



**PACER FÜZYON REAKTÖRÜNDE ENERJİ VE HİDROJEN ÜRETİMİNİN  
İNCELENMESİ**

**Medine ÖZKAYA**

**DOKTORA TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2024**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Medine ÖZKAYA

08.01.2024

# PACER FÜZYON REAKTÖRÜNDE ENERJİ VE HİDROJEN ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Medine ÖZKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

## ÖZET

Bu tez çalışmasında PACER füzyon reaktörüne hidrojen üretim tesisi entegre edilerek farklı soğutucu akışkan (Eriyik tuz) ve soğutucu akışkana farklı oranlarda nükleer yakıt karıştırılarak hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. İlk çalışma da PACER füzyon reaktöründe hacimsel olarak iki farklı mod belirlenmiştir. Mod ①: %25 eriyik tuz + ThF<sub>4</sub>, %75 boşluk ve mod ②: %50 eriyik tuz + ThF<sub>4</sub>, %50 boşluk olarak belirlenmiştir. Eriyik tuz +ThF<sub>4</sub> oranı ise %5 ThF<sub>4</sub>+ %95 LiF, %10 ThF<sub>4</sub>+ %90 LiF, %15 ThF<sub>4</sub>+ %85 LiF, %20 ThF<sub>4</sub>+ %80LiF, %25 ThF<sub>4</sub>+%75 LiF şeklinde kullanılarak Monte Carlo yöntemi yardımı ile nötronik analizler yapılmıştır. Nötronik analizlerle enerji çoğaltım faktörü (M) ve trityum üretim oranı (TBR) elde edilmiştir. PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinde yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE), kükürt - iyot termokimyasal çevrimi (S-I) ve buhar-metan reformasyonunun (SMR) hidrojen üretim yöntemleri kullanılmıştır. Nötronik analizlerle elde edilen M değerine bağlı olarak hidrojen üretim tesisinin toplam termal gücü ( $P_{hpf}$ ), termal güç oranı ( $1-\psi$ ) elde edilmiş ve tesiste üretilen hidrojen miktarı ( $\dot{m}$ ) hesaplanmıştır. En iyi hidrojen üretim sonucu mod ②'de soğutucu akışkana %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt karışımında, SMR yönteminin üç reaksiyonlu SMR+WGS+MCS reaksiyonundan ~90 kg/s olarak hesaplanmıştır. İkinci çalışmada ise soğutucu bölgede kullanılan eriyik tuz Flibe (Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>) içerisine üç farklı nükleer yakıt (ThF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub>+ThF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub>) kullanılmıştır ve bu nükleer yakıtların her biri üç farklı oranda(%2, %6, %12) karıştırılmıştır. Bu parametrelerin tamamında 6 farklı <sup>6</sup>Li zenginleştirme (%7,5; %20, %40, %60, %80, %90) yapılarak bu oranın etkisi incelenmiştir. Bu veriler kullanılarak Monte Carlo yöntemi yardımı ile nötronik analizler yapılmış enerji çoğaltım faktörü (M) ve trityum üretim oranı (TBR) elde edilmiştir. PACER füzyon reaktörüne demir-klorür termokimyasal yöntemiyle (Fe-Cl) hidrojen üretimi yapılan tesisin toplam Termal gücü, termal güç oranı ve hidrojen üretim miktarı hesaplanmıştır. Sonuç olarak ham soğutucu akışkana karıştırılan nükleer yakıt türünün, hem yakıt oranının hem de <sup>6</sup>Li zenginleştirmenin hidrojen üretim miktarını arttırdığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu iki çalışma için ortak parametre belirlenerek dört farklı hidrojen üretim yöntemleriyle elde edilen hidrojen miktarı kıyaslanmış ve hidrojen üretim miktarı ~5,6 – ~88,3 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen hidrojen verileri ekonomiklik açısından incelenmiş ve ~358 \$/kg.yıl – ~83376 \$/kg.yıl kazanç elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 92805

Anahtar Kelimeler : PACER füzyon reaktörü, demir klor termokimyasal çevrimi, buhar metan reformasyonu, S-I döngülü termokimyasal yöntem, yüksek sıcaklıkta elektroliz, nükleer hidrojen

Sayfa Adedi : 101

Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

## INVESTIGATION OF ENERGY AND HYDROGEN PRODUCTION IN PACER

## FUSION REACTOR

(Ph. D. Thesis)

Medine ÖZKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

## ABSTRACT

In this thesis study, the hydrogen production facility was integrated into the PACER fusion reactor and the hydrogen production potential was examined by mixing different coolant (molten salt) and nuclear fuel in different proportions into the coolant. In the first study, two different volumetric modes were determined in the PACER fusion reactor. Mod ①: 25% molten salt + ThF<sub>4</sub>, 75% void and mod ②: 50% molten salt + ThF<sub>4</sub>, 50% void; was determined as. The molten salt + ThF<sub>4</sub> ratio was used as 5% ThF<sub>4</sub> + 95% LiF, 10% ThF<sub>4</sub> + 90% LiF, 15% ThF<sub>4</sub> + 85% LiF, 20% ThF<sub>4</sub> + 80% LiF, 25% ThF<sub>4</sub> + 75% LiF, and neutron analyzes were carried out with the help of Monte Carlo method. Energy multiplication factor (M) and tritium breeding ratio (TBR) were obtained through neutronic analysis. Hydrogen production methods of high temperature electrolysis (HTE), sulfur iodine thermochemical cycle (S-I) and steam methane reforming (SMR) were used in the hydrogen production facility integrated into the PACER fusion reactor. Depending on the M value obtained by neutronic analysis, the total thermal power ( $P_{hpf}$ ) and thermal power ratio ( $1-\psi$ ) of the hydrogen production facility were obtained and the amount of hydrogen produced ( $\dot{m}$ ) in the facility was calculated. The best hydrogen production result was calculated as ~90kg/s from the three-reaction SMR+WGS+MCS reaction of the SMR method in a 25% ThF<sub>4</sub> nuclear fuel mixture into the coolant in mode ②. In the second study, three different nuclear fuels (ThF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub>+ThF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub>) were used in the molten salt Flibe (Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>) used in the cooling zone, and each of these nuclear fuels was mixed at three different rates (2%, 6%, 12%). In all of these parameters, 6 different <sup>6</sup>Li enrichments (7,5%, 20%, 40%, 60%, 80%, 90%) were made and the effect of this ratio was examined. Using these data, neutronic analyzes were carried out with the help of the Monte Carlo method, and the energy multiplication factor (M) and tritium breeding ratio (TBR) were obtained. The total thermal power ( $P_{hpf}$ ), thermal power ratio ( $1-\psi$ ) and hydrogen production amount ( $\dot{m}$ ) of the facility, where hydrogen is produced by the iron-chloride thermochemical method (Fe-Cl) for the PACER fusion reactor, were calculated. As a result, it has been determined that the type of nuclear fuel mixed into the raw refrigerant increases the amount of hydrogen production, both the fuel ratio and the <sup>6</sup>Li enrichment. As a result, the common parameter for these two studies was determined and the amount of hydrogen obtained by four different hydrogen production methods was compared and the hydrogen production amount was calculated as ~5.6 - ~88.3. The hydrogen data obtained was examined in terms of economy and a gain of ~358 \$/kg.year – ~83376 \$/kg.year was obtained.

Science Code : 92805  
Key Words : PACER fusion reactor, iron chlorine thermochemical cycle, steam methane reforming, S-I cycled thermochemical method, high temperature electrolysis, nuclear hydrogen  
Page Number : 101  
Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca her türlü yardım ve desteği esirgemeyen, bilgi, tecrübe ve yardımlarıyla yoluma ışık tutan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Adem ACIR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm çalışmam boyunca her zaman destek olan, beni sabırla dinleyen değerli arkadaşlarım Doç. Dr. Tuğba TABANLIGİL CALAM ve Öğr. Gör. Dr. Gülşen TAŞKIN'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan her zaman yanımda olan çok kıymetli Annem Kamile YİĞİT ve babam Şaban YİĞİT'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sevgili eşim Hakan ÖZKAYA'ya ve hayatımın anlamı olan kızlarım Zeynep Berra ÖZKAYA ve Nilay ÖZKAYA'ya en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>3</b>
<b>3. PACER FÜZYON NÜKLEER SANTRALLERİ.....</b>	<b>13</b>
<b>4. HİDROJEN ÜRETİMİ .....</b>	<b>19</b>
4.1. PACER Füzyon Reaktöründe Hidrojen Üretimi.....	22
4.2. Nükleer Hidrojen Üretim Metotları.....	27
4.2.1. Buhar-metan reformasyonu (SMR) ile hidrojen üretimi.....	28
4.2.2. Yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ile hidrojen üretimi.....	35
4.2.3. Kükürt-iyot (S-I) döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi....	39
4.2.4. Demir-klor (Fe-Cl) döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi	44
<b>5. HESAPLAMA YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>53</b>
5.1. Monte Carlo Hesaplama Yöntemi.....	53
5.2. Hidrojen Üretiminin İncelenmesi.....	54
<b>6. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>55</b>
6.1. Nötronik Analizler .....	55
6.1.1. Tritiyum Üretim Oranı (TBR).....	55
6.1.2. Enerji Çoğaltım Faktörü (M) .....	59
6.2. Hidrojen Üretim Miktarı Verileri.....	62

**Sayfa**

6.2.1. SMR (buhar - metan reformasyonu) yöntemi ile hidrojen üretim miktarı	62
6.2.2. S-I (kükürt – iyot) termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretim miktarı ....	67
6.2.3. HTE (yüksek sıcaklıkta elektroliz) yöntemi ile hidrojen üretim miktarı ..	70
6.2.4. HTE, SMR, S-I ve Fe-Cl termokimyasal yöntemlerinin hidrojen üretim miktarlarının karşılaştırılması.....	73
6.2.5. Fe-Cl (demir – klor) termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretim miktarı	75
6.2.6. Fe-Cl termokimyasal yöntemlerinin hidrojen üretim miktarlarının Karşılaştırılması .....	81
6.3. Üretilen Hidrojen Miktarlarının Karşılaştırılması.....	83
6.4. Farklı Yöntemlerle Üretilen Hidrojenin Ekonomiklik Durumlarının Karşılaştırılması .....	87
6.5. Hidrojen Üretiminin Karbon Salımı Üzerine Etkisi.....	89
7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	91
KAYNAKÇA.....	95
ÖZGEÇMİŞ .....	101

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. PACER füzyon reaktöründe hidrojen üretimi için gerekli olan parametreler ve değerleri .....	27
Çizelge 4.2. Buhar-Metan Reaksiyonu için gerekli $q_{tot}$ değerleri .....	34
Çizelge 4.3. Bileşiklerin Oluşum Entalpileri ve Shomete hesaplaması için gerekli olan Fe-Cl döngü sabitleri.....	51
Çizelge 4.4. H <sub>2</sub> O ve FeCl <sub>3</sub> bileşiklerinin Entalpi Değerleri.....	52
Çizelge 6.1. Literatürdeki farklı hidrojen üretim miktarlarının karşılaştırılması.....	85

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Döteryum-trityum füzyon reaksiyonu şematik görünümü .....	14
Şekil 3.2. PACER füzyon Rektörü akış şeması .....	16
Şekil 3.3. PACER füzyon reaktör kesiti .....	18
Şekil 4.1. Hidrojen üretim yöntemleri .....	20
Şekil 4.2. Nükleer santrallerden elde edilen enerji ile hidrojen üretim yöntemleri .....	21
Şekil 4.3. PACER füzyon reaktörü hidrojen üretim tesisi genel enerji akış şeması .....	23
Şekil 4.4. Buhar- metan reformasyonu prosesi .....	28
Şekil 4.5. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş SMR yöntemi ile hidrojen akış Şeması .....	31
Şekil 4.6. Yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi akış şeması .....	36
Şekil 4.7. Yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi için gerekli olan enerji girdileri .....	37
Şekil 4.8. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş HTE yöntemi ile hidrojen akış Şeması .....	38
Şekil 4.9. Kükürt – İyot (S-I) termokimyasal çevrimine genel bakış .....	41
Şekil 4.10. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş S-I yöntemi ile hidrojen akış Şeması .....	42
Şekil 4.11. Kükürt – iyot termokimyasal çevriminin tahmini verim grafiği .....	44
Şekil 4.12. Demir- klor termokimyasal çevrimine genel bakış .....	45
Şekil 4.13. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş Fe-Cl yöntemi ile hidrojen akış Şeması .....	47
Şekil 6.1. Trityum üretiminin yakıt oranına göre değişimi .....	56
Şekil 6.2. Trityum üretiminin lityum zenginleştirme oranına göre değişimi .....	57
Şekil 6.3. Trityum üretim oranının (TBR) nükleer yakıt oranlarına göre değişimi .....	58
Şekil 6.4. Enerji çoğaltım faktörünün (M) yakıt oranına göre değişimi .....	59
Şekil 6.5. Enerji değişim faktörünün (M) ${}^6\text{Li}$ zenginleştirme oranına göre değişimi .....	60
Şekil 6.6. Enerji çoğaltım faktörünün (M) nükleer yakıt oranlarına göre değişimi .....	61
Şekil 6.7. SMR için toplam termal gücün ( $P_{hp}^{SMR}$ ) yakıt oranına göre değişimi .....	63

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.8. SMR için termal güç oranının $(1-\psi)$ yakıt oranına göre değişimi.....	64
Şekil 6.9. SMR için hidrojen üretim miktarının $(\dot{m})$ yakıt oranına göre değişimi .....	65
Şekil 6.10. Yakıt oranına göre SMR sisteminden emisyon salımı .....	66
Şekil 6.11. S-I için termal güç oranının $(1-\psi)$ yakıt oranına göre değişimi .....	68
Şekil 6.12. S-I için toplam termal gücün $(P_{hpf}^{S-I})$ yakıt oranına göre değişimi .....	69
Şekil 6.13. S-I için hidrojen üretim miktarının $(\dot{m})$ yakıt oranına göre değişimi .....	70
Şekil 6.14. HTE için termal güç oranının $(1-\psi)$ yakıt oranına göre değişimi.....	71
Şekil 6.15. HTE için toplam termal gücün $(P_{hpf}^{HTE})$ yakıt oranına göre değişimi .....	72
Şekil 6.16. HTE için hidrojen üretim miktarının $(\dot{m})$ yakıt oranına göre değişimi .....	73
Şekil 6.17. SMR, S-I ve HTE için hidrojen üretim miktarının $(\dot{m})$ yakıt oranına göre Değişimi .....	74
Şekil 6.18. Fe-Cl için toplam termal gücün $(P_{hpf}^{Fe-Cl})$ ${}^6\text{Li}$ zenginleştirme oranına göre Değişimi .....	76
Şekil 6.19. Fe-Cl için termal güç oranının $(1-\psi)$ ${}^6\text{Li}$ zenginleştirme oranına göre Değişimi .....	77
Şekil 6.20. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının $(\dot{m})$ $\text{UF}_4$ nükleer yakıtıyla ${}^6\text{Li}$ zenginleştirme oranına göre değişimi .....	78
Şekil 6.21. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının $(\dot{m})$ $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$ nükleer yakıtıyla ${}^6\text{Li}$ zenginleştirme oranına göre değişimi .....	79
Şekil 6.22. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının $(\dot{m})$ $\text{ThF}_4$ nükleer yakıtıyla ${}^6\text{Li}$ zenginleştirme oranına göre değişimi .....	78
Şekil 6.23. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının $(\dot{m})$ ${}^6\text{Li}$ zenginleştirme oranına göre Değişimi .....	82
Şekil 6.24. S-I, HTE, SMR ve Fe-Cl yöntemleriyle hidrojen üretimi .....	84
Şekil. 6.25. S-I, HTE, SMR ve Fe-Cl yöntemleriyle birim miktarda enerjiye göre hidrojen üretimi .....	86
Şekil 6.26. Yakıt oranına göre üretilen hidrojenin toplam satış geliri .....	87

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<i>a</i>	Anot
$\alpha$	Alfa parçacığı
$\alpha$	Kısmi güç
$\beta$	Isı yayılımı
<i>c</i>	Katot
<i>D</i>	Döteryum
<i>n</i>	Nötron
<i>q</i>	Buharlaşma
$\rho$	Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>
$\mathcal{R}$	1 kg hidrojen üretmek için gerekli olan enerji, MJ/kg
$\varepsilon$	Orantı sabiti
<i>v</i>	Molar kütle, g/mol
$\psi$	Elektriksel güç oranı
\$	Dolar
$\Delta G$	Gibbs serbest enerji, kJ/mol
$\Delta H$	Entalpi değişimi, kJ
$\Delta S$	Entropi değişimi, kJ/K.mol
°C	Santigrat derece
$\mu\text{m}$	Mikrometre
(1- $\psi$ )	Termal güç oranı
<i>E<sub>f</sub></i>	Fisyon başına enerji, MeV
<i>F</i>	Faraday sabiti
<b>F</b>	Füzyon nötron kaynağı
<b>g</b>	Gram
<b>GeV</b>	Giga elektron volt

**Simgeler****Açıklamalar**

<b><i>HHV</i></b>	Hidrojen üst ısıl değeri, MJ/kg
<b><i>h</i></b>	Saat
<b><i>keV</i></b>	Kilo elektron volt
<b><i>kg</i></b>	Kilogram
<b><i>MeV</i></b>	Mega elektron volt
<b><i>M</i></b>	Enerji çoğaltım faktörü
<b><i>MJ</i></b>	Mega joule
<b><i>MPa</i></b>	Mega pascal
<b><i>MW</i></b>	Mega watt
<b><i>N</i></b>	Newton
<b><math>\eta_{Fe-Cl}</math></b>	Fe-Cl reaksiyonu verimi
<b><math>\eta_{MCS}</math></b>	MCS reaksiyonu verimi
<b><math>\eta_{SMR}</math></b>	SMR reaksiyonu verimi
<b><math>\eta_{WGS}</math></b>	WGS reaksiyonu verimi
<b><math>\eta_{ds}</math></b>	Sürücü sistem verimi
<b><math>\eta_{gt}</math></b>	Gaz türbini verimi
<b><math>\eta_{hpf}</math></b>	Hidrojen üretim termal verimi
<b><math>\eta_{ihx}</math></b>	Ara ısı değiştirici verimi
<b><math>\dot{m}</math></b>	Kütleli debi
<b><math>P_{aux}</math></b>	Yardımcı sistem elektriksel gücü, MW
<b><math>P_{cir}</math></b>	Sirkülasyon elektrik gücü, MW
<b><math>P_{ds}</math></b>	Sürücü sistem elektriksel gücü, MW
<b><math>P_e</math></b>	Brüt elektrik gücü, MW
<b><math>P_{eh}</math></b>	Hidrojen üretim elektriksel gücü, MW
<b><math>P_f</math></b>	Füzyon güç çıktısı, MW
<b><math>P_{ge}</math></b>	Elektrik üretimi için gerekli güç, MW
<b><math>P_{hpf}</math></b>	Hidrojen üretimi için gerekli toplam güç, MW
<b><math>P_i</math></b>	Füzyon giriş gücü, MW
<b><math>P_{isf}</math></b>	İzotop ayırma tesisi elektriksel gücü, MW
<b><math>P_n</math></b>	Nötron parçacıklarından gelen füzyon gücü
<b><math>P_{net}</math></b>	Şebekeye giden elektriksel güç

**Simgeler****Açıklamalar**

$P_{th}$	Toplam termal güç, MW
$P_{\alpha}$	Alfa parçacıklarından gelen füzyon gücü
$T$	Sıcaklık, K
tM	Metrik ton
$Q$	Füzyon enerji oranı
$T$	Tritiyum
$T\Delta S$	Termal enerji girdisi, kJ/mol
$q_{tot}$	Toplam reaksiyon enerjisi, MJ/kg
$x_{aux}$	Güç oranı
$x_{cir}$	Sirkülasyon elektriksel güç oranı
$x_{eh}$	Elektriksel güç oranı
$x_{isf}$	Güç oranı
$x_n$	Nötron parçacıklarının enerji oranı
$x_{net}$	Net elektriksel güç oranı
$x_{\alpha}$	Alfa parçacıklarının enerji oranı

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AHTR</b>	Gelişmiş yüksek sıcaklıklı reaktör
<b>AS</b>	Yardımcı sistem
<b>CANDU</b>	Kanada Döteryum-Uranyum reaktörü
<b>cm</b>	Santimetre
<b>Co-Cl</b>	Kobalt klorür termokimyasal çevrimi
<b>Cu-Cl</b>	Bakır klorür termokimyasal çevrimi
<b>DS</b>	Sürücü sistem
<b>D-D</b>	Döteryum - Döteryum
<b>D-T</b>	Döteryum - Tritiyum
<b>Fe-Cl</b>	Demir klorür termokimyasal çevrimi
<b>HTE</b>	Yüksek sıcaklıkta elektroliz
<b>HTGR</b>	Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı nükleer reaktör
<b>HTHX</b>	Yüksek sıcaklık ısı değiştiricisi

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>HyS</b>	Hibrid sülfür çevrimi
<b>IHX</b>	Ara ısı değiştirici
<b>ISF</b>	İzotop ayrıştırma sistemi
<b>LAL</b>	Los Alamos laboratuvarı
<b>LIFE</b>	Lazer ataletsel füzyon enerji reaktörü
<b>LLNL</b>	Lawrence Livermore Ulusal laboratuvarındaki
<b>LTHX</b>	Düşük sıcaklık ısı değiştiricisi
<b>m</b>	Metre
<b>MCNP</b>	Monte Carlo N-Parçacık kodu
<b>MCS</b>	Mineral karbondioksit tutumu
<b>MHR</b>	Modüler helyum reaktörü
<b>MFE</b>	Manyetik füzyon enerjisi
<b>Mg-Cl</b>	Magnezyum klorür termokimyasal çevrimi
<b>PACER</b>	Barışçıl nükleer patlayıcı
<b>PEM</b>	Proton değişim membranlı yakıt pili
<b>PNE</b>	Barışçıl nükleer patlayıcı
<b>s</b>	Saniye
<b>S-I</b>	Kükürt-iyot döngülü termokimyasal çevrim
<b>SMR</b>	Buhar metan reformasyonu
<b>SOMBRERO</b>	Katı Hareketli Üretici Füzyon Reaktörü
<b>SS</b>	Paslanmaz çelik
<b>TBR</b>	Tritiyum üretim oranı
<b>TRISO</b>	Tri (üç) yapısal izotropik yakıt
<b>WGS</b>	Su-gaz değişimi

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun devamlı artması ve teknolojinin çok hızlı bir şekilde gelişmesi enerji ihtiyacının da artmasına sebep olmaktadır. Yeryüzünde yaygın olarak kullanılan enerji kaynağı ise fosil yakıtlardır ki buda küresel yakıt ihtiyacının %84'ünü karşılar [1]. Fosil yakıtların bu avantajının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. İlk olarak akla gelen dezavantajı tüm insanlığı yakından ilgilendiren sera gazı gibi birçok çevresel sorunların neden olduğu küresel ısınmadır[2]. Diğer bir dezavantajı ise fosil yakıtların dünyanın her yerinde eşit miktarda olmamasıdır. Fosil yakıt rezervlerine sahip olmayan ülkeler, bu rezervlere bağlı olan ülkelere bağımlıdır. Bu durumun sonucu olarak dünya üzerinde zaman zaman enerji krizleri yaşanmıştır [3]. Bu yaşanan enerji krizleri, ülkelerin bağımlılık sorunlarını çözmek için ve tüm dünyayı ilgilendiren çevresel sorunlara çözüm bulmak için bilim insanlarının fosil yakıtlar dışında yeni enerji kaynağı arayışına sebep olmuştur [2].

Bilim insanları hem çevre dostu olan hem de dışa bağımlı olmadan enerji ihtiyacının karşılanmasına çözüm aradılar. Ve bu sorunlara çözüm olarak, nükleer santrallerin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve geliştirilmesine büyük önem vermişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, dalga enerjisidir. Bunlara ek olarak hem bir yakıt kaynağı hem de enerji taşıyıcısı olan hidrojen enerjisi alternatif bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Bir enerji para birimi olan Hidrojen evrenin en hafif elementtir fakat diğer elementlerle kıyaslandığında en yüksek enerjiye sahiptir. Hidrojen enerjisi denilince akla ilk olarak hidrojen bombası gelse de hidrojen, tarımdan gıdaya birçok alanda fayda sağlamaktadır.[4].

Hidrojen evrende en bol bulunan element olmasına karşın doğada serbest halde bulunmaz. Bu nedenle üretilmesi gerekmektedir. Hidrojen üretimi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hidrojen üretimi için enerji girdisine ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji ihtiyaçlarının çoğunun fosil yakıtlardan elde edilmesi mümkündür. Fakat bu ihtiyaçların yenilenebilir enerji kaynaklarından ya da nükleer santrallerden de karşılanması mümkündür [5].

Dünyanın en büyük fosil yakıt kullanım alanlarından biri olan otomotiv sektörü de bu gün fosil yakıtların karbon ayak izi oluşumunun büyük kısmını oluşturduğunu kabul etmektedirler. Oysa nükleer santraller fosil yakıtlar gibi olumsuz etkilere sahip değildir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında ise yüksek ısı enerjisine sahiptir. Hidrojen üretim yöntemlerinin bir kısmı elektrik enerjisine, bir kısmı ısı enerjisine ihtiyaç duyarken bir kısmı ise hem elektrik hem de ısı enerjisine ihtiyaç duymaktadır [6].

Sera gazı üretmeyen nükleer santraller hidrojen üretimi için gerekli olan ısı enerjisine ve/veya elektrik enerjisine sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde hidrojen üretim yöntemlerinin tamamı için bir enerji kaynağıdır. 1960'lı yıllarda Funk ve Reinstrom elektroliz, doğrudan ayrışma ve çok reaksiyonlu termokimyasal işlemler ile sudan hidrojen üretim çalışmalarını başlatmışlardır [7]. Literatürde bazı hidrojen üretim yöntemleri kullanılmaktadır, örneğin; yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) yöntemi, buhar-metan reformasyonu (SMR), seryum-klorür (Ce-Cl), demir-klorür (Fe-Cl), kükürt-iyot (S-I) cevrimi, bakır-klorür (Cu-Cl), vanadyum-klor (V-Cl), bakır-sülfat (Cu-SO<sub>4</sub>), magnezyum-iyot (Mg-I), potasyum-bizmut (K-Bi), magnezyum- klorür (Mg-Cl) vb'dir. Bu yöntemler için yapılan çalışmalar sonucunda bir kısmı uygulanabilirken bir kısmı için araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

## 2. LİTERATÜR

Nükleer enerjiden faydalanılarak Nükleer santralleri ve Hidrojen üretimini araştıran birçok çalışma mevcuttur. Bu kısımda Literatürde yapılmış çalışmalar verilmiştir.

Baldwin ve ark. [8] yapmış oldukları çalışmada, yeni nesil bir reaktör olan Modüler helyum reaktörünün (MHR) doğal güvenlik ve güvenlik sistemleri hakkında bilgi verirken aynı zamanda S-I süreci için MHR uygulamasını açıklamaktadırlar. Yakıt olarak kullanılan TRISO'yu, helyum soğutucu ve Grafit moderatör ile birleştirerek verimli güç üretimi sağlamasına olanak sağlandığı ve MHR sisteminin tasarımı ve teknolojisi hakkında bilgi verilmektedir. Sonuçta ise elde edilen verilerin oldukça umut verici olduğunu ama asıl sonucun uygulamada görüleceğini belirtmişlerdir.

Revankar [9] çalışmasında termokimyasal prosesler yoluyla hidrojen üretimi yapmak için çok yüksek sıcaklık reaktöründen (VHTR) prosesin ısısı elde edildi. Bu tesis için S-I döngüsü ve PBMR modeli geliştirildi, sistemler arasındaki bağlantı ara ısı değiştirici (IHX) ile sağlandı. Bu işlemlerin simülasyonu için ASPENPlus ve HYSYS kullanıldı ve kimyasal tesis modeli analiz edildi. Nükleer reaktör modeli ve tesis entegrasyonu için PBMR çekirdek modeli iki bileşenden oluşturuldu, Nokta kinetik modeli ve THERMIX-DIRECT hesaplamaları yapıldı. Sonuç olarak nükleer reaktörde hız sınırlı ısı emici kazalar olarak ortaya çıkma sebebi kimyasal tesisten gelen geri bildirimler olduğu gösterildi.

Juárez – Martinez ve ark. [10] bu çalışmada HTTR sistemini ısı kaynağı olarak kullanarak, Kükürt – İyot (S-I) termokimyasal nükleer hidrojen üretim döngüsünün enerji optimizasyonunu yaptılar. Kükürt - İyot döngüsü için gerekli olan tüm denklemler ayrıntılı olarak açıklandı ve bu prosesin entegrasyonunun temel amacının harici soğutma ve ısıtma hizmetlerinin kullanımını azaltmak için prosesin akışından yararlanmaktır. Bu işlem için 5 yeni ısı değiştirici kullanıldı. Bu yöntemle elde edilen veriler karşılaştırıldı. Sonuç olarak bu 5 yeni ısı değiştirici tüm akışlar arasında en yüksek sıcaklık farkına sahip olan HX2 akışı soğutma için kullanılmış ve bu sonuç olarak daha sonraki çalışmalarda farklı değerlendirme yapılabilmesi için Ortalama Sıcaklık Farkı (LMTD) yöntemi kullanılarak bu 5 ısı değiştiricinin boyutlandırılması yapılması gerektiği açıklanmıştır.

Elder ve Allen [11] hidrojen üretim prosesi için gerekli olan ısıyı temin etmek için sistemin çok yüksek sıcaklıklı reaktöre bağlanmasını araştırmışlardır. Sistem için gerekli olan ısı Gaz soğutmalı IV. Nesil reaktör olan çok yüksek sıcaklık reaktöründen (VHTR) elde edilmesi için dünya çapında çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Bu çalışmada yapılan araştırmalar derlenerek hidrojen üretimi için nükleer teknolojileri ve nükleer hidrojen üretim tesislerini ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Sonuç olarak bu VHTR sistemlerinden 5 tanesi uygulanabilir bulunmuş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Ayrıca bu reaktörlerin hidrojen üretim tesisine bağlanması durumunda hidrojen üretim maliyeti düşecektir.

Canavesio ve ark. [12] demir-klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrimini hem teorik hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Böylece orijinal çevrim ile değiştirilmiş versiyonunu kıyasladılar. Bu işlemler yapılırken reaksiyon sıcaklığını, bekleme süresini ve sistem basıncını değiştirerek bu parametrelerin reaksiyon üzerindeki etkisini incelediler. Deneysel çalışmalarda reaksiyon sıcaklığının artmasının hidrojen üretimi üzerinde küçük bir etkisinin olduğunu fakat sistem basıncının artmasının hidrojen üretimi üzerinde daha fazla etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Böylece harici ısı, entalpi dengesi ve iş gereksinimleri sınırlayıcı enerji verimliliğinin teorik olarak %24-28'den %32-37 aralığına yükseltmektedir.

Safari ve Dinçer [13], dört aşamalı demir klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrimini ASPEN plus yazılım paketi kullanarak simüle etmişler. Çevrimin her adımının parametrelerini değiştirmiş ve hidrojen üretim oranını incelemiştir. Bu parametreler basınç sıcaklık buhar-demir klorür (FeCl<sub>2</sub>) ve buhar-klor oranıdır. Sonuç olarak döngünün her bir adımı için en iyi buhar, basınç ve sıcaklık oranları belirlenmiştir.

Lewis ve Masin [14] çalışmalarında termokimyasal çevrimleri incelerken dokuz tane Çevrim belirlemişlerdir. Bu termokimyasal çevrimler; demir – klor (Fe-Cl), hibrit bakır – klor (Cu-Cl), magnezyum – iyot (Mg-I), Seryum - klor (Ce-Cl), vanadyum – klor (V-Cl), bakır – sülfat (Cu-SO<sub>4</sub>), potasyum – bizmut (K-Bi), kalsiyum- bromür (Ca-Br), hibrit klor döngüsüdür. Her bir Çevrim farklı üniversitelerde oluşturulan ekipler tarafından analiz edilmiş ve döngülerin verimlilikleri hesaplanmıştır.

Oruç ve Dinçer [15] magnezyum klor (Mg-Cl), bakır Klor (Cu-Cl), hibrit-kükürt döngüsü (HyS), demir klor (Fe-Cl), kükürt iyot (S-I), NaOH ve boron termokimyasal çevrimleri

maliyet ve verimlilik açısından incelemişlerdir. Bu beş çevrimi avantaj, dezavantaj ve zorluklarına göre özetlemişlerdir.

Karaca ve ark. [16] nükleer bazlı hidrojen üretimi için bazı termokimyasal yöntemler üzerine kapsamlı bir araştırma yapmaktadırlar. Bu döngüler Cu-Cl, Fe-Cl, V-Cl, Mg-Cl, Zn-Zn, Ca-Br, Hys ve S-I'dır. Bu işlemleri yaparken ilk olarak çevrimleri adım sayısına göre sınıflandırmış ve üretim maliyeti, ekserji, enerji, asitlenme potansiyeli (AP) ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) açısından ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak bu döngülerin hidrojen üretim yöntemine uygun olduğunu bu hidrojen üretimi için farklı enerji kaynaklarının kullanılabilmesi vurgulanmıştır.

Lemont [17] çalışmasında yeni bir yaklaşım anlatmaktadır. Bu yeni yaklaşımda bormun yerine klor ve demirin yerine seryum katılarak çevrimi dört adımdan üç adıma düşürmektedir. Böylece çalışma sıcaklığını optimize etmede, ara yüzeyde oluşan reaktan ürünlerini yok ederek ilerleme hızını arttırmakta, katı difüzyon katmanlarını yok ederek reaksiyon kinetiğini geliştirmekte, sistem için gerekli olan reaktanları tekrar sistematik bir şekilde oluşturmak ve gaz ayrımını oluşturmak gibi avantajlar sunmaktadır.

Shin ve ark. [18] hidrojen üretimi için yüksek sıcaklıkta elektrolizin (HTES) değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmalarında aşırı yüksek sıcaklık reaktöründe (VHTR) buharın yüksek sıcaklıkta elektrolizinin hidrojen üretiminin genel termal verimi hesaplandı ve ayrıca HTES süreci için gerekli olan elektrik ve ısı enerjisinin dengesini belirlediler. Yapılan çalışmalar ve değerlendirmeler sonucunda yaklaşık % 45 termal verim ve sistem için talep edilen elektrik dengesi %80 olarak hesaplandı. Genel olarak termal verimi etkileyen dominant faktör ise yüksek sıcaklık helyum türbininin ürettiği elektriğin verimi ve katı oksit pillerinin verimi olarak belirlemişlerdir.

Cheng ve ark. [19] çalışmalarında bir membran reaktöründe metanın kısmi oksidasyonundan hidrojen üretimi için öncelikle katalizör hazırlama ve karakterizasyonları yapıldı ve alfa alümina tozu üzerinde desteklenen rodyum katalizörü kullanıldı. Metan kısmi oksidasyon reaksiyonu Paket Yataklı Reaktör (PBR), Paket Yataklı Membran Reaktör (PBMR), Çift Membranlı reaktörden geçirildi ve gerekli hesaplamalar yapıldı. Sonuç olarak bu üç reaktörden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı Paket Yataklı Membran Reaktörden (PBMR)

diğer iki reaktöre kıyasla daha güvenilir bir çalışma sağlarken aynı zamanda daha yüksek dönüşümler ve daha yüksek hidrojen seçiciliği elde edildi.

Sakaba ve ark. [20], yüksek sıcaklıkta gaz soğutmalı HTTR reaktöründen gelen ısıyı kullanan termokimyasal su bölme iyot-kükürt (IS) yöntemi ile hidrojen üretim sisteminin kavramsal tasarımını araştırmışlardır. Çalışmada HTTR-IS sisteminin araştırılması ve çalışma aşamalarını ve sonuçlarını açıklamışlardır. En temel HTTR teknolojisinin ve IS yöntemi ile hidrojen üretimine kadar olan tüm süreçler ve gerekli güvenlik uygulamasının hesaplamalarının yapılmıştır. Sonuç olarak çalışmalarında 1980'lerin ortasında laboratuvar uygulamasıyla başlayan ve daha sonra HTTR-IS aşamasında stabil durumda hidrojen üretiminin yapıldığı ispatlamışlardır.

Greyvenstein ve ark. [21] Güney Afrika'nın küresel hidrojen ekonomisinde nükleer gücün rolünü en üst düzeye çıkarma stratejisiyle Güney Afrika'nın ekonomik kalkınma stratejisini değerlendirmişlerdir. Güney Afrika önerilen stratejiler doğrultusunda hareket etmesi dahilinde temiz enerji kaynakları konusunda küresel liderlik, ekonomik olarak gelişme, enerji çeşitlendirmesi ve temiz hidrojen teknolojisini ticarileştiren bilgi tabanına sahip konumda olacaktır. Bu stratejilere sahip ülke olması onu dünya lideri konumuna getirecektir. Nükleer enerji üretiminde reaktör olarak PBMR'nin kullanılmasıyla hidrojen üretimi için daha önce kullanılan kömür ve petrol ürünlerine ihtiyaç kalmayacaktır. Özellikle petrol kullanımı ülkeyi dışa bağımlı yapması, PBMR teknolojisiyle ortadan kalkacaktır. Sonuç olarak nükleer enerji Güney Afrika ülkesine sayısız avantaj sağlayacaktır.

Asal ve ark. [22] PACER füzyon reaktörüne, hidrojen üretim tesisi modifiye ederek tesisin hidrojen üretim potansiyelini incelemişlerdir. Öncelikle PACER füzyon reaktöründe iki farklı soğutucu bölge kalanını belirlediler. Tanımlanan bu bölgeler; %25 erimiş tuz + %75 boşluk ve %50 erimiş tuz + %50 boşluktur. Bu bölgelerde erimiş tuz LiF içerisine nükleer yakıt olarak %5-25 arasında 5 farklı oranda ThF<sub>4</sub> kullanmışlardır. Bu verilerle Monte Carlo yöntemi yardımıyla nötronik analizler yapmış ve elde edilen nötronik analizlerle üç farklı hidrojen üretim yöntemi kullanılarak hidrojen üretim potansiyelini hesaplamışlardır. Bu hidrojen üretim yöntemleri ise S-I, SMR ve HTE'dir. Sonuç olarak bu 3 hidrojen üretim yöntemi arasında en iyi hidrojen üretim performansı SMR çevriminden elde edilmişlerdir.

Balta ve ark. [23] hidrojen üretimi için magnezyum klor (Mg-Cl), demir klor (Fe-Cl), bakır klor (Cu-Cl) ve vanadyum klor (VCl) çevrimlerini incelemişlerdir. Bu işlemler için bazı varsayımlar kabul etmişlerdir. Birincisi 25°C sıcaklık ve 1 atm basınç referans kabul edilip, reaktanları ve ürünleri bu reaksiyon sıcaklığında ve bu şartlar altında değerlendirmişlerdir. Bir diğer kabul ise %30 ısı kaybının olmasıdır. Enerji, kütle, ekserji dengesi, genel çevrenin ısı girdisi, enerji ve ekserji verimliliği ve ekserji yok etme oranlarını hesaplamalarında kullanmışlardır. Ayrıca en umut verici VCl termokimyasal çevrimi diğer üç çevrimle karşılaştırmışlar ve VCl çevriminin enerji verimliliğini %41,80 ve ekserji verimliliğini ise %77,28 olarak hesaplamışlardır.

Acır ve Aktı [24] modifiye LIFE füzyon reaktörünün, zamana bağlı nötronik analizlerini ve hidrojen üretim potansiyelini incelemişlerdir. Bu hesaplamalar için reaktör yakıt bölgesinde %90 natural lityum soğutucu ve %10 triso kaplamalı minör nükleer atıklar kullanmışlardır. Nötronik analizlerde trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) değerini hesaplamışlardır. M değerine bağlı olarak hidrojen üretim miktarını hesaplamışlardır. Hidrojen üretim yöntemi olarak yüksek sıcaklıkta elektrolizi (HTE) tercih etmişlerdir. Sonuç olarak LIFE füzyon reaktörünün yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) yöntemi ile hidrojen üretimine uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Mehrpooya ve Habibi [25] çalışmalarında, hidrojen üretimi için kükürt iyot (S-I) bakır klor (Cu-Cl), magnezyum klor (Mg-Cl), demir klor (Fe-Cl), vanadyum klor (VCl) ve çinko-kükür-iyot (Zn-SI) döngülerini incelemişlerdir. Ayrıca bu çevrimleri termal güç yükü, enerji ve ekserji verimliliği ve hidrojen üretim maliyeti açısından karşılaştırmışlardır. Bütün döngülerin tek tek avantaj ve dezavantajlarını açıklamışlardır. Sonuç olarak yakın gelecekte termokimyasal çevrimlerle hidrojen üretilebileceğini ve ticarileştirilebileceğini vurgulamışlardır.

Özkaya ve ark. [26] PACER Füzyon reaktörüne modifiye ettikleri demir klor (Fe-Cl) termokimyasal çevriminin hidrojen üretim miktarını araştırmışlardır. Nötronik çalışmalarında MCNP nükleer kod programını kullanmışlardır. Çalışmalarında erimiş tuz yakıtı olarak Filibe kullanılmış ve bu tuz içerisine %2, %6 ve %12 oranında nükleer yakıt karıştırmışlardır. Karıştırılan bu nükleer yakıt ise UF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub>+ThF<sub>4</sub> ve ThF<sub>4</sub>'tür. Ayrıca Tüm bu parametreler için <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranı belirlenmiştir. Bu oranlar ise %7,5 (doğal lityum), %20, %40, %60, %80 ve %90'dır. Hesaplamalarında trityum üretim oranı (TBR) ve

enerji çoğaltım faktörü ( $M$ ) ayrıca termal enerji oranı ( $1-\psi$ ) toplam termal güç ( $P_{\text{hpf}}$ ) ve kütle akış hızı ( $\dot{m}$ ) hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçları değerlendirdiklerinde PACER füzyon reaktöründe Demir Klor termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretiminin yapılabileceğini vurgulamışlardır.

Özışık ve ark. [27] Kuvvetsiz helisel reaktöründe (FFHR) farklı erimiş tuz karışımları kullanarak, hidrojen üretim miktarını ve bölünebilir üreme oranını araştırmışlardır. Kullanılan dört farklı tuz karışımları sırasıyla saf Flibe, Filibe + ThF<sub>4</sub> karışımı, Flibe + UF<sub>4</sub> karışımı ve Flibe + UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub> karışımlarıdır. Çalışmalarında nötronik analizler için XSDRNPM/SCALE4.4a kod programı kullanmışlardır. Hidrojen üretimi için kükürt iyot (S-I) ve yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) yöntemlerini seçmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda HTE yöntemi ile hidrojen üretiminin S-I çevrimi ile hidrojen üretiminde daha iyi olduğu vurgulamışlardır. Sonuç olarak bu iki yöntemle hidrojen üretilebileceğini ve önemli miktarda bölünebilir yakıt üretimi yapılabileceğini ispatlamışlardır.

Acır ve Asal [28] lazer ataletsel hapsedilmiş füzyon fisyon enerjisi (LIFE) tahrikli toryum yetiştiricisinin hidrojen üretimi ve nötronik hesaplamaları için çeşitli soğutucular kullanarak hesaplamalarını yapmışlardır. Soğutucu olarak doğal lityum ve Flibe kullanmışlardır. Enerji çoğaltım değerini ( $M$ ), trityum üretim oranını (TBR) hesaplamışlardır. Hidrojen üretim yöntemi olarak buhar metan reformasyonu (SMR), kükürt iyot (S-I) döngüsünü ve yüksek sıcaklıkta elektrolizi (HTE) seçmişlerdir. Hidrojen üretim miktarları kıyaslandığında en iyi performansı sırasıyla SMR, HTE ve S-I döngüsüne ait olduğunu hesaplamışlardır. Ayrıca soğutucu olarak bakıldığında doğal Lityum Flibe'den daha az hidrojen üretimine neden olmuştur. Sonuç olarak lazer füzyon sürücüsü toryum yetiştiricisinin hidrojen üretebilir olduğu vurgulanmıştır.

Asal ve Acır [29] LIFE füzyon reaktörü için yakıtlı tuz toryumunun hidrojen üretim potansiyelini ve nötronik analizlerini araştırmışlardır. Erimiş tuz toryumu %2, %4, %6, %8, %10 ve %12 oranlarında Flibe ile karıştırmışlardır. Yakıt bölge kalınlığı için iki farklı hacim belirlemişlerdir; bu hacim oranları 50 cm ve 100 cm'dir. Ayrıca erimiş Toryum tuzundaki <sup>6</sup>Li'yi %15, %20, %50, %75 ve %90 hacim oranlarında karıştırarak performansını incelemişlerdir. Hidrojen üretim yöntemi olarak bakır klor (Cu-Cl) termokimyasal çevrimini kullanmışlardır. Nötronik analizler sonucunda yakıt bölgesi kalınlığının ve <sup>6</sup>Li zenginleştirmenin trityum üretim oranı (TBR) üzerinde olumlu etkisi olduğunu

vurgulamışlardır. Aynı zamanda yakıt bölgesi kalınlığının,  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranının ve  $\text{ThF}_4$  oranının artması hidrojen üretim miktarını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Demir [30] çalışmasında füzyon gücü 2677 MW olan ve 2891 MW toplam termal güce sahip SOMBRERO füzyon reaktörünün hidrojen üretim potansiyelini ve sistemin ısı kazanımını araştırmıştır. Nötronik analizleri XSDRNPM/SCALE4.4a nötron taşıma kod programı yardımıyla yapmıştır. Sistemde 3 üreme bölgesi bulunmakta olup birinci bölge 19 cm, ikinci bölge ve üçüncü bölge 40 cm kalınlığına sahiptir. Bu 3 bölgede 3 farklı yakıt kullanılmıştır. Bunlar; %70  $\text{ThO}_2$  + %25  $\text{UO}_2$  + %0.5  $\text{PuO}_2$ , %70  $\text{ThO}_2$  + %20  $\text{UO}_2$  + %10  $\text{PuO}_2$  ve %70  $\text{ThO}_2$  + %15  $\text{UO}_2$  + %15  $\text{PuO}_2$ 'dır. Hidrojen üretim yöntemi olarak buhar metan reformasyonunu (SMR) kullanmış ve bu yöntemle sistemin ısı kazanımını hesaplamıştır. Sonuç olarak yakıt fraksiyonlarının artması enerji çoğaltım faktörünü arttırmıştır ve bu değer artması tesisin ısıl verimini arttırmıştır. Isı geri kazanımı ile hidrojen üretim miktarı da artmıştır.

Genç [31] füzyon gücü 4000 MW APEX füzyon reaktörünün hidrojen üretim potansiyelini ve minör aktinileri dönüştürmedeki nötronik performansını incelemiştir. Soğutucu olarak kullanılan erimiş tuz duvarı minör aktinit tetra florür ( $\text{MAF}_4$ ) tuzunu Flibe,  $\text{FLiNaBe}$   $\text{LiF}$  ve Eutectic lityum ile ayrı ayrı karıştırır. Burada kullanılan MA nükleitleri ilki PWR-MOX yakıttan boşaltılan ikincisi PWR-  $\text{UO}_2$  kullanılmış yakıttan boşaltılandır. Modelleme tek boyut için XSDRNPM/SCALE4.4a, üç boyutlu geometri için MCNP4B kodu kullanılarak yapılmıştır. Hidrojen üretim yöntemi olarak buhar-metan reformasyonu (SMR), kükürt iyot döngüsü (S-I) ve yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda önemli miktarda hidrojen üretimi yapıldığı vurgulamıştır.

Asal ve Acır [32] LIFE füzyon reaktörüne modifiye edilen kobalt klor ( $\text{Co-Cl}$ ) termokimyasal çevriminin hidrojen üretim potansiyelini araştırmışlardır. LIFE füzyon reaktörü zamana bağlı nötronik analizlerini yapmışlardır. Nötronik analizler için MCNP nükleer kod programını kullanmışlardır. İlk olarak Flibe eriyik tuzu içerisine nükleer yakıtı hacimce %2  $\text{ThF}_4$  ve %2  $\text{UF}_4$  karıştırmışlardır. LIFE füzyon reaktörü trityum üretim oranı ( $\text{TBR} > 1,05$ ) 1,05 değerine %2  $\text{ThF}_4$  için yaklaşık olarak 34 yıl, %2  $\text{UF}_4$  için yaklaşık olarak 35 yıl sonra düşmüştür. Bu da reaktörün kendi kendine sürdürebilme süresidir. Bu süreçte enerji çoğaltım faktörü (M) fisil yakıt üretimi, yakıt yanma oranı (BurnUp) Termal güç oranı ( $1-\psi$ ) toplam Termal güç ( $P_{\text{hpf}}$ ) ve hidrojen üretim miktarı  $\dot{m}$  ayrı ayrı hesaplamışlardır.

Sonuç olarak LIFE füzyon reaktörü iyi bir nötronik analize sahip olduğunu ve önemli miktarda hidrojen üretimi yapabildiğini vurgulamışlardır.

Asal ve Acır [33], hidrojen üretimi için kobalt klor (Co-Cl), bakır Klor (Cu Cl) ve kükürt iyot (S-I) yöntemlerini belirlemişlerdir. Atalet sınırlamalı Füzyon Fisyon motoru ısı kaynağı olarak kullanmışlardır. Sistemin nötronik analizleri MCNP nükleer kod programı ile statik olarak hesaplanmış ve elde edilen veriler ile reaktörün optimum çalışma koşullarını belirlemiştir. LIFE füzyon reaktöründe yakıt olarak triso kaplı toryum karbür soğutucu olarak doğal lityum ve FLiNaBe kullanılmış. Tüm bu şartlar altında, nötronik sonuçların TBR ve M değerleri elde edilmiş ve elde edilen M değerine göre hidrojen üretim miktarını belirlemişlerdir. Sonuç olarak en iyi hidrojen üretim miktarı sırasıyla Cu Cl, Co-Cl ve S-I olduğu hesaplamışlardır.

Bu tez çalışmasında modifiye edilen PACER füzyon reaktörünün farklı soğutucu akışkanlar ve farklı hidrojen üretim metotları kullanılarak hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Bu yöntemlerin PACER füzyon reaktörüne uyumlu olup olmadığını ve üretilen hidrojen miktarlarının ekonomiklik açısından analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda iki farklı analiz yapılmıştır. İlk yapılan analiz PACER füzyon reaktörünün statik analizidir. PACER füzyon reaktörü için iki farklı soğutucu bölge hacmi mod 1: %25 (erimiş tuz + ThF<sub>4</sub>) +%75 boşluk ve mod 2: %50 (erimiş tuz + ThF<sub>4</sub>) +%50 boşluk olarak tanımlanmıştır. Erimiş tuz olarak lityum florür (LiF) nükleer yakıt olarak toryum tetra florür (ThF<sub>4</sub>) beş farklı oranda karıştırılmıştır. Bu oranlar %5 ThF<sub>4</sub> + %95 LiF, %10 ThF<sub>4</sub> + %90 LiF, %15 ThF<sub>4</sub> + %85 LiF, %20 ThF<sub>4</sub> + %80 LiF ve %25 ThF<sub>4</sub> + %75 LiF'dir. Beş oranın her biri her iki mod için ayrı ayrı nötronik hesaplamaları yapılmış, böylece trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltımı faktörü (M) elde edilmiştir. Hesaplamalar için ise ENDF- V nötron veri kütüphanesi ile MCNP nükleer kod programı kullanılmıştır. Elde edilen M değerine bağlı olarak hidrojen üretim ünitesinin ihtiyaç duyduğu termal güç oranı (1-  $\psi$ ) ve toplam termal güç ( $P_{hp}$ ) hesaplanarak tesisin hidrojen ( $H_2$ ) üretim miktarı hesaplanmıştır. Hidrojen üretim yöntemi olarak üç farklı çevrim seçilmiştir. Bunlar buhar-Metan reformasyonu (SMR), Kükürt-İyot çevrimi (S-I) ve yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi (HTE)'dir. Sonuçta modifiye PACER füzyon reaktörüne ayrı ayrı entegre edilen bu üç yöntemin hidrojen üretim potansiyelleri birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan ikinci çalışma ise; modifiye PACER füzyon reaktörü soğutucu bölgede soğutucu akışkan olarak FLiBe ve nükleer yakıt olarak UF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub>+ThF<sub>4</sub> ve ThF<sub>4</sub> tercih edilmiştir. Soğutucu bölge kalınlığı %25 eriyik tuz + %75 boşluktur. Nükleer yakıtların oranları ise %2 UF<sub>4</sub>+ %98 FLiBe, %6 UF<sub>4</sub>+ %94 FLiBe, %12 UF<sub>4</sub>+ %88 FLiBe, %2 (UF<sub>4</sub>+ThF<sub>4</sub>) + %98 FLiBe, %6 (UF<sub>4</sub>+ThF<sub>4</sub>) + %94 FLiBe, %12 (UF<sub>4</sub>+ThF<sub>4</sub>) + %88 FLiBe, %2 TF<sub>4</sub>+ %98 FLiBe, %6 TF<sub>4</sub>+ %94 FLiBe ve %12 TF<sub>4</sub>+ %88 FLiBe'dir. Dokuz farklı soğutucu akışkanın her biri için <sup>6</sup>Li zenginleştirme yapılmıştır. <sup>6</sup>Li zenginleştirme için belirlenen oranlar ise %7,5 <sup>6</sup>Li (doğal lityum), %20 <sup>6</sup>Li, %40 <sup>6</sup>Li, %60 <sup>6</sup>Li, %80 <sup>6</sup>Li ve %90 <sup>6</sup>Li'dir. Hidrojen üretim yöntemi olarak demir klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrimi tercih edilmiştir. Bu belirlenen parametreler kullanılarak PACER füzyon reaktörünün nötronik analizleri Monte Carlo metodu yardımı ile yapılmıştır. Belirlenen bu parametrelerden elde edilen TBR ve M değerleri kullanılarak hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu termal güç oranını ve toplama termal güç hesaplanmış ve tesiste üretilen hidrojen (H<sub>2</sub>) miktarı hesaplanmıştır. Sonuç olarak tüm veriler grafikler halinde sunulmuş ve yorumlanmıştır.

Bu yapılan iki çalışmanın verileri için ortak bir nokta belirlenerek PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinin HTE, S-I, SMR ve Fe-Cl yöntemleri için hidrojen üretim miktarları karşılaştırılmıştır. İlk olarak soğutucu bölge hacmi %25 (eriyik tuz + nükleer yakıt) + %75 boşluk olarak belirlenmiştir. Bu hacimsel bölgede soğutucu akışkan olarak FLiBe ve nükleer yakıt olarak ThF<sub>4</sub> ve UF<sub>4</sub> karıştırılmıştır. Nükleer yakıt oranları ise %2, %5 ve %10'dur. Daha sonra bu yöntemlerle üretilen hidrojenin satış tutarları \$/kg.yıl cinsinden kıyaslanmıştır.

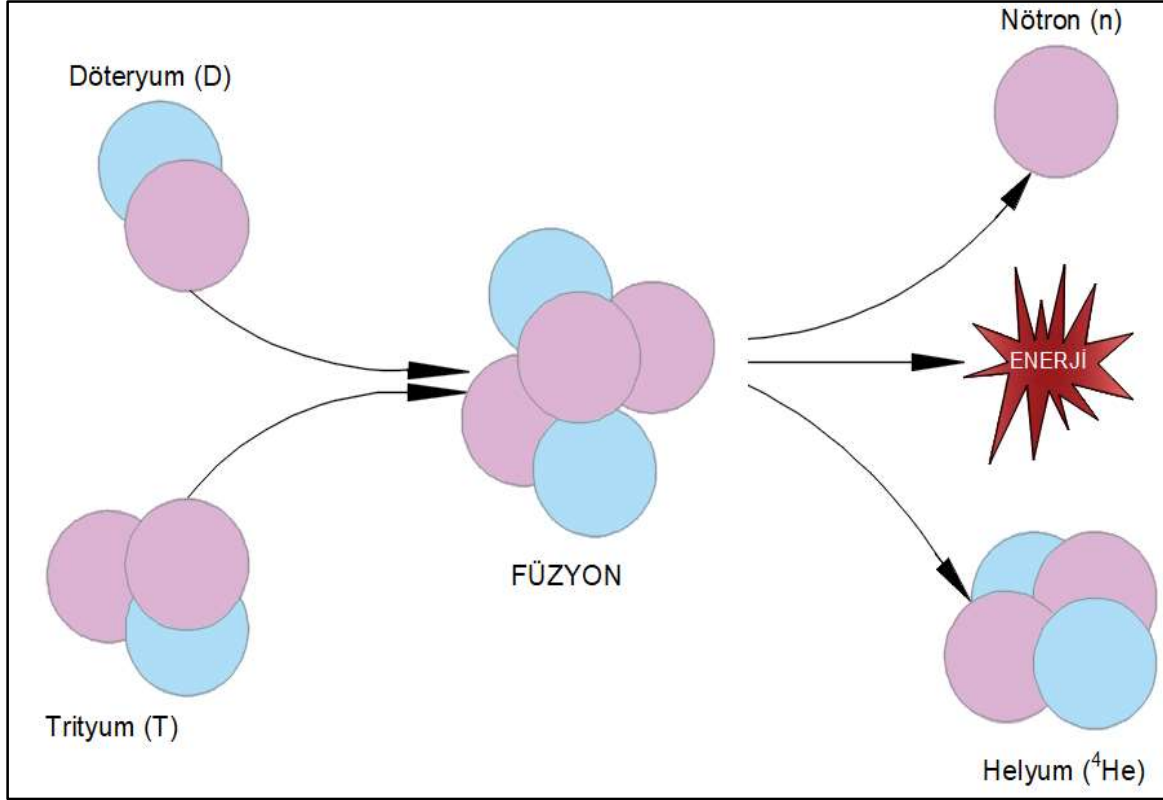


### 3. PACER FÜZYON NÜKLEER SANTRALİ

Dünya nüfusunun artması, teknolojinin ilerlemesi ve endüstrinin enerji ihtiyacının artması enerjiye olan talebi arttırmaktadır. Bu talebi karşılamak için devamlı olarak enerji üretmek gerekmektedir. Enerji üretimi için temiz bir enerji kaynağı olan füzyon enerjisi araştırılmaktadır. Nükleer füzyon iki hafif çekirdeğin birleşmesi sonucunda daha ağır ve kararlı elementin oluşmasıdır. Laboratuvar ortamında yapılan araştırmalar sonucunda mümkün olan döteronların ve tritonların füzyonun reaksiyonları aşağıda Eş. (3.1) - (3.4) verilmiştir [34].



Bu çalışmalar esnasında görüldü ki Eş. 3.4’de verilen en düşük enerjide en yüksek tesir kesiti döteryum ( ${}^2\text{D}$ ) ve trityum ( ${}^3\text{T}$ ) arasındaki reaksiyonda gerçekleşmektedir. Şekil 3.1.’de Döteryum-Trityum füzyon reaksiyonunun şematik görünümü verilmiştir. Bu birleşme esnasında büyük miktarda enerji açığa çıkar. Bu işlem sonucunda helyum ( ${}^4\text{He}$ ) oluşur ve bir nötron ( ${}^1\text{n}$ ) açığa çıkar. Döteryum ve trityum hidrojenin izotopu olup döteryum doğada en fazla suda bulunmaktadır, trityum ise lityumun nötronla reaksiyonu sonucunda üretilmektedir.



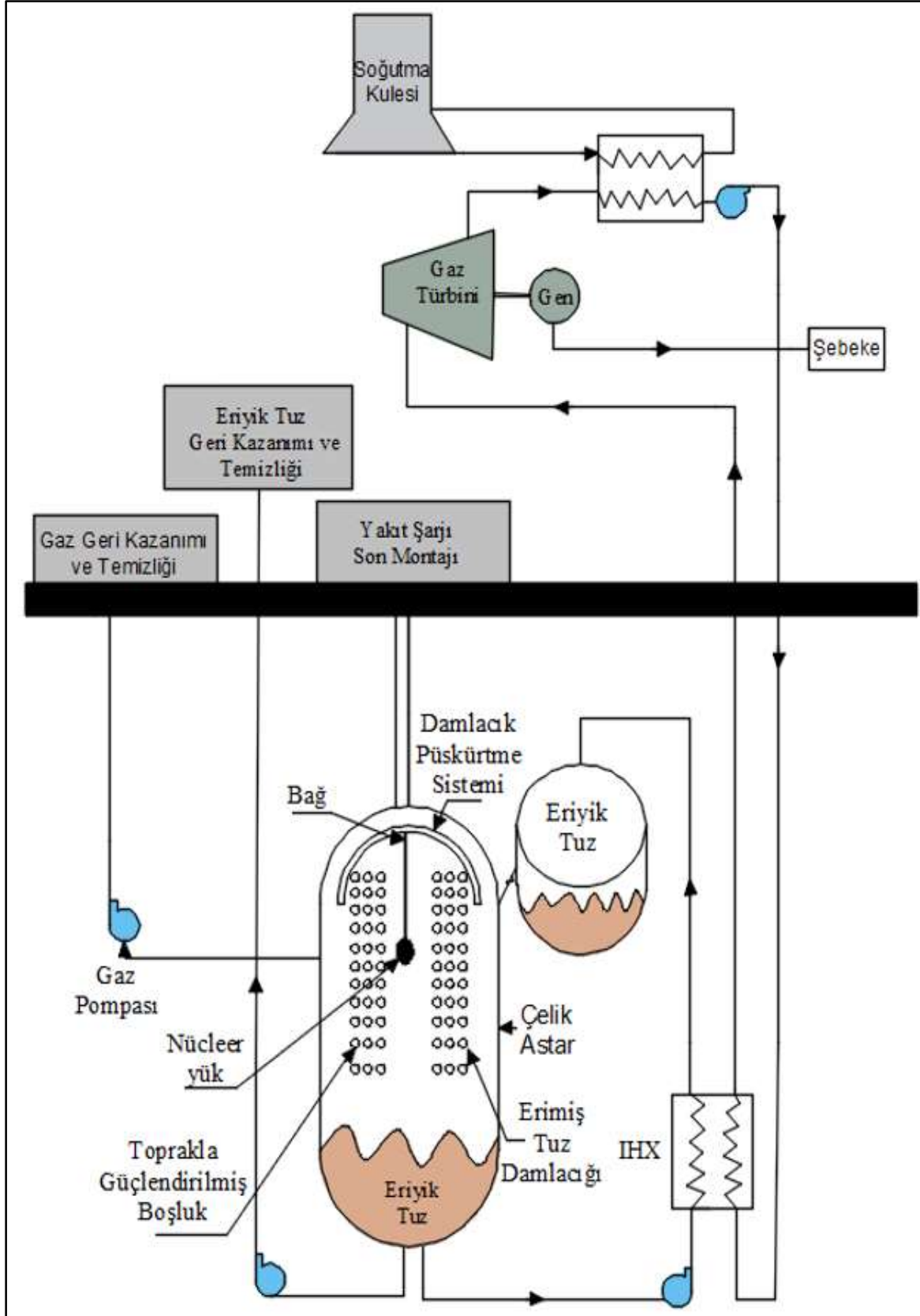
Şekil 3.1. Döteryum-trityum füzyon reaksiyonu

Füzyon enerjisi, füzyon reaksiyonlarının kendi kendini sürdürebildiğini ve çoğaltabildiğini gösteren iki ana yaklaşım için onlarca yıldır bilim insanları çalışmaktadır. Bunlardan ilki Lawrence Livermore Ulusal laboratuvarındaki (LLNL) geliştirilmiş DT buz ve gaz karışımı içeren bir kapsülü doğrudan aydınlatma veya dolaylı aydınlatma yoluyla sıkıştırmak için ağır iyon ve lazer ışınlarını kullanan ataletsel füzyon enerjisidir. İkincisi ise manyetik füzyon enerjisi üreten (MFE) düşük yoğunluklu Döteryum Trityum (D-T) plazmasının sınırlandırılmasını gerçekleştirmektedir. Bu sınırlandırma için güçlü manyetik alanlar kullanılmaktadır. Böylece füzyon enerjisinin sürdürülebilir koşulları oluşturulur [35,36].

1960'lar başından bu yana barışçıl nükleer patlayıcılar (PNE) geliştirilmektedir. Hidrojen yakıtının yer altında devamlı olarak tepkimeye girmesi yoluyla ısı enerjisi ve besleyici yakıtlar üretilmektedir. Böylece nükleer füzyon gerçekleşmektedir. PNE'lerin ilk tasarımları yerin altında buhar dolu odalarda güvenli bir şekilde yönetilerek füzyon enerjisi salımını gerçekleştirmektedir. Üretilen yüksek sıcaklıklı buhar, enerji kaynağı olarak kullanılırken, üretilen nötronlar fisyon tipi tepkimeler için enerji kaynağı olan  $^{233}\text{U}$  gibi malzemeleri üretmektedir [37]. Bu sistemi yeniden ele alıp bazı düzenlemeler yapılarak termonükleer

patlamalardan enerji elde etmek, Barışçıl Nükleer Patlatıcı yani PACER (Peaceful Nuclear Explosive) olarak adlandırılmıştır. Yapılan düzenlemeler şunlardır; derinlik yaklaşık olarak 30 000 cm'den 3000 cm'ye değiştirildi. İlk olarak her 3 saatte bir buhar dolu toprak duvarlı boşlukta 20 kton'luk nükleer patlayıcının patlatılması ile 1000 MWe güç üretimi önerildi. Daha sonraki çalışmalarda toprak duvarlı boşluğun patlamalar esnasında deforme olmasını engellemek, patlayıcının etkisini azaltmak ve enerjiyi absorbe etmek için buhar dolu boşluk, erimiş tuz damlacıklarının kullanıldığı çelik astarlı bir yapıya dönüştürüldü. Ayrıca yapılan çalışmalar 3 saatlik süreyi 20 dakikaya indirerek 2 kton'luk nükleer patlayıcıdan yine 1000MWe güç elde edildiğini gösterdi [38,39,40,41]. Her bir patlama sonucunda PACER füzyon reaktörü klasik fisyon reaktörünün ihtiyacı olan nükleer yakıtları %1 oranında üretecektir.

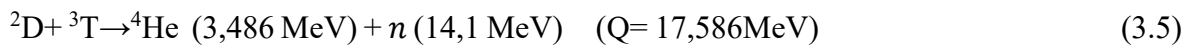
Diğer reaktör modelleri ile kıyaslandığında daha az nükleer atık üretirken aynı zamanda fisyon ürünler ve atık işlenebilmektedir. Ayrıca fisyon reaktörleri için zenginleştirilmiş nükleer yakıt üretebilmektedir [40].



Şekil 3.2. PACER füzyon Rektörü akış şeması [22,26,38-42].

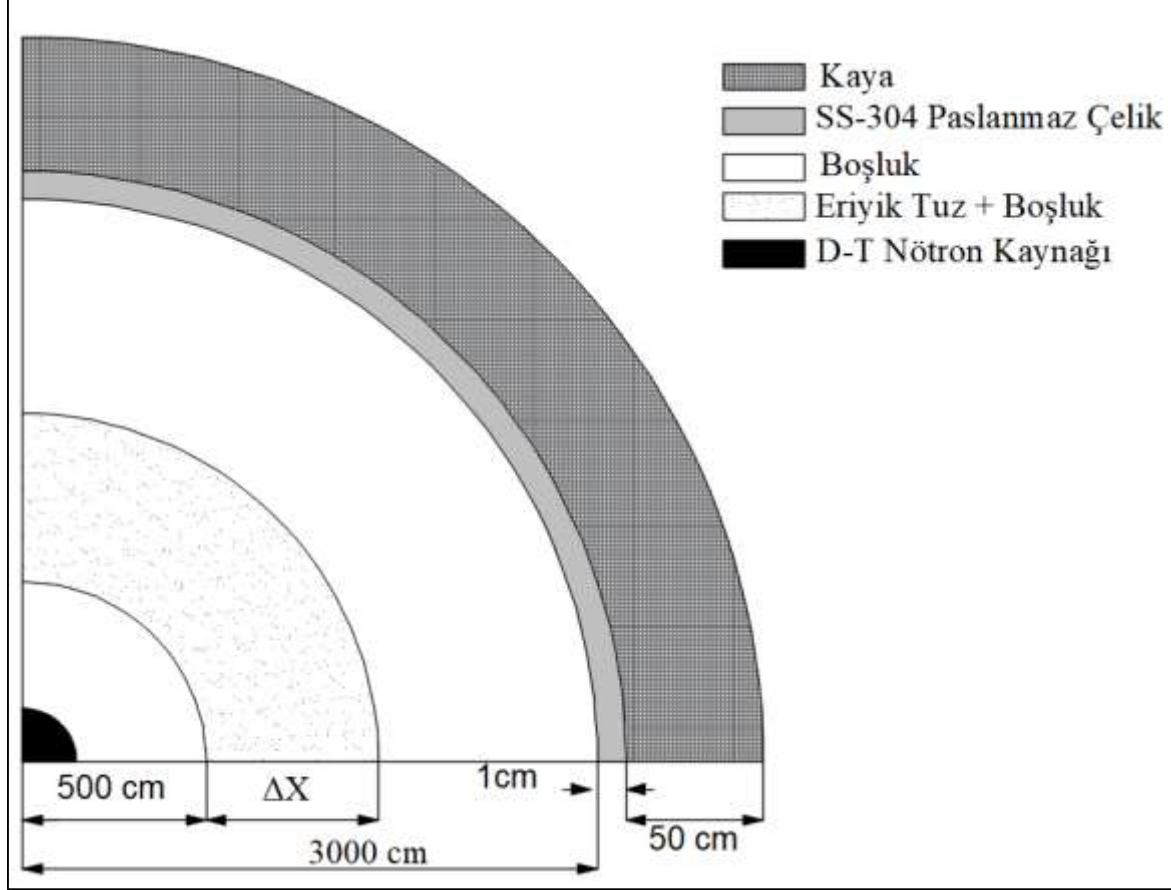
Şekil 3.1 de PACER füzyon nükleer tesisi görülmektedir [22,26,38-41]. Tesis füzyon reaksiyonunun gerçekleştiği bölüm, gaz geri kazanımı ve temizleme, yakıt şarjının son montaj kısmı, eriyik tuz geri kazanımı ve temizleme bölümlerinden oluşmaktadır. Bu tesiste oluşan yüksek sıcaklıktaki buhar ısı değiştiricisinden geçerek tekrar kullanılmak üzere eriyik tuz ünitesine geri dönmektedir. Reaksiyon odasının ısını absorbe eden bu akışkan aynı zamanda oda denge basıncını da düşürecektir. Ayrıca reaksiyon sonrası açığa çıkan yüksek enerjili nötronların, duvar malzemesi açısından füzyon reaksiyonu ile duvar arasına girerek duvarı ani şoktan koruyacaktır. Bir diğer özelliği ise kalıcı radyoaktif kirlenmeyi ve reaksiyon sonrası açığa çıkan yüksek enerjili nötronların duvar malzemesine zarar vermesini engelleyecek olmasıdır. PACER nükleer ünitesinden eriyik tuz vasıtasıyla ısı absorbe edilerek kızgın buhar haline dönüştürülür ve bu ısı değiştiricisinden başka bir akışkana aktarılarak ısı elektrik üretiminde kullanılmak üzere gaz türbinine gönderilmektedir. Gaz türbininden jeneratöre güç geçerek elektrik üretimi gerçekleşmektedir. Isı, gaz türbinden sonra ikinci bir ısı değiştiricisinden geçerek sonra tekrar ilk ısı değiştiricisine gönderilmektedir. Çevrim bu şekilde devam etmektedir. İkinci ısı değiştiricisindeki akışkan soğutulmak üzere soğutma kulesine gönderilmektedir. Soğutma kulesinde akışkanın ısı düşürüldükten sonra tekrar burada da ilk çevrimde olduğu gibi kapalı bir döngü devam etmektedir[42].

PACER füzyon reaktöründe, füzyon işleminin gerçekleşebilmesi için yakıt topu içinde önce fisyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi gerekmektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi merkezi D-T füzyon nötron kaynağı olan 3000 cm yarıçaplı füzyon reaksiyon kısmı kaya bölgesinde yer almaktadır. D-T füzyon nötron kaynağı 14,1 MeV kinetik enerjiye sahip nötronları meydana getirmek için hidrojen izotopu olan döteryum ve trityum tepkimeye girer. Döteryum trityum reaksiyonu Eş. 3.1’de verilmiştir [38, 40, 42].



PACER füzyon reaktörü kesit görünümü Şekil 3.3’de verilmiştir. PACER füzyon reaktörünün 3000 cm yarıçaplı füzyon reaksiyon kısmı bir kaya bölgesi içerisine yerleştirilmiştir. Bu kaya bölgesi ile füzyon reaksiyon bölgesi arasında soğutucu, boşluk ve SS-304 paslanmaz çelik yapı vardır. Yapının bu şekilde olmasındaki amaç; buharlaşma esnasında genleşmeden kaynaklı zararların engellenmesidir. Kaya yapı betonlarla perçinlenmiş ve üzeri 1-2 cm kalınlığında SS-304 paslanmaz çelikle sızdırmayı engellemek

için kaplanmıştır [42]. Modifiye edilen PACER füzyon reaktörünün füzyon güç girdisi ise 348 MW ve termal güç çıktısı 3480 MW olarak alınmıştır [22,26].



Şekil 3.3. PACER füzyon reaktör kesiti [22,26, 38-42]

Modifiye PACER füzyon reaktörünün kesit görünümü incelendiğinde  $\Delta x$  olarak verilen bölge soğutucu akışkan erimiş tuzun aktığı kısımdır ve Eriyik tuz + Boşluk olarak ifade edilmektedir. Bu tez kapsamında ilk çalışmada  $\Delta x$  mesafesi 200 m olarak alınmış ikinci çalışmada kıyaslanmanın yapıldığı son çalışmada bu mesafe 250 cm olarak alınmıştır. Ayrıca soğutucu bölgede kullanılan eriyik tuz + boşluk değerleri her iki çalışmada da farklı farklı kullanılmıştır. Birinci çalışmada soğutucu bölgenin hacimsel oranları mod ② ve mod ① olarak adlandırılmış ve sırasıyla %25 (LiF + ThF<sub>4</sub>) +%75 boşluk ve %50 (LiF +ThF<sub>4</sub>) + %50 boşluk olarak belirlenmiştir. İkinci çalışmada ise soğutucu bölge hacimsel oranı %25 (FLiBe + nükleer yakıt) + %75 boşluktur. Üç farklı nükleer yakıt tercih edilmiştir bunlar UF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub> ve ThF<sub>4</sub>'tür. Burada amaç bu parametrenin de hidrojen üretimi üzerindeki etkisini incelemektir.

## 4. HİDROJEN ÜRETİMİ

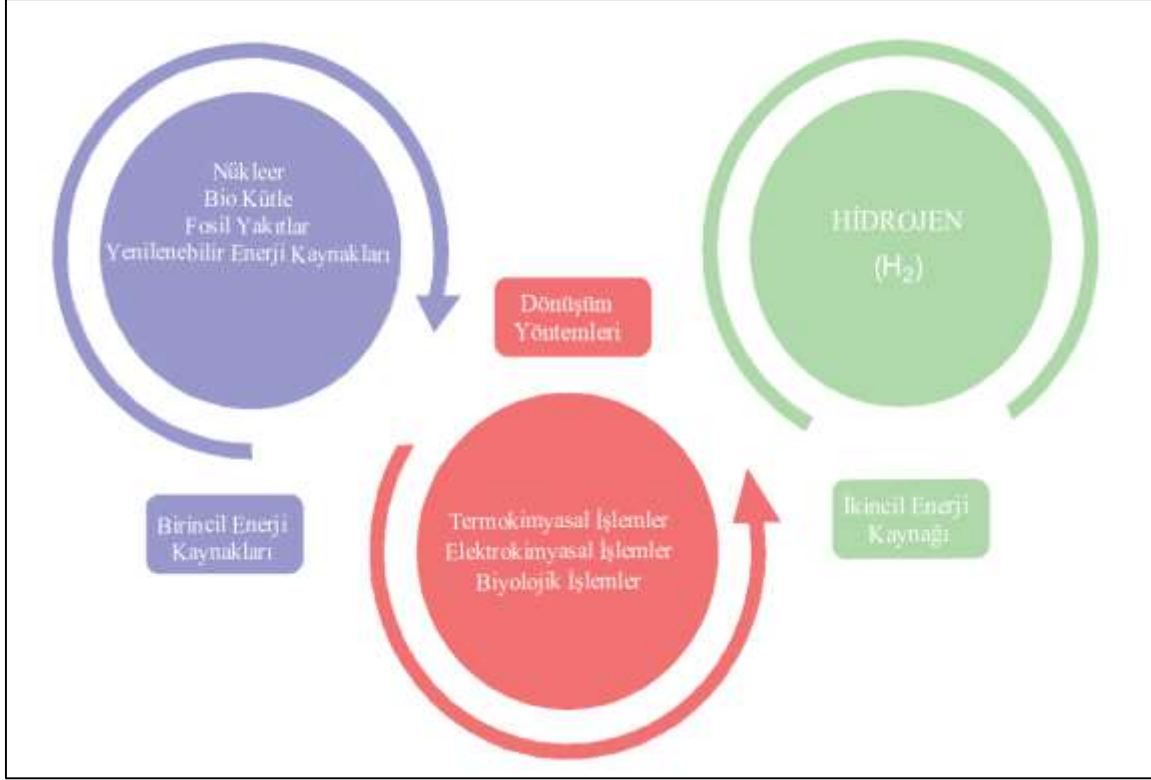
1500 yıllarında keşfedilen ve 1700'lü yıllarda yanabildiğinin farkına varılan hidrojen, periyodik cetvelin sol en üst köşesinde bulunan, atom numarası 1 olan ve havadan 14.4 kat daha hafif olan elementtir. Ayrıca bir bar basınç ve 25°C sıcaklıkta renksiz, kokusuz, tatsız, tamamen zehirsiz ve yanıcı bir gazdır. Sembolü H olan bu element 1,0079 kg/mol kütle ile evrende bulunan elementlerin en hafifidir ve evrenin toplam kütleinin %75'ini oluştururken evrenin en bol bulunan üçüncü elementidir. Bilinen tüm yakıtlar içerisinde en yüksek enerji içeriğine sahip olmasına rağmen yakıt olarak kullanılması esnasında sadece su buharı oluşturmaktadır. Sınırsız olarak kabul edilen hidrojen en çok suda ve fosil yakıtlarda bulunmaktadır.

Yenilenebilir enerjilerin devamlılığının olmaması ve üretilen elektrik enerjinin depolanamaması büyük bir sorundur. Çünkü yenilenebilir enerjileri sistemlerinin üretimde olmadığı saatlerde enerji ihtiyacı fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Bu saatlerde, fosil yakıtların hem belirli bir süre sonra bitecek olması hem de oluşturduğu çevresel sorunlarından dolayı geleceğin yatırımı olarak kabul edilen hidrojenin enerji talebini karşılaması beklenmektedir. Hidrojen hem iyi bir enerji taşıyıcısı hem de iyi bir enerji kaynağıdır. Gıda sektöründen endüstriye, ulaşımdan ev ve ofislere kadar birçok alanda kullanılmaktadır [44].

Karbonsuzlaşmanın diğer adı olan hidrojenin birçok kullanım alanı mevcuttur. Yakıt hücreleri motorlar ve türbinler, enerji depolama, petrol geri kazanımı ve arıtma, metanol üretimi, metal İşleme ve imalat, elektronik aletler ve amonyak üretimi alanlarında kullanılmaktadır.

Hidrojen evrende bol miktarda bulunmasına rağmen element olarak doğada serbest halde bulunmamaktadır. Hidrojen üretimi için birçok farklı yöntem mevcuttur. Şekil 4.1.'de şematik olarak verilmiştir. Hidrojen üretimi için gerekli olan enerji birincil kaynak olarak adlandırılmıştır. Birincil enerji kaynakları nükleer, bio kütle, fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Fosil yakıtlar petrol, doğalgaz ve kömürden oluşmaktadır. Rüzgâr, güneş, hidrolik enerji sistemleri, jeotermal vb. enerji kaynakları ise yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla hidrojen üretim metotları ise elektroliz,

termoliz ve fotolizdir. Fosil yakıtla hidrojen üretim metodu olarak hidrokarbon reformasyonu ve hidrokarbon prolizi yöntemleri kullanılır. Hidrokarbon reformasyonu kendi içerisinde buhar reformasyonu, kısmi oksidasyon ve ototermal reformasyon olarak üçe ayrılır. [45].

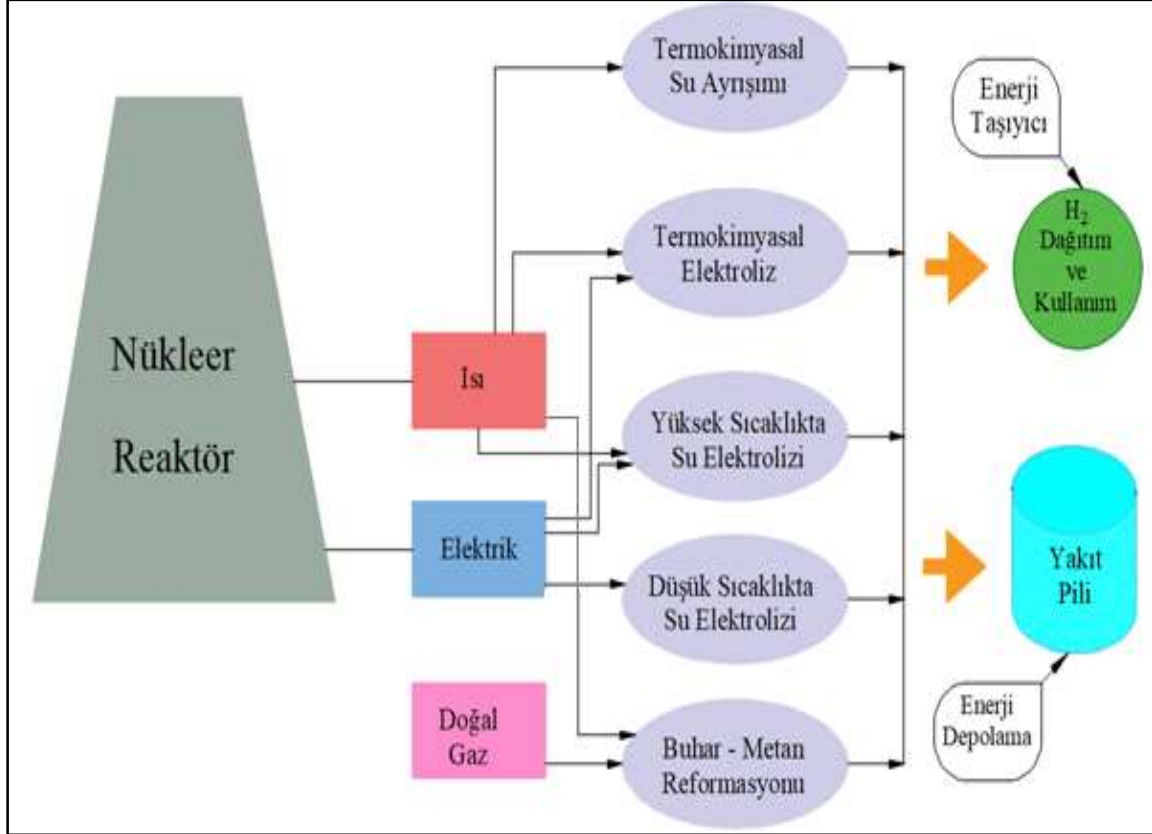


Şekil 4.1. Hidrojen üretim yöntemleri

Endüstri devrimiyle başlayıp kullanımı yaygınlaşan en ucuz kaynak olan fosil yakıt çevresel bir risktir. Hidrojen üretimi esnasında diğer alternatifleriyle kıyaslandığında fosil yakıt kullanımının maliyeti daha düşüktür. Fakat fosil yakıtların kullanımı esnasında meydana gelen zararlı gazlar seri gazı salımı yaparak küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bu zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için nükleer enerji iyi bir alternatiftir. Nükleer Santrallerin kullanımında doğaya zarar verecek zararlı gaz salımı minimum seviyededir.

Nükleer santrallerden elde edilen enerji direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürülüp şebeke sistemine verilebilir. Ayrıca ısı değiştiricisinden geçen ısı nükleer santrallere entegre edilecek bir sistemle faydalı işe dönüştürülebilir. Bu faydalı işe dönüştürme işlemlerinden bir tanesi de santrallere hidrojen üretim tesisinin entegre edilmesidir.

Literatürde hidrojen üretimi için farklı yöntemler mevcuttur. Bunlardan bir kısmı sadece ısı enerjisine bir kısmı sadece elektrik enerjisine bir kısmı ise hem ısı hem de elektrik enerjisine ihtiyaç duyar. Nükleer santrallerden hem ısı enerjisi hem de elektrik enerjisi elde edilebilir. Aşağıda Şekil 4.2’de nükleer santrallerden elde edilen enerji ile hidrojen üretim yöntemleri verilmiştir.



Şekil 4.2. Nükleer santrallerden elde edilen enerji ile hidrojen üretim yöntemleri

Kükürt iyot çevrimi (S-I), demir klor termokimyasal çevrimi (Fe-Cl) ve kobalt klor termokimyasal çevrimi (Co-Cl) termokimyasal su ayrışımı yöntemini örnek olarak verilebilir. Bu yöntemle hidrojen üretimi için gerekli olan enerji sadece ısı girdisidir. Bu çevrimler aynı zamanda Saf çevrim olarak da adlandırılırlar. Termokimyasal elektroliz yönteminde ise hidrojen üretimi için hem ısı hem de elektrik enerjisine ihtiyaç duyulur. Bakır klor termokimyasal çevrimi (Cu-Cl) ve magnezyum klor termokimyasal çevrimleri (Mg-Cl) örnek olarak verilebilir ve bu tür çevrimler hem elektrik hem de ısı enerjisini kullandıkları için hibrit çevrim olarak adlandırılırlar. Yüksek sıcaklıkta su elektrolizi termokimyasal elektroliz yöntemi gibi hibrit bir sistemdir ve hem ısı hem de elektrik enerjisine ihtiyaç duyar. Yüksek sıcaklık elektroliz (HTE) yöntemini örnek olarak verilebilir. Bir diğer

hidrojen üretim yöntemi ise düşük sıcaklıkta su elektrolizidir. Bu yöntemde enerji girdisi olarak sadece elektrik enerjisine ihtiyaç duyulur. Örneğin magnezyum iyot (Mg-I) çevriminde en yüksek sıcaklık değeri 600 °C'dir ve bu düşük sıcaklıkta tepkimeye girerek hidrojen üretimini gerçekleştirir [46]. Son yöntem ise buhar metan reformasyonudur (SMR). Buhar metan reformasyonunda diğer yöntemlerden farklı olarak enerji girdisi elektrik kullanılırken aynı zamanda sisteme bir metan girdisi de devam etmektedir.

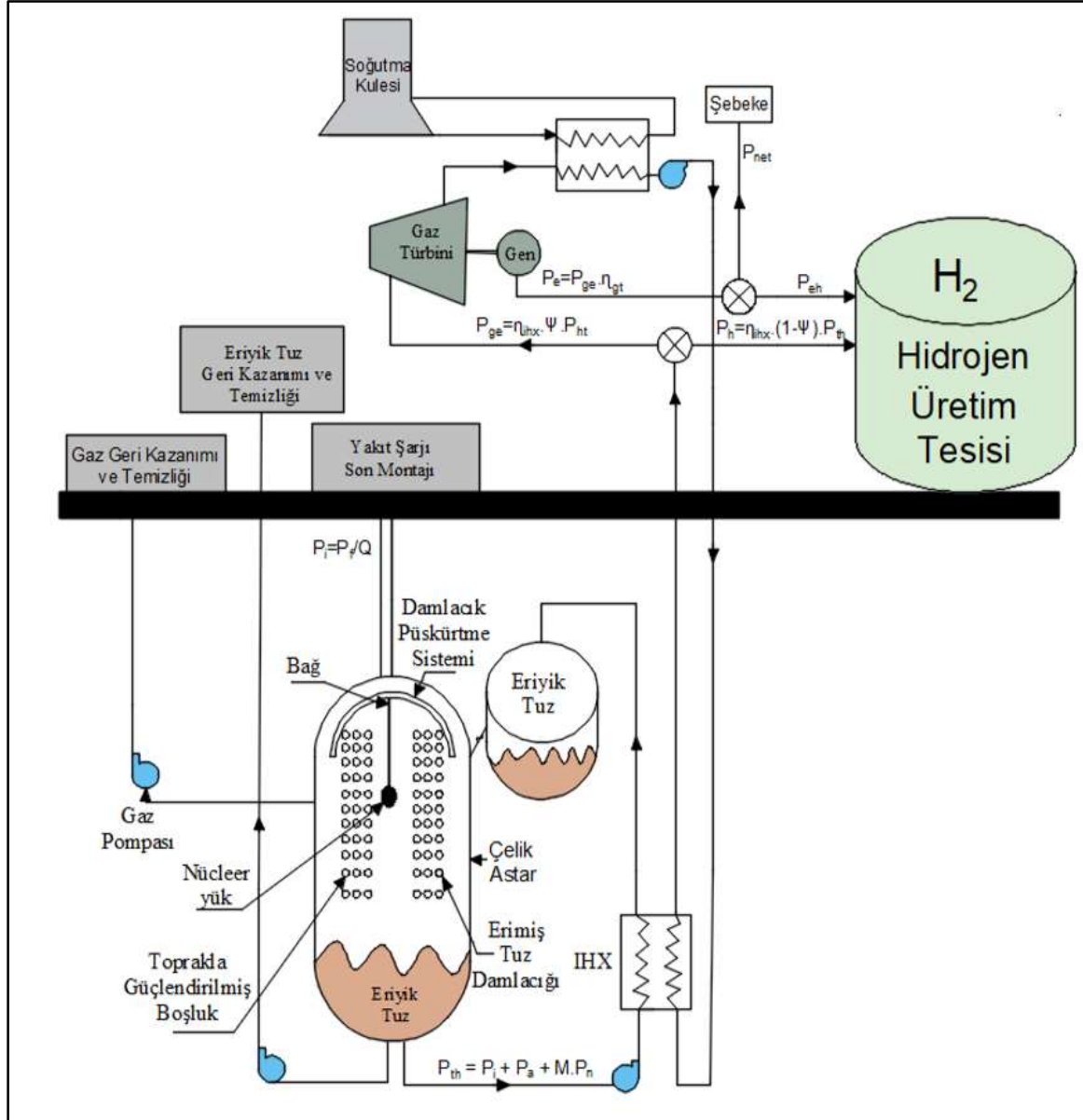
Bu yöntemler kullanılarak üretilen hidrojen ya enerji taşıyıcısı ya da enerji depolama sisteminde kullanılır. Üretilen bu hidrojen evlerde ısınma ve elektrik üretim tesislerinde güç sağlayan bir yakıt olarak kullanılabilir. Ayrıca araçlarda itici güç olarak kullanılabilmesi için ya taşınabilir yakıt hücresi ya sıvı itici roket ya da sabit yakıt hücreleri ile elektrik motorlarına güç veren sistemlerin olması gerekmektedir. Yakıt pili ile hidrojen enerji depolayıcısı olarak kullanılır. Yakıt hücresi olarak hidrojen ile elektrik üretimi yapmak, yanmalı motorlar ile elektrik üretimi yapmaktan 2-3 kat daha verimlidir. Ayrıca yakıt hücreleri sınırlı sayıda hareketli parçaya sahip oldukları için daha sessiz çalışırlar.

#### **4.1. PACER Füzyon Reaktöründe Hidrojen Üretimi**

Periyodik cetvelde verilen orta büyüklükte bir elementin çekirdeği kararlı bir yapıya sahiptir. Bu elementler dışarıdan yapılacak bir müdahale ile kararlı yapısı bozulup başka bir elemente dönüştürülemezler. Fakat bazı elementler kararlı yapıya sahip değildirler, bu elementlere dışarıdan müdahale edilerek başka elementlere dönüştürülebilirler. Bu işlem esnasında hızlı bir şekilde radyasyon yayılımı kütle şeklinde başka bir forma dönüştürülmesini sağlar [44]. Bu elementlerin dönüşümü iki şekilde gerçekleşebilir. Birincisi kütle numarası çok büyük olan bir element parçalanarak iki veya daha fazla elemente dönüşerek enerji açığa çıkarır. Bu olaya fisyon reaksiyonu denir. İkincisi ise iki hafif elementin nükleer reaksiyonlar sonucunda birleşerek daha ağır bir element oluşturması esnasında enerji açığa çıkarmasıdır. Bu olaya füzyon reaksiyonu denir. Bu işlem sonucunda oluşabilecek en ağır element ise demir elementidir.

Hem fisyon hem de füzyon reaksiyonu sonucunda oluşacak enerji hem ısı hem de elektrik enerjisi olarak hidrojen üretim tesislerinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada PACER füzyon reaktöründen elde edilecek ısı ve/veya elektriğin hidrojen üretim tesisinde kullanımını

açıklanmaktadır. Aşağıda Şekil 4.1’de hidrojen üretimi için gerekli olan enerjinin PACER füzyon reaktöründeki genel akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.3. PACER füzyon reaktörü hidrojen üretim tesisi genel enerji akış şeması [22,26,38-42,48,49]

Şekil 4.3'te verilen PACER füzyon reaktöründe görüldüğü gibi hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu hem elektrik hem de ısı enerjisi sağlamaktadır. Fakat bazı hidrojen üretim yöntemleri sadece ısı enerjisine ihtiyaç duyar. Bu yüzden PACER füzyon reaktöründen elde edilen, hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu ısıl gücün hesaplanması gerekmektedir. Isıl

güç elektriksel güç oranı ve ara ısıtıcının verimine bağlıdır ve füzyon reaktöründen elde edilen ısıl güç aşağıda verilen Eş. 4.1 ile hesaplanır [31].

$$P_{th} = P_i + P_\alpha + MP_n \quad (4.1)$$

Eş. 4.1'de verilen  $P_{th}$  toplam ısıl gücü ifade ederken,  $P_i$  füzyon güç girdisini,  $P_\alpha$  alfa parçacıklarından gelen gücü,  $P_n$  nötron parçacıklarından gelen gücü ifade etmektedir.  $M$  ise Monte Carlo metodu ile hesaplanır ve enerji çoğaltım faktörünü ifade etmektedir.

PACER füzyon reaktöründe yakıt olarak kullanılan bir D-T füzyon reaksiyonu sonucunda 14,1 MeV enerjiye sahip nötron ve 3,5 MeV enerjiye sahip helyum üretilmektedir. Yani bir füzyon reaksiyonu sonucunda toplamda 17,6 MeV'luk füzyon enerjisi elde edilmektedir. Bu gücün bir kısmı alfa ( $\alpha$ ) parçacıklarından bir kısmı ise nötron ( $n$ ) parçacıklarından gelmektedir. Bu  $P_\alpha$  ve  $P_n$  parçacıklarından gelen güç sırasıyla Eş. 4.2'de ve Eş. 4.3'te verilmiştir [31].

$$P_n = x_n \cdot P_f \quad (4.2)$$

$$P_\alpha = x_\alpha \cdot P_f \quad (4.3)$$

Eş. 4.2 ve 4.3'te verilen  $x_\alpha$  ve  $x_n$  bir D-T füzyon reaksiyonunda elde edilen alfa ve nötron parçacıklarının enerji oranını ifade eder ve bu oran  $x_\alpha$  için 0,2 ve  $x_n$  için ise 0,8'dir.  $P_f$  ise füzyon reaksiyonu güç çıktısıdır. Bu durumda elde edilen füzyon reaksiyonu güç çıktısının %8'i nötron parçacıklarından gelen güç iken %2'si ise alfa parçacıklarından gelen güçtür.

Füzyon reaksiyonu güç çıktısının ( $P_f$ ), füzyon güç girdisine ( $P_i$ ) oranı ise füzyon enerji kazanım oranına ( $Q$ ) eşittir ve Eş. 4.4'te verilmiştir [31].

$$Q = P_f / P_i \quad (4.4)$$

Verilen Eş. 4.2, 4.3 ve 4.4'te gerekli düzenlemeler yapıp Eş. 4.1'de yerine konulursa toplam termal güç eşitliliği aşağıda verilen Eş. 4.5'teki halini alır [31].

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

PACER füzyon reaktöründe üretilen ısı güç ikiye ayrılarak bir kısmı elektrik üretimi için gaz türbinine giderken bir kısmı ise hidrojen üretimi için hidrojen üretim tesisine gitmektedir. Gaz türbininde enerji üretimi için gerekli güç ( $P_{ge}$ ) Eş. 4.6 ve hidrojen üretim tesisinde hidrojen üretmek için gerekli olan güç ( $P_h$ ) Eş. 4.7'de verilmiştir [31].

$$P_{ge} = \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (4.6)$$

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

Eş. 4.6 ve 4.7'de verilen  $\eta_{ihx}$  ara ısı değiştirici verimini ifade eder.  $\psi$  elektriksel güç oranı, reaktörün toplam ısı gücü ile ara ısı değiştiricinin verimiyle çarpılarak gaz türbininde üretilen güç ( $P_e$ ) güç hesaplanır.  $(1 - \psi)$  ise ısı güç oranını ifade etmektedir ve reaktörün toplam ısı gücü ile ara ısı değiştiricinin verimiyle çarpılarak hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu ısı güç hesaplanır.

Gaz türbininden geçen ısı ile elde edilen güç jeneratöre aktarılacaktır ve böylece elektrik üretimi gerçekleşecektir. Elde edilen elektrik gücü ise ya şebekeye direk olarak gönderilecektir ya da hidrojen üretim tesisinde kullanılacaktır. Üretilen elektrik gücünün hesaplanabilmesi için gaz türbininin verimi de ( $\eta_{gt}$ ) önemlidir. Eş. 4.6 düzenlenerek bürüt elektrik üretimi Eş. 4.8 ile hesaplanır [31].

$$P_e = \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (4.8)$$

Ayrıca jeneratörde üretilen elektrik üç ayrı yerde kullanılmak üzere ayrılır. İlk olarak net elektrik güç oranı  $x_{net}$  şebekeye giden elektriği, ikinci olarak elektriksel güç oranı  $x_{eh}$  ile hidrojen üretim tesisinde kullanılacak olan elektrik oranını ve son olarak elektriksel güç oranı  $x_{cir}$  ile dolaşımdaki elektrik oranı hesaplanır. Şebekeye giden elektrik gücü  $P_{net}$  hidrojen üretim tesislerine giden elektrik gücü  $P_{eh}$  ve sistemde dolaşan elektrik gücü  $P_{cir}$  sırasıyla aşağıda verilen Eş. (4.9)-(4.11)'de ifade edilmiştir.

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

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

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

Burada verilen elektriksel güç oranları  $x_{net}$ ,  $x_{cir}$  ve  $x_{eh}$  toplamı her zaman bire (1) eşittir. Ayrıca yeniden dolaşımdaki elektriksel güçte tekrar kendi içerisinde üçe ayrılmaktadır. Pompalar gibi yardımcı sistemler için  $P_{aux}$ , sürücü sistem elektrik gücü için  $P_{ds}$ , ve izotop ayırma sistemi için  $P_{isf}$ 'dir ve sırasıyla aşağıda verilen Eş. (4.12)-(4.14)'de ifade edilmiştir [31].

$$P_{ds} = P_i / \eta_{ds} \quad (4.12)$$

$$P_{aux} = x_{aux} \cdot P_{th} \quad (4.13)$$

$$P_{isf} = x_{isf} \cdot P_{th} \quad (4.14)$$

Hidrojen üretimi için hem elektrik hem de ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrojen üretim ünitesine verilen hem elektrik hem de ısı enerjisinin birbirine oranı ise  $\mathcal{E}$  ile ifade edilir ve Eş. 4.15'de verilmiştir [31].

$$\mathcal{E} = \frac{P_{eh}}{P_h} \quad (4.15)$$

Böylece hidrojen üretimi için gerekli olan toplam güç Eş. 4.16 verilmiştir [31].

$$P_{hpf} = (1 + \mathcal{E}) \cdot P_h \quad (4.16)$$

Verilen eşitliklerde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra elektriksel güç oranı ( $\psi$ ) aşağıda Eş. 4.17'de verildiği gibi olur.

$$\psi = \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \cdot [\eta_{gt} + \mathcal{E} - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} + \frac{\mathcal{E}}{\eta_{gt} + \mathcal{E} - \eta_{th} \cdot x_{net}} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} \cdot [\eta_{gt} + \mathcal{E} - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} \quad (4.17)$$

Hidrojen üretimi için gerekli olan toplam gücün hesaplanabilmesi için Eş. 4.5, 4.7 ve 4.16 kullanılarak aşağıda verilen Eş. 4.18 elde edilmiştir [31].

$$P_{hpf} = (1 - \psi) \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \eta_{ihx} \cdot \frac{P_f}{Q} \cdot [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \quad (4.18)$$

PACER füzyon reaktöründe hidrojen üretiminin hesaplanabilmesi için gerekli olan parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PACER füzyon reaktöründe hidrojen üretimi için gerekli olan parametreler ve değerleri [22, 24, 27-33]

Parametreler	Değerler
Füzyon güç çıktısı, $P_f$	3480 MW
Füzyon güç girdisi, $P_i$	348 MW
Ara ısı değıştirici verimi, $\eta_{ihx}$	0,9
Sürücü sistem verimi, $\eta_{ds}$	0,5
Gaz türbini termal verimi, $\eta_{gt}$	0,6
Nötron parçacıkları için enerji fraksiyonu, $x_n$	0,8
Alfa parçacıkları için enerji fraksiyonu, $x_a$	0,2
Füzyon enerji kazancı, $Q$	10
İzotop ayrıştırma sistemi güç fraksiyonu, $x_{isf}$	0,05
Yardımcı sistem güç fraksiyonu, $x_{aux}$	0,05

Çizelge 4.1’de verilen parametreler ve değerleri bu tez çalışmasında hidrojen üretim yöntemlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında hidrojen üretim yöntemi olarak, buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıklı elektroliz (HTE), kükürt-iyot (SI) döngüsü ve demir-klor (Fe-Cl) termokimyasal döngüleri kullanılmıştır.

## 4.2. Nükleer Hidrojen Üretim Metotları

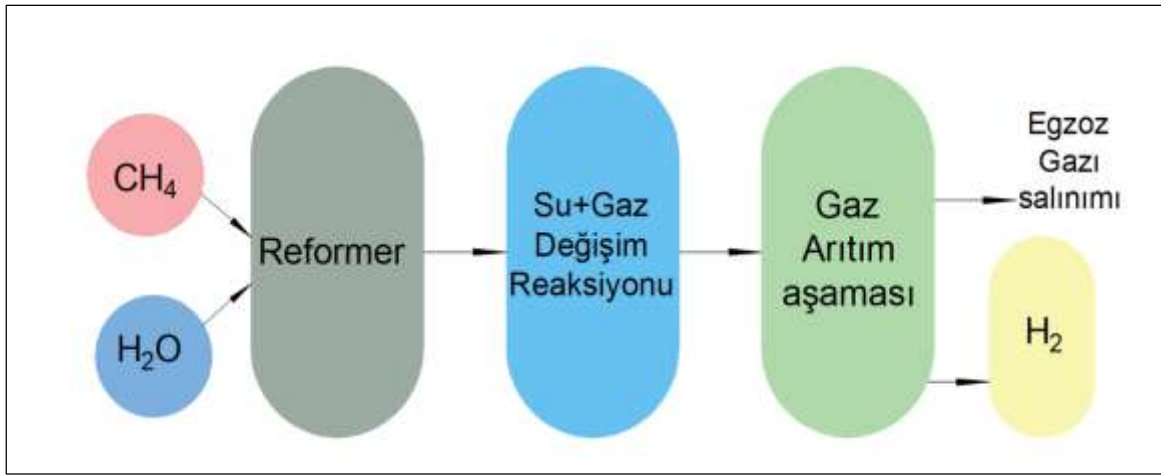
Bu tez çalışmasında PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesislerinde kullanılan hidrojen üretim yöntemleri açıklanacaktır. Bu hidrojen üretim yöntemleri sırasıyla buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıklı elektroliz (HTE), kükürt-iyot (SI) döngüsü ve demir-klor (Fe-Cl) termokimyasal döngüleridir.

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

Buhar-metan reformasyonu (SMR), kızgın buhar ile doğal gazın ( $CH_4$ ) karıştırılması ile hidrojen ( $H_2$ ) üretimi yöntemidir. Bir hidrokarbon olan doğal gazdan hidrojen üretebilmek için reformasyon yöntemi kullanılmaktadır [46]. Ayrıca doğal gaza ek olarak nafta, hafif hidrokarbonlar ve likit petrol gazı (LPG) gibi kaynaklar kullanılabilir.

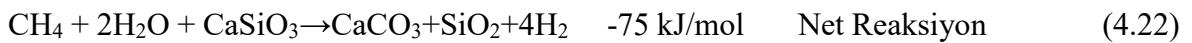
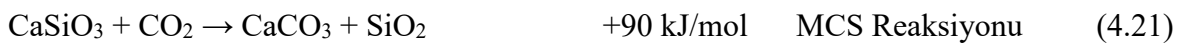
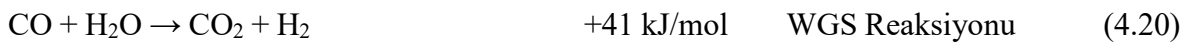
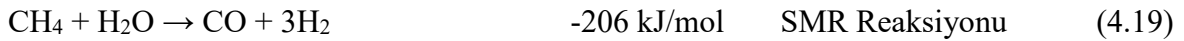
Hidrojen üretim yöntemleri içerisinde en yaygın üretim yöntemi olan SMR %83 verime sahiptir. Buda günümüzde kullanılan hidrojen üretim yöntemleri arasında en verimli yöntem olduğunu ve aynı zamanda en ucuz yöntem olduğunu göstermektedir [49].

Doğalgazdan kükürt giderme işleminin yapılabilmesi için öncelikle basınçlandırılan yakıt ısıtılarak buharlaştırılır ve bir miktar hidrojen ile zenginleştirilir. Bu arındırma işleminden sonra yakıt reformer'a gider. Buhar- metan reformasyonu prosesinin şematik görünümü Şekil 4.4 verilmiştir.



Şekil 4.4. Buhar- metan reformasyonu prosesi

Buhar – metan reaksiyonu için üç farklı reaksiyonun hidrojen üretim potansiyelleri incelenmiştir. Bu üç farklı reaksiyonun adı sırasıyla SMR, SMR + WGS ve SMR + WGS + MCS'dir ve aşağıda Eş. (4.19) – (4.21)'de reaksiyonlar verilmiştir. Ayrıca net reaksiyon veya toplam reaksiyon olarak adlandırılan reaksiyon ise Eş. 4.22'de verilmiştir.

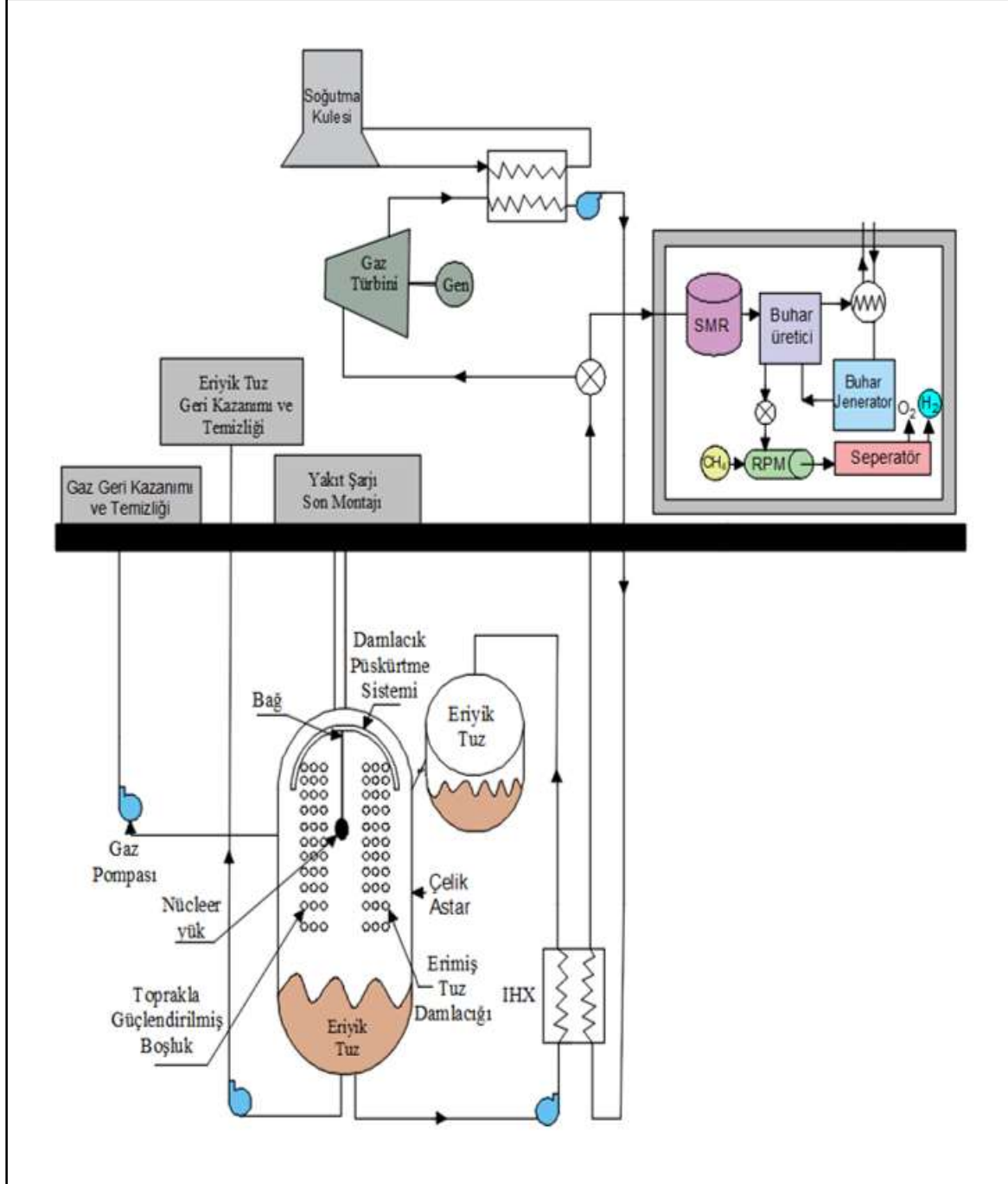


İlk reaksiyon olan SMR adımı yaklaşık olarak 973 – 1123K sıcaklıklarda ve 3-25MPa basınçta gerçekleşmektedir. Arındırma işleminden sonra ilk olarak reforme gelen yakıt ( $\text{CH}_4$ ) su ile tepkimeye girerek karbonmonoksit ve hidrojen üretmektedir. SMR reaksiyonu sonucunda 3:1 oranında CO ve  $\text{H}_2$  üretilmektedir [27]. Aslında hidrojen üretimi bu adımda gerçekleşmektedir. Fakat karbonmonoksit oldukça zehirli bir gaz olduğu ve doğada kolay kolay çözünemediği için karbondioksitin yok edilmesi gerekmektedir. Eğer bir insan veya hayvanın bulunduğu bir ortamda CO seviyesi 50 ppm'i geçerse CO solunum yoluyla kana karışır ve oksijenin vücuda girmesini engelleyerek kısa süre içerisinde müdahale edilemezse zehirlenme ölümle sonuçlanır. Fakat 50 ppm'nin bile bu kadar zararlı olduğu bu gaz birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin ilaçlar, parfümler ve yakıtların üretilmesinden endüstride jeneratör gazı olarak kullanılan birçok alan mevcuttur. CO bu gibi alanlarda kullanılmak istenirse sadece SMR reaksiyonu yeterlidir.

CO salımını azaltmak için SMR reaksiyonundan sonra CO tekrar su ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ile tepkime girer. Bu tepkime 573 – 673K sıcaklıklarında gerçekleşen su gazı değişimi (WGS) reaksiyonudur [50]. Bu tepkime sonucunda Karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) ve hidrojen ( $\text{H}_2$ ) üretimi gerçekleşmiştir. WGS reaksiyonu Eş. 4.20'de verilmiştir.  $\text{CO}_2$  gazı CO gazı kadar zararlı değildir.  $\text{CO}_2$  sera gazı emisyonları içerisinde en yüksek paya sahiptir. Sera gazı emisyonları atmosferde ısıyı tutma özellikleri yüzünden atmosferin ısısını arttırmakta ve küresel ısınmaya sebep olmaktadır. CO emisyonunda olduğu gibi  $\text{CO}_2$  emisyonunu da doğaya salınım yapmak yerine faydalı işe dönüştürülebilir. Örneğin tıpta, gıda alanında gıdaların uzun süre bozulmadan saklanmasında ve nakledilmesi işlemlerinde, Seralarda gübreleme işlemlerinde, aşırı ısınan makinelerin soğutulmasında ve yangın tüplerinde söndürme maddesi olarak kullanılmaktadır. Hem SMR hem de WGS reaksiyonlarında elde edilen  $\text{H}_2$  gazı gaz ayırım aşamasına gelerek saflaştırılır ve daha sonra ise depolanır.

WGS reaksiyonunda elde edilen  $\text{CO}_2$ 'in olumsuz etkilerinden kurtulmak için  $\text{CO}_2$  magnezyum silikatla veya kalsiyum silikatla tepkimeye girerek  $\text{CO}_2$  tutulur.  $\text{CO}_2$  tutulumunun gerçekleştiği bu adıma ise mineral karbondioksit tutumu (MCS) olarak adlandırılır ve Eş. 4.21'de verilmiştir[51,52].  $\text{CO}_2$  ile kalsiyum silikatın tepkimeye girmesi sonucunda kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ve silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) meydana gelir. Böylelikle  $\text{CO}_2$  tutulumu sağlanmış olur. Eş. 4.22'de ise net reaksiyon verilmiştir.

Bu tez çalışmasında SMR yöntemi ile hidrojen üretimi için gerekli olan ısıl enerji kaynağı olarak PACER füzyon reaktörü tercih edilmiştir. PACER füzyon reaktörüne hidrojen üretim ünitesi entegre edilmiştir. Aşağıda Şekil 4.5. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş SMR yöntemi ile hidrojen akış şeması verilmiştir [22,27,30].



Şekil 4.5. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş SMR yöntemi ile hidrojen akış şeması [22,27,30, 38-40]

Bu test çalışmasında iki ayrı araştırma yapılmıştır. Birinci çalışmada buhar metan reformasyonu (SMR), kükürt iyot (S-I) çevrimi ve yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) çevrimlerinin hidrojen üretim miktarları incelenmiştir. Bu incelemeler için bazı parametreler belirlenmiştir. İlk aşamada enerji kaynağı olarak tercih edilen PACER füzyon reaktörünün sıvı jetlerinin bulunduğu erimiş tuz bölgesi için iki farklı hacim belirlenmiştir. Bu belirlenen iki farklı hacim mod ① ve mod ② olarak adlandırılmıştır. Mod ① %25 erimiş tuz + ThF<sub>4</sub> ve %75 boşluktur. Mod ② ise %50 erimiş tuz + ThF<sub>4</sub> ve %50 boşluk olarak belirlenmiştir. Ayrıca erimiş tuz ThF<sub>4</sub> karışımlarında bulunan ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranı ise her iki mod için %5, %10, %15, %20 ve %25 olarak değiştirilerek hidrojen üretim miktarı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu parametreler ilk olarak bütün reaksiyonlar kullanılarak ( SMR, WGS ve MCS) hidrojen üretim miktarları hesaplanmıştır. Daha sonra sadece iki reaksiyon (SMR ve WGS) kullanılarak hidrojen üretiminin miktarı hesaplanmıştır. En son olarak ise tek reaksiyonu (SMR) kullanılmış ve bu üç ayrı adım için elde edilen hidrojen ve miktarları karşılaştırılmıştır.

Hidrojen üretim miktarının hesaplanabilmesi için hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu toplam gücün hesaplanması gerekmektedir. Eş. 4.18'de toplam güç formülü verilmişti fakat SMR yöntemiyle hidrojen üretimi için sadece ısı güce ihtiyaç duyulduğu için elektrik gidisi 0 olarak alınır. Bu da elektriksel gücün ısı güce oranını olan  $\mathcal{E}$  değerinin 0 ( $\mathcal{E}=0$ ) olması anlamına gelmektedir. Eş. 4.18 tekrar düzenlendiğinde SMR yöntemi ile hidrojen üretimi için gerekli olan toplam güç Eş. 4.23 elde edilir.

$$P_{hpf}^{SMR} = (1 - \psi)\eta_{ihx} \cdot P_f [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \quad (4.23)$$

Toplam termal güç denklemin hesaplanabilmesi için bu denklemde verilen elektriksel güç oranı ( $\psi$ ) değerinin hesaplanması gerekmektedir. Hesaplamaların yapılabilmesi için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Nükleer tesiste üretilen tüm enerjinin sistemde harcandığı kabul edilerek net elektrik güç oranı 0 ( $x_{net} = 0$ ) olur. Ayrıca  $\mathcal{E}=0$  olduğunda Eş. 4.17 aşağıda Eş. 4.24'de verildiği gibi düzenlenir.

$$\psi^{SMR} = \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \cdot [\eta_{gt}]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} \cdot [\eta_{gt}]} \quad (4.24)$$

Toplam termal gücün hesaplanmasından sonra SMR, WGS ve MCS reaksiyonlarıyla hidrojen üretiminin hesaplanabilmesi için kütleli debinin hesaplanması gerekmektedir. Eş. (4.25)-(4.28)'da SMR reaksiyonunun kütleli debisi hesaplanması verilmiştir [31].

$$\dot{m}_{CH_4} = \frac{P_{hp}^{SMR}}{q_{tot}} \quad (4.25)$$

$$\dot{m}_{H_2O-I} = \dot{m}_{CH_4} \cdot \frac{v_{H_2O}}{v_{CH_4}} \quad (4.26)$$

$$\dot{m}_{CO} = \dot{m}_{CH_4} \cdot \frac{v_{CO}}{v_{CH_4}} \cdot \eta_{SMR} \quad (4.27)$$

$$\dot{m}_{H_2-I} = 3\dot{m}_{CH_4} \cdot \frac{v_{H_2}}{v_{CH_4}} \cdot \eta_{SMR} \quad (4.28)$$

SMR reaksiyonunun hesaplaması yapıldıktan sonra eğer iki aşamalı reaksiyonun hidrojen üretim miktarı hesaplanacak ise SMR reaksiyonuna ek olarak WGS reaksiyonun kütleli debisi hesaplanmalıdır. WGS reaksiyonunun kütleli debi hesaplaması Eş. (4.29)-(4.31)'de verilmiştir [31].

$$\dot{m}_{H_2O-II} = \dot{m}_{CO} \cdot \frac{v_{H_2O}}{v_{CO}} \quad (4.29)$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_{CO} \cdot \frac{v_{CO_2}}{v_{CO}} \cdot \eta_{WGS} \quad (4.30)$$

$$\dot{m}_{H_2-II} = \dot{m}_{CO} \cdot \frac{v_{H_2}}{v_{CO}} \cdot \eta_{WGS} \quad (4.31)$$

SMR ve WGS reaksiyonlarında hidrojen miktarı hesaplanmaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere reaksiyon sonucunda açığa çıkan gazların miktarının azaltılması/yok edilmesi için son adım olan MCS reaksiyonun gerçekleşmesi gerekmektedir. Aşağıda Eş. (3.32)-(4.34)'de MCS reaksiyonunun kütleli debi hesaplaması verilmiştir.

$$\dot{m}_{CaSiO_3} = \dot{m}_{CO_2} \cdot \frac{v_{CaSiO_3}}{v_{CO_2}} \quad (4.32)$$

$$\dot{m}_{CaCO_3} = \dot{m}_{CO_2} \cdot \frac{v_{CaCO_3}}{v_{CO_2}} \cdot \eta_{MCS} \quad (4.33)$$

$$\dot{m}_{SiO_2} = \dot{m}_{CO_2} \cdot \frac{v_{SiO_2}}{v_{CO_2}} \cdot \eta_{MCS} \quad (4.34)$$

SMR, WGS ve MCS reaksiyonlarında verilen  $\dot{m}$  kütleli debiyi,  $v$  reaksiyonlarda verin bileşiminin molar kütleli debisini  $\eta$  ise her bir reaksiyon için reaksiyonun verimini ifade etmektedir. Bu çalışmada  $\eta_{SMR}$ ,  $\eta_{WGS}$  ve  $\eta_{MCS}$  verim değerleri 0,90 olarak kabul edilmiştir.

Kütleli debi hesaplaması SMR reaksiyonunda  $CH_4$ 'de kütleli debisinin hesaplanmasıyla başlamıştır.  $CH_4$ 'ün hesaplanabilmesi için toplam reaksiyon enerjisinin bilinmesi gerekmektedir. Çizelge 4.2'de bu çalışmanın hesaplamalarında kullanılan  $q_{tot}$  değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Buhar-Metan Reaksiyonu için gerekli  $q_{tot}$  değerleri

Kullanılan Reaksiyon sayısı	Kullanılan Reaksiyonlar	Toplam Reaksiyon Enerjisi ( $q_{tot}$ )
3'lü Reaksiyon	Eş. 4.19 - Eş 4.20 - Eş 4.21	4,687
2'li Reaksiyon	Eş. 4.19 - Eş 4.20	10,312
Tek Reaksiyon	Eş. 4.19	12,875

Çizelge 4.2'de verilen üçlü reaksiyon terimi SMR + WGS +MCS reaksiyonlarını, ikili reaksiyon terimi SMR + WGS reaksiyonlarını ve tek reaksiyon terimi ise SMR reaksiyonunu ifade etmektedir.

Buhar-metan reaksiyonu sonucunda üretilen toplam hidrojen miktarının hesaplanabilmesi için Eş. (4.28) ve Eş. (4.31)'den faydalanılarak Eş. 4.35 elde edilmiştir. Böylece reaksiyonun toplam hidrojen miktarı hesaplanabilmiştir [22,24,28, 31].

$$\dot{m}_{H_2-tot} = \dot{m}_{H_2-I} + \dot{m}_{H_2-II} \quad (4.35)$$

Hidrojen üretim miktarı hesaplandıktan sonra önemli bir parametre ise sitemin verimidir. Çünkü harcadığımız enerji ile elde ettiğimiz enerjiden ( $H_2$ ) daha fazla olması istenmez. Sitemin veriminin hesaplanması için aşağıda verilen Eş. 4.36 kullanılmıştır.

$$\eta_{hp}^{SMR} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV_{H_2}}{\dot{m}_{CH_4} \cdot HHV_{CH_4} + P_{hp}^{SMR}} \quad (4.36)$$

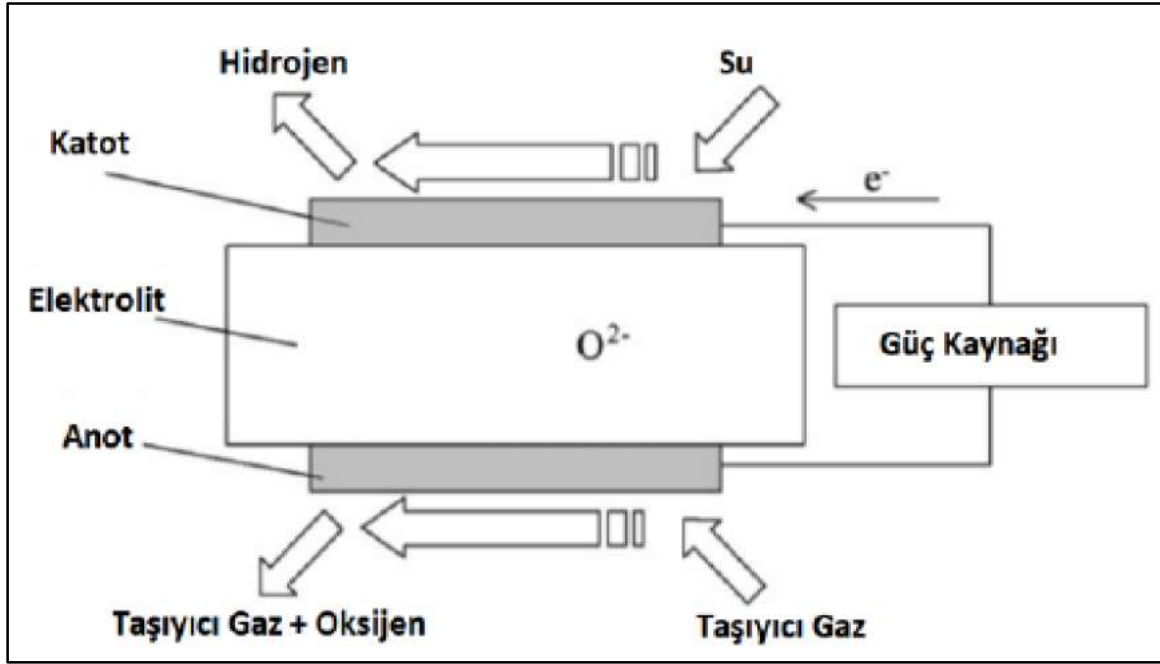
Eş. 4.36 incelendiğinde üretilen hidrojenin kütleli debisiyle hidrojenin üst ısı değeri, kullanılan yakıtın kütleli debisiyle üst ısı değerine hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu ısı gücünün toplamının oranıyla elde edilmektedir [22,24,28, 31].

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

Hidrojen üretim yöntemleri IRENA'ya göre kendi içerisinde dört renk ile sınıflandırılmış; gri yeşil mavi ve turkuazdır. Bu sınıflandırılma, kullanılan materyal ve yöntemine göre yapılmıştır. Bu sınıflandırma içerisinde elektroliz yöntemi ile hidrojen üretimi yeşil hidrojen olarak adlandırılır. Çünkü bu yöntem sonucunda karbondioksit ( $CO_2$ ) salımı gerçekleşmemektedir [53]. Elektroliz terimi, elektrik akımı yardımıyla sıvının kimyasal bileşiklerine ayrıştırılması olarak açıklanabilir. Elektroliz yönteminde sıvı olarak en çok su kullanılmaktadır. [54]. Aşağıda Eş. 4.37'de suyun elektroliz yöntemini gösteren reaksiyon verilmiştir [53].

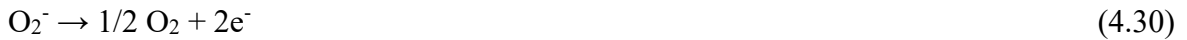
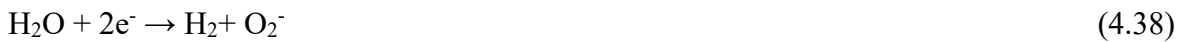


Yüksek sıcaklıkta elektroliz yönteminde ise düşük sıcaklıktaki su elektrolizine göre toplam enerji talebi buharlaşma ısıyla karşılandığı için daha az enerji talep etmektedir. Bu özelliği nedeniyle ticarileştirilmiş elektroliz yöntemine göre daha yüksek verime sahiptir [55].



Şekil 4.6. Yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi akış şeması [24]

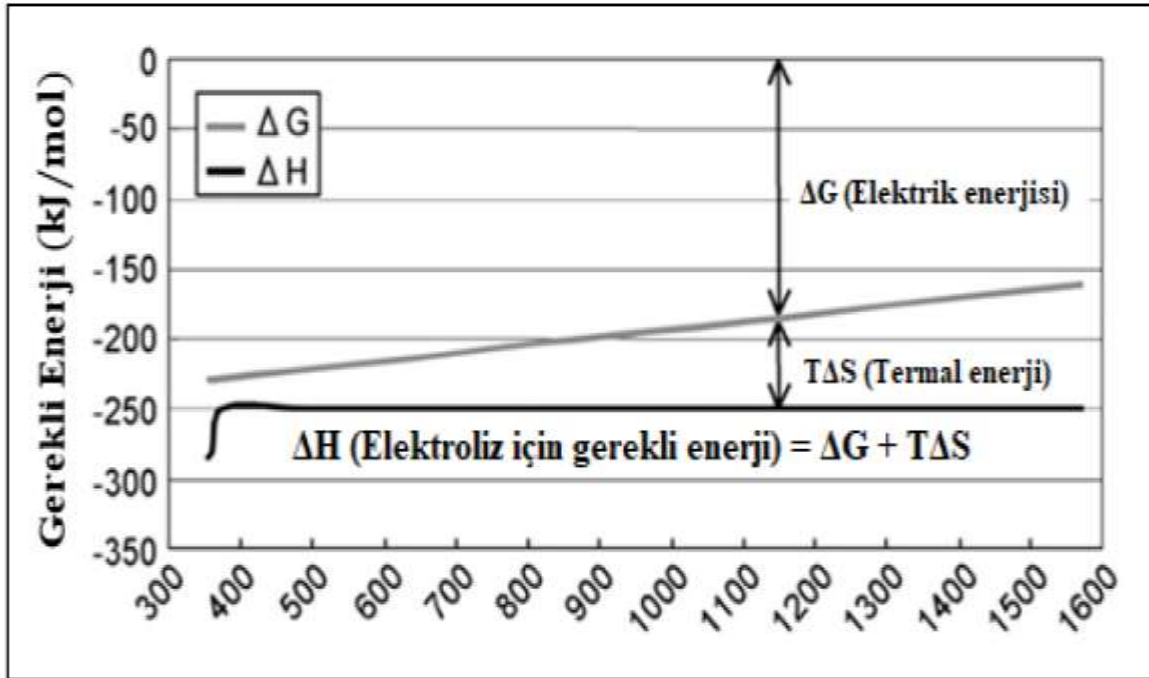
Şekil 4.6 incelendiğinde elektroliz işlemi için yükseltgenmenin gerçekleştiği anot ve indirgenmenin gerçekleştiği katot uçları mevcuttur. Anot ve katot bir güç kaynağından beslenir. Su elektrolit kısmına girmeden önce dış bir kaynak tarafından ısıtılıp öyle gönderilir. Elektrolize gelen buhar hidrojen ve oksijen olarak iki ayrı iyon ayrılır. Hidrojen ürünü katota gönderilirken oksijen iyonları ise iletken elektronlar sayesinde anota taşınmaktadır. Bu işlemlerin kimyasal formülü ise Eş. (4.38) – (4.40) verilmiştir [56].



Bu reaksiyonun gerçekleşebilmesi için gerekli olan hem ısı hem de elektrik gücünün hesaplaması gerekmektedir. Gerekli enerjinin hesaplanabilmesi için aşağıda Eş. 4.41’de bu iki enerji girdisinin oranı verilmiştir [56].

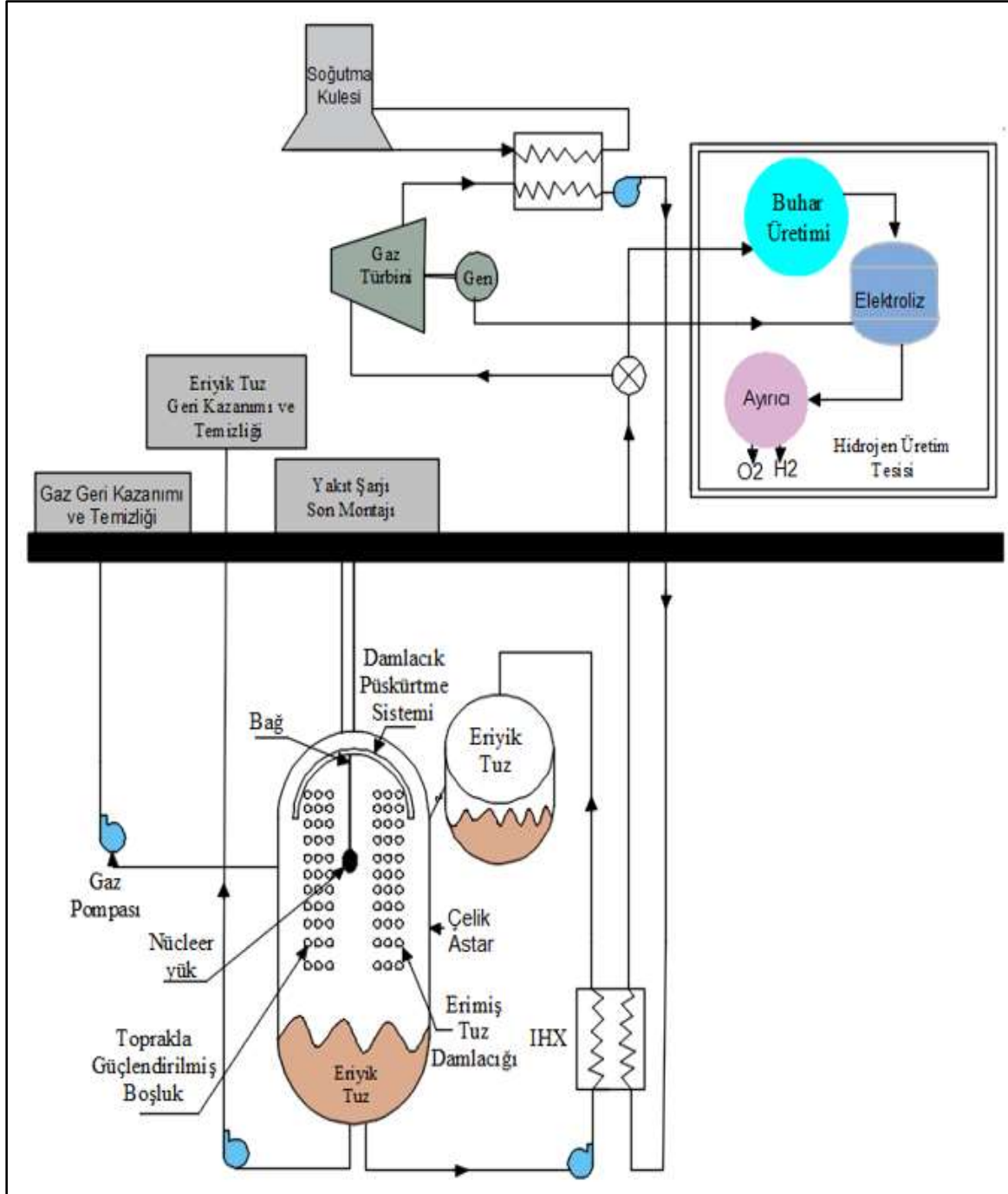
$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (4.41)$$

Bu eşitlikte verilen  $\Delta H$  entalpi değişimini gösterirken hidrojenin yanma ısısının negatifine eşittir.  $\Delta G$  sistemin Gibbs serbest enerji değişimini,  $T$  belirtilen reaksiyonun sıcaklığını ve  $\Delta S$  belirtilen reaksiyonun entropi değişimini ifade etmektedir. Yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi için gerekli olan elektrik ve ısı gücün hesaplanabilmesi için Şekil 4.7'den faydalanılır. Burada  $\Delta G$  sistemin ihtiyaç duyduğu elektriksel gücü,  $T\Delta S$  ise sistemin ihtiyaç duyduğu ısı gücü (termal güç) ifade etmektedir.  $T\Delta S$  değerinin artmasıyla sistemin ihtiyaç duyduğu elektriksel güç  $\Delta G$ 'nin değerinin azalması yüksek sıcaklıkta elektrolizin düşük sıcaklıkta elektroliz yöntemine göre daha az enerji girdisine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir [56].



Şekil 4.7. Yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi için gerekli olan enerji girdileri [56]

PACER füzyon reaktörü yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi ile hidrojen üretimi yapabilmek için gerekli olan ısı gücü ve elektriksel gücü sağlamaktadır. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş HTE hidrojen üretim tesisinin akış şeması Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş HTE yöntemi ile hidrojen akış şeması [22,27,30, 38-40, 57]

Şekil 4.8 incelendiğinde PACER füzyon reaktöründen elde edilen ısı güç ikiye ayrılmaktadır. Bu ısı gücün bir kısmı hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu ısı enerjisi karşılamaktadır. Diğer kısmı ise gaz türbinine giderek jeneratörden elektrik üretimini gerçekleştirmektedir. Bu üretilen elektrik ise hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılamaktadır. Tesiste hidrojen üretimi 900°C’de gerçekleştiği için tesisin ihtiyaç

duyduğu elektrik gücünün ısı güce oranı olan  $\mathcal{E}=4$  olarak alınır ve ısı gücü formülü Eş. 4.42'de verildiği gibi düzenlenir.

$$P_{hpf}=(1-\psi)\cdot(1+4)\cdot\eta_{ihx}\cdot\frac{P_f}{Q}\cdot[Q\cdot(x_a+x_n\cdot M)+1] \quad (4.42)$$

Şekil 4.8 incelendiğinde PACER füzyon reaktöründen elde edilen enerji ile jeneratörde üretilen tüm elektrik enerjinin hidrojen üretim tesisinde kullanıldığı görülmektedir. Bu da  $x_{net} = 0$  olduğu anlamına gelmektedir. Bu şartlarda Eş. 4.17 yeniden düzenlendiğinde aşağıda verilen Eş. 4.43 elde edilir.

$$\psi^{HTE} = \frac{1}{\eta_{ihx}\cdot\eta_{ds}[Q\cdot(x_a+x_n\cdot M)+1]\cdot[\eta_{gt}+4]} + \frac{4}{[\eta_{gt}+4]} + \frac{x_{aux}+x_{isf}}{\eta_{ihx}\cdot[\eta_{gt}+4]} \quad (4.43)$$

PACER füzyon reaktörüne entegre edilen yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi yapan tesisin hidrojen üretim miktarı Eş. 4.44 ile hesaplanmıştır.

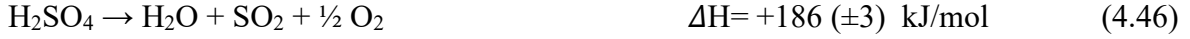
$$\dot{m}_{H_2}^{HTE} = \frac{P_{hpf}^{HTE}}{HHV_{H_2}} \quad (4.44)$$

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

Termokimyasal döngüye adını veren Kükürt ve İyot döngünün ara maddeleri olup doğaya zarar vermez ve geri dönüştürülebilir. Kükürt - İyot (S-I) döngüsü çevre dostudur, temizdir ve büyük ölçüde hidrojen üretimine uygundur. S-I hidrojen üretim sisteminin ısı verimliliği ise %50'nin üzerindedir. Bu durum S-I termokimyasal döngüsünü en umut verici hidrojen üretim yöntemlerinden biri yapmaktadır [58].

Amerikalı bir şirket olan GA tarafından ilk defa 1970'li yıllarda keşfedilen S-I döngüsü günümüzde en fazla araştırılan ve olgunluğa erişmek üzere olan bir çevrimdir. S-I termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretim yapmanın sayısız faydası sayesinde ABD, Çin, Güney Kore, Almanya, Japonya, Fransa gibi ülkelerde bu çevrimin aktif olarak kullanılabilmesi için sürekli çalışılmaktadırlar [59].

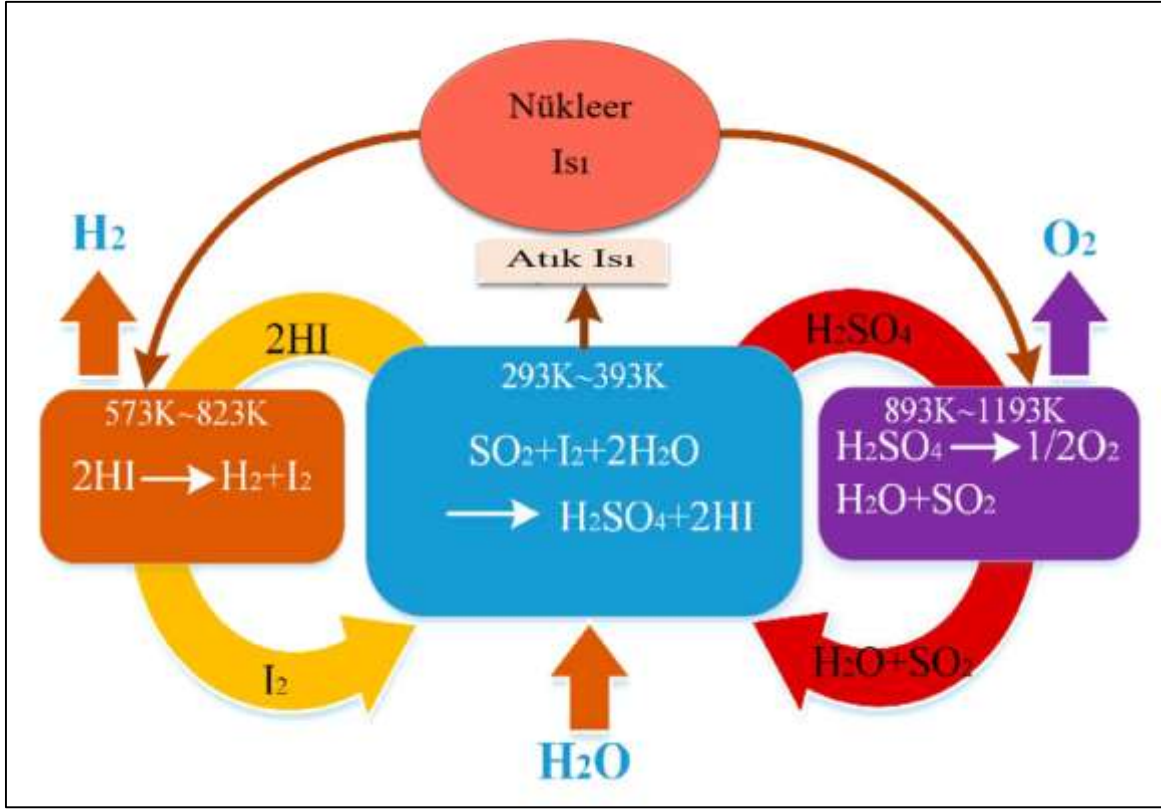
Kükürt - İyot (S-I) termokimyasal çevrimi 3 farklı kimyasal reaksiyondan meydana gelmektedir. S-I termokimyasal çevrimi aşağıda Eş.(4.45)-(4.47)'de verilmiştir [59, 60].



Eş. 4.45'te verilen Kükürt – İyot çevrimin ilk adımı Bursen çevrimi olarak adlandırılır ve 363 – 413 K sıcaklığında gerçekleşmektedir [61]. Kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), iyot (I<sub>2</sub>) ve suyun (H<sub>2</sub>O) tepkimeye girmesi sonucunda sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ile hidrojen iyodür (HI) meydana gelmektedir. Bu ekzotermik bir reaksiyondur ve bundan dolayı Bursen reaksiyonu harici bir ısıya ihtiyaç duymaz.

Eş.4.46'da endotermik bir reaksiyon gerçekleşmektedir ve bu adımda harici bir ısıya ihtiyaç duyulmaktadır. Reaksiyon sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ayrışma adımı olarak adlandırılır. Reaksiyonun gerçekleşmesi iki tane ayrıştırıcıdan geçmesi gerekmektedir. İlk ayrıştırıcıda ısı 573 -773 K arasındadır. Bursen reaksiyonu ürünlerinden olan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ün ısı ile ilk ayrışması sonucunda su (H<sub>2</sub>O), kükürt trioksit (SO<sub>3</sub>) oluşmaktadır. Kükürt trioksit (SO<sub>3</sub>) 1023- 1123K sıcaklığına sahip olan ikinci ayrıştırıcıda oksijen (1/2 O<sub>2</sub>) ve kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) olarak ayrışır. Daha sonra ise elde edilen bir mol su ile kükürt dioksit tekrar kullanılmak üzere Bursen çevrimine gönderilir.

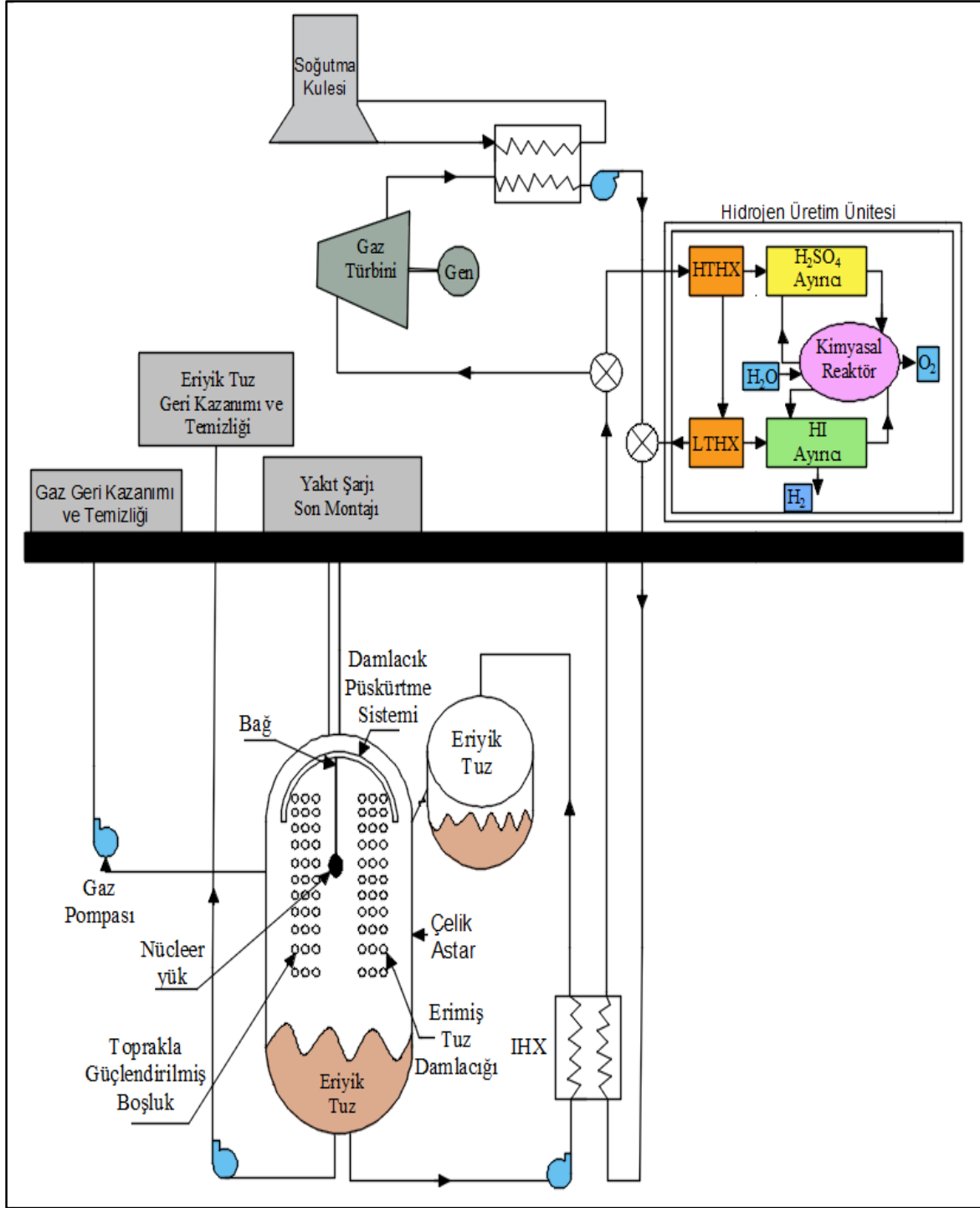
Kükürt – İyot termokimyasal çevriminde hidrojenin olduğu adımdır. Eş. 4.47'de verilmiştir. Bu adım endotermik bir reaksiyondur ve harici bir ısıya ihtiyaç duyar. Bu reaksiyon hidrolik asit ayrışımı olarak adlandırılır. Hidrojen iyodür (HI), 373- 773K sıcaklığında ayrıştırılarak iyot (I<sub>2</sub>) ve hidrojen (H<sub>2</sub>) oluşur. Elde edilen iyot tekrar kullanılmak üzere Bursen reaktörüne gönderilir ve çevrim devam eder. Kükürt – İyot (S-I) termokimyasal çevriminin şematik görünümü Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kükürt – İyot (S-I) termokimyasal çevrimine genel bakış [59]

Şekil 4.9 incelendiğinde nükleer ısı kaynağından gelen ısı kükürt – iyot çevriminin iki aşaması için gereklidir. İlk olarak sülfürik asit ayrışması ikinci olarak ise hidrojen iyodürün ayrışma aşaması açık bir şekilde görülmektedir. Reaksiyona Bursen çevriminde su girişi olup atık ısı çevreye verilmekte iken sülfürik asit çevriminde oksijen çıkışı olmakta ve hidrojen iyodür reaksiyonunda ise hidrojen ( $\text{H}_2$ ) elde edilmektedir.

Şekil 4.10'da PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş S-I yöntemi ile hidrojen akış şeması verilmiştir. PACER füzyon reaktörü kükürt – iyot termokimyasal çevriminin ihtiyaç duyduğu ısıl enerjiyi karşılamaktadır. Şekil 4.10 incelendiğinde reaktörden gelen ısı ikiye ayrılmaktadır. Isının bir kısmı S-I termokimyasal çevriminde hidrojen üretimi için kullanılırken diğer kısmı elektrik üretimi için gaz türbinine gönderilmektedir. Gaz türbine giden enerjinin jeneratörde elektrik üretimi hidrojen üretim tesisimde kullanılmadığı için tamamı şebekeye verilmektedir. Bu durumda güç oranı sabiti  $\mathcal{E}=0$  olarak kabul edilir.



Şekil 4.10. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş S-I yöntemi ile hidrojen akış şeması [22,27,30, 38-40, 57]

Şekil 4.10'da kullanılan HTHX yüksek sıcaklık ısı değıştiricisi, LTHX ise düşük sıcaklık ısı değıştiricisidir.

Kükürt – iyot termokimyasal çevrimi kullanılan hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu termal güç, güç oranı sabitinin sıfır ( $\mathcal{E}=0$ ) olarak alınması durumunda Eş. 4.18 tekrar düzenlenerek Eş. 4.49’da verildiği gibi olur [61].

$$P_{hpf}^{S-I} = (1 - \psi)\eta_{ihx} \cdot P_f [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \quad (4.49)$$

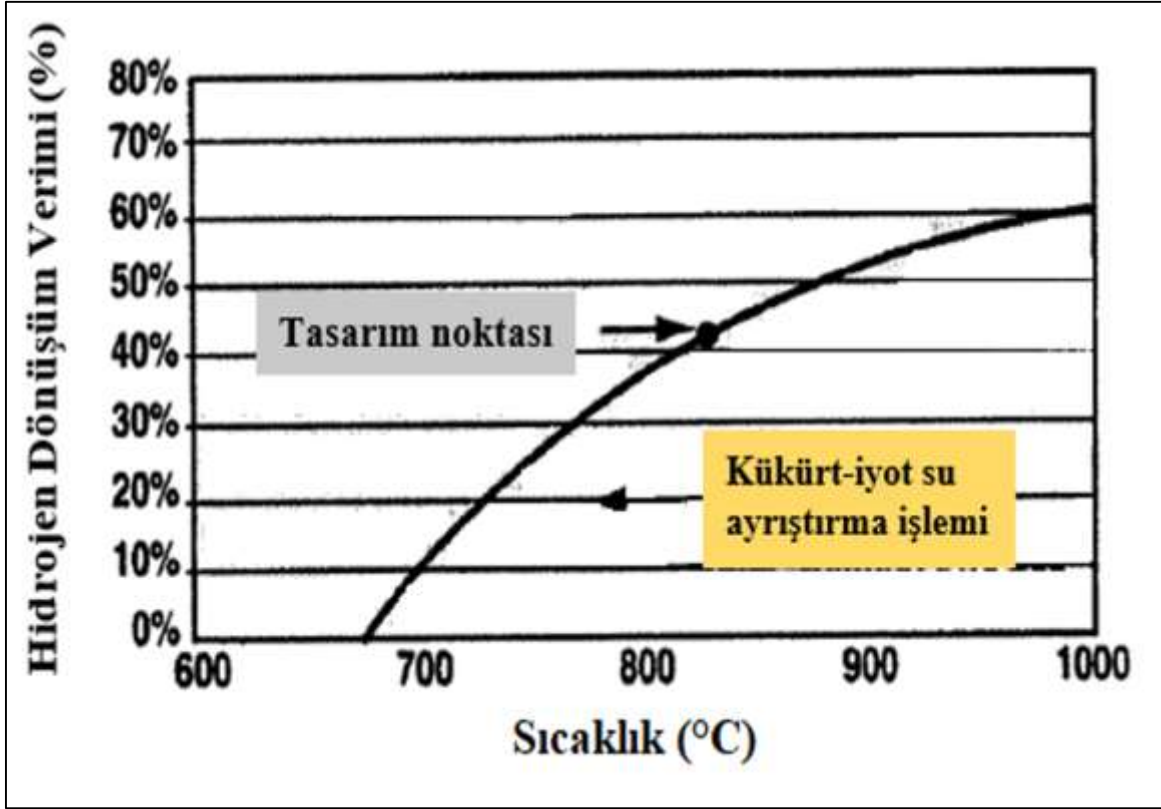
Kükürt – iyot termokimyasal çevrimi için  $\mathcal{E}=0$  kabulüyle beraber tesiste üretilen elektrik enerjisinin tamamının tekrar tesiste tüketildiği kabul edilirse  $x_{net} = 0$  olur ve elektrik güç oranının ( $\psi$ ) hesaplanabilmesi için Eş. 4.17 tekrar düzenlenir ve Eş. 4.50 elde edilir.

$$\psi^{S-I} = \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{as} [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \cdot [\eta_{gt}]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} \cdot [\eta_{gt}]} \quad (4.50)$$

Kükürt – iyot termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretim miktarının hesaplanabilmesi için aşağıda verilen Eş. 4.51 kullanılır.

$$\dot{m}_{H_2}^{S-I} = \eta_{hpf} \cdot P_{hpf}^{S-I} \cdot \mathcal{R}^{-1} \quad (4.51)$$

Eş. 4.51’de verilen  $\mathcal{R}^{-1}$  ifadesi 1kg hidrojen üretmek için gerekli olan enerjiyi ifade etmektedir ve bu değer 141,7 MJ/kg’dır.  $\eta_{hpf}$  ifadesi ise kükürt – iyot termokimyasal çevriminin verimini ifade etmektedir. Çevrimin veriminin belirlenebilmesi için Şekil 4.11’den faydalanılmıştır. S-I termokimyasal çevrimi 900 °C’de gerçekleştiği için grafikte bu değere karşılık gelen 0,53’tür.

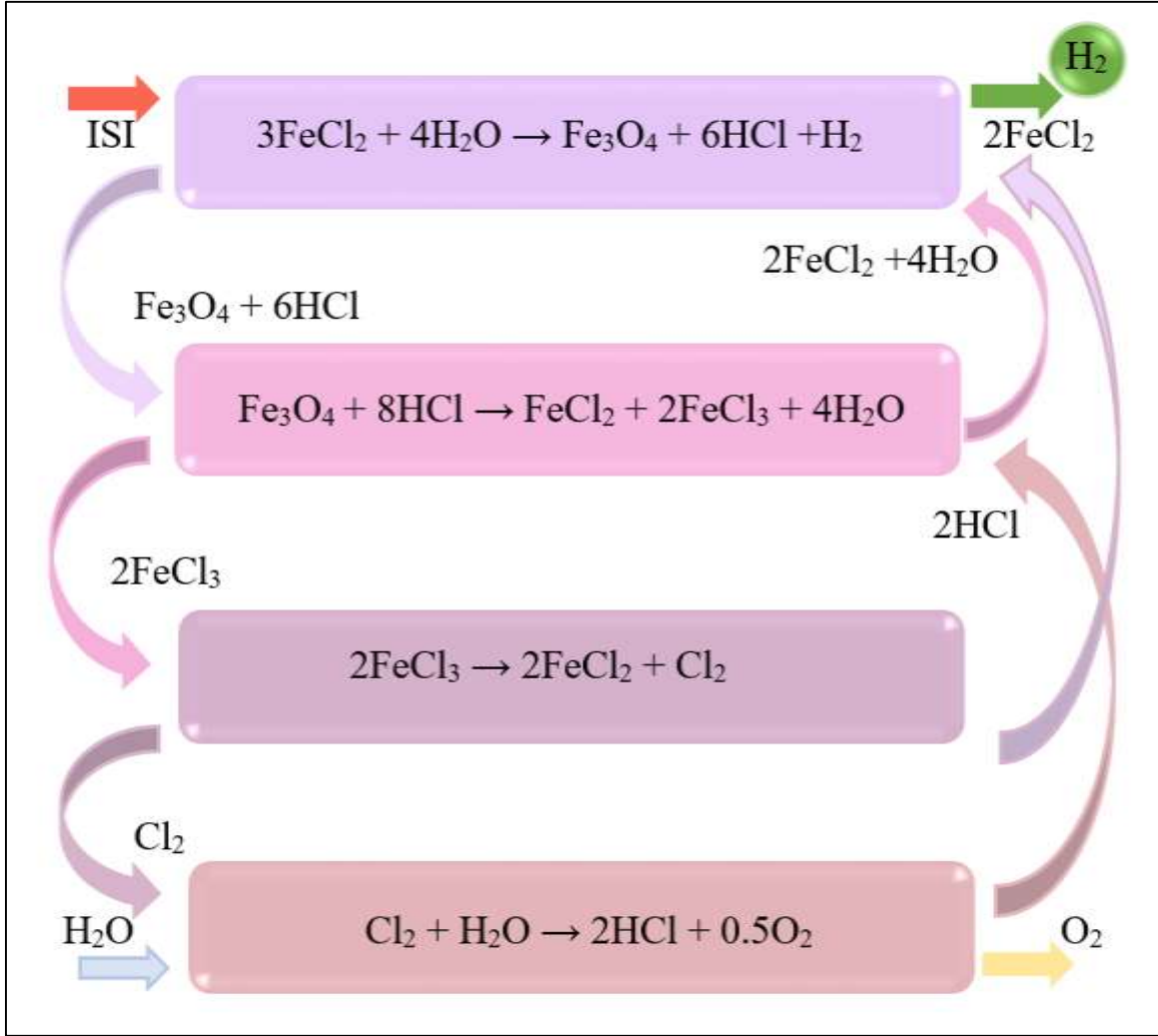


Şekil 4.11. Kükürt – iyot termokimyasal çevriminin tahmini verim grafiği [62]

#### 4.2.4. Demir-klor (Fe-Cl) döngülü termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi

Çevre kirliliği, enerjiye olan tabin artması ve yaşanan enerji krizi gibi nedeler alternatif enerji arayışını hızlandırmıştır. En iyi alternatif enerji olarak günümüzde hidrojen ( $H_2$ ) görülmektedir. Temiz ve sürdürülebilir enerji kaynağı olarak hidrojenin üretimi için farklı yöntemler araştırılmış hatta bunlardan bir kısmı hayata geçirilmiştir. Bu alternatif hidrojen üretim yöntemleri yukarıda anlatılan HTE, SMR ve S-I döngüsü gibi çevrimlerdir. Bu alternatif hidrojen üretim yöntemlerinden biride demir – klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrimidir. Fe-Cl termokimyasal çevriminin kullanılmasında bazı önemli avantajları vardır. Bunlar Fe-Cl termokimyasal çevriminde kullanılan malzemelerin kolaylıkla bulunabilir olması, bu malzemelerin fiyatlarının ucuz olması ve kimyasal özelliklerinin iyi biliniyor olmasıdır [63].

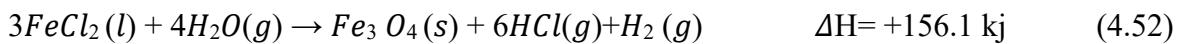
Demir – klorür çevrimi için birkaç farklı çevrim bulunmaktadır. Bu çalışmada 4 adımlı Fe-Cl termokimyasal çevrimi incelemiştir. Şekil 4.12’de Fe-Cl termokimyasal çevrimin şematik görünümü verilmiştir.



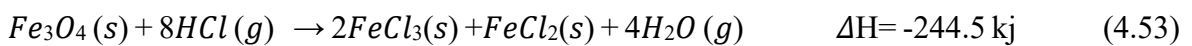
Şekil 4.12. Demir- klor termokimyasal çevrimine genel bakış

Demir - klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrim 4 farklı kimyasal reaksiyondan meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlardan ilki hidroliz reaksiyonu, ikincisi klorlama reaksiyonu, üçüncüsü termal ayrıştırma reaksiyonu ve son adım ise ters deakon reaksiyonu olarak adlandırılmaktadır ve bunlar aşağıda Eş. (4.52) – (4.55) verilmiştir [64].

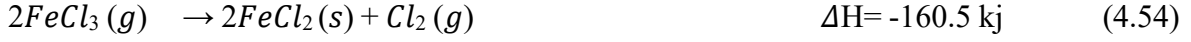
#### 1. Hidroliz Reaksiyonu



#### 2. Klorlama Reaksiyonu



### 3. Termal Ayrıştırma Reaksiyonu



### 4. Ters Deakon Reaksiyonu

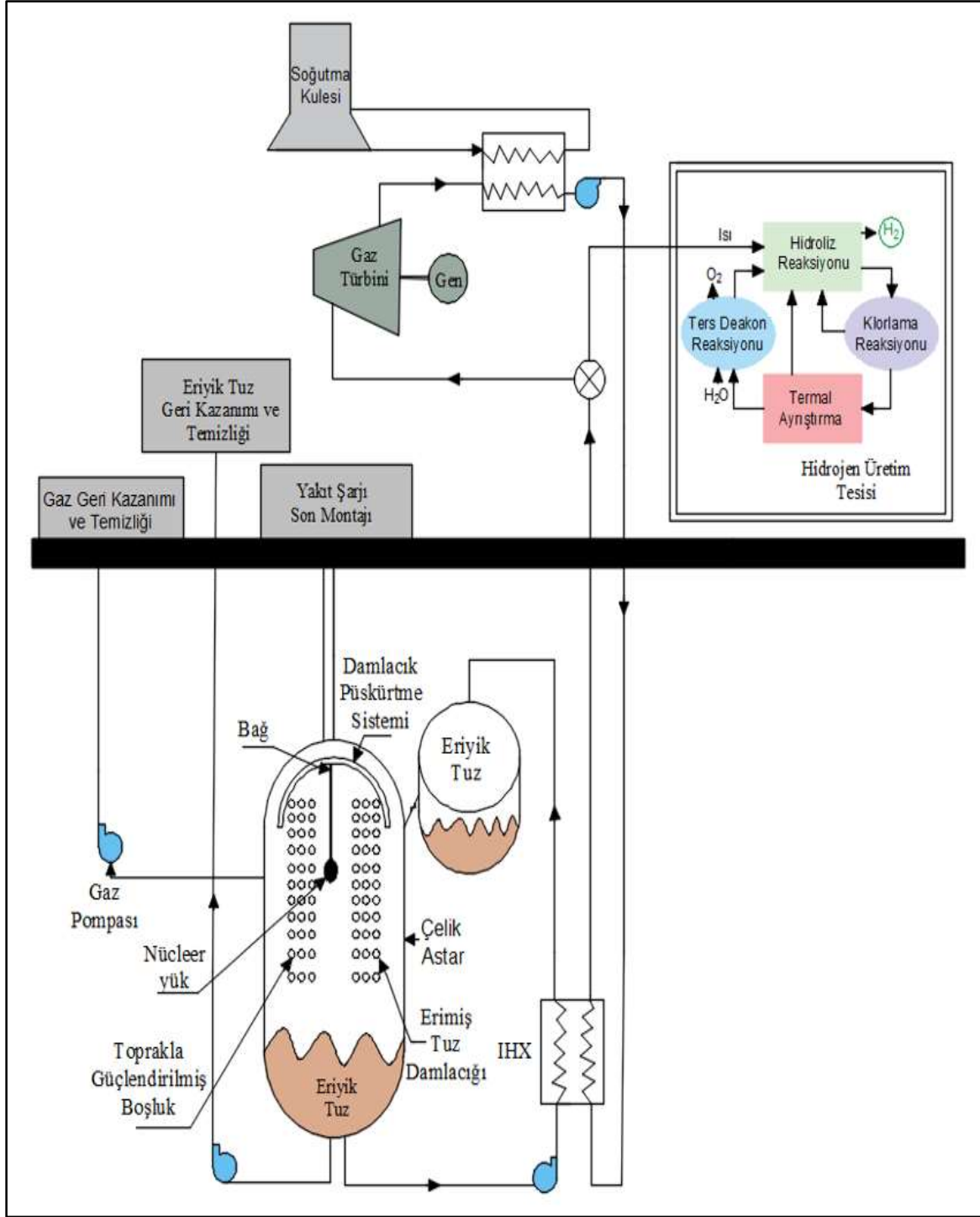


Eş. 4.52 verilen hidroliz reaksiyonu demir klor termokimyasal çevrimin ilk adımı endotermik bir reaksiyon olan Hidroliz adıdır ve bu adımda hidrojen (H<sub>2</sub>) üretilmektedir. demir(II) klorür (FeCl<sub>2</sub>) likit fazlı olup gaz fazındaki su (H<sub>2</sub>O) ile reaksiyona girip, manyetit olarak adlandırılan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>'ü katı fazında ve hidroklorürü (HCl) gaz fazında ve yine gaz fazında hidrojeni (H<sub>2</sub>) üretilir.

Eş. 4.53 verilen ikinci adım ekzotermik bir reaksiyon olan klorlama reaksiyonu adıdır. Katı fazda olan manyetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) gaz fazındaki hidroklorür (HCl) ile tepkimeye girer, bu tepkime esnasında demir cevheri içerisinde hidroklorik asit çözülür. Tepkime sonucunda katı fazında demir(II) klorür (FeCl<sub>2</sub>) ile demir(III) klorür (FeCl<sub>3</sub>) ve gaz fazında su (H<sub>2</sub>O) oluşur.

Eş. 4.54 termal ayrıştırma reaksiyonu verilmiştir. Reaksiyonun isminden de anlaşılacağı üzere demir (III) klorür (FeCl<sub>3</sub>) reaksiyonu üzerine ısı uygulanması yöntemi iki ayrı bileşiğe ayrılmış ekzotermik bir reaksiyondur. Katı fazda bulunan demir (III) klorür (FeCl<sub>3</sub>) reaksiyonu katı fazında demir (II) klorür (FeCl<sub>2</sub>) ve gaz fazında klorür (Cl<sub>2</sub>) oluşturur.

Eş. 4.55 ise ters deakon reaksiyonudur. Son adım da klorür (Cl<sub>2</sub>) ve su (H<sub>2</sub>O) tepkimeye girerek gaz fazında hidroklorür (HCl) ve oksijen (O<sub>2</sub>) oluşturur. Endotermik bir reaksiyondur. Reaksiyona girdi olarak sadece su girmektedir ve hidrojen ve oksijen çıktı olarak alınmaktadır. Diğer reaksiyon elementleri döngü içerisinde çevrimi gerçekleştirmektedir. Aşağıda Şekil 4.13'te PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş Fe-Cl termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretim tesisi verilmiştir [26].



Şekil 4.13. PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş Fe-Cl yöntemi ile hidrojen akış şeması [26, 38-40]

PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş Fe-Cl termokimyasal yöntemiyle hidrojen üretim miktarının incelenmesi bu test çalışması kapsamında yapılan ikinci çalışmadır. Bu çalışmada bazı parametreler belirlenmiştir. PACER füzyon reaktörünün sıvı jetlerinin bulunduğu erimiş tuz bölgesi hacmi %25 (erimiş tuz + nükleer yakıt) + %75 boşluk olarak

belirlenmiştir. %25 erimiş tuz + nükleer yakıt karışımında ise hem erimiş tuzun parametreleri hem de kullanılan nükleer yakıtın parametrelerinin hidrojen üretim miktarı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yakıt olarak UF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub> ve ThF<sub>4</sub>, erimiş tuz olarak Filibe (Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>) kullanılmıştır. Bunların oranları ise; %2 UF<sub>4</sub> +% 98 Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, %6 UF<sub>4</sub> +%94 Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, %12 UF<sub>4</sub> +% 88Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, % 2ThF<sub>4</sub> +% 98Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, % 6ThF<sub>4</sub> +% 94Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, % 12 ThF<sub>4</sub> +% 88Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, % 2 (UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>) +% 98Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, % 6 (UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>) +% 94Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub> ve % 12 (UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>) +% 88Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub> olarak belirlenmiştir. Bu dokuz oran üzerinde daha sonra lityum zenginleştirmenin (<sup>6</sup>Li) etkisi incelenmiştir. <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranları ise % 7,5 (doğal lityum), %20, %40, %60, %80 ve %90 olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin tamamının hidrojen üretimi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Şekil 4.13 incelendiğinde Fe-Cl termokimyasal çevrimiyle hidrojen üretim tesisinin sadece ısı enerjisine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Elektrik enerjisine ihtiyaç olmadığından güç orantı sabiti sıfır ( $\mathcal{E}=0$ ) olarak kabul edilir. Eş. 4.18 düzenlenerek Fe-Cl termokimyasal çevriminin ihtiyaç duyduğu güç formülü  $\mathcal{E}=0$ 'a göre düzenlenerek aşağıda verilen Eş. 4.56 elde edilir.

$$P_{hpf}^{Fe-Cl} = (1 - \psi)\eta_{ihx} \cdot P_f [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \quad (4.56)$$

Fe-Cl termokimyasal çevrimi ile hidrojenin üretimi için tesiste üretilen tüm elektrik enerjisinin tesiste kullanıldığı varsayımı  $x_{net} = 0$  ile elektriksel güç oranı aşağıda Eş. 4.57 de verilmiştir.

$$\psi^{S-I} = \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \cdot [\eta_{gt}]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} \cdot [\eta_{gt}]} \quad (4.50)$$

Demir – klor termokimyasal döngüsüyle üretilen toplam hidrojen akış oranı ( $\dot{m}_{h_2-tot}$ ) aşağıda verilen Eş. (4.51)- (4.64) kütle akış oranı denklemleriyle hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{FeCl_2} = \frac{P_{hpf}}{q_{tot}} \quad (4.51)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{4}{3} \dot{m}_{FeCl_2} \frac{u_{H_2O}}{u_{FeCl_2}} \quad (4.52)$$

$$\dot{m}_{Fe_3O_4} = \frac{1}{3} \dot{m}_{FeCl_2} \frac{u_{Fe_3O_4}}{u_{FeCl_2}} \eta_{adım-I} \quad (4.53)$$

$$\dot{m}_{HCl} = 2 \dot{m}_{FeCl_2} \frac{u_{HCl}}{u_{FeCl_2}} \eta_{adım-I} \quad (4.54)$$

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{1}{3} \dot{m}_{FeCl_2} \frac{u_{H_2}}{u_{FeCl_2}} \eta_{adım-I} \quad (4.55)$$

$$\dot{m}_{HCl} = 8 \dot{m}_{Fe_3O_4} \frac{u_{HCl}}{u_{Fe_3O_4}} \quad (4.56)$$

$$\dot{m}_{FeCl_2} = \dot{m}_{Fe_3O_4} \frac{u_{FeCl_2}}{u_{Fe_3O_4}} \eta_{adım-II} \quad (4.57)$$

$$\dot{m}_{FeCl_3} = 2 \dot{m}_{Fe_3O_4} \frac{u_{FeCl_3}}{u_{Fe_3O_4}} \eta_{adım-II} \quad (4.58)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 4 \dot{m}_{Fe_3O_4} \frac{u_{H_2O}}{u_{Fe_3O_4}} \eta_{adım-II} \quad (4.59)$$

$$\dot{m}_{FeCl_2} = \dot{m}_{FeCl_3} \frac{u_{FeCl_2}}{u_{FeCl_3}} \eta_{adım-III} \quad (4.60)$$

$$\dot{m}_{Cl_2} = 0.5 \dot{m}_{FeCl_3} \frac{u_{Cl_2}}{u_{FeCl_3}} \eta_{adım-III} \quad (4.61)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 2 \dot{m}_{Cl_2} \frac{u_{H_2O}}{u_{Cl_2}} \eta_{adım-IV} \quad (4.62)$$

$$\dot{m}_{HCl} = 2 \dot{m}_{Cl_2} \frac{u_{HCl}}{u_{Cl_2}} \eta_{adım-IV} \quad (4.63)$$

$$\dot{m}_{O_2} = \dot{m}_{Cl_2} \frac{u_{O_2}}{u_{Cl_2}} \eta_{adım-IV} \quad (4.64)$$

Burada verilen  $\dot{m}$  kütleli debiyi,  $u$  molar kütleyi ifade etmektedir.  $\eta_{adım-I}$ ,  $\eta_{adım-II}$ ,  $\eta_{adım-III}$ ,  $\eta_{adım-IV}$  Fe-Cl termokimyasal çevriminin verim değerini ifade etmektedir ve 0,90 olarak kabul edilmiştir.

Fe-Cl termokimyasal çevrimin toplam reaksiyon enerjisinin hesaplanabilmesi için  $q_{tot}$  değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için çevrimin kinetik ve potansiyel enerjilerindeki değişimler göz ardı edilerek enerjinin korunumu kanuna göre aşağıda Eş. 4.65'te verilen denklem kullanılmıştır [26, 65].

$$\dot{E}_g = \dot{E}_ç \quad (4.65)$$

Eş. 4.65'te verilen  $\dot{E}_g$ , sisteme giren enerjiyi,  $\dot{E}_ç$  sistemden çıkan enerjiyi ifade eder. Bu enerji denkleminde göre Fe-Cl termokimyasal çevriminin gerçekleşmesi için gerekli olan ısı (Q) miktarı aşağıda verilen Eş. (4.66) – (4.68) ile hesaplanır [26, 65].

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum n_{in} H_{in} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum n_{out} H_{out} \quad (4.66)$$

$$Q = \sum n_{out} (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}_o)_{out} - \sum n_{in} (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}_o)_{in} \quad (4.67)$$

$$\bar{h}(T) - \bar{h}_o = AT + B \frac{T^2}{2} + C \frac{T^3}{3} + D \frac{T^4}{4} - \frac{E}{T} + F - H \quad (4.68)$$

Burada verilen  $\dot{W}$  (kW) çevrim tarafından gerçekleşen işi,  $\bar{h}$  (kJ/mol) entalpiyi,  $\bar{h}_f^o$  (kJ/mol) oluşum entalpisini ve  $\bar{h}_o$  (kJ/mol) standart entalpi ifade etmektedir. Reaksiyonun her bir adımının entalpi değerinin hesaplanabilmesi için Shomate katsayılarından yararlanılmıştır. Eş. 4.68'de A, B, C, D, E, F ve H değerleri Fe-Cl termokimyasal denkleminin gerçekleşmesinde kullanılan elementlerin belirli hal ve sıcaklıktaki değerlerinin ve oluşum entalpisinin hesaplanabilmesi için kullanılan döngü sabitleridir. Fe-Cl termokimyasal çevrimine ait döngü sabitleri aşağıda Çizelge 4.3'de verilmiştir [26, 66]

Çizelge 4.3. Bileşiklerin Oluşum Entalpileri ve Shomete hesaplaması için gerekli olan Fe-Cl döngü sabitleri [26, 66]

Bileşik	Sıcaklık (K)	$\bar{h}_f^\circ$ (kJ/mol)	A	B	C	D	E	F	H
FeCl <sub>2</sub> (l)	1198	-311,34	102,1733	-1,07882E-08	8,4244E-09	-2,0967E-09	-1,8464E-10	-341,799	-311,337
FeCl <sub>3</sub> (s)	398 - 698	-341,83	73,66852	22,5409	-10,12172	1,4662	-0,252648	-365,564	-341,833
H <sub>2</sub> O (g)	1198	-241,83	30,0920	6,832514	6,793435	-2,53448	0,082139	-250,881	-241,8264
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	1198	-1120,89	200,832	1,58644E-07	-6,662E-08	9,45245E-09	3,18602E-08	-1174,14	-1120,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	398	-1120,89	104,2096	178,5108	10,6151	1,132534	-0,994202	-1163,34	-1120,89
HCl (g)	398 - 1198	-92,31	32,12392	-13,45805	19,86852	-6,853936	-0,049672	-101,6206	-92,31201
H <sub>2</sub> (g)	1198	0	18,563083	12,257357	-2,859786	0,268238	1,97788	-1,147438	0
FeCl <sub>3</sub> (s)	398	-399,41	979,1104	-4704,364	9295,174	-6246,963	-12,49577	-593,977	-399,406
Cl <sub>2</sub> (g)	698	0	33,0506	12,2294	-12,0651	4,38533	-0,159494	-10,8348	0
Cl <sub>2</sub> (g)	1198	0	42,6773	-5,00957	1,904621	-0,165641	-2,09848	-17,2898	0
O <sub>2</sub> (g)	1198	0	30,03235	8,772972	-3,988133	0,788313	-0,741599	-11,3247	0

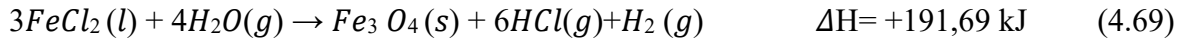
Çizelge 4.3 incelendiğinde 398K’de suyun (H<sub>2</sub>O) gaz fazı ve 698K’de demir III klorürün (FeCl<sub>3</sub>) gaz fazının çizelgede olmadığı görülmektedir. Çünkü bu iki bileşiğin belirtilen faz ve sıcaklık aralığı shomate denklemleri mevcut değildir. Bu yüzden bu iki bileşiğin entalpi değerleri ayrıca hesaplanmıştır ve Çizelge 4.4’te verilmiştir [26, 65, 67].

Çizelge 4.4. H<sub>2</sub>O ve FeCl<sub>3</sub> bileşiklerinin entalpi değerleri [26, 65, 66]

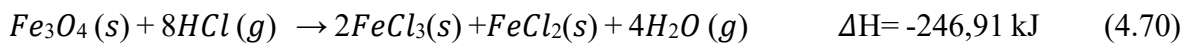
Bileşik	Bileşiğin Sıcaklığı (K)	Bileşiğin Fazı	Entalpi Değeri (ΔH)
H <sub>2</sub> O	398 K	Gaz	-238,59592 kJ
FeCl <sub>3</sub>	698 K	Gaz	-217,5502 kJ

Shomate denklemleri sonucunda yapılan hesaplamalarla Fe-Cl termokimyasal denkleminin entalpi değerleri Eş. (4.69) – (4.72) de verilmiştir.

#### 1. Hidroliz Reaksiyonu



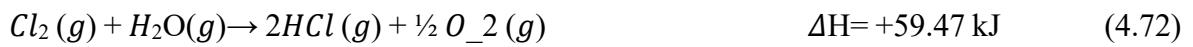
#### 2. Klorlama Reaksiyonu



#### 3. Termal Ayrıştırma Reaksiyonu



#### 4. Ters Deakon Reaksiyonu



Kütlesel debi hesaplaması Fe-Cl termokimyasal reaksiyonunda FeCl<sub>2</sub>’de kütlesel debisinin hesaplanmasıyla başlamıştır. FeCl<sub>2</sub>’ün hesaplanabilmesi için toplam reaksiyon enerjisinin

bilinmesi gerekmektedir. Shomate eşitliği kullanılan Fe-Cl termokimyasal çevrimi çalışmasının hesaplamalarında kullanılan  $q_{tot} = 1.30$  MJ/kg olarak hesaplanmıştır.

## 5. HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Bu tez kapsamında iki ayrı çalışma yapılmıştır. İlk çalışmada modifiye edilmiş PACER füzyon reaktörünün iki farklı mod için nötronik performanslarının hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Hidrojen üretim yöntemi olarak üç farklı metot belirlenmiştir. Bu metotlar; buhar metal reformasyonu (SMR), kükürt iyot termokimyasal çevrimi (S-I) ve yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi (HTE)'dir. Bu üç hidrojen üretim yöntemi için gerekli olan ısı ve elektrik enerjisi Şekil 3.2'de verilen PACER füzyon reaktöründen elde edilmiştir. PACER füzyon reaktörünün nötronik analizlerinin yapılabilmesi için ENDF-V nötron veri kütüphanesine sahip Monte Carlo N Parçacık kodu (MCNP) [70] nükleer kod programı kullanılmıştır. Burada yapılan nötronik analizler sonucunda trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) elde edilmiştir. Elde edilen M değeri ile PACER füzyon reaktörünün bu üç hidrojen üretim yöntemi ile hidrojen üretim miktarları hesaplanmıştır. Hidrojen üretim potansiyelinin hesaplanabilmesi için termal güç ( $P_{hpf}$ ), termal güç oranı ( $1-\psi$ ) ve hidrojen üretim miktarı ( $\dot{m}$ ) değerleri elde edilmiştir.

İkinci çalışmada hidrojen üretim yöntemi olarak demir – klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrimi tercih edilmiştir. Fe-Cl termokimyasal çevriminin ihtiyaç duyduğu ısı enerjisi PACER füzyon reaktöründen elde edilmiştir. Nötronik analizlerle trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) değeri elde edilmiştir. Fe-Cl termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretim tesisinde hidrojen üretim miktarının hesaplanabilmesi için termal güç ( $P_{hpf}$ ), termal güç oranı ( $1-\psi$ ) ve hidrojen üretim miktarı ( $\dot{m}$ ) değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Ayrıca termal gücün hesaplanabilmesi için gerekli olan  $q_{tot}$  değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada  $q_{tot}$  değerinin hesaplanmasında Shomate eşitliğinden yararlanılmıştır.

### 5.1. Monte Carlo Hesaplama Yöntemi

Monte Carlo yöntemi 1930'lu yıllarda ilk kez Los Alamos laboratuvarlarında (LAL) çalışan bilim insanlarının nükleer silah geliştirmek için yaptıkları çalışmalar neticesinde ortaya çıkmıştır. Monte Carlo yönteminin temel amacı rastgele sayıların kullanımı ile istatistiksel ve deneysel problemlerin çözümünü yaklaşık olarak hesaplamasıdır. 1940'lara gelindiğinde Monte Carlo yöntemi daha da geliştirilerek John Von Neumann ve Stanislaw Ulam

tarafından modern tekniklerinde eklenmesi ile Monte Carlo Simülasyon adını almıştır [68, 69].

Los Alamos ulusal laboratuvarları tarafından Monte Carlo yöntemi geliştirilerek Monte Carlo N parçacık kodlu nükleer kod programı elde edilmiştir. Monte Carlo yöntemi foton, nötron, elektron transport problemlerinin çözümünden nükleer tıp, radyasyon kalkını, nükleer güvenlik ve fisyon - füzyon reaktör tasarımı gibi birçok alanda yapılan çalışmalarda kullanılmaktadır [70].

Nötronik analizler döngü başına 100 000 nötron (nps) ile gerçekleştirilmiştir. Monte Carlo yöntemi ile PACER füzyon reaktöründe yapılan çalışmalar sonucunda nötronik veriler elde edilmektedir. Bu nötronik veriler trityum üretim oranı (TBR) ve Enerji çoğaltım (M) faktörüdür.

## 5.2. Hidrojen Üretiminin İncelenmesi

Bu tez kapsamında iki farklı çalışma yapılmıştır. İlk çalışmada modifiye edilen PACER füzyon reaktöründe bölüm 4.2'de verilen buhar – metan reformasyonu (SMR), kükürt iyot (S-I) çevrimi ve yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) yöntemleri ile hidrojen üretim miktarı incelenirken ikinci çalışmada demir – klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrimiyle hidrojen üretim miktarı incelenmiştir. Microsoft Excel 2008 programı ile nötronik analizler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak hidrojen üretim analizleri yapılmıştır. Nötronik analizler sonucunda elde edilen M değerine bağlı olarak termal güç ( $P_{hpf}$ ), termal güç oranı ( $1-\psi$ ) ve hidrojen üretim miktarı ( $\dot{m}$ ) hesaplanabilmektedir.

## 6. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Modifiye edilen PACER füzyon reaktörünün nötronik analizleri Monte Carlo yöntemi yardımıyla yapılmıştır. PACER füzyon reaktörü için belirlenen iki farklı parametre sonucunda Monte Carlo yöntemi yardımıyla trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) statik olarak hesaplanmıştır. İlk çalışma için buhar metan reformasyonu (SMR), kükürt - iyot termokimyasal çevrimi (S-I) ve yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) hidrojen üretim yöntemleri için termal güç ve hidrojen üretim miktarları hesaplanmıştır. Aynı şekilde ikinci çalışmada demir - klorür (Fe-Cl) termokimyasal çevrimi için hidrojen üretim miktarlarının hesaplanabilmesi için tesisin ihtiyaç duyduğu termal güç ( $P_{hpf}$ ) ve hidrojen üretim miktarı ( $\dot{m}$ ) hesaplanmıştır. Sonuçlar her iki çalışmada da ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

### 6.1. Nötronik Analizler

PACER füzyon reaktörüne ait nötronik analizler iki farklı çalışma için statik olarak incelenmiş ve grafikler halinde verilmiştir.

#### 6.1.1. Trityum üretim oranı (TBR)

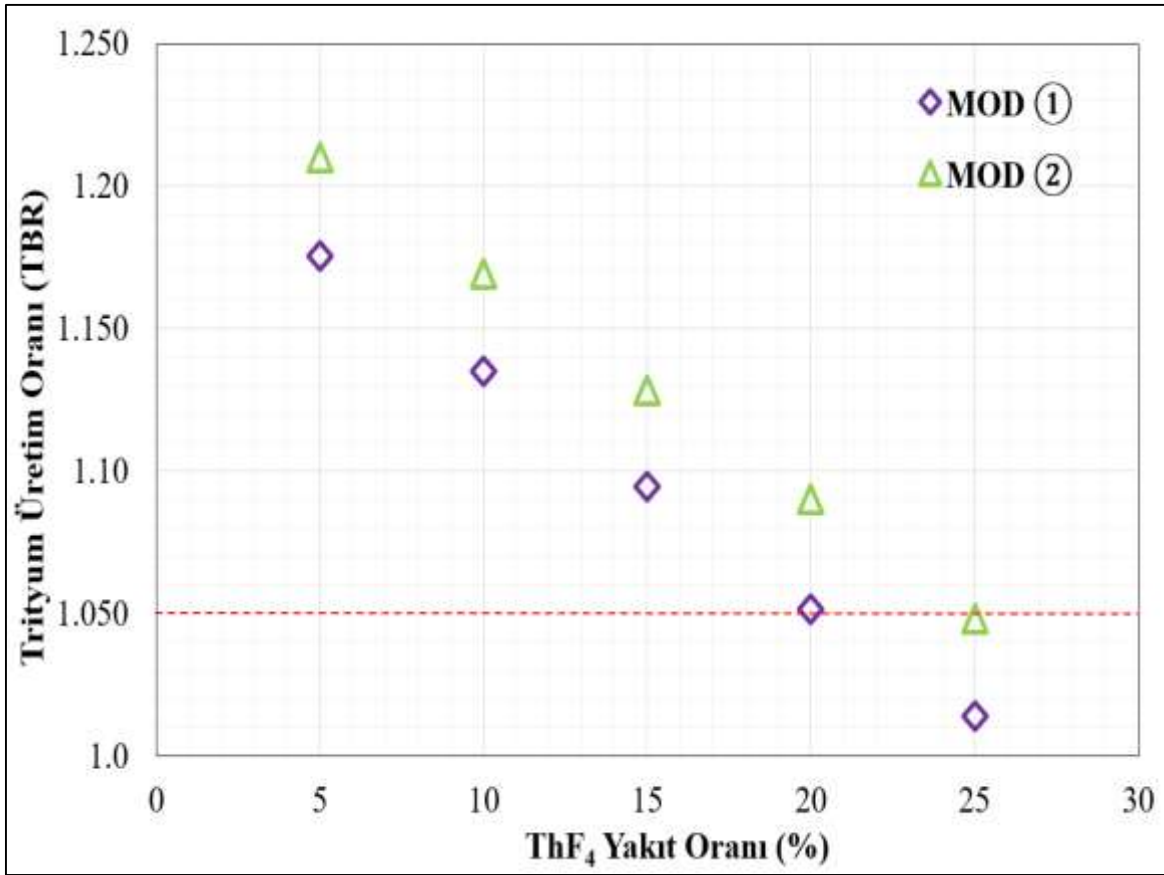
PACER füzyon reaktöründe füzyon reaksiyonunun devam edebilmesi için TBR değerinin 1,05'ten ( $TBR > 1,05$ ) büyük olması gerekmektedir. Trityum üretiminin gerçekleşebilmesi için  ${}^6\text{Li}$  ve  ${}^7\text{Li}$  izotoplarının düşük ve yüksek enerjili nötronlarla reaksiyona girmesi gerekmektedir [ 71, 72]. Aşağıda Eş. (6.1) ve (6.2)'de verilmiştir.



Eş. (6.1) ve (6.2) Lityum izotoplarının nötronlarla reaksiyona girmesi sonucunda oluşan  $\text{T}_6$  ve  $\text{T}_7$ 'nin toplamları füzyon reaksiyonunun devam edebilirliğini gösteren trityum üretim oranını vermektedir. Toplam trityum oranı aşağıda Eş. 6.3'te verilmiştir.

$$TBR = T_6 + T_7 \quad (6.3)$$

Bu tez çalışmasında yapılan ilk çalışmanın TBR değeri Şekil 6.1’de verilmiştir. TBR değerinin belirlenmesi için PACER füzyon reaktörü soğutucu bölgesinde kullanılan soğutucu akışkan LiF (lityum florür) içerisine farklı oranlarda nükleer yakıt ThF<sub>4</sub> karıştırılmıştır. Bu karışım iki farklı soğutucu bölge haciminde incelenmiştir ve bu hacimler mod ① ve mod ② olarak ifade edilmektedir.

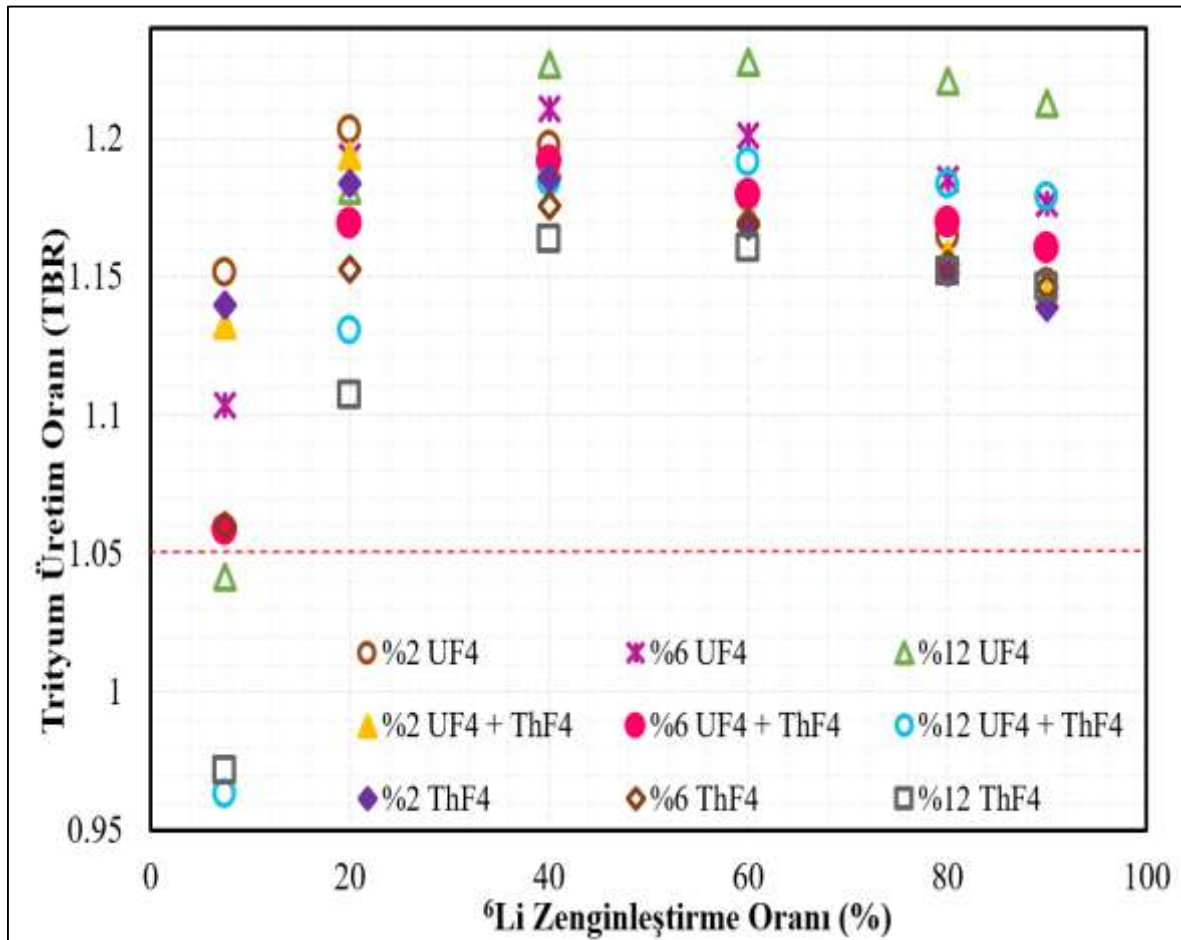


Şekil 6.1. Trityum üretiminin yakıt oranına göre değişimi

TBR değerinin füzyon reaksiyonunu devam ettirebilmesi için eşik değer olan 1,05’te büyük olması gerekmektedir ve Şekil 6.1’de bu durum kırmızı kesik çizgi ile işaretlenmiştir. Şekil 6.1’de mod ① ve mod ② incelendiğinde soğutucu akışkan LiF içerisine %25 ThF<sub>4</sub>’ün karıştırılarak reaksiyona girmesi durumunda TBR<1,05 olmaktadır. Buda reaksiyonun kendi kendine devam edemeyeceği anlamına gelmektedir. Mod ① LiF + %20 ThF<sub>4</sub>’ün TBR değeri tam sınırdadır. Buda reaksiyonun kısa bir süre içerisinde yeterli TBR değerini üretemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu üç ThF<sub>4</sub> değeri dışında kalan diğer LiF +

ThF<sub>4</sub> oranlarının tamamında TBR değeri 1,05'in üzerindedir. Hatta Şekil 6.1 dikkatli bir şekilde incelenirse LiF içerisine karıştırılan ThF<sub>4</sub> oranı azaldıkça TBR değeri artmaktadır. Neticede ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtının trityum üretim oranının (TBR) az oluşu görülmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan ikinci çalışmanın trityum üretim oranı (TBR) Eş. 6.2'de verilmiştir.

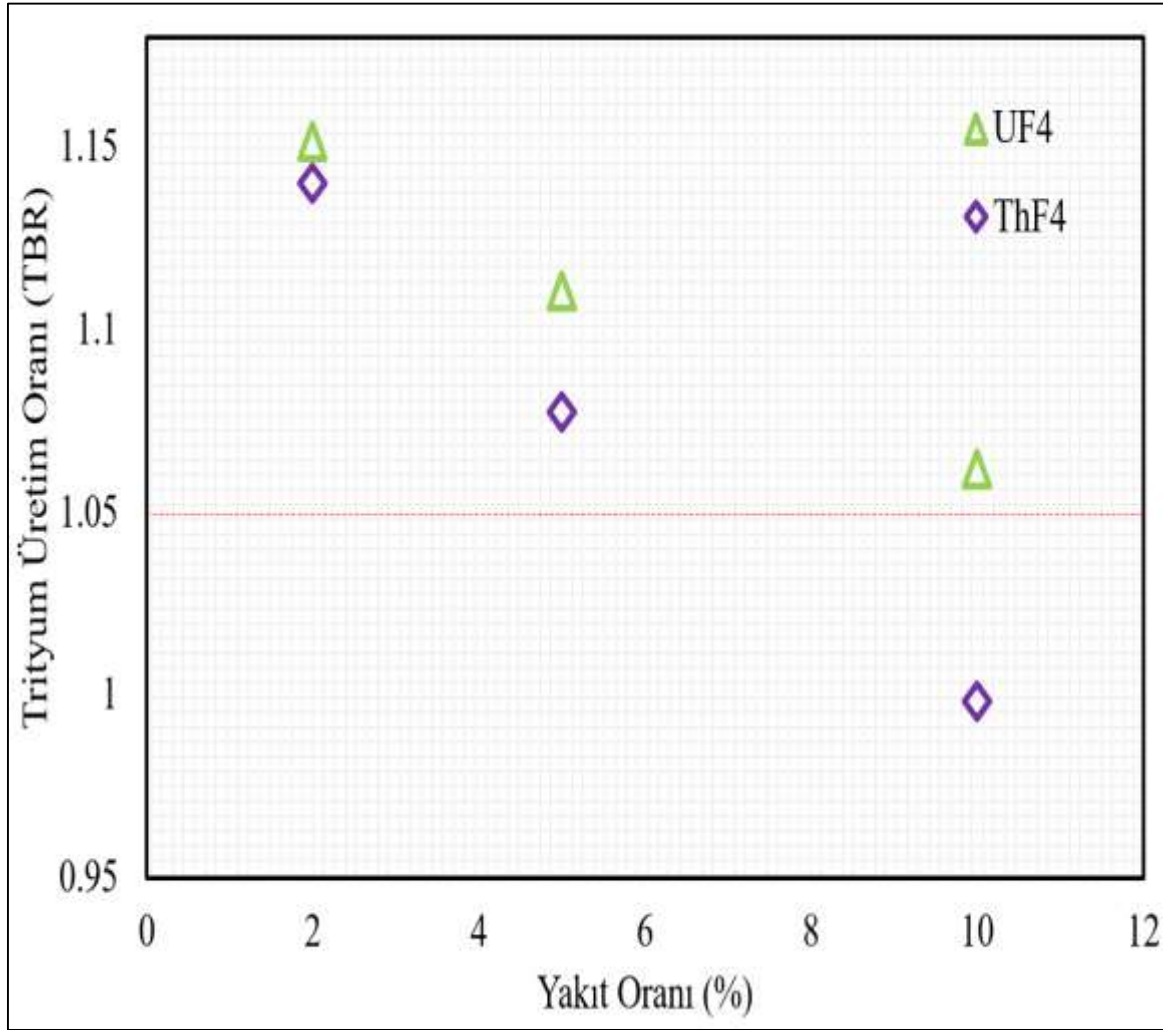


Şekil 6.2. Trityum üretiminin lityum zenginleştirme oranına göre değişimi

TBR değerinin hesaplanabilmesi için PACER füzyon reaktöründe soğutucu akışkan olarak Flibe'ye (Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>) farklı oranlarda UF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub> ve ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtı karıştırılmıştır. Ayrıca soğutucu akışkanda kullanılan ve TBR hesaplamalarında etkili olan lityum izotopu <sup>6</sup>Li farklı oranlarda soğutucu akışkana karıştırılarak <sup>6</sup>Li zenginleştirmenin etkisi incelenmiştir. Şekil 6.2'de kırmızı kesik çizgi TBR= 1,05 yani sınır değeri ifade etmektedir ve bu çizginin altında kalan durumlarda reaksiyon kendi kendini devam ettiremez. Doğal lityum (% 7,5) kullanılan soğutucu akışkanı karıştırılan %12 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>, %12 ThF<sub>4</sub> ve %12

UF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranlarının TBR değeri 1,05'ten küçük olduğu için bu üç durum için reaksiyon kendi kendini devam ettiremez. Diğer karışım oranlarının tamamında TBR değeri 1,05'ten büyüktür. En iyi sonuç ise %60 <sup>6</sup>Li zenginleştirme kullanılan soğutucu akışkana %12 oranında UF<sub>4</sub> nükleer yakıt karıştırılmasıyla elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında HTE, S-I, SMR ve Fe-Cl yöntemlerinin karşılaştırılması için yapılan çalışmanın trityum üretim oranı (TBR) Eş. 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Trityum üretim oranının (TBR) nükleer yakıt oranlarına göre değişimi

Şekil 6.3 incelendiğinde soğutucu akışkan Flibe içerisine karıştırılan nükleer yakıt oranı arttıkça TBR değeri düşmüştür. Reaktörün kendi kendine devam ettirebilmesi için gerekli olan TRB değerinin 1,05'ten büyük olması gerekmektedir ve kırmızı kesik çizgi bu sınır

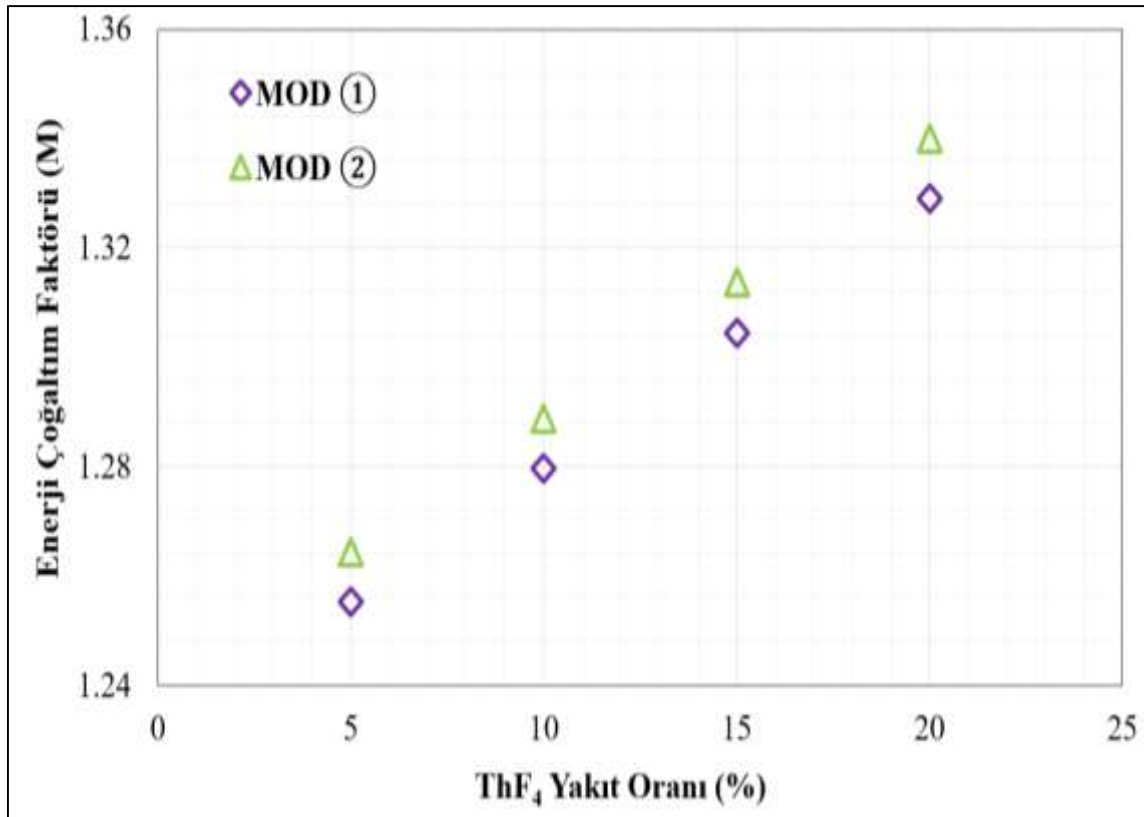
değere denk gelmektedir. Sadece soğutucu akışkana karıştırılan %10 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranında TBR değeri 1.05'ten küçüktür.

### 6.1.2. Enerji çoğaltım faktörü (M)

Fisyon reaksiyonu sonucunda artan fisil yakıt oranına bağlı olan enerji çoğaltım faktörü (M) reaktörden elde edilen enerji olarak tanımlanabilir. Aşağıda verilen Eş. 6.4 ile hesaplanır [35, 36, 73].

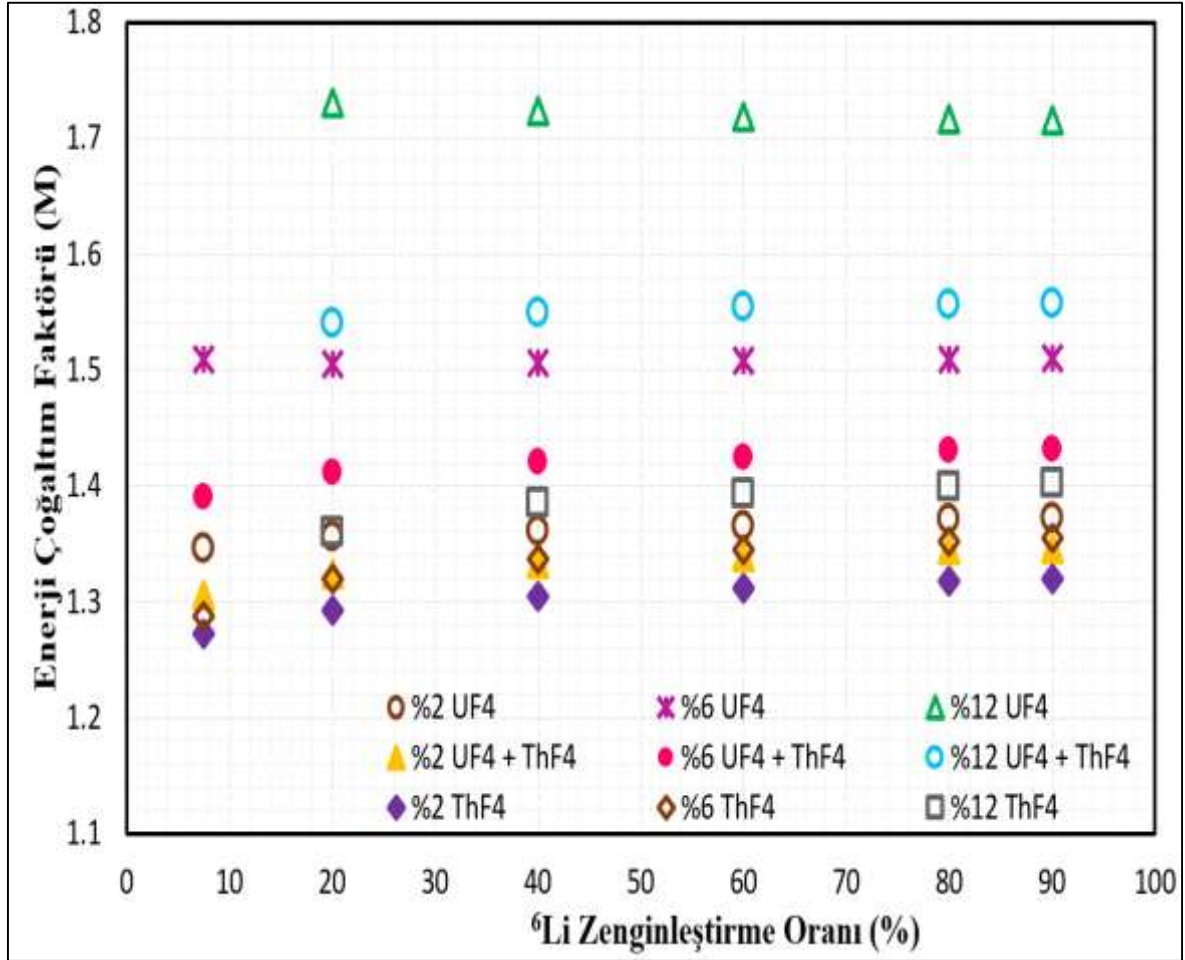
$$M = 1 + \frac{200 \text{ MeV} \cdot \langle \Phi \cdot \Sigma_f \rangle + 4,7484 \text{ MeV} \cdot T_6 - 2,467 \text{ MeV} \cdot T_7}{14,1 \text{ MeV}} \quad (6.4)$$

Eş. 6.4'te verilen 200MeV bir fisyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan enerjii, 4.7484MeV Eş. 6.1'de verilen T<sub>6</sub> üretimi sonucunda açığa çıkan enerjii, -2.467 Eş. 6.2'de verilen T<sub>7</sub> üretimi esnasında kaybolan enerjii ve 14.1Mev ise bir nötronun sahip olduğu enerjii ifade etmektedir.  $\langle \Phi \cdot \Sigma_f \rangle = \iint \Phi \cdot \Sigma_f dE dV$  değeri ise toplam integral fisyon oranını ifade etmektedir.



Şekil 6.4. Enerji çoğaltım faktörünün (M) yakıt oranına göre değişimi

Çalışma bire göre hesaplanan, mod ① ve mod ② değerleri kıyaslandığında mod ②'de M değerinin mod ①'e göre daha yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek M değeri mod ②'de %20 ThF<sub>4</sub> yakıt oranında elde edilmiştir. En düşük değer ise mod ①'de %5 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranında gerçekleştiği görülmektedir. Soğutucu akışkana karıştırılan ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtın fisil yakıt oranını arttırdığını ve bununla beraber M değerini de arttırdığı görülmektedir.

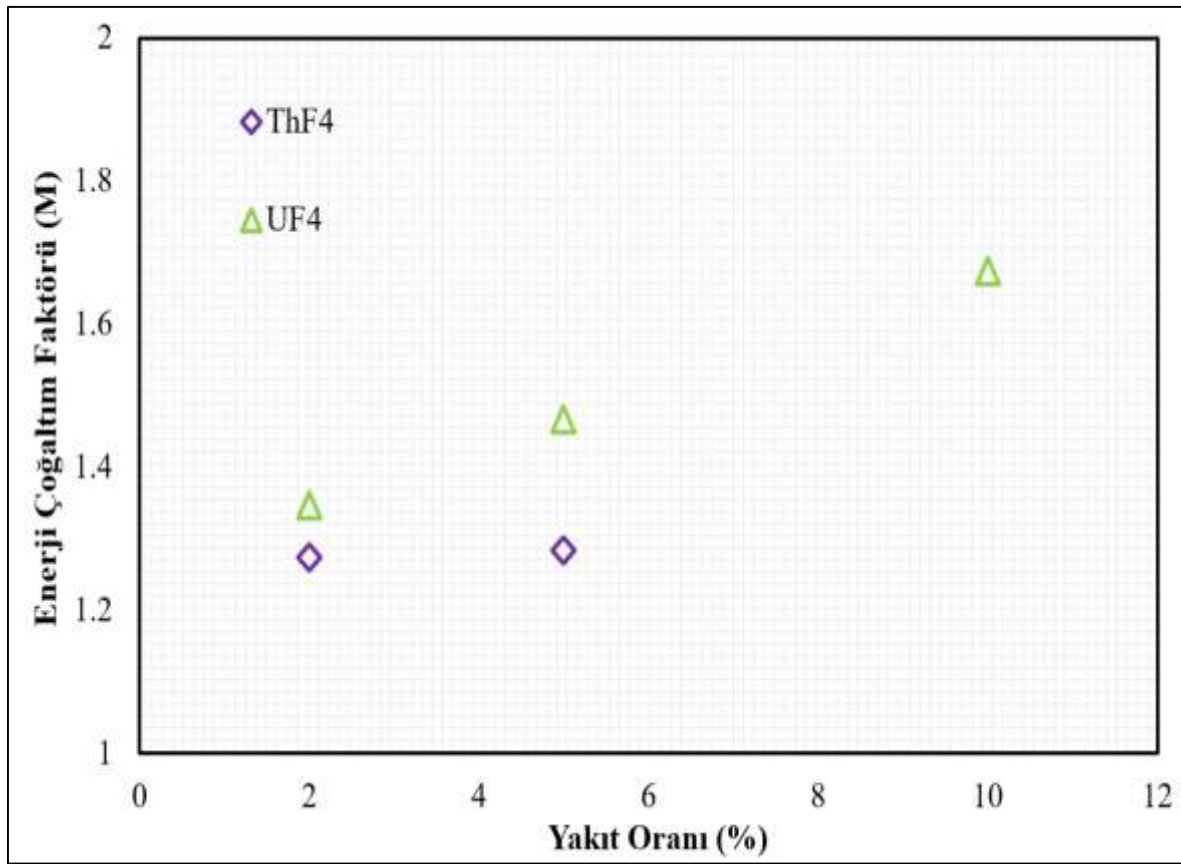


Şekil 6.5. Enerji çoğaltım faktörünün (M) <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına göre değişimi [26]

Çalışma ikinin verilerine göre elde edilen verilen Şekil 6.5'de verilmiştir. M değeri incelendiğinde soğutucu akışkana karıştırılan nükleer yakıt oranlarına göre en düşük değerlerin %2 ThF<sub>4</sub>'ten elde edildiği en yüksek değerlerin ise %12 UF<sub>4</sub>'ten elde edildiği görülmektedir. <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına bağlı olarak M değeri incelendiğinde ise <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranının artması M değerini arttırmıştır. %20 <sup>6</sup>Li zenginleştirmede kullanılan soğutucu akışkan da %12 UF<sub>4</sub> nükleer yakıt karıştırılarak elde edilen reaksiyon sonucunda

en yüksek M değeri ( $\sim 1,73$ ) elde edilmiştir. En düşük M değeri ( $\sim 1,27$ ) ise doğal  ${}^6\text{Li}$  (%7,5) kullanılan soğutucu akışkana %2  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıt karıştırılan reaksiyon sonucunda elde edilmiştir.

HTE, S-I, SMR ve Fe-Cl yöntemlerinin karşılaştırılması için yapılan çalışmanın enerji çoğaltım faktörünün (M) trityum üretim oranına (TBR) bağlı olarak değişimi Eş. 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Enerji çoğaltım faktörünün (M) nükleer yakıt oranlarına göre değişimi

Şekil 6.6 incelendiğinde soğutucu akışkana karıştırılan %10  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtının M değerinin olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi soğutucu akışkana karıştırılan %10  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtın reaktörün kendi kendini sürdürebilmesi için gerekli olan  $\text{TBR} > 1,05$  değerinin altında kalmasıdır. Yani  $\text{TBR} < 1,05$  değeri için herhangi bir M değerinden bahsedilemez.  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtının M değerleri  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtından elde edilen M değerinden %2 ve %5 yakıt oranlarında kıyaslandığında  $\text{UF}_4 > \text{ThF}_4$  ilişkisi vardır. En yüksek

M değeri ise soğutucu akışkana karıştırılan %10 UF<sub>4</sub> nükleer yakıtından elde edilmiştir ve bu değer ~1,67'dir.

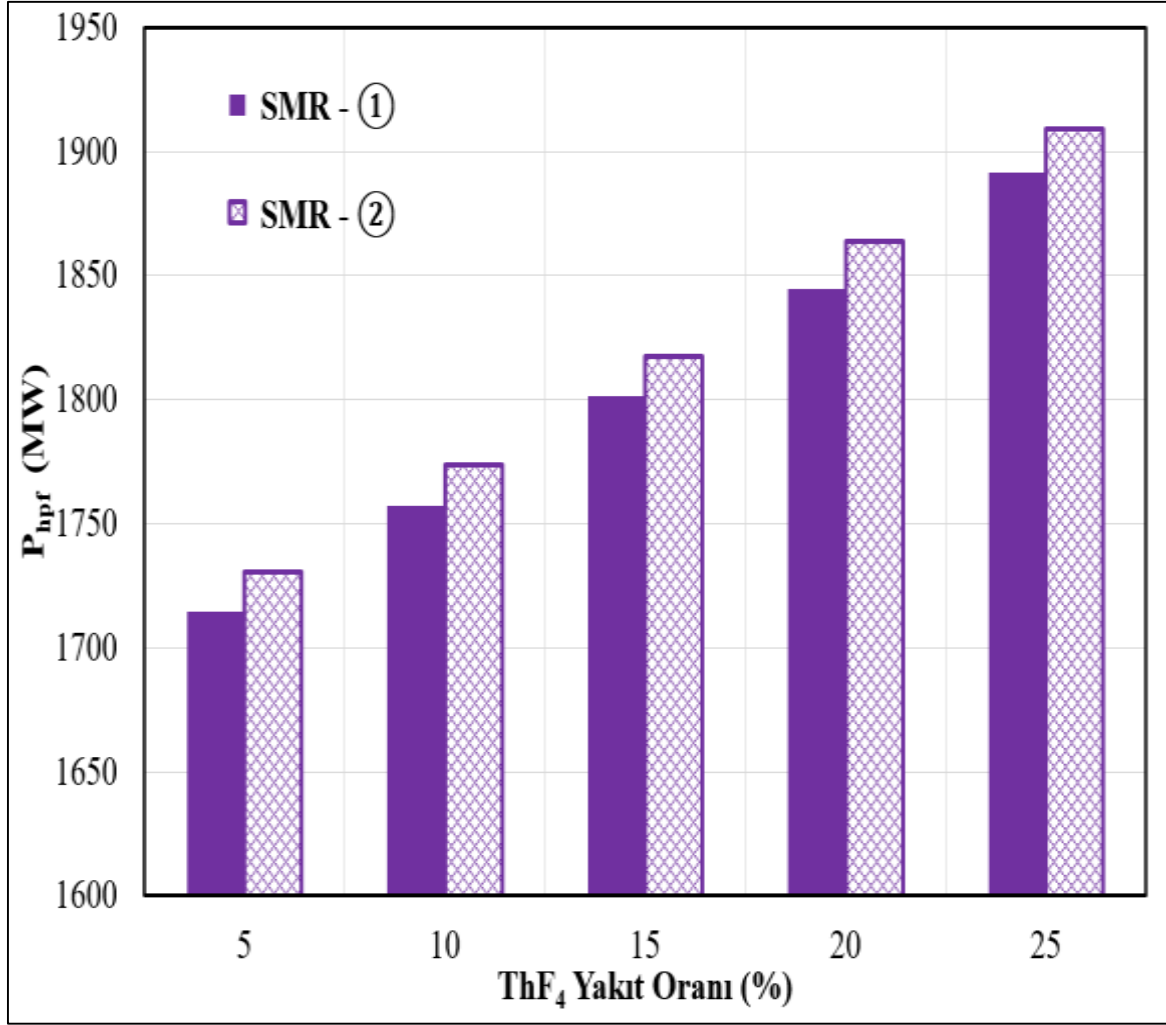
## 6.2. Hidrojen Üretim Miktarı Verileri

Nötronik analizleri elde edilen PCER füzyon reaktörüne modifiye edilen dört farklı hidrojen üretim metodu kullanılarak üretilen hidrojen miktarının hesaplamaları yapılmıştır. Hidrojen üretim potansiyelinin hesaplanabilmesi için yine iki farklı çalışmanın nötronik verileri kullanılmıştır.

### 6.2.1. SMR (buhar - metan reformasyonu) yöntemi ile hidrojen üretim miktarı

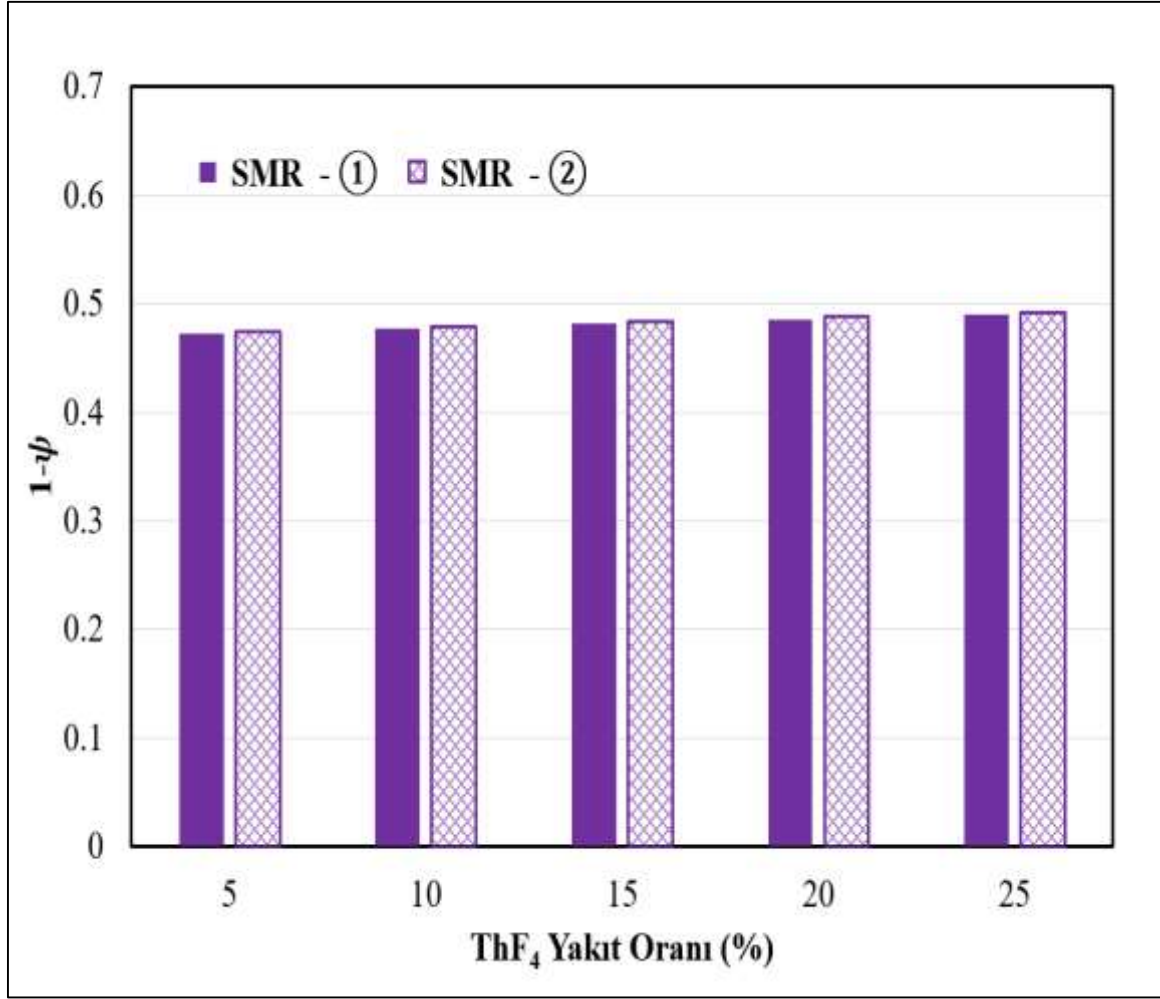
Bölüm 4.2.1'de buhar – metan reformasyonu (SMR) detaylı bir şekilde anlatılmıştı ve Bölüm 4.2.1'de Şekil 4.5'te PACER füzyon reaktörüne modifiye edilmiş SMR hidrojen üretim tesisi verilmiştir. Aşağıda Şekil 6.7.'de mod ① ve mod ② için SMR metodunun ihtiyaç duyduğu toplam termal gücün ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) yakıt oranına göre değişimi verilmiştir.

Şekil 6.7 incelendiğinde SMR metodu ile hidrojen üretimi ile yapılan tesisin ihtiyaç duyduğu toplam termal güç enerji çoğaltım faktörüne (M) bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu değişim aynı zamanda hidrojen üretim miktarını da etkilemektedir. Mod ① ve mod ② kendi arasında kıyaslandığında mod ②'nin termal güç değerinin tüm yakıt oranlarında mod ①'den daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca soğutucu akışkan LiF'e karıştırılan ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranının artması toplam termal gücüde ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) arttırmıştır. En düşük  $P_{hpf}^{SMR}$  değeri 1714,36 MW, mod ①'de soğutucu akışkan LiF'e karıştırılan %5 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtından elde edilirken, en yüksek  $P_{hpf}^{SMR}$  değeri mod ②'de soğutucu akışkan LiF'e karıştırılan %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtından elde edilmiştir ve bu değer 1909 MW'tır.



Şekil 6.7. SMR için toplam termal gücün ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) yakıt oranına göre değişimi

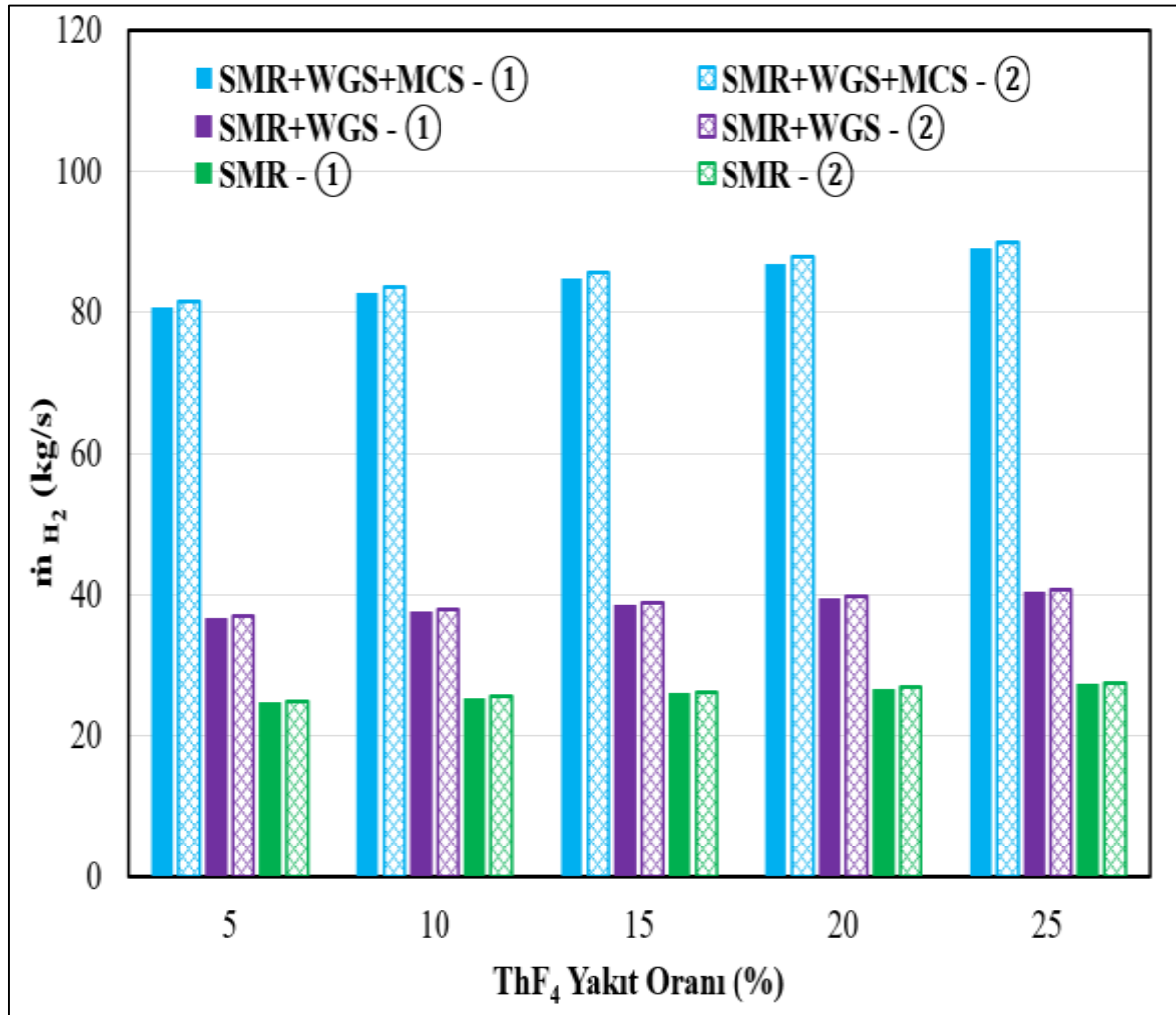
Şekil 6.8’de PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim ünitesinin SMR metodu ile hidrojen üretimi yapılabilmesi için gerekli olan toplam termal gücün hesaplanmasında kullanılan termal güç oranının ( $1-\psi$ ) değişimi verilmiştir. Termal güç oranı da  $M$  değerine bağlı olarak değişim göstermektedir. SMR yöntemiyle hidrojen üretimi yapılırken elektrik girdisine ihtiyaç yoktur sadece ısıl enerjiye ihtiyaç duyulur. Şekil 6.8 incelendiğinde mod ① ve mod ②’de elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca soğutucu akışkan LiF’e karıştırılan nükleer yakıt ThF<sub>4</sub>’ün miktarının artması termal güç oranını çok fazla etkilememiştir. En düşük termal güç oranı ( $1-\psi$ ) mod ①’de ve ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranının %5 olduğu durumda 0,472 olarak elde edilmiştir. En yüksek termal güç oranı ( $1-\psi$ ) ise mod ②’de ve nükleer yakıt ThF<sub>4</sub>’ün %25 olduğu durumda 0,492 olarak hesaplanmıştır. Buda soğutucu bölgenin hacimsel oranın ve yakıt oranının artmasının termal güç oranını ( $1-\psi$ ) olumlu bir şekilde etkilediğini göstermektedir.



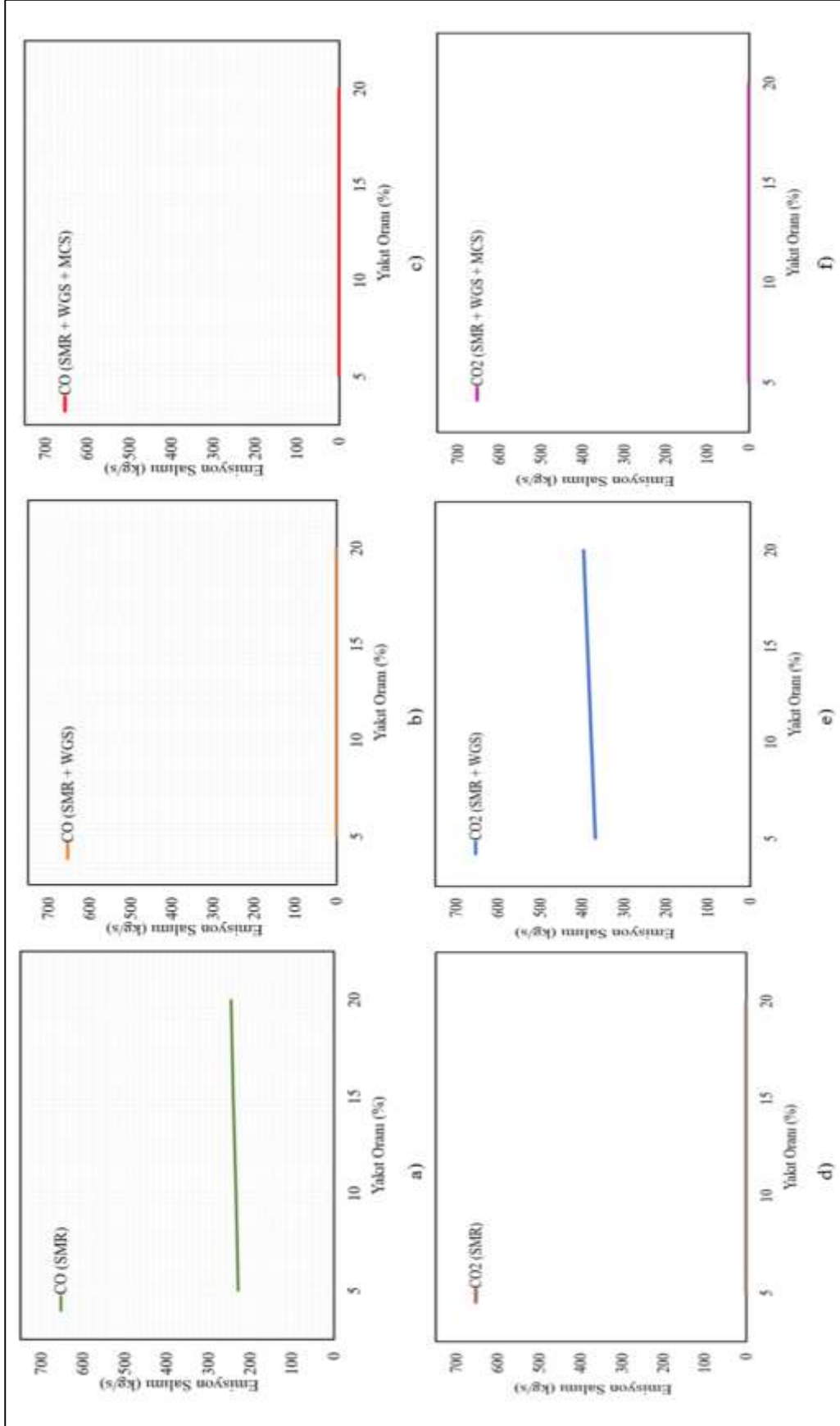
Şekil 6.8. SMR için termal güç oranının ( $1-\psi$ ) yakıt oranına göre değişimi

PACER füzyon reaktörüne entegre edilen SMR yöntemi ile hidrojen üretimi gerçekleştiren hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu termal güç oranının ( $1-\psi$ ) ve toplam termal gücün ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) hesaplanması ile bu tesiste üretilen hidrojen miktarı hesaplanmıştır. Şekil 6.9'de SMR için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) yakıt oranına göre değişimi verilmiştir. Şekil 6.9 incelendiğinde hidrojen üretim miktarı SMR, SMR + WGS ve SMR + WGS + MCS adımlarının üçü için ayrı ayrı hesaplanmıştır. SMR + WGS + MCS üçlü reaksiyon için mod ①'de hidrojen üretimi en az nükleer yakıt ThF<sub>4</sub>'ün %5 olduğu durumda ~80 kg/s ve en yüksek hidrojen üretim miktarı ise mod ②'de ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtının %25 olduğu durumda ~89 kg/s olarak hesaplanmıştır. SMR + WGS ikili reaksiyon için Şekil 6.9 incelendiğinde SMR + WGS + MCS üçlü reaksiyonuna kıyasla daha az hidrojen üretimi gerçekleşmektedir. SMR + WGS ikili reaksiyonunun en yüksek hidrojen üretimi mod ②'de ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtının %25 olduğu durumda ~40 kg/s iken en az hidrojen üretimi mod ①'de nükleer yakıt ThF<sub>4</sub>'ün %5 olduğu durumda ~36 kg/s olarak hesaplanmıştır. En

düşük hidrojen üretim miktarının SMR reaksiyonunda gerçekleştiği görülmektedir. SMR reaksiyonu için en fazla hidrojen üretim miktarı mod ②'de ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtının %25 olduğu durumda ~26 kg/s ve en hidrojen üretim miktarı ise mod ①'de nükleer yakıt ThF<sub>4</sub>'ün %5 olduğu durumda ~24 kg/s olarak hesaplanmıştır. SMR reaksiyonunda hem hidrojen üretim miktarı az hem de reaksiyon sonucunda çok tehlikeli olan CO salımı gerçekleşmektedir. SMR + WGS + MCS üçlü reaksiyonu ile daha fazla hidrojen üretilmesinin yanı sıra bu reaksiyon doğa dostu olur zararlı gaz salımını minimize etmektedir. Sonuç olarak tüm reaksiyonlar için hem soğutucu bölge hacmindeki artış hem de soğutucu akışkana karıştırılan nükleer yakıtın artması hidrojen üretim miktarını arttırmıştır.



Şekil 6.9. SMR için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) yakıt oranına göre değişimi



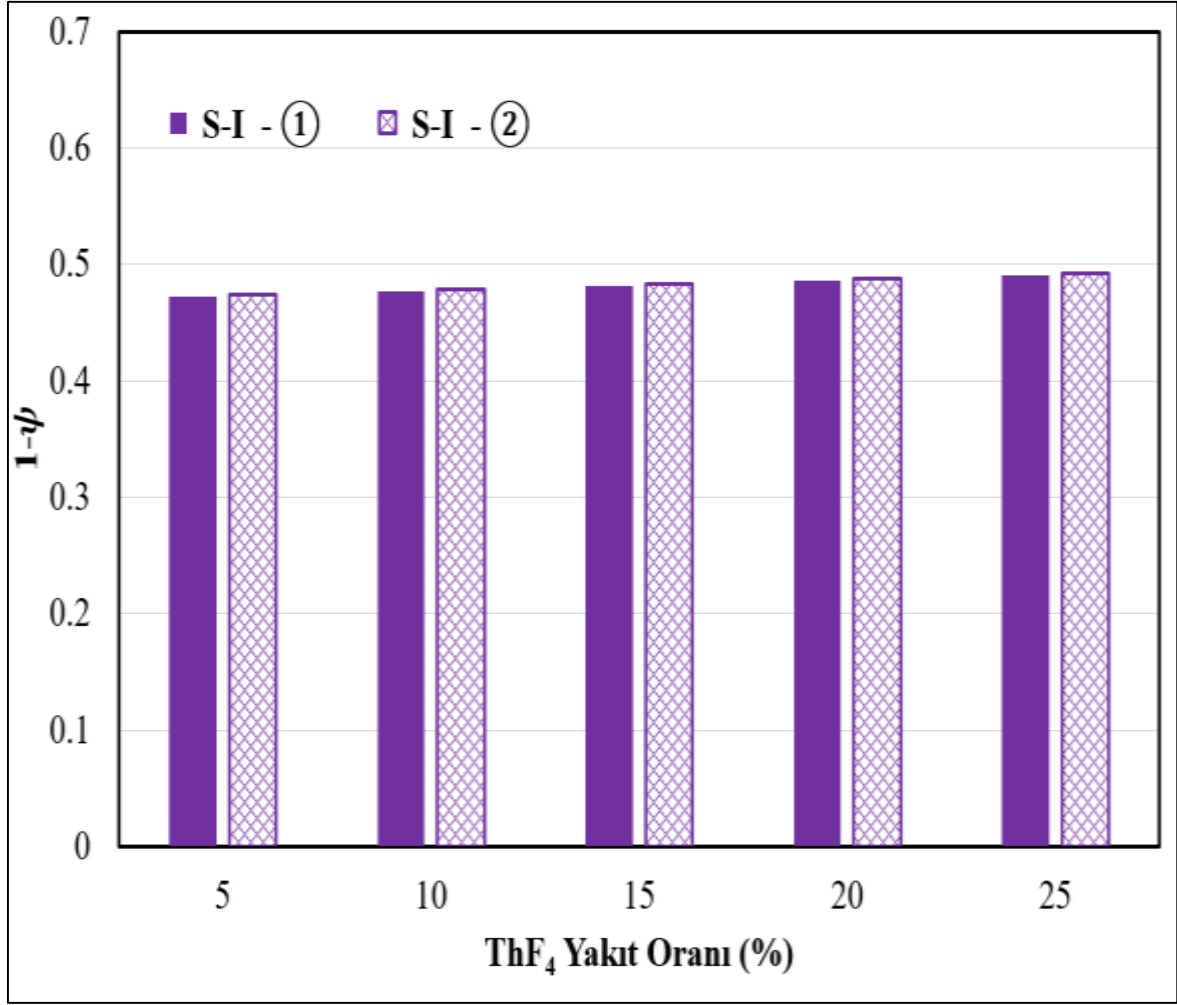
Şekil 6.10. Yakıt oranına göre SMR sisteminden emisyon salımı

SMR çevriminde ilk adımında sadece karbon monoksit oluşur ve bu oluşan karbon monoksiti yok edilebilmesi için su gaz değişimi reaksiyonu gerçekleşir. Bu adım ise iki reaksiyonlu (SMR + WGS) SMR çevrimi olarak adlandırılır. Bu iki reaksiyonlu tepkime sonucunda ise sadece karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) oluşur [74,75]. Şekil 6.10 incelendiğinde sadece SMR reaksiyonun da yani a seçeneğinde karbon monoksit (CO) salımı olduğu görülmektedir. Diğer SMR + WGS ve SMR + WGS + MCS reaksiyonlarında karbon monoksit salımı yoktur. En düşük karbon monoksit salımı soğutucu akışkana karıştırılan %5  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıt oranında ve  $\sim 229$  kg/s en yüksek değer ise soğutucu akışkana karıştırılan %25  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıt oranında ve  $\sim 347$  kg/s'dir. SMR + WGS reaksiyonunda karbon monoksit salımı yok edilirken reaksiyon sunucunda karbon dioksit ( $\text{CO}_2$ ) salımı gerçekleşmektedir. Reaksiyon sonucunda oluşan karbon dioksit ( $\text{CO}_2$ ) salımı Şekil 6.10'da e seçeneğinde görülmektedir. En düşük karbon dioksit ( $\text{CO}_2$ ) salımı soğutucu akışkana karıştırılan %5  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıt oranında ve  $\sim 367$  kg/s en yüksek değer ise soğutucu akışkana karıştırılan %25  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıt oranında ve  $\sim 397$  kg/s'dir. SMR + WGS + MCS reaksiyonunda ise hem karbon monoksit (CO) hem de karbon dioksit ( $\text{CO}_2$ ) salımı yoktur yani  $\text{CO} = 0$  ve  $\text{CO}_2 = 0$ 'dır.

### 6.2.2. S-I (kükürt – iyot) termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretim miktarı

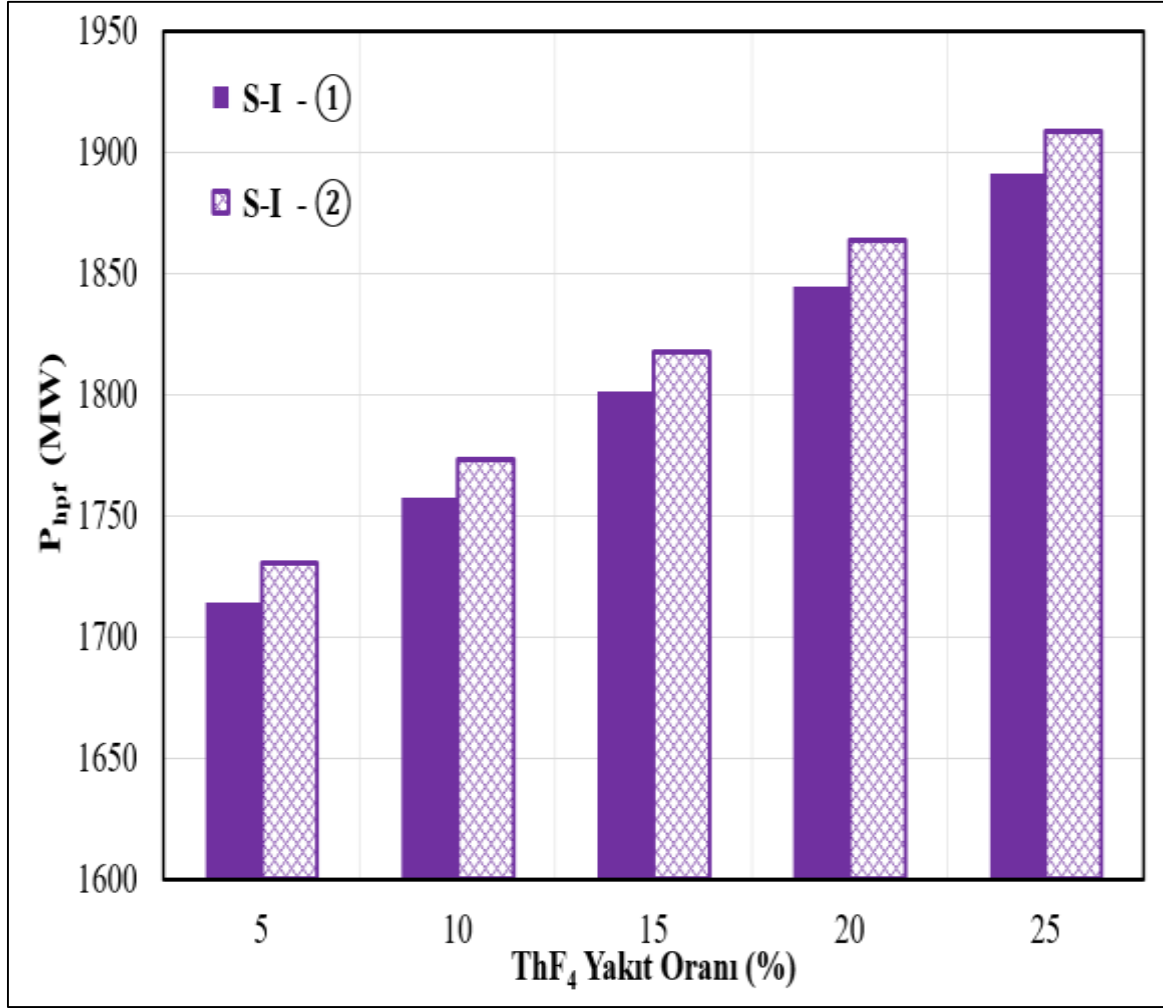
PACER füzyon reaktörüne entegre edilen S-I termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretimi yapan hidrojen üretim tesisinin şematik görünümü bölüm 4.2'de verilen Şekil 4.10'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. S-I termokimyasal yöntemi de SMR yöntemi gibi sadece ısı enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Şekil 6.11'de S-I termokimyasal yöntemin için termal güç oranının ( $1-\psi$ ) yakıt oranına göre değişimi görülmektedir.

Şekil 6.11 S-I için termal güç oranının ( $1-\psi$ ) yakıt oranına göre değişimi incelendiğinde yakıt oranının artması termal güç oranının ( $1-\psi$ ) da arttırmıştır. En düşük termal güç oranını ( $1-\psi$ ) mod ①'de nükleer yakıt  $\text{ThF}_4$ 'ün %5 olduğu durumda elde edilmiştir. En yüksek termal güç oranı ( $1-\psi$ ) ise mod ②'de ve nükleer yakıt  $\text{ThF}_4$ 'ün %25 olduğu durumda elde edilmiştir. Ayrıca nükleer yakıt tüm oranları için mod ② > mod ①'den.



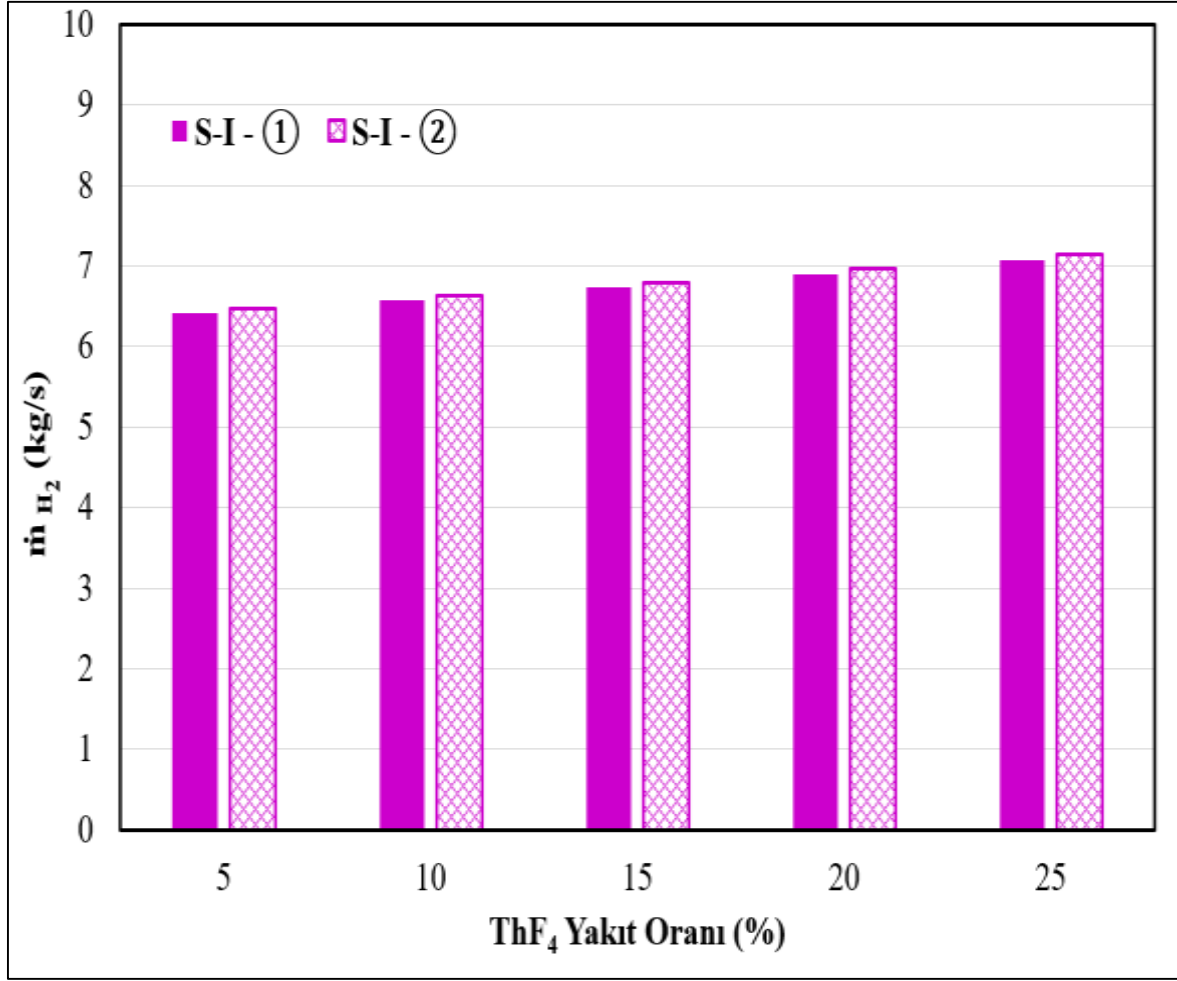
Şekil 6.11. S-I için termal güç oranının ( $1-\psi$ ) yakıt oranına göre değişimi

PACER füzyon rektörüne entegre edilen S-I termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretimi yapan hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu toplam termal güç Şekil 6.12’de verilmiştir. Şekil 6.12 S-I için toplam termal gücün ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) yakıt oranına göre değişimi incelendiğinde termal güç oranına ( $1-\psi$ ) bağlı olarak bir değişim olduğu görülmektedir. Yakıt oranının artmasına bağlı olarak toplam termal güç ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) de artmıştır. Şekil 6.12 incelendiğinde En düşük  $P_{hpf}^{SMR}$  değeri mod ①’de soğutucu akışkan LiF’e karıştırılan %5 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtından elde edilmiştir. En yüksek  $P_{hpf}^{SMR}$  değeri mod ②’de soğutucu akışkan LiF’e karıştırılan %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtından elde edilmiştir.



Şekil 6.12. S-I için toplam termal gücün ( $P_{hpr}^{S-I}$ ) yakıt oranına göre değişimi

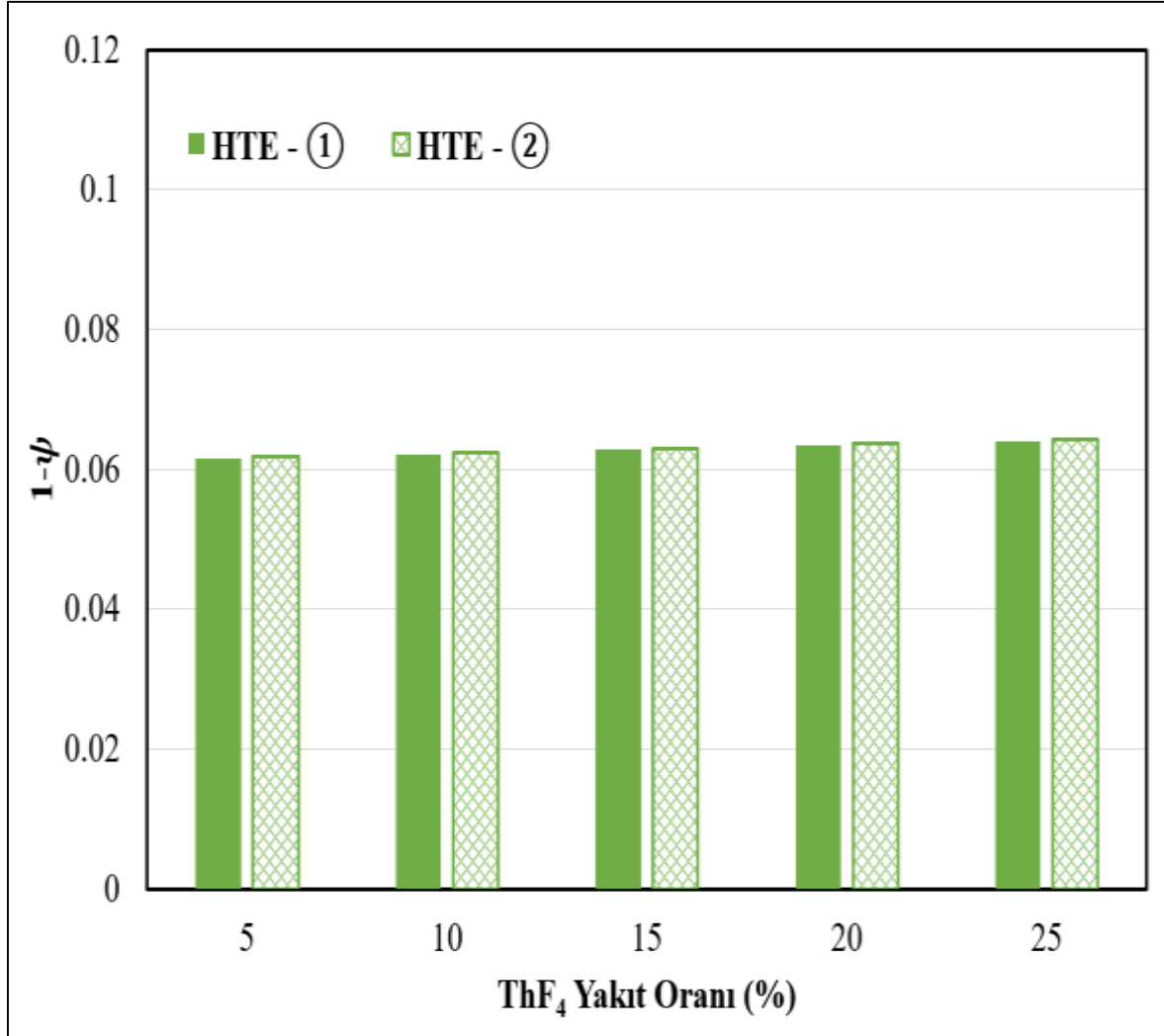
PACER füzyon reaktörüne kükürt – iyot termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretimi yapan hidrojen üretim tesisinin entegre edilmesiyle hidrojen üretim miktarı hesaplanmıştır. Bölüm 4.2’de kükürt – iyot termokimyasal yöntemine ait kimyasal formüller Eş. (4.45)-(4.47) kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 6.13 S-I için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) yakıt oranına göre değişimi verilmiştir. Şekil 6.13 incelendiğinde hidrojen üretim miktarları soğutucu bölge hacmi açısından mod ② > mod ① ilişkisi elde edilmiştir. Yani soğutucu bölge hacmi arttıkça hidrojen üretim miktarı da artmaktadır. En fazla hidrojen üretimi mod ②’de %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtı karışımından ~7,1 kg/s olarak elde edilmiştir. En az hidrojen üretimi ise mod ①’de %5 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtı karışımından ~6,4 kg/s olarak elde edilmiştir



Şekil 6.13. S-I için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) yakıt oranına göre değişimi

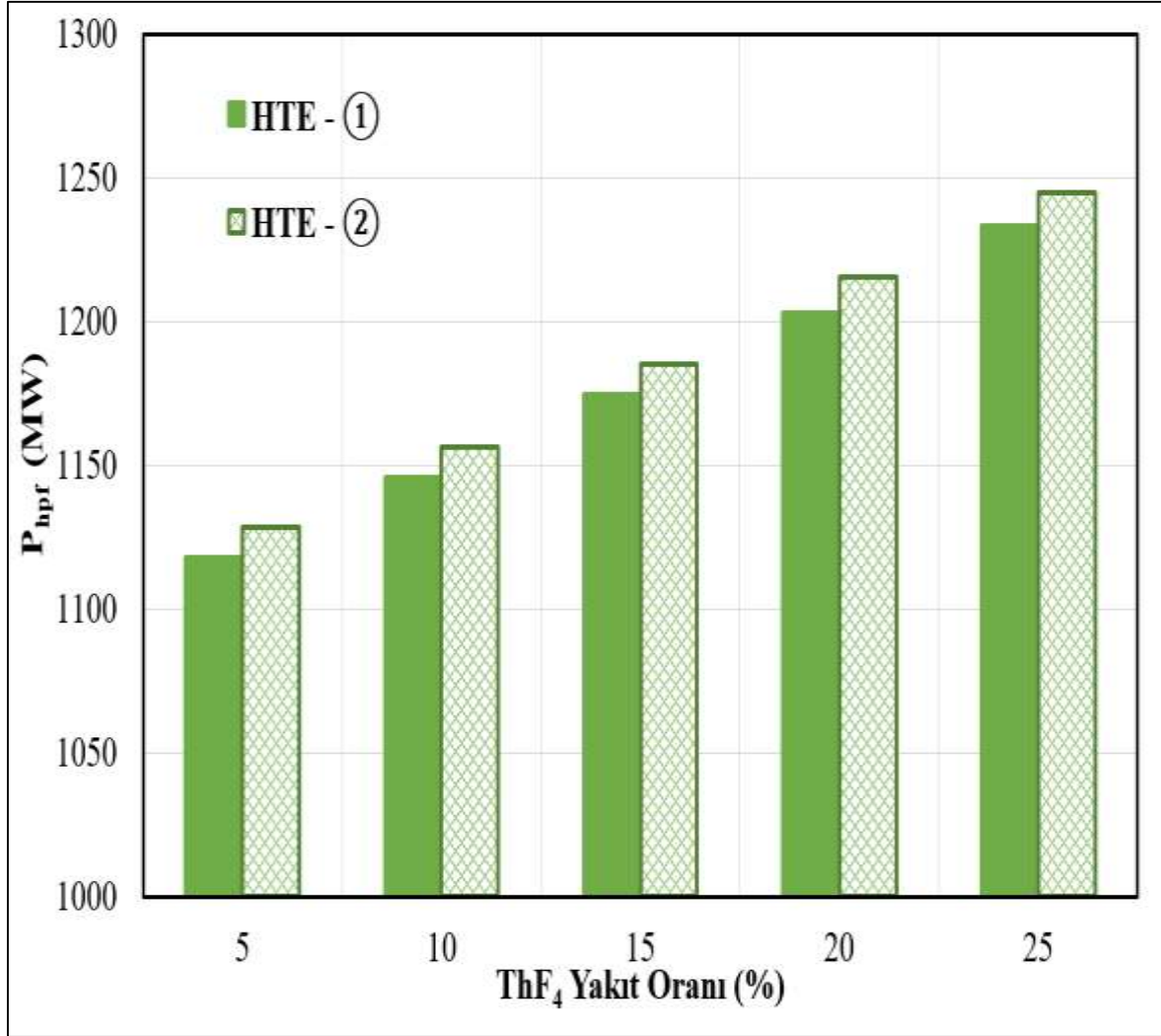
### 6.2.3. HTE (yüksek sıcaklıkta elektroliz) yöntemi ile hidrojen üretim miktarı

PACER füzyon reaktörüne entegre edilen yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi ile hidrojen üretimi yapan hidrojen üretim tesisinin şematik görünümü bölüm 4.2’de Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde HTE yöntemi ile hidrojen üretimi yapabilmek için hem elektrik enerjisine hem de ısıl enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 6.14 HTE için termal güç oranının ( $1-\psi$ ) yakıt oranına göre değişimi verilmiştir. Şekil 6.14 incelendiğinde soğutucu akışkan LiF’e karıştırılan ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranının artması termal güç oranını da ( $1-\psi$ ) arttırmıştır. Termal güç oranının ( $1-\psi$ ) artmasında artan yakıt oranı gibi artan soğutucu bölge hacmi de etki olmuştur. Böylece en yüksek termal güç oranı mod (2)’de %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtı karışımında ~0,065 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.14. HTE için termal güç oranının  $(1-\psi)$  yakıt oranına göre değişimi

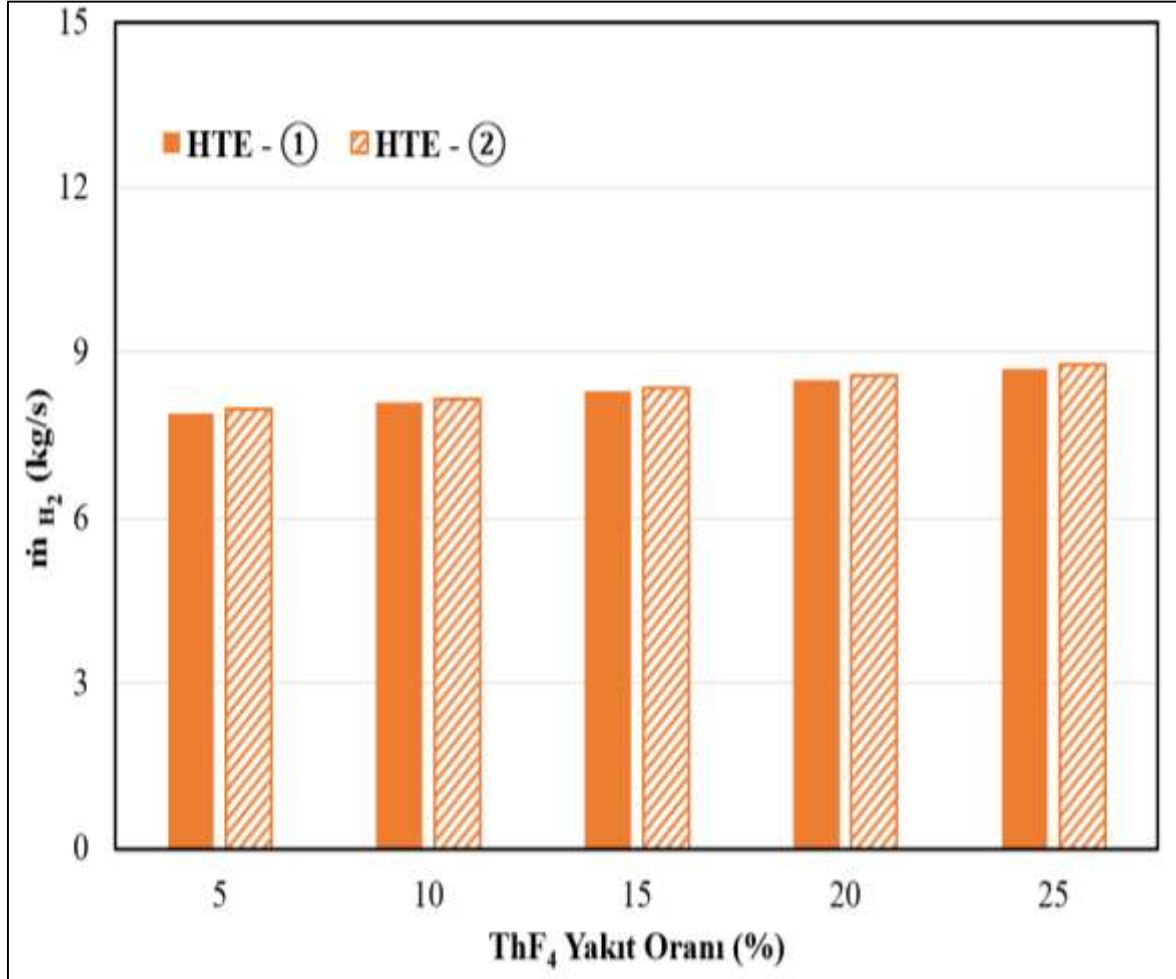
PACER füzyon reaktöründe HTE yöntemi ile hidrojen üretebilmek için gerekli olan HTE için toplam termal gücün ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) yakıt oranına göre değişimi Şekil 6.15’de verilmiştir. HTE yönteminde de SMR ve S-I yönteminde olduğu gibi hem soğutucu bölge hacmin artması hem de yakıt miktarının artması toplam termal gücü ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) arttırmıştır. Bu iki parametrenin en yüksek olduğu mod ②’de %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtı karışımıdır ve bu oranda elde edilen toplam termal güç ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) ~1245MW’tır. En düşük toplam termal güç ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) ise mod ①’de %5 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtı karışımından ~1118MW olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.15. HTE için toplam termal gücün ( $P_{hpf}^{HTE}$ ) yakıt oranına göre değişimi

Toplam termal güç ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) ve termal güç oranının ( $1-\psi$ ) oranlarından alınan veriler kullanılarak PACER füzyon reaktöründe HTE yöntemi ile hidrojen üretim miktarı hesaplanmıştır. HTE için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) yakıt oranına göre değişimi Şekil 6.16 verilmiştir. Toplam termal güç ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) miktarına paralel olarak HTE yöntemi ile hidrojen üretim miktarı artış göstermektedir. Toplam termal güç ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) sonuçlarında olduğu gibi en yüksek hidrojen üretim miktarı da mod ②'de %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtı karışımından elde edilmiştir. Mod ①'de %5 ThF<sub>4</sub>, %10 ThF<sub>4</sub>, %15 ThF<sub>4</sub>, %20 ThF<sub>4</sub> ve %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranlarına göre üretilen hidrojen miktarları sırasıyla ~7,8 kg/s, 8 kg/s, 8,2 kg/s, 8,4 kg/s ve 8,7 kg/s'dir. Mod ②'de %5 ThF<sub>4</sub>, %10 ThF<sub>4</sub>, %15 ThF<sub>4</sub>, %20 ThF<sub>4</sub> ve %25 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranlarına göre üretilen hidrojen miktarı ise sırasıyla ~7,9 kg/s, 8,1 kg/s, 8,3 kg/s, 8,5 kg/s ve 8,8 kg/s'dir. Bu veriler incelendiğinde ~7.8kg/s, hidrojen üretim miktarına sahip

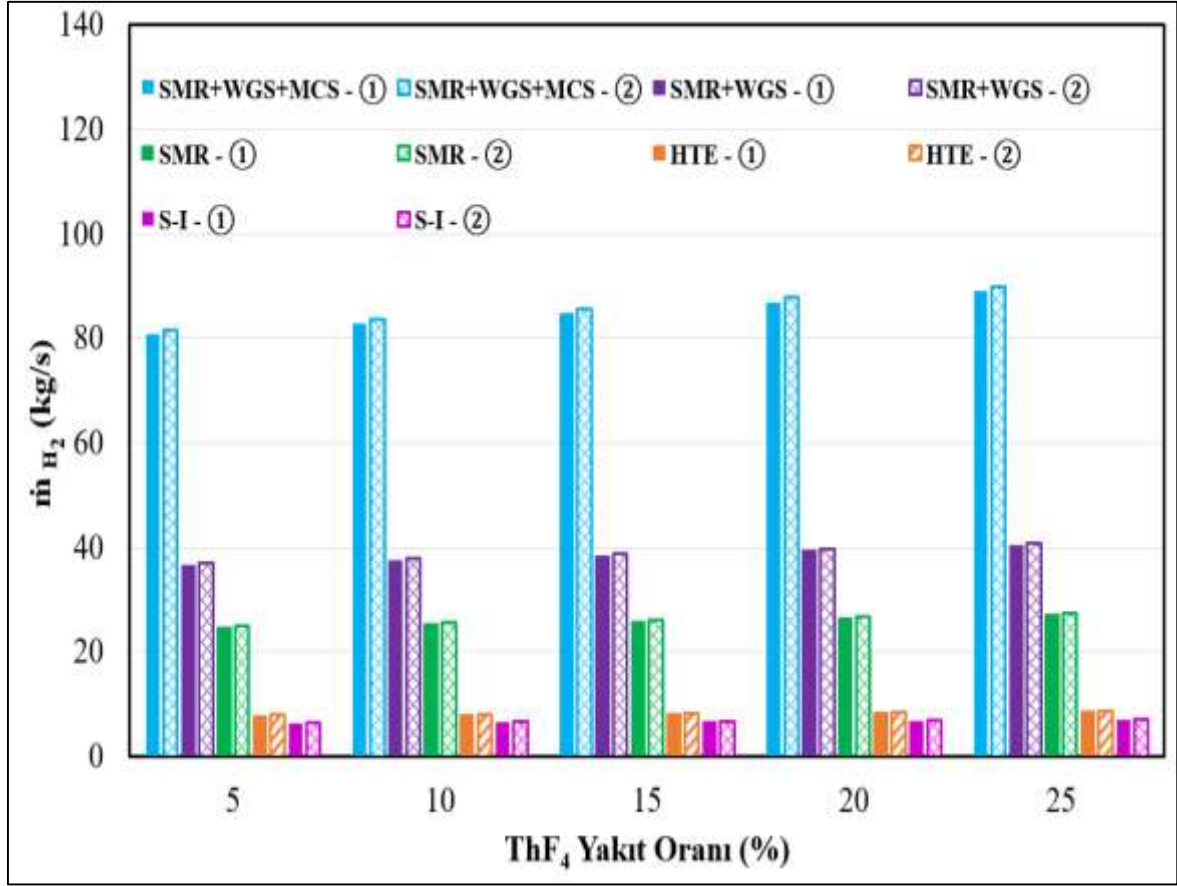
mod ①'de soğutucu akışkan LiF'e karıştırılan %5 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtından elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.16. HTE için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) yakıt oranına göre değişimi

#### 6.2.4. HTE, SMR, S-I termokimyasal yöntemlerinin hidrojen üretim miktarlarının karşılaştırılması

Bu bölümde PACER füzyon reaktörü bir enerji kaynağı olarak kullanılan bu tez çalışmasında yapılan iki farklı çalışmanın hidrojen üretim miktarları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. İlk çalışmada hidrojen üretim yöntemi olarak buhar metan reformasyonu (SMR), kükürt iyot termokimyasal çevrimi (S-I) ve yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi (HTE) PACER füzyon reaktörünü entegre edilerek hidrojen üretim miktarları hesaplanmıştır.



Şekil 6.17. SMR, S-I ve HTE için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) yakıt oranına göre değişimi

Şekil 6.17’de PACER füzyon reaktörüne entegre edilen HTE, S-I ve SMR yöntemleri için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) yakıt oranına göre değişimi verilmiştir. Şekil 6.17 incelendiğinde üçlü SMR yöntemi olan SMR+WGS+MCS reaksiyonunun hidrojen üretim miktarının tüm yakıt oranlarında diğer hidrojen üretim yöntemleriyle kıyaslandığında en fazla olduğu görülmektedir. Bu üçlü SMR yönteminde mod ②’de üretilen hidrojen miktarı mod ①’de üretilen hidrojen miktarından fazladır. En az hidrojen üretim miktarı mod ①’de S-I termokimyasal yönteminde gerçekleşmiştir. PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesislerinde hidrojen üretim yöntemlerine göre üretilen hidrojen miktarı kıyaslandığında tüm veriler kıyaslanabilir. İlk olarak mod ①’de soğutucu akışkana %5 oranında karıştırılan nükleer yakıt ile S-I, HTE, SMR, SMR+WGS ve SMR+WGS+MCS yöntemlerinde sırasıyla; ~6,4 kg/s, ~7,9 kg/s, ~24,7 kg/s, ~36,6 kg/s, ve ~80,8 kg/s hidrojen üretimi hesaplanmıştır. Soğutucu akışkana %5 oranında karıştırılan nükleer yakıt durumunu mod ②’de S-I, HTE, SMR, SMR+WGS ve SMR+WGS+MCS yöntemleriyle üretilen hidrojen miktarı sırasıyla; ~6,5 kg/s, ~8 kg/s, ~25

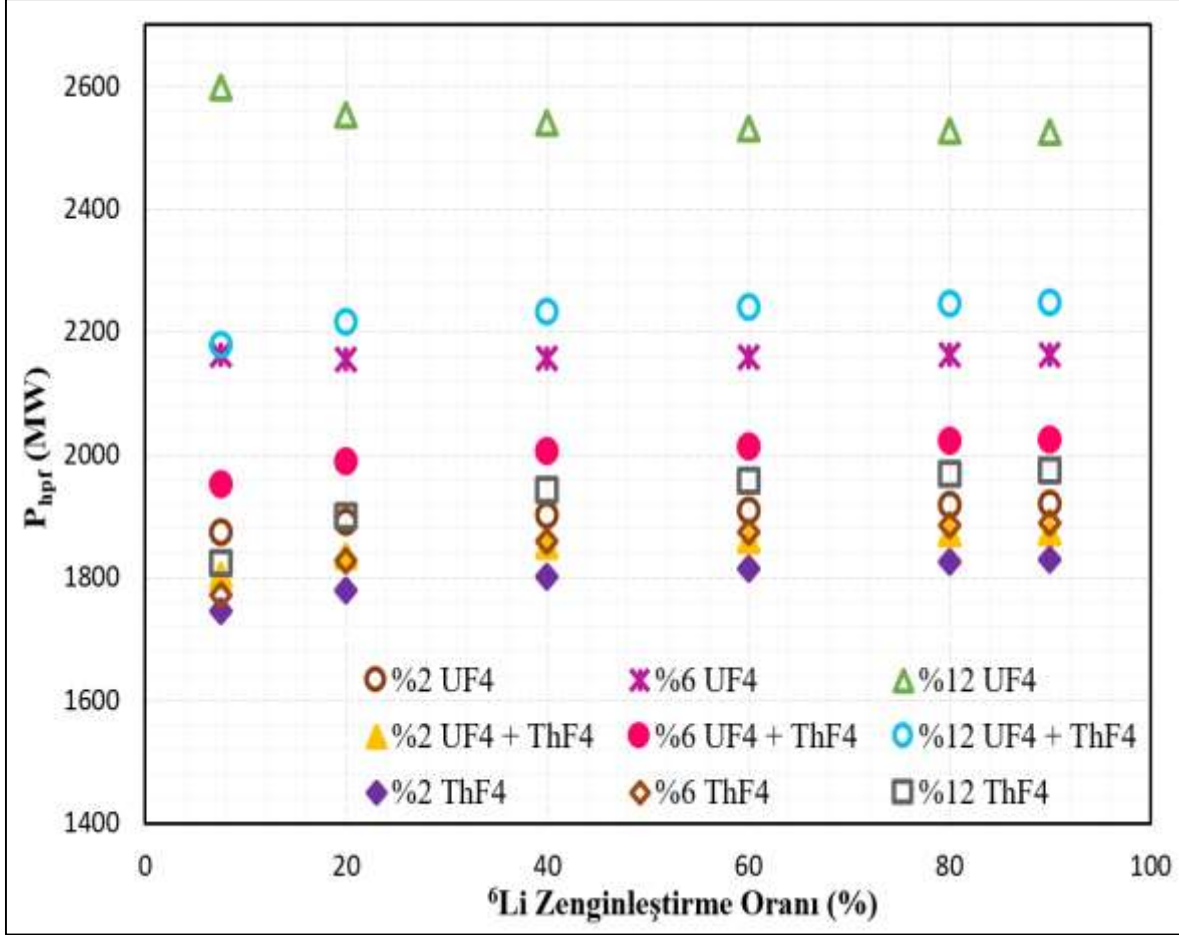
kg/s, ~37 kg/s, ve ~81,5kg/s olarak hesaplanmıştır. Bu veriler PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinde S-I, HTE, SMR, SMR+WGS ve SMR+WGS+MCS yöntemleriyle üretilen en düşük hidrojen üretim miktarıdır. Mod ①'de soğutucu akışkana %25 oranında karıştırılan nükleer yakıt ile S-I, HTE, SMR, SMR+WGS ve SMR+WGS+MCS yöntemlerinde sırasıyla; ~7 kg/s, ~8,7 kg/s, ~27,3 kg/s, ~40,3 kg/s, ve ~89 kg/s hidrojen üretimi hesaplanırken, mod ②'de S-I, HTE, SMR, SMR+WGS ve SMR+WGS+MCS yöntemleriyle üretilen hidrojen miktarı sırasıyla; ~7,1 kg/s, ~8,8 kg/s, ~27,5 kg/s, ~40,7 kg/s, ve ~90kg/s olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak hacimsel oranın artması hidrojen üretim miktarını arttırmıştır. Yani hidrojen üretimi açısından mod ②> mod ① ilişkisi vardır. Aynı hacimsel oran için soğutucu akışkana karıştırılan nükleer yakıt oranının değişmesi de hidrojen üretim miktarını arttırmıştır. Bu durumu hidrojen üretimi açısından %25ThF<sub>4</sub>> %20ThF<sub>4</sub>> %15ThF<sub>4</sub>> %10ThF<sub>4</sub>> %5ThF<sub>4</sub> ilişkisi olduğu görülmektedir.

#### 6.2.5. Fe-Cl (demir – klor) termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretim miktarı

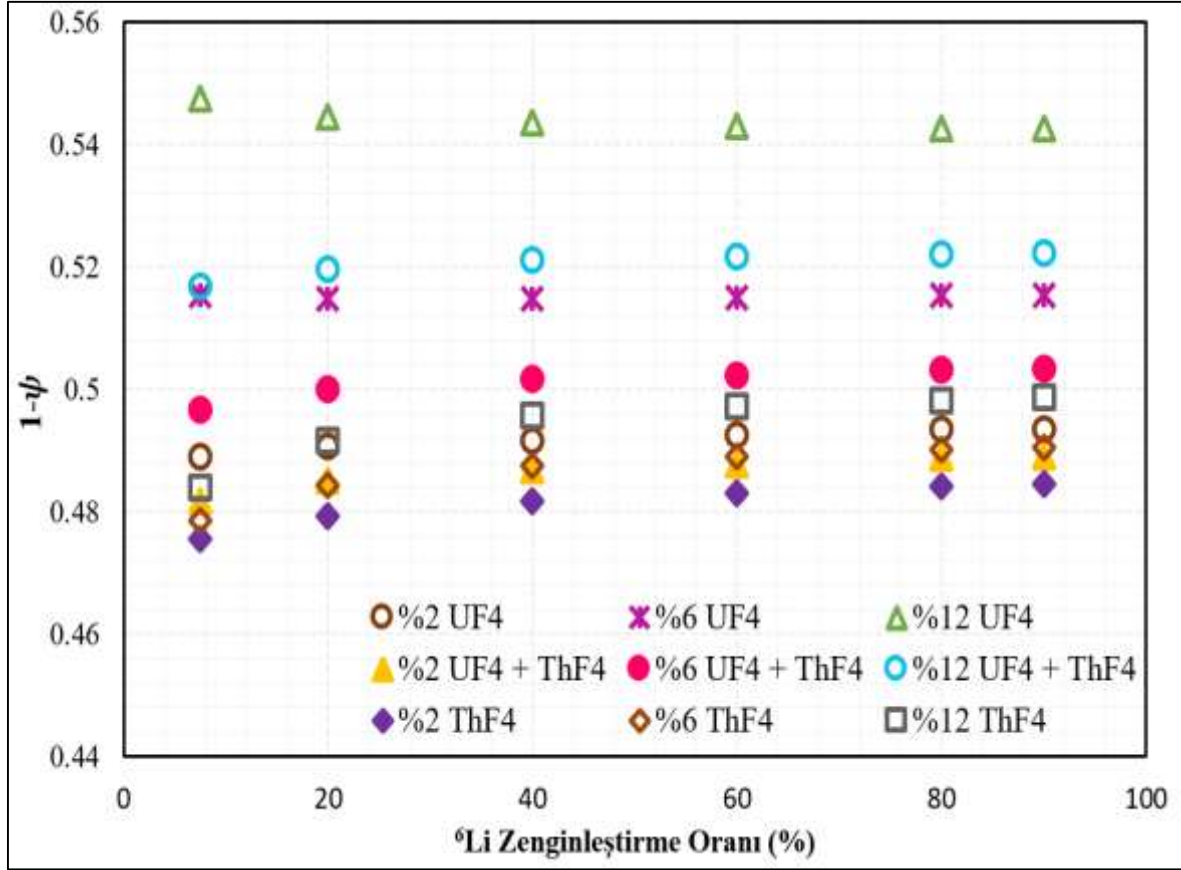
Bu tez kapsamında yapılan çalışma ikinin verilerine göre, Şekil 6.18'de PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş Fe-Cl termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretimi yapan hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu toplam termal gücün ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına göre değişimi verilmiştir. Toplam termal gücün artması M değerine bağlı olduğu için Şekil 6.4'te verilen grafik incelenirse <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranının artmasıyla M değeri de artmıştır. Şekil 6.4'de olduğu gibi Şekil 6.18 incelendiğinde M değerine bağlı olarak toplam termal güç ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) oranını da arttırmıştır. Ayrıca <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranının artması da toplam termal güç ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) oranını arttırmıştır. <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranını kullanılan tüm nükleer yakıtlar için aynı sonucu vermemiştir. Doğal <sup>6</sup>Li oranını nükleer yakıt açısından incelersek; en düşük değer soğutucu akışkan Flibe içerisine karıştırılan %2 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtından elde edilmiştir. Daha sonra soğutucu akışkana karıştırılan %2 ThF<sub>4</sub>, %6 ThF<sub>4</sub>, %2 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>, %12 ThF<sub>4</sub>, %2 UF<sub>4</sub>, %6 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>, %6 UF<sub>4</sub>, %12 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>, %12 UF<sub>4</sub> nükleer yakıtların toplam termal gücü ( $P_{hpf}^{SMR}$ ) etkisi sırasıyla ~1745 MW, 1772MW, 1803MW, 1824MW, 1874MW, 1953MW, 2162MW, 2180 MW ve 2599MW olarak hesaplanmıştır. Bu da aynı oranda <sup>6</sup>Li zenginleştirme yapılması onucunda farklı nükleer yakıtların farklı oranlarda kullanılması toplam termal gücü etkilediğini göstermektedir. Hatta aynı oranda <sup>6</sup>Li

zenginleştirme ve aynı oranda nükleer yakıt kullanılması durumunda yine farklı sonuçlar alınmıştır. Örnek olarak %60  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme yapılan bir durumda soğutucu akışkana %2  $\text{ThF}_4$ , %2  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$ , %2  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtlarının karıştırılmasıyla sırasıyla 1814 MW, 1861MW ve 1909 MW toplam termal güç elde edilmiştir.



Şekil 6.18. Fe-Cl için toplam termal gücün ( $P_{hpf}^{Fe-Cl}$ )  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranına göre değişimi

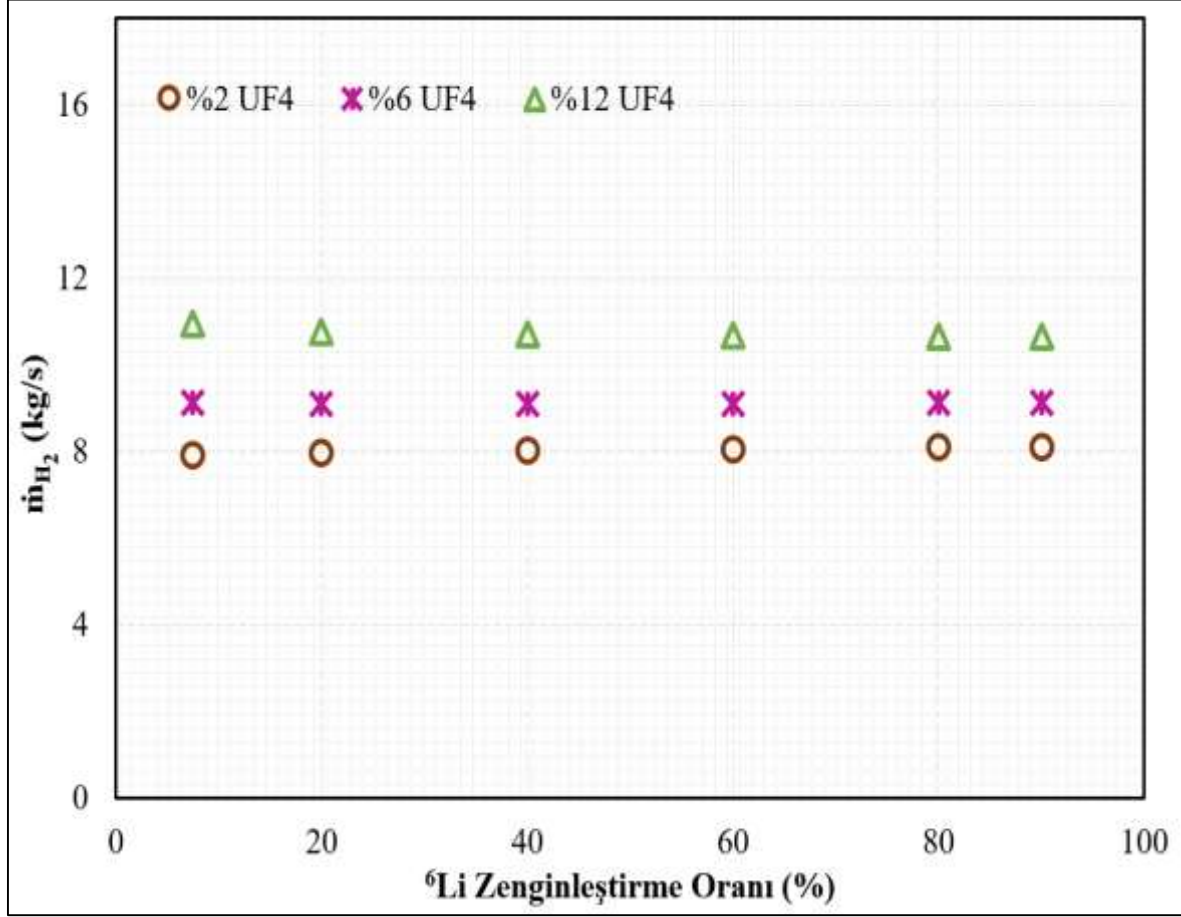
PACER füzyon reaktörüne entegre edilen Fe-Cl termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretimi yapan hidrojen üretim tesisinin toplam termal gücünün hesaplanabilmesi için termal güç oranının ( $1-\psi$ ) bilinmesi gerekmektedir. Fe-Cl termokimyasal yöntemi PACER füzyon reaktörünün sadece ısı enerjisini kullanarak hidrojen üretimi yapmaktadır. Fe-Cl termokimyasal yöntemi için termal güç oranının ( $1-\psi$ )  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranına göre değişimi Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.19. Fe-Cl için termal güç oranının ( $1-\psi$ )  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranına göre değişimi

Termal güç oranını ( $1-\psi$ );  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranı etkisi incelenirken aynı zamanda soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıtın türü ve bu nükleer yakıtların karışımındaki oranı da incelenmiştir. Şekil 6.19 incelendiğinde yakıt türü olarak en iyi sonucun soğutucu akışkan içerisine karıştırılan  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtından elde edildiği görülmektedir. Daha sonra doğal  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranı için soğutucu akışkan içerisine karıştırılan  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtının %2  $\text{UF}_4$ , %6  $\text{UF}_4$ , %12  $\text{UF}_4$ , oranlarının değerleri incelendiğinde sırasıyla  $\sim 0,48$ ; 0,51 ve 0,54'tür. Bu durumda soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt oranının artmasının termal güç oranını ( $1-\psi$ ) arttırdığını göstermektedir. Yakıt türü olarak en kötü sonuç ise  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtından elde edilmiştir.  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtında olduğu gibi, doğal  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranı için soğutucu akışkan içerisine karıştırılan  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtının %2  $\text{ThF}_4$ , %6  $\text{ThF}_4$ , %12  $\text{ThF}_4$ , oranlarının değerleri incelendiğinde sırasıyla  $\sim 0,47$ ; 0,47 ve 0,48 oranı elde edilmiştir. Buda  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranı kadar hem nükleer yakıtın hem de soğutucu akışkana karıştırılan nükleer yakıt oranının önemini göstermektedir.  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranı arttıkça tüm yakıt türleri ve yakıt oranlarında termal güç oranında ( $1-\psi$ ) artış elde edilmiştir.

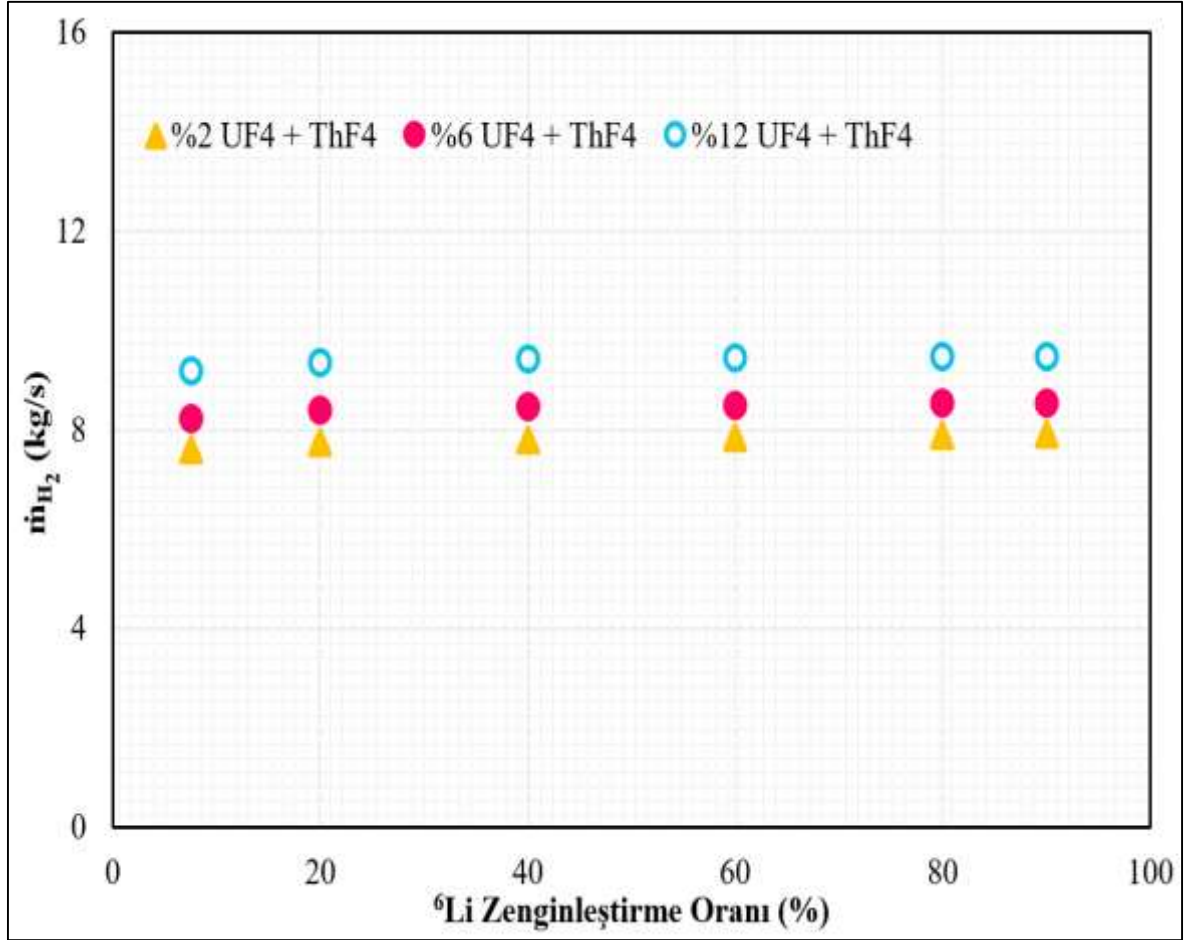
Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) UF<sub>4</sub> nükleer yakıtıyla <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına göre değişimi Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6.20. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) UF<sub>4</sub> nükleer yakıtıyla <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına göre değişimi

Şekil 6.20 incelendiğinde UF<sub>4</sub> nükleer yakıtının soğutucu akışkan içerisine karıştırılarak <sup>6</sup>Li zenginleştirme yapılmıştır. Bu karışımın hidrojen üretimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. UF<sub>4</sub> nükleer yakıtı soğutucu akışkana %2 UF<sub>4</sub>, %6 UF<sub>4</sub>, %12 UF<sub>4</sub> oranlarında karıştırılmıştır. Bu üç nükleer yakıt oranı için <sup>6</sup>Li zenginleştirme %7,5 (doğal lityum), %20, %40, %60, %80 ve %90 oranlarında yapılmıştır. Sonuç olarak hem nükleer yakıt oranının artması hem de <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranının artması hidrojen üretim miktarını arttırdığı görülmektedir.

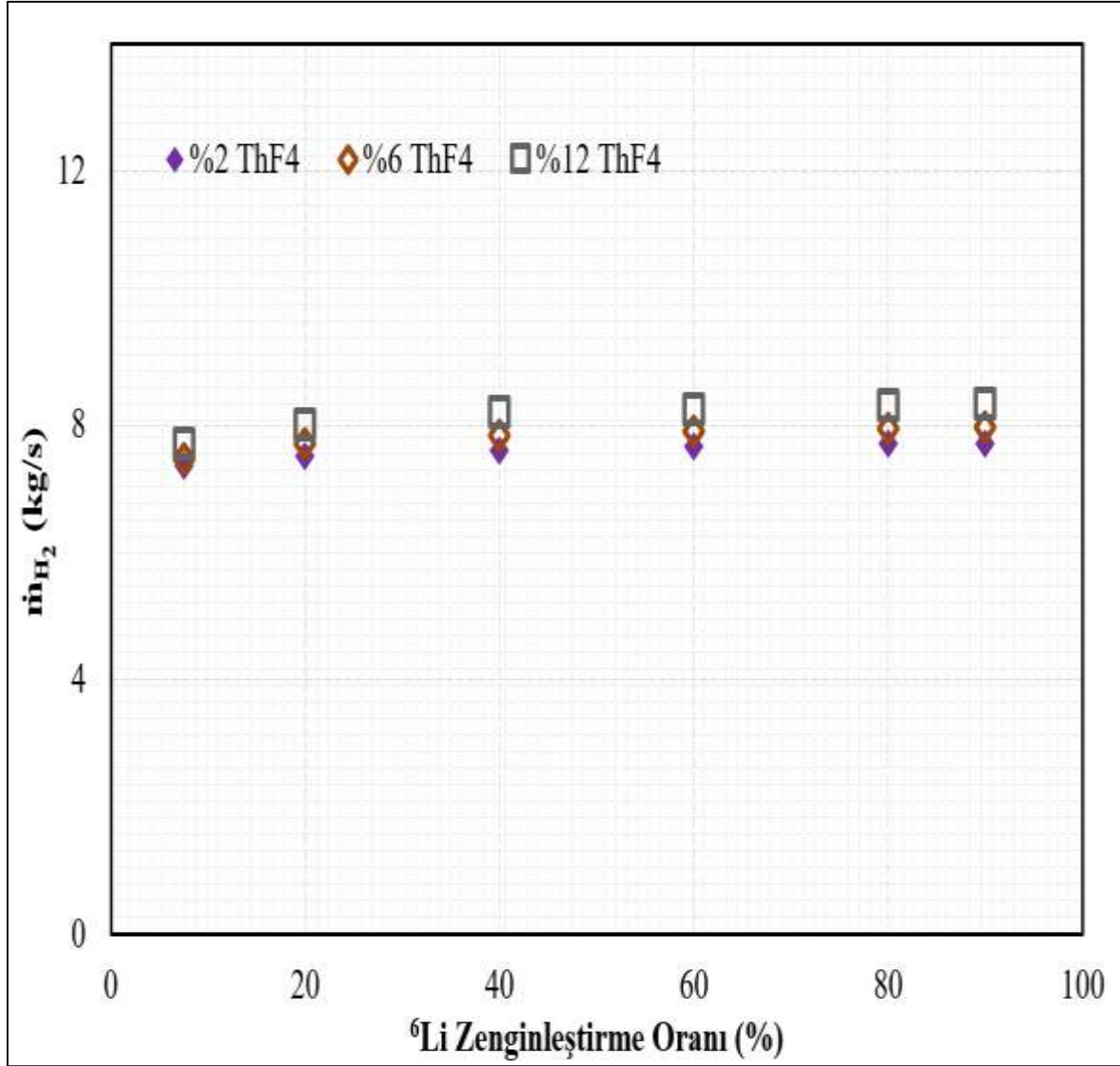
Şekil 6.21. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtıyla <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 6.21. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtıyla <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına göre değişimi

Şekil 6.21 incelendiğinde soğutucu akışkana karıştırılan nükleer yakıt oranı %2 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>, %6 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub> ve %12 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>'tür. Bu üç nükleer yakıt karışımı için <sup>6</sup>Li zenginleştirme %7,5 (doğal lityum), %20, %40, %60, %80 ve %90 oranlarında kullanılarak hidrojen üretim miktarı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yakıt oranlarındaki artış ve <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranındaki artış hidrojen üretim miktarını arttırmıştır. En yüksek hidrojen üretim miktarı %90 <sup>6</sup>Li zenginleştirme ve %12 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>'te gerçekleşmiştir ve demir klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrimiyle ~9,49 kg/s hidrojen üretilmiştir.

Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtıyla <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına göre değişimi Şekil 6.22'de verilmiştir.



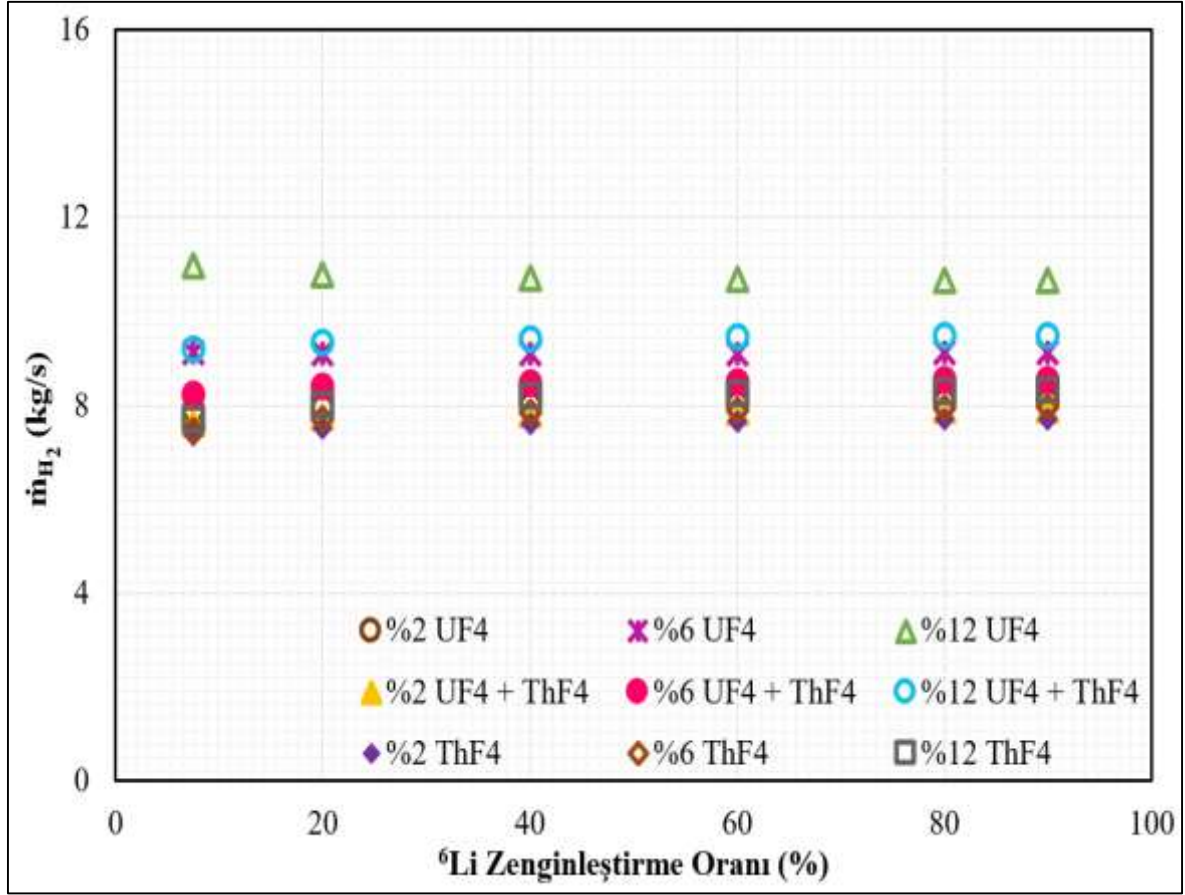
Şekil 6.22. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtıyla <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranına göre değişimi

Soğutucu akışkana karıştırılan ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtın ile <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranının PACER füzyon reaktörüne entegre edilmiş demir klor termokimyasal cevrimin hidrojen üretim miktarı üzerine etkisi incelenmiştir. <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranının artmasıyla hidrojen üretim miktarı artarken aynı zamanda nükleer yakıt olarak kullanılan ThF<sub>4</sub>'ün oransal olarak artması da hidrojen üretimini arttırmıştır. En düşük hidrojen üretim miktarı %7,5 <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranının yapıldığı ve %2 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt karışımından ~7,4 kg/s olarak elde edilmiştir. En yüksek hidrojen üretim oranı ise %90 <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranının yapıldığı ve %12 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt karışımından ~8,4 kg/s olarak elde edilmiştir.

### 6.2.6. Fe-Cl termokimyasal yönteminin hidrojen üretim miktarının karşılaştırılması

PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinde Fe-Cl termokimyasal yöntemi ile  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranına göre hidrojen üretim miktarının farklı nükleer yakıt ve farklı nükleer yakıt oranları ile hesaplanması Şekil 6.23. verilmiştir. Soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıtlar ve oranları; %2 ThF<sub>4</sub>, %6 ThF<sub>4</sub>, %12 ThF<sub>4</sub>, %2 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>, %6 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>, %12 UF<sub>4</sub> + ThF<sub>4</sub>, %2 UF<sub>4</sub>, %6 UF<sub>4</sub>, %12 UF<sub>4</sub>'tür. Bu nükleer yakıtların tüm oranları için  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme yapılarak PAER füzyon reaktöründen elde edilen termal güç oranı  $(1-\psi)$  ve toplam termal güç ( $P_{hpf}^{Fe-Cl}$ ) hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen verilerle Fe-Cl termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretimi yapan hidrojen üretim tesisinin ürettiği toplam hidrojen miktarı hesaplanmıştır.

Şekil 6.23 incelendiğinde üç nükleer yakıtın her birinde  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranının artması hidrojen üretim miktarını da beraberinde arttırmıştır. Örneğin PACER füzyon reaktörüne entegre edilen Fe- Cl termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretim miktarı soğutucu akışkana %2 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtının tüm  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranına göre, ~ 7,4 kg/s, ~7,5 kg/s, ~7,6 kg/s, ~7,66 kg/s, ~7,7 kg/s, ve ~7,72 kg/s olarak hesaplanmıştır. %6 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtının tüm  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranına göre değerleri ise; ~7,5 kg/s, ~7,7 kg/s, ~7,8 kg/s, ~7,9 kg/s, ~7,95 kg/s, ~7,97 kg/s'dir. %12 ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtının tüm  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranına göre değerleri ise; ~7,7 kg/s, ~8 kg/s, ~8,2 kg/s, ~8,26 kg/s, ~8,3 kg/s, ~8,4 kg/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.23. Fe-Cl için hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ )  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranına göre Değişimi

PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim miktarları üç farklı  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$  nükleer yakıt karışımı için tüm  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranlarına göre hidrojen üretim miktarları hesaplanmıştır. İlk olarak soğutucu akışkan içerisine karıştırılan %2  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$  nükleer yakıtı ile üretilen hidrojen miktarı;  $\sim 7,6$  kg/s,  $\sim 7,7$  kg/s,  $\sim 7,8$  kg/s,  $\sim 7,85$  kg/s,  $\sim 7,9$  kg/s,  $\sim 7,91$  kg/s'dir. Soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt oranı %6  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$  olduğunda;  $\sim 8,3$  kg/s,  $\sim 8,4$  kg/s,  $\sim 8,47$  kg/s,  $\sim 8,5$  kg/s,  $\sim 8,54$  kg/s ve  $\sim 8,56$  kg/s hidrojen üretimi hesaplanmıştır. Soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt oranı %12  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$  olduğunda;  $\sim 9,20$  kg/s,  $\sim 9,35$  kg/s,  $\sim 9,43$  kg/s,  $\sim 9,46$  kg/s,  $\sim 9,47$  kg/s ve  $\sim 9,49$  kg/s hidrojen üretimi hesaplanmıştır. Tüm  ${}^6\text{Li}$  zenginleştirme oranları için soğutucu akışkan içerisine karıştırılan %2  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$ , %6  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$ , %12  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$  nükleer yakıt karışımlarının hidrojen üretim miktarı ayrı ayrı incelendiğinde hidrojen üretim miktarı %12  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4 > \%6 \text{UF}_4 + \text{ThF}_4 > \%2 \text{UF}_4 + \text{ThF}_4$  'dir.

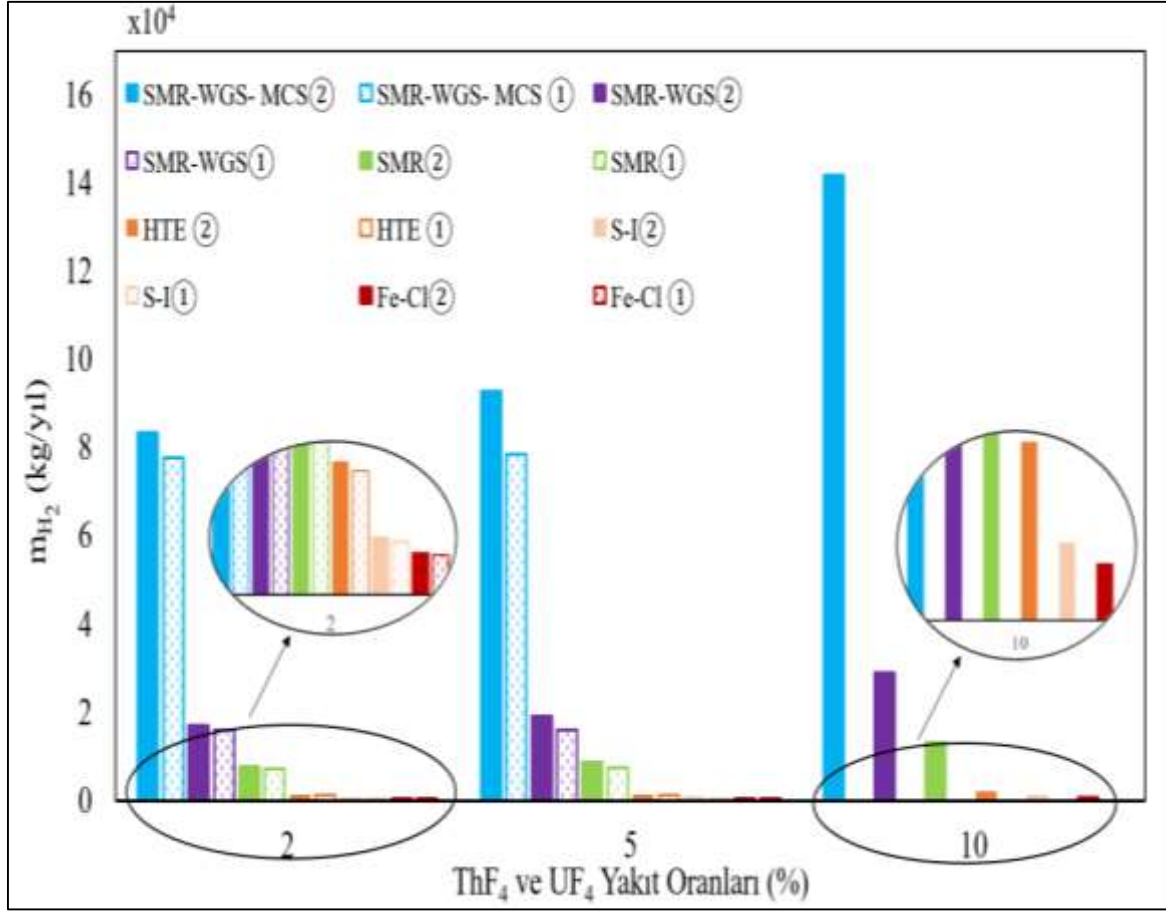
Son olarak PACER füzyon reaktörüne entegre edilen Fe-Cl termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretimi hidrojen üretimi için bir diğer parametre olan soğutucu akışkan karıştırılan %2 UF<sub>4</sub>, %6 UF<sub>4</sub>, %12 UF<sub>4</sub> nükleer yakıttır. Soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt oranı %2 UF<sub>4</sub> olduğunda tüm <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranları için hidrojen üretim miktarı sırasıyla; ~7,9 kg/s, ~7,98 kg/s, ~8,02 kg/s, ~8,05 kg/s, ~8,09 kg/s ve ~8,1 kg/s'dir. Soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt oranı %6 UF<sub>4</sub> olduğunda ~9,12 kg/s, ~9,09 kg/s, ~9,6 kg/s, ~9,11 kg/s, ~9,12 kg/s ve ~9,13 kg/s olarak hesaplanmıştır. Son olarak soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt oranı %12 UF<sub>4</sub> olması durumunda hidrojen üretim miktarı ~ 10,96 kg/s, ~10,77 kg/s, ~10,71 kg/s, ~10,68 kg/s, ~10,66 kg/s ve ~10,65 kg/s olarak hesaplanmıştır.

PACER füzyon reaktörüne entegre edilen Fe-Cl termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretimi hidrojen üretim tesisinin hidrojen üretim potansiyeli belirlemek için belirlenen parametreler kıyaslanmıştır. Bu parametreler sonucunda en iyi hidrojen üretim parametresi %7.5 (doğal lityum) <sup>6</sup>Li zenginleştirme oranında soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt oranı %12 UF<sub>4</sub>'te elde edilmiştir.

### 6.3. Üretilen Hidrojen Miktarlarının Karşılaştırılması

Bu tez kapsamında modifiye PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinde S-I, HTE, SMR ve Fe-Cl yöntemleri ile hidrojen üretim potansiyeli ve üretilen hidrojenlerin ekonomiklik açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu dört hidrojen üretim yönteminin karşılaştırılabilmesi için PACER füzyon reaktöründe belirlenen ortak parametrelerde hidrojen üretim miktarları karşılaştırılmıştır. Belirlenen parametreler; soğutucu bölge kalınlığı %25 (eriyik tuz + nükleer yakıt) + %75 boşluk, nükleer yakıt UF<sub>4</sub> ve ThF<sub>4</sub>, eriyik tuz Flibe ve nükleer yakıt oranları %2, %5 ve %10 olarak belirlenmiştir. ThF<sub>4</sub> verileri ① ve UF<sub>4</sub> verileri ② olarak tanımlanmıştır.

S-I, SMR ve Fe-Cl yöntemleriyle hidrojen üretimi için sadece ısıl enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu üç hidrojen üretim yöntemi ile hidrojen üretimi yapan tesisinin ihtiyaç duyduğu toplam termal güç ( $P_{hpf}$ ) ve termal güç oranı ( $1-\psi$ ) birbirine eşittir. Fakat üç yöntemin hidrojen üretim miktarları eşit değildir. HTE yöntemleriyle hidrojen üretimi için hem ısıl enerjiye hem de elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden HTE yönteminin termal güç oranı S-I, SMR ve Fe-Cl yöntemlerinin termal güç oranından daha küçüktür.



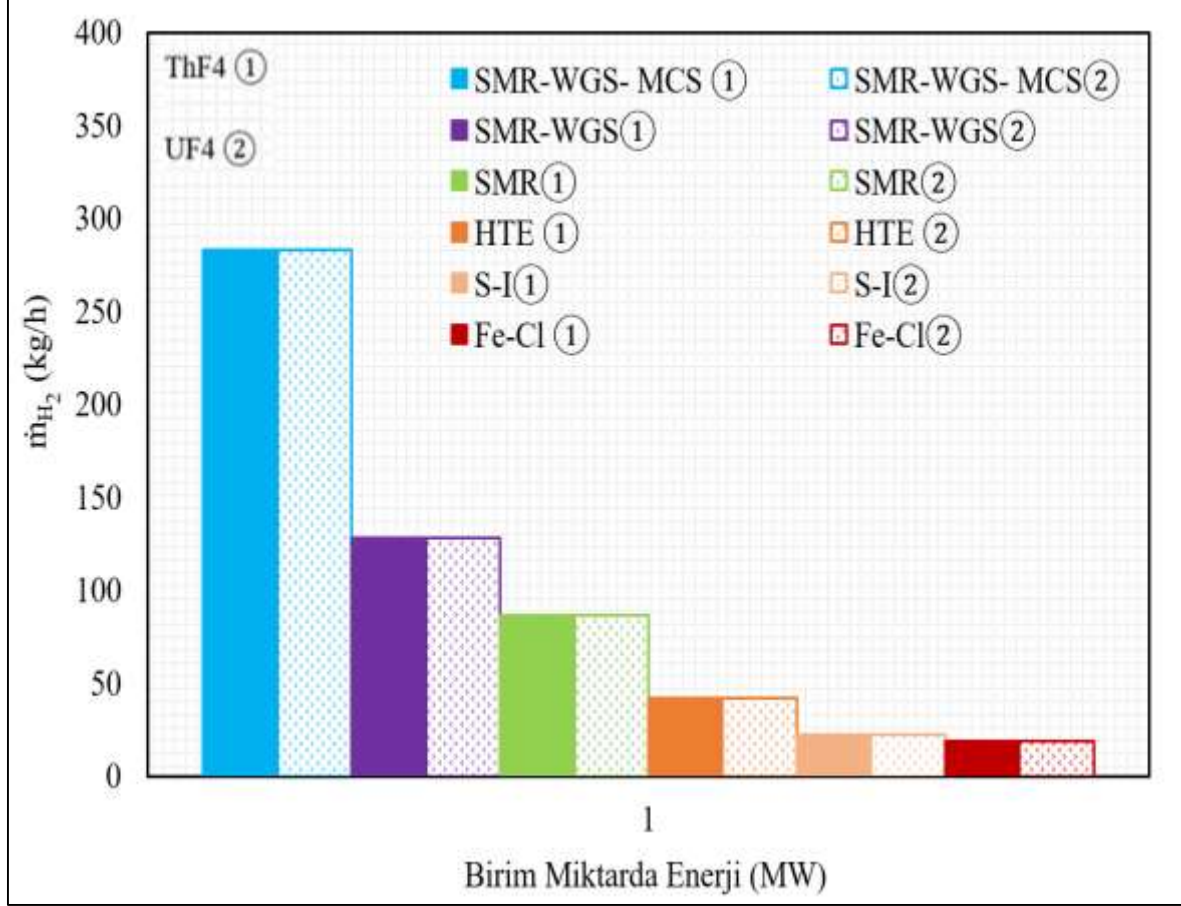
Şekil 6.24. S-I, HTE, SMR ve Fe-Cl yöntemleriyle hidrojen üretimi

Hidrojen üretimi açısından incelendiğinde en fazla hidrojen üretim miktarı soğutucu akışkan içerisine karıştırılan  $UF_4$  nükleer yakıtında ve SMR yönteminin SMR + WGS + MCS reaksiyonundan elde edilmiştir ve  $\sim 150$   $kg/s$ 'dir. En düşük hidrojen üretim miktarı ise soğutucu akışkan içerisine karıştırılan  $ThF_4$  nükleer yakıtında Fe-Cl termokimyasal yönteminde olmuştur ve  $\sim 5,6$   $kg/s$  olarak hesaplanmıştır. Çalışmada hesaplanan hidrojen miktarı literatürde yapılan çalışmalarla kıyaslanmış ve veriler aşağıda Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Literatürdeki farklı hidrojen üretim miktarlarının karşılaştırılması

Referanslar	Nükleer reaktörler	Analiz yöntemi	Nükleer Yakıt ve Soğutucular	Hidrojen Üretim Yöntemi	H <sub>2</sub> Üretim Miktarı (kg/s)
		Statik analiz		SMR+WGS+MCS	82 – 150 Aralığında
		Statik analiz		SMR+WGS	37 – 128 Aralığında
		Statik analiz	Eriyik tuz karışımı (FLiBe, ThF <sub>4</sub> ve UF <sub>4</sub> )	SMR	25 – 46 Aralığında
Bu Çalışma	PACER füzyon reaktörü	Statik analiz		HTE	8 – 42,5 Aralığında
		Statik analiz		S-I Termokimyasal Çevrimi	6,5 – 12 Aralığında
		Statik analiz		Fe-Cl Termokimyasal Çevrimi	5,6 – 10,2 Aralığında
		Statik analiz		SMR+WGS+MCS	80,76
		Statik analiz		SMR+WGS	36,61
		Statik analiz		SMR	24,73
Ref. [22]	PACER füzyon reaktörü	Statik analiz	Eriyik tuz karışımı (ThF <sub>4</sub> + LiF)	HTE	7,89
		Statik analiz		S-I Termokimyasal Çevrimi	6,41
Ref. [26]	PACER füzyon reaktörü	Statik analiz	Eriyik tuz karışımı (Flibe, ThF <sub>4</sub> ve UF <sub>4</sub> )	Fe-Cl Termokimyasal Çevrimi	7,36 – 10,96 Aralığında
Ref. [27]	FFHR füzyon reaktörü	Statik analiz	Eriyik tuz karışımı (FLiBe, ThF <sub>4</sub> ve UF <sub>4</sub> )	HTE	11,8
		Statik analiz		S-I Termokimyasal Çevrimi	11,25
Ref. [28]	LIFE füzyon reaktörü	Statik analiz	Eriyik tuz karışımı (ThF <sub>4</sub> + Li <sub>2</sub> BeF <sub>4</sub> )	Cu-Cl Termokimyasal Çevrimi	1,39
Ref. [30]	SOMBRERO füzyon reaktörü	Statik analiz	C, Li <sub>2</sub> O ve seramik yakıt parçacıkları	SMR+WGS	33

Aşağıda Şekil 6.25 incelendiğinde S-I, HTE, SMR ve Fe-Cl yöntemleriyle birim miktarda enerjiye göre hidrojen üretim miktarları verilmiştir.



Şekil. 6.25. S-I, HTE, SMR ve Fe-Cl yöntemleriyle birim miktarda enerjiye göre hidrojen üretimi

Şekil 6.25 incelendiğinde soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt ThF<sub>4</sub> ve UF<sub>4</sub> ile üretilen enerjinin birim miktarından elde edilen hidrojen üretim miktarlarının aynı hidrojen üretim yönteminde eşit olduğu görülmektedir. Örneğin soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt ThF<sub>4</sub> ve UF<sub>4</sub> ile üretilen enerjinin birim miktarı için Fe-Cl (1) ve Fe-Cl (2) yöntemi ile elde edilen hidrojen üretim miktarları eşittir. (SMR-WGS-MCS (1) = SMR-WGS-MCS (2), SMR-WGS (1) = SMR-WGS (2), SMR (1) = SMR (2), S-I (1) = S-I (2), HTE (1) = HTE (2))

Fakat soğutucu akışkan içerisine karıştırılan UF<sub>4</sub> nükleer yakıtı ile enerji üretimi ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtıyla üretilen enerjiden daha fazladır (UF<sub>4</sub> > ThF<sub>4</sub>). Böylece soğutucu akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt UF<sub>4</sub> nükleer yakıtı ile üretilen hidrojen miktarı soğutucu

akışkan içerisine karıştırılan nükleer yakıt  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtı ile üretilen hidrojen miktarından daha fazladır.  $\text{ThF}_4$  ve  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtlarının birim fiyatları 35\$/kg olarak kabul edilmiştir [76]. Aynı hacimde  $\text{ThF}_4$  ve  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtları için aynı oranlar dikkate alındığında aynı miktarda yakıt kullanılmış ve aynı miktarda ücrete mal edilmiştir. Fakat  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtından daha fazla enerji elde edilmiştir.

#### 6.4. Farklı Yöntemlerle Üretilen Hidrojenin Ekonomiklik Durumlarının Karşılaştırılması

PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinde dört farklı yöntemle elde edilen hidrojen miktarlarından elde edilen satış gelirleri hesaplanmış ve ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır.

PACER füzyon tesisinde üretilen hidrojenin satış geliri aşağıda verilen Eşitlik 6.5 ile hesaplanmıştır [77].

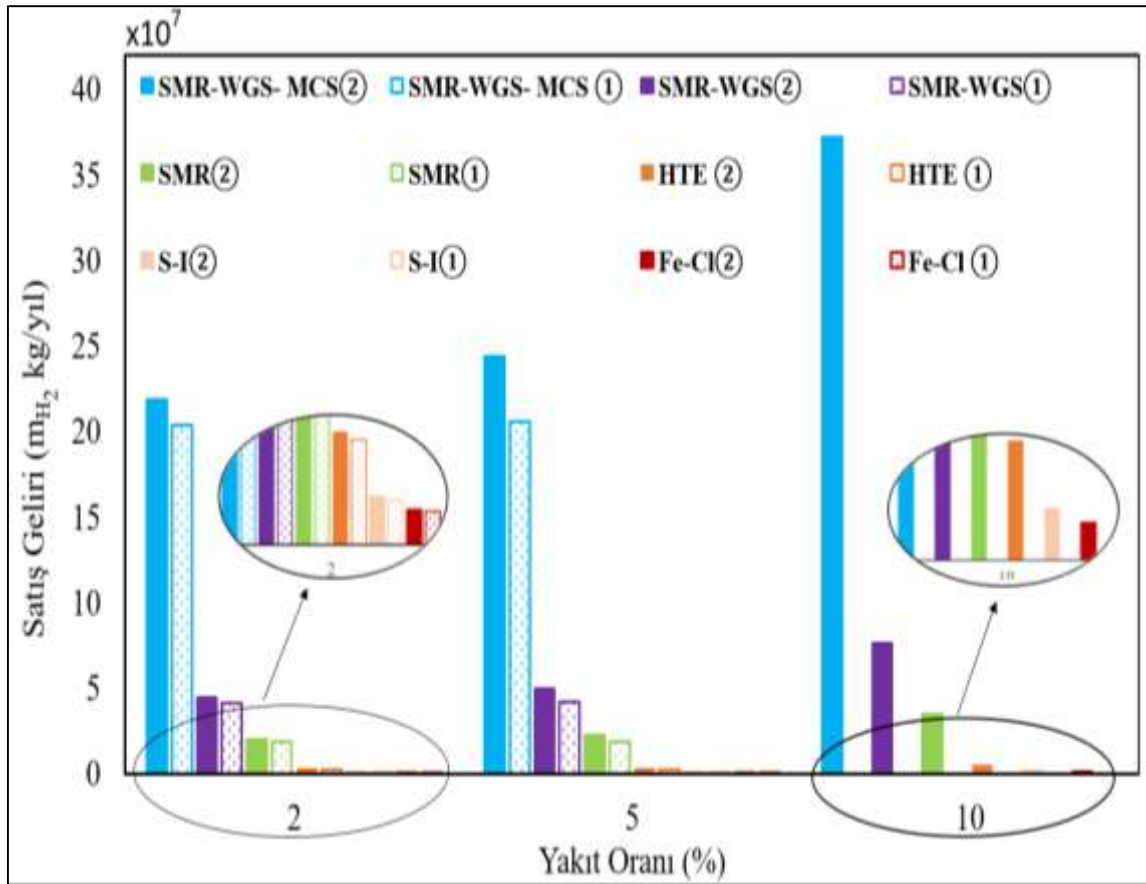
$$\text{Satış Geliri} = \text{Satış Miktarı} \times \text{Satış Fiyatı} (\$/\text{kg.s}) \quad (6.5)$$

Eşitlik 6.2'de verilen satış miktarı her bir hidrojen üretim yöntemi ile üretilen hidrojen miktarını ifade ederken satış fiyatı ise ortama 1,67 \$/kg olarak kabul edilmiştir.

PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinden hidrojen üretim yöntemlerine göre hidrojen fiyatını ortalama 1,67 \$/kg olarak kabul ettiğimizde üretilen hidrojen miktarına bağlı olarak toplam satış geliri hesaplanmıştır [78]. Aşağıda Şekil 6.26'da yakıt oranına göre üretilen hidrojenin toplam satış geliri verilmiştir.

İlk olarak soğutucu içerisine karıştırılan yakıt türüne göre Şekil 6.26 incelendiğinde aynı oranda  $\text{ThF}_4$  ve  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtı kullanılmasına rağmen  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtı ile elde edilen hidrojen miktarının fazla olması satış gelirinin de bu oranda fazla olduğunu göstermektedir. S-I, HTE, SMR ve Fe-Cl yöntemleriyle hidrojen satış gelirleri kıyaslandığında SMR-WGS-MCS ① < SMR-WGS-MCS ②, SMR-WGS ① < SMR-WGS ②, SMR ① < SMR ②, S-I ① < S-I ②, HTE ① < HTE ② Fe-Cl ① < Fe-Cl ②'dir.

İkinci olarak soğutucu içerisine karıştırılan  $\text{ThF}_4$  ve  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtlarının oranlarını kıyaslanmıştır.  $\text{ThF}_4$  ve  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtlarının oranlarının atması hidrojen üretim miktarını arttırırken buna paralel olarak toplam satış gelirlerini de arttırmıştır. En yüksek hidrojen satış geliri %10  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtın soğutucu akışkana karıştırılmasıyla ve SMR yönteminin üçlü reaksiyonu olan SMR-WGS-MCS ②'den elde edilmiştir ve  $\sim 37,23 \times 10^7$  \$/kg.yıl'dır.  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtı dikkate alındığında en düşük hidrojen satış geliri soğutucu akışkana karıştıran nükleer yakıtın %2 oranında ve Fe-Cl termokimyasal çevriminde  $\sim 0,094 \times 10^7$  \$/kg.yıl olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.26. Yakıt oranına göre üretilen hidrojenin toplam satış geliri

Reaksiyonun kendi kendini devam ettirmesi için gerekli olan  $\text{TBR} > 1,05$  koşulu sadece soğutucu akışkana karıştıran %10  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtında sağlanamamıştır. Bu yüzden soğutucu akışkana karıştıran %10  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıt karışımından enerji elde edilememiştir. Bu duruma bağlı olarak herhangi bir hidrojen üretiminden ve hidrojen satış gelirinden bahsedilememiştir.

Soğutucu akışkana karıştıran nükleer yakıtın %2 UF<sub>4</sub> oranında Fe-Cl, S-I, HTE, SMR-WGS-MCS, SMR-WGS ve SMR hidrojen üretim yöntemlerinin satış gelirleri sırasıyla;  $\sim 0,10 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,13 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,32 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $21,91 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $4,50 \times 10^7$  \$/kg.yıl ve  $2,05 \times 10^7$  \$/kg.yıl'dır. %5 UF<sub>4</sub> oranında Fe-Cl, S-I, HTE, SMR-WGS-MCS, SMR-WGS ve SMR hidrojen üretim yöntemlerinin satış gelirleri sırasıyla;  $\sim 0,11 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,15 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,35 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $24,40 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $5,01 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $2,28 \times 10^7$  \$/kg.yıl'dır. %10 UF<sub>4</sub> oranında Fe-Cl, S-I, HTE, SMR-WGS-MCS, SMR-WGS ve SMR hidrojen üretim yöntemlerinin satış gelirleri ise sırasıyla;  $\sim 0,17 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,23 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,54 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $37,23 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $7,65 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $3,49 \times 10^7$  \$/kg.yıl olarak hesaplanmıştır.

Soğutucu akışkana karıştıran nükleer yakıtın %2 ThF<sub>4</sub> oranında Fe-Cl, S-I, HTE, SMR-WGS-MCS, SMR-WGS ve SMR hidrojen üretim yöntemlerinin satış gelirleri sırasıyla;  $\sim 0,094 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,12 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,29 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $20,40 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $4,19 \times 10^7$  \$/kg.yıl ve  $1,91 \times 10^7$  \$/kg.yıl'dır. %5 ThF<sub>4</sub> oranında Fe-Cl, S-I, HTE, SMR-WGS-MCS, SMR-WGS ve SMR hidrojen üretim yöntemlerinin satış gelirleri sırasıyla;  $\sim 0,095 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,13 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $0,30 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $20,62 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $4,23 \times 10^7$  \$/kg.yıl,  $1,93 \times 10^7$  \$/kg.yıl'dır. %10 ThF<sub>4</sub> oranında TBR < 1,05 olduğundan dolayı hidrojen üretimi gerçekleşmemiştir.

### 6.5. Hidrojen Üretiminin Karbon Salımı Üzerine Etkisi

Karbon salımı; insan kaynaklı faaliyetler sonucunda doğada oluşan karbonun atmosfere salımı olarak tanımlanır. Karbon salımının en büyük kaynağı fosil yakıtlardır ve sanayi devrimi ile karbon salımı miktarı artarak devam etmiştir. Karbon salımının çevre üzerinde olumsuz etkileri mevcuttur. Bunların en başında ise aşırı hava olayları, doğal afetler ve iklim değişiklikleri gelmektedir [79]. Bu olumsuz etkiler insan yaşamının kalitesini düşürmekte hatta insan yaşamını olumsuz yönde etkilemektedir. Tüm bu olanlar sadece bir ülkeyi veya sadece bir kıtayı değil bütün dünyayı etkilemektedir. Bunun için karbon salımı konusuna tüm dünya büyük önem vermektedir. İlk olarak 1997 yılında yürürlüğe giren Kyoto protokolü ile karbon salımının önemi gündeme gelmiştir. Böylece piyasa mekanizmaları karbon salımı ile mücadelede yeni bir yol olarak ilk kez önerildi. İşletmeleri karbon salımı konusunda duyarlılığa teşvik ederken, karbon salımı konusuna uymayan işletmeler için ise "kirleten öder prensiplerini" devreye koyar. Ayrıca daha sonra karbon salımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin; Avrupa Birliği tarafından 2020 yılında, Karbon İklim

Yasasının ve Avrupa Yeşil Anlaşmasının yürürlüğe girmesiyle 2050 yılına kadar karbon nötr vizyona ulaşmayı hedeflemişlerdir [80].

Karbon salımı konusunda Türkiye 2004 yılında Avrupa iklim yasasını, 2009 yılında Kyoto protokolünü, 2016 yılında ise Paris Antlaşması'nı imzalamıştır. Ülkemiz enerjisinin büyük bir kısmını fosil yakıtlardan elde etmektedir. Karbon salımını azaltmak için ise yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük önem vermektedir. Ülkemizde alternatif yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermaller vb. kullanılmaktadır. Ayrıca 2023-2030 yılları arasında ise ülkemizin %10'luk elektrik tüketimini karşılayabilecek üç nükleer santral açılacaktır.

Enerji taşıyıcısı olan hidrojenin üretimi ve kullanımı ise karbon salımı açısından incelendiğinde hidrojen eğer yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji ile üretilirse karbonsuzlaşma gerçekleşecektir. Ayrıca hidrojenin kullanımı sırasında ise herhangi bir karbon salımı meydana gelmemektedir. Yani hem dünyanın hem de Türkiye'nin karbon salımı konusunda ihtiyacı olan iki parametre; hidrojen ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Bu tez çalışmasında işletilmesi esnasında hiçbir karbon salımı yapmayan PACER füzyon reaktörü enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Enerji taşıyıcı olan hidrojen üretimi için ise PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinde SMR, HTE, S-I ve Fe-Cl döngüleri kullanılmıştır. Buhar-metan reformasyonu (SMR) en fazla kullanılan hidrojen üretim yöntemidir. Bu yöntemde karbon salımını önlemek için üç adımlı SMR+WGS+MCS reaksiyonu kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıkta elektroliz yönteminde ise elektrik ve ısı enerjisi kullanılarak sudan hidrojen üretilmektedir. Bu yöntemde herhangi bir karbon salınımından bahsedilemez. Son olarak kükürt-iyot (S-I) ve demir-klor (Fe-Cl) termokimyasal çevrimlerinde ise sisteme ısı enerjisinin yanı sıra sadece su girmektedir. Çevrimin diğer elementleri sistemde kalmaktadır ayrıca bu elementler karbon içermezler. Böylece SMR, HT, S-I ve Fe-Cl yöntemleriyle hidrojen üretimi karbon salımı açısından doğa dostudur.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında PACER füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim tesisinde üretilen hidrojen miktarı incelenmiştir. Bu kapsamda iki farklı çalışmanın nötronik analizleri yapılarak trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) değerleri elde edilmiştir. Her iki çalışmada da elde edilen M değerine bağlı olarak hidrojen üretim potansiyelleri incelenmiştir. İlk çalışmada hidrojen üretimi yöntemi olarak kükürt-iyot termokimyasal çevrimi (S-I), Yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve buhar-metan reformasyonu (SMR) çevrimleri kullanılmıştır. İkinci çalışmada ise demir-klorür termokimyasal çevrimi (Fe-Cl) kullanılmıştır. Son çalışmada ise ortak parametreler kullanılarak demir-klorür termokimyasal çevrimi (Fe-Cl), kükürt-iyot termokimyasal çevrimi (S-I), yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve buhar-metan reformasyonu (SMR) çevrimleri kullanılmış ve hidrojen üretim potansiyelleri kıyaslanmış ve ekonomiklik açısından incelenmiştir. Çalışmalar için yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- S-I termokimyasal yöntemi ve SMR yöntemi için gerekli olan toplam termal güç ( $P_{hpf}$ ) ve termal güç oranı ( $1-\psi$ ) miktarları mod ② ve mod ①'de her bir yakıt durumu için kıyaslandığında S-I termokimyasal yöntemiyle hidrojen üretimi yapmak SMR yöntemi ile hidrojen üretimi yapmaktan çok daha azdır.
- Mod ② hacim bölgesi mod ① hacim bölgesinden büyüktür. Bu durum ise toplam termal gücün ( $P_{hpf}$ ), termal güç oranının ( $1-\psi$ ) ve hidrojen üretim miktarının ( $\dot{m}$ ) artmasını sağlamaktadır yani mod ②'den alınan bu üç veri her zaman mod ①'den alınan verilerden daha yüksektir. Bu da hacmin artmasının hidrojen üretimi üzerinde olumlu etkisi olduğunu gösterir.
- Soğutucu akışkan LiF'e karıştırılan ThF<sub>4</sub> nükleer yakıtının artması hidrojen üretim miktarını ( $\dot{m}$ ), termal güç oranı ( $P_{hpf}$ ) ve toplam termal gücü ( $1-\psi$ ) arttırmıştır.
- Mod ① soğutucu akışkana karıştırılan ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranına göre kıyaslandığında TBR değeri ~1,18; 1,14; 1,09; 1,05; 1,01 iken, mod ②'de TBR değeri ~1,21; 1,16; 1,13; 1,09 ve 1,04 olarak hesaplanmıştır.
- %2, %5 ve %10 oranlarında soğutucu akışkana karıştırılan ThF<sub>4</sub> ve UF<sub>4</sub> nükleer yakıtlarından sadece %10 ThF<sub>4</sub> oranının TBR değeri 1,05'ten küçüktür. Ayrıca soğutucu akışkana karıştırılan ThF<sub>4</sub> nükleer yakıt oranının artması TBR değerini düşürmüştür.

- Soğutucu akışkana karıştırılan  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıt oranının artması enerji çoğaltım faktörü (M) değerini arttırmıştır. En yüksek M değeri %25  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıt karışımından elde edilmiştir fakat bu durumda TBR değeri 1.05'ten küçük olduğu için reaktör kendi kendini devam ettiremeyeceği için bu M değeri için hidrojen üretiminden söz edilememiştir.
- S-I ve SMR yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu termal güç oranı ( $1-\psi$ ), HTE yönteminin ihtiyaç duyduğu termal güç oranından büyüktür. Çünkü S-I ve SMR yöntemi sadece termal güce ihtiyaç duyarken HTE yöntemi hem termal güce hem de elektriksel güce ihtiyaç duymaktadır.
- Mod ① parametreleri dikkate alındığında hidrojen üretim tesisinde en az hidrojen üretimi %5  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtından elde edilmiştir. Hidrojen üretim yöntemleri S-I, HTE, SMR, SMR+WGS ve SMR+WGS+MCS'de sırasıyla;  $\sim 6,4$  kg/s,  $\sim 7,9$  kg/s,  $\sim 24,7$  kg/s,  $\sim 36,6$  kg/s, ve  $\sim 80,8$  kg/s olarak hesaplanmıştır.
- Mod ② parametreleri dikkate alındığında hidrojen üretim tesisinde en fazla hidrojen üretimi %25  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtından elde edilmiştir. S-I, HTE, SMR, SMR+WGS ve SMR+WGS+MCS yöntemleriyle üretilen hidrojen miktarı sırasıyla;  $\sim 7,1$  kg/s,  $\sim 8,8$  kg/s,  $\sim 27,5$  kg/s,  $\sim 40,7$  kg/s ve  $\sim 90$  kg/s olarak hesaplanmıştır.
- PACER füzyon reaktörüne entegre edilen Fe-Cl termokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi yapılan tesiste üretilen hidrojen miktarı soğutucu akışkana karıştırılan üç farklı nükleer yakıt oranına göre  $\text{UF}_4 > \text{UF}_4 + \text{ThF}_4 > \text{ThF}_4$  şeklinde olmuştur. Ayrıca sadece soğutucu akışkana karıştırılan %12  $\text{UF}_4$  %12  $\text{UF}_4 + \text{ThF}_4$  ve %12  $\text{ThF}_4$  nükleer yakıtlarının %7,5  $^6\text{Li}$  zenginleştirme oranlarında TBR değeri 1,05'ten küçüktür.
- Fe-Cl termokimyasal yöntemi ile hidrojen üretimi yapılan tesiste ihtiyaç duyulan toplan termal güç ( $P_{hpf}$ ) soğutucu akışkanı karıştırılan nükleer yakıt oranının artmasıyla artış göstermektedir.
- Aynı oranında  $\text{ThF}_4$  ve  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtların S-I, HTE, SMR ve Fe-Cl yöntemleriyle elde edilen hidrojen satış tutarları kıyaslandığında SMR-WGS-MCS ① < SMR-WGS-MCS ②, SMR-WGS ① < SMR-WGS ②, SMR ① < SMR ②, S-I ① < S-I ②, HTE ① < HTE ② Fe-Cl ① < Fe-Cl ②'dir.
- $\text{ThF}_4$  ve  $\text{UF}_4$  nükleer yakıtlarının birim miktarda hidrojen üretimi kıyaslandığında; Fe-Cl ① ve Fe-Cl ②, SMR-WGS-MCS ① = SMR-WGS-MCS ②, SMR-WGS ① = SMR-WGS ②, SMR ① = SMR ②, S-I ① = S-I ②, HTE ① = HTE ②'dir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmanın sonuçları yukarıda maddeler halinde verilmiştir. Ayrıca elde edilen bu sonuçlar neticesinde hidrojen üretimine katkı sağlamak amacıyla öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Hidrojen üretim miktarını arttırabilmek için farklı oralarda nükleer yakıt kullanılarak zamana bağlı hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir.
- PACER füzyon reaktörünün geometrisinde farklı dizaynlar yapılarak daha fazla enerji üretimi gerçekleştirilebilir.
- PACER füzyon reaktöründe farklı soğutucu akışkanlar kullanılarak ve/veya farklı nükleer yakıtlar farklı oranlarda kullanılarak daha fazla hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir.
- PACER füzyon reaktöründe hidrojen üretim miktarını ve verimini arttırabilmek için ara ısı değiştiricisi başta olmak üzere tesiste kullanılan sistem elemanlarının daha yüksek verimliliğe sahip olanları seçilebilir.
- Bu tez kapsamında yapılan tüm çalışmalarda en düşük hidrojen üretim miktarı Fe-Cl termokimyasal yöntemine ait olmasına rağmen reaksiyonda kullanılan tüm elementler diğer üç yöntemle kıyaslandığında hem daha ucuzdur hem de kolay tedarik edilebilir. Bu yüzden Fe-Cl termokimyasal yöntemi daha fazla araştırılmalıdır.

PACER füzyon reaktörünün çalışması incelenmiş elde edilen nötronik analizler sonucunda hidrojen üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. Sonuç olarak PACER füzyon reaktörünün iyi bir güç kaynağı olduğu ve reaktöre hidrojen üretim tesisinin entegre edilebilir olduğu görülmüştür. Ayrıca entegre edilen hidrojen üretim tesisinde kullanılan hidrojen üretim yöntemleri ile yüksek miktarda hidrojen üretimi gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu tez kapsamında yapılan tüm çalışmalarda en yüksek hidrojen üretim potansiyeli SMR yöntemine ait olmakla beraber HTE, S-I ve Fe-Cl yöntemleri ile de hidrojen üretimi gerçekleştirildiği görülmüştür. Ayrıca reaktörden elde edilen enerjiye bağlı olarak yüksek ısı enerjisi ve elektrik enerjisi kullanılması durumunda tüm hidrojen üretim yöntemlerinde üretilen hidrojen miktarlarının arttığı görülmüştür.



## KAYNAKLAR

1. Aydın, M. İ. ve Diçer, İ. (2022). An assessment study on various clean hydrogen production methods. *Energy*, 245(15), 123090.
2. Shah, M., Prajapati, M., Yadav, K. and Sircar, A. (2022). A review of the geothermal integrated hydrogen production system as a sustainable way of solving potential fuel shortages. *Journal of Cleaner Production*, 380(20), 135001.
3. Gao, Q., Qu, X., Peng, W., Zhang, P. and Chen S. (2022). Influence of obstacle morphology on safety of nuclear hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(86), 36733-36748.
4. Rosen, M. A., (2010). Advances in hydrogen production by thermochemical water decomposition: A review. *Energy*, 35(2), 1068-1076.
5. Yuan, L., and Steinle-Neumann G. (2023). Hydrogen distribution between the Earth's inner and outer core. *Earth and Planetary Science Letters*, 609, 118084.
6. Yan, X. L. and Hino, R. (Eds.). (2011). Nuclear hydrogen production handbook. Florida: *CRC Press*, 47-49.
7. Funk, J.E. and Reinstrom, R.M. (1966). Energy requirements in the production of hydrogen from water. *IEEC Process Design and Development*, 5, 336-342.
8. Baldwin, D., Campbell, M., Ellis C., Richards, M. and Shenoy, A. (2008). MHR desing, technology and applictions. *Energy Conversion and Management*, 49(7), 1898-1901.
9. Revankar, S. T. (2013). Transient analysis of coupled high temperature nuclear reactor to a thermochemical hydrogen plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(14), 6174-6181.
10. Juarez-Martínez, L.C., Espinosa-Paredes G., Vazquez-Rodríguez A., and Romero-Paredes H. (2021). Energy optimization of a Sulfure -Iodine thermochemical nuclear hydrogen production cycle. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(6), 2066-2073.
11. Elder, R. and Allen, R. (2009). Nuclear heat for hydrogen production: Coupling a very high/high temperature reactor to a hydrogen production plant. *Progress in Nuclear Energy*, 51(3), 500–525.
12. Canavesio, C., Nassini, H. E. and Bohé, A. E. (2015). Evaluation of an iron-chlorine thermochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(28), 8620-8632.
13. Safari F. ve Diçer İ. (2020). A study on the Fe–Cl thermochemical water splitting cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 18867-18875.

14. Lewis, M. and Masin, J. G. (2009). The evaluation of alternative thermochemical cycles – Part II: The down-selection process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9), 4125-4135.
15. Oruç, O. ve Dinçer, İ. (2021). Assessing the potential of thermo-chemical water splitting cycles: A bridge towards clean and sustainable hydrogen generation. *Fuel*, 286(2), 119325.
16. Karaca, A. E., Qureshy, A.M.M.I. and Dinçer, İ. (2023). An overview and critical assessment of thermochemical hydrogen production methods. *Journal of Cleaner Production*, 385(20), 135706.
17. Lemont, F. (2008). Promising optimization of the CeO<sub>2</sub>/CeCl<sub>3</sub> cycle by reductive dissolution of cerium(IV) oxide. *International Journal Hydrogen Energy*, 33(24), 7355-7360.
18. Shin, Y., Park, W., Chang, J., and Park, J. (2007). Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen. *International Journal Hydrogen Energy*, 32(10-11), 1486 – 1491.
19. Cheng, Y.S., Pen˜a, M.A., and Yeung, K.L. (2009). Hydrogen production from partial oxidation of methane in a membrane reactor. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 40(3), 281–288.
20. Sakaba, N., Kasahara, S., Onuki, K., and Kunitomi, K. (2007). Conceptual design of hydrogen production system with thermochemical water-splitting iodine–sulphur process utilizing heat from the high-temperature gas-cooled reactor HTTR. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), 4160-4169.
21. Greyvenstein, R., Correia, M., and Kriel, W. (2008). South Africa’s opportunity to maximise the role of nuclear power in a global hydrogen economy. *Nuclear Engineering and Design*, 238(11), 3031–3040.
22. Asal, Ş., Özkaya, M., ve Acır, A. (2023). A study of hydrogen production by using SMR, S-I and HTE methods in a PACER fusion concept based on thorium molten salt fuel. *Fuel*, 333 (2), 126602.
23. Balta, M. T., Dincer, İ., ve Hepbasli, A., (2016). Comparative assessment of various chlorine family thermochemical cycles for hydrogen production. *International Journal Hydrogen Energy*, 41(19), 7802-7813.
24. Acır, A. ve Aktı, S. (2019). LIFE füzyon reaktöründe yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi ile hidrojen üretimi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 1-8.
25. Mehrpooya, M. and Habibi, R., (2020). A review on hydrogen production thermochemical water-splitting cycles. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123836.
26. Özkaya, M, Acır, A and Yalçın, Ş., (2023), Investigation of the hydrogen production of the PACER fusion blanket integrated with Fe–Cl thermochemical water splitting cycle. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(11), 4287-4294.

27. Özişik, G., Demir, N., Übeyli, M. ve Yapıcı H., (2010). Hydrogen production via water splitting process in a molten-salt fusion breeder. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(14), 7357-7368.
28. Acır, A. ve Asal, Ş., (2021). Investigation of the hydrogen production of a laser FUSION driver thorium breeder using various coolants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(10), 7087-7098.
29. Asal, Ş. ve Acır, A., (2021). Utilization of the Cu–Cl thermochemical cycle for hydrogen production using a laser driver thorium molten salts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(61), 31133-31142.
30. Demir, N., (2013). Hydrogen production via steam-methane reforming in a SOMBRERO fusion breeder with ceramic fuel particles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(2), 853-860.
31. Genç, G., (2010). Hydrogen production potential of APEX fusion transmuter fueled minor actinide fluoride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), 10190-10201.
32. Asal, Ş. ve Acır, A., (2022). A study on nuclear hydrogen production using a novel approach cobalt-chlorine thermochemical cycle in a laser driver fission fusion blanket for various molten salt fuels. *Progress in Nuclear Energy*, 153, 104443.
33. Asal, Ş. ve 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.
34. Sadowski, M. (2005). Nuclear fusion-energy for future. *Nukleonika*, 50, 53-58.
35. Şahin, S., Khan, M. J. and Ahmed, R., (2011). Fissile fuel breeding and minor actinide transmutation in the life engine. *Fusion Engineering and Design*, 86(2–3), 227–237.
36. Acır, A. (2013). Neutronic analysis of the laser inertial confinement fusion-fission energy (LIFE) engine using various thorium molten salts. *Journal of Fusion Energy*, 32(6), 634–641.
37. Hammond, R.P., Hubbard, H. W. and Dooley, J. L., (1982). Practical fusion power. *Mechanical Engineering*, 104(7), 34 – 43
38. Moir, R.W., (1989). PACER revisited. *Fusion Technology*, 15, 1114.
39. Szöke, A., and Moir, R.W., (1991). A realistic, gradual and economical approach to fusion power, *Fusion Technology*, 20, 1012-1020.
40. Szoke, A. and Moir, R.W., (1991). A Practical Route to Fusion Power. *Technology Review*, 94, 20

41. Rozanov, V. B, Verdon, C P, Decroisette, M, Gus'kov, S Y, Lindl, J D, Nishihara, K, and Takabe, H., (1995). Inertial confinement target physics. *Energy from Inertial Fusion*, IAEA, Vienna, 21-69
42. Acır, A. (2004). *PACER Füzyon Reaktöründe Yakıt ve Enerji Üretiminin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 31-46.
43. Morse, E. (2020). Nuclear fusion. California: Elsevier Inc, 1-9.
44. Bakır, G. (2013). *Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Nükleer Hidrojen Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 25-28.
45. Kalamaras, C. M. ve Efstathiou, A. M. (2013). Hydrogen production technologies: Current state and future developments. *Conferans Papers in Energy*, 1-9.
46. Özdemir, Z. Ö. ve Mutlubaş, H. (2019). Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 2(1), 16-34.
47. Şahin, S., Yalçın, Ş., ve Yıldız, K. (2003). Fissile fuel breeding with peaceful nuclear explosives. *Fusion Engineering and Design*, 65 (4), 643-656.
48. Call, C.J., and Moir, R.W. (1990). A Novel Fusion Power Concept Based on Molten-Salt Technology: PACER Revisted. *Nuclear Engineering and Technology*, 104, 364.
49. Koşar, C. (2021). Hydrogen Storage Methods. *Open Journal of Nano*, 6(1), 1-10.
50. Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L. and Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139(4), 244-260.
51. Lackner, K. S., Wendt, C. H., Butt, D. P., Joyce, E. L. and Sharp, D. H. (1995). Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*, 20(11), 1153-1170.
52. Prigiobbe V., Hänchen M., Werner M., Baciocchi R. and Mazzotti M. (2009). Mineral carbonation process for CO2 sequestration. *Energy Procedia*, 1(1), 4885-4890.
53. İnternet: Yeşil enerji. URL: <https://yeserenerji.com/yesil-hidrojen-uretiminde-elektroliz-yontemleri/> Son Erişim Tarihi: 03.12.2023.
54. Gördesel, M., Zıraman, D. U., Doğan, Ö. M., ve Uysal, B.Z. (2020). Effect of different parameters on hydrogen production by electrochemical reforming of glycerol. *GUJ Sci, Part C*, 8(2), 439-450
55. Henderson, A. D. and Taylor A. (2005). Nuclear Production of Hydrogen, *Third Information Exchange Meeting Oarai, Japan*, 73-77.
56. Fujiwara, S., Kasai, S., Yamauchi, H., Yamada, K., Makino, S., Matsunaga, K., Yoshino, M., Kameda, T., Ogawa, T., Momma, S. and Hoashi, E. (2008). Hydrogen production by high temperature electrolysis with nuclear reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 50(2-6), 422-426.

57. Acır, A. ve 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.
58. Yang A., Ying Z., Zhao M., Zheng X., Dou B., and Cui G. (2024). Process modelling and assessment of thermochemical sulfur-iodine cycle for hydrogen production considering Bunsen reaction kinetics. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 195, 109624.
59. Liu H., Ye H., Wang Q., and Dong H. (2024). Design and evaluation of a novel process for green hydrogen production in the iodine–sulfur cycle via pressure-swing distillation of HIx (HI-I<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O). *Separation and Purification Technology*, 330, Part A, 125257.
60. Lanchi, M., Ceroli, A., Liberatore, R., Marrelli, L., Maschiatti, M., Spadoni, A., and Tarquini, P. (2009). S–I thermochemical cycle: A thermodynamic analysis of the HI–H<sub>2</sub>O–I<sub>2</sub> system and design of the HIx decomposition section. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(5), 2121-2132.
61. Aktı, S. (2019). *Life Füzyon Reaktörünün Hidrojen Üretim Potansiyelinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 43-52.
62. Brown, L. C., Lentsch, R. D., Besenbruch, G. E. and Schultz, K. R. (2003). Alternative flowsheets for the sulfur-iodine thermochemical hydrogen cycle, *General Atomics*, 35(20), 1-19.
63. Safari F. and Dinçer İ. (2020). A study on the Fe–Cl thermochemical water splitting cycle for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*, 45(38), 18867-18875.
64. Canavesio C., Nassini H. E., Bohé A. E. (2015). Evaluation of an iron-chlorine thermochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(28), 8620-8632.
65. Cengel Y., Boles M., In: *Thermodynamics an engineering approach*. 2012.
66. İnternet: “NIST Chemistry WebBook. URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>; 2018.” Son Erişim Tarihi: 04.11.2023
67. Scientific Group Thermodata Europe (SGTE), “Compounds from CoCl<sub>3</sub> to Ge<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,” Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology -New Series / *Physical Chemistry*, 19(9), 2000.
68. Ulam S., and Metropolis N., “The Monte Carlo Method,” *j.amer.Stat.assoc.*, 44,335,1949
69. Hançerlioğulları, A. (2006). Monte carlo simülasyon metodu ve MCNP kod sistemi. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 14(2), 545–556.
70. Briesmeister, JF. A general Monte Carlo N-particle transport code. LA-12625M, Los Alamos National Laboratory, MCNP; 1997.

71. Şahin, S., Şarer, B., ve Çelik, Y. (2014). Neutronic investigations of a laser fusion driven lithium cooled thorium breeder. *Progress of Nuclear Energy*, 73, 188–196.
72. Şahin, S. (1990). Power flattening in a catalyzed deuterium-deuterium fusion-driven hybrid blanket using nuclear waste actinides. *Nuclear Technology*, 92(1), 93–105.
73. Acır, A., ve Baysal, E. (2018). Monte Carlo calculations of the incineration of plutonium and minor actinides of laser fusion inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine. *Plasma Science and Technology*, 20, 1-7.
74. Chen, B., Liao Z., Wang J., Yu H., and Yang Y. (2012). Exergy analysis and CO2 emission evaluation for steam methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(4), 3191-3200.
75. Ishaq, H., and Dincer I. (2019). Analysis and optimization for energy, cost and carbon emission of a solar driven steam-autothermal hybrid methane reforming for hydrogen, ammonia and power production. *Journal of Cleaner Production*, 234, 242-257.
76. Ünalın, S. (2004). Economical and neutronic performance of HYLIFE-II with mixture of 90% flibe + 10% UF4 (or ThF4). *Energy Conversion and Management*, 45(13-14), 2059-2074.
77. İnternet: İşletmenin gelirleri. URL: <https://avesis.yildiz.edu.tr/hkeskin/dokumanlar> Son Erişim Tarihi: 03.12.2023.
78. Chikazawa, Y., Konomura, M., Uchida, S., and Sato, H. (2005). A feasibility study of a steam methane reforming hydrogen production plant with a sodium-cooled fast reactor. *Nuclear Technology*, 152(3), 266-272.
79. Li Y., Yang X., Du E., Liu Y., Zhang S., Yang C., Zhang N., and Liu C. (2024). A review on carbon emission accounting approaches for the electricity power industry. *Applied Energy*, 359, 122681.
80. Feng X., Zhao Y., and Yan R. (2024). Does carbon emission trading policy has emission reduction effect?—An empirical study based on quasi-natural experiment method. *Journal of Environmental Management*, 351, 119791.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*