısı cinsinden ifade eden geçerli bir yöntem olarak kabul edilir. Bu yaklaşımla, tek hızlı nötron difüzyon denklemi şu şekilde ifade edilir (Duderstadt and Hamilton, 1976: 111-153):

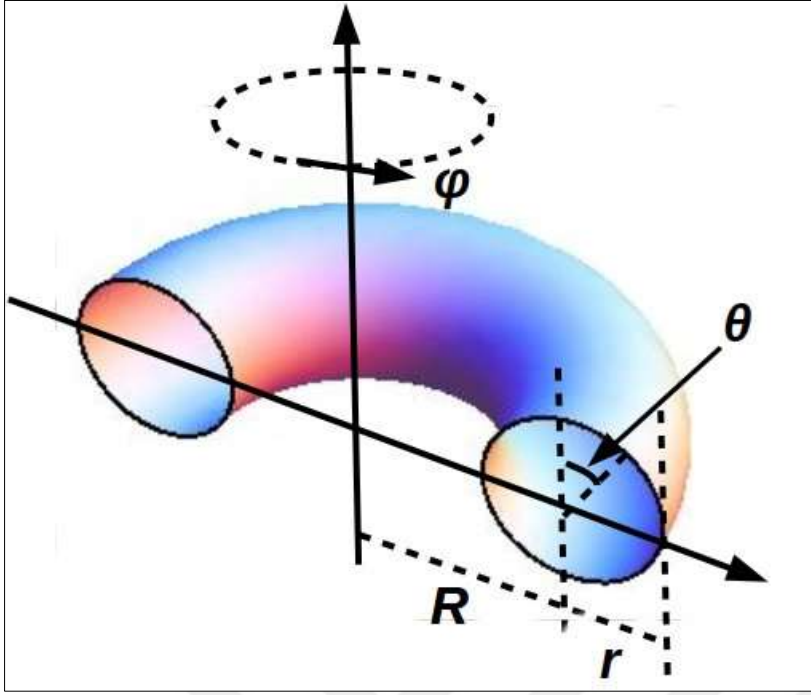
$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot D(r)\nabla\phi - \Sigma_a(r)\phi(r, t) + S(r, t) \quad (3.13)$$

Difüzyon teorisi, özellikle heterojen reaktör çekirdeklerinde ve güçlü absorplayıcı bölgelerde yeterli olmayabilir. Bu nedenle, fraksiyonel dereceli modelleme gibi alternatif yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu modeller, nötronların anormal difüzyon süreçlerini daha doğru bir şekilde temsil eder [52].

Karşılaştırmalar ve uygulamalar

Nötron transport ve difüzyon teorilerinin karşılaştırılması, her iki yaklaşımın farklı koşullar altındaki performansını ortaya koyar. Transport teorisi daha yüksek doğruluk sağlarken, difüzyon teorisi basitliği ve düşük hesaplama maliyetiyle öne çıkar [53].

Difüzyon teorisinin spektral yaklaşımları, özellikle torus gibi özel geometrilere başlangıç katmanı problemlerini çözmek için kullanılır (Şekil 3.4). Sayısal doğrulama çalışmaları ise bu teorilerin farklı senaryolardaki geçerlilik ve doğruluğunu değerlendirir [54].



Şekil 3.4. Toroidal geometri ve torus kabuğu [55]

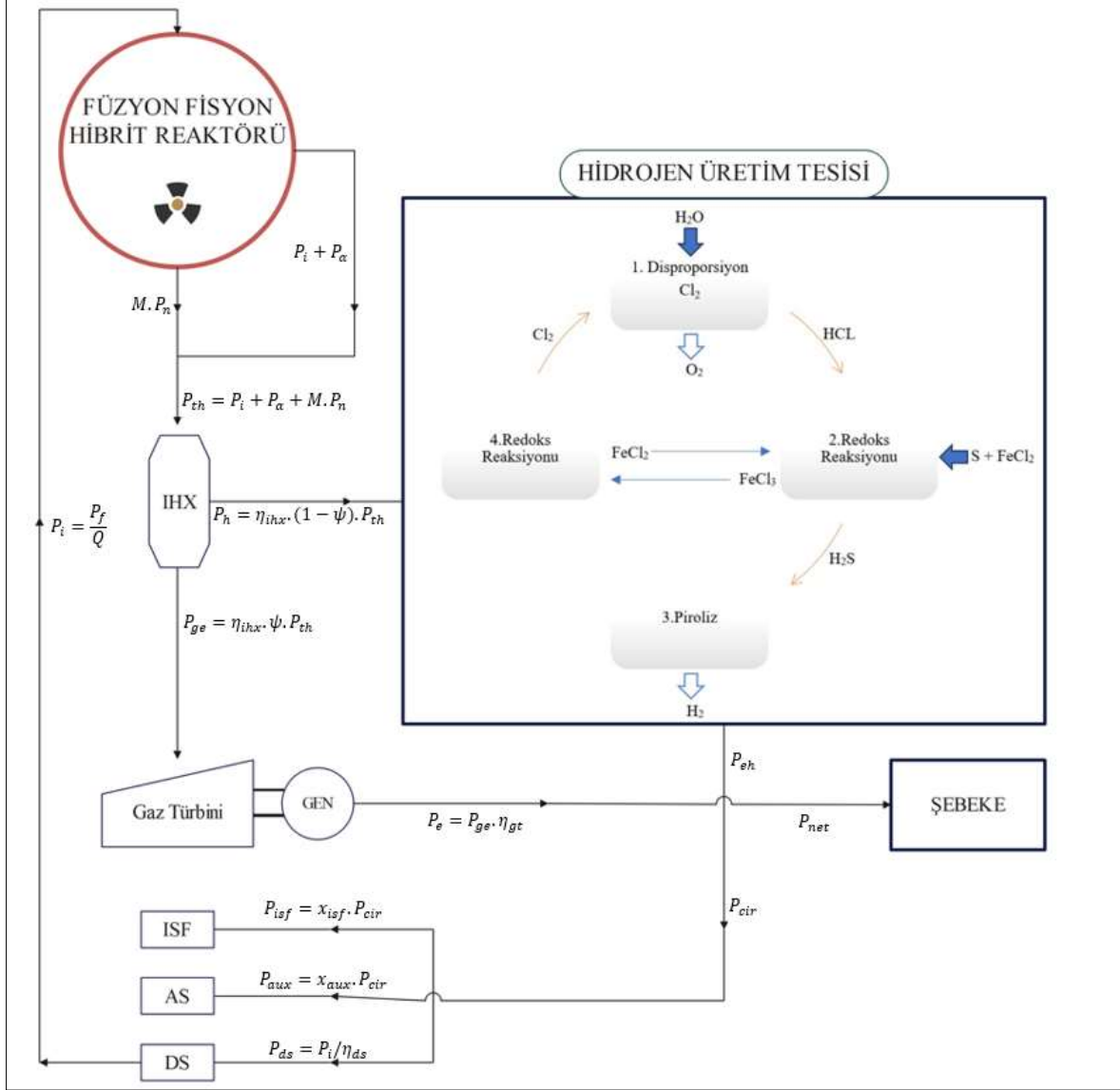
Nötron difüzyon ve transport teorileri, nükleer reaktörlerin tasarımı ve güvenliği için vazgeçilmezdir ve sürekli geliştirilmektedir. Bu teoriler, nükleer mühendislikte temel araçlar olarak önemini korumaktadır.

3.3. Hidrojen Üretim Teorisi

TRISO yakıt kaplamalı bir hibrid reaktör, lityumun yüksek termal verimliliği ve üstün ısı transfer özellikleriyle nükleer enerji sistemlerinin geleceğinde önemli bir rol oynar. Bu reaktörler, hidrojen üretimi gibi yüksek sıcaklık gerektiren termokimyasal döngüler için ideal bir ısı kaynağı sağlar. Lityumun sunduğu yüksek sıcaklık, kararlı bir termal ortam oluşturarak hidrojen üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini artırır. Nükleer enerji, hidrojen gibi temiz enerji taşıyıcılarının üretiminde ekonomik ve çevresel avantajlar sunarak uzun vadeli enerji güvenliğine katkıda bulunur. Ayrıca, bu reaktörlerin yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyonu, elektrik üretiminde daha güvenilir ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.

Bu tezde, TRISO yakıt kaplamalı bir hibrid reaktöre entegre edilmiş bir üniteye HyS-Cl termokimyasal çevrimiyle hidrojen üretimi incelenmiş; hibrid süreçlerin entegrasyonu ile enerji verimliliğinin nasıl artırılacağı değerlendirilmiştir. Yüksek sıcaklık reaktörleriyle

bu süreçlerin birleşimi, hidrojen üretiminde daha verimli ve ölçeklenebilir çözümler sunma potansiyeli taşır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Füzyon-fisyon hibrid reaktör ve entegre edilmiş hidrojen üretim tesisinin genel akış şeması [56, 57]

Şekil 3.5, enerji sisteminin temel bileşenlerini göstermektedir. Ara ısı değiştirici (IHX), ısı transferini sağlar. Jeneratör (Gen), enerji üretimini gerçekleştirir. İzotop ayırıştırma sistemi (ISF), nükleer reaksiyonlardan elde edilen izotopları ayırır. Yardımcı sistem (AS), bileşenlerin destekleyici işlevlerini yerine getirirken; sürücü sistemi (DS), sistemin hareketini sağlar.

Füzyon reaktöründen elde edilen güç çıktısı (P_f) ile füzyon giriş gücünün (P_i) oranı, füzyon enerji kazanım oranını (Q) verir. Bu oran, bir füzyon reaktörünün verimliliğini belirler. Eş. 3.14 ile ifade edilir [58]:

$$Q = \frac{P_f}{P_i} \quad (3.14)$$

Burada, P_f füzyon gücü çıktısı (reaksiyonlardan elde edilen toplam enerji) ve P_i ise reaktörün plazma akımını sürdürmek için gereken giriş gücüdür.

Füzyon reaksiyonunda alfa parçacıkları ve nötronlar, farklı enerji oranlarıyla toplam füzyon gücüne katkı sağlar. Alfa parçacıklarından elde edilen füzyon gücü (P_α), füzyon gücünün belirli bir payına bağlı olarak hesaplanır ve Eş. 3.15 ile ifade edilir [58].

$$P_\alpha = x_\alpha \cdot P_f \quad (3.15)$$

Burada, x_α alfa parçacıklarının enerji kesri (0,2) ve P_f füzyon güç çıktısıdır. Benzer şekilde, nötron parçacıklarından gelen füzyon gücü (P_n), nötronların enerji kesri (x_n) 0,8 kullanılarak aynı denklemlerle belirlenir ve Eş. 3.16 gösterilmiştir [58].

Döteryum-trityum (D-T) füzyon reaksiyonunda, alfa parçacıkları için 0,2 ve nötronlar için 0,8 enerji kesirleri standart değerler olarak kullanılır. Toplam 17,6 MeV enerji, alfa parçacıkları ($\sim 3,5$ MeV, yani $\sim 20\%$) ve nötronlar ($\sim 14,1$ MeV, yani $\sim 80\%$) arasında paylaşılır. Bu nedenle, 0,2 ve 0,8 oranları, reaksiyonun fiziksel yapısından kaynaklanan sabit değerlerdir.

$$P_n = x_n \cdot P_f \quad (3.16)$$

Füzyon giriş gücü (P_i), alfa parçacıklarından (P_α) ve nötronlardan (P_n) gelen füzyon güçleriyle birlikte toplam termal gücü (P_{th}) oluşturur. Toplam termal güç, aşağıdaki Eş. 3.17 ifade edilir [58]:

$$P_{th} = P_i + P_\alpha + M \cdot P_n \quad (3.17)$$

Burada M , enerji çoğaltım faktörüdür ve nötronlardan gelen füzyon gücüne etki eder. Ayrıca, P_{th} toplam termal güç, füzyon gücü (P_f) ve enerji kazanım faktörü (Q) ile Eş. 3.18'de de hesaplanabilir [58]:

$$P_{th} = \frac{P_f}{Q} \cdot [Q \cdot (x_\alpha + x_n \cdot M) + 1] \quad (3.18)$$

3.3.1. Termal gücün dağılımı

Reaktörün toplam termal gücü (P_{th}), termokimyasal tepkimelerde kullanılacak termal güçtür. Bu güç, aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$P_h = \eta_{ihx} \cdot (1 - \psi) \cdot P_{th} \quad (3.19)$$

Burada, (P_h) termokimyasal reaktör için gereken termal gücü, (η_{ihx}) ara ısı değiştiricisinin verimliliğini, (ψ) ise elektriksel güç oranını gösterir. Ara ısı değiştirici, termal enerjiyi bir noktadan diğerine aktararak enerji akışını istenen şekilde yönlendiren bir cihazdır.

3.3.2. Gaz türbininden elektrik gücü üretimi

Gaz türbininden elde edilen elektriksel güç, termal güçten türetilir. Gaz türbini, termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Bu dönüşüm, aşağıdaki denklemler ile hesaplanır [58]:

$$P_e = \eta_{gt} \cdot P_{ge} \quad (3.20)$$

$$P_e = \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.21)$$

Eş. 3.20 ve Eş. 3.21'de, (P_e), brüt elektrik gücünü, (η_{gt}) gaz türbininin verimliliğini ve (P_{ge}) türbinin toplam enerji girdisini ifade eder. Bu güç dağılımları, hidrojen üretim tesisine yönelen elektrik gücü (P_{eh}), yeniden dolaşıma giren elektrik gücü (P_{cir}) ve şebekeye aktarılan elektrik gücü (P_{net}) olarak sınıflandırılır. Her bir güç bileşeni, aşağıdaki formüllerle hesaplanır [58]:

$$p_{net} = x_{net} \cdot P_e = x_{net} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.22)$$

$$p_{cir} = x_{cir} \cdot P_e = x_{cir} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.23)$$

$$p_{eh} = x_{eh} \cdot P_e = x_{eh} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.24)$$

Bu denklemlerde, (x_{net}) , (x_{cir}) ve (x_{eh}) sırasıyla şebekeye aktarılan, yeniden dolaşıma giren ve hidrojen üretim tesisine yönelen elektriksel güç oranlarını ifade eder. Bu oranların toplamı her zaman 1'e eşittir. Elektriksel güç oranları, gücün farklı sistemler arasında nasıl paylaşıldığını tanımlar.

3.3.3. Yeniden dolaşımdaki elektrik gücü dağılımı

Yeniden dolaşımdaki elektriksel güç (p_{cir}), üç ana bileşene ayrılır: izotop ayırma tesisi elektrik gücü (p_{isf}), sürücü sistem elektrik gücü (p_{ds}), ve yardımcı sistem elektrik gücü (p_{aux}). Bu güçlerin hesaplanması şu denklemlerle yapılır [58]:

$$p_{isf} = x_{isf} \cdot P_{th} \quad (3.25)$$

$$p_{ds} = \frac{p_i}{\eta_{ds}} \quad (3.26)$$

$$p_{aux} = x_{aux} \cdot P_{th} \quad (3.27)$$

İzotop ayırma tesisi, nükleer yakıtların ayrıştırıldığı bir tesisken, sürücü sistemi, reaktörün mekanik hareketini sağlayan bileşenleri ifade eder. Yardımcı sistem ise reaktörün diğer destekleyici bileşenlerini kapsar.

3.3.4. Hidrojen üretimi için güç ilişkisi

Hidrojen üretiminde kullanılan termal (p_h) ve elektriksel (p_{eh}) güç arasında bir ilişki vardır. Bu ilişki, bir orantı sabiti (ε) ile tanımlanır [58]:

$$p_{eh} = \varepsilon \cdot p_h \quad (3.28)$$

Eş. 3.28, hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu elektriksel gücün, kullanılan termal güçle orantılı olduğunu ifade eder. ε sabiti, çevrimde sadece ısı enerjisine ihtiyaç duyulduğu için $\varepsilon=0$ olarak alınır. Eş. 3.29'da (ψ) elektriksel güç oranı hesaplanır.

$$\psi = \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot x_{\alpha} \cdot x_n \cdot M + 1] \cdot [\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} + \frac{\varepsilon}{[\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} + [\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} \quad (3.29)$$

Hibrid çevrimlerde hidrojen üretimi için gereken toplam güç (P_{hpf}), füzyon reaktöründen elde edilen enerji ve sistem verimlilik parametreleri kullanılarak aşağıdaki denklemlerle hesaplanır [58]:

$$P_{hpf} = (1 - \psi) \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \eta_{ihx} \cdot \frac{P_f}{Q} \cdot [Q \cdot (x_{\alpha} + x_n \cdot M) + 1] \quad (3.30)$$

Bu denklemler, reaktörün enerji üretim süreçlerini ve hidrojen üretimi için gereken gücü hesaplamada kullanılan temel ilişkileri tanımlar. Termal ve elektrik gücünün uygun şekilde dağıtılması, füzyon reaktörünün verimliliği açısından büyük önem taşır. Hidrojen üretimi hesaplamalarında kullanılan parametre değerleri Çizelge 3.3'de sunulmuştur.

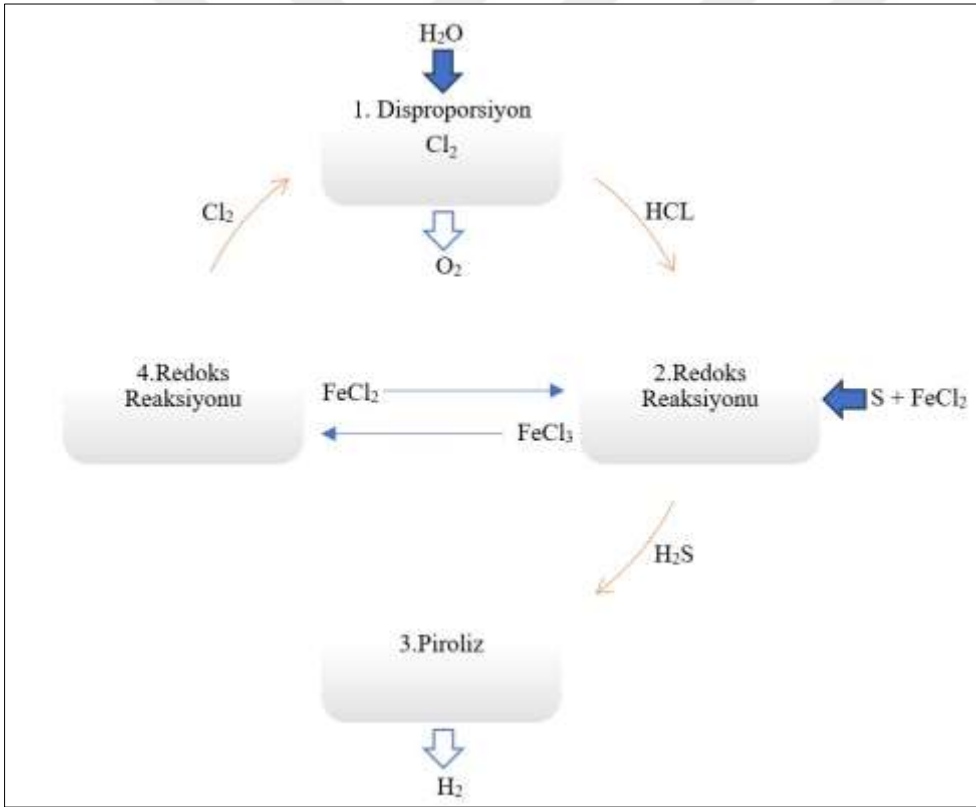
Çizelge 3.3. Nükleer hidrojen üretimi için gerekli parametreler ve değerleri [56, 59, 60]

Parametreler	Simge	Değer
Ara Isı Değiştirici Verimi	η_{ihx}	0,8
Sürücü Sistem Verimi	η_{ds}	0,5
Gaz Türbinin Termal Verimi	η_{gt}	0,6
Alfa Parçacıklarının Enerji Fraksiyonu	x_{α}	0,2
Nötronların Enerji Fraksiyonu	x_n	0,8
Net elektrik Gücü Fraksiyonu	x_{net}	0
Füzyon enerji kazanç faktörü	Q	10
Yardımcı Güç Fraksiyonu	x_{aux}	0,05
İzotop Ayırma Tesisi için Güç Fraksiyonu	x_{isf}	0,05

3.4. Nükleer Enerjiden Hidrojen Üretim Metotları

Bu tez kapsamında, TRISO yakıt kaplamalı bir hibrid nükleer reaktörde HyS-Cl termokimyasal döngüsüyle hidrojen üretimi incelenmektedir. HyS-Cl çevrimi, nükleer enerjiyle yüksek verimli hidrojen üretiminde öne çıkan yöntemlerden biridir. Reaktörün termal gücü, termokimyasal reaksiyonlar ve piroliz aşamaları arasındaki etkileşimler bu süreçte kilit rol oynar. Bu bölümde, çevrimin temel kavramları ve işlem adımları ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

HyS-Cl çevrimi, kükürt ve klor temelli reaksiyonlarla yüksek verimli hidrojen üretimi sağlar. Proses adımlarının işlem sırası aşağıdaki adımlardan oluşur (Şekil 3.6):



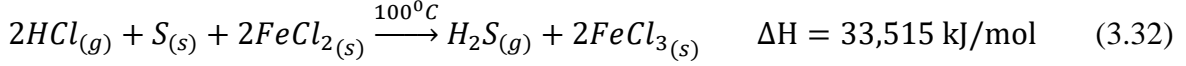
Şekil 3.6. Hibrid sülfür-klor çevrimi termokimyasal akış şeması

Klorun disproporsinasyon reaksiyonu (oksijen üretim adımı)



Bu adımda, klor gazı su buharıyla yüksek sıcaklıkta (800°C) tepkimeye girerek hidroklorik asit ve oksijen gazı üretir. Döngünün oksijen çıkışını sağlayan bu reaksiyon, termokimyasal enerjiyle desteklenir ve çevrimin sürdürülebilirliği için kritik bir başlangıç noktasıdır.

Redoks reaksiyonu (hidroklorik asit ile kükürt reaksiyonu)



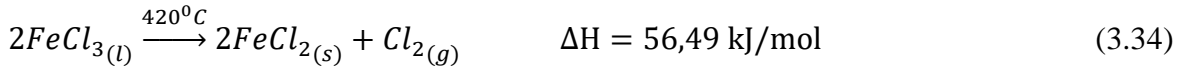
Bu adımda, hidroklorik asit, katı kükürt ve demir (II) klorür, düşük sıcaklıkta (100°C) tepkimeye girerek hidrojen sülfür (H₂S) ve demir (III) klorür üretir. H₂S, döngünün sonraki aşamalarında hidrojen üretimine katkı sağlar.

Termal ayrışma (piroliz)



Bu adımda, hidrojen sülfür (H₂S) yüksek sıcaklıkta (800°C) ayrılarak hidrojen gazı (H₂) ve kükürt gazı (S₂) üretir. Döngünün hidrojen üretim aşaması olan bu reaksiyon, çevrimin temel hedefini gerçekleştirir [61].

Klor geri kazanım reaksiyonu (FeCl₃ termal ayrışması)



Döngünün devamı için klor gazı geri kazanılır. Bu reaksiyon, demir (III) klorürün (FeCl₃) demir (II) klorüre (FeCl₂) indirgenmesi ve klor gazı (Cl₂) üretimiyle ilgilidir. Bu klor, çevrimin bir sonraki döngüsünde tekrar kullanılır.

Shomate denklemi, belirli sıcaklık aralıklarında bir bileşiğin termodinamik özelliklerini, özellikle ısı kapasite, entalpi ve entropi değişimlerini hesaplamak için kullanılan parametrik bir modeldir. Çizelge 3.2’de verilen Shomate katsayıları, HyS-Cl döngüsündeki ısı ve enerji dönüşümlerinin analizi için temel oluşturur.

Çizelge 3.4. Hibrid sülfür-klor çevriminin termokimyasal Shomate verileri [62]

Bileşik	\bar{h}_f^0 (kJ/mol)	A	B	C	D	E	F	G	H
Cl ₂ (g)	0,00000	42,67730	-5,00957	1,90462	-0,1656	-2,0984	-17,28980	269,84000	0,00000
H ₂ O (g)	-241,82	30,09200	6,83251	6,79344	-2,5344	0,08214	-250,8810	223,39670	-241,8264
HCl (g)	-92,310	32,12392	-13,4580	19,86852	-6,8539	-0,0496	-101,6206	228,68660	-92,31201
O ₂ (g)	0,00000	30,03235	8,77297	-3,98813	0,78831	-0,7416	-11,32468	236,16630	0,00000
HCl (g)	-92,310	32,12392	-13,4580	19,86852	-6,8539	-0,0496	-101,6206	228,68660	-92,31201
S (s)	32,0540	21,21978	3,86586	22,27461	-10,319	-0,1225	-7,08560	54,99575	0,00000
FeCl ₂ (s)	-341,83	73,66852	22,54009	-10,12172	1,46620	-0,2526	-365,5636	199,39230	-341,8332
H ₂ S (g)	-20,500	26,88412	18,67809	3,43420	-3,3787	0,13588	-28,91211	233,37470	-20,50202
FeCl ₃ (s)	-399,41	979,11040	-4704,36	9295,17400	-6246,9	-12,495	-593,9774	2301,47200	-399,4055
H ₂ S (g)	-20,500	26,88412	18,67809	3,43420	-3,3787	0,13588	-28,91211	233,37470	-20,50202
H ₂ (g)	0,00000	18,56308	12,25736	-2,85979	0,26824	1,97799	-1,14744	156,28813	0,00000
S ₂ (g)	128,600	33,51313	5,06536	-1,05967	0,08991	-0,2119	117,68550	266,09190	128,60030
FeCl ₃ (l)	-362,82	133,88800	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-402,7343	362,68290	-362,8156
FeCl ₂ (s)	-341,83	73,66852	22,54009	-10,12172	1,46620	-0,2526	-365,5636	199,39230	-341,8332
Cl ₂ (g)	0,00000	33,05060	12,22940	-12,06510	4,38533	-0,1594	-10,83480	259,02900	0,00000

Hidrojen üretim tesisinde, HyS-Cl hibrid termokimyasal çevrimi ısı enerjisi gerektirir. Termal güç oranı $(1 - \psi)$ ve tesisin toplam termal güç ihtiyacı (P_{hpf}), Eş. 3.35 ve Eş. 3.36 ile hesaplanır [60].

$$1 - \psi = 1 - \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot (x_\alpha + x_n \cdot M) + 1] * [\eta_{gt} + \varepsilon]} + \frac{\varepsilon}{[\eta_{gt} + \varepsilon]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} + [\eta_{gt} + \varepsilon]} \quad (3.35)$$

$$P_{hpf} = (1 - \psi) \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \eta_{ihx} \cdot \frac{P_f}{Q} \cdot [Q \cdot (x_\alpha + x_n \cdot M) + 1] \quad (3.36)$$

Çevrimde toplam hidrojen üretim miktarı \dot{m}_{H_2} (kg/s) Eş. 3.37- 3.48 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{Cl_2} = P_{hpf} / q_{tot} \quad (3.37)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{Cl_2} \times \frac{M_{H_2O}}{M_{Cl_2}} \quad (3.38)$$

$$\dot{m}_{HCl} = 2 \times \dot{m}_{Cl_2} \times \frac{M_{HCl}}{M_{Cl_2}} \times \eta \quad (3.39)$$

$$\dot{m}_{O_2} = 0,5 \times \dot{m}_{Cl_2} \times \frac{M_{O_2}}{M_{Cl_2}} \times \eta \quad (3.40)$$

$$\dot{m}_S = 0,5 \times \dot{m}_{HCl} \times \frac{M_S}{M_{HCl}} \quad (3.41)$$

$$\dot{m}_{FeCl_2} = \dot{m}_{HCl} \times \frac{M_{FeCl_2}}{M_{HCl}} \quad (3.42)$$

$$\dot{m}_{H_2S} = 0,5 \times \dot{m}_{HCl} \times \frac{M_{H_2S}}{M_{HCl}} \times \eta \quad (3.43)$$

$$\dot{m}_{FeCl_3} = \dot{m}_{HCl} \times \frac{M_{FeCl_3}}{M_{HCl}} \times \eta \quad (3.44)$$

$$\dot{m}_{H_2} = \dot{m}_{H_2S} \times \frac{M_{H_2}}{M_{H_2S}} \times \eta \quad (3.45)$$

$$\dot{m}_{S_2} = 0,5 \times \dot{m}_{H_2S} \times \frac{M_{S_2}}{M_{H_2S}} \times \eta \quad (3.46)$$

$$\dot{m}_{FeCl_2} = \dot{m}_{FeCl_3} \times \frac{M_{FeCl_2}}{M_{FeCl_3}} \times \eta \quad (3.47)$$

$$\dot{m}_{Cl_2} = 0,5 \times \dot{m}_{FeCl_3} \times \frac{M_{Cl_2}}{M_{FeCl_3}} \times \eta \quad (3.48)$$

Burada verilen \dot{m} kütleli debiyi, M molar kütleyi ifade etmektedir. HyS-Cl termokimyasal çevriminin tepkime verim değeri (η) 0,90 olarak kabul edilmiştir.

Döngünün toplam ısı gereksinimi, başlangıç bileşiğinin molar kütlesine bölünmesi ile q_{tot} : 5,37 MJ/kg değeri bulunmuştur.

Isı (Q) gereksinimini hesaplamaları için formüller Eş. 3.49- 3.52 aralığında verilmiştir [62].

$$\bar{h}(T) - \bar{h}_0 = AT + B\frac{T^2}{2} + C\frac{T^3}{3} + D\frac{T^4}{4} - \frac{E}{T} + F - H \quad (3.49)$$

$$Q = \sum n_c(\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_0)_c - \sum n_g(\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}_0)_g \quad (3.50)$$

$$\bar{s} = A \ln(T) + BT + C\frac{T^2}{2} + D\frac{T^3}{3} - \frac{E}{2T^2} + G \quad (3.51)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.52)$$

Shomate katsayıları kullanılarak, entalpi ve entropi değerlerinin elde edilebilmesi için Eş. 3.48 ve Eş. 3.50'ten yararlanılmıştır. Bu kapsamda, \bar{h} (kJ/mol) entalpi, \bar{h}_f^0 (kJ/mol) oluşum entalpisi ve \bar{h}_0 (kJ/mol) standart entalpiyi temsil etmektedir. Ayrıca \bar{s} mutlak entropisini, ΔH reaksiyonun entalpi değişimi, ΔG Gibbs serbest enerjisi değişimini ve T reaksiyonun gerçekleştiği sıcaklığı (Kelvin cinsinden) temsil etmektedir.



4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Nötronik Analiz

4.1.1. Trityum üretimi (TBR)

Füzyon reaktörlerinde, kendi kendine sürdürülebilirliği için trityum üretim oranının (TBR) 1,05'ten büyük olması gerekir. Reaktörde trityum, yakıt bölgesindeki doğal lityum soğutucu akışkan ile Li_2C_2 ve LiH katı trityum üreteçleri aracılığıyla üretilir. Trityum üretim reaksiyonları, ^6Li ve ^7Li izotoplarının etkileşimleriyle gerçekleşir ve aşağıda sırasıyla Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'de sunulmuştur [36].

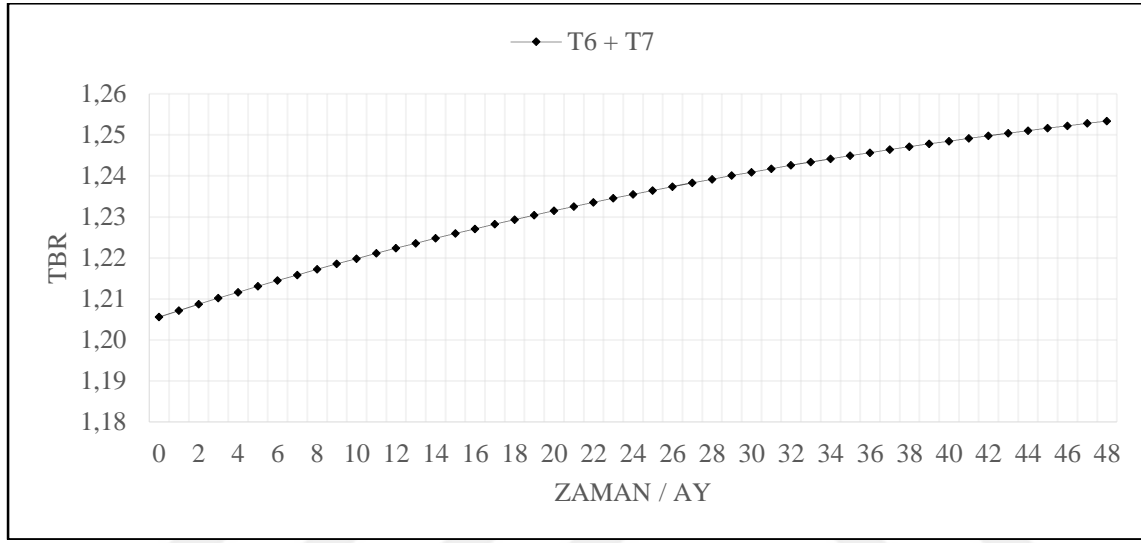


Reaktörün çalışma başlangıcında ve 48 aylık işletim süresi sonunda, ^6Li 'den üretilen trityum (T_6), ^7Li 'den üretilen trityum (T_7) ve mantodaki toplam trityum üretim oranı (TBR), Çizelge 4.1'de sunulmuştur. 5 MW/m² nötron duvar yükü altında, LiH içeren blanket geometrisinde toplam trityum üretimi başlangıçta 1,20562, süreç sonunda ise 1,25335 olarak hesaplanmıştır. Li_2C_2 yakıtlı blanket geometrisinde ise bu değerler başlangıçta 1,23166, 48 ay sonunda 1,27653 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. 5 MW/m² nötron duvar yükü altında farklı katı trityum üretecine bağlı trityum üretimi (a: işlem başlangıcı; b: 48 ay sonra)

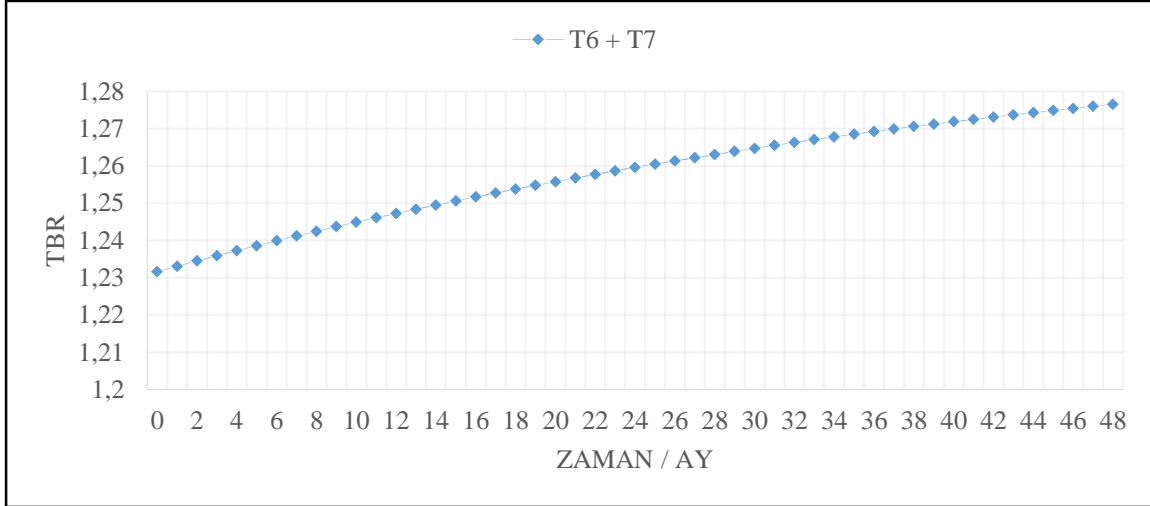
Nötron Duvar Yükü	5 MW/m ²	
	LiH	Li ₂ C ₂
T ₆	0,98311 ^{a)}	0,99174
	1,02738 ^{b)}	1,03300
T ₇	0,22250	0,23992
	0,22597	0,24353
TBR (T ₆ + T ₇)	1,20562	1,23166
	1,25335	1,27653

5 MW/m² nötron duvar yükü altında, LiH ve Li₂C₂ katı trityum üreteçlerinin trityum üretim performansları karşılaştırıldığında, her iki izotop için TBR değerlerinin 1,05'in üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. LiH katı trityum üretecinde, hidrojen izotopunun yüksek absorpsiyon oranı nedeniyle TBR, Li₂C₂'ye kıyasla daha düşük hesaplanmıştır. Li₂C₂'li blanket geometrisinde TBR'nin daha yüksek olmasının nedeni, karbon izotopunun reflektör görevi görerek nötronları absorbe etmeden geri yansıtmasıdır



Şekil 4.1. LiH blanket geometrisinde trityum üretim oranı (TBR) değişimi

Şekil 4.1, LiH katı trityum üretecine sahip blanket geometrisinde, 5 MW/m² nötron duvar yükü altında toplam trityum üretim oranının (TBR) 48 aylık işletim süresince değişimini göstermektedir. TBR'nin 48 ay boyunca istikrarlı bir artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Başlangıç değerinden itibaren düzenli bir yükselişle %4,0'lük bir artışla 1,25335'e ulaşılmıştır.



Şekil 4.2. Li_2C_2 blanket geometrisinde trityum üretim oranı (TBR) değışimi

Şekil 4.2, Li_2C_2 katı trityum üretene sahip blanket geometrisinde, 5 MW/m^2 nötron duvar yükü altında toplam trityum üretim oranının (TBR) 48 aylık işletim süresince değışimini göstermektedir. TBR'nin başlangıçtan itibaren daha belirgin bir artış sergilediğini gözlemlenmiştir. Başlangıçtaki 1,23166 değerinden %3,7'lik bir artışla 1,27653'e ulaşılmıştır, bu da LiH'ye göre %1,8 daha yüksek bir TBR artışı anlamına gelmektedir. Li_2C_2 'deki karbon içeriğinin nötronları saçarak reflektör etkisi oluşturması, blanket içinde nötronların daha fazla tutulmasını ve ^6Li ile ^7Li izotoplarının trityum üretimine katkısını artırmaktadır.

4.1.2. Enerji çoğaltım faktörü (M)

Blankette açığa çıkan enerjinin füzyon nötron enerjisine oranı, enerji çoğaltım faktörü (M) olarak tanımlanır. D-T kaynaklı bir hibrid reaktörde, ^6Li (n, α)T ekzotermik reaksiyon enerjisi ile ^7Li (n, α)T endotermik reaksiyon enerjisi dikkate alınarak hesaplanan M değerinin genel gösterimi Eş. 4.3'te sunulmuştur:

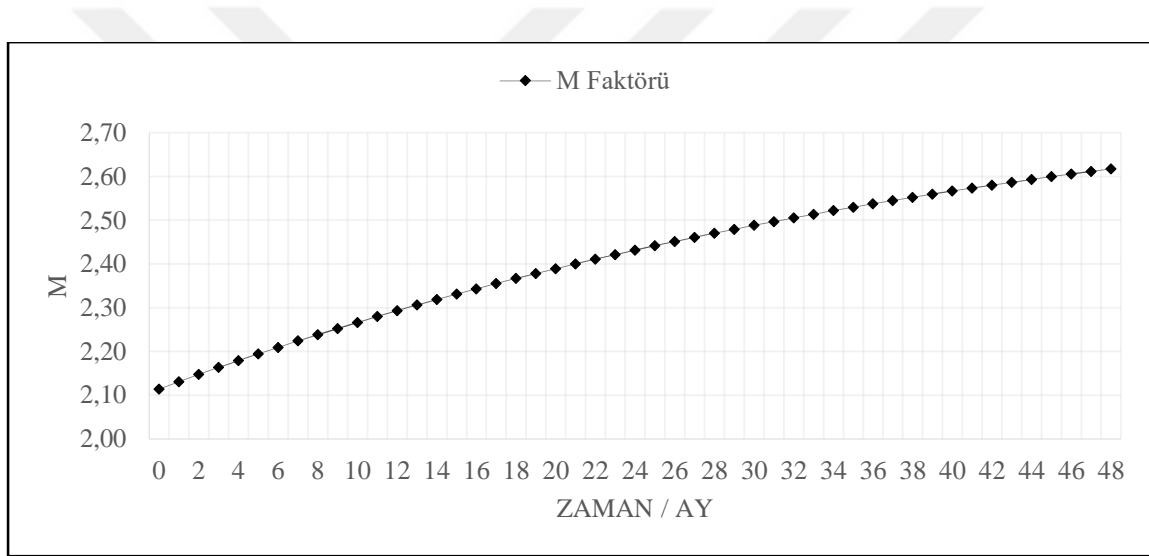
$$M = \frac{200 \cdot \langle \Phi \cdot \Sigma_f \rangle + 4,784 \cdot T_6 - 2,467 \cdot T_7}{14,1} + 1$$

$$\langle \Phi \cdot \Sigma_f \rangle : \text{toplam fisyon miktarı} \quad (4.3)$$

LiH ve Li_2C_2 blanket geometrilerinde hesaplanan enerji çoğaltım faktörü (M) değerleri, reaktörün enerji üretimi açısından büyük önem taşır. Şekil 4.3'te gösterildiği üzere, LiH

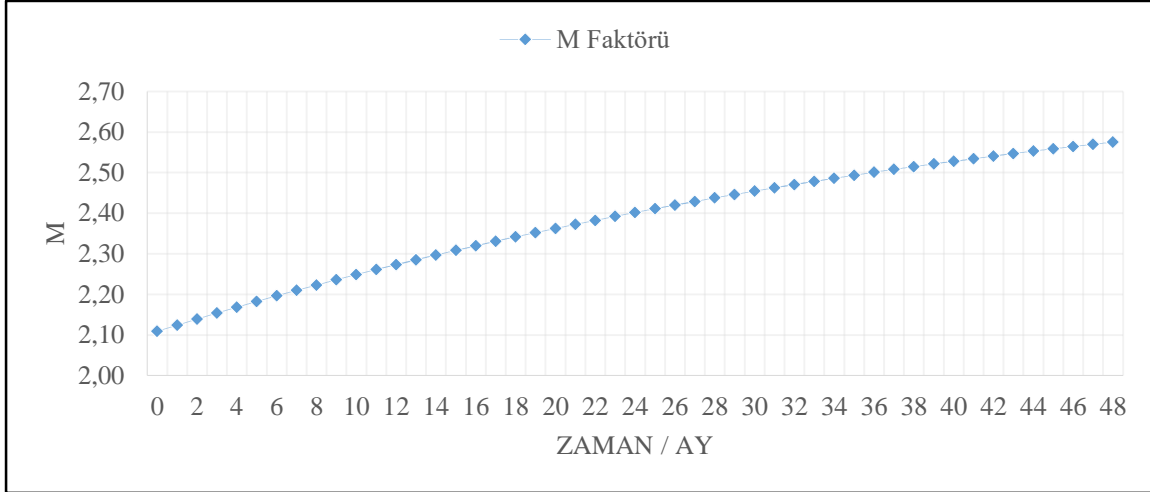
blanket geometrisinde M değeri başlangıçta 2,11404 iken, 48 aylık işletim süreci sonunda 2,61708'e yükselmiştir. Şekil 4.4'te Li_2C_2 blanket geometrisinde ise M değeri başlangıçta 2,10909 olarak ölçülmüş, 48 ay sonunda 2,57544'e ulaşmıştır.

LiH ve Li_2C_2 katı trityum üreteçlerinin kullanımı, nükleer sistemin genel M değerini artırarak nötron çoğaltım mekanizmasını güçlendirir. LiH , yüksek hidrojen içeriğiyle etkin bir nötron moderatörü olarak öne çıkarken, Li_2C_2 karbon içeriği sayesinde grafit benzeri bir yapı sunarak nötron etkileşimlerini dengeler. Lityumun (n, α) reaksiyonlarıyla trityum üretimi ve fisyon süreçlerinde serbest nötronların sürdürülebilir çoğaltımı, bu malzemelerin uzun vadeli potansiyelini destekler (Şekil 4.3-4.4).



Şekil 4.3. LiH blanket geometrisinde enerji çoğaltım faktörü (M) değişimi

Şekil 4.3'teki LiH blanket geometrisine ait grafik incelendiğinde, M faktörünün 48 ay boyunca düzenli bir artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Başlangıçtan itibaren sürekli yükselen eğri, süreç sonunda %23,8'lik bir artışla 2,61708'e ulaşmaktadır. Bu artış, LiH 'nin yüksek hidrojen içeriğinin nötronları termal enerji seviyelerine yavaşlatarak fisyon olaylarını desteklemesiyle açıklanabilir.

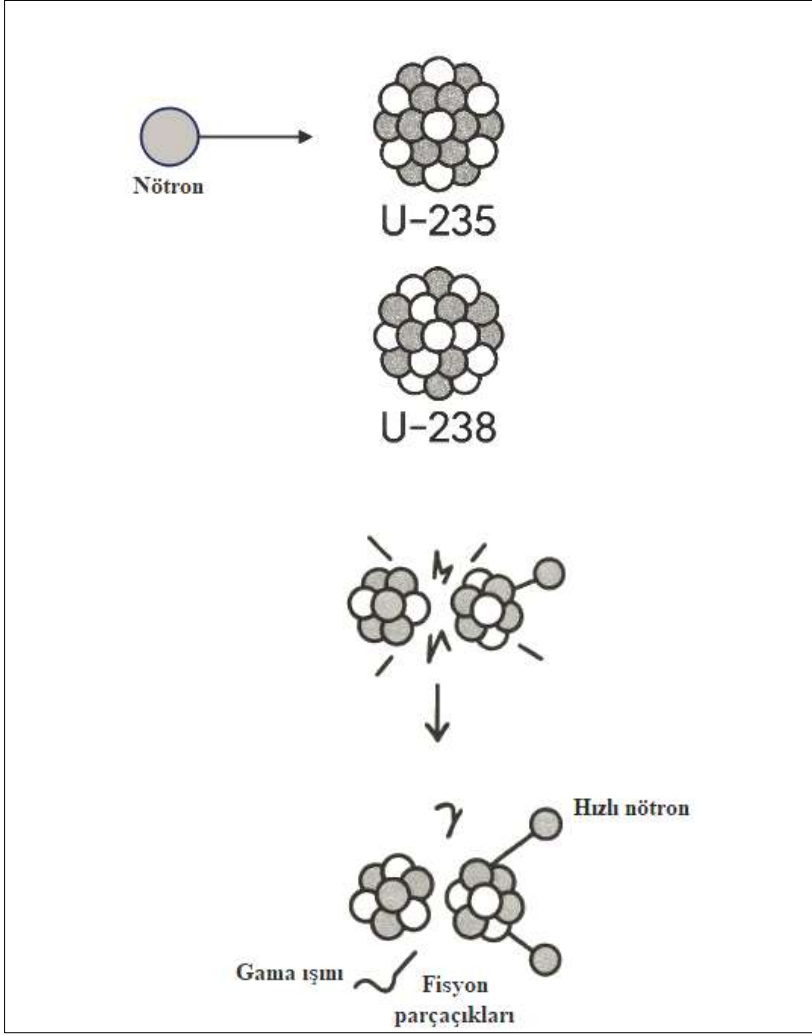


Şekil 4.4. Li_2C_2 blanket geometrisinde enerji çoğaltım faktörü (M) değişimi

Li_2C_2 blanket geometrisine ait grafik ise benzer bir artış eğilimi sergilemektedir (Şekil 4.4), ancak süreç sonunda M faktörü 2,57544 ile LiH'ye göre %1,6 daha düşük kalmaktadır. Başlangıçtaki 2,10909 değerinden %22,1'lik bir artışla bu seviyeye ulaşılmıştır.

4.1.3. Filyon tepkimeleri

Bir nötronun ağır elementler, özellikle uranyum (^{235}U) ve plütonyum ile etkileşimi, radyatif yakalama veya filyon sürecini tetikleyebilir (Şekil 4.5). Filyonda, nötronun yakalanmasıyla çekirdek kararsız hale gelir ve iki filyon parçasına bölünür. Bu süreçte açığa çıkan yaklaşık 200 MeV enerjinin 166 MeV'si filyon parçalarının kinetik enerjisi olarak taşınır. Filyon sırasında hızlı nötronlar ve anlık gama ışınları da yayılır. Ortaya çıkan ısı enerjisi, nükleer reaktörlerde kullanılabilir [63].



Şekil 4.5. Fisyon süreci genel gösterimi

Bir nötronun ^{235}U gibi bir çekirdekle etkileşimi, oluşan ^{236}U çekirdeğinin iç enerjisini artırır, çünkü nötron ve ^{235}U 'nun toplam kütlesi, kararlı bir ^{236}U çekirdeğinin kütlesinden fazladır [63]. Tepkimenin ilk adımı şu şekilde ifade edilir:



Yavaş nötronlarla tetiklenen fisyon, ^{235}U gibi çekirdeklerin kinetik enerji katkısıyla gerçekleşebilir. Doğal izotoplardan yalnızca ^{235}U bu şekilde fisyon yaparken, yapay izotoplar ^{239}Pu ve ^{233}U da benzer şekilde fisyonlanabilir. Diğer ağır izotoplar, fisyon için gereken uyarılma enerjisine ulaşmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyar; bu enerji, genellikle gelen nötronun kinetik enerjisiyle sağlanır. Örneğin, ^{238}U 'nun fisyonu için en az 0,9 MeV enerjili nötronlar gerekirken, diğer izotoplar daha yüksek enerji talep eder.

Terminolojide, yavaş nötronlarla fisyon yapabilen maddeler “fissil” olarak adlandırılır; diğer izotoplar ise yeterli enerji sağlandığında fisyonlanabilir. Hızlı nötronlarla fisyon için yaklaşık 1 MeV enerji kullanılması etkin bir yöntemdir [63].

LiH ve Li₂C₂ blanket geometrili hibrid reaktörde, 48 aylık süreçte 5 MW/m² nötron duvar yükü altında oluşan toplam fisyon oranları Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. 5 MW/m² nötron duvar yükü altında oluşan fisyon oranları (a:işlem başlangıcı; b: 48 ay sonra)

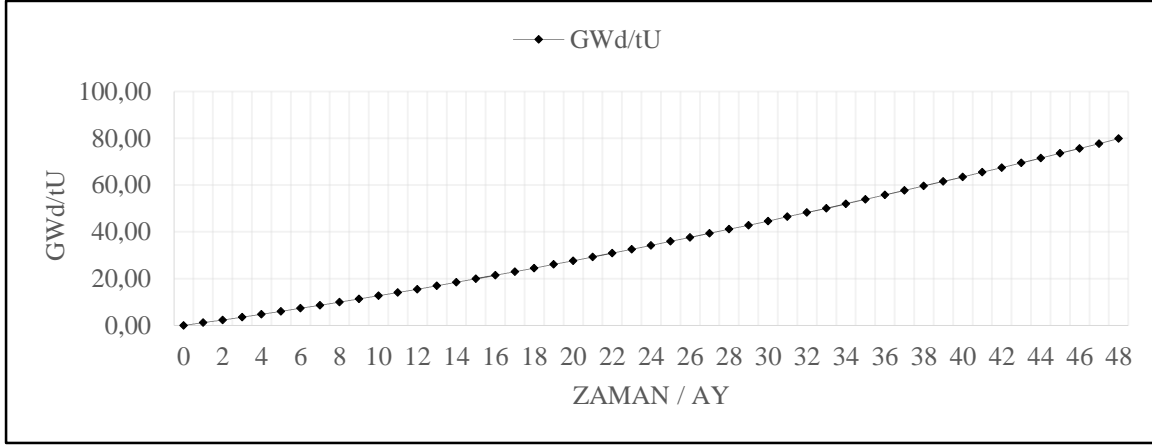
Nötron Duvar Yükü	5 MW/m ²	
	LiH	Li ₂ C ₂
Soğutucu		
Σ_f	0,05777 ^{a)} 0,09222 ^{b)}	0,05743 0,08936

Çizelge 4.2’de sunulan fisyon oranları, LiH ve Li₂C₂ bileşiklerinin nükleer reaksiyonlar üzerindeki etkilerini yansıtmaktadır. LiH için fisyon oranı başlangıçta 0,05777 iken, 48 ay sonunda 0,09222’ye yükselmiş; Li₂C₂ için ise başlangıçta 0,05743 olan oran, 48 ay sonunda 0,08936’ya ulaşmıştıgı gözlemlenmiştir.

4.1.4. Yanma oranları (Burn up)

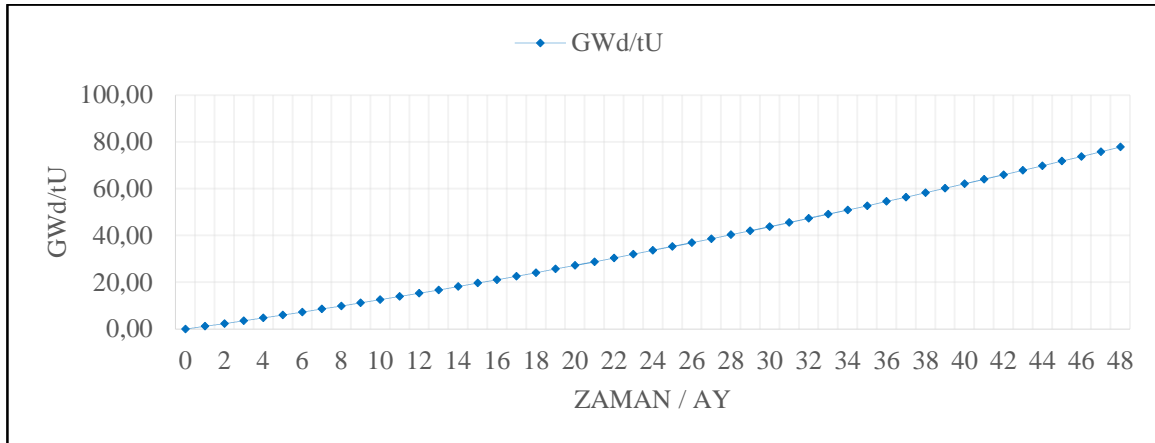
Yanma oranı (burn-up), nükleer reaktörde yakıtın ürettiği enerjiyi ve tüketim miktarını ölçen bir parametredir. Fisyon reaksiyonları sırasında yakıtın fisyon çekirdekleri azalırken, fisyon ürünleri oluşur ve bu ürünler nötron etkileşimleri veya radyoaktif bozunmayla yeni kimyasal elementlere dönüşebilir. Yakıt tüketimi, zamanla reaktör çekirdeğinin izotopik bileşimini değiştirerek nötron akışını ve güç dağılımını etkiler. Yanma oranının bilinmesi, çekirdek tasarımında kritik önem taşır; çünkü bu oran, belirli bir süre boyunca gereken gücü sağlamak için gerekli yakıt miktarını belirlemeyi sağlar [64].

Şekil 4.6’da gösterildiği üzere, 48 ay sonunda LiH blanket geometrisinde yanma oranı 79,80 GWd/tU, Şekil 4.7.’de Li₂C₂ blanket geometrisinde ise 77,78 GWd/tU olarak hesaplanmıştır. LiH blanket geometrisi, Li₂C₂’ye kıyasla daha yüksek yanma oranı sergilemiştir.



Şekil 4.6. LiH blanket geometrisinde yanma oranı (BU) değişimi

LiH blanket grafiğine baktığımızda, yanma oranının 48 ay boyunca istikrarlı bir artış gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.6). Süreç sonunda 79,80 GWd/tU'ya ulaşması, yakıtın (özellikle ^{235}U ve biriken Pu-239) verimli bir şekilde tükendiğini ve fisyon olaylarının zamanla yoğunlaştığını göstermektedir. Bu artış, LiH'nin yüksek hidrojen içeriği sayesinde nötronları yavaşlatarak fisyonu desteklemesiyle açıklanabilir. Hidrojen, nötronları termal enerji seviyelerine getirmekte, bu da U-235 ve Pu-239'un fisyon kesitini artırıp enerji üretimini güçlendirmektedir.



Şekil 4.7. Li_2C_2 blanket geometrisinde yanma oranı (BU) değişimi

Şekil 4.7'deki Li_2C_2 blanket grafiğinde yanma oranı, yine sıfırdan başlayıp 48 ay sonunda 77,78 GWd/tU'ya ulaşıyor, ama LiH'ye göre %2,5 daha düşük. Bu, Li_2C_2 'nin karbon içeriğiyle daha çok nötron reflektörü gibi davranmasından kaynaklanmaktadır. Grafikteki artış eğrisi, LiH'ye benzer şekilde düzenli, ama sonlara doğru biraz daha yavaş bir yükseliş olduğu gözlemlenmiştir.

4.1.5. Fissil yakıt üretimi

Fissil yakıt üretimi, fisyon reaktörlerinde, özellikle uzun vadeli işletimlerde önemli bir rol oynar. Fisyon reaktörlerinde fissil yakıt, farklı izotopların kritik kütle farkları dikkate alınarak “eşdeğer fissil yakıt” kavramıyla hesaplanır. Bu yaklaşım, çeşitli fissil izotopların katkılarını değerlendirmek için ağırlık faktörlerini kullanır. Fissil yakıt, hem fisyon reaktörlerinde hem de füzyon çekirdeklerini çevreleyen blanketlerde üretilebilir ve bu yakıtlar diğer reaktörlerde yeniden kullanıma uygun hale getirilebilir (Harms, 1977).

Doğal olarak bulunan verimli yakıtlar, örneğin ^{232}Th ve ^{238}U , nötron etkileşimleriyle fissil yakıt üretimine şu şekilde dönüşür (Eş.4.5) [66]:



Eş. 4.5 ve Eş. 4.6'daki parantezler (*), ara nükleer bozunma durumlarını ifade eder. Fisyon reaktöründe üretilen fissil yakıt, geri dönüşüm için aynı reaktörde kullanılabilirken, füzyon çekirdeğini çevreleyen blanketlerde üretilen fissil yakıt da fisyon çekirdeğine aktarılabilir. İhtiyaç fazlası fissil yakıt, diğer fisyon reaktörlerini desteklemek için değerlendirilebilir. Ayrıca, trityum gibi fissil yakıtlar, blanket veya fisyon reaktöründe aşağıdaki reaksiyonlarla üretilir [66]:



Eş. 4.6, D-T füzyon reaksiyonunu sürdürmek için trityum üretimini sağlar. Bu reaksiyonlar, füzyon çekirdeğini çevreleyen blanketlerde gerçekleşebilir ya da fisyon çekirdeğinde kasıtlı veya tesadüfi olarak üretilebilir [66].

Nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılan doğal izotoplar ^{235}U ve ^{238}U 'dir. ^{235}U , ana fissil yakıt olarak öne çıkarken, ^{238}U yalnızca MeV seviyesindeki nötronlarla fisyon yapabilir. Bununla birlikte, her nükleer reaktörde ^{238}U (n,γ) reaksiyonlarıyla ^{239}Pu gibi yüksek fissil özelliklere sahip izotoplar üretilir [37].

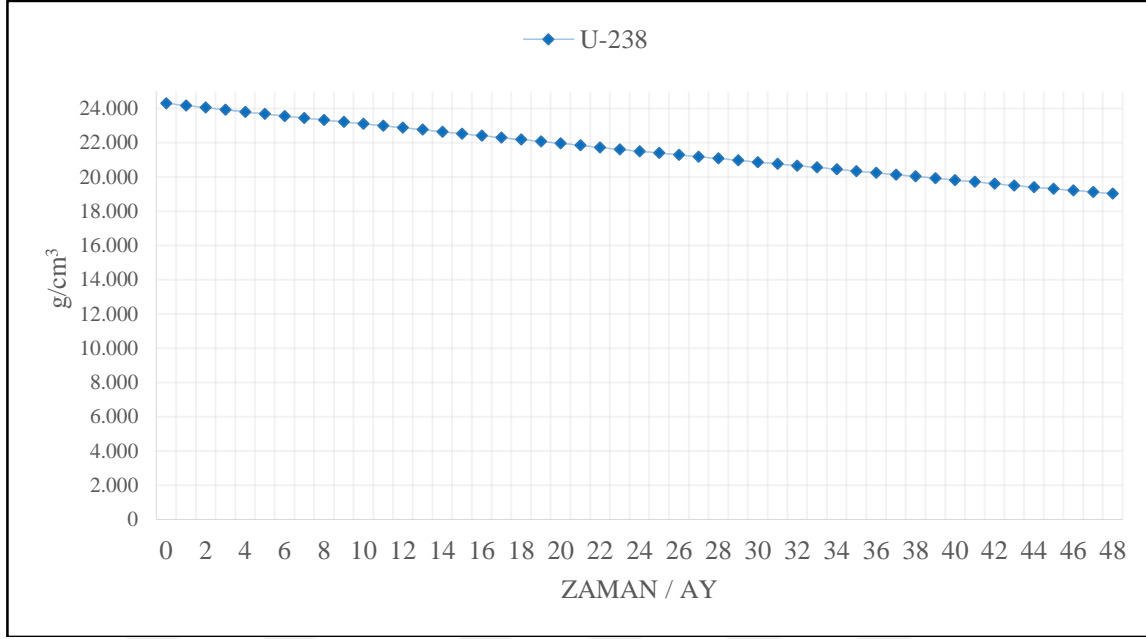
LiH katı trityum üretici içeren blankette izotopların 48 aylık zamana bağlı değişimleri Şekil 4.8-4.10'da, Li_2C_2 katı trityum üretici içeren blankette ise Şekil 4.11-4.13'te sunulmuştur. Her iki blanket geometrisindeki başlangıç ve bitiş kütle değerleri Çizelge 4.3'te derlenmiştir.

5 MW/m² nötron duvar yükü altında, LiH blanket geometrisinde izotopların kütle değişimleri, reaktörün nötron dinamiklerini yansıtır. Başlangıçta U-234 kütlesi 48 ay sonunda 2,04 g/cm³ 'e ulaşmıştır. U-235 izotopu başlangıçta 172,56 g/cm³ olup, süreç sonunda 57,97 g/cm³'a gerilemiştir. U-236 izotopu 48 ay sonunda 19,54 g/cm³ olmuştur. U-238 izotopu başlangıçta 24 301,20 g/cm³, süreç sonunda 19 032,40 g/cm³ düşmüştür. Np-237 kütlesi 48 ay sonunda 637,39 g/cm³'e yükselmiştir. Pu-238 izotopu süreç sonunda 192,23 g/cm³'e ulaşmıştır. Pu-239 izotopu 48 ay sonunda 1276,72 g/cm³ olmuştur. Pu-240 izotopu süreç sonunda 161,22 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Pu-241 izotopu 48 ay sonunda 11,70 g/cm³'e yükselmiştir. Pu-242 izotopu süreç sonunda 0,61 g/cm³ olmuştur. Am-241 izotopu 48 ay sonunda 0,51 g/cm³ olarak kaydedilmiştir.

Li_2C_2 katı trityum üreticinde, 48 aylık işletim süreci boyunca izotop kütle değişimleri, sistemin nötron reflektör özelliklerini ortaya koyar. 48 ay sonunda U-234 izotopu 1,96 g/cm³'e ulaşmıştır. U-235 izotopu başlangıçta 172,56 g/cm³ olup, süreç sonunda 60,71 g/cm³'e gerilemiştir. U-236 izotopu 48 ay sonunda 19,00 g/cm³ olmuştur. U-238 izotopu başlangıçta 24301,20 g/cm³, süreç sonunda 19118,30 g/cm³'a düşmüştür. Np-237 izotopu 48 ay sonunda 650,13 g/cm³'a yükselmiştir. Pu-238 izotopu süreç sonunda 185,17 g/cm³'e ulaşmıştır. Pu-239 izotopu 48 ay sonunda 1247,00 g/cm³ olmuştur. Pu-240 izotopu süreç sonunda 147,84 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Pu-241 izotopu 48 ay sonunda 10,13 g/cm³'e yükselmiştir. Pu-242 izotopu süreç sonunda 0,50 g/cm³ olmuştur. Am-241 izotopu 48 ay sonunda 0,44 g/cm³ olarak kaydedilmiştir.

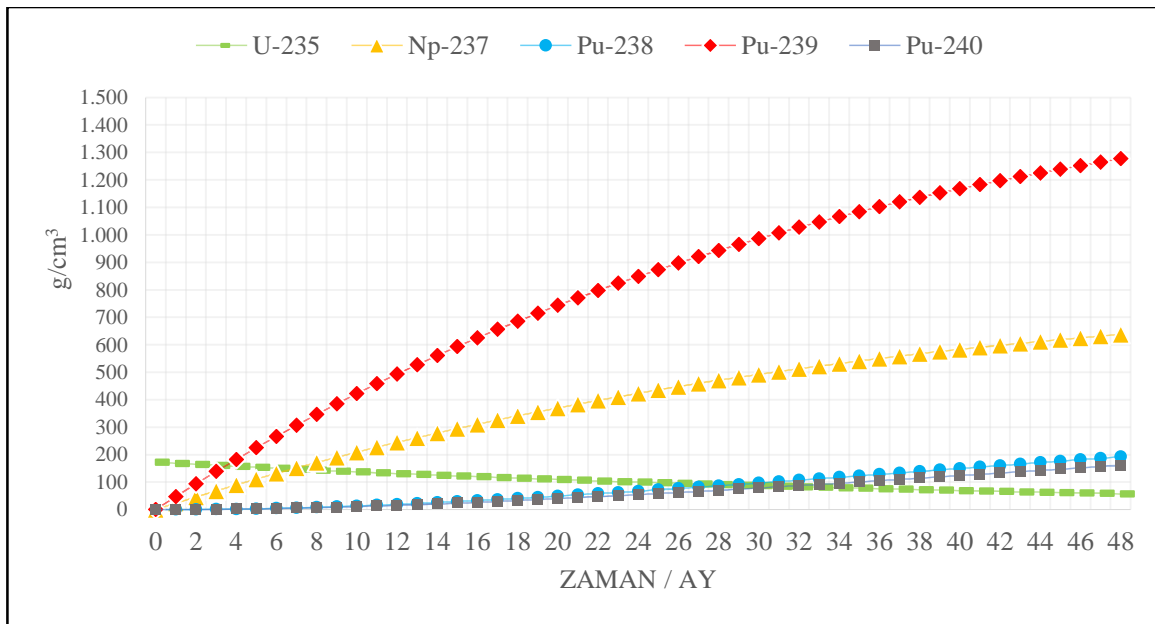
Çizelge 4.3. 5 MW/m² nötron duvar yükü altında gözlemlenen izotopların zamana bağlı değişimi (a:işlem başlangıcı; b: 48 ay sonra)

Nötron Duvar Yükü	5 MW/m ²	
	LiH (g/cm ³)	Li ₂ C ₂ (g/cm ³)
U-234	0,00 ^{a)}	0,00 ^{a)}
	2,04 ^{b)}	1,96 ^{b)}
U-235	172,56 ^{a)}	172,56
	57,97 ^{b)}	60,71
U-236	0,00	0,00
	19,54	19,00
U-238	24301,20	24301,20
	19032,40	19118,30
Np-237	0,00	0,00
	637,39	650,13
Pu-238	0,00	0,00
	192,23	185,17
Pu-239	0,00	0,00
	1276,72	1247,00
Pu-240	0,00	0,00
	161,22	147,84
Pu-241	0,00	0,00
	11,70	10,13
Pu-242	0,00	0,00
	0,61	0,50
Am-241	0,00	0,00
	0,51	0,44
Am-242	0,00	0,00
	0,00	0,00
Am-243	0,00	0,00
	0,02	0,02
Cm-244	0,00	0,00
	0,00	0,00
Cm-245	0,00	0,00
	0,00	0,00



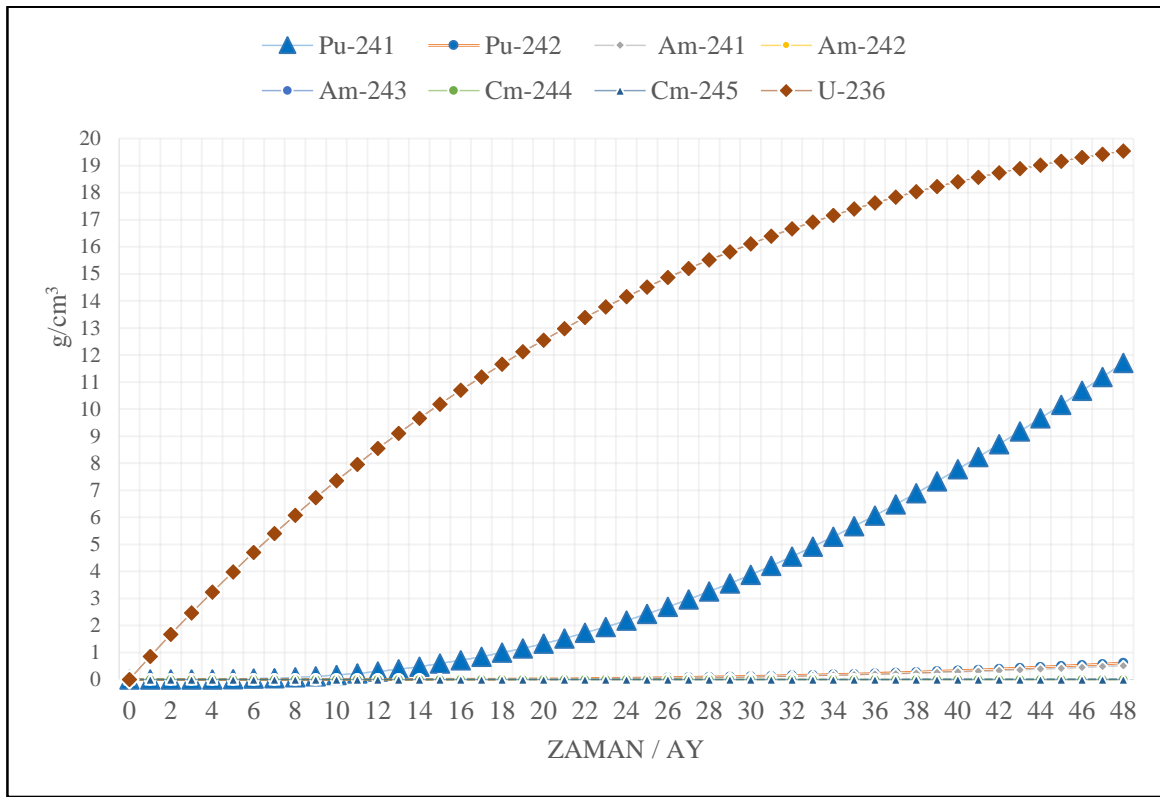
Şekil 4.8. LiH blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-238)

Şekil 4.8’te U-238’in 48 aylık işletim süreci boyunca düzenli bir azalma eğilimi sergilediği gözlemlenmiştir. Başlangıçta $24301,20 \text{ g/cm}^3$ olan kütle, süreç sonunda $19032,40 \text{ g/cm}^3$ ’e gerilemiştir. Bu %21,7’lik azalma, U-238’in nötron yakalama reaksiyonlarıyla (n,γ) Pu-239 gibi fissil izotoplara dönüşmesiyle açıklanmaktadır. Grafikteki düşüş eğrisi, nötron duvar yükünün (5 MW/m^2) etkisiyle fisyon ve yakalama süreçlerinin istikrarlı bir şekilde devam ettiğini göstermektedir.



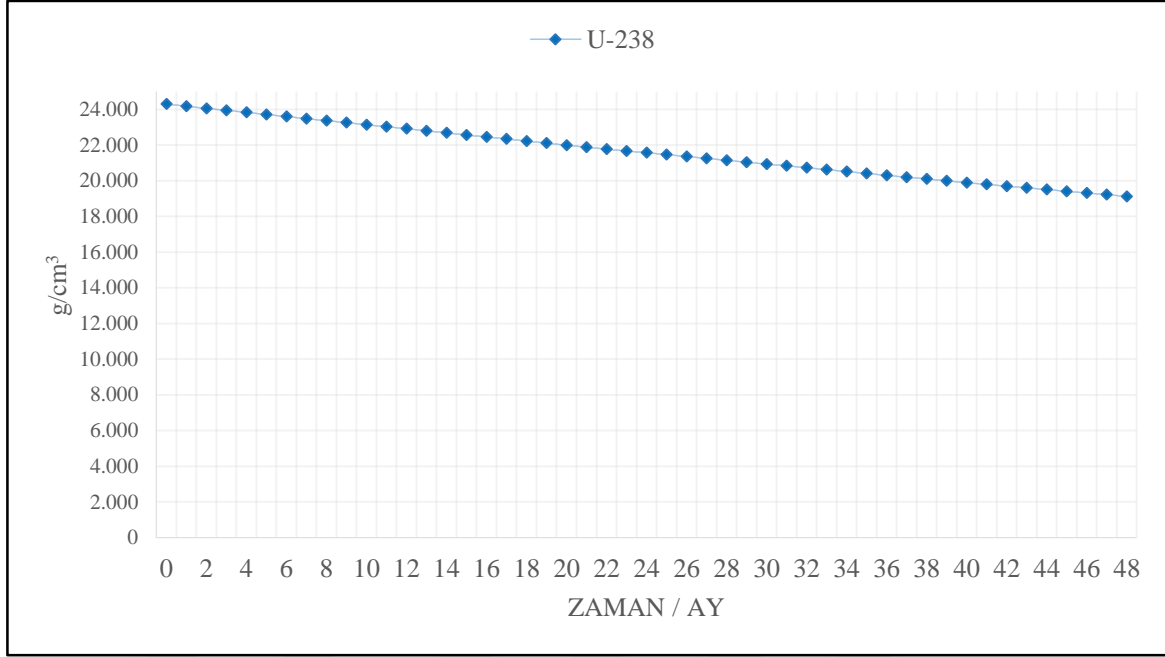
Şekil 4.9. LiH blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-235, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240)

Yukarıda izotopların kütle değişimlerini gösteren grafik (Şekil 4.9), 48 ay boyunca farklı eğilimler ortaya koymaktadır. U-235, başlangıçta $172,56 \text{ g/cm}^3$ iken süreç sonunda %66,4 azalarak $57,97 \text{ g/cm}^3$ 'a düştüğü saptanmıştır, bu da fisyon yoluyla tüketimini yansıtmaktadır. Np-237, sıfırdan $637,39 \text{ g/cm}^3$ 'a ulaşarak önemli bir birikim göstermiştir. Pu-238, $192,23 \text{ g/cm}^3$, Pu-239, $1276,72 \text{ g/cm}^3$ ve Pu-240, $161,22 \text{ g/cm}^3$ olarak kaydedilmiş, özellikle Pu-239'un yüksek birikimi dikkat çekmektedir. Şekil 4.9'daki eğriler, Pu-239'un nötron yakalama yoluyla hızlı bir artış sergilediğini, diğer izotopların ise daha yavaş birikim gösterdiğini ifade etmektedir.



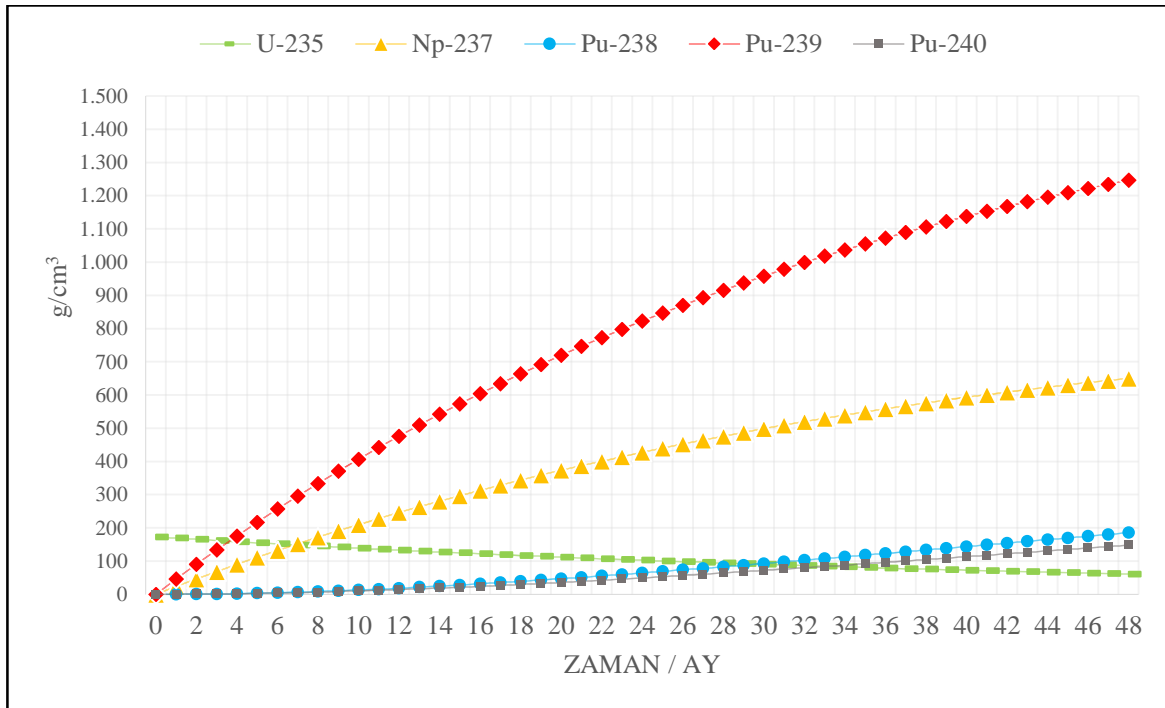
Şekil 4.10. LiH blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-236, Pu-239, Pu-242, Am-241, Am-242, Am-243, Cm-244, Cm-245)

Şekil 4.10'daki izotopların grafiği, 48 ay sonunda düşük kütle birikimlerini göstermektedir. U-236, sıfırdan $19,54 \text{ g/cm}^3$ 'a ulaşmış, Pu-241 $11,70 \text{ g/cm}^3$, Pu-242 $0,61 \text{ g/cm}^3$, Am-241 $0,51 \text{ g/cm}^3$ ve Am-243 $0,02 \text{ g/cm}^3$ olarak kaydedilmiştir. Am-242, Cm-244 ve Cm-245 ise sıfır kütlede kalmıştır. Grafikteki eğriler, U-236 ve Pu-241'in sınırlı bir artış gösterdiğini, diğer izotopların ise çok düşük seviyelerde biriktiğini yansıtmaktadır. Bu, nötron yakalama süreçlerinin bu izotoplar için daha az etkili olduğunu düşündürmektedir.



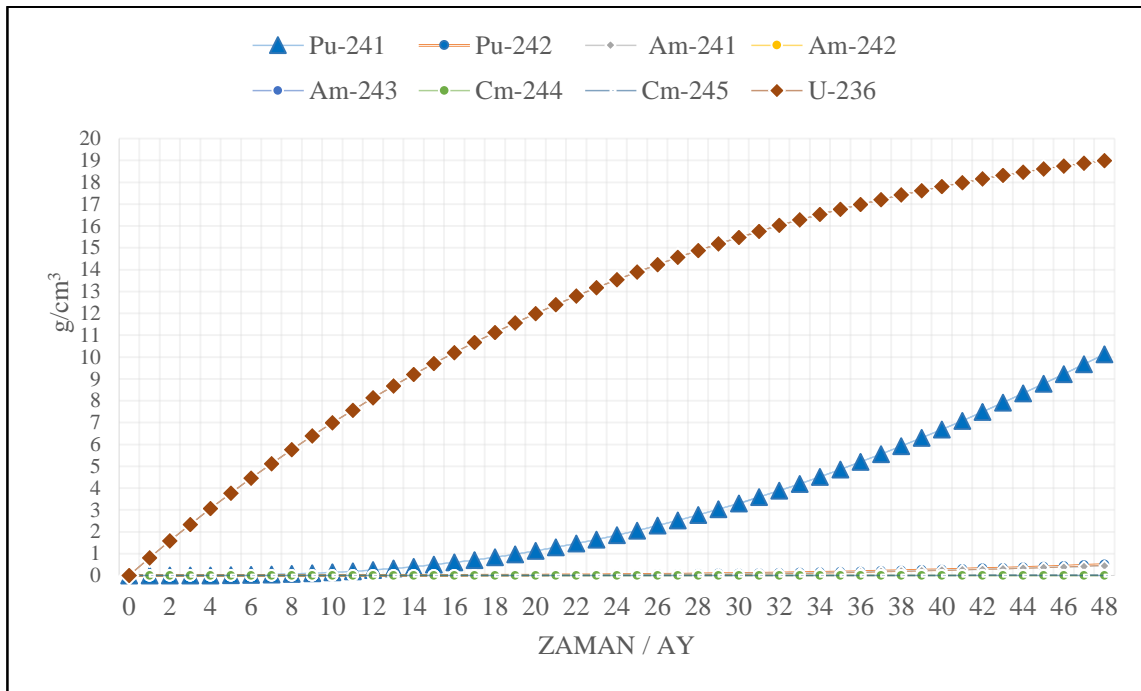
Şekil 4.11. Li_2C_2 blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-238)

U-238 kütlesinin zamana bağlı değişimini gösteren grafik (Şekil 4.11), 48 ay boyunca düzenli bir azalma eğilimi sergilemektedir. Başlangıçta $24\,301,20\text{ g/cm}^3$ olan kütle, süreç sonunda $19\,118,30\text{ g/cm}^3$ 'a gerilemiştir. Bu %21,3'lük azalma, U-238'in nötron yakalama yoluyla Pu-239 gibi fissil izotoplara dönüştüğünü ifade etmektedir.



Şekil 4.12. Li_2C_2 blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-235, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240)

U-235, Np-237, Pu-238, Pu-239 ve Pu-240'ın izotoplarının kütle değişimlerini gösteren grafik (Şekil 4.12), 48 ay boyunca farklı eğilimler ortaya koymaktadır. U-235, başlangıçta $172,56 \text{ g/cm}^3$ iken %64,8 azalarak $60,71 \text{ g/cm}^3$ 'e düşmüştür, bu da fisyon yoluyla tüketildiğini yansıtmaktadır. Np-237, sıfırdan $650,13 \text{ g/cm}^3$ 'e ulaşarak belirgin bir birikim göstermiştir. Pu-238, $185,17 \text{ g/cm}^3$, Pu-239, $1247,00 \text{ g/cm}^3$ ve Pu-240, $147,84 \text{ g/cm}^3$ olarak kaydedilmiş, Pu-239'un yüksek birikimi öne çıkmaktadır. Grafikteki eğriler, Pu-239'un nötron yakalama yoluyla hızlı bir artış sergilediğini, Np-237 ve Pu-238'in orta seviyede biriktiğini, Pu-240'ın ise daha yavaş bir yükseliş gösterdiğini ifade etmektedir.



Şekil 4.13. Li_2C_2 blanket geometrisinde fissil yakıt değişimi (U-236, Pu-239, Pu-242, Am-241, Am-242, Am-243, Cm-244, Cm-245)

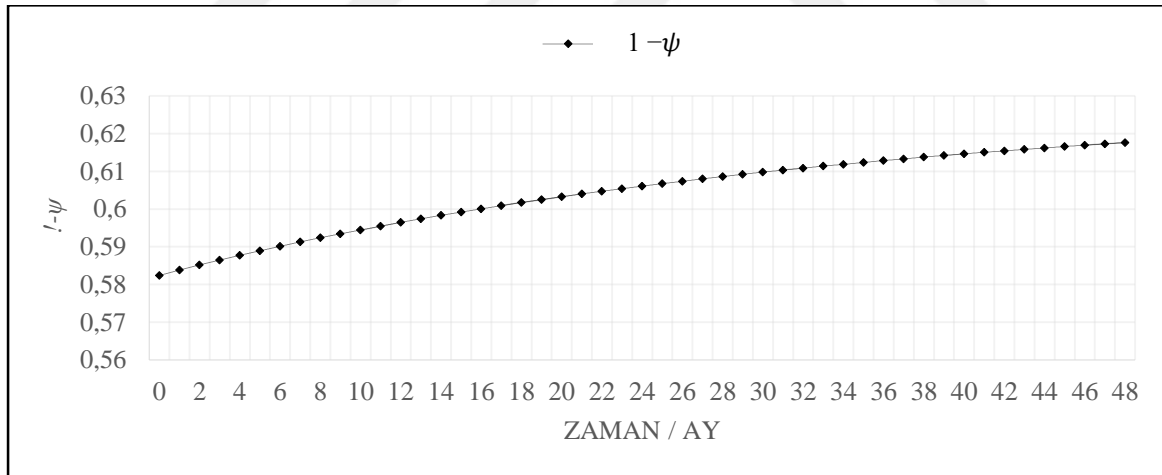
Şekil 4.13'te izotoplar 48 ay sonunda düşük kütle birikimlerini ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. U-236, sıfırdan $19,00 \text{ g/cm}^3$ 'a ulaşmış, Pu-241 $10,13 \text{ g/cm}^3$, Pu-242 $0,50 \text{ g/cm}^3$, Am-241 $0,44 \text{ g/cm}^3$ ve Am-243 $0,02 \text{ g/cm}^3$ olarak kaydedilmiştir. Am-242, Cm-244 ve Cm-245 sıfır kütlede kalmıştır. U-236 ve Pu-241'in sınırlı bir artış göstermiş, Pu-242, Am-241 ve Am-243'ün çok düşük seviyelerde birikmiş, diğer izotopların ise birikim göstermediği gözlemlenmiştir. Bu, nötron yakalama süreçlerinin bu izotoplar için daha az etkin olduğunu düşündürmektedir.

4.2. Hibrid Reaktör ve Hidrojen Üretim Potansiyeli

Hibrid füzyon-fisyon reaktöründe, HyS-Cl termokimyasal döngüsüyle hidrojen üretim kapasitesi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Reaktör tasarımı ile hidrojen üretim tesisi entegre edilerek sistemin bütüncül performansı değerlendirilmiştir.

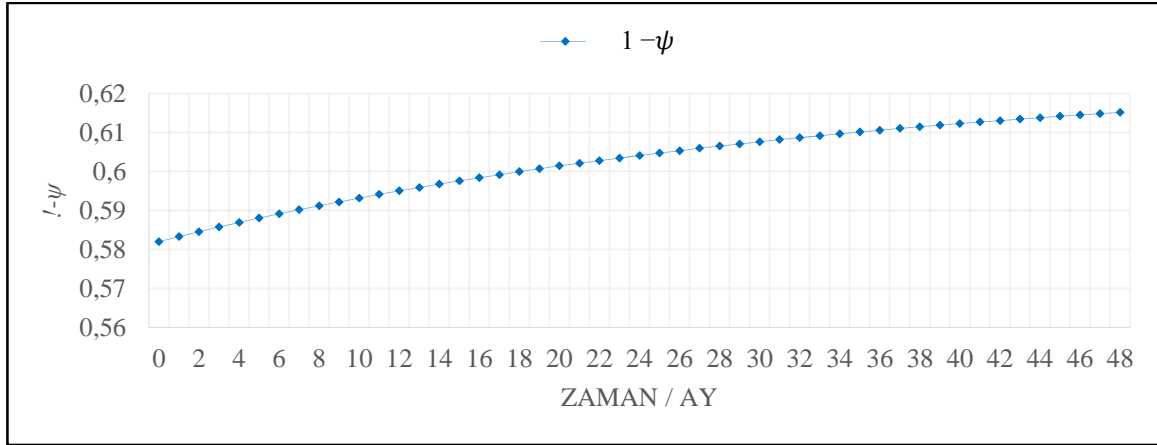
Bu analizlerde, temel parametrelerin incelenmesi büyük önem taşır. Termokimyasal döngüyle hidrojen üreten tesiste hem elektrik hem de ısı enerjisi gereklidir. Bu kapsamda, M faktörüne bağlı olarak hesaplanan termal güç oranı ($1-\psi$), tesisin toplam termal gücü (P_{hpf}) ve hidrojen üretim hızı (\dot{m}) belirlenmiştir.

Şekil 4.14'te, LiH yapıları blanket geometrisinde ($1-\psi$) termal güç oranının 48 aylık işletim süreci boyunca değişimi sunulmuştur. Başlangıçta 0,5824 olan ($1-\psi$) değeri, süreç sonunda %6,0'lık bir artışla 0,6175'e ulaşmıştır. Bu yükseliş, reaktörün termal enerjisinin hidrojen üretimine yönlendirilen payının zamanla arttığını ifade etmektedir.



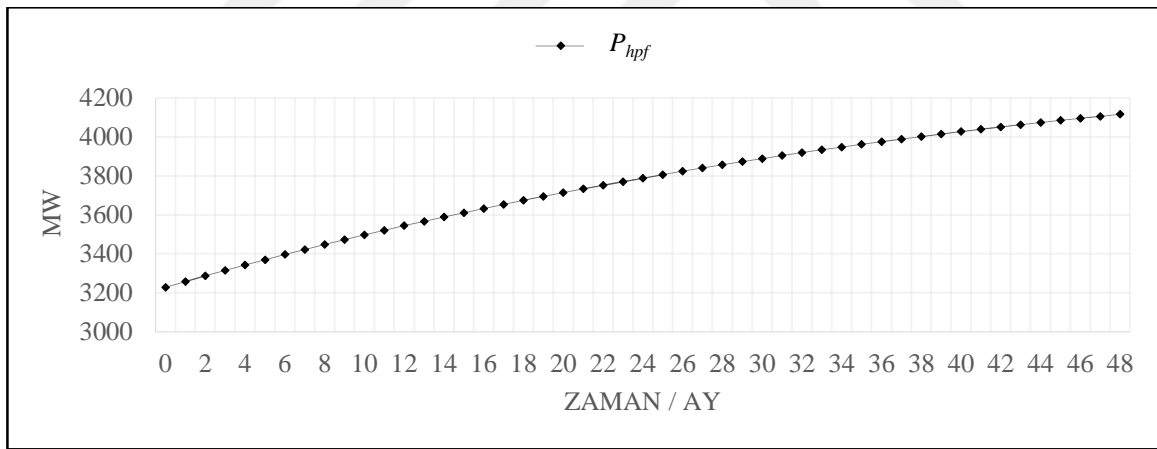
Şekil 4.14. LiH blanket geometrisinde termal güç oranı ($1 - \psi$) zamana bağlı değişimi

Şekil 4.15'te ise Li_2C_2 blanket geometrisinde ($1-\psi$) termal güç oranının 48 aylık işletim süreci boyunca gösterdiği değişim sunulmuştur. Başlangıçta 0,5819 olan ($1-\psi$) değeri, süreç sonunda %5,7'lik bir artışla 0,6151'e ulaşmıştır. Bu artış, Li_2C_2 blanket geometrisinde termal enerjinin hidrojen üretimine ayrılan payının zamanla büyüdüğünü yansıtmaktadır.



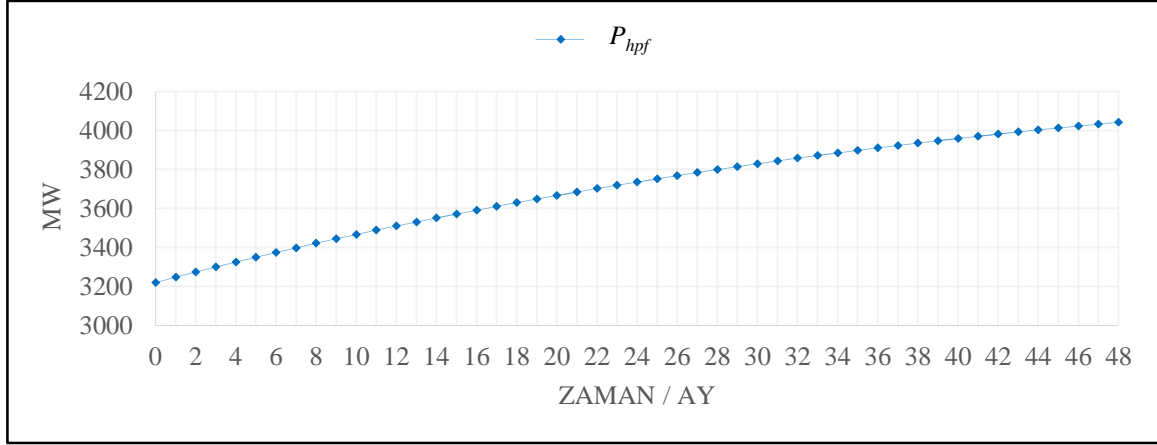
Şekil 4.15. Li_2C_2 blanket geometrisinde termal güç oranı ($1 - \psi$) zamana bağlı değişimi

LiH blanket geometrisinde, toplam termal güç (P_{hpf}) değerinin 48 aylık işletim süreci boyunca değişimi Şekil 4.16'te verilmiştir. Başlangıçta 3228,67 MW olan P_{hpf} değeri, süreç sonunda %27,5'lik bir artışla 4115,63 MW'a ulaşmıştır. Bu yükseliş, reaktörün enerji üretim kapasitesinin zamanla güçlendiğini ifade etmektedir.



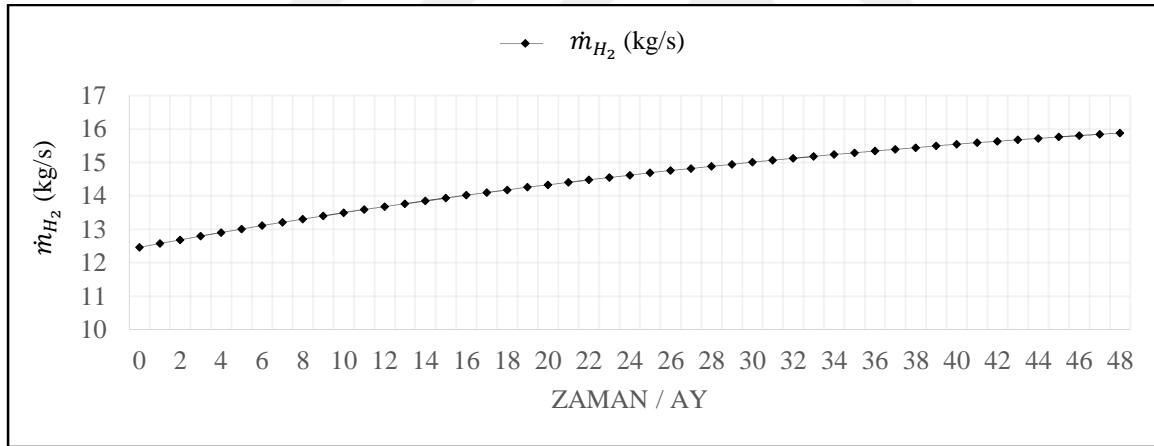
Şekil 4.16. LiH blanket geometrisinde toplam termal güç (P_{hpf}) zamana bağlı değişimi

Li_2C_2 blanket geometrisinde, toplam termal güç (P_{hpf}) değerinin 48 aylık işletim süreci boyunca değişimi Şekil 4.17'de sunulmuştur. Başlangıçta 3219,94 MW olan P_{hpf} değeri, süreç sonunda %25,5'lik bir artışla 4042,21 MW'a ulaşmıştır. Bu artış, Li_2C_2 blanket geometrisinde enerji üretiminin zamanla yükseldiğini yansıtmaktadır.



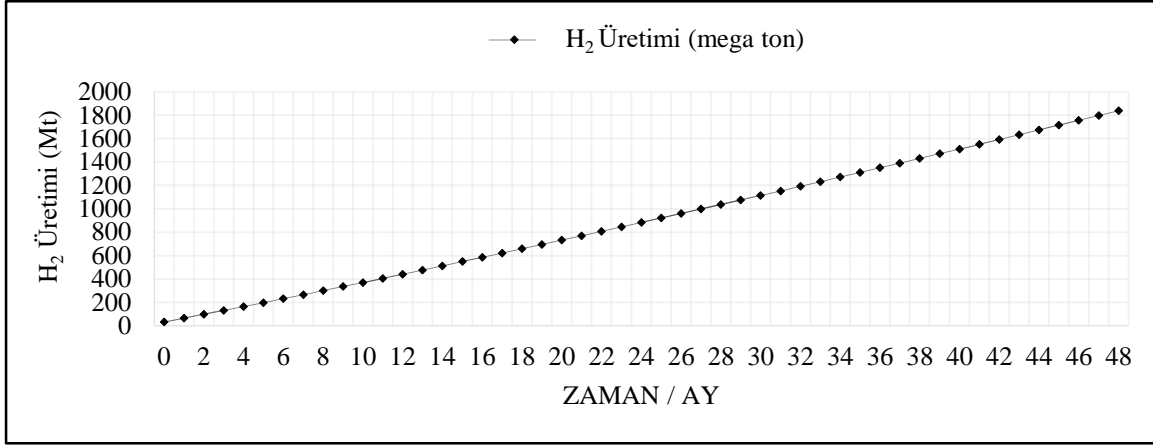
Şekil 4.17. Li_2C_2 blanket geometrisinde toplam termal güç (P_{hpf}) zamana bağlı değişimi

LiH blanket geometrisine entegre hidrojen üretim tesisinde, hidrojen üretim hızının 48 aylık süreçteki değişimi Şekil 4.18’de sunulmuştur. Başlangıçta 12,46 kg/s olan üretim hızı, süreç sonunda 15,88 kg/s’ye yükselmiştir.



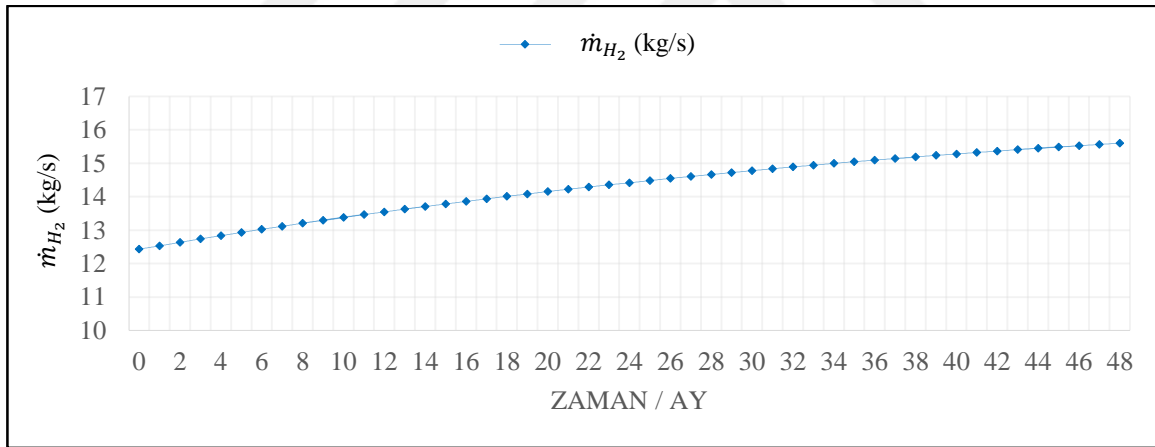
Şekil 4.18. LiH blanket geometrisi üzerine entegre hidrojen üretim tesisinde üretilen hidrojen miktarının (\dot{m}_{H_2}) zamana bağlı değişimi

LiH blanket geometrisine entegre hidrojen üretim tesisinde, hidrojen üretim miktarı 48 aylık süreçteki değişimi Şekil 4.19’da sunulmuştur. İlk ayın sonunda 32,2993 Mt (mega ton) olan üretim miktarı, süreç sonunda önceki aylar ile birlikte katlanarak 1837,4886 Mt’a yükselmiştir.



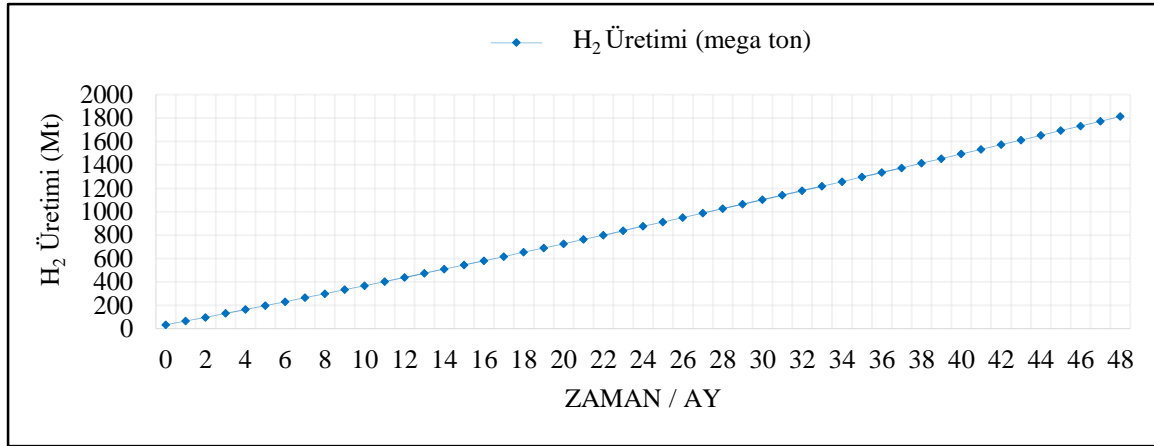
Şekil 4.19. LiH blanket geometrisi üzerine entegre hidrojen üretim tesisinde üretilen toplam hidrojen miktarı (mega ton- t) zamana bağlı değişimi

Li₂C₂ blanket geometrisine entegre hidrojen üretim tesisinde, hidrojen üretim hızının 48 aylık süreçteki değişimi Şekil 4.20’de verilmiştir. Başlangıçta 12,43 kg/s olan üretim hızı, süreç sonunda 15,60 kg/s’ye ulaşmıştır.



Şekil 4.20. Li₂C₂ blanket geometrisi üzerine entegre hidrojen üretim tesisinde üretilen hidrojen miktarının (\dot{m}_{H_2}) zamana bağlı değişimi

Li₂C₂ blanket geometrisine entegre hidrojen üretim tesisinde, hidrojen üretim miktarı 48 aylık süreçteki değişimi Şekil 4.21’de sunulmuştur. İlk ayın sonunda 32,2120 Mt (mega ton) olan üretim miktarı, süreç sonunda önceki aylar ile birlikte katlanarak 1837,4886 Mt’a yükselmiştir.



Şekil 4.21. Li₂C₂ blanket geometrisi üzerine entegre hidrojen üretim tesisinde üretilen toplam hidrojen miktarı (mega ton- t) zamana bağlı değişimi

Bu çalışma kapsamında, HyS-Cl termokimyasal çevrimiyle elde edilen hidrojen üretim miktarları (kg/s), literatürdeki bulgularla karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi, literatürde farklı nükleer reaktör tasarımları, çeşitli yakıt türleri, değişken parametreler ve alternatif hidrojen üretim yöntemleri bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, önerilen çevrimin performansını değerlendirirken sistemin özgün katkılarını ve enerji verimliliğini vurgulamaktadır.

Çizelge 4.4. Farklı termokimyasal çevrimlerle hidrojen üretim miktarlarının literatürle karşılaştırılması

Referans	Reaktör Adı	Yakıt ve Soğutucu	Hidrojen Üretim Yöntemi	H ₂ Üretim Miktarı (kg/s)
Bu çalışma	Hibrid Füzyon-Fisyon Reaktörü	UO ₂ Doğal Lityum	HyS-Cl (LiH Blanket) HyS-Cl (Li ₂ C ₂ Blanket)	~12,46- 15,88 aralığında ~12,43- 15,60 aralığında
Ref. [60]	SOMBRERO Füzyon Reaktörü	%2-%10 UO ₂	HyS-Br HyCa-Br	~3,14- 4,52 ~2,63- 3,78
Ref. [67]	PACER füzyon reaktörü	Eriyik tuz karışımı (FLiBe, ThF ₄ , UF ₄)	S-I çevrim Fe-Cl çevrim,	6,5- 12 5,6- 10,2

Çizelge 4.4. (devam) Farklı termokimyasal çevrimlerle hidrojen üretim miktarlarının literatürle karşılaştırılması

Ref. [13]	LIFE füzyon reaktörü	TRISO kaplamalı ThC	Cu-Cl Co-Cl S-I	9 4,8 7,36
Ref. [56]	FFHR füzyon reaktörü	Eriyik tuz karışımı (FLiBe, ThF ₄ , UF ₄)	S-I çevrim	11,25
Ref. [58]	Apex füzyon reaktörü	Eriyik tuz karışımı (Minör Aktinit ve FLiBe)	SMR HTE S-I	60 8,60 8,40
Ref. [68]	HTR-PM fisyon reaktörü	TRISO kaplamalı UO ₂	Mg-Cl	2,43

Bu çalışma kapsamında, hibrid füzyon-fisyon reaktöründe HyS-Cl termokimyasal döngüsüyle hidrojen üretim performansı değerlendirilmiştir. Hidrojen üretim hızı (\dot{m}_{H_2}), LiH blanket geometrisinde 12,46 kg/s'den 15,88 kg/s'ye, Li₂C₂ geometrisinde ise 12,43 kg/s'den 15,60 kg/s'ye yükselmiştir. Bu sonuçlar, diğer reaktörlerle karşılaştırıldığında hibrid reaktörün hidrojen üretim performansını ortaya koymaktadır (Çizelge 4.4). SOMBRERO füzyon reaktörü, HyS-Br döngüsünde 3,14–4,52 kg/s ve HyCa-Br döngüsünde 2,63–3,78 kg/s hidrojen üretimi elde etmiştir. PACER füzyon reaktörü, S-I döngüsünde 6,5–12 kg/s ve Fe-Cl döngüsünde 5,6–10,2 kg/s üretim sağlamış, LIFE füzyon reaktörü, Cu-Cl (9 kg/s), Co-Cl (4,8 kg/s) ve S-I (7,36 kg/s) döngülerinde sabit üretim sunmuştur. FFHR füzyon reaktörü, S-I döngüsünde 11,25 kg/s ile bu tezde başlangıçta üretilen \dot{m}_{H_2} 'ye yakın bir üretim göstermiştir. Apex füzyon reaktörü ise SMR döngüsünde 60 kg/s üretim sağlarken, HTE (8,60 kg/s) ve S-I (8,40 kg/s) üretim sağlamıştır. HTR-PM fisyon reaktörü, Mg-Cl döngüsünde 2,43 kg/s ile bu tez kapsamında kullanılan hibrid füzyon-fisyon reaktörden daha az hidrojen ürettiği gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar göz önüne alındığında, hibrid füzyon-fisyon reaktörünün HyS-Cl döngüsüyle sağladığı hidrojen üretim performansı, diğer reaktörlerle karşılaştırıldığında belirli avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Avantajlar arasında, hibrid reaktörün LiH ve Li₂C₂ blanket geometrilerinin esnekliği yer alır; LiH, yüksek yanma oranı (%5–10 daha fazla

enerji üretimi) ile enerji üretimini desteklerken Li_2C_2 , nötron refleksiyonu sayesinde TBR’de %10–15 daha fazla artış sağlamıştır. Fissil yakıt üretimi, özellikle Pu-239 birikimi, uzun vadeli yakıt döngüsüne katkı sağlar. Ancak, HyS-Cl döngüsünün $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ adımının yüksek enerji gereksinimi, daha fazla termal güç talep eder. $x_{\text{net}} = 0$ seçimi, elektriğin tesis içi kullanımıyla şebeke gelirini sınırlayarak ekonomik performansı %20–30 oranında etkilemektedir. Bu avantajlar ve dezavantajlar, hibrid reaktörün hidrojen üretiminde etkili bir performans sergilediğini, ancak termodinamik ve ekonomik optimizasyonlarla daha da geliştirilebileceğini göstermektedir.

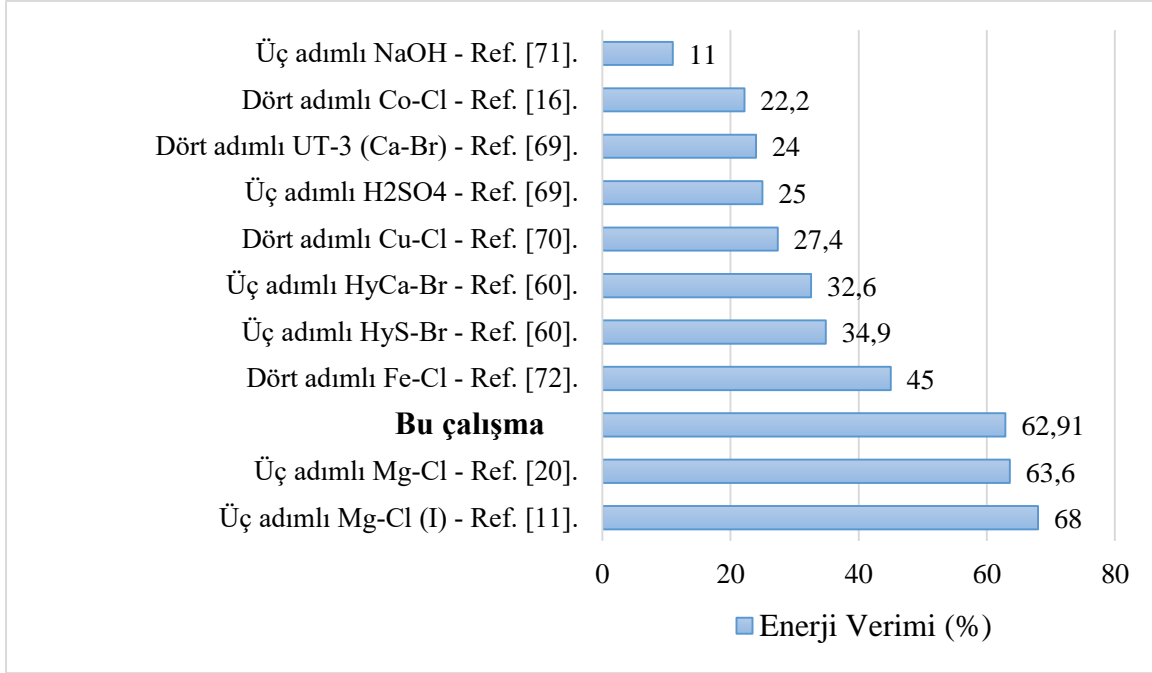
4.3. Termokimyasal çevrimlerin hidrojen üretim verimlerinin karşılaştırılması

Bu kısımda, HyS-Cl termokimyasal çevrimiyle gerçekleştirilen hidrojen üretiminin sistem ve çevrim verimliliği analiz edilmiştir. Verim hesaplamaları, Eş. 4.7 ve 4.8 kullanılarak yapılmıştır [60].

$$\eta_{\text{sistem}} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2} \times \text{LHV}_{\text{H}_2}}{P_{\text{hpf}}} \quad (4.7)$$

$$\eta_{\text{çevrim}} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2} \times \text{LHV}_{\text{H}_2}}{Q} \quad (4.7)$$

Burada η_{sistem} , sistemin verimini, $\eta_{\text{çevrim}}$, termokimyasal çevrimin verimini, \dot{m}_{H_2} , reaktörden elde edilen hidrojen üretim miktarını (kg/s), LHV_{H_2} , hidrojenin alt ısıl değerini, P_{hpf} , hidrojen üretimi için kullanılan toplam termal gücü (MW), Q ise çevrimin ısı gereksinimini (MW) temsil etmektedir. Hesaplamalar sonucunda, HyS-Cl termokimyasal çevriminin hem LiH hem de Li_2C_2 blanket için sistem verimi tüm süreç boyunca %46,31, çevrim verimi ise %62,91 bulunmuştur. Bu değerler, literatürdeki diğer termokimyasal çevrimlerle karşılaştırıldığında dikkat çekici bir tablo ortaya koymaktadır (Şekil 4.22).



Şekil. 4.22. Farklı çevrimler için hidrojen üretim verimliliği karşılaştırması [11, 16, 20, 60, 69, 70, 71, 72].



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, doğal lityum soğutmalı ve UO_2 yakıtlı bir füzyon-fisyon hibrid reaktörde, HyS-Cl termokimyasal çevrimiyle hidrojen üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. LiH ve Li_2C_2 bileşenlerini içeren blanket yapılarıyla tasarlanan hibrid reaktörde, nötron transport denklemlerine dayalı S_8-P_3 çözümleme yöntemiyle SCALE4.4a nötronik kodu kullanılmıştır. Bu hesaplamalarla reaktörün temel performans parametreleri belirlenmiştir. Enerji çoğaltım faktörüne bağlı olarak, hibrid reaktöre entegre HyS-Cl döngüsüyle termal güç fraksiyonu, tesisin enerji ihtiyacı ve hidrojen üretim kapasitesi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. LiH ve Li_2C_2 blanket geometrileri için ayrı ayrı yapılan analizler, sistemin verimliliğini ve potansiyelini ortaya koymuştur. Aşağıda, her iki blanket yapısı için elde edilen bulgular maddeler halinde özetlenmiştir:

- Tritiyum üretim oranları (TBR), LiH blanket geometrisinde başlangıçta 1,20562, 48 ay sonunda 1,25335 olarak hesaplanmıştır. Li_2C_2 blanket geometrisinde ise başlangıç değeri 1,23166 iken, süreç sonunda 1,27653'e ulaşmıştır. LiH'de %4,0, Li_2C_2 'de %3,7 artış gözlemlenmiştir. Bu artışlar ile blanketlerin trityum üretim kapasitesinin işletim süresi boyunca istikrarlı bir şekilde yükseldiği ölçülmüştür.
- Enerji çoğaltım faktörleri (M), LiH blanket geometrisinde başlangıçta 2,11404, 48 ay sonunda 2,61708 olarak belirlenmiştir. Li_2C_2 blanket geometrisinde başlangıç değeri 2,10909 iken, süreç sonunda 2,57544'e yükselmiştir. LiH'de %23,8, Li_2C_2 'de %22,1 artış kaydedilmiştir. Bu yükseliş, fisyon ve nötron çoğaltım süreçlerinin blanketlerde enerji üretimini önemli ölçüde artırdığını ifade etmektedir.
- Toplam fisyon oranları, LiH blanket geometrisinde başlangıçta 0,05777, 48 ay sonunda 0,09222 olarak hesaplanmıştır. Li_2C_2 blanket geometrisinde başlangıç değeri 0,05743 iken, süreç sonunda 0,08936'ya ulaşmıştır. LiH'de %59,6, Li_2C_2 'de %55,6 artış gözlemlenmiştir.
- Yanma oranları (Burn up), LiH blanket geometrisinde 48 ay sonunda 79,80 GWd/tU, Li_2C_2 blanket geometrisinde ise 77,78 GWd/tU olarak ölçülmüştür. Başlangıçta sıfır kabul edilen yanma oranları, LiH'de 79,80 GWd/tU, Li_2C_2 'de 77,78 GWd/tU'ya ulaşarak %2,6'lık bir fark göstermiştir. Bu değerler, yakıtın enerji üretiminde etkin bir şekilde kullanıldığını ve LiH'nin biraz daha yüksek verim sunduğunu göstermektedir.

- Fissil yakıt üretim oranları, LiH ve Li₂C₂ blanket geometrilerinde izotop kütle değişimleriyle değerlendirilmiş; 48 ay sonunda her iki yapıda da önemli fissil izotop birikimleri gözlemlenmiştir. Başlangıçta sıfır olan fissil izotoplar (örneğin, Pu-239: LiH'de 1276,72 g/cm³, Li₂C₂'de 1247,00 g/cm³, LiH'de %2,4 daha fazla birikim göstermiştir. Bu birikim ile nötron yakalama süreçlerinin uzun vadeli yakıt döngüsüne katkı sağlandığı teorik olarak gözlemlenmiştir.
- Termal güç oranları (1-ψ), LiH blanket geometrisinde başlangıçta 0,5824, 48 ay sonunda 0,6175 olarak hesaplanmıştır. Li₂C₂ blanket geometrisinde başlangıç değeri 0,5819 iken, süreç sonunda 0,6151'e yükselmiştir. LiH'de %6,0, Li₂C₂'de %5,7 artış kaydedilmiştir.
- Toplam termal güç (P_{hpf}), LiH blanket geometrisinde başlangıçta 3228,67 MW, 48 ay sonunda 4115,63 MW olarak belirlenmiştir. Li₂C₂ blanket geometrisinde başlangıç değeri 3219,94 MW iken, süreç sonunda 4042,21 MW'a ulaşmıştır. LiH'de %27,5, Li₂C₂'de %25,5 artış gözlemlenmiştir. Bu yükseliş, reaktörün enerji üretim kapasitesinin zamanla güçlendiğini ve LiH'nin biraz daha yüksek katkı sunduğunu göstermektedir.
- Hidrojen üretim miktarları (\dot{m}_{H_2}), LiH blanket geometrisine entegre tesiste başlangıçta 12,46 kg/s, 48 ay sonunda 15,88 kg/s olarak ölçülmüştür. Toplam üretim miktarına baktığımızda 48 ay sonunda 1837,4886 Mt elde edilmiştir. Li₂C₂ blanket geometrisine entegre tesiste başlangıç değeri 12,43 kg/s iken, süreç sonunda 15,60 kg/s'ye yükselmiştir. Toplam üretim miktarına baktığımızda 48 ay sonunda 1813,5846 Mt elde edilmiştir. LiH'de %27,47, Li₂C₂'de %25,54 artış kaydedilmiştir. Bu artışlar, HyS-Cl döngüsünün hidrojen üretim performansının işletim süresi boyunca iyileştiğini ve LiH'nin biraz daha yüksek verim sağladığını yansıtmaktadır.

Bu çalışma, füzyon-fisyon hibrid reaktörlerde HyS-Cl termokimyasal döngüsünün hidrojen üretim potansiyelini ortaya koymuş; ancak ileriki araştırmalarda, LiH ve Li₂C₂ blanket geometrilerinin farklı yakıt kompozisyonları ve nötronik parametrelerle optimizasyonu sistem verimliliğini daha da artırabilir.

KAYNAKLAR

1. Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., Khalilpour, K. (2020). Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109620.
2. Singla, M., Nijhawan, P., Oberoi, A. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 15607-15626
3. Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180.
4. Dawood, F., Anda, M., Shafiullah, G. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3847-3869.
5. Møller, K., Jensen, T., Akiba, E., Li, H. (2017). Hydrogen - a sustainable energy carrier. *Progress in Natural Science: Materials International*, 27, 34-40.
6. Dutta, S. (2014). A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 1148-1156.
7. Fernández-Arias, P., Antón-Sancho, Á., Lampropoulos, G., Vergara, D. (2024). Emerging trends and challenges in pink hydrogen research. *Energies*, 17(10), 2291.
8. Maniscalco, M., Longo, S., Cellura, M., Micciché, G., Ferraro, M. (2024). Critical review of life cycle assessment of hydrogen production pathways. *Environments*, 11, 108.
9. Yılmaz, F., Selbaş, R. (2017). Thermodynamic performance assessment of solar based sulfur-iodine thermochemical cycle for hydrogen generation. *Energy*, 140, 520-529.
10. Ying, Z., Yang, J., Zheng, X., Wang, Y., Dou, B. (2021). Energy and exergy analyses of a novel sulfur-iodine cycle assembled with HI-I₂-H₂O electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 27975-27987.
11. Acır, A., Özkaya, M. (2024). Performance evaluation of the Fe-Cl and Mg-Cl cycle for hydrogen production of the minor actinide fuelled PACER fusion blanket. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 634-643.
12. Safari, F., Dinçer, I. (2020). A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 205, 112182.
13. Asal, Ş., Acır, A. (2023). Evaluation and comparison of hydrogen production potential of the LIFE fusion reactor by using copper-chlorine (Cu-Cl), cobalt-chlorine (Co-Cl) and sulfur-iodine (S-I) cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(60), 22791-22805.

14. Farsi, A., Dinçer, I., Naterer, G. (2020). Review and evaluation of clean hydrogen production by the copper-chlorine thermochemical cycle. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123833.
15. Farsi, A., Zamfirescu, C., Dinçer, I., Naterer, G. (2019). Thermodynamic assessment of a lab-scale experimental copper-chlorine cycle for sustainable hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 17595-17607.
16. Çakıroğlu, R., Çinici, O., Asal, Ş., Acır, A. (2024). Multi-objective optimization of the hydrogen fuel production of a solar-based cobalt-chlorine (Co-Cl) thermochemical cycle with grey relational analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 68, 360-373.
17. Razi, F., Dinçer, I., Gabriel, K. (2020). Energy and exergy analyses of a new integrated thermochemical copper-chlorine cycle for hydrogen production. *Energy*, 205, 117985.
18. Özcan, H., Dinçer, I. (2016). Modeling of a new four-step magnesium-chlorine cycle with dry HCl capture for more efficient hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 7792-7801.
19. Özcan, H., Dinçer, I. (2016). Comparative performance assessment of three configurations of magnesium-chlorine cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 845-856.
20. Balta, M., Dinçer, I., Hepbasli, A. (2012). Energy and exergy analyses of magnesium-chlorine (Mg-Cl) thermochemical cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 4855-4862.
21. Teymouri, M., Aieneh, K., Sadeghi, S., Ghandehariun, S. (2021). Energy and exergy analyses of a solar magnesium-chlorine thermochemical plant for methane production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1067, 012101.
22. Safari, F., Dinçer, I. (2020). A study on the Fe-Cl thermochemical water splitting cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 18867-18875.
23. Balta, M. T., Dinçer, I., Hepbasli, A. (2016). Comparative assessment of various chlorine family thermochemical cycles for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), 7802-7813.
24. Müller, R., Steinfeld, A. (2007). Band-approximated radiative heat transfer analysis of a solar chemical reactor for the thermal dissociation of zinc oxide. *Solar Energy*, 81(10), 1285-1294.
25. Steinfeld, A. (2002). Solar hydrogen production via a two-step water-splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(6), 611-619.
26. Loutzenhiser, P. G., Meier, A., Steinfeld, A. (2010). Review of the two-step H₂O/CO₂-splitting solar thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions. *Materials*, 3(11), 4922-4938.

27. Lassouane, F. (2020). Parametric study of SO₃ conversion to SO₂ in tubular reactor for hydrogen production via sulfuric cycle. *In Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering*, 323-329.
28. Riccardi, J., Massimo, S., Fastelli, I., Smitkova, M. (2011). Modelling of Westinghouse and sulphur-iodine water splitting cycles for hydrogen production. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2(3), 49-62.
29. Gorenssek, M., Corgnale, C., Summers, W. (2017). Development of the hybrid sulfur cycle for use with concentrated solar heat. I. Conceptual design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 20939-20954.
30. Orhan, M., Dinçer, I., Rosen, M. (2009). Efficiency analysis of a hybrid copper-chlorine (Cu-Cl) cycle for nuclear-based hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, 155, 132-137.
31. Ishaq, H., Dinçer, I., Naterer, G. (2018). Industrial heat recovery from a steel furnace for the cogeneration of electricity and hydrogen with the copper-chlorine cycle. *Energy Conversion and Management*, 171, 384-397.
32. Li, H., Stolberg, L., Vega, A., Zhang, W., Reinwald, S., Ryland, D., Boniface, H., Suppiah, S. (2020). Canadian advances in the copper-chlorine thermochemical cycle for clean hydrogen production: A focus on electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 33037-33046.
33. Aimei, C., Liu, C., Yuxia, L., Zhang, L. (2019). Uranium thermochemical cycle used for hydrogen production. *Nuclear Engineering and Technology*, 51, 1687-1694.
34. Forsberg, C., Collins, J., Dole, L., Ferrada, J., Haire, M., Hunt, R., Ladd-Lively, J., Lewis, B., Wymer, R. (2010). A uranium thermochemical cycle for hydrogen production. *Nuclear Science*, 453-456.
35. Mao, Y., Gao, Y., Dong, W., Wu, H., Song, Z., Zhao, X., Sun, J., Wang, W. (2020). Hydrogen production via a two-step water splitting thermochemical cycle based on metal oxide – a review. *Applied Energy*, 267, 114860.
36. Yıldız, K., Acır, A. (2003). UC₂ yakıtlı bir hibrid reaktörün farklı nötron kütüphanelerine göre nötronik performanslarının karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, 6(2), 465-473.
37. Taşkolu, H., Acır, A. (2013). Bir hibrid reaktörde TRISO kaplamalı CANDU nükleer yakıt atıklarının nötronik analizi. *Politeknik Dergisi*, 16(4), 129-133.
38. Lamarsh, J. R., Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering*. (3. Baskı). New Jersey: Prentice Hall, 40-44
39. Schappel, D., Terrani, K., Powers, J., Snead, L., Wirth, B. (2018). Modeling the performance of TRISO-based fully ceramic matrix (FCM) fuel in an LWR environment using BISON. *Nuclear Engineering and Design*, 335, 216-228.
40. Peng, L., Yang, Y., Li, S., Nong, Z., Tang, S. (2025). Investigation on irradiated-thermal-mechanical coupling performance and failure behaviors of TRISO particle fuel for space reactor applications. *Progress in Nuclear Energy*, 180, 105633.

41. Simnad, T. M. (2003). *Nuclear reactor materials and fuels*. In *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. (3. Baskı). San Diego: Academic Press, 775-815
42. Chen, M., Wu, B., Zhou, L., Zhu, Y., Wu, H. (2020). Micromechanical properties of pyrolytic carbon with interlayer crosslink. *Carbon*, 159, 549-560.
43. Voice, E. H. (1969). *Silicon carbide as a fission product barrier in nuclear fuels*. In *Proceedings of the International Conference on Silicon Carbide*, Pennsylvania: University Park, S331-S339
44. Kumamaru, H., Shimoda, K., Itoh, K. (2007). Three-dimensional numerical calculations on liquid-metal magneto-hydrodynamic flow through circular pipe in magnetic-field inlet-region. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 44, 714-722.
45. Gioè, A., Bongiovì, G., Catanzaro, I., Chiovaro, P., Di Maio, P., Giambrone, S., Quartararo, A., Vallone, E., Arena, P., Basile, S. (2023). Thermomechanical and thermofluid-dynamic coupled analysis of the top cap region of the water-cooled lithium lead breeding blanket for the EU DEMO fusion reactor. *Energies*, 16, 3249.
46. Sun, H., Wang, C., Liu, X., Tian, W., Qiu, S., Su, G. (2018). Conceptual design and analysis of a multipurpose micro nuclear reactor power source. *Annals of Nuclear Energy*, 121, 118-127.
47. Jiang, K., Chen, L., Chen, L., Wu, Q., Cheng, X., Yang, J., Zheng, X., Zhang, N., Ni, M., Liu, S. (2024). Thermal hydraulic assessment on the full banana model of COOL blanket for CFETR. *Nuclear Fusion*, 64, 026015.
48. Tait, J. (1956). Some topics in neutron diffusion theory. *Reports on Progress in Physics*, 19, 268-297.
49. Cassell, J., Williams, M. (2003). An integral equation arising in neutron transport theory. *Annals of Nuclear Energy*, 30, 1009-1031.
50. Marguet, S. (2017). Diffusion approximation in neutron physics. In *The Physics of Nuclear Reactors*, 731-813.
51. Duderstadt, J. J., Hamilton, L. J. (1976). *Nuclear reactor analysis*. Michigan: John Wiley & Sons Inc., 111-153
52. Vyawahare, V., Nataraj, P. (2013). Fractional-order modeling of neutron transport in a nuclear reactor. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 9747-9767.
53. Zanette, R., Barichello, L., Petersen, C. (2024). A numerical validation between the neutron transport and diffusion theories for a spatial kinetics problem. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 12, e2361.
54. Bahrami, M., Vosoughi, N. (2018). SN transport method for neutronic noise calculation in nuclear reactor systems: Comparative study between transport theory and diffusion theory. *Annals of Nuclear Energy*, 114, 236-244.

55. Teixeira, A., Castillo, S., Vojkovic, S., Fonseca, J., Altbir, D., Nunez, S., Carvalho-Santos, V. (2018). Analysis on the stability of in-surface magnetic configurations in toroidal nanoshells. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 103, 343-350.
56. Özışık, G., Demir, N., Übeyli, M., Yapıcı, H. (2010). Hydrogen production via water splitting process in a molten-salt fusion breeder. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(14), 7357-7368.
57. Asal, Ş. (2020). *Toryum nükleer yakıtlı lazer sürücülü bir füzyon reaktöründe fissil yakıt ve hidrojen üretim potansiyelinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
58. Genç, G. (2010). Hydrogen production potential of APEX fusion transmuted fueled minor actinide fluoride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), 10190-10201.
59. Acır, A., Aktı, S. (2019). Investigation of hydrogen production potential of the LASER inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(45), 24867-24879.
60. Şener, G. (2024). *SOMBRERO füzyon reaktöründe termokimyasal döngüler kullanılarak hidrojen üretim potansiyelinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
61. Funk, J. E. (2001). Thermochemical hydrogen production: Past and present. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(3), 185-190.
62. İnternet: "NIST Chemistry WebBook. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>" Son Erişim Tarihi: 05.05.2025.
63. Murray, R. L. (2009). *Fission. In Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*. (6. Baskı). Butterworth-Heinemann, 73-82
64. Amosun, A. A., Salau, A. O., Fadodun, O. G., Jayeola, M. A., Osanyin, T. K., Fasasi, M. K., Ibitoye, F. I. (2018). Numerical calculation of fuel burn-up rate in a cylindrical nuclear reactor. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 319, 459-470.
65. Harms, A. A. (1977). Fissile fuel dynamics of breeder/convertor reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 5, 65-73.
66. Harms, A. A., Gordon, C. W. (1976). Fissile fuel breeding potential with paired fusion-fission reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 3, 411-420.
67. Özkaya, M. (2024). *PACER füzyon reaktöründe enerji ve hidrojen üretiminin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
68. Asal, Ş., Acır, A., Dinçer, İ. (2024). A study on integrated HTR-PM driven hydrogen production using thermochemical cycles. *Energy Conversion and Management*, 307, 118336.

69. Özdemir, A., Genç, G. (2022). A comprehensive comparative energy and exergy analysis in solar based hydrogen production systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(24), 12189–12203.
70. Temiz, M., Dinçer İ. (2021). Concentrated solar driven thermochemical hydrogen production plant with thermal energy storage and geothermal systems. *Energy*, 219, 119554.
71. Ghorbani, B., Zendejboudi, S., Zhang, Y., Zarrin, H., Chatzis, I. (2023). Thermochemical water-splitting structures for hydrogen production: Thermodynamic, economic, and environmental impacts. *Energy Conversion and Management*, 297, 117599
72. Simpson, M. F., Utgikar, V., Sachdev, P., McGrady, C. (2007). Anovel method for producing hydrogen based on the Ca–Br cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 505-509.



Gazili olmak ayrıcalıktır