



**SOMBRERO FÜZYON REAKTÖRÜNDE TERMOKİMYASAL
DÖNGÜLER KULLANILARAK HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN
İNCELENMESİ**

Gamze ŞENER

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 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.

Gamze ŞENER

07/06/2024

SOMBRERO FÜZYON REAKTÖRÜNDE TERMOKİMYASAL DÖNGÜLER KULLANILARAK HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gamze ŞENER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

ÖZET

Bu çalışmada SOMBRERO füzyon reaktöründe farklı yakıt oranları için nötronik performans analizi ve hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Hesaplamalarda %2 artış oranında %2 UO_2 ve %10 UO_2 aralığında nükleer yakıt kullanılmıştır. Blanket geometrisinde ilk Li_2O katmanı kalınlıkları %6, %12 ve %19 olarak değiştirilmiştir. Nötronik hesaplamalar Monte Carlo yöntemi yardımı ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, füzyon reaktörünün sürdürülebilirliği için trityum üretim oranı (TBR) ve blanket enerji çoğaltım faktörü (M) hesaplanmıştır. İkinci olarak, SOMBRERO füzyon reaktöründe Hibrit Sülfür-Bromür ve Hibrit Kalsiyum-Bromür termokimyasal çevrimleri kullanılarak hidrojen üretim performansı araştırılmıştır. Hesaplamalarda, M değerine bağlı olarak termal güç oranı ($1-\psi$), hidrojen üretim ünitesinin toplam termal gücü (P_{hpf}) ve hidrojen üretim miktarı (\dot{m}) elde edilmiştir. Hibrit Sülfür-Bromür için hidrojen üretim miktarı %2 UO_2 yakıtlı blanket yapısı için 2,76 kg/s elde edilirken, %10 UO_2 yakıtlı blanket yapısı için 3,78 kg/s hesaplanmıştır. %2 UO_2 ve %10 UO_2 yakıtlı blanket yapısı için Hibrit Kalsiyum-Bromür termokimyasal çevrimleri kullanılarak elde edilen hidrojen üretimi ise sırasıyla 3,29 kg/s ve 4,52 kg/s olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak blankette ilk Li_2O katmanı kalınlıkları ve kullanılan yakıt oranının artırılması ile hem nötronik hem de hidrojen üretim performansının arttığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 91704

Anahtar Kelimeler : SOMBRERO, füzyon, nötronik, hibrit sülfür-bromür, hibrit kalsiyum-bromür, termokimyasal, nükleer hidrojen

Sayfa Adedi : 59

Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

INVESTIGATION OF HYDROGEN PRODUCTION POTENTIAL USING DIFFERENT THERMOCHEMICAL CYCLES IN A SOMBRERO FUSION REACTOR

(M.Sc. Thesis)

Gamze ŞENER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

In this study, neutronic performance analysis and hydrogen production potential have been performed for different fuel ratios in the SOMBRERO fusion reactor. In the calculations, nuclear fuel in the range of 2% UO₂ and 10% UO₂, with a 2% increase rate have been used. In the blanket geometry, the first Li₂O layer thicknesses have been changed as 6 cm, 12cm and 19 cm. Neutronic calculations have been carried out with the help of the Monte Carlo method. First, tritium production rate (TBR) and blanket energy multiplication factor (M) have been calculated for the self-sustainability of the fusion reactor. Secondly, hydrogen production performance have been investigated using Hybrid Sulfur-Bromide and Hybrid Calcium-Bromide thermochemical cycles in the SOMBRERO fusion reactor. In the calculations, thermal power ratio ($1-\psi$), total thermal power of the hydrogen production unit (P_{hpf}) and hydrogen production amount (\dot{m}) have been obtained depending on the M value. While the hydrogen production amount for Hybrid Sulfur-Bromide has been computed as 2.76 kg/s for the 2% UO₂ fueled blanket structure, the values is 3,78 kg/s for the 10% UO₂ fueled blanket structure. The hydrogen production obtained using Hybrid Calcium-Bromide thermochemical cycles for the blanket structure fueled by 2% UO₂ and 10% UO₂ have been calculated as 3.29 kg/s and 4.52 kg/s, respectively. As a result, it has been observed that both neutronic and hydrogen production performance increases with increasing the thickness of the first Li₂O layer in the blanket and the fuel ratios.

Science Code : 91704
Key Words : SOMBRERO, fusion, neutronic hybrid sulfur-bromine, hybrid calcium bromine, thermochemical, nuclear hydrogen
Page Number : 59
Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans 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 arkadaşım Esra KARAKAYA'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan her zaman yanımda olan çok kıymetli annem Meryem ŞENER ve babam Kenan ŞENER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte her zaman yanımda olan kardeşlerim Tuğçe Nur ŞENER, Kadir ŞENER ve Meryem Nur ŞENER'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ | ix |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ | x |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | xi |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. LİTERATÜR | 3 |
| 3. MATERYAL VE METOT | 9 |
| 3.1. SOMBRERO Füzyon Nükleer Reaktörü | 9 |
| 3.2. Nötron Difüzyon ve Transport Teorileri | 12 |
| 3.2.1. Nötron difüzyon teorisi | 13 |
| 3.2.2. Nötron transport teorisi | 14 |
| 3.3. SOMBRERO Füzyon Reaktöründe Hidrojen Üretimi | 15 |
| 3.3.1. Nükleer hidrojen üretim metotları | 19 |
| 4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA | 35 |
| 4.1. Nötronik Analizler | 35 |
| 4.1.1. Trityum üretim oranı (TBR) | 35 |
| 4.1.2. Enerji çoğaltım faktörü (M) | 37 |
| 4.2. Hidrojen Üretim Potansiyeli | 38 |
| 4.2.1. Hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretimi | 38 |

| | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.2.2. Hibrit kalsiyum-bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretimi..... | 41 |
| 4.2.3. Üretilen hidrojen miktarlarının karşılaştırılması..... | 45 |
| 4.2.4. Hidrojen üretim çevrimlerinin veriminin karşılaştırılması..... | 47 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 49 |
| KAYNAKLAR..... | 53 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 59 |

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 3.1. SOMBRERO füzyon reaktörü tesis parametreleri | 11 |
| Çizelge 3.2. Nükleer hidrojen üretimi için gereken parametreler | 19 |
| Çizelge 3.3. Üç adımlı hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) termokimyasal çevriminin enerji analizi | 24 |
| Çizelge 3.4. Üç adımlı hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) termokimyasal çevriminin Shomate eşitlik verileri | 24 |
| Çizelge 3.5. $Br_{2(aq)}$, $Br_{2(s)}$ ve $H_2SO_{4(aq)}$ bileşikleri için termodinamik veriler | 25 |
| Çizelge 3.6. Üç adımlı hibrit kalsiyum-bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevriminin enerji analizi..... | 29 |
| Çizelge 3.7. Üç adımlı hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevriminin Shomate eşitlik verileri | 29 |
| Çizelge 4.1. Çeşitli hidrojen üretim çevrimleri için üretilen hidrojen miktarının karşılaştırılması..... | 46 |
| Çizelge 4.2. Farklı hidrojen üretim çevrimleri için verimlilik karşılaştırılması | 48 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. SOMBRERO füzyon reaktörü kesit görünümü | 9 |
| Şekil 3.2. SOMBRERO füzyon reaktörünün duvar yapısı | 11 |
| Şekil 3.3. SOMBRERO füzyon reaktör kesit görünümü | 12 |
| Şekil 3.4. SOMBRERO füzyon reaktörü hidrojen üretim tesisi genel enerji akış şeması | 16 |
| Şekil 3.5. Üç adımlı hibrit sülfür-bromür termokimyasal çevriminin sistematik görünüşü..... | 21 |
| Şekil 3.6. Üç adımlı hibrit sülfür bromür termokimyasal çevrimi için akış şeması | 23 |
| Şekil 3.7. Üç adımlı hibrit kalsiyum-bromür termokimyasal çevriminin sistematik görünüşü..... | 26 |
| Şekil 3.8. Üç adımlı hibrit kalsiyum bromür termokimyasal çevrim için akış şeması | 28 |
| Şekil 3.9. SOMBRERO füzyon reaktörüne entegre edilmiş Rankine çevrimi ve hidrojen üretim tesisinin gösterimi | 33 |
| Şekil 4.1. Tritiyum üretiminin yakıt oranına göre değişimi..... | 36 |
| Şekil 4.2. Enerji çoğaltım faktörünün (M) yakıt oranına göre değişimi | 37 |
| Şekil 4.3. HyS-Br termokimyasal çevrimi için termal güç oranı ($1-\psi$) değişimi | 39 |
| Şekil 4.4. HyS-Br çevrimi için toplam gücün (Phpf) yakıt oranına göre değişimi | 40 |
| Şekil 4.5. HyS-Br termokimyasal çevrimi ile üretilen hidrojen üretim miktarı (\dot{m}_{H_2}) | 41 |
| Şekil 4.6. HyCa-Br çevrimi için termal güç oranının ($1-\psi$) yakıt oranına göre değişimi..... | 42 |
| Şekil 4.7. HyCa-Br çevrimi için toplam termal gücün (Phpf) yakıt oranına göre değişimi..... | 43 |
| Şekil 4.8. HyCa-Br çevrimi ile üretilen hidrojen üretim miktarının (\dot{m}_{H_2}) yakıt oranına göre değişimi | 44 |
| Şekil 4.9. HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimleri ile üretilen hidrojen oranının karşılaştırılması..... | 45 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler | Açıklamalar |
|--------------------|-------------------------------------------------------|
| α | Alfa parçacığı |
| α | Kısmi güç |
| \square | Isı yayılımı |
| D | Döteryum |
| n | Nötron |
| q | Buharlaşma |
| ρ | Yoğunluk, kg/m ³ |
| \mathcal{R} | 1 kg hidrojen üretmek için gerekli olan enerji, MJ/kg |
| ε | Orantı sabiti |
| M | Molar kütle, g/mol |
| \square | Elektriksel güç oranı |
| $\Delta\square$ | Gibbs serbest enerji, kJ/mol |
| ΔH | Entalpi değişimi, kJ |
| ΔS | Entropi değişimi, J/mol.K |
| $^{\circ}\text{C}$ | Santigrat derece |
| $(1-\psi)$ | Termal güç oranı |
| E_f | Fisyon başına enerji, MeV |
| F | Faraday sabiti |
| F | Füzyon nötron kaynağı |
| g | Gram |
| GeV | Giga elektron volt |
| LHV | Hidrojen alt ısı değeri, MJ/kg |
| h | Saat |
| keV | Kilo elektron volt |
| kg | Kilogram |
| MeV | Mega elektron volt |
| M | Enerji çoğaltım faktörü |

Simgeler**Açıklamalar**

| | |
|-----------------|----------------------------------------------|
| MPa | Mega paskal |
| MW | Mega watt |
| N | Newton |
| η_{HBr} | HyS-Br reaksiyonu verimi |
| η_{Ca-Br} | HyCa-Br reaksiyonu verimi |
| η_{ds} | Sürücü sistem verimi |
| η_{gt} | Gaz türbini verimi |
| η_{hpf} | Hidrojen üretim termal verimi |
| η_{ihx} | Ara ısı değiştirici verimi |
| \dot{m} | Kütlesel debi |
| P_{222} | Yardımcı sistem elektriksel gücü, MW |
| P_{cir} | Sirkülasyon elektrik gücü, MW |
| P_{22} | Sürücü sistem elektriksel gücü, MW |
| P_e | Brüt elektrik gücü, MW |
| P_{22} | Hidrojen üretim elektriksel gücü, MW |
| P_f | Füzyon güç çıktısı, MW |
| P_{ge} | Elektrik üretimi için gerekli güç, MW |
| P_{hpf} | Hidrojen üretimi için gerekli toplam güç, MW |
| P_i | Füzyon giriş gücü, MW |
| P_{isf} | İzotop ayırma tesisi elektriksel gücü, MW |
| P_n | Nötron parçacıklarından gelen füzyon gücü |
| P_{net} | Şebekeye giden elektriksel güç |
| P_{22} | Toplam termal güç, MW |
| P_{2} | Alfa parçacıklarından gelen füzyon gücü |
| T | Sıcaklık, K |
| tM | Metrik ton |
| η | Füzyon enerji oranı |
| η | Trityum |
| η_{Δ} | Termal enerji girdisi, kJ/mol |
| η_{222} | Toplam reaksiyon enerjisi, MJ/kg |
| η_{222} | Yardımcı güç oranı |

Simgeler**Açıklamalar**

| | |
|------------|-------------------------------------|
| x_{cir} | Sirkülasyon elektriksel güç oranı |
| x_{eh} | Elektriksel güç oranı |
| x_{isf} | Güç oranı |
| x_n | Nötron parçacıklarının enerji oranı |
| x_{net} | Net elektriksel güç oranı |
| x_α | Alfa parçacıklarının enerji oranı |

Kısaltmalar**Açıklamalar**

| | |
|--------------|---------------------------------------------|
| AS | Yardımcı sistem |
| cm | Santimetre |
| DS | Sürücü sistem |
| D-D | Döteryum - Döteryum |
| D-T | Döteryum - Tritiyum |
| HTE | Yüksek sıcaklıkta elektroliz |
| HyS | Hibrid sülfür çevrimi |
| IHX | Ara ısı değiştirici |
| ISF | İzotop ayrıştırma sistemi |
| LAL | Los Alamos laboratuvarı |
| LIFE | Lazer ataletsel füzyon enerji reaktörü |
| LLNL | Lawrence Livermore Ulusal laboratuvarındaki |
| m | Metre |
| MCNP | Monte Carlo N-Parçacık kodu |
| MCS | Mineral karbondioksit tutumu |
| MHR | Modüler helyum reaktörü |
| MFE | Manyetik füzyon enerjisi |
| Mg-Cl | Magnezyum klorür termokimyasal çevrimi |
| PEM | Proton değişim membranlı yakıt pili |
| PNE | Barışçıl nükleer patlayıcı |
| s | Saniye |
| S-I | Sülfür-iyodür termokimyasal çevrimi |

Kısaltmalar**Açıklamalar****SOMBRERO**

Katı Hareketli Üretici Füzyon Reaktörü

SS

Paslanmaz çelik

TBR

Tritiyum üretim oranı

TRISO

Tri (üç) yapısal izotropik yakıt

1. GİRİŞ

İnsan uygarlığının sürdürülebilir kalkınmasına geçiş, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve insanın çevre üzerindeki etkisinin neden olduğu küresel iklim değişikliğine neden olan karbon salınımlarını sınırlamak için enerji alanında teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması kaçınılmaz hale gelmiştir [1].

Üretimi için neredeyse sınırsız kaynaklara sahip, evrensel, çevre açısından temiz bir enerji kaynağı olan hidrojenin geniş kullanımı, gelecekteki enerji gelişimi için olası yollardan biri haline gelmiştir. Dünya enerji gelişimine ilişkin uzun vadeli tahminler, beklenen enerji tüketimi düzeyine ve diğer koşullara, özellikle de sera gazı emisyonları üzerindeki kısıtlara bağlı olarak, 2050-2100 yılına kadar hidrojen üretimi ve tüketiminin, mevcut seviyenin onlarca hatta yüzlerce kat üzerinde olması beklenmektedir. Hidrojen, 21. yüzyılın ikinci yarısında giderek fosil yakıtların yerini alacak ve ana enerji kaynağı haline gelecektir. Bunun için hidrojen teknolojilerinin güvenliğini sağlayacak pek çok teknik sorunun çözülmesi, hidrojenin üretim, depolama ve taşıma yöntemlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Hidrojenin nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretimi büyük ölçekli enerji tedarikinde büyük katkı sağlayacaktır [1].

Hidrojen, birçok endüstride hayati bir rol oynayan ticari bir kimyasal türdür. Bugün itibariyle, petrokimya rafinajı, metanol ve amonyak üretiminin yanı sıra çelik üretimi gibi endüstriler, yıllık yaklaşık 70 Mt civarındaki en büyük hidrojen miktarlarına ihtiyaç duymaktadır [2]. Hidrojenin neredeyse tamamı fosil yakıtlardan (doğal gaz): %48; atık gazlar: %30; kömür: %18; su elektrolizi: %4 üretilmektedir [3], bu da yılda yaklaşık 830 milyon ton CO₂ emisyonuna yol açmaktadır. Küresel ölçekte doğal gazın yaklaşık %6'sı ve kömürün %2'si hidrojen üretimine katkı sağlamaktadır [2].

Bir yakıt olarak hidrojen, ağırlıkça en yüksek enerji içeriğine sahip (benzine göre 3 kat daha fazla) olmakla birlikte yanma sonucu herhangi bir karbondioksit salınımına neden olmamaktadır. Hidrojen, sıvı yakıtlar da dahil olmak üzere tüm kimya endüstrisi için kritik bir hammadDEDİR. Uluslararası enerji komisyonu, hidrojen kullanımının 2050 yılına kadar bugünkü seviyeye göre 5-7 kat artacağını tahmin etmektedir [4]. Araştırmacılar, günümüzde hidrojen üretiminin fosil yakıtlardan sağlanmasından dolayı, sera gazı emisyonlarına yol

açmayan "temiz" hidrojen üretimini teşvik edecek farklı üretim yöntemlerini incelemektedir. Günümüzde halen fosil yakıtlar aracılığıyla hidrojen üretiminde daha düşük maliyette elde edilmesinden dolayı hala en büyük paya sahiptir. Hidrojen üretmek için en yaygın teknoloji üretilen hidrojenin ~%76'sını oluşturan buhar-metan reformasyonudur (SMR) [5]. Hidrojen aynı zamanda kömür gazlaştırma yöntemiyle de üretilmektedir ve bu seçenek, dünyadaki kömür gazlaştırma tesislerinin %80'inden fazlasının bulunduğu Çin'de iyi bir şekilde temsil edilmektedir. Bu yöntem hidrojen üretimi için en düşük maliyete sahiptir [5]. SMR teknolojisi 10t CO₂/1t H₂ salınımına neden olurken, kömür gazlaştırması 19t CO₂/1t H₂ salınım üretmektedir [6].

Hidrojen üretiminin termokimyasal döngüler gibi başka yolları da vardır, son zamanlarda teknolojik gelişmelere bağlı olarak yenilenebilir ve nükleer enerji ile entegrasyon ile uygulamaya geçilmeye başlanmıştır. Nükleer enerji, elektrik ve ısı sağlayarak termokimyasal döngüler aracılığıyla hidrojen üretimine katkı sağlamaktadır. Mevcut tüm nükleer reaktör teknolojiler ve yeni tip nükleer reaktörlerden sağlanan elektrik ve nükleer ısıyı kullanarak termokimyasal işlemlerle hidrojen üretimi büyük oranda gerçekleştirilebilecektir. Bu tez çalışması kapsamında nükleer teknoloji ve hidrojen üretim tesislerinin toplumda farkındalığı artırmanın yanı sıra temiz enerji geçişini desteklemek için füzyon teknolojisine dayalı nükleer enerji kullanılarak düşük karbonlu bir enerji kaynağı olarak hidrojen üretimi göz önüne alınmıştır.

2. LİTERATÜR

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerjiden hidrojen üretimi üzerine çalışmalar mevcuttur. Yenilenebilir enerjiye dayalı hidrojen üretimi dalga, okyanus termal, su, rüzgar, biyokütle, jeotermal ve güneş gibi enerji kaynaklarına bağlı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu enerji kaynakları kullanarak farklı dönüşüm yöntemleriyle hidrojen elde edilebilmektedir. Örneğin dalga enerjisinden elektrik elde edilerek su elektrolize edilebildiği gibi, termal enerji yöntemiyle güneş enerjisinden ısı gerektiren yöntemlerle de hidrojen üretmek mümkündür. Yenilenebilir olmayan ancak emisyon yaymadığı için yeşil enerji olarak adlandırılan nükleer enerji de hidrojen üretiminde kullanılabilir. Nükleer enerji kullanılarak üretilen elektrik ile su elektrolize edilebilmekte ve/veya elde edilen termal enerji, termokimyasal çevrimleri için gereken ısıyı karşılayabilmektedir. Literatürde hem yenilenebilir enerji hem de nükleer enerji aracılığıyla hidrojen üretimi için farklı termokimyasal çevrim yöntemleri önerilmiştir.

Bilgen ve Joels [7], güneş enerjisi destekli bir sistemde Mark 13-V2 (HyS-Br) hibrit sülfür-bromür termokimyasal çevriminin hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Mark 13-V2 hibrit prosesiyle birleştirilmiş merkezi alıcı sistemi konseptini kullanan güneş enerjisi ile hidrojen üretimi mümkün olduğu vurgulanmıştır. Çevrim verimliliği yaklaşık %37 iken, genel güneş enerjisi hidrojen üretim sisteminin verimi yaklaşık %21 olarak hesaplanmıştır.

Velzen ve arkadaşları [8], tarafından Mark-13 hibrid sülfür bromür çevrimi ile hidrojen üretimi için sürekli laboratuvar ölçeğinde bir tesisin geliştirilmesi ve tasarımı üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmada JRC-Ispra'da yapılan deneysel çalışmalar ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanan bu tesisin net hidrojen üretim hızı 4,0 g/mol.saate olarak elde edilmiştir.

Sorgulu ve Dinçer [9], tarafından yapılan çalışmada güneş kulesi ve heliostatlar, rüzgar türbinleri, gaz sobaları, kombiler, gaz motoru, biyokütle kurutma ve yakma ünitelerini içeren kompleks bir sistem tasarımı üzerinde enerji, ekserji ve hidrojen yakıt üretimi ve etkin kullanımı için yenilenebilir enerji bazlı hibrit sülfür-bromür çevriminin bir değerlendirmesi yapılmıştır. Sistemin toplam enerji ve ekserji verimi sırasıyla %64,43 ve %32,24 bulunmuştur.

Pinsky ve arkadaşları [10], tarafından yapılan çalışmada nükleer hibrit enerji sistemleri için hidrojen üretim teknolojilerinin karşılaştırmalı incelemesi yapılmıştır. Bu çalışmada detaylı olarak nükleer teknoloji kullanarak hidrojen üretimi için aday çevrimler alkali su elektrolizi, proton değişim membranı (PEM) elektrolizi, katı oksit elektroliz hücreleri (SOEC), termokimyasal sülfür-iyodin (S-I), kalsiyum bromür (Ca-Br) döngüleri, hibrit sülfür (HyS) ve bakır klorür (Cu-Cl) çevrimleri incelenmiştir.

Ghorbani ve arkadaşları [11], tarafından yapılan çalışmada termokimyasal çevrimlerle büyük ölçekte temiz hidrojen (H₂) üretmek için endüstrilerden, yenilenebilir enerjiden ve nükleer enerji kaynaklarından faydalanılabileceği belirtilmiş ve çevrimlerin termodinamik, ekonomik ve çevresel yönlerini araştırılmış ve tartışılmıştır. Bu çalışmada termokimyasal çevrimler arasında bakır klorür (Cu-Cl), magnezyum klorür (Mg-Cl), demir klorür (Fe-Cl), vanadyum klorür (V-Cl), kobalt klorür (Co-Cl), seryum klorür (Ce-Cl), hibrit sülfür (HyS), sülfür-iyodin (S-I) ve çinko-sülfür -iyodin (Zn-S-I) yer almaktadır. Bu çevrimler için çalışma koşulları ve potansiyel uygulamalar yardımıyla H₂'nin güvenli ve verimli üretimiyle ilgili detaylı bilgilendirmeler yapılmış ve tartışılmıştır.

Balta ve arkadaşları [12], tarafından yapılan çalışmada, ısı ve/veya elektrikten faydalanılarak hidrojen üretimi için kullanılan çeşitli klorür ailesi bakır klorür (Cu-Cl), magnezyum klorür (Mg-Cl), demir klorür (Fe-Cl) ve vanadyum klorür (V-Cl) döngülerinin karşılaştırmalı bir değerlendirmesini ele alınmıştır. Bu döngüler yoluyla hidrojen üretimi sırasındaki enerji verimliliği, V-Cl döngüsü için %31 ila %46, Mg-Cl döngüsü için %30-65, Cu-Cl döngüsü için %15-52 ve Fe-Cl döngüsü için %18,5 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Fe-Cl ve V-Cl döngüsünün, Mg-Cl ve Cu-Cl döngüleriyle rekabet edebilmesi için daha da geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Balta ve arkadaşları [13], tarafından hidrojen üretimi için güneş enerjili entegre Mg-Cl çevriminin performans analizi enerji ekserji yöntemi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisine dayalı entegre hidrojen üretim sisteminin genel enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %18,18 ve %19,15 olarak hesaplanmıştır.

Balta ve arkadaşları [14], tarafından yapılan bu çalışmada, hidrojen üretimi için jeotermal enerjiyle çalıştırılan bakır klorürlü (Cu-Cl) termokimyasal çevriminin ekserji, maliyet, enerji

ve kütle (EXCEM) analizi yapılmıştır. Cu-Cl döngüsünün enerji ve ekserji verimleri, dikkate alınan koşullar ve parametrelere göre sırasıyla %49 ve %54 olarak hesaplanmıştır.

Karaca ve arkadaşları [15], tarafından yapılan çalışmada, hidrojen üretimine yönelik literatürde en yaygın kullanılan termokimyasal çevrimler incelenerek karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Bu çalışma, enerji verimliliği açısından %52,6, %69, %63,63 ve %46,9, ekserji verimliliği açısından ise sırasıyla %78,21, %77,28, %71, %62,39 gibi yüksek performans değerlerinden dolayı Cu-Cl, V-Cl, Mg-Cl ve S-I çevrimlerinin sistem verimi ve hidrojen üretimi için umut verici olduğu belirtilmiştir.

Özcan ve Dinçer [16], tarafından yapılan çalışmada, dört adımlı Mg-Cl çevriminin ekserji bazlı ekonomik değerlendirmesi yapılmış ve diğer hibrit termokimyasal çevrimlerle karşılaştırılmıştır. Hem termodinamik hem de termoeconomik analizlerin sonuçları, Mg-Cl döngüsünün nihai tasarımının Hibrit-Sülfür döngüsüne (HyS) göre daha düşük hidrojen maliyeti sonuçları gösterdiğini ve hibrit Bakır-Klorür (Cu-Cl) çevrimi ile benzer bir eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Modifiye edilmiş Mg-Cl döngüsünün ulaşılabilir maksimum ekserji verimliliği %56,24 olarak hesaplanmıştır.

Genç [17], tarafından yapılan çalışmada minör aktinit yakıtlı APEX füzyon reaktöründe buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve termokimyasal sülfür-iyodin (S-I) çevrimleri kullanarak nötronik ve hidrojen üretim oranları incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda en yüksek oranda hidrojen üretim miktarı buhar-metan reformasyonu (SMR) ile 426 kg elde edilmiştir.

Demir [18], tarafından yapılan çalışmada farklı yakıt oranları için seramik nükleer yakıt karışımları için (ThO_2 , UO_2 , PuO_2) SOMBRERO füzyon reaktöründe buhar-metan reformasyonu (SMR) için hem nötronik hem de hidrojen üretim miktarı incelenmiştir. Yapılan analiz sonucunda hidrojen üretim miktarı 100,66 kg/s ve 161,48 kg/s aralığında değişim göstermiş ve sistemin verimi %76,1 ve %89,7 aralığında hesaplanmıştır.

Lewis [19], tarafından yapılan araştırmada farklı termokimyasal çevrimleri arasından en umut verici iki Ca-Br ve Cu-Cl çevrimleri seçilerek Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda çevrimlerin iyileştirilmesi için matematiksel ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

El-Emam ve arkadaşları [20], nükleer hidrojen üretim teknolojilerinin temiz ve ekonomik bir enerji geleceği ile ilgili verimli ve sürdürülebilir hidrojen üretimi için termokimyasal çevrimlerin maliyet tahmini ve temel güvenlik hususları incelenmiştir. Yapılan araştırmada S-I, HyS, Cu-Cl, Mg-Cl ve Ca-Br termokimyasal çevrimlerinin kimyasal kinetiğe, ilgili çözeltilerin termodinamiğine ve meydana gelen yan reaksiyonların kimyasına ilişkin maliyet tahmini ve temel güvenlik hususları ile ilgili belirsizlikler vurgulanmıştır.

Aihara ve arkadaşları [21], çalışmasında dört adımlı UT-3 (Ca-Br) termokimyasal hidrojen üretim çevriminin kinetik analiz sürecini incelenmiştir. Sudan UT-3 termokimyasal hidrojen üretim çevrimi için termogravimetri ile kinetik ölçümler yapılmıştır. Reaktan ve katı ürün arasındaki molar hacim farklılıklarından dolayı, peletin yapısal değişiminin döngüsel işlemde meydana geldiği ve bunun da kimyasal dönüşüme karşı etkili bir engele yol açtığı bulunmuştur. UT-3 termokimyasal çevrimde, bir kalsiyum (Ca) peletinin hem brominasyon hem de hidrolizinin reaksiyon hızları, bir termobalans kullanılarak ölçülmüştür.

Çakıroğlu ve arkadaşları [22], farklı sistem işletim parametreleri için güneş enerji destekli kobalt klorür (Co-Cl) termokimyasal çevrim kullanarak Gri İlişkisel Optimizasyon tekniği kullanarak hidrojen üretim miktarını optimize etmiştir. Yapılan optimizasyonda en yüksek çevrim verimi (%) ve hidrojen üretim miktarı, 143 kWh güneş ışınımı, 5 m/s rüzgar hızı, 8 m güneş toplayıcı yüksekliği, 3 m güneş toplayıcı yarıçapı ve 850 heliostat sayısı için sırasıyla %22,2 ve 122,59 (ton/ay) olarak elde edilmiştir.

Asal ve arkadaşları [23], gaz soğutmalı yüksek sıcaklık reaktöründe üç ve dört adımlı iki farklı magnezyum klorür (Mg-Cl) termokimyasal çevrimi kullanarak sistem üzerinde farklı parametreler için enerji, ekserji ve hidrojen üretim miktarını araştırmışlardır. Yapılan hesaplamalarda üç ve dört adımlı iki farklı magnezyum klorür (Mg-Cl) termokimyasal çevrimi için hidrojen üretimi 2,43 kg/s ve 2,13 kg/s olarak elde edilmiştir. Sistemin enerji ve ekserji verimliliği ise üç adımlı (Mg-Cl) için %29,2 ve %40,3, elde edilirken, dört adımlı (Mg-Cl) için %25,6 ve %35,2 olarak elde edilmiştir.

Asal ve Acır [24], toryum yakıtlı doğal lityum ve flibe soğutuculu bir LIFE füzyon reaktöründe buhar-metan reformasyonu (SMR), yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve termokimyasal sülfür-iyodin (S-I) çevrimleri kullanarak nötronik ve hidrojen üretim oranları incelenmiştir. Natural lityum ve flibe soğutucu kullanılarak reaktörde toryum yakıtı yanma

oranı sırasıyla 22 GWd/tM ve 6 GWd/tM elde edilmiştir. En yüksek hidrojen üretim miktarı ise buhar-metan reformasyonu (SMR) ile ~200 kg/s olarak hesaplanmıştır.

Asal ve Acır [25], lazer füzyon sürücülü toryum yakıtlı bir füzyon reaktöründe farklı eriyik tuz ThF_4 yakıt oranları ve lityum zenginleştirmeleri için bakır klorür (Cu-Cl) termokimyasal çevrimi kullanarak nötronik ve hidrojen üretim performansı açısından araştırma yapmıştır. Yapılan çalışmada en yüksek elde edilen hidrojen miktarı %12 ThF_4 ve %90 Li zenginleştirmesi için 1,39 kg/s olarak elde edilmiştir.

Asal ve Acır [26], lazer füzyon sürücülü TRISO kaplamalı toryum yakıtlı bir füzyon reaktöründe zamana bağlı olarak bakır klorür (Cu-Cl), kobalt klorür (Co-Cl) ve sülfür-iyodin (S-I) termokimyasal çevrimi kullanarak hidrojen üretim performansı incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarla reaktör işletim zamanı sonunda Cu-Cl, Co-Cl ve S-I termokimyasal çevrim için 9,00, 4,80 ve 7,36 kg/s hidrojen üretimi sağlanmıştır.

Özkaya ve arkadaşları [27], flibe soğutuculu PACER füzyon reaktöründe farklı oranlarda (%2 ve %12) ThF_4 , UF_4 ve UF_4+ThF_4 yakıt karışımı kullanılarak nötronik analiz yapmış ve elde edilen enerjiden faydalanarak demir klorür (Fe-Cl) termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretim miktarı araştırılmıştır. Hesaplanan hidrojen üretim miktarı %2 ile %12 arasında değişen eriyik tuz yakıtları için hidrojen üretim miktarı $232,24 \times 10^6$ kg/yıl ve $345,79 \times 10^6$ kg/yıl aralığında elde edilmiştir.

Acır ve Özkaya [28], flibe soğutuculu minör aktinit yakıtlı PACER füzyon reaktöründe zamana bağlı nötronik analiz ve Fe-Cl/Mg-Cl termokimyasal çevrimleri ile hidrojen üretim miktarı incelenmiştir. Yapılan nötronik hesaplamalarda minör aktinitlerin ~800 GWd/tM yanma oranı bertarafı sağlanmıştır. Hidrojen üretim miktarı ise Fe-Cl çevrimi için ~ 534,65 kg/yıl elde edilirken; Mg-Cl çevrimi için ~1236,82 kg/yıl hesaplanmıştır.

Bu tez kapsamında, diğer çalışmalardan farklı olarak modifiye edilen SOMBRERO füzyon reaktörünün çeşitli hibrit hidrojen üretim yöntemleri karşısındaki hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. İlk olarak, hesaplamalar Monte Carlo hesaplama yöntemine gerçekleştirilmiştir. Monte Carlo hesaplama yöntem ile, SOMBRERO füzyon reaktörünün statik nötronik analizi %2, %4, %6, %8 ve %10 olmak üzere beş farklı yakıt oranı ve blanket ilk Li_2O bölgesi 6, 12 ve 19 cm olmak üzere üç farklı yakıt bölgesi kalınlığına göre

araştırılmıştır. Yakıt olarak doğal uranyum (UO_2), trityum üretim malzemesi olarak Li_2O kullanılmıştır. Nötronik analiz sonucunda trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) değerleri elde edilmiştir. SOMBRERO füzyon reaktöründe elde edilen enerji çoğaltım faktörü (M) yardımıyla, reaktörün hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Hidrojen üretim potansiyeli hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) çevrimleri için analiz edilmiştir.

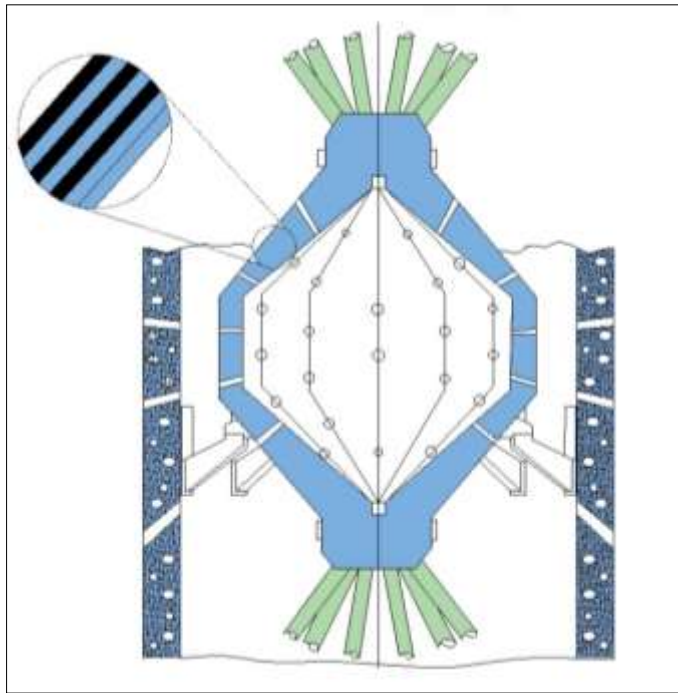
3. MATERYAL VE METOT

3.1. SOMBRERO Füzyon Nükleer Reaktörü

1990 yılında D.O.E. Fusion Energy birliği tarafından, SOMBRERO IFE füzyon reaktörü tasarım çalışmasını başlatmıştır. W. J. Schafer Associates tarafından bir araştırma ekibi oluşturulmuş ve bu füzyon reaktörüne SOMBRERO adı, SOLid MOving BREeder ReactOr'un kısaltması olarak verilmiştir [29].

SOMBRERO, simetrik ışınlama konfigürasyonunda doğrudan tahrikli hedefler kullanan 1000 MWe KrF lazerle çalışan IFE enerji santralinin kavramsal tasarım çalışmasıdır. KrF lazerin 60 ışını hedefe toplam 3,4 MJ enerji iletmektedir. Yaklaşık 118'lik bir kazanç için hedef verim 400 MJ'dir. Lazerle ışın tekrarlama oranı 6,7 Hz'dir [29].

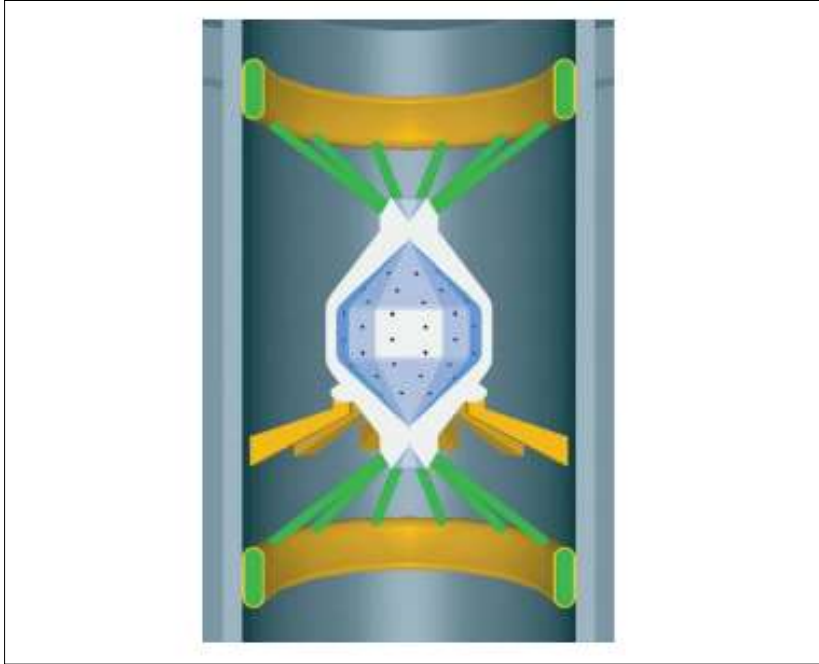
Füzyon tasarımının ilk duvarı (FW) düşük aktivasyonlu bir karbon/karbon (C/C) kompozitinden yapılmıştır ve blanket, yerçekimiyle bölmenin içinden akan, boyutu 300 ila 500 μm olan katı Li_2O parçacıklarından oluşan hareketli bir yataktan oluşmaktadır. Parçacıklar 0,2 MPa'lık bir helyum taşıyıcı gaz içinde iletilmektedir [29].



Şekil 3.1. SOMBRERO füzyon reaktörü kesit görünümü [29]

Bu blanket konfigurasyonu 1,25 üreme oranı ve 1,08 enerji çarpım faktörü vermektedir. İlk duvar 0,5 torr ksenon gazı ile korunmaktadır. Ksenon kimyasal olarak inerttir (tepkimeye girmeyen) ve yüksek bir X-ışını soğurma kesitine sahiptir. Ksenon gazı, hedef X-ışınlarından ve kalıntılardan gelen enerjiyi absorbe edecek ve duvara zarar verebilecek aşırı sıcaklıkları önleyecek kadar uzun bir zaman ölçeğinde bunu ilk duvara (FW) yeniden yayacaktır [29,30]. SOMBRERO füzyon reaktörü kesit görünümü Şekil 3.1'de gösterilmektedir. FW 1 cm kalınlığındadır ve C/C kompozitinden yapılmıştır. Blanket farklı bileşime sahip üç bölgeye bölünmüştür. En içteki bölüm 19 cm kalınlığındadır ve %3 karbon kompozit ve %97 Li₂O parçacıklarından oluşmaktadır. İkinci ve üçüncü bölgelerin her biri 40 cm kalınlığında olup sırasıyla %20 ve %50 karbon oranına sahiptir. Artan karbon oranı bir nötron reflektörü görevi görmektedir ve blanket içindeki enerji absorpsiyonunu ve trityum üremesini artırmaktadır. Orta düzlemdaki genel örtü/reflektör kalınlığı 1 m'dir. Blanket boyunca Li₂O akış hızı 1,15 m/s'de sabit kalmaktadır. Li₂O'nun teorik yoğunluğu 2,01 g/cm³'tür, ancak malzemenin %90 yoğunlukta olduğu ve hareketli yatağın %60 Li₂O oranına sahip olduğu varsayılır, bu da etkin yoğunluğa 1,08 g/cm³ değerini verir [29,30].

D-T nötron kaynağı vakum kabı olarak da hizmet veren büyük bir reaktör binasının ortasında yer almaktadır. Şekil 3.2'de reaktörün duvar yapısı gösterilmiştir. 10 m iç yarıçapa sahip, 1,7 m kalınlığında beton bir kalkan, odayı çevrelemektedir. Lazer ışınları reaktör binasının alt seviyesinden geçerek reaktör binasının zeminindeki pencerelerden dikey olarak yansıtılmaktadır. Lazer ışınları yukarıya doğru yansıtıldıktan sonra son odaklama aynalarına (FFM'ler) yansıtılır. FFM'ler girişleri odaklar ve onları otlatma metal aynalarına (GIMM'ler) yönlendirir; bu da onları daha sonra kalkan duvarı ve bölmedeki uygun bağlantı noktaları aracılığıyla bölmeye yönlendirir. GIMM'ler hedeften 30 m'lik bir yarıçapta bulunur ve ışın portlarından sızan füzyon nötronlarının doğrudan görüş hattındadır. FFM'ler hedef odanın merkezinden 50 m yarıçaptadır. Bu dielektrik kaplamalı aynaların nötron hasarına karşı GIMM'lere göre daha duyarlı olabileceği göz önüne alındığında, bunlar birincil nötronların görüş hattının dışında konumlandırılmıştır [29,30]. Çizelge 3.1'de SOMBRERO tasarımının ilgili tesis parametreleri verilmiştir.

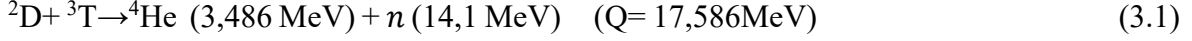


Şekil 3.2. SOMBRERO füzyon reaktörünün duvar yapısı [31]

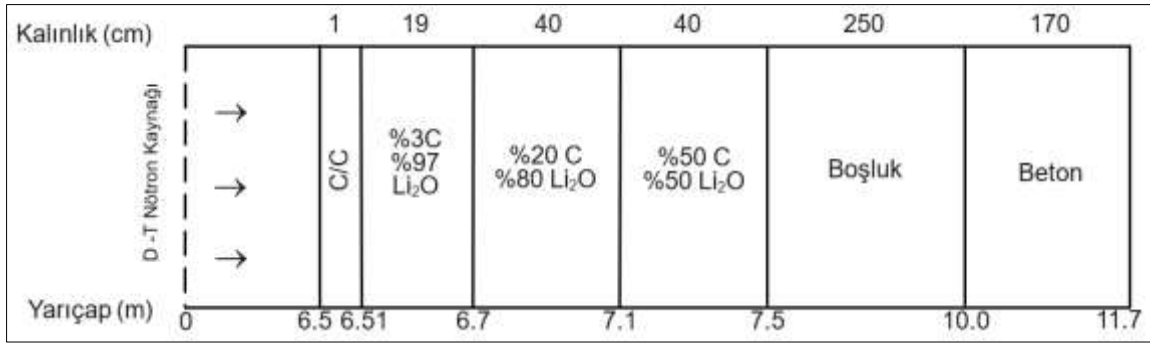
Çizelge 3.1. SOMBRERO füzyon reaktörü tesis parametreleri [18]

| SOMBRERO Füzyon Reaktörü Parametreleri | |
|----------------------------------------|--------------------------------|
| Sürücü | KrF lazer |
| Sürücü Enerjisi (MJ) | 3,4 |
| Sürücü Verimi (%) | 7,5 |
| Hedef Türü | Direkt |
| Hedef Kazanımı | 118 |
| Hedef Verim (MJ) | 400 |
| Tekrar oranı (Hz) | 6,7 |
| Enerji Çoğaltımı | 1,08 |
| Oda malzemesi | C/C kompozit |
| Besleme malzemesi | Li ₂ O parçacıkları |
| Besleme oranı | 1,25 |
| Füzyon Gücü (MW) | 2677 |
| Termal Güç (MW) | 2891 |
| Brüt Elektrik Gücü (MW _e) | 1359 |
| Sürücü gücü (MW _e) | 304 |
| Yardımcı Güç (MW _e) | 55 |
| Net Elektrik gücü (MW _e) | 1000 |

SOMBRERO füzyon reaktöründe D-T füzyon nötron kaynağı kullanılmıştır. D-T füzyon nötron kaynağı reaktör korunun orta kısmında yer almaktadır. D-T füzyon nötron kaynağı 14,1 MeV kinetik enerjiye sahip olmakla birlikte, nötron popülasyonu sağlanması için Eş. 3.1’de verildiği gibi hidrojen izotopu olan döteryum ve trityum tepkimeye girmektedir.[32]



SOMBRERO füzyon reaktörü kesit görünümü Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. SOMBRERO füzyon reaktör kesit görünümü [18, 29,32]

SOMBRERO füzyon reaktöründe ilk Li₂O katman kalınlıkları 6, 12, 19 cm alınarak, bu katmanda Li₂O trityum üretici içerisine %2’den %10’a kadar %2’şer aralıklarla doğal UO₂ yakıtı karıştırılarak Monte Carlo yöntemi (MCNP) [33] yardımıyla reaktörün nötronik analizi yapılmıştır. Burada elde edilen enerji çoğaltım faktörü ile belirlenen parametreler doğrultusunda hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) çevrimlerinin hidrojen üretimi üzerindeki etkisini araştırılmıştır.

3.2. Nötron Difüzyon ve Transport Teorileri

Nükleer reaktör tasarımlarında nötron akı dağılımı dikkate alınmaktadır. Belirlenen tasarım ve parametrelere bağlı olarak nötron akı dağılımlarının belirlenebilmesi için Nötron Difüzyon ve Transport Teorileri analiz edilmektedir. Nötron akı dağılımının yaklaşık olarak belirlenmesinde nötron Difüzyon Teorisi kullanılırken, nötron akı dağılımının hassas olarak belirlenmesinde ise Transport Teorisi kullanılmaktadır. Fakat geliştirilen bu teorinin denklemleri karmaşık bir yapıya sahip olduğundan sayısal çözümlere için nötronik olarak nükleer reaktörlerin performansını analiz eden birçok bilgisayar kodu bulunmaktadır [34].

Bu tez kapsamında, SOMBRERO füzyon reaktörünün nötronik performansının analizinde bu iki teori referans alınmış olup Monte Carlo hesaplama yöntemini içeren MCNP bilgisayar kodu kullanılmıştır.

3.2.1. Nötron difüzyon teorisi

Nükleer reaktör fiziği nükleer reaktör korunda kullanılan malzemelerle nötronların etkileşime girmesi sonucu reaksiyonlar meydana gelen oranlarını hesaplar. Bu hesaplamalarda, nötronların uzaydaki ve reaktördeki enerji dağılımlarına bağlı olarak oluşan reaksiyon kesitleri dikkate alınır. Nötron dağılımı, reaktör korundaki fisyon kaynağına ve nötronların atom çekirdeği ile etkileşimlerine bağlıdır. Nötron dağılımının nükleer reaktörlerde en yaygın ve en basit matematiksel tanımı, nötron difüzyon teorisidir.

Nötron difüzyon teorisi, nötron enerji spektrumu ile reaksiyonlardaki önemli etkileri ele alan ve nötron transport teorisi ortaya çıkan karmaşıklığı ortadan kaldıran, nötronların aynı etkin hıza sahip olduğu ve enerjilerindeki değişim etkilerinin göz önüne alınmadığı varsayılan matematiksel bir tanımdır [35]. Nötron difüzyon teorisinde nötronun yoğunluğunun yüksek olduğu yerden düşük olduğu bölgeye hareketini dikkate alan Fick Kanunundan faydalanılmaktadır. Bu hareketle tesir kesitinden birim zamanda birim alandan geçen nötron sayısı yani nötron akım yoğunluğu (J) olarak isimlendirilmiştir.

Nötron akım yoğunluğunda x yönünde hareket eden nötronların akım yoğunluğu (J_x) olarak tanımlanmış ve D ifadesi difüzyon parametresi ile Eş. 3.2'te gösterilmiştir.

$$J_x = -D (d\phi/dx) \quad (3.2)$$

V hacmi ele alınmış olup bu hacimdeki nötron sayısının zamanla değişimini veren nötron balansı nötron difüzyon teorisinde önem arz etmekle birlikte Eş. 3.3 ile verilmiştir.

$$\partial n(r, t)/\partial t = S(r, t) - \Sigma_a(r)\phi(r, t) - D\nabla^2\phi(r, t) \quad (3.3)$$

$\partial n(r, t)/\partial t$ ifadesi V hacmi içindeki nötron sayısının zamanla değişimini, $S(r, t)$ hacim içinde üretilen nötron sayısını, $\Sigma_a(r)\phi(r, t)$ hacim içinde soğrulan nötron sayısını ve $D\nabla^2\phi(r, t)$ ise hacim içinden kaçan nötron sayısını ifade etmektedir. Eş. 3.3'te verilen

nötron akısı, nötron sayısı ve nötron hızının çarpımı olarak verilirse nötron difüzyon denklemi Eş. 3.4'teki gibi ifade edilir;

$$\partial n(r, t)/v\partial t = S(r, t) - \Sigma_a(r)\phi(r, t) - D\nabla^2\phi(r, t) \quad (3.4)$$

3.2.2. Nötron transport teorisi

Nötron transport teorisi 1872 yılında L. Boltzmann tarafından nötronlar, fotonlar ve diğer bazı partiküller için Boltzmann denklemleri olarak türetilmiştir. Nötron transport denklemi, nötron madde etkileşimini incelemek üzere bazı basitleştirilmiş indirgemelerle, nötronların nokta varsayıldığı, nötron-nötron etkileşimlerinin yok sayıldığı, nötronların nötr olmasından kaynaklı düz çizgiler halinde ilerlediği, anlık çarpışma olduğu, izotropik dağılım varsayıldığı, zamandan bağımsız olduğu gibi varsayımlar yapılmaktadır [36].

Nötron taşınım hesaplamalarında kararlı bir sistemde zamanla nötron açısız yoğunluğundaki değişim oranı, $\partial n/\partial t$, sıfırdır [36].

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \text{Üretim Oranı } (\theta) - \text{Kaçak Oranı } (L) - \text{Uzaklaştırma Oranı } (R) \quad (3.5)$$

Eş. 3.5'te üretim oranı (θ) için üç adet nötron kaynağı bulunmaktadır. Birincisi, gelen nötronun E' enerjisinden ve X' yönünden E enerjisine ve X yönüne saçıldıktan sonra oluşan nötronları ifade eden θ_s , ikincisi fisyon kaynağı θ_f ve üçüncüsü ise kendiliğinden bir fisyon kaynağı, doğal radyoaktif kaynak ve diğerleri gibi bağımsız yabancı kaynaktır. Böylece üretim oranı θ Eş. 3.6 ile ifade edilir [36];

$$\theta = \theta_s + \theta_f + S = dVdEd\Omega \left[\int_0^\infty dE' \int_{\Omega^l}^A \Sigma_s(r, E^l) f(r, E^l \rightarrow E, \Omega^l \rightarrow \Omega) \right. \\ \left. \phi(r, E^l, \Omega^l, t) d\Omega^l + \frac{X(E)}{4\pi} \int_0^\infty dE' \int_{\Omega^l}^A v \Sigma_f(r, E^l) \right. \\ \left. \phi(r, E^l, \Omega^l, t) d\Omega^l + S(r, E, \Omega, t) \right] \quad (3.6)$$

Burada $f(r, E^l \rightarrow E, \Omega^l \rightarrow \Omega)$ saçılma fonksiyonunun olarak tanımlanmaktadır. Nötron kaçığı oranı, birim hacim başına dV 'ye giren nötron sayısı ile dV 'den çıkan nötron sayıları farkı olarak ifade edilmektedir ve Eş. 3.7 ile elde edilmektedir.

$$L = \phi(r_0 + (s + ds)\Omega, E, \Omega, t)dAdEd\Omega - \phi(r_0 + s\Omega, E, \Omega, t)dAdEd\Omega \quad (3.7)$$

$$= \frac{d\phi(r_0 + s\Omega, E, \Omega, t)}{ds}dVdEd\Omega = \Omega \cdot \nabla\phi dVdEd\Omega$$

Nötronlar, dV içerisinde absorbe edilerek ve E enerjisi ve X yönünden başka bir enerji alanına ve yönüne saçılarak uzaklaştırılır. Uzaklaştırma oranı Eş. 3.8'den hesaplanır.

$$R = (\Sigma_s + \Sigma_a)\phi(r, E, \Omega, t)dVdEd\Omega = \Sigma_t\phi(r, E, \Omega, t)dVdEd\Omega \quad (3.8)$$

Eş 3.6, 3.7 ve 3.8 Eş. 3.5'e yerleştirilip düzenlendiğinde sırasıyla kararlı durum nötron transport denklemi Eş 3.9 ve zamana bağlı nötron transport denklemi Eş. 3.10 elde edilir [34].

$$\frac{1}{v}\frac{\partial\phi}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla\phi + \Sigma_t(r, E)\phi = \int_0^\infty dE' \int_{\Omega'}^A \Sigma_s(r, E')f(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(r, E', \Omega', t)d\Omega' \quad (3.9)$$

$$+ \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_0^\infty dE' \int_{\Omega'}^A v \Sigma_f(r, E')\phi(r, E', \Omega', t)d\Omega' + S(r, E, \Omega, t)$$

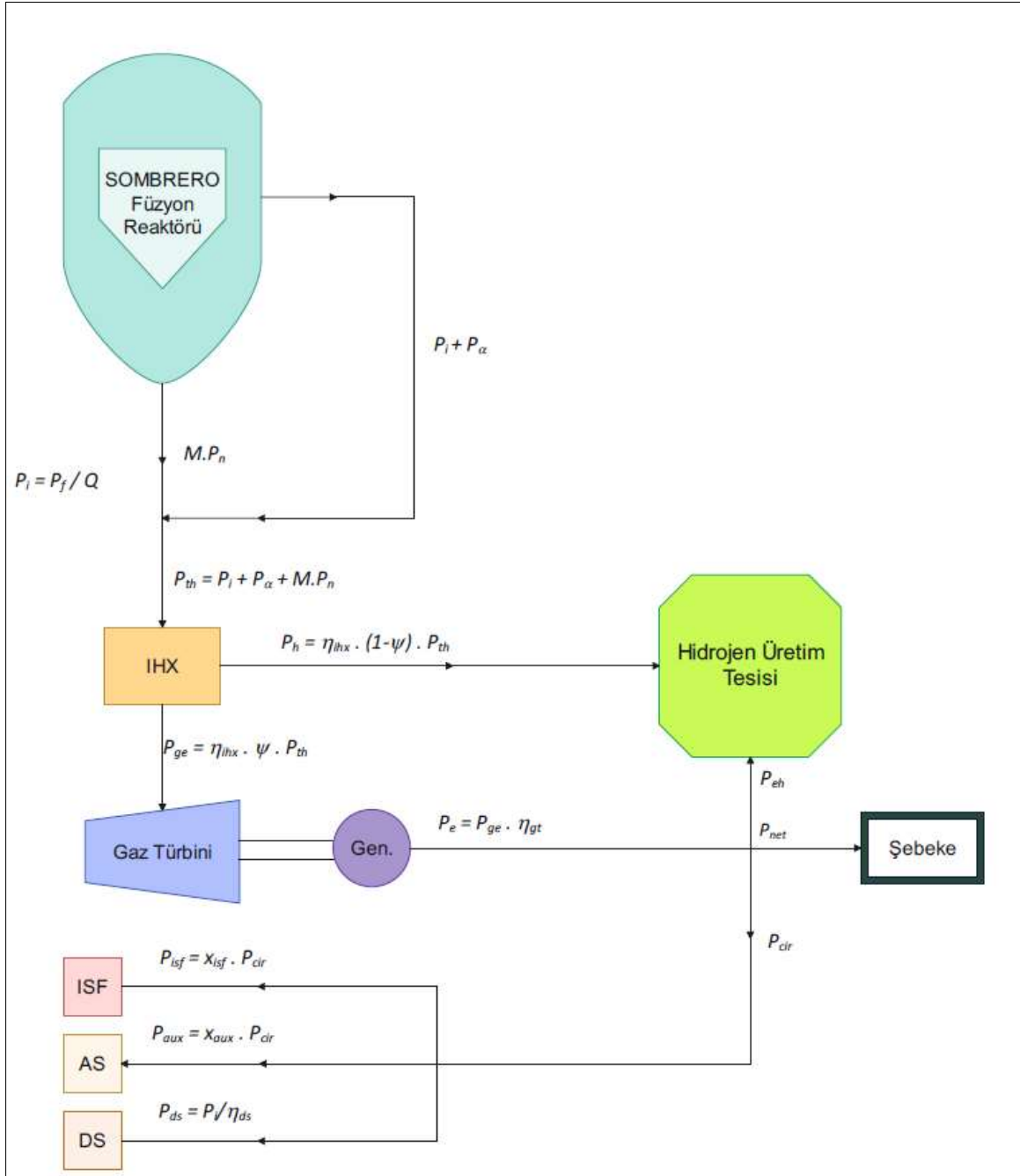
$$\phi(r, E, \Omega, t) = \int_0^\infty \exp\left[-\int_0^l \Sigma_t(r - l'\Omega, E)dl'\right] \phi(r - l\Omega, E, \Omega, t - \frac{l}{v})dl \quad (3.10)$$

Zamana bağlı nötron transport denklemini çözümü ise Eş 3.11'de verilmiştir [34];

$$\phi(r, E, \Omega, t)|_{t=0} = \phi_0(r, E, \Omega) \quad (3.11)$$

3.3. SOMBRERO Füzyon Reaktöründe Hidrojen Üretimi

Hidrojen üretim çevrimlerinin bazıları sadece ısı enerjisine bağlı çalışırken bazıları da hem elektrik hem de ısı enerjisine bağlı olarak çalışmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) çevrimleri termokimyasal tepkimelerinde ısı enerjisine, elektrokimyasal tepkimelerinde ise elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 3.4. SOMBRERO füzyon reaktörü hidrojen üretim tesisi genel enerji akış şeması [18, 37]

Reaktörün termal gücü ara ısı değiştiriciden sonra ikiye ayrılmaktadır; termokimyasal tepkimelerde ve elektroliz aşamasının ısı ihtiyacını karşılamada kullanılacak olan termal güç P_h ve çevrimlerin elektroliz tepkimelerinde kullanılacak elektriği üretmek için gereken güç P_{ge} sırasıyla Eş. 3.12 ve Eş. 3.13 ile hesaplanmaktadır [37].

$$P_h = \eta_{ihx} \cdot (1 - \psi) \cdot P_{th} \quad (3.12)$$

$$P_{ge} = \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.13)$$

Eş. 3.12 ve 3.13'te verilen η_{ihx} ara ısı değıştiricinin verimini, $(1-\psi)$, termal güç oranını, ψ ise elektriksel güç oranını simgelemektedir.

Gaz türbininin elektrik üretmesi için gereken güç olan P_{ge} , türbinden çıktığında Eş. 3.14'teki hale dönüşmektedir. Brüt elektrik güç üretimi (P_e) ise Eş. 3.15'ten faydalanılarak hesaplanmaktadır. Burada kullanılan η_{gt} gaz türbinin verimini ifade etmektedir.

$$P_e = \eta_{gt} \cdot P_{ge} \quad (3.14)$$

$$P_e = \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.15)$$

Gaz türbininden sonra brüt elektrik güç üretimi (P_e) üçe ayrılmaktadır. Bunlar; x_{eh} elektriksel güç oranı ile birlikte hidrojen üretim tesisine gidecek P_{eh} elektrik gücü, x_{cir} elektriksel güç oranıyla yeniden dolaşımdaki P_{cir} elektrik gücü ve x_{net} elektriksel güç oranıyla şebekeye verilen P_{net} elektrik gücüdür. Ek olarak x_{eh} , x_{cir} ve x_{net} elektrik güç oranlarının toplamı 1'e eşittir. P_{eh} , P_{cir} ve P_{net} elektriksel güçleri için kullanılan formüller aşağıda verilmiştir [37].

$$P_{net} = x_{net} \cdot P_e = x_{net} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.16)$$

$$P_{cir} = x_{cir} \cdot P_e = x_{cir} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.17)$$

$$P_{eh} = x_{eh} \cdot P_e = x_{eh} \cdot \eta_{gt} \cdot \eta_{ihx} \cdot \psi \cdot P_{th} \quad (3.18)$$

P_{cir} yeniden dolaşımdaki elektriksel güç de P_e gibi üçe ayrılmaktadır. Bunlar; P_{isf} izotop ayırma tesisi elektrik gücü, P_{ds} sürücü sistem elektrik gücü ve yardımcı sistem elektriksel gücü P_{aux} yardımcı sistem elektrik gücüdür. İlgili eşitlikler aşağıdadır.

$$P_{isf} = x_{isf} \cdot P_{th} \quad (3.19)$$

$$P_{ds} = \frac{P_i}{\eta_{ds}} \quad (3.20)$$

$$P_{aux} = x_{aux} \cdot P_{th} \quad (3.21)$$

Hidrojen üretimi için kullanılan termal (P_h) ve elektriksel (P_{eh}) güç arasında ε oranı sabiti ile de ilişkili olan bir bağlantı mevcuttur. ε oranı sabiti hidrojen üretimi için gereken toplam gücü hesaplarırken de kullanılır [37].

$$P_{eh} = \varepsilon \cdot P_h \quad (3.22)$$

Formüller Eş. 3.23'teki gibi düzenlendiğinde ψ elektriksel güç oranı elde edilir.

$$\psi = \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \cdot [\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} + \frac{\varepsilon}{[\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} + [\eta_{gt} + \varepsilon - \eta_{gt} \cdot x_{net}]} \quad (3.23)$$

Hibrit çevrimlerde hidrojen üretimi için gereken toplam güç aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$P_{hpf} = (1 - \psi) \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \eta_{ihx} \cdot \frac{P_f}{Q} \cdot [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \quad (3.24)$$

Elektriksel güç oranı ve toplam güç formüllerinde kullanılan Q , füzyon güç çıktısının (P_f) füzyon giriş gücüne (P_i) oranıdır ve füzyon enerji kazanım oranı olarak adlandırılır.

$$Q = \frac{P_f}{P_i} \quad (3.25)$$

Nötron ve alfa parçacıklarından gelen füzyon güçleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$P_n = x_n \cdot P_f \quad (3.26)$$

$$P_\alpha = x_\alpha \cdot P_f \quad (3.27)$$

Verilen eşitliklerde x_n ve x_α nötron ve alfa parçacıklarının D-T tepkimelerindeki enerji oranlarını göstermektedir. Nötron (P_n) ve alfa (P_α) parçacıklarının füzyon güç çıktısını hesaplamada kullanılan bu sabitlerin değerleri sırasıyla 0,8 ve 0,2'dir. Bir füzyon reaksiyonunda bu iki parçacıktan gelen toplam güç 17,6 MeV'dur [37].

Toplam termal güç füzyon giriş gücü, alfa ve nötron parçacıklarından gelen füzyon gücü ve enerji çoğaltım faktörünün etkisiyle değişmektedir.

$$P_{th} = P_i + P_\alpha + M \cdot P_n \quad (3.28)$$

$$P_{th} = \frac{P_f}{Q} [Q \cdot (x_\alpha + x_n \cdot M) + 1] \quad (3.29)$$

Burada P_{th} , toplam termal gücü, M ise enerji çoğaltım faktörünü simgelemektedir ve Monte Carlo nötronik koduyla hesaplanmaktadır [33].

SOMBRERO füzyon reaktöründen alınan güçle hidrojen üretimi yapmak için gereken hesaplamaları yaparken kullanılacak parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Nükleer hidrojen üretimi için gereken parametreler [18, 29, 32, 38]

| Parametreler | Simge | Değer |
|------------------------------------------|--------------|-------|
| Füzyon giriş gücü | P_i (MW) | 304 |
| Füzyon çıkış gücü | P_f (MW) | 2677 |
| Füzyon enerji kazanç faktörü | Q | 8,8 |
| Alfa Parçacıklarının Enerji Fraksiyonu | x_α | 0,2 |
| Nötronların Enerji Fraksiyonu | x_n | 0,8 |
| Ara Isı Değiştirici Verimi | η_{ihx} | 0,8 |
| Gaz Türbinin Termal Verimi | η_{gt} | 0,6 |
| Sürücü Sistem Verimi | η_{ds} | 0,5 |
| Yardımcı Güç Fraksiyonu | x_{aux} | 0,05 |
| İzotop Ayırma Tesisi için Güç Fraksiyonu | x_{isf} | 0,05 |

3.3.1. Nükleer hidrojen üretim metotları

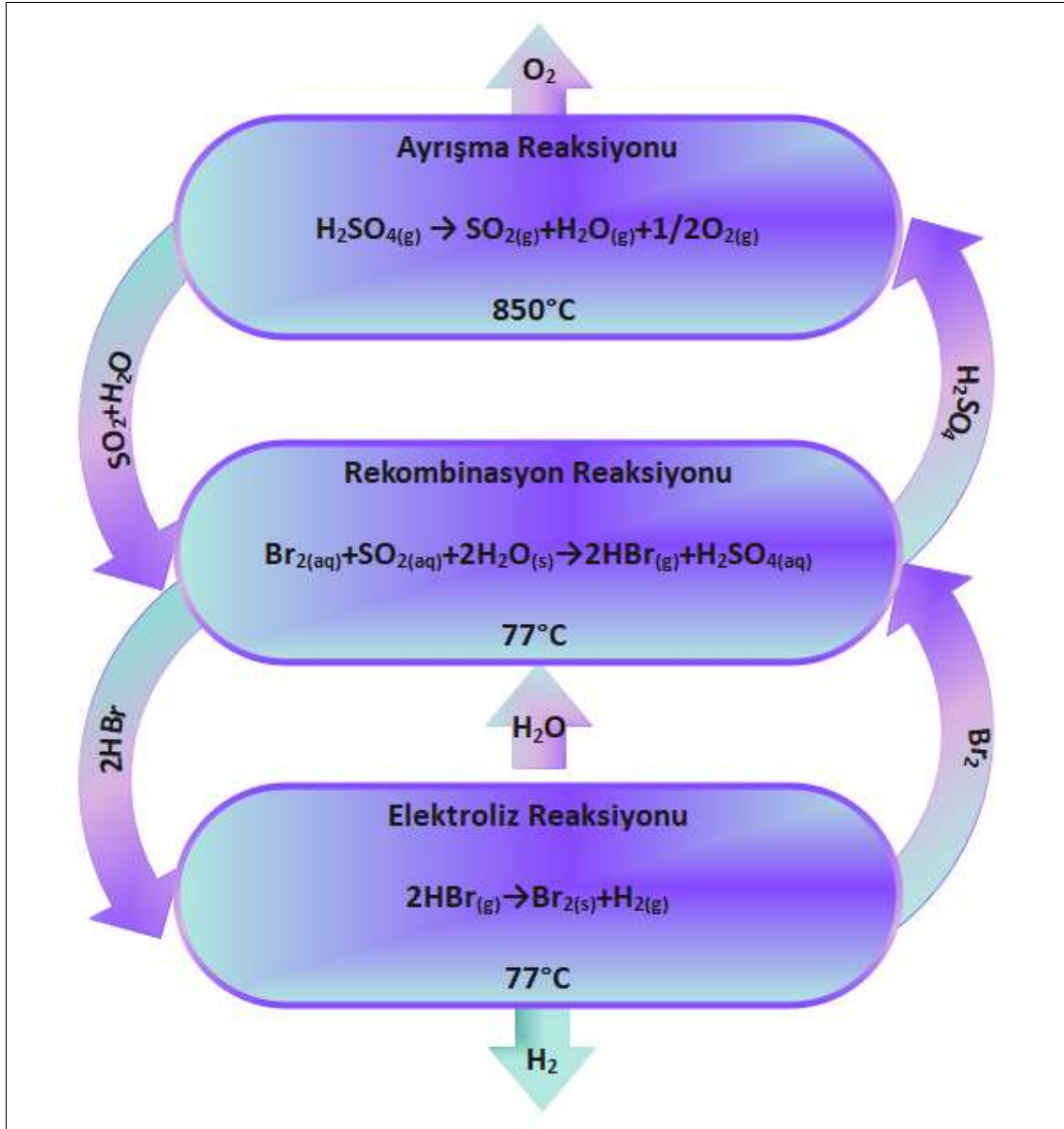
Bu çalışmada hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimleri kullanılarak SOMBRERO füzyon reaktöründe hidrojen üretim potansiyelleri incelenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve

hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimlerine döngü yapıları aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Hibrit sülfür-bromür çevrimi (HyS-Br)

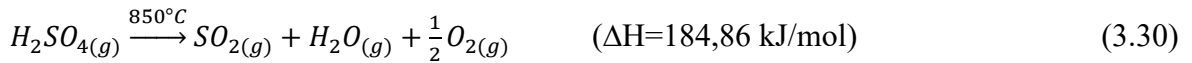
Literatürde sülfür temelli birkaç farklı çevrim bulunmaktadır. Bunlardan bazıları sülfür-iyodin çevrimi (S-I), hibrit sülfür (HyS) çevrimi ve hibrit sülfür-bromür çevrimidir. Bu tez kapsamında hibrit sülfür-bromür çevriminin hidrojen üretim performansı incelenmiştir [9, 39, 40].

Hibrit sülfür-bromür çevrimi diğer adıyla Mark-13 çevrimi 1974 yılında Schfitz ve Fiebelmann tarafından geliştirilmiştir. Çevrimin deneysel çalışmaları Ispra'daki Ortak Araştırma Merkezi'nde yürütülmüştür. Aşağıdaki eşitliklerde ve Şekil 3.5'te gösterildiği gibi çevrim üç tepkimeden meydana gelmektedir. Bu tepkimelerin ikisi termokimyasal ve biri elektrokimyasaldır. İlk tepkime termal ayrışma, ikinci tepkime rekombinasyon ve üçüncü tepkime ise elektroliz olarak adlandırılmaktadır [8, 9, 39, 40].



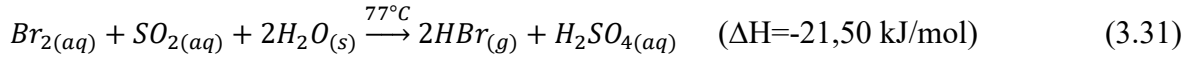
Şekil 3.5. Üç adımlı hibrit sülfür-bromür termokimyasal çevriminin sistematik görünüşü

Termal ayrıştırma tepkimesi



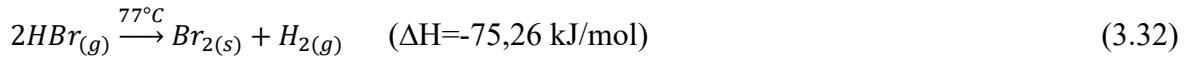
Eş. 3.30'da verilen ilk tepkime sülfirik asidin (H_2SO_4) 700-1000°C sıcaklık aralığında ayrışmasıyla başlamaktadır. Reaksiyon sonucunda sülfür dioksit (SO_2), su buharı (H_2O) ve oksijen (O_2) oluşmaktadır. Burada oluşan O_2 depolama ünitesine gönderilirken, SO_2 ve H_2O gaz karışımı önce ısı değiştiriciye ardından ikinci tepkimenin gerçekleştiği üniteye gönderilmektedir [9].

Rekombinasyon tepkimesi

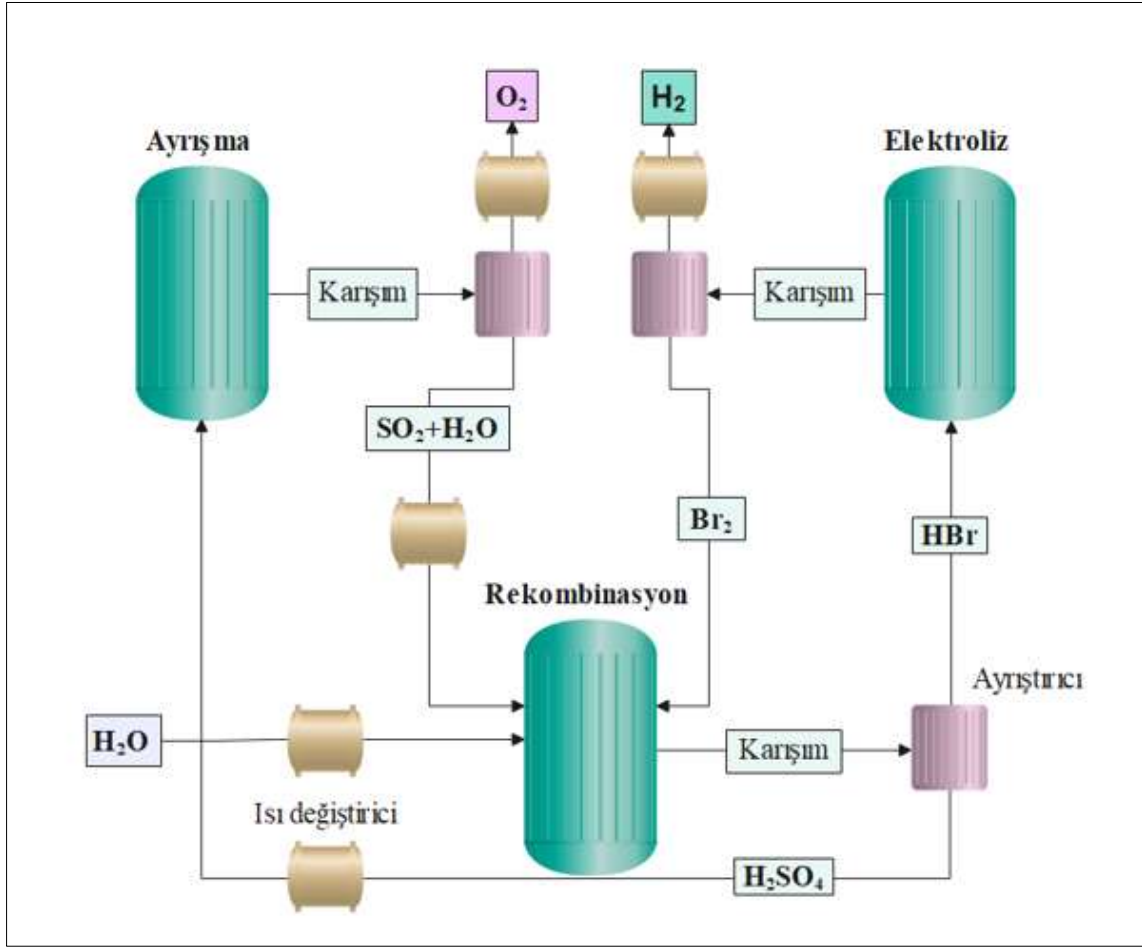


Eş. 3.31’de verilen ve ilk tepkimeyi takip eden ikinci tepkimede 20-100°C sıcaklık aralığında bromür (B₂) ve SO₂’in rekombinasyonu işlemi gerçekleşmektedir. Bu aşamada 1 mol su ayrışma tepkimesinden gelirken, tepkimenin devam etmesi için gerekli olan diğer 1 mol su döngü her kendini tamamlayıp başa döndüğünde dışarıdan takviye edilmektedir. Rekombinasyon tepkimesi sonucunda elde edilen ürünler önce ayrıştırıcıya, sonrasında elektroliz aşamasında kullanılacak olan hidrojen bromür (HBr) elektroliz ünitesine, H₂SO₄ ise termal ayrışma ünitesine gönderilmektedir [9].

Elektroliz



Eş. 3.32 çevrimin hidrojen gazı elde edilen elektroliz reaksiyonu olan elektroliz aşamasını göstermektedir. Tepkime 80-200°C sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Elektroliz işlemi sonucunda açığa çıkan gazlar önce ayrıştırıcıya gönderilmektedir. Burada gerekli işlemler yapıldıktan sonra bromür gazı (B₂) çevrime geri dönerken, hidrojen gazı (H₂) depolanmak üzere saklanır. Şekil 3.6’da üç adımlı hibrit sülfür-bromür termokimyasal çevrim için akış şeması verilmiştir [9].



şekil 3.6. Üç adımlı hibrit sülfür bromür termokimyasal çevrimi için akış şeması

Akış şeması dikkate alınarak, Hibrit sülfür-bromür çevriminin ısı ihtiyacı 628,09 MW, elektrik gereksinimi ise 112,76 MW olarak hesaplanmış ve Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Çevrimin ısı ve elektrik ihtiyacını belirlemek için kullanılan entalpi, entropi ve Gibbs enerjisi değerleri Çizelge 3.4'te verilen Shomate katsayılarından faydalanılarak ilgili formüller ile hesaplanmıştır [41]. Hibrit sülfür-bromür çevrimi için Shomate katsayıları bulunmayan bileşiklerin entalpi ve entropi değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir [42]. Hesaplamalar yapılırken sadece mevcut sıcaklığı artırma görevi gören ısı değiştiriciler ve endotermik reaksiyonların entalpi değerleri göz önüne alınmıştır .

Çizelge 3.3. Üç adımlı hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) termokimyasal çevriminin enerji analizi

| Hibrit Sülfür-Bromür Çevrimi Enerji Analizi | | | | |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| İşlem | Reaksiyon/Bileşik | Sıcaklık (°C) | Isı enerjisi (MW) | Elektrik işi (MW) |
| Ayrışma reaksiyonu | $H_2SO_{4(g)} \rightarrow SO_{2(g)} + H_2O_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)}$ | 850 | 184,86 | |
| Elektroliz reaksiyonu | $2HBr_{(g)} \rightarrow Br_{2(s)} + H_{2(g)}$ | 77 | 270,67 | 112,76 |
| Isı değiştirici | $H_2SO_{4(g)}$ | 77→850 | 168,64 | |
| Isı değiştirici | $H_2O_{(s)}$ | 25→77 | 3,91 | |
| Toplam | | | 628,09 | 112,76 |

Çizelge 3.4. Üç adımlı hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) termokimyasal çevriminin Shomate eşitlik verileri [41]

| Bileşik | Sıcaklık (K) | h^f (kJ/mol) | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----------------|--------------|----------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| $H_2SO_{4(g)}$ | 1123 | -735,13 | 47,28924 | 190,3314 | -148,1299 | 43,86631 | -0,740016 | -758,9525 | 301,2961 | -735,1288 |
| $SO_{2(g)}$ | 1123 | -296,84 | 21,43049 | 74,35094 | -57,75217 | 16,35534 | 0,086731 | -305,7688 | 254,8872 | -296,8422 |
| $H_2O_{(g)}$ | 1123 | -241,83 | 30,092 | 6,832514 | 6,793435 | -2,53448 | 0,082139 | -250,881 | 223,3967 | -241,8264 |
| $O_{2(g)}$ | 1123 | 0 | 30,03235 | 8,772972 | -3,988133 | 0,788313 | -0,741599 | -11,32468 | 236,1663 | 0 |
| $SO_{2(aq)}$ | 350 | -296,84 | 21,43049 | 74,35094 | -57,75217 | 16,35534 | 0,086731 | -305,7688 | 254,8872 | -296,8422 |
| $H_2O_{(s)}$ | 350 | -285,83 | -203,606 | 1523,29 | -3196,413 | 2474,455 | 3,855326 | -256,5478 | -488,7163 | -285,8304 |
| $HBr_{(g)}$ | 350 | -36,44 | 31,71409 | -13,69992 | 23,35567 | -9,008529 | -0,02876 | -45,57464 | 240,0428 | -36,44306 |
| $H_{2(g)}$ | 350 | 0 | 33,066178 | -11,363417 | 11,432816 | -2,772874 | -0,158558 | -9,980797 | 172,707974 | 0 |

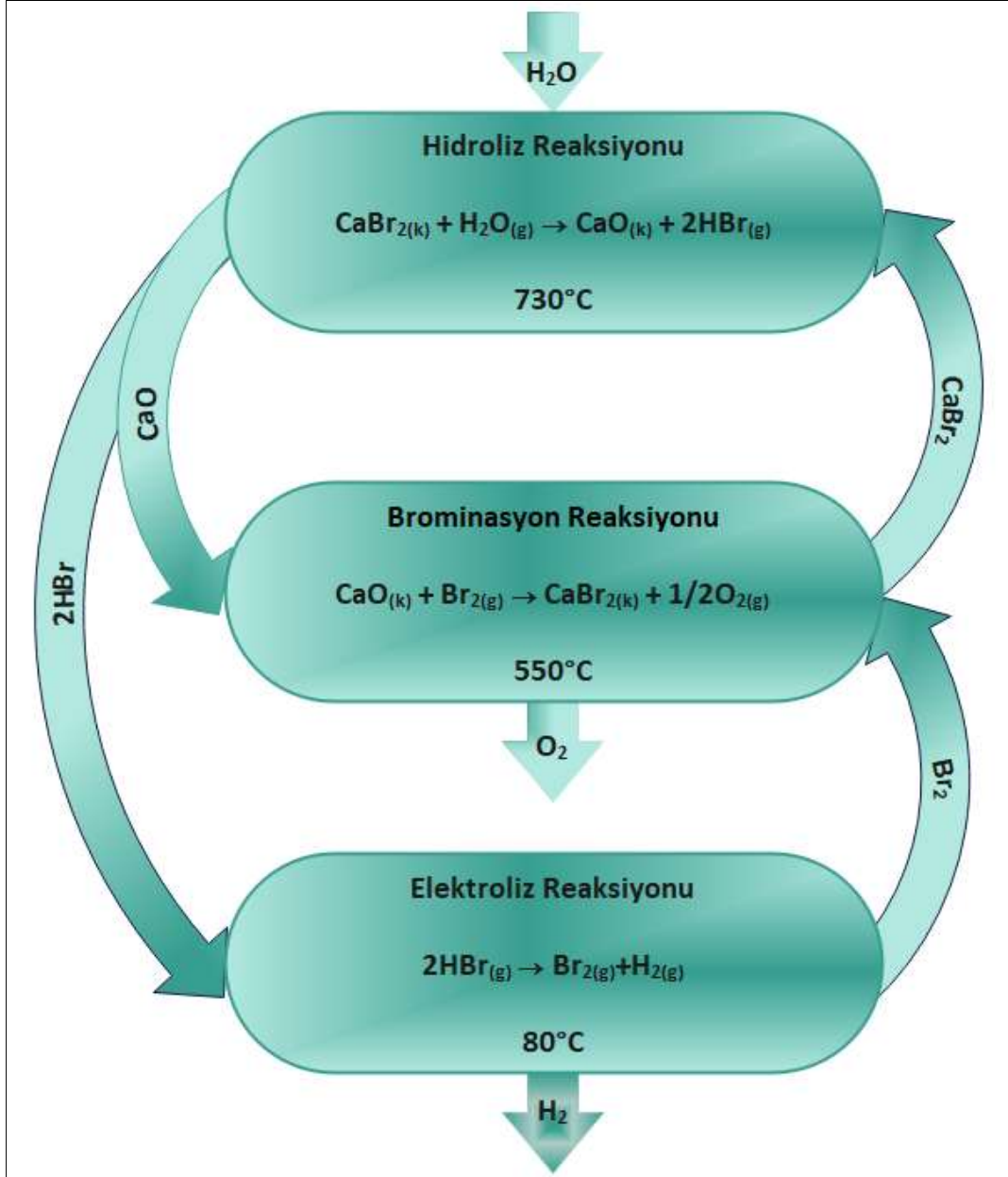
Çizelge 3.5. $\text{Br}_{2(\text{aq})}$, $\text{Br}_{2(\text{s})}$ ve $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ bileşikleri için termodinamik veriler [42]

| Bileşik | Sıcaklık (K) | Entalpi Değeri ($\Delta\text{H}=\text{kJ/mol}$) | Entropi Değeri ($\Delta\text{S}=\text{J/mol}$) |
|--------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $\text{Br}_{2(\text{aq})}$ | 350 | 3,908 | 164,291 |
| $\text{Br}_{2(\text{s})}$ | 350 | 3,908 | 164,291 |
| $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ | 350 | -806,305 | 175,754 |

Hibrit kalsiyum bromür çevrimi (HyCa-Br)

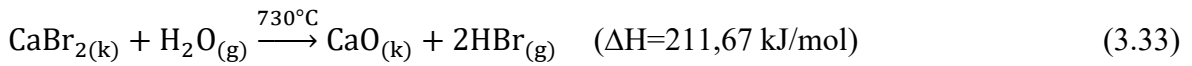
Hibrit kalsiyum bromür çevrimi UT-3 olarak adlandırılan dört aşamalı bir kalsiyum temelli çevrimin değiştirilmiş versiyonudur. Bu yöntem 2002 yılında Richard D. Doctor ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Gerek tepkimelerin sıcaklıkları gerekse tepkimelerin çevrim içindeki sıcaklık farkı dolayısıyla verimi yüksek bir çevrimdir [43, 44, 45, 46].

Aşağıdaki eşitliklerde ve Şekil 3.7’de gösterildiği gibi çevrim üç tepkimeden oluşmaktadır. Hidrojen gazının üretildiği sonuncu adım elektrokimyasal, diğer iki aşama ise termokimyasaldır. İlk tepkime hidroliz, ikinci tepkime brominasyon ve son tepkime çevrimin hibrit olarak adlandırılmasını sağlayan elektroliz tepkimesidir [44, 45, 46].



Şekil 3.7. Üç adımlı hibrit kalsiyum-bromür termokimyasal çevriminin sistematik görünüşü

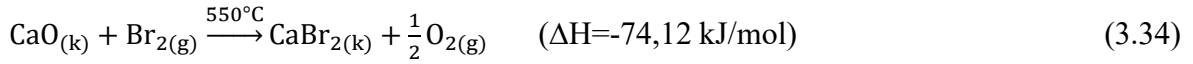
Hidroliz tepkimesi



Eş. 3.33'te verilen başlangıç tepkimesi $730\text{-}750^\circ\text{C}$ 'de gerçekleşen kalsiyum bromürün (CaBr_2) hidrolizi tepkimesidir. CaBr_2 'nin su buharıyla tepkimesi sonucu kalsiyum oksit (CaO) ve hidrojen bromür (HBr) oluşmaktadır. Bu aşamada elde edilen karışım önce

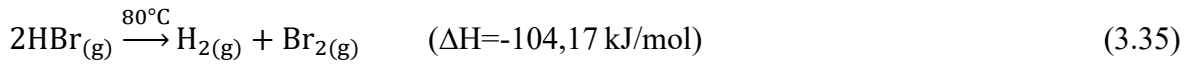
ayırıştırıcı ünitesine, ardından çevrimin devam etmesi için izleyecekleri yollara gitmek üzere ısı değiştiricilere gönderilmektedir [46].

Brominasyon tepkimesi

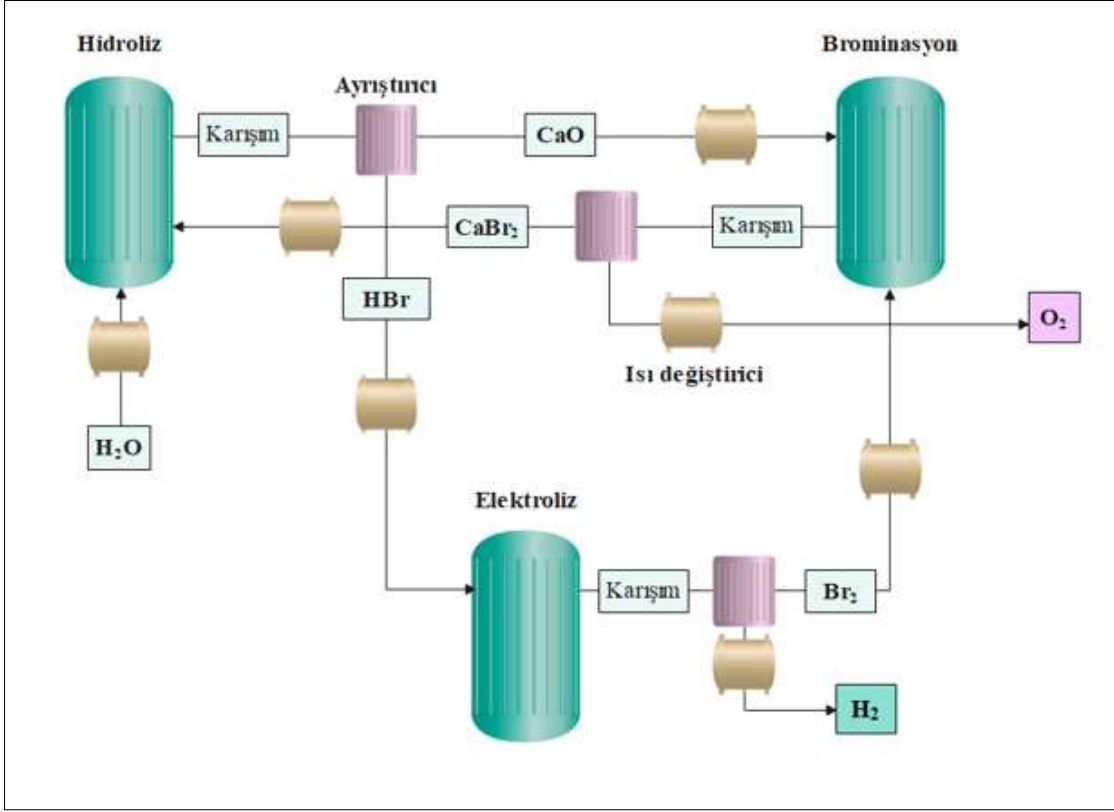


Eş. 3.34'te verilen kalsiyum oksidin (CaO) bromür (Br₂) ile tepkimesi olan brominasyon aşamasıdır. Bu aşamada 550-580°C aralığında tepkimeye giren CaO ve Br₂ tepkime sonucunda CaBr₂ ve O₂'e dönüşmektedir. Burada elde edilen karışım ayırıştırıcıya iletdikten sonra O₂ ısı değiştiriciden geğip depolanırken, CaBr₂ çevrimin sürekliliği adına 730°C'ye kadar ısıtıldıktan sonra hidroliz ünitesine gönderilmektedir [46].

Elektroliz tepkimesi



Eş. 3.35'te verilen son aşama ise hidrojen bromürün (HBr) elektrolizidir. İlk reaksiyonun ürünlerinden olan HBr 80-100°C aralığında elektroliz edilmek üzere elektroliz ünitesine alınmaktadır. Bu işlem sonucunda elde edilen karışım ayırıştırıcıya iletilmesinin ardından Br₂ sıcaklığı 550°C'ye çıkartılıp çevrime geri dönerken, H₂ depolanma ünitesine gitmektedir. Şekil 3.8'te üç adımlı hibrit sülfür bromür termokimyasal çevrimi için akış şeması verilmiştir [46].



Şekil 3.8. Üç adımlı hibrit kalsiyum bromür termokimyasal çevrim için akış şeması

Akış şemasındaki işlemler göz önüne alındığında hibrit kalsiyum bromür çevriminin ısı gereksinimi 581,97 MW, elektrik enerjisi ihtiyacı 111,29 MW olarak hesaplanmış ve Çizelge 3.6.'da sunulmuştur. Çizelge 3.7'te çevrimin termodinamik hesaplamalarında kullanılan entalpi, entropi ve Gibbs enerjisi değerlerini elde etmek için kullanılan formüllerde yararlanılan üç adımlı hibrit kalsiyum bromür termokimyasal çevriminin Shomate katsayıları verilmiştir [41]. Çevrimin ısı ve elektrik gereksinimini hesaplarken yalnızca çevrimde sıcaklık artışında kullanılan ısı değiştiricilerin ve endotermik tepkimelerin enerji ihtiyacı göz önüne alınmıştır.

Çizelge 3.6. Üç adımlı hibrit kalsiyum-bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevriminin enerji analizi

| Hibrit Kalsiyum Bromür Çevrimi Enerji Analizi | | | | |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| İşlem | Reaksiyon/Bileşik | Sıcaklık (°C) | Isı enerjisi (MW) | Elektrik işi (MW) |
| Hidroliz reaksiyonu | $\text{CaBr}_{2(k)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{CaO}_{(k)} + 2\text{HBr}_{(g)}$ | 730 | 211,67 | - |
| Elektroliz reaksiyonu | $2\text{HBr}_{(g)} \rightarrow \text{Br}_{2(g)} + \text{H}_{2(g)}$ | 80 | 267,14 | 111,29 |
| Isı değiştirici | $\text{CaBr}_{2(k)}$ | 550→730 | 15,52 | - |
| Isı değiştirici | $\text{H}_2\text{O}_{(s)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(g)}$ | 25→730 | 70,13 | - |
| Isı değiştirici | $\text{Br}_{2(g)}$ | 80→730 | 17,5 | - |
| Toplam | | | 581,97 | 111,29 |

Çizelge 3.7. Üç adımlı Hibrit Kalsiyum Bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevriminin Shomate eşitlik verileri [41]

| Bileşik | Sıcaklık (K) | h^*f (kJ/mol) | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----------------------------|--------------|-----------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| $\text{CaBr}_{2(k)}$ | 1003-823 | -683,25 | 103,1402 | -71,94304 | 75,73542 | -17,10511 | -1,1524 | -715,3176 | 266,2129 | -683,2472 |
| $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ | 1003 | -241,83 | 30,092 | 6,832514 | 6,793435 | -2,53448 | 0,082139 | -250,881 | 223,3967 | -241,8264 |
| $\text{CaO}_{(k)}$ | 1003-823 | -635,09 | 49,95403 | 4,887916 | -0,352056 | 0,046187 | -0,825097 | -652,9718 | 92,56096 | -635,0894 |
| $\text{HBr}_{(g)}$ | 1003-353 | -36,44 | 31,71409 | -13,69992 | 23,35567 | -9,008529 | -0,028758 | -45,57464 | 240,0428 | -36,44306 |
| $\text{Br}_{2(g)}$ | 823-353 | 30,91 | 38,52723 | -1,976835 | 1,526107 | -0,198398 | -0,185815 | 18,8762 | 291,4863 | 30,91001 |
| $\text{O}_{2(g)}$ | 823 | 0 | 30,03235 | 8,772972 | -3,988133 | 0,788313 | -0,741599 | -11,32468 | 236,1663 | 0 |
| $\text{H}_{2(g)}$ | 353 | 0 | 33,06618 | -11,36341 | 11,432816 | -2,772874 | -0,158558 | -9,980797 | 172,707974 | 0 |

HyS-Br ve HyCa-Br hibrit termokimyasal çevrimleri hidrojen üretim tesisinde hem ısı hem de elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Elektrik enerjisi için güç oranı sabiti HyS-Br termokimyasal çevriminde $\mathcal{E}=0,179$ elde edilirken, HyCa-Br termokimyasal çevriminde ise bu oran $\mathcal{E}=0,191$ olarak hesaplanmıştır. HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevriminde kullanılan termal güç oranı $(1 - \psi)$ ve tesisin ihtiyaç duyduğu toplam termal güç (P_{hpf}) aşağıda verilen Eş. 3.36 ve 3.37’de elde edilmektedir [37].

$$1 - \psi = 1 - \frac{1}{\eta_{ihx} \cdot \eta_{ds} [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \cdot [\eta_{gt} + \mathcal{E}]} + \frac{\mathcal{E}}{[\eta_{gt} + \mathcal{E}]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} + [\eta_{gt} + \mathcal{E}]} \quad (3.36)$$

$$P_{hpf} = (1 - \psi) \cdot (1 + \mathcal{E}) \cdot \eta_{ihx} \cdot \frac{P_f}{Q} \cdot [Q \cdot (x_a + x_n \cdot M) + 1] \quad (3.37)$$

Hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) termokimyasal çevrimi için toplam hidrojen üretim miktarı \dot{m}_{H_2} (kg/s) Eş. 3.38 - 3.47 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{H_2SO_4} = P_{hpf} / q_{tot} \quad (3.38)$$

$$\dot{m}_{SO_2} = \dot{m}_{H_2SO_4} \times \frac{M_{SO_2}}{M_{H_2SO_4}} \times \eta \quad (3.39)$$

$$\dot{m}_{H_2O-1} = \dot{m}_{H_2SO_4} \times \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2SO_4}} \times \eta \quad (3.40)$$

$$\dot{m}_{O_2} = 0,5 \times \dot{m}_{H_2SO_4} \times \frac{M_{O_2}}{M_{H_2SO_4}} \times \eta \quad (3.41)$$

$$\dot{m}_{Br_2} = \dot{m}_{SO_2} \times \frac{M_{Br_2}}{M_{SO_2}} \quad (3.42)$$

$$\dot{m}_{H_2O-2} = 2 \times \dot{m}_{SO_2} \times \frac{M_{H_2O}}{M_{SO_2}} \quad (3.43)$$

$$\dot{m}_{HBr} = 2 \times \dot{m}_{SO_2} \times \frac{M_{HBr}}{M_{SO_2}} \times \eta \quad (3.44)$$

$$\dot{m}_{H_2SO_4-2} = \dot{m}_{SO_2} \times \frac{M_{H_2SO_4}}{M_{SO_2}} \times \eta \quad (3.45)$$

$$\dot{m}_{Br_2-2} = 0,5 \times \dot{m}_{HBr} \times \frac{M_{Br_2}}{M_{HBr}} \times \eta \quad (3.46)$$

$$\dot{m}_{H_2} = 0,5 \times \dot{m}_{HBr} \times \frac{M_{H_2}}{M_{HBr}} \times \eta \quad (3.47)$$

Hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimi için toplam hidrojen üretim miktarı \dot{m}_{H_2} (kg/s) Eş. 3.48 - 3.56 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{CaBr_2-1} = \frac{P_{hpf}}{q_{tot}} \quad (3.48)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{CaBr_2-1} \times \frac{M_{H_2O}}{M_{CaBr_2}} \quad (3.49)$$

$$\dot{m}_{CaO} = \dot{m}_{CaBr_2-1} \times \frac{M_{CaO}}{M_{CaBr_2}} \times \eta \quad (3.50)$$

$$\dot{m}_{HBr} = 2 \times \dot{m}_{CaBr_2-1} \times \frac{M_{HBr}}{M_{CaBr_2}} \times \eta \quad (3.51)$$

$$\dot{m}_{Br_2-1} = \dot{m}_{CaO} \times \frac{M_{Br_2}}{M_{CaO}} \quad (3.52)$$

$$\dot{m}_{CaBr_2-2} = \dot{m}_{CaO} \times \frac{M_{CaBr_2}}{M_{CaO}} \times \eta \quad (3.53)$$

$$\dot{m}_{O_2} = 0,5 \times \dot{m}_{CaO} \times \frac{M_{O_2}}{M_{CaO}} \times \eta \quad (3.54)$$

$$\dot{m}_{Br_2-2} = 0,5 \times \dot{m}_{HBr} \times \frac{M_{Br_2}}{M_{HBr}} \times \eta \quad (3.55)$$

$$\dot{m}_{H_2} = 0,5 \times \dot{m}_{HBr} \times \frac{M_{H_2}}{M_{HBr}} \times \eta \quad (3.56)$$

Burada verilen \dot{m} kütleli debiyi, M molar kütleyle ifade etmektedir. HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevriminin tepkime verim değerleri (η) 0,90 olarak kabul edilmiştir.

HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimlerinde q_{tot} değerleri sırasıyla 6,40 ve 2,91'dir. q_{tot} değeri çevrimin toplam ısı gereksinimi değerinin çevrimin başlangıç bileşiğinin molar kütlelerine bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

HyS-Br ve HyCa-Br çevrimleri için gerekli ısı (Q) ve elektrik gereksinimini hesaplamada kullanılan formüller Eş. 3.57 - 3.60 aralığında verilmiştir [9, 25].

$$\bar{h}(T) - \bar{h}_0 = AT + B \frac{T^2}{2} + C \frac{T^3}{3} + D \frac{T^4}{4} - \frac{E}{T} + F - H \quad (3.57)$$

$$Q = \sum n_{\zeta} (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}_0)_{\zeta} - \sum n_g (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}_0)_g \quad (3.58)$$

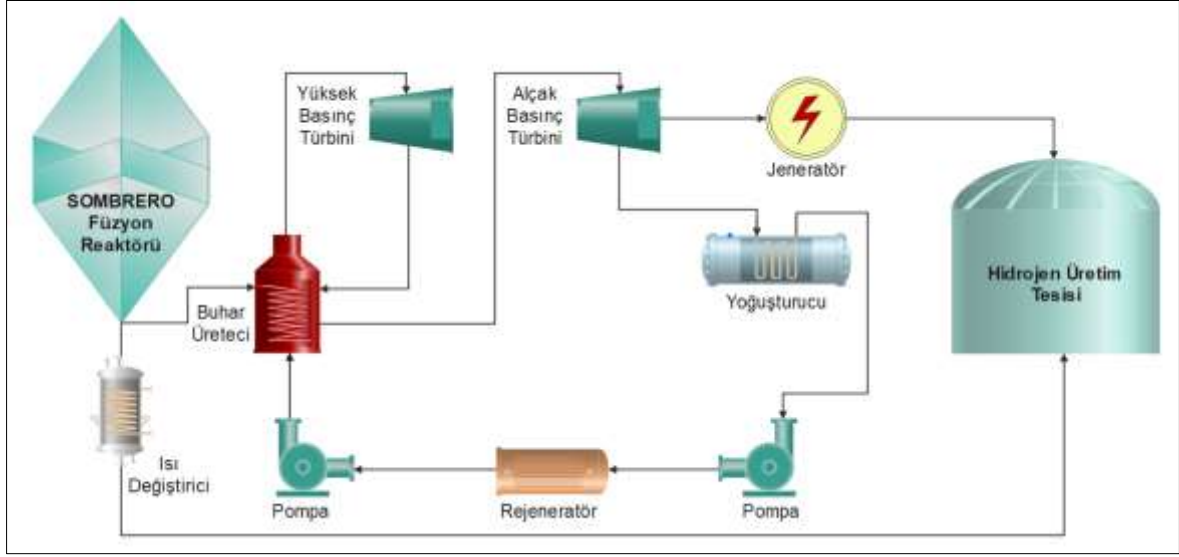
$$\bar{s} = A \ln(T) + BT + \frac{CT^2}{2} + \frac{DT^3}{3} - \frac{E}{2T^2} + G \quad (3.59)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.60)$$

Burada, \bar{h} (kJ/mol) entalpi, \bar{h}_f^o (kJ/mol) oluşum entalpisi ve \bar{h}_o (kJ/mol) standart entalpiyi simgelemektedir. Shomate katsayıları yardımıyla hesaplamalarda kullanılacak entalpi ve entropi değerlerinin elde edilebilmesi için Eşitlik 3.57 ve 3.59'dan faydalanılmıştır.

Eş. 3.60 hidrojen üretim çevrimlerinin elektroliz tepkimelerinin elektrik gereksinimini hesaplamada kullanılmıştır.

Şekil 3.9 SOMBRERO füzyon reaktörüne entegre edilmiş hidrojen üretim tesisini göstermektedir. Hidrojen üretim tesisinin ısı ihtiyacı reaktörden karşılanırken, elektrik ihtiyacı ise Rankine çevrimi yoluyla üretilmekte ve çevrim verimi %41 olarak kabul edilmiştir [47].



Şekil 3.9. SOMBRERO füzyon reaktörüne entegre edilmiş Rankine çevrimi ve hidrojen üretim tesisinin gösterimi

4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

SOMBRERO füzyon reaktörünün nötronik analizi ve hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimleri için hidrojen üretim miktarı incelenmiştir. Hesaplamalarda, nötronik analiz Monte Carlo yöntemi kullanılarak yapılmıştır [33]. İlk olarak, UO₂ yakıtlı SOMBRERO füzyon reaktöründe belirlenen farklı parametrelere göre hesaplanmış statik olarak trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) nötronik sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra, SOMBRERO füzyon reaktörüne entegre edilmiş hidrojen ünitesinde hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) çevrimleri termokimyasal çevrimi kullanılarak reaktörün hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Hesaplamalarda termal güç oranı ($1 - \psi$), tesisin ihtiyaç duyduğu toplam güç (P_{hp}) ve hidrojen üretim miktarı (\dot{m}) hesaplanmıştır. Elde edilen nötronik sonuçlar ve farklı hidrojen üretim prosesleri için elde edilen sonuçlar ayrı ayrı ele alınmıştır.

4.1. Nötronik Analizler

Monte Carlo yöntemi kullanılarak elde edilen SOMBRERO füzyon reaktörünün nötronik sonuçları bu bölümde statik olarak incelenmiş ve grafik üzerinde yorumlanmıştır.

4.1.1. Trityum üretim oranı (TBR)

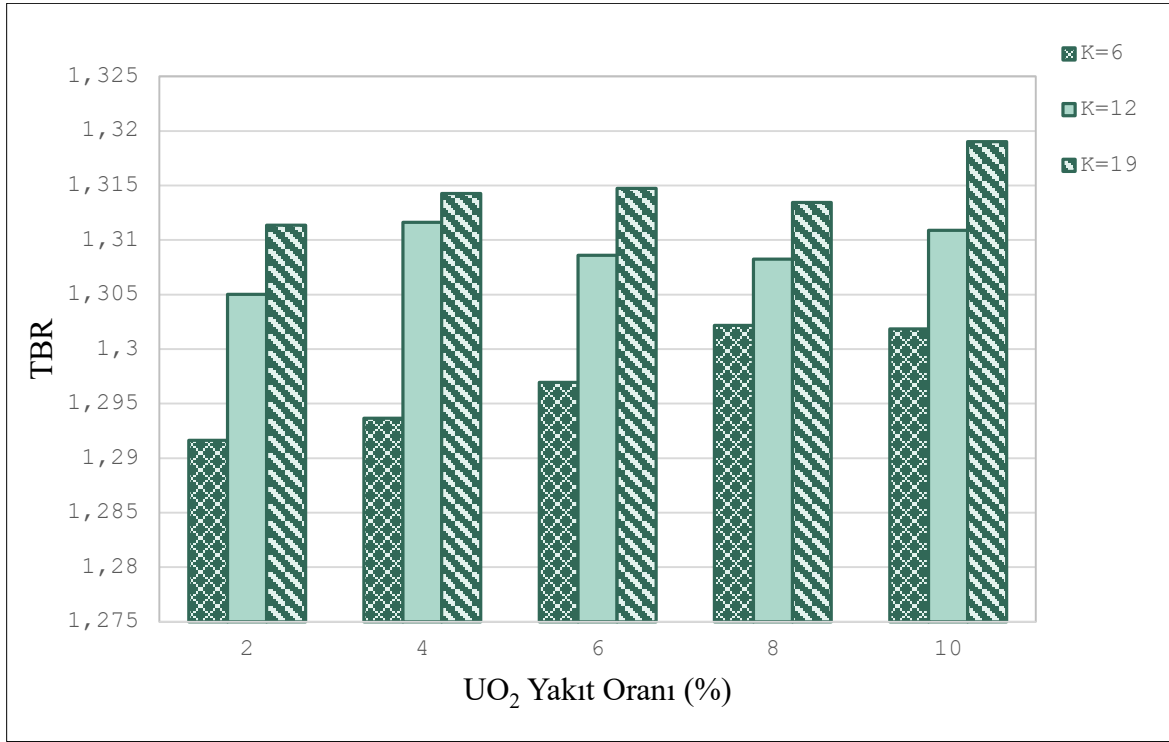
Füzyon tabanlı nükleer reaktörlerde, reaktörün kendi kendine füzyon reaksiyonlarını sürdürebilmesi için trityum üretim oranı ($TBR > 1,05$) 1,05'ten büyük olması gerekmektedir. Füzyon reaktörleri için gerekli trityum üretiminin sağlanabilmesi için Li izotopu içeren (Li₂O gibi) materyaller aracılığıyla düşük ve yüksek enerjili nötronlarla Eş. 4.1 ve 4.2'de verilen reaksiyonların gerçekleşmesi gerekmektedir [37].



Eş. 4.1 ve 4.2'de verilen reaksiyonlar sonucunda Eş. 4.3'te verildiği gibi T₆ ve T₇'nin toplamları füzyon reaksiyonunun sürdürülebilirliği için gerekli TBR'yi vermektedir.

$$TBR = T_6 + T_7 \quad (4.3)$$

Bu tez kapsamında SOMBRERO füzyon reaktöründe ilk katman Li_2O kalınlıkları 6, 12, 19 cm alınarak, bu katmanda Li_2O trityum üretici içerisine %2'den %10'a kadar %2'şer aralıklarla doğal UO_2 yakıtı karıştırılarak reaktörün tamamı için elde edilen TBR değerleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Trityum üretiminin yakıt oranına göre değişimi

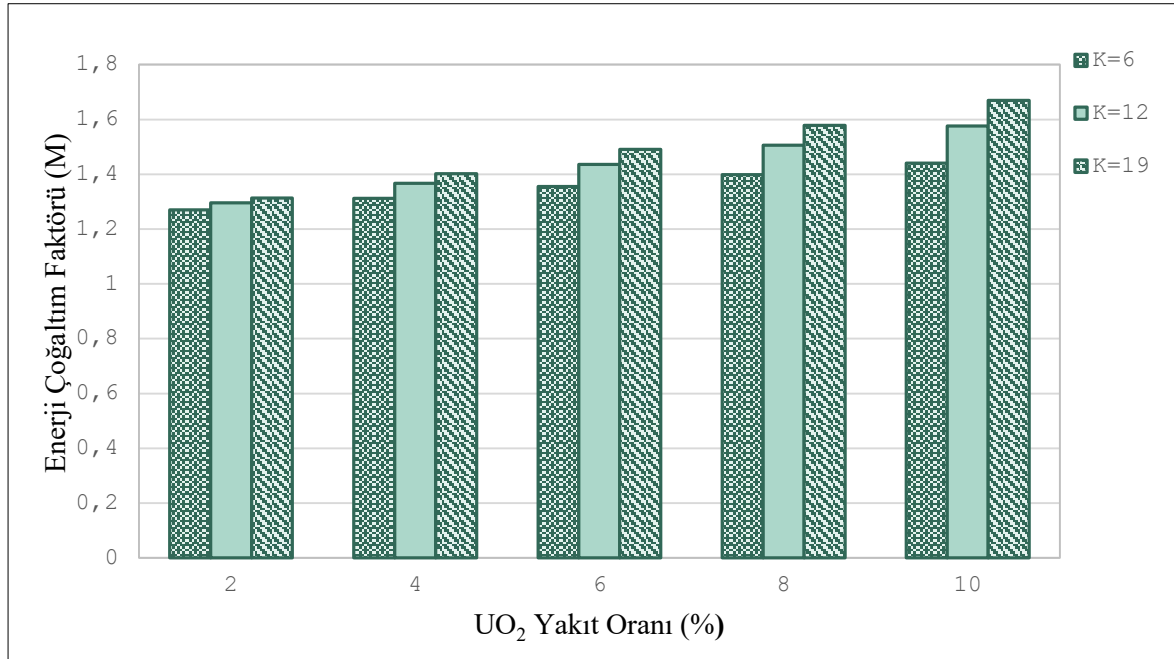
Şekil 4.1 incelendiğinde füzyon reaksiyonunun sürdürülebilirliği için gerekli TBR değerinin 1,05'ten büyük olduğu görülmektedir. TBR değerinin, yakıt bölgesi kalınlığı ve UO_2 yüzdeleri oranının artması ile birlikte artış gösterdiği gözlemlenmiştir. %2 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta TBR oranı 1,292 olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 1,312 olarak hesaplanmıştır. %6 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta TBR oranı 1,295 olarak hesaplanırken, bu değer 19 cm kalınlık için 1,315 olarak elde edilmiştir. %10 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta TBR oranı 1,301 elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 1,320 olarak hesaplanmıştır.

4.1.2. Enerji çoğaltım faktörü (M)

Enerji çoğaltım faktörü (M), füzyon nötron enerjisine bağlı blanket geometrisinde açığa çıkan toplam enerji üretimi olarak tanımlanır. Enerji çoğaltım faktörü (M), Eş. 4.4'te verildiği gibi blankette açığa çıkan fisyon oranı, T_6 ve T_7 üretim oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır [37].

$$M = 1 + \frac{200 \text{ MeV} \cdot \langle \Phi \cdot \Sigma_f \rangle + 4,7484 \text{ MeV} \cdot T_6 - 2,467 \text{ MeV} \cdot T_7}{14,1 \text{ MeV}} \quad (4.4)$$

Burada 200 MeV bir fisyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan enerjiyi, 4,7484 MeV T_6 üretimi sonucunda açığa çıkan enerjiyi, -2,467 MeV T_7 üretimi esnasında açığa çıkan enerji ve 14,1 MeV bir nötronun sahip olduğu enerjiyi tanımlamaktadır. $\langle \Phi \cdot \Sigma_f \rangle = \iint \Phi \cdot \Sigma_f dE dV$ ifadesi ise toplam integral fisyon oranını tanımlamaktadır [37].



Şekil 4.2. Enerji çoğaltım faktörünün (M) yakıt oranına göre değişimi

Blankette açığa çıkan enerji çoğaltım faktörü Şekil 4.2 verilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde M değeri yakıt bölgesi kalınlığı ve UO₂ yüzdelik oranının artması ile birlikte artış gösterdiği görülmektedir. %2 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta M değeri 1,270 olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 1,313 olarak hesaplanmıştır. %6 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta M değeri 1,355 olarak hesaplanırken, bu değer 19 cm

kalınlık için 1,490 olarak elde edilmiştir. %10 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta M değeri 1,441 elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 1,670 olarak hesaplanmıştır. Artan yakıt oranı ile birlikte blankette meydana fisyon reaksiyonları enerji çoğaltım faktörünün artışına pozitif yönde etki gösterdiği anlaşılmaktadır.

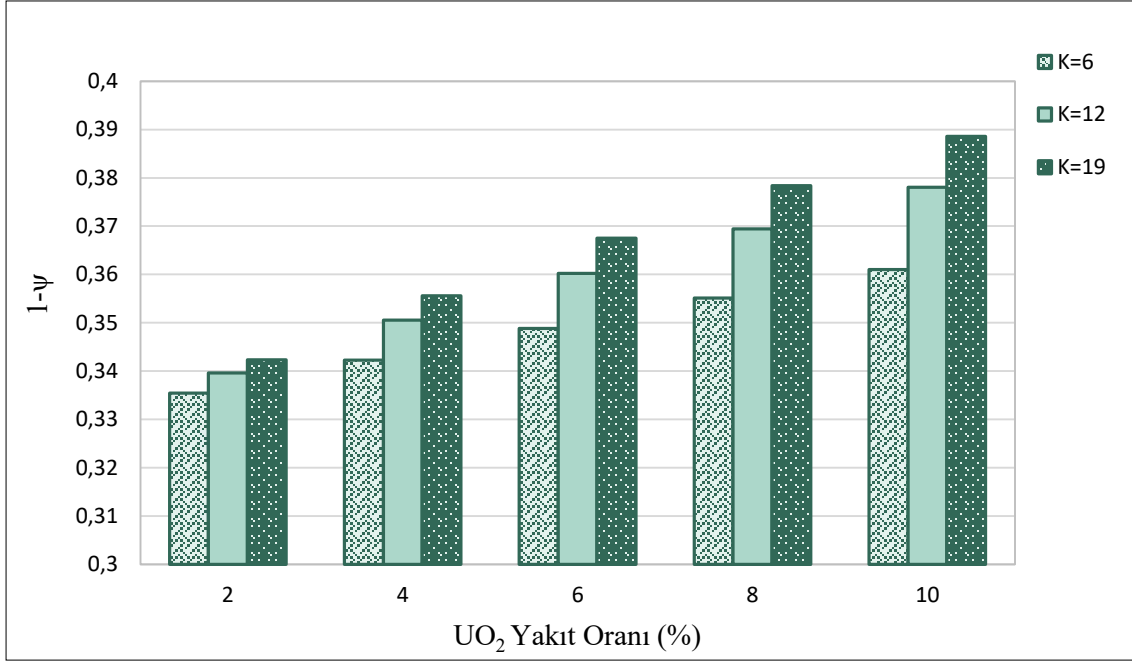
4.2. Hidrojen Üretim Potansiyeli

SOMBRERO füzyon reaktöründe hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimleri olmak üzere iki farklı hidrojen üretim yöntemi kullanılmıştır. Nötronik hesaplamalara bağlı olarak farklı parametreler için reaktöre entegre edilmiş hidrojen ünitesinde hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir.

4.2.1. Hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretimi

SOMBRERO füzyon reaktöründe Hibrit Sülfür-Bromür termokimyasal çevrimi kullanılarak hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Nötronik analizlere bağlı olarak elde edilen enerji çoğaltım faktörü (M) değerine bağlı olarak termal güç oranı ($1-\psi$), hidrojen üretim ünitesinin toplam termal gücü (P_{hpf}) ve hidrojen üretim miktarı (\dot{m}) hesaplanmıştır.

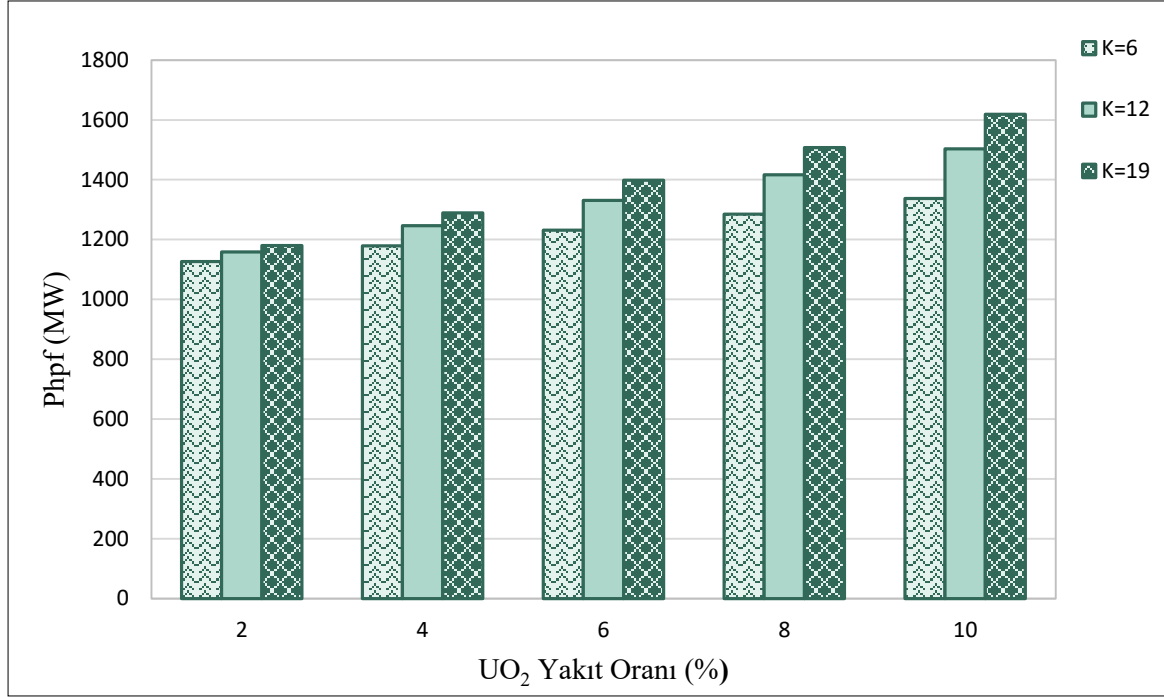
Hibrit Sülfür-Bromür (HyS-Br) termokimyasal çevrimi kullanılarak SOMBRERO füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim ünitesinde hidrojen üretimi termal güç oranının ($1-\psi$) elde edilmesi gerekmektedir. Hibrit Sülfür-Bromür termokimyasal çevrimlerinde hem ısı hem de elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. HBr termokimyasal çevrimi için elde edilen termal güç ($1-\psi$) oran değişimi %2 artış oranında %2 UO_2 ve %10 UO_2 aralığında nükleer yakıt ve blanket geometrisinde ilk Li_2O katmanı kalınlıkları 6 cm, 12 cm ve 19 cm için Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. HyS-Br termokimyasal çevrimi için termal güç oranı ($1-\psi$) değişimi

Termal güç oranının ($1-\psi$), blankette ilk bölgede yer alan Li_2O kalınlığı ve UO_2 yüzdelik oranının artması ile birlikte artış gösterdiği Şekil 4.3'te görülmektedir. %2 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta $1-\psi$ oranı 0,335 olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 0,342 olarak hesaplanmıştır. %6 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta ($1-\psi$) oranı 0,348 olarak hesaplanırken, bu değer 19 cm kalınlık için 0,367 olarak elde edilmiştir. %10 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta ($1-\psi$) oranı 0,360 elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 0,380 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.3'te görüldüğü gibi artan UO_2 yakıt oranı ve Li_2O kalınlık boyutunun artması ile birlikte termal güç oranının ($1-\psi$) artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

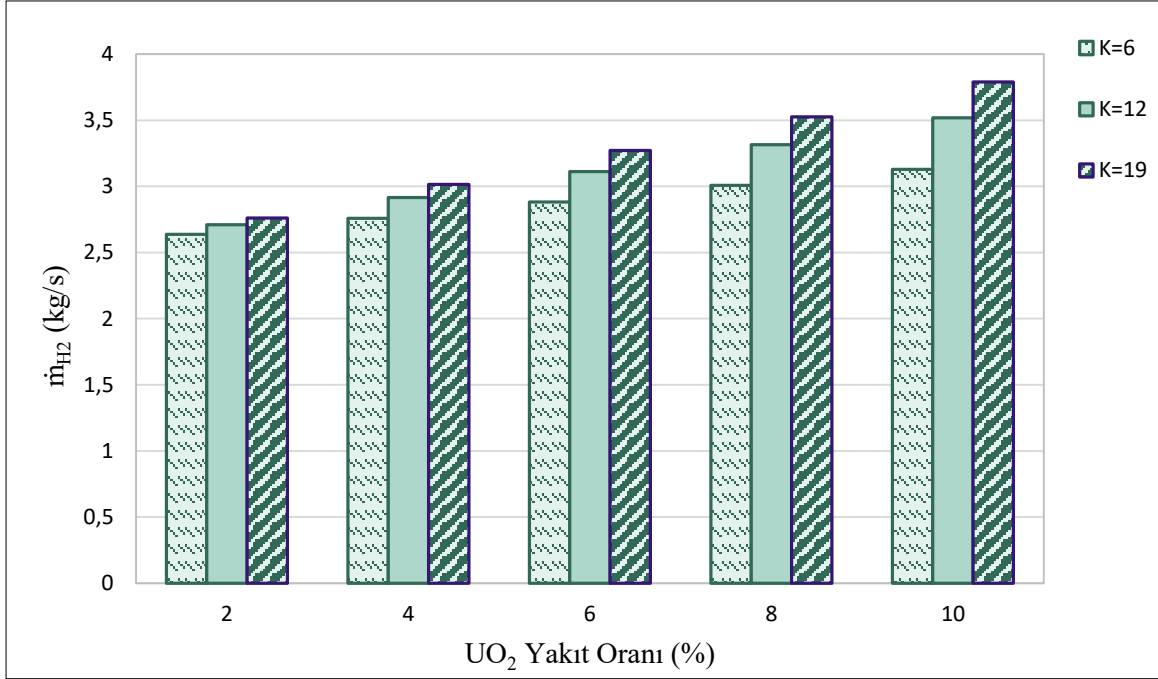
Hibrit Sülfür-Bromür (HyS-Br) termokimyasal çevrimleri yardımıyla SOMBRERO füzyon reaktöründe hidrojen üretimi için hidrojen üretim ünitesinin toplam termal gücüne (P_{hpf}, MW) ihtiyaç duyulmaktadır. HyS-Br termokimyasal çevrimi için elde edilen P_{hpf} grafiksel değişimi %2 artış oranında %2 UO_2 ve %10 UO_2 aralığında nükleer yakıt ve blanket geometrisi ilk Li_2O katmanı 6 cm, 12 cm ve 19 cm kalınlıkları için Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. HyS-Br çevrimi için toplam gücün (P_{hpf}) yakıt oranına göre değişimi

Toplam gücün (P_{hpf}), blankette ilk bölgede yer alan Li_2O kalınlığı ve UO_2 yüzdelik yakıt oranının artması ile birlikte artış gösterdiği Şekil 4.4'te görülmektedir. %2 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta P_{hpf} değeri 1126,77 MW olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 1109,75 MW olarak hesaplanmıştır. %6 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta P_{hpf} değeri 1231,67 MW olarak hesaplanırken, bu değer 19 cm kalınlık için 1398,08 olarak elde edilmiştir. %10 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta P_{hpf} değeri 1337,23 MW elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 1619,20 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4'te görüldüğü ilk Li_2O bölgesinin kalınlığı ve % UO_2 yakıt oranı artmasıyla birlikte P_{hpf} değerinin arttığı tespit edilmiştir.

SOMBRERO füzyon reaktöründe (HyS-Br) termokimyasal çevrimi yardımıyla hidrojen üretimi (\dot{m}_{H_2}), %2 artış oranında %2 UO_2 ve %10 UO_2 aralığında nükleer yakıt ve blanket geometrisi ilk Li_2O katmanı 6 cm, 12 cm ve 19 cm kalınlıkları için Şekil 4.5'te görüldüğü gibi hesaplanmıştır.



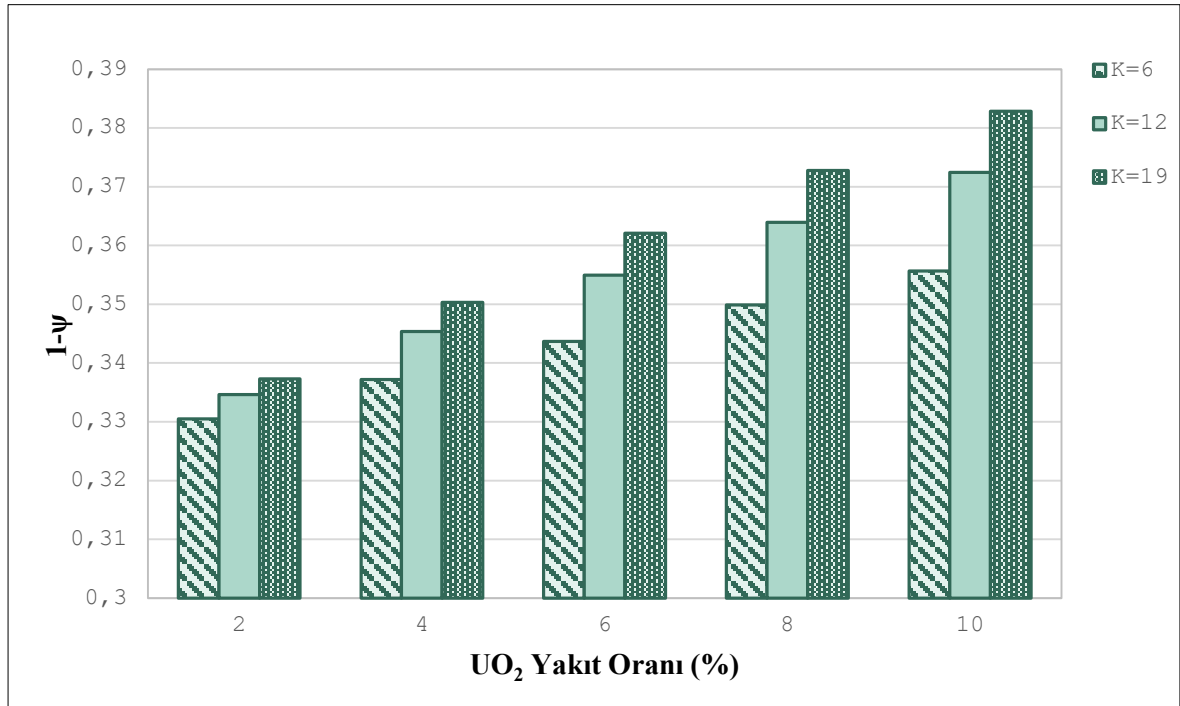
Şekil 4.5. HyS-Br termokimyasal çevrimi ile üretilen hidrojen üretim miktarı (\dot{m}_{H_2})

Hidrojen üretim miktarı (\dot{m}_{H_2}), blankette ilk bölgede yer alan Li_2O kalınlığı ve UO_2 yüzdelik oranının artması ile birlikte artış gösterdiği Şekil 4.5'te sunulmuştur. %2 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta \dot{m}_{H_2} değeri 2,63 kg/s olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 2,76 kg/s olarak hesaplanmıştır. %6 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta \dot{m}_{H_2} değeri 2,88 kg/s olarak hesaplanırken, bu değer 19 cm kalınlık için 3,27 olarak elde edilmiştir. %10 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta \dot{m}_{H_2} değeri 3,12 kg/s elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 3,78 kg/s olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.5'te görüldüğü ilk Li_2O bölgesinin kalınlığı ve % UO_2 yakıt oranı artmasıyla \dot{m}_{H_2} değerinin arttığı anlaşılmıştır.

4.2.2. Hibrit kalsiyum-bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimi ile hidrojen üretimi

Bu bölümde SOMBRERO füzyon reaktöründe Hibrit Kalsiyum-Bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimi kullanılarak hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Nötronik analizler sonucu elde edilen enerji çoğaltım faktörü (M) değerine bağlı olarak termal güç oranı ($1-\psi$), hidrojen üretim ünitesinin toplam termal gücü (P_{hpf}) ve hidrojen üretim miktarı (\dot{m}) hesaplanmıştır.

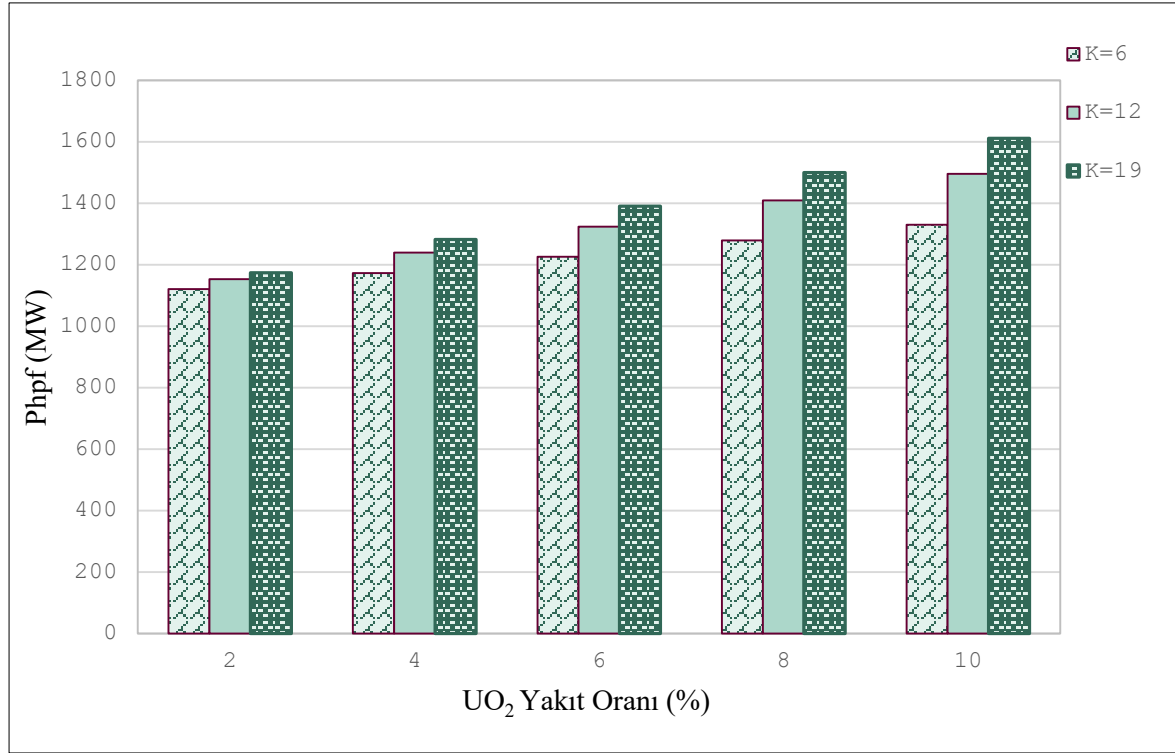
Hibrit Kalsiyum-Bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimleri kullanılarak SOMRERO füzyon reaktörüne entegre edilen hidrojen üretim ünitesinde hidrojen üretimi termal güç oranına ($1-\psi$) ihtiyaç duyulmaktadır. HyCa-Br termokimyasal çevrimlerinde hem ısı hem de elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. HyCa-Br termokimyasal çevrimi için elde edilen termal güç ($1-\psi$) oran değişimi %2 artış oranında %2 UO₂ ve %10 UO₂ aralığında nükleer yakıt ve blanket geometrisinde ilk Li₂O katmanı kalınlıkları 6 cm, 12 cm ve 19 cm için Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. HyCa-Br çevrimi için termal güç oranının ($1-\psi$) yakıt oranına göre değişimi

Blankette ilk bölgede yer alan Li₂O kalınlığı ve UO₂ yüzdeleri oranının artması ile birlikte termal güç oranı ($1-\psi$)'in artış oranı Şekil 4.6'da görülmektedir. Termal güç oranı ($1-\psi$), %2 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta 0,330 olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 0,337 olarak hesaplanmıştır. 6 cm Li₂O katman kalınlığında %6 UO₂ içeren blanket geometrisi için $1-\psi$ oranı 0,343 olarak hesaplanırken, bu değer 19 cm kalınlık için 0,362 olarak elde edilmiştir. 6 cm Li₂O kalınlıkta %10 UO₂ içeren blanket geometrisi için $1-\psi$ oranı 0,355 elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 0,382 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.7'de görüldüğü ilk Li₂O bölgesinin kalınlığı ve % UO₂ yakıt oranı artmasıyla birlikte ($1-\psi$) değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

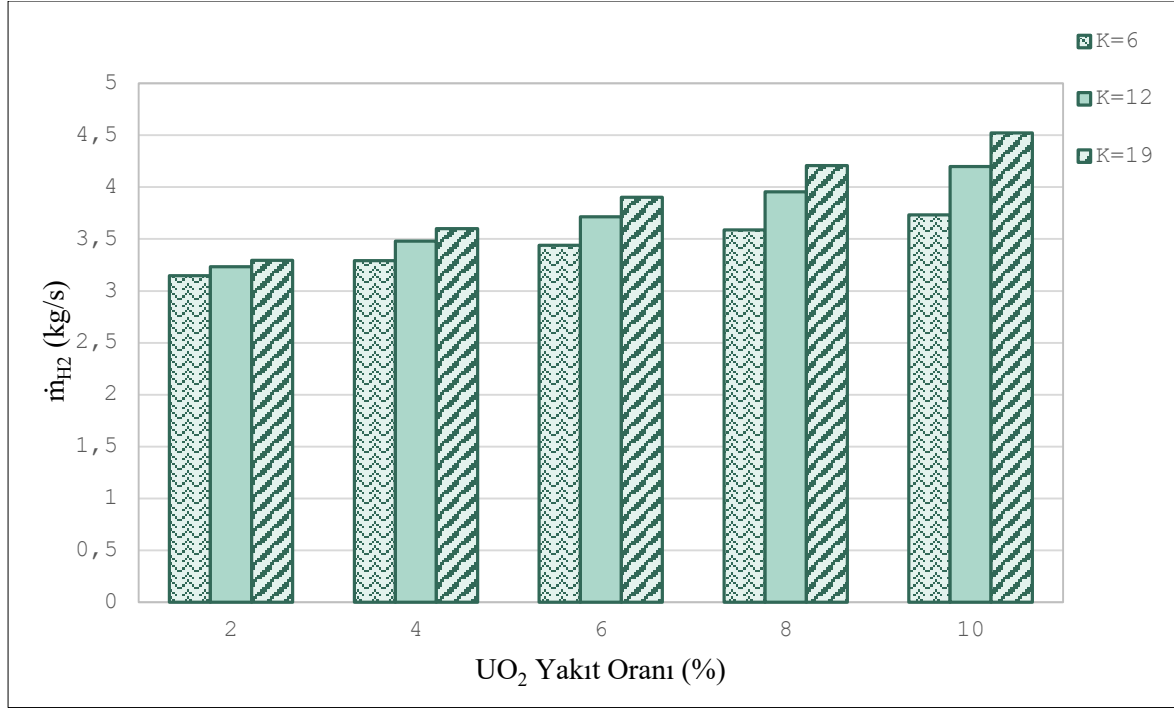
HyCa-Br termokimyasal çevrimi yardımıyla SOMBRERO füzyon reaktöründe hidrojen üretimi için hidrojen üretim ünitesinin toplam termal gücüne (P_{hpf}, MW) ihtiyaç duyulmaktadır. %2 artış oranında %2 UO_2 ve %10 UO_2 aralığında nükleer yakıt ve blanket geometrisi ilk Li_2O katmanı 6 cm, 12 cm ve 19 cm kalınlıkları için HyCa-Br termokimyasal çevrimi için elde edilen P_{hpf} grafiksel değişimi Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. HyCa-Br çevrimi için toplam termal gücün (P_{hpf}) yakıt oranına göre değişimi

Blankette ilk bölgede yer alan Li_2O kalınlık değişimi ve UO_2 yüzdelik oranının artması ile birlikte artış toplam termal gücün (P_{hpf}) artış gösterdiği Şekil 4.7’de görülmektedir. 6 cm Li_2O kalınlıkta ve %2 UO_2 içeren blanket geometrisi için P_{hpf} değeri 1121,12 MW olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlıktaki Li_2O için 1173,84 MW olarak hesaplanmıştır. 6 cm Li_2O kalınlık ve %6 UO_2 içeren blanket geometrisi için P_{hpf} değeri 1225,50 MW olarak hesaplanırken, bu değer 19 cm kalınlığa sahip Li_2O için 1391,08 olarak elde edilmiştir. 6 cm Li_2O kalınlık ve %10 UO_2 içeren blanket geometrisinde P_{hpf} değeri 1330,53 MW elde edilirken, 19 cm kalınlıktaki Li_2O için bu değer 1611,14 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi blanket ilk Li_2O katman bölgesinin kalınlığı ve blanketteki % UO_2 yakıt oranı artmasıyla P_{hpf} değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

SOMBRERO füzyon reaktöründe HyCa-Br termokimyasal çevrimi yardımıyla blanket geometrisi ilk Li₂O katmanı 6 cm, 12 cm ve 19 cm kalınlıkları ve %2 artış oranında %2 UO₂ ve %10 UO₂ aralığında nükleer yakıt kullanılmasıyla birlikte elde edilen hidrojen üretimi (\dot{m}_{H_2}), Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

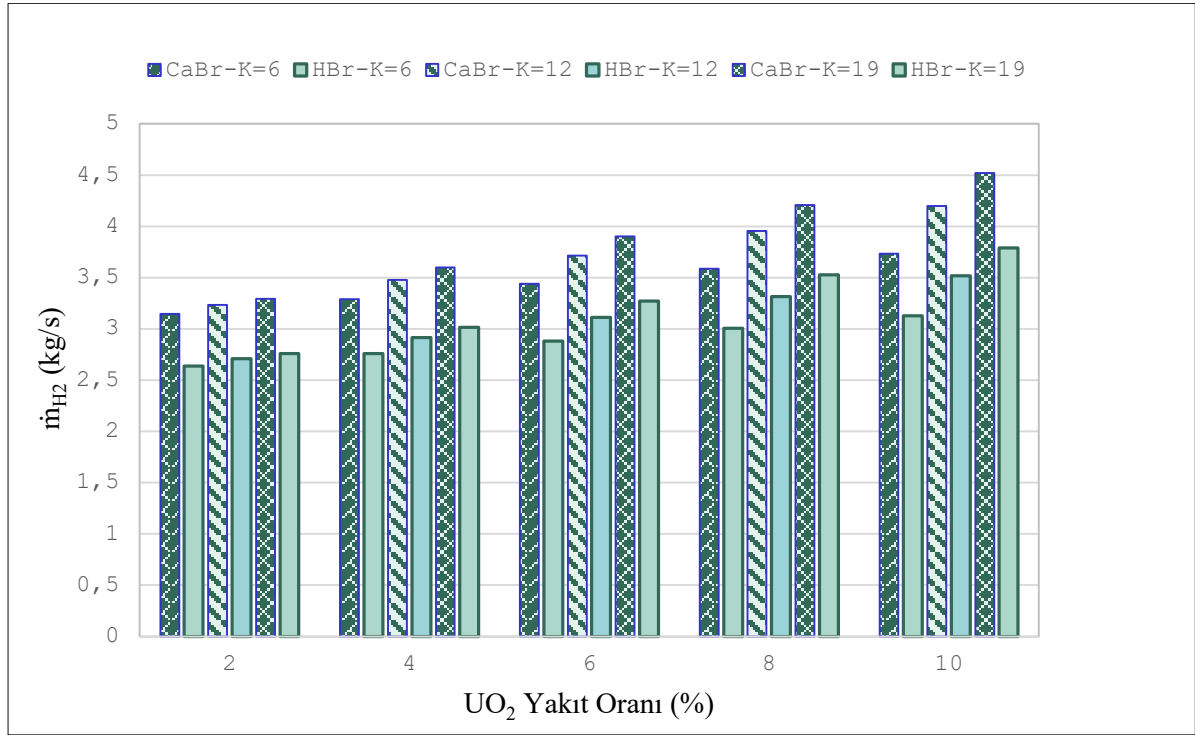


Şekil 4.8. HyCa-Br çevrimi ile üretilen hidrojen üretim miktarının (\dot{m}_{H_2}) yakıt oranına göre değişimi

Blankette ilk bölgede yer alan Li₂O kalınlık ve UO₂ yüzdelerinin artması ile hidrojen üretim miktarının (\dot{m}_{H_2}), artış gösterdiği Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Blanket ilk katman 6 cm Li₂O kalınlıkta ve %2 UO₂ içeren blanket geometrisi için \dot{m}_{H_2} değeri 3,14 kg/s olarak elde edilirken, 19 cm Li₂O kalınlık için bu değer 3,29 kg/s olarak hesaplanmıştır. 6 cm Li₂O kalınlıkta ve %6 UO₂ içeren blanket geometrisi için \dot{m}_{H_2} değeri 3,43 kg/s olarak hesaplanırken, 19 cm Li₂O kalınlık için bu değer 3,90 olarak elde edilmiştir. 6 cm Li₂O kalınlıkta ve %10 UO₂ içeren blanket geometrisi için \dot{m}_{H_2} değeri 3,73 kg/s elde edilirken, 19 cm Li₂O kalınlık için bu değer 4,52 kg/s olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.8’de görüldüğü ilk Li₂O bölgesinin kalınlığı ve % UO₂ yakıt oranı artmasıyla ile \dot{m}_{H_2} değerinin reaktörden elde edilen enerjiye bağlı olarak arttığı görülmüştür.

4.2.3. Üretilen hidrojen miktarlarının karşılaştırılması

SOMBRERO füzyon reaktöründe hibrit sülfür-bromür (HyS-Br) ve hibrit kalsiyum bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimleri olmak %2 artış oranında %2 UO_2 ve %10 UO_2 aralığında nükleer yakıt ve blanket geometrisinde ilk Li_2O katmanı kalınlıkları 6 cm, 12 cm ve 19 cm için hidrojen üretim oranları Şekil 4.9'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.9. HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimleri ile üretilen hidrojen oranının karşılaştırılması

Hidrojen üretim miktarı (\dot{m}_{H_2}) karşılaştırıldığında, %2 UO_2 içeren blanket geometrisi için HyS-Br termokimyasal çevrimine göre HyCa-Br termokimyasal çevrim ile elde edilen \dot{m}_{H_2} miktarı tüm Li_2O katman kalınlıkları değişimi için ortalama yaklaşık %8 oranında artış göstermiştir. SOMBRERO füzyon reaktörü ilk Li_2O katman kalınlıkları değişiminin tümü ve %6 UO_2 içeren blanket geometrisi için HyS-Br termokimyasal çevrimine göre HyCa-Br termokimyasal çevrim ile elde edilen \dot{m}_{H_2} miktarı ortalama yaklaşık %19 oranında artış sağlamaktadır. %10 UO_2 içeren ve blanket ilk Li_2O katman kalınlıkları değişimi için HyS-Br termokimyasal çevrimine göre HyCa-Br termokimyasal çevrim ile elde edilen \dot{m}_{H_2} miktarı ortalama yaklaşık %20 oranında bir artış sergilemiştir. Şekil 4.9'da görüldüğü HyS-

Br termokimyasal çevrimine göre HyCa-Br termokimyasal çevrim daha fazla hidrojen üretileceği tespit edilmiştir.

Bu tez kapsamında belirlenen parametreler doğrultusunda HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimleri ile elde edilen hidrojen üretim miktarları (kg/s) literatürle karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.1’te görüldüğü gibi literatür çalışmalarında farklı nükleer reaktörler, farklı yakıtlar, farklı parametreler ve farklı hidrojen üretim yöntemleri mevcuttur.

Çizelge 4.1. Çeşitli hidrojen üretim çevrimleri için üretilen hidrojen miktarının karşılaştırılması

| Kaynakça | Reaktör adı | Yakıt ve Soğutucu | Çevrim | Üretilen hidrojen miktarı (kg/s) (İlk değer) |
|------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------|
| Bu çalışma | SOMBRERO füzyon reaktörü | %2-%10 UO ₂ Li ₂ O | HyS-Br HyCa-Br | ~3,14-4,52 ~2,63-3,78 |
| Ref.[28] | PACER füzyon reaktörü | Eriyik tuz karışımı (MAF ₄ + Li ₂ BeF ₄) | Fe-Cl | ~13 |
| | | | Mg-Cl (I) | ~39 |
| | | | Mg-Cl (II) | ~26 |
| Ref. [25] | LIFE füzyon reaktörü | Eriyik tuz karışımı (ThF ₄ + Li ₂ BeF ₄) | Cu-Cl | 1,39 |
| Ref. [27] | PACER füzyon reaktörü | Eriyik tuz karışımı (ThF ₄ ve UF ₄ + Li ₂ BeF ₄) | Fe-Cl | 7,36/10,96 |
| Ref. [48] | PACER füzyon reaktörü | Eriyik tuz karışımı (ThF ₄ + LiF) | SMR+WGS+MCS | 80,76 |
| | | | SMR+WGS | 36,61 |
| | | | SMR | 24,73 |
| | | | HTE | 7,89 |
| | | | S-I | 6,41 |
| Ref. [18] | SOMBRERO füzyon reaktörü | C, Li ₂ O ve seramik yakıtlar | SMR+WGS | 33,00 |
| Ref. [17] | APEX füzyon reaktörü | Eriyik tuz karışımı (Minör Aktinit ve Flibe) | SMR+WGS+MCS | 218 |
| | | | SMR+WGS | 100 |
| | | | SMR | 60 |
| | | | HTE | 8,60 |
| | | | S-I | 8,40 |
| Ref. [23] | HTR-PM fisyon reaktörü | TRISO kaplamalı UO ₂ | Mg-Cl | 2,43 |
| Ref. [26] | LIFE füzyon reaktörü | TRISO kaplamalı ThC | Cu-Cl | 9 |
| | | | Co-Cl | 4,8 |
| | | | S-I | 7,36 |

HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimleri, literatürden derlenen ve Çizelge 4.1’te verilen sonuçlarla hidrojen üretimi açısından değerlendirildiğinde, nükleer reaktörün gücü, işletim için belirlenen parametreler ve termokimyasal çevrimlere elde edilen değerlerin farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimlerinin elde edilen hidrojen üretim sonuçları değerlendirildiğinde, bu çevrimlerin nükleer enerjiden hidrojen üretimi için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

4.2.4. Hidrojen üretim çevrimlerinin veriminin karşılaştırılması

Bu bölümde, hidrojen üretimi için kullanılan HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimlerinin, sistem verimi ve çevrim verimi açısından değerlendirilmiştir. Sistem ve çevrim verimi Eş. 4.5 ve 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır [23].

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{m}_{H_2} \times LHV_{H_2}}{P_{hp f}} \quad (4.5)$$

$$\eta_{\text{çevrim}} = \frac{\dot{m}_{H_2} \times LHV_{H_2}}{Q + W_{el}} \quad (4.6)$$

Burada, \dot{m}_{H_2} reaktörden üretilen hidrojen üretim miktarı (kg/s), LHV ise hidrojeninin üst ısı değeri (120 kJ/kg), $P_{hp f}$, hidrojen üretimi için kullanılan toplam gücü Q , çevrimlerin ısı gereksinimini, W_{el} ise çevrimlerin elektrik işi gereksinimleri olarak tanımlanmıştır. Yapılan verim hesaplamaları sonucunda, HyS-Br termokimyasal çevriminin sistem ve çevrim verimi sırasıyla %33,6 ve %34,9 olarak elde edilmiştir. HyCa-Br termokimyasal çevrim için ise sistem ve çevrim verimi %28,1 ve %32,6 olarak hesaplanmıştır. HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimleri için elde edilen verim değerleri, literatürden derlenen verim değerleri ile Çizelge 4.2'te gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Farklı termokimyasal çevrimlerle HyS-Br ve HyCa-Br termokimyasal çevrimlerinin verimlilik değerlerinin istenilen değerler aralığında olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.2. Farklı hidrojen üretim çevrimleri için verimlilik karşılaştırılması

| Hidrojen Üretim Çevrimi | Enerji Verimi (%) | Ref. |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|
| Üç adımlı HyS-Br | 34,9 | - |
| Üç adımlı HyCa-Br | 32,6 | - |
| Dört adımlı Co-Cl | 22,2 | [22] |
| Üç adımlı Mg-Cl, Üç adımlı H ₂ SO ₄ Dört adımlı UT-3 (Ca-Br) | 23-25 24-25 24 | [49] |
| Dört adımlı Ağır element halojenür döngüsü | 26,1 | [50] |
| Dört adımlı Cu-Cl | 27,4 | [51] |
| Üç adımlı Mg-Cl | 18,8 | [52] |
| Üç adımlı Sodyum Hidroksit (NaOH) | 11 | [53] |
| Dört adımlı Fe-Cl | 45 | [28] |
| Üç adımlı Mg-Cl (I) | 68 | [28] |
| Dört adımlı Fe-Cl | 32-37 | [54] |
| Üç adımlı Mg-Cl | 63,6 | [55] |
| Üç adımlı Mg-Cl | 51,56 | [55] |
| Üç adımlı Mg-Cl | 54,2 | [23] |

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada SOMBRERO füzyon reaktöründe nötronik hesaplamalara bağlı olarak Hibrit Sülfür-Bromür (HyS-Br) ve Hibrit Kalsiyum-Bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimleri kullanılarak nükleer enerjiden faydalanarak hidrojen üretimi incelenmiştir. Monte Carlo hesaplama yöntemi ile nötronik hesaplamalarda trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) değerleri göre elde edilmiştir. Nötronik hesaplamalarla elde edilen enerji çoğaltım faktörüne (M) bağlı olarak Hibrit Sülfür-Bromür (HyS-Br) ve Hibrit Kalsiyum-Bromür (HyCa-Br) termokimyasal çevrimleri ile hidrojen üretim potansiyelleri incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda aşağıda sonuçlar elde edilmiştir.

- 6 cm ve 19 cm Li_2O kalınlıkları için %2 UO_2 yakıtlı blanket geometrisinde Trityum üretim oranı (TBR) sırasıyla 1,292 ve 1,312 olarak hesaplanmıştır. 6 cm ve 19 cm Li_2O kalınlıkları için %10 UO_2 yakıtlı blankette ise TBR sırasıyla 1,301 ve 1,320 olarak elde edilmiştir. Artan yakıt oranı ve blanket kalınlığı ile birlikte TBR oranının arttığı sonucuna varılmıştır.
- 6 cm ve 19 cm Li_2O kalınlıkları için %2 UO_2 yakıtlı blanket geometrisinde enerji çoğaltım aktörü (M) sırasıyla 1,270 ve 1,313 olarak hesaplanmıştır. 6 cm ve 19 cm Li_2O kalınlıkları için %10 UO_2 yakıtlı blankette ise M değeri sırasıyla 1,441 ve 1,670 olarak elde edilmiştir. Artan yakıt miktarı ile blankette üretilen fisyon miktarına bağlı olarak M değerinin arttığı sonucuna varılmıştır.
- HyS-Br termokimyasal çevrimleri için %2 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla $(1-\psi)$ oranı 0,335 ve 0,342 olarak elde edilmiştir. %10 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla $(1-\psi)$ oranı 0,360 ve 0,380 olarak hesaplanmıştır.
- HyCa-Br termokimyasal çevrimleri için %2 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla 0,330 ve 0,337 olarak hesaplanmıştır. %10 UO_2 içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla $(1-\psi)$ oranı 0,355 ve 0,382 olarak hesaplanmıştır.

- HyS-Br termokimyasal çevrimleri için %2 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla P_{hpf} değeri 1126,77 MW ve 1109,75 MW olarak hesaplanmıştır. %10 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla P_{hpf} değeri 1337,23 MW ve 1619,20 olarak elde edilmiştir.
- HyCa-Br termokimyasal çevrimleri için %2 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla P_{hpf} değeri 1121,12 MW ve 1173,84 MW olarak hesaplanmıştır. %10 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla P_{hpf} değeri 1330,53 MW ve 1611,14 olarak elde edilmiştir.
- HyS-Br termokimyasal çevrimleri için %2 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta \dot{m}_{H_2} değeri 2,63 kg/s olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 2,76 kg/s olarak hesaplanmıştır. %10 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla \dot{m}_{H_2} değeri 3,12 kg/s ve 3,78 kg/s olarak hesaplanmıştır.
- HyCa-Br termokimyasal çevrimleri için %2 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm kalınlıkta \dot{m}_{H_2} değeri 3,14 kg/s olarak elde edilirken, bu değer 19 cm kalınlık için 3,29 kg/s olarak hesaplanmıştır. %10 UO₂ içeren blanket geometrisi için 6 cm ve 19 cm kalınlıklar için sırasıyla \dot{m}_{H_2} değeri 3,73 kg/s 4,52 kg/s olarak elde edilmiştir.
- HyCa-Br termokimyasal çevriminin sistem verimi %33,6, çevrimin verimi ise %34,9 olarak hesaplanmıştır. HyS-Br termokimyasal çevriminin sistem verimi %28,1 , çevrimin verimi %32,6 olarak elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışma doğrultusunda daha sonra yapılacak araştırmalara katkı sağlamak amacıyla aşağıdaki öneriler verilmiştir.

- SOMBRERO füzyon reaktörünün farklı reflektör, trityum üretim malzemesi ve farklı yakıt oranlarında nötronik tasarımları gerçekleştirilebilir.
- SOMBRERO füzyon reaktörünün farklı reflektör, trityum üretim malzemesi ve farklı yakıt oranları için enerji çoğaltım faktörleri elde edilebilir ve buna bağlı hidrojen üretim performansları farklı termokimyasal çevrimler için araştırılabilir.

- SOMBRERO füzyon reaktörünün farklı reflektör, trityum üretim malzemesi ve farklı yakıt oranları için enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Marchenko, O.V., Solomin, S.V. (2015). The future energy: Hydrogen versus electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(10), 3801-3805.
2. International Energy Agency. (2019). The future of hydrogen. *IEA*, 23-26.
3. Muradov, N. (2017). Low to near-zero CO₂ production of hydrogen from fossil fuels: status and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(20), 14058-14088.
4. Energy Transitions Commission. (2021). Making the hydrogen economy possible: accelerating clean hydrogen in an electrified economy. *ETC*, 12-21
5. New Nuclear Watch Institute. (2020). On the role of nuclear power in the development of a European hydrogen economy. *NNWI*, 5-23.
6. Constantin, A. (2024). Nuclear hydrogen projects to support clean energy transition: Updates on international initiatives and IAEA activities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54(7), 768-779.
7. Bilgen, E., Joels R., K. (1985). An assessment of solar hydrogen production using the Mark 13 hybrid process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10(3), 143-155.
8. Van Velzen, D., Langenkamp, H., Schütz, G., Lalonde, D., Flamm, J., Fiebelmann, P. (1980). Development and design of a continuous laboratory-scale plant for hydrogen production by the Mark-13 cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5(2), 131-139.
9. Sorgulu, F., Dinçer, İ. (2023). Development of an integrated thermochemical cycle-based hydrogen production and effective utilization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(71), 27502-27512.
10. Pinsky, R., Sabharwall, P., Hartvigsen, J., O'Brien, J. (2020). Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems. *Progress in Nuclear Energy*, 123, 103317.
11. Ghorbani, B., Zendehboudi, S., Zhang, Y., Zarrin, H., Chatzis, I. (2023). Thermochemical water-splitting structures for hydrogen production: Thermodynamic, economic, and environmental impacts. *Energy Conversion and Management*, 297, 117599.
12. Balta, M.T., Dinçer, İ., Hepbaşı, A. (2016). Comparative assessment of various chlorine family thermochemical cycles for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), 7802-7813.
13. Balta M.T., Dinçer İ., Hepbaşı A. (2014). Performance assessment of solar-driven integrated Mg-Cl cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), 20652-20661.

14. Balta, M.T., Dinçer, İ., Hepbaşlı, A. (2011). Exergoeconomic analysis of a hybrid copper–chlorine cycle driven by geothermal energy for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(17), 11300-11308.
15. Karaca, A. E., Qureshy, A.M.M.I., Dinçer, İ. (2023). An overview and critical assessment of thermochemical hydrogen production methods. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135706.
16. Özcan, H., Dinçer, İ. (2017). Exergoeconomic optimization of a new four-step magnesium–chlorine cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2435-2445.
17. Genç, G., (2010). Hydrogen production potential of APEX fusion transmuted fueled minor actinide fluoride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), 10190-10201.
18. 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.
19. Lewis, M. A. (2006). II. G. 3 High Temperature Thermochemical Processes. *ANL*, 216-219.
20. El-Emam, R. S., Özcan, H., Zamfirescu, C. (2020). Updates on promising thermochemical cycles for clean hydrogen production using nuclear energy. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121424.
21. Aihara, M., Umida, H., Tsutsumi, A. and Yoshida, K. (1990). Kinetic study of UT-3 thermochemical hydrogen production process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15(1), 7-11.
22. Çakıroğlu, R., Çinici, O.K, Asal, Ş., Acır, A. (2024). Multi-objective optimization of the hydrogen fuel production of a solar-based cobalt-chlorine (Co–Cl) thermochemical cycle with grey relational analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 68, 360-373.
23. Asal, Ş., Acır, A., Dinçer, İ. (2024). A study on integrated HTR-PM driven hydrogen production using thermochemical cycles. *Energy Conversion and Management*, 307, 118336.
24. Acır, A. and 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.
25. Asal, Ş. and 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, 31133-31142.

26. Asal, Ş. and 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.
27. 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.
28. Acır, A. and Özkaya, M. (2024). Performance evaluation of the Fe–Cl and Mg–Cl cycle for hydrogen production of the minor actinide fuelled PACER fusion blanket. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 634-643.
29. Reyes, S., Latkowski, J. F., Sanz, J., & Gomez del Rio, J. (2001). Safety assessment for inertial fusion energy power plants: Methodology and application to the analysis of the HYLIFE-II and SOMBRERO conceptual designs. *Journal Of Fusion Energy*, 20, 23-44.
30. Reyes, S., Latkowski, J.F., Sanz, J., Gomez del Rio, J. (2001). Safety assessment for inertial fusion energy power plants: Methodology and application to the analysis of the HYLIFE-II and SOMBRERO conceptual designs. *Journal of Fusion Energy*, 20, 23–44.
31. Meier, W. R., Raffray, A. R., Abdel-Khalik, S. I., Kulcinski, G. L., Latowski, J. F., Najmabadi, F. and Yoda, M. (2003). IFE Chamber Technology–Status and Future Challenges. *Fusion Science And Technology*, 44(1), 27-33.
32. Sviatoslavsky, I.N., Sawan, M.E., Peterson, R.R., Kulcinski, G.L., MacFarlane, J.J., Wittenberg, L.J., Mogahed, E.A., Rutledge, S.C. (1991). *SOMBRERO-a solid breeder moving bed KrF laser driven IFE power reactor*. In: 14th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering. San Diego, 646-649.
33. Briesmeister, JF. A general Monte Carlo N-particle transport code. LA-12625M, Los Alamos National Laboratory, MCNP; 1997.
34. Aktı, S. (2019). *LIFE Füzyon Reaktörünün Hidrojen Üretim Potansiyelinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14-18.
35. Stacey, W. M. (2018). *Nuclear reactor physics*. (3rd, revised edition). New Jersey: John Wiley and Sons, 43.
36. Wu, Y. (2017). *Fusion Neutronics*. (First online edition). Singapore: Springer, 21-64.
37. Asal, Ş. (2020). Toryum Nükleer Yakıtlı Lazer Sürücülü Bir Füzyon Reaktöründe Fisil Yakıt ve Hidrojen Üretim Potansiyelinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-21.

38. Özişik, G., Demir, N., Übeyli, M. and Yapici, H. (2010). Hydrogen production via water splitting process in a molten-salt fusion breeder. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(14), 7357–7368.
39. Bilgen, E. and Joels, R.K. (1985). An assessment of solar hydrogen production using the Mark 13 hybrid process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10, 143-155.
40. Brown, L. C., Besenbruch, G. E., Lentsch, R. D., Schultz, K. R., Funk, J. F., Pickard, P. S., Marshall, A. C., and Showalter, S. K. (2003). *High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power*. GA, 49-50.
41. İnternet: “NIST Chemistry WebBook. URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>; 2018.” Son Erişim Tarihi: 19.04.2024
42. İnternet: “NIST-JANAF Thermochemical Tables. URL: <https://janaf.nist.gov/>; 2013.” Son Erişim Tarihi: 03.05.2024
43. Sorgulu, F., Dinçer, İ. (2023). Development and performance assessment of a calcium-iron bromide cycle-based hydrogen production integrated system. *Energy Conversion and Management*, 277, 116660.
44. Doctor, R.D., Matonis, D.T., Wade, D.C., Moisseytsev, A.V., Sienicki, J.J., Faibish, R. (2004, April 25-29). STAR-H2 with a calcium bromine cycle: delivering hydrogen, electricity and water from a modular reactor. In: Proceedings of the Spring National Meeting of the American Institute of Chemical Engineers,
45. Simpson, M. F., Utgikar, V., Sachdev, P., McGrady, C. (2007). A novel method for producing hydrogen based on the Ca–Br cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 505-509.
46. Sivasubramanian, P. K., Ramasamy, R. P., Freire, F. J., Holland, C. E., Weidner J. W. (2007). Electrochemical hydrogen production from thermochemical cycles using a proton exchange membrane electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 463-468.
47. Al-Muslim, H., Dinçer, İ. (2001). Thermodynamic analysis of reheat cycle steam power plants. *International Journal of Energy Research*, 25, 727-739.
48. Asal, Ş., Özkaya, M., 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, 126602.
49. Özdemir, A., Genç, G. (2022). A comprehensive comparative energy and exergy analysis in solar based hydrogen production systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(24), 12189–12203.
50. Sorgulu, F., Dinçer, İ. (2023). A solar energy driven thermochemical cycle based integrated system for hydrogen production. *Energy*, 269, 126834.

51. Temiz, M., Dinçer İ. (2021). Concentrated solar driven thermochemical hydrogen production plant with thermal energy storage and geothermal systems. *Energy*, 219, 119554.
52. Özcan, H. and Dinçer, İ. (2014). Energy and exergy analyses of a solar driven Mg-Cl hybrid thermochemical cycle for co-production of power and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28), 15330-15341.
53. Oruç, O. and Dinçer, İ. (2021). Analysis and assessment of a new solar assisted sodium hydroxide thermochemical hydrogen production cycle. *Energy Conversion and Management*, 237, 114139.
54. Canavesio, C., Nassini, H. E., Bohè, A. E. (2015). Evaluation of an iron-chlorine thermochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 8620–8632.
55. Balta, MT., Dinçer, İ., Hepbaşı, A. (2012). Energy and exergy analyses of magnesium-chlorine (Mg-Cl) thermochemical cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 4855-4862.



Gazili olmak ayrıcalıktır