
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FÜZYON REAKTÖRÜ TABANLI ENTEGRE ENERJİ SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ: NÖTRONİK, TERMODİNAMİK VE HİDROJEN ÜRETİM ANALİZİ

Şulenur ASAL

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2025

ETİK BEYAN

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

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

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

Şulenur ASAL

01/08/2025

FÜZYON REAKTÖRÜ TABANLI ENTEGRE ENERJİ SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ: NÖTRONİK, TERMODİNAMİK VE HİDROJEN ÜRETİM ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Şulenur ASAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2025

ÖZET

Temiz enerji kaynaklarının insanlığın tüm ihtiyaçlarını karşılayacak düzeye ulaştırılması ve karbon içermeyen enerji sistemlerinin ticarileşmesi, sürdürülebilir bir gelecek için kritik hedefler arasında yer almaktadır. Bu hedefler doğrultusunda, sürdürülebilir ve güvenli enerji üretim potansiyeli ile füzyon enerjisi umut vadeden bir çözüm sunmaktadır. Tez kapsamında, füzyon enerjisi kaynak olarak kullanılmış, hidrojen ve elektrik üretimi için entegre sistemler tasarlanmıştır. Füzyon reaktörü olarak uygun fiyatlı, sağlam, kompakt bir füzyon reaktörü tasarımı seçilmiş, seçilen füzyon reaktörü nükleer kod aracılığı ile modifiye edilmiş ve farklı nötronik parametreler altında reaktör potansiyeli değerlendirilmiştir. Hidrojen üretim çevrimi olarak üç-adımlı ve dört-adımlı magnezyum-klor çevrimleri belirlenmiş, simülasyonları yapılmış ve parametrik çalışmalar yürütülmüştür. Ayrı ayrı incelenen tüm alt sistemler, temiz enerji üretimi için entegre edilmiş, enerji ve ekserji yaklaşımlarıyla Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına göre analiz edilmiştir. Ayrıca, füzyon enerjisinin insanlığın ihtiyaçlarını karşılamada kaynak olarak kullanımı bir vaka çalışması ile analiz edilmiştir. Füzyon reaktörü sürücülü üç-adımlı magnezyum-klor entegre sisteminde enerji ve ekserji verimleri sırası ile %28,38 ve %40,91 olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde, füzyon reaktörü sürücülü dört-adımlı magnezyum-klor entegre sisteminde ise enerji verimi %24,86 ve ekserji verimi %35,83 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bu tez ile füzyon enerjisinin gelecekte ticarileşmesi durumunda sürdürülebilir yaşam alanlarının ihtiyaçlarını karşılamak üzere enerji kaynağı olarak kullanımı değerlendirilmiştir. Sürdürülen vaka çalışmasına göre sürdürülebilir yaşam alanında kullanılmak üzere, mahal ısıtması için 29,38 MW termal enerji ve evsel kullanım için 59,07 MW elektriksel güç, saniyede 243,50 kg arıtılmış su ve 1,24 kg/s hidrojen üretilmiştir.

Bilim Kodu	:	92811
Anahtar Kelimeler	:	Nükleer füzyon, hidrojen üretimi, termokimyasal çevrim, entegre enerji sistemleri
Sayfa Adedi	:	145
Danışman	:	Prof. Dr. Adem ACIR

DEVELOPMENT OF FUSION REACTOR-BASED INTEGRATED ENERGY SYSTEMS: NEUTRONIC, THERMODYNAMIC, AND HYDROGEN PRODUCTION ANALYSIS

(Ph.D. Thesis)

Şulenur ASAL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2025

ABSTRACT

Ensuring clean energy sources meet all human needs and commercializing carbon-free energy systems are among the critical goals for a sustainable future. In line with these goals, fusion energy, with its sustainable and safe energy production potential, offers a promising solution. Within the scope of this dissertation, fusion energy is used as a source, and integrated systems for hydrogen and electricity production are designed. An affordable, robust, and compact fusion reactor design is selected as the fusion reactor. The selected fusion reactor is modified using a nuclear code, and the potential of the reactor is evaluated under various neutronic parameters. The three-step and four-step magnesium-chlorine cycles are determined as hydrogen production cycles, simulations are performed, and parametric studies are conducted. All subsystems examined separately are integrated for clean energy production, and analyzed using energy and exergy approaches according to the first and second laws of thermodynamics. Furthermore, the use of fusion energy as a resource to meet human needs is analyzed through a case study. In the three-step magnesium-chlorine integrated system driven by a fusion reactor, the energy and exergy efficiencies are obtained as 28.38% and 40.91%, respectively. Similarly, in the four-step magnesium-chlorine integrated system driven by a fusion reactor, the energy efficiency is calculated as 24.86% and exergy efficiency as 35.83%. Consequently, this thesis evaluates the potential use of fusion energy as a primary energy source to meet the needs of sustainable communities in the event of its commercialization in the future. According to the conducted case study, the system was able to supply 29.38 MW of thermal energy for district heating, 59.07 MW of electrical power for residential use, as well as 243.50 kg/s of freshwater and 1.24 kg/s of hydrogen.

Science Code	:	92811
Key Words	:	Nuclear fusion, hydrogen production, thermochemical cycle, integrated energy systems
Page Number	:	145
Supervisor	:	Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tüm lisansüstü eğitimim süresince bilgi, tecrübe ve yol göstericiliğini hiçbir zaman esirgemeyen, akademik hayatımda ilerlememe büyük katkıda bulunan, Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi ve kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Adem ACIR'a sonsuz desteği ve değer biçilemez rehberliği için en içten şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tez sürecim boyunca yardım ve bilgilerini esirgemeyen Tez İzleme Komitesi (TİK) üyelerim Prof. Dr. Metin GÜRÜ (Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi) ve Prof. Dr. Gamze GENÇ (Erciyes Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi) hocalarıma teşekkür ederim.

Doktora tez sürecim içerisinde Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı kapsamında desteklendiğimi ve program kapsamında Kanada, Ontario Tech Üniversitesi, Temiz Enerji Araştırma Laboratuvarı'nda (CERL) 10 ay süresince çalışmalar yürüttüğümü belirtmek isterim. Bana bu desteği saylayan TÜBİTAK'a, Ontario Tech Üniversitesi'ndeki eğitim sürem boyunca desteklerini esirgemeyen kıymetli ev sahibi danışmanım Prof. Dr. İbrahim DİNÇER'e ve tez kapsamında Aspen Plus simülasyon programını kullanmama olanak sağlayan Ontario Tech Üniversitesi'ne teşekkürü borç bilirim.

Tüm eğitim hayatımda olduğu gibi, doktora sürecim boyunca da gerek Türkiye'de gerekse Kanada'da bana sonsuz sabırlarını, desteklerini esirgemeyen ve en önemlisi inançlarını hiç yitirmeyen canım ailem, annem İlknur ASAL'a, babam Mustafa ASAL'a ve biricik kardeşim Şeymanur ASAL'a ayrıca teşekkür etmek isterim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

1.1. Motivasyon 6

1.2. Amaçlar 6

1.3. Yenilikler 7

1.4. Tez Akışı 8

2. TEMİZ ENERJİ KAYNAKLARI 9

2.1. Nükleer Enerji 9

2.1.1. Fisyon 10

2.1.2. Füzyon 10

2.1.3. Nükleer reaktörler 12

2.2. Hidrojen 14

2.3. Hidrojen Üretim Metotları 15

2.3.1. Elektroliz 20

2.3.2. Metan reformasyonu 21

2.3.3. Termokimyasal su ayrıştırma çevrimleri 22

2.4. Entegre Temiz Enerji Sistemleri 26

3. LİTERATÜR TARAMASI 29

3.1. ARC Füzyon Reaktörü 29

Sayfa

3.2. Termokimyasal Hidrojen Üretim Çevrimleri 32
3.3. Entegre Enerji Sistemleri 35
3.3.1. Nükleer enerji bazlı entegre enerji sistemleri 35
3.3.2. Yenilenebilir enerji bazlı entegre enerji sistemleri 39
3.4. Literatürdeki Boşluk ve Tezin Literatüre Katkısı 40
4. SİSTEM TASARIMI 43
4.1. ARC Füzyon Reaktörü Tasarımı 44
4.2. Hidrojen Üretim Çevrimlerinin Tasarımı 50
4.2.1. Üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi tasarımı 51
4.2.2. Dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi tasarımı 54
4.3. ARC Füzyon Reaktörü Sürücülü Entegre Enerji Sistemlerinin Tasarımı 57
4.3.1. ARC füzyon reaktörü sürücülü üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi 59
4.3.2. ARC füzyon reaktörü sürücülü dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi 61
4.4. Vaka Çalışması 63
5. ANALİZ VE SİMÜLASYON 67
5.1. Nötronik Analiz 67
5.1.1. Trityum üretim oranı 68
5.1.2. Enerji çoğaltım faktörü 70
5.2. Hidrojen Üretim Analiz ve Simülasyonu 71
5.2.1. Üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi simülasyonu 74
5.2.2. Dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi simülasyonu 78
5.2.3. Hidrojen üretim çevrimlerinin parametrik analizi 81
5.2.4. Model doğrulaması 82
5.3. ARC Füzyon Reaktörü Sürücülü Entegre Enerji Sistemlerinin Analizi 84
5.4. Vaka Çalışması Analizi 87
6. SAYISAL BULGULAR VE TARTIŞMA 89

Sayfa

6.1. Nötronik Analiz Sonuçları 89
6.2. Hidrojen Üretim Sonuçları 98
6.2.1. Hidrojen üretim çevrimlerinin parametrik analiz sonuçları 104
6.2.2. Model doğrulama sonuçları 110
6.3. ARC Füzyon Reaktörü Sürücülü Entegre Enerji Sistemleri Analiz Sonuçları ... 114
6.4. Vaka Çalışması Sonuçları 125
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 129
KAYNAKLAR 133
ÖZGEÇMİŞ 145

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. ARC füzyon reaktörü orijinal tasarımı parametreleri 45

Çizelge 4.2. Orijinal tasarımda kullanılan malzemeler ve özellikleri 47

Çizelge 4.3. Modifiye edilen tasarımlarda kullanılan malzemeler ve özellikleri 50

Çizelge 5.1. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için denge eşitlikleri 77

Çizelge 5.2. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için denge eşitlikleri 80

Çizelge 5.3. Üç-adımlı Mg-Cl çevriminin hidroliz reaksiyonu için gerekli sabitler ve oluşum entalpileri 83

Çizelge 5.4. Üç-adımlı Mg-Cl çevriminin klorlama reaksiyonu için gerekli sabitler ve oluşum entalpileri 83

Çizelge 5.5. Üç-adımlı Mg-Cl çevriminin elektroliz reaksiyonu için gerekli sabitler ve oluşum entalpileri 84

Çizelge 5.6. FLiBe soğutucu için gerekli sabitler ve oluşum entalpileri 87

Çizelge 6.1. 3-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus simülasyonu termofiziksel özellikleri 98

Çizelge 6.2. 4-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus simülasyonu termofiziksel özellikleri 100

Çizelge 6.3. Mg-Cl çevrimleri için enerji ve ekserji verimleri karşılaştırması 111

Çizelge 6.4. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi Shomate denklemi analizi termofiziksel özellikleri 115

Çizelge 6.5. Orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevrimi termofiziksel özellikleri 118

Çizelge 6.6. ARC füzyon reaktörü sürücülü üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi termofiziksel özellikleri 120

Çizelge 6.7. ARC füzyon reaktörü sürücülü dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi termofiziksel özellikleri 125

Çizelge 6.8. Vaka çalışması için her adımın termofiziksel özellikleri 128

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Yıllara göre küresel fosil yakıt kullanımı ve CO_2 emisyonu..... 1

Şekil 1.2. Enerji kaynaklarına göre ölüm oranı ve sera gazı emisyonları 3

Şekil 2.1. Fisyon reaksiyonu illüstrasyonu..... 10

Şekil 2.2. Füzyon reaksiyonu illüstrasyonu..... 11

Şekil 2.3. Füzyon zincir reaksiyonu 12

Şekil 2.4. Nükleer reaktörlerin gelişimi..... 13

Şekil 2.5. Hidrojen ve bazı yaygın fosil yakıtların ısıl değerleri..... 15

Şekil 2.6. Kaynaklara göre hidrojen üretim maliyetleri 16

Şekil 2.7. Hidrojen üretim metotları..... 18

Şekil 2.8. Hidrojen renk spektrumu..... 19

Şekil 2.9. Termokimyasal çevrimler için şematik gösterim 23

Şekil 2.10. Hidrojen üretim çevrimlerinin enerji verimleri ve çalışma sıcaklıkları..... 26

Şekil 2.11. Sürdürülebilir toplumlar için entegre enerji sistemleri 27

Şekil 3.1. Füzyon bazlı sürdürülebilir enerji sistemi örneği..... 41

Şekil 4.1. Entegre sistem algoritması 41

Şekil 4.2. ARC füzyon reaktörün orijinal tasarım görüntüsü..... 44

Şekil 4.3. ARC füzyon reaktörü orijinal tasarımı..... 46

Şekil 4.4. ARC füzyon reaktörünün MCNP kodunda modellenen geometrisi..... 48

Şekil 4.5. ARC füzyon reaktöründe yapılan modifikasyonlar için kesit görüntüleri 49

Şekil 4.6. Termokimyasal hidrojen üretim çevrimlerinin temel çalışma prensibi şematik gösterimi 51

Şekil 4.7. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin reaksiyonları ve bileşik akış şeması 52

Şekil 4.8. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi akış şeması..... 53

Şekil 4.9. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin reaksiyonları ve bileşik akış şeması..... 54

Şekil 4.10. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi akış şeması..... 56

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.11. ARC füzyon reaktörü sürücülü Rankine çevrimi akış şeması 57

Şekil 4.12. ARC füzyon reaktörü sürücülü hidrojen üretimi entegrasyonu genel akış şeması 59

Şekil 4.13. ARC füzyon reaktörü sürücülü üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi akış şeması 60

Şekil 4.14. ARC füzyon reaktörü sürücülü dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi akış şeması 62

Şekil 4.15. Vaka çalışması için akış şeması 64

Şekil 5.1. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için Aspen Plus akış şeması 75

Şekil 5.2. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için Aspen Plus akış şeması 78

Şekil 6.1. Model 1, 2, 3 ve 4 için trityum üretim oranı ve enerji çoğaltım faktörü değişimi 90

Şekil 6.2. Model 5 için ThF_4 yakıt oranlarına göre trityum üretim oranı değişimi 91

Şekil 6.3. Model 6 için UF_4 yakıt oranlarına göre trityum üretim oranı değişimi 92

Şekil 6.4. Model 8 için ThF_4 yakıt oranlarına göre trityum üretim oranı değişimi 114

Şekil 6.5. Model 9 için UF_4 yakıt oranlarına göre trityum üretim oranı değişimi 116

Şekil 6.6. Model 5, 6, 8 ve 9 için yakıt oranlarına göre TBR değişimi 117

Şekil 6.7. Model 5, 6, 8 ve 9 için yakıt oranlarına göre M değişimi 95

Şekil 6.8. Yapılan modifikasyonlar için TBR, M ve termal güç değerleri 97

Şekil 6.9. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin ekipmanları için ısı/elektrik giriş ve çıkışları 99

Şekil 6.10. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin ekipmanları için ekserji yok oluşu oranları 100

Şekil 6.11. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin ekipmanları için ısı/elektrik giriş ve çıkışları 102

Şekil 6.12. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin ekipmanları için ekserji yok oluşu oranları 103

Şekil 6.13. 1 mol hidrojen üretimi için gerekli termal enerji ve elektriksel güç değerleri 103

Şekil 6.14. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi reaksiyonlarının buhar/$MgCl_2$ oranına göre termal enerji ve Gibbs serbest enerjisi değişimi 105

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.15. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi hidroliz reaksiyonu için ısı girişi değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi 106

Şekil 6.16. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi klorlama reaksiyonu için ısı çıkışı değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi 107

Şekil 6.17. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi reaksiyonlarının buhar/$MgCl_2$ oranına göre termal enerji ve Gibbs serbest enerjisi değişimi 108

Şekil 6.18. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi hidroliz reaksiyonu için ısı çıkışı değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi 109

Şekil 6.19. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi ayrışma reaksiyonu için ısı girişi değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi 110

Şekil 6.20. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi klorlama reaksiyonu için ısı çıkışı değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi 110

Şekil 6.21. Aspen Plus simülasyonu ve Shomate ısı kapasitesi hesapları karşılaştırması 112

Şekil 6.22. Model doğrulamasına ait mutlak sapma ve hata oranları 113

Şekil 6.23. Üç-adımlı Mg-Cl çevrime ait enerji ve ekserji verimleri..... 113

Şekil 6.24. Orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri 115

Şekil 6.25. Orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevrimi ekipmanlarının ekserji yok oluş oranları..... 116

Şekil 6.26. Hidrojen üretim çevrimi entegreli sistemler için modellenen Rankine çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri 118

Şekil 6.27. ARC füzyon reaktörü entegreli hidrojen üretim sistemlerinin çıktıları 118

Şekil 6.28. 3-adımlı Mg-Cl çevrim entegreli sistem için hidrojen üretim çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri 119

Şekil 6.29. 4-adımlı Mg-Cl çevrim entegreli sistem için hidrojen üretim çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri 120

Şekil 6.30. Her bir sistem için enerji ve ekserji verimleri..... 121

Şekil 6.31. Nükleer kanyak sıcaklığına göre alt sistemlerin verim değişimi 122

Şekil 6.32. Entegre sistemlerde ihtiyaca göre hidrojen ve elektrik üretimi 123

Şekil 6.33. Nükleer reaktör modellemelerine göre üretilen hidrojen miktarı değişimi..... 124

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.34. Vaka çalışması için modellenen Rankine çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri 126

Şekil 6.35. Vaka çalışması için modellenen Rankine çevrimi ekipmanlarının ekserji yok oluş oranları 126

Şekil 6.36. Vaka çalışmasındaki her bir alt sistem için enerji ve ekserji verimleri 127

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{A}$	Amper
$\boldsymbol{\phi}$	Nötron akısı
$\boldsymbol{\Sigma}$	Makroskopik tesir kesiti
$\boldsymbol{v}$	Nötron hızı
$\boldsymbol{\sigma}$	Mikroskopik tesir kesiti
$\boldsymbol{N}$	Atomik yoğunluk
$\boldsymbol{N_A}$	Avogadro Sayısı
$\boldsymbol{\rho}$	Fiziksel yoğunluk
$\boldsymbol{M}$	Atom ağırlığı
$\boldsymbol{P_\alpha}$	Alfa parçacıklarından gelen güç
$\boldsymbol{P_n}$	Nörton parçacıklarından gelen güç
$\dot{\boldsymbol{m}}$	Kütlesel debi
$\dot{\boldsymbol{E}}$	Enerji (kW)
$\dot{\mathbf{E}}\mathbf{x}_\mathbf{d}$	Ekserji yok oluşu
$\mathbf{ex}$	Spesifik ekserji
$\dot{\mathbf{E}}\mathbf{x}$	Ekserji oranı
$\boldsymbol{g}$	Yerçekimi ivmesi
$\boldsymbol{h}$	Entalpi
$\dot{\boldsymbol{W}}$	İş
$\boldsymbol{V}$	Hız
$\dot{\boldsymbol{S}}$	Entropi
$\boldsymbol{s}$	Spesifik entropi
$\boldsymbol{F}$	Faraday sabiti
$\boldsymbol{n}$	Elektron mol sayısı
$\boldsymbol{E^0}$	Standart hücre potansiyeli
$\boldsymbol{G}$	Gibbs enerjisi

Simgeler	**Açıklamalar**
$\boldsymbol{\eta}$	Enerji verimi
$\boldsymbol{\psi}$	Ekserji verimi
$\boldsymbol{\bar{h}}$	Spesifik entalpi
$\boldsymbol{\bar{h}_0}$	Oluşum entalpisi
$\boldsymbol{v}$	Özgül hacim
V	Volt
$\boldsymbol{D}$	Döteryum
$\boldsymbol{T}$	Trityum
$\boldsymbol{\alpha}$	Alfa parçacığı
P	Basınç
$\boldsymbol{n}$	Nötron
$\boldsymbol{P_f}$	Füzyon Gücü
$\boldsymbol{Q}$	Füzyon Kazancı
$\boldsymbol{P_{th}}$	Termal Enerji
$\boldsymbol{P_{el}}$	Elektriksel Güç
$\boldsymbol{\eta_{el}}$	Elektrik Üretim Verimi
$\boldsymbol{\dot{S}_{gen}}$	Entropi üretimi
$\boldsymbol{T}$	Sıcaklık

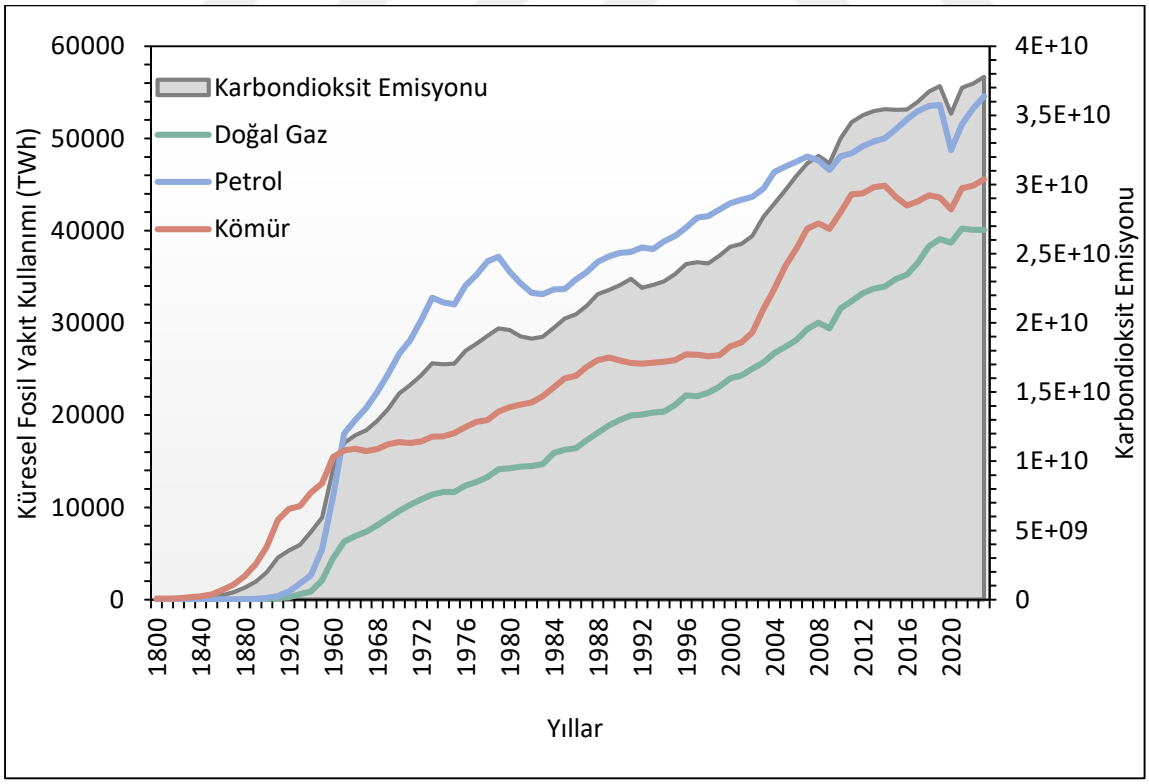
Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ARC	Uygun fiyatlı, sağlam, kompakt
APEX	Advanced Power Extraction
EES	Engineering Equation Solver
FNSF	Füzyon Nükleer Bilim Tesisi
GT-MHR	Gaz Türbini Modüler Helyum Reaktör
HEX	Isı değiştirici
HP	Yüksek basınç
IPCC	Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
ITER	Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı

Kısaltmalar	Açıklamalar
LP	Alçak basınç
MIT	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
MED	Çok etkili damıtma
MSF	Çok kademeli ani buharlaşma
MCNP	Monte Carlo Nötron Parçacık
MIX	Karışım
NIST	National Institute of Standards and Technology
PEM	Proton değişim membranlı
SMR	Buhar metan reformasyonu
SMR	Küçük modüler reaktörü
SOEC	Katı oksit elektroliz
SEP	Ayırıcı
SFR	Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör
SCWR	Süperkritik Su Reaktörü
$\boldsymbol{TBR}$	Trityum Üretim Oranı
VHTR	Çok Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze, nüfusun artışı ve insanoğlunun standartlarının yükselişi ile enerji ihtiyacı sürekli olarak artış göstermiştir. 1860'lı yıllarda buhar makinesinin icadı ve sonrasında ise Sanayi Devrimi ile kas gücü, su ve rüzgar gibi sınırlı kaynakların kullanımı yerini sürekli ve güçlü olan buhar gücüne bırakmıştır [1]. Kömürün buhar üretiminde kullanımı ile fosil kaynaklara olan bağımlılık başlamıştır. Odun, kömür gibi kaynakların sık kullanımı sonrasında petrol ve doğalgaz kullanımı ile sürmüştür. Sürekli olan güç kullanımı üretimin seri hale gelmesine ve böylece yaşam standartlarının yükselmesine sebep olmuştur.

Artan enerji talebi ile fosil kaynakların kullanımı da sürekli olarak artmıştır, (Şekil 1.1). Günümüzde, küresel çapta brüt elektrik üretiminin %61'lik bir oranı fosil kaynaklardan sağlanmaktadır [2]. Fosil kaynaklara bağımlı enerji üretimi, sera gazı salımı, çevresel kirlilik, hava kirliliği ve iklim değişikliğinin hızlanması gibi birçok soruna sebep olmaktadır [3].

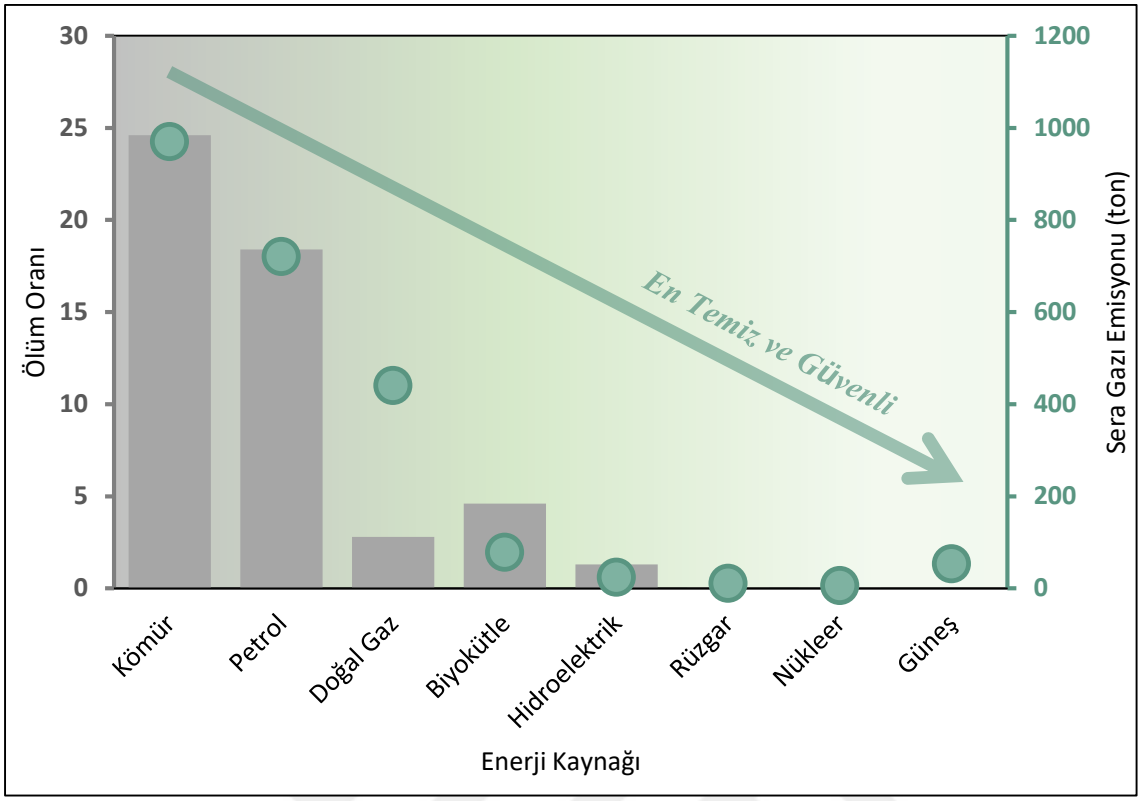


Şekil 1.1. Yıllara göre küresel fosil yakıt kullanımı ve CO_2 emisyonu (veri: Referans [4])

Çevresel sorunlara dair kanıtlar sürekli olarak artmakta ve bu da enerji tüketimi, endüstriyel faaliyetler gibi insan faaliyetlerinin bileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu çevresel sorunların fosil kaynakların kullanımı ile arttığı bilinmekte ve giderek karmaşık bir hal almaktadır. Fosil kaynakların çıkarılmasından yanmasına tüm işlemleri çevreye zarar vermekte ve yanma sürecinde atmosfere karbondioksit (CO_2), kükürt (S), metan (CH_4) ve azot oksitler (NO_x) gibi gazlar salınmaktadır. Bu gazların salımı sonucunda hava kirliliği ve asit yağmurları meydana gelmektedir ve bu da küresel ısınmayı tetiklemektedir [5]. Küresel ısınma tehdidinin başlıca sebebi fosil kaynaklar olarak belirlenmiştir. Birim fosil yakıt enerjisi için salınan karbondioksit miktarı kaynak bazlı değişmektedir. Bu değer kömür için 85,50 kg karbondioksit, doğal gaz için 52 kg karbondioksit ve petrol için 69,40 kg karbondioksittir [6]. Küresel ısınmanın sebep olduğu ciddi çevresel tehditlerin ele alınması ve sürdürülebilir temiz kaynaklara yönelimin artması önem taşımaktadır.

İklim değişikliği ile mücadele ve ortalama sıcaklık artışını sanayi öncesi döneme göre en fazla 1,5°C ile sınırlama hedefi ile "1,5°C Senaryosu" küresel yol haritası belirlenmiştir [7]. Senaryo 2015 yılında imzalanan Paris İklim Anlaşması [8] ile benimsenmiş ve Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) [9] tarafından 2018 yılında yayımlanan bir rapor ile temellere oturtulmuştur. 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonuna ulaşmak, fosil kaynakların kullanımının minimize edilirken aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının hızla artırılması ve enerji verimliliği gibi çözümlerin yaygınlaştırılması başlıca senaryo hedefleri arasında yer almaktadır.

Temiz enerji üretimi için yenilebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji umut vadeden kaynaklardır [10]. 2022 yılında elektrik üretiminin %29'u yenilenebilir kaynaklardan, %9'u ise nükleerden sağlanmakta ve bu oranların 1,5°C senaryosuna göre 2030 yılında sırasıyla %68 ve %8 olması beklenirken, 2050 yılında ise %91,40 ve %4,20 olması hedeflenmektedir [2]. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji ve nükleer enerjinin kullanımı karbon salımını azaltmak adına önem arz etmektedir. Günümüzde kullanılan enerji kaynaklarının sera gazı emisyonu salınımı ve ölüm oranları incelendiğinde en güvenilir ve temiz ikinci kaynağın nükleer enerji [4] oluşu dikkat çekmektedir, (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Enerji kaynaklarına göre ölüm oranı ve sera gazı emisyonları (veri: Referans [4])

Güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal gibi yenilebilir enerji kaynaklarının tümünün kökeninde nükleer süreçler yatmaktadır. Güneş enerjisi doğrudan Güneş'teki füzyon reaksiyonlarına dayanırken, rüzgar ve hidroelektrik enerjilerinin Güneş'in yeryüzündeki etkilerinden kaynaklandığı görülmektedir. Güneş'in yeryüzünde oluşturduğu ısı farkları ve su döngüsünün sonucu olarak rüzgar ve hidroelektrik enerjilerinden yararlanılmaktadır, yani Güneş'te gerçekleşen hidrojen füzyonu ile yeryüzünde rüzgar oluşumu ve buharlaşma süreçleri tetiklenmektedir. Dünya'nın iç yapısındaki radyoaktif elementlerin bozunumu ile ortaya çıkan ısı ise jeotermal enerji kaynaklarını beslemektedir [11]. Sonuç olarak, farklı yenilenebilir enerji kaynakları Güneş'teki füzyon reaksiyonu ya da Dünya'da meydana gelen doğal fisyonla ilişkilidir, bu da hepsinin nükleer enerji kökenli olduğunu göstermektedir.

Karbon nötr enerjiye geçiş, atığı en aza indirme ve güvenlik açısından nükleer enerjiye yönelim artmaktadır [12]. Nükleer enerji, proton ve nötronlardan oluşan atomun çekirdeğinden yayılmaktadır. Nükleer enerji, bir ağır çekirdeğin daha hafif birkaç parçaya bölünmesi (fisyon) ve hafif iki çekirdeğin birleşmesi (füzyon) ile üretilebilir. Nükleer enerji Paris İklim Anlaşması hedefleri doğrultusunda uygun bir enerji kaynağıdır, santraller faaliyetleri sırasında sera gazı üretimi yapmazlar ve tüm yaşam döngüleri süresince çok az

emisyon salımı yaparlar. Yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında üretilen birim elektrik başına CO_2 emisyon miktarı güneş enerjisine göre üçte birdir [13,14]. Günümüzde, dünyada 371 539 MW ile faaliyette olan toplam 413 reaktör bulunmaktadır ve 17 farklı ülkede toplam 59 adet reaktör kurulum aşamasındadır [15]. Ayrıca, Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA), gelişmiş nükleer reaktörler (ARIS) listesindeki 122 adet nükleer reaktörün 10 tanesi çalışır durumda, 5 tanesi yapım aşamasında ve 104 tanesi modelleme aşamasındadır [16]. Ek olarak, fosil yakıtlar ve nükleer enerji kaynakları enerji yoğunluğu bakımından karşılaştırıldığında, 1 kg kömür yakılması ile 3 kWh elektrik üretimi, 1 kg petrol ile 4 kWh ve 1 kg uranyum ile 50 000 kWh elektrik üretimi gerçekleşmektedir. Ayrıca, arazi bakımından karşılaştırıldığında 4 km^2 ile nükleer enerji en az alana ihtiyaç duyarken, güneş enerji santralleri 20-50 km^2, rüzgar tarlaları ise 50-150 km^2 alana ihtiyaç duymaktadır [17]. Nükleer enerjinin tüm bu avantajları ve gelişimi göz önünde bulundurulduğunda Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Paris İklim Anlaşması gibi emisyonları düşürmeye yönelik çalışmalarda umut vadeden bir enerji kaynağı olarak göze çarpmaktadır.

Nükleer fisyonun yanı sıra, füzyon enerjisi radyoaktif atık üretmemesi, sınırsız enerji potansiyeli olması ve daha güvenilir olması gibi yönleriyle ön plana çıkmaktadır. Birçok ülke füzyon çalışmaları yürütmekte ve kendi füzyon hedeflerini belirlemektedir. Avrupa Birliği ilk füzyon reaktörünün modellemesini 2030 yılına kadar tamamlamayı ve 2040 yılına kadar inşasını hedeflemektedir [18]. Kanada 2030 yılına kadar Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör (ITER) projesi gibi uluslararası füzyon projelerinde aktif olarak rol almaktadır [19]. Ayrıca, Çin kendi DEMO füzyon reaktör tasarımını 2030 yılına kadar tamamlamayı amaçlamaktadır. ITER için ise ilk plazmayı 2035 yılına kadar elde etmek hedeflenmektedir [20]. Bu çalışmalara ek olarak, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) yeni bir kompakt füzyon reaktörü üzerine çalışmalar yürütmektedir; uygun fiyatlı, sağlam, kompakt (Affordable Robust Compact-ARC) reaktörü. Reaktör, hali hazırda çalışılan füzyon reaktörlerinin boyutunu küçültmeyi, maliyetini azaltmayı ve karmaşıklığı ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma ile daha yenilikçi tasarımların önü açılması hedeflenmektedir [21].

Sera gazı emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliği etkilerini minimize etmek için yenilebilir enerji ve nükleere yönelim artmaktadır, fakat bu yeterli değildir. Enerjide sürdürülebilirliğin sağlanması için bir depolama ve taşıma aracına ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrojen bu noktada potansiyel bir çözüm olarak görülebilir. Uluslararası Yenilenebilir

Enerji Ajansı (IRENA)'nın 2022 yılı raporunda [22], 2050 yılına kadar emisyonların düşürülmesi için altı teknolojik yol sunulmuştur; yenilenebilir enerji kaynakları, enerji verimliliği, elektrifikasyon, fosil yakıt kaynaklı CO_2 yakalama ve depolama, yenilenebilir enerji kaynaklı CO_2 giderimi ve hidrojen. Hidrojen bu teknolojik yollar arasında %10'luk önemli bir paya sahiptir.

Hidrojen, bir element olarak değil bileşik olarak dünyamızda çokça bulunmaktadır. Dünya yüzeyinin %60'ından fazlasını kapsayan suyun önemli bir parçası olmakla birlikte, hayvanlarda, bitkilerde, insanlarda, fosil yakıtlarda ve bazı kimyasal bileşiklerin yapısında bileşik halinde bulunmaktadır. Dizel ve benzin sırası ile 45,5 MJ/kg ve 45,8 MJ/kg enerji yoğunluklarına sahipken, hidrojen 120 MJ/kg'lık bir enerji yoğunluğuna sahiptir, ki bu da dizel ve benzinin neredeyse üç katına eşittir [6,23]. Bu da emisyonların azaltılması için hidrojenin önemli bir seçenek olduğunu vurgulamaktadır. Ek olarak, hidrojen temiz bir enerji taşıyıcısı olarak daha az çevresel etkiye sahip olması, kaynak çeşitliliği, uygun şekilde kullanıldığı sürece güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji olması, küçük ölçekli sistemler sağlaması gibi özellikleriyle hidrojenin sürdürülebilir bir enerji sistemi tasarımında temel bir seçenek olduğu görülmektedir [24]. Hidrojen, talebin %96'sını karşılamak üzere buhar metan reformasyonu (SMR) gibi petrol ve kömür kullanan tekniklerden üretilmektedir. Ancak, farklı kaynak kullanımları ve farklı metotlarla temiz olarak da üretilebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları [25] doğrultusunda temiz enerji kaynağı kullanımı ile temiz hidrojen üretimi hedeflenmektedir. Enerji kaynağı olarak gelişmekte olan füzyon enerjisinin kaynak olarak kullanımı değerlendirilmiştir. ARC füzyon reaktörü Monte Carlo Nötron Parçacık (MCNP) nükleer kodu aracılığıyla modellenmiş, farklı nötronik parametreler aracığıyla reaktörün performansı incelenmiştir. Temiz bir enerji kaynağı olan nükleer enerjiden temiz hidrojen üretimi için iki farklı yüksek verimliliklere sahip termokimyasal hidrojen üretim çevrimi belirlenmiş, üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi ve dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi, ve çevrimler Aspen Plus programı aracılığıyla simüle edilmiştir. Buna ek olarak sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin çevrimler üzerindeki etkisi incelenmiş, simülasyon programı aracılığıyla detaylı olarak analiz edilmiştir. Son olarak, nükleer kaynak ve hidrojen üretim çevrimlerinin entegrasyonu için, nükleer reaktörün termodinamik çevrimi olarak bir açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi tasarlanmış, Engineering Equation Solver (EES) kullanılarak, enerji ve ekserji yaklaşımı ile tüm sistem ekipmanlarının birinci ve ikinci yasa analizleri yapılmıştır. Hem

nötronik parametrelerin hem de hidrojen üretim çevriminde kullanılan parametrelerin etkilerine bağlı olarak sonuçlar yorumlanmıştır. Buna ek olarak, füzyon enerjisinin sürdürebilir bir toplumun temel ihtiyaçlarını karşılamak üzere kaynak olarak kullanıldığı bir vaka çalışması sunulmuştur.

1.1. Motivasyon

İnsanoğlunun temiz ve sürdürülebilir kaynak arayışında nükleer enerji ve yenilebilir enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Fakat güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili oluşu nükleer enerjinin avantajlarının vurgulanmasına yardımcı olmaktadır. Nükleer fisyonun atık problemi gibi dezavantajları sebebiyle nükleer füzyona yönelim giderek artmaktadır. Temiz enerji kaynağı kullanımı, sürdürülebilirliğin sadece bir parçasıdır, tam anlamı ile sürdürülebilirliği sağlamak için temiz bir enerji taşıyıcısı ve enerji depolama aracına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada hidrojen umut vadeden, potansiyel bir çözüm olarak görülmektedir.

Bu tez çalışmasının motivasyonu, temiz enerji kaynağı kullanımı ile temiz hidrojen üretimidir. Bu enerji kaynağı arayışında füzyonun önemli bir seçenek olduğunu ve temiz hidrojen üretimi için nükleer kullanımını vurgulamaktır. Füzyon enerjisi günümüzde dünya ülkelerince çalışılmakta ve gelecek 15-20 yıl için hedefler belirlenmiş durumdadır. Bu doğrultuda, tez kapsamında füzyon enerjisinin insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak üzere hidrojen üretiminde kaynak olarak kullanımı farklı nötronik ve hidrojen üretim parametreleri ile incelenmiş, sistem entegrasyonu termodinamik çevrim aracılığıyla sağlanmıştır.

1.2. Amaçlar

Bu tez çalışmasında temel amaç, hem füzyon enerjisinin insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanımını incelemek, hem de temiz hidrojen üretiminde kaynak olarak kullanılmasını değerlendirmektir. Bu genel amaca hizmet eden alt hedefler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Füzyon reaktörlerinin insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak üzere alt sistemlerle entegrasyonunu sağlamak.
- Bir füzyon reaktörü modellemek.

- Farklı nötronik parametrelerin reaktör performansına etkisini incelemek.
- Bir füzyon reaktörü için termodinamik çevrim modellemek ve birinci ve ikinci analizlerini gerçekleştirmek.
- Temiz hidrojen üretimi için termokimyasal çevrimlerin füzyon reaktörü ile entegrasyonunu sağlamak.
- Termokimyasal hidrojen üretim çevrimlerinin simülasyonlarını yürütmek.
- Termokimyasal hidrojen üretim çevrimlerinin çeşitli sıcaklık ve basınç değerleri altında parametrik analizlerini gerçekleştirmek.
- Füzyon reaktörü entegreli hidrojen üretim sistemlerinin enerji ve ekserji yaklaşımlarıyla analizlerini gerçekleştirmek.
- Bir vaka çalışması ile füzyon enerjisinin insanoğlu yararına kullanımını değerlendirmek.

1.3. Yenilikler

Bu tez ile literatürden farklı olarak, füzyon reaktörü entegre sistemler incelenmiş, ARC füzyon reaktörü için tasarlanan termodinamik çevrimin detaylı analizi gerçekleştirilmiş, üç- ve dört-adımlı Mg-Cl hidrojen üretim çevrimlerinin ARC füzyon reaktörü ile entegrasyonu sağlanmıştır. Tez kapsamında:

- Füzyon bazlı entegre enerji sistemi modellenmiştir.
- ARC füzyon reaktöründe eriyik tuz kullanımı incelenmiştir.
- ARC füzyon reaktöründe grafit malzeme etkisi analiz edilmiştir.
- ARC füzyon reaktörü için açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi modellenmiş ve detaylı termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir.
- ARC füzyon reaktörü sürücülü entegre enerji sisteminde hidrojen üretimi incelenmiştir.
- ARC füzyon reaktörü entegre sistemde hidrojen üretimi üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimleri ile analiz edilmiştir.
- Hidrojen üretim çevrimleri iki farklı metot ile analiz edilerek Aspen Plus model doğrulaması yapılmıştır.
- Entegre sistemin termodinamik analizi enerji ve ekserji yaklaşımlarıyla gerçekleştirilmiştir.

1.4. Tez Akışı

Sunulan tez yedi ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tezin motivasyonu, amaçları ve yenilikleri sunularak teze giriş yapılmıştır. İkinci bölümde temiz enerji kaynakları başlığı altında nükleer enerji ve hidrojen sunulmuş, ayrıca hidrojen üretim yöntemleri detaylı olarak incelenmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, tez kapsamında analiz edilen alt sistemler ve entegre sistemler için detaylı literatür taraması sunulmuş, literatürdeki boşluk ve bu tez çalışmasının literatüre katkısına odaklanılmıştır. Sistem tasarımı, alt sistemlerin tanımı, tasarım parametreleri gibi veriler tezin dördüncü bölümünde verilirken, yapılan analizlere dair detaylı sunuş, MCNP ve Aspen Plus simülasyonlarına dair detaylı açıklamalar beşinci bölümde yer almaktadır. Nötronik sonuçlar, hidrojen üretim çevrimlerine dair simülasyon sonuçları, parametrik çalışma sonuçları, model doğrulama sonuçları, entegre sistemlere dair analiz sonuçları ve vaka çalışması sonuçları bölüm altıda grafiklerle sunulmuş, detaylı olarak yorumlanmıştır. Yedinci bölümde ise tüm sonuçların özeti ve tezin ana sonuçları verilmiş, gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. TEMİZ ENERJİ KAYNAKLARI

Fosil yakıtların sebep olduğu sera gazı emisyonları ve dolayısıyla meydana gelen iklim değişikliği, hava kirliliği gibi çevresel sorunlarla mücadele için yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji gibi temiz enerji kaynakları başlıca çözüm yollarıdır. Güneş, rüzgar, jeotermal ve biyokütle gibi kaynaklar giderek daha uygun maliyetli hale gelmektedir [26]. Küresel çapta sürekli olarak artan enerji ihtiyaçlarının karşılanması ve iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasında yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer teknolojilerin etkisi büyük olacaktır [27].

Tezin bu bölümünde, nükleer enerji ve hidrojene genel bir bakış açısı ile giriş yapılmakta, fisyon, füzyon, nükleer reaktörler ve hidrojen üretim metotları irdelenmektedir.

2.1. Nükleer Enerji

Nükleer enerji, günümüzde birçok ülkenin enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve düşük karbonlu üretim sağlayarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır [28]. Bir nükleer enerji santralinden kaynaklanan CO_2 emisyonu, fosil yakıt kullanan bir enerji santralinden kaynaklanan emisyondan iki kat daha düşüktür [29].

Nükleer enerji, fosil yakıt bağımlılığını azaltma, kullanılan yakıt kaynaklarının çeşitliliğini artırma, nükleer enerji kullanılarak üretilen kilovatsaat fiyatının uranyum fiyatına olan düşük bağımlılığı ile yakıt maliyetlerini azaltma, iklim değişikliğinin etkilerini minimize etme, nükleer santrallerden kaynaklanan çok düşük emisyon olduğu için hava kirliliğini azaltma ve hidrojen ekonomisine geçiş için bir zemin hazırlama gibi avantajlarla ön plana çıkmaktadır [30,31]. Buna ek olarak, uranyum rezervinin mevcut kullanım hızı ile yaklaşık 400-500 yıl daha kullanılabileceği tahmin edilmektedir, yani kullanılan fosil yakıtlardan yaklaşık olarak 50 kat daha uzun süre kullanılabilirler [17].

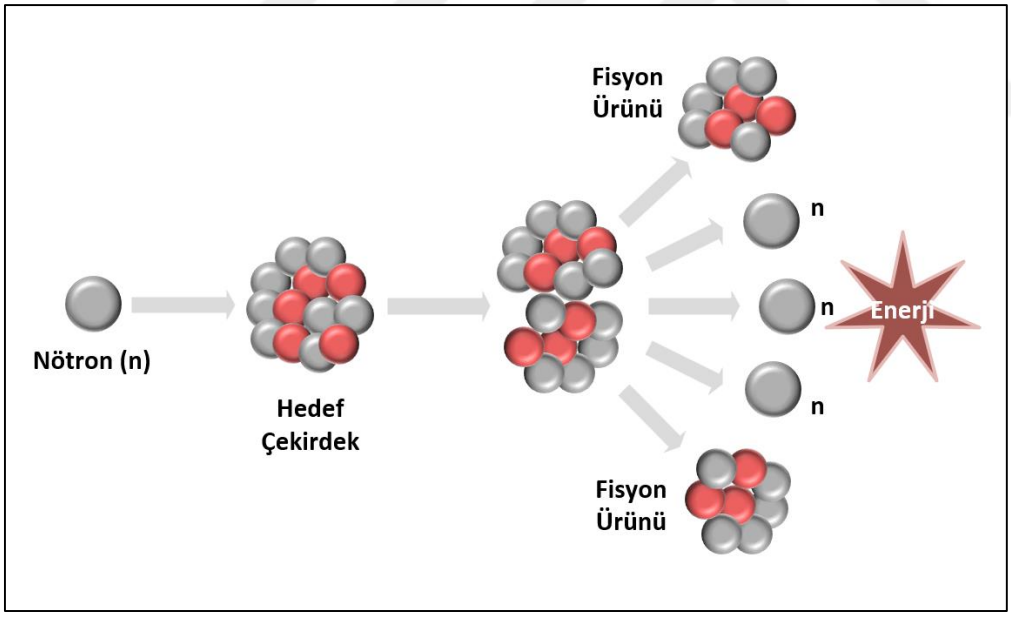
Atom çekirdeğinde meydana gelen reaksiyonlar ile meydana gelen nükleer enerji temel olarak çekirdek bölünmesi (fisyon) ve çekirdek birleşmesi (füzyon)'dan meydana gelmektedir. Günümüzde ticari olarak kullanılan nükleer santraller fisyon teknolojisine dayanmaktadır ve ^{235}U ya da ^{239}Pu gibi ağır çekirdeklerin bölünmesi ile enerji ortaya

çıkmaktadır. Füzyon reaktörleri ise araştırma halinde olan reaktörlerdir, birçok ülke tarafından füzyon eşiğinin aşılması için çalışmalar yürütülmektedir.

2.1.1. Fisyon

Fisyon teknolojisi çekirdek bölünmesine dayanmaktadır. Ağır çekirdek nötron bombardımanına uğrayarak daha hafif iki çekirdeğe bölünür ve yüksek miktarda enerji açığa çıkar, (Şekil 2.1). Bir uranyum-235 atomunun çekirdeği nötron bombardımanı ile genellikle bir baryum ve bir kripton çekirdeği olarak ikiye ayrılır ve 2 ila 3 serbest nötron ve belirli bir enerji açığa çıkar. Bu serbest nötronlar çevredeki uranyum-235 atomlarında nükleer fisyona sebep olur ve zincirleme bir reaksiyon başlar [13]. Eşitlik (2.1) ^{235}U için fisyon reaksiyonunu vermektedir.

$$^{235}U + {}^{1}n \rightarrow {}^{141}Ba + {}^{92}Kr + 3{}^{1}n + enerji \qquad (2.1)$$



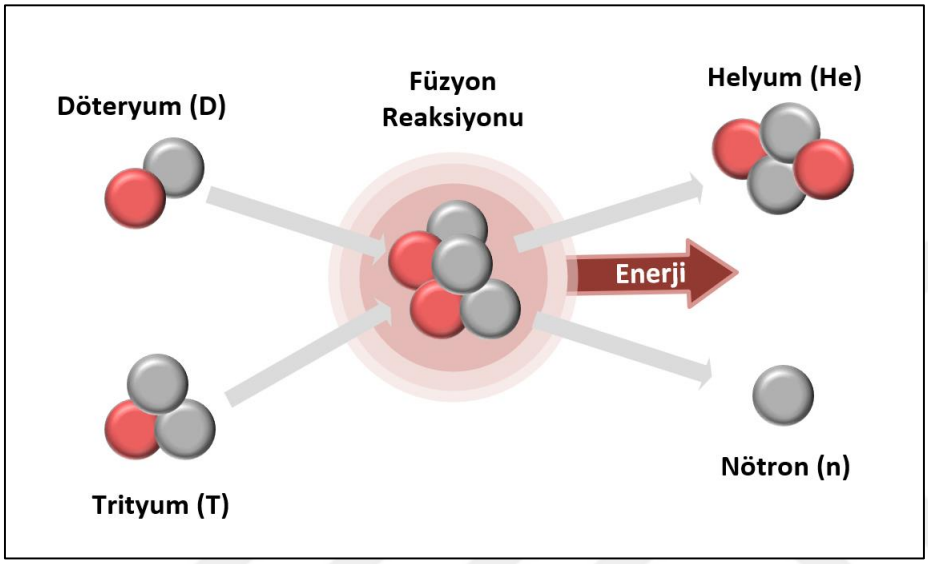
Şekil 2.1. Fisyon reaksiyonu illüstrasyonu

2.1.2. Füzyon

Güneş'te gerçekleşen enerji üretim sürecine benzer yapısıyla füzyon enerjisi geleceğin temiz ve sınırsız enerji kaynağı olarak görülmektedir. Füzyon reaksiyonu iki farklı hafif çekirdeğin yüksek basınç ve sıcaklık altında birleşmesi ve yüksek miktarda enerji açığa çıkması ile

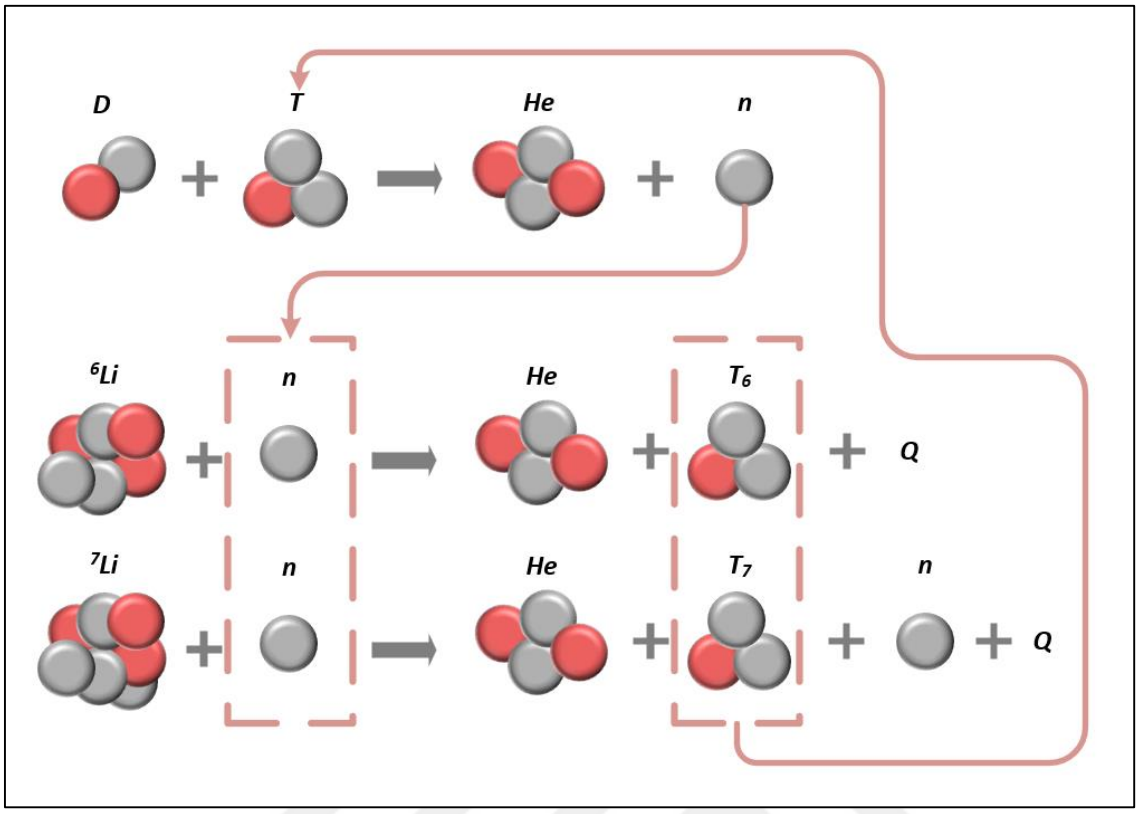
oluşur [32]. En yaygın füzyon tepkimesi döteryum-trityum izotopları arasında gerçekleşmektedir, (Şekil 2.2). Yüksek enerjili nötron kaynağı döteryum (D) trityum (T) füzyon reaksiyonu Eşitlik (2.2) ile verilmiştir [33,34].

$$D + T \rightarrow \alpha(3.6\ MeV) + n(14.1\ MeV) \tag{2.2}$$



Şekil 2.2. Füzyon reaksiyonu illüstrasyonu

Füzyon reaksiyonu sonucunda yaklaşık 17,6 MeV ısı açığa çıkmaktadır. Döteryum doğada bol miktarda bulunurken, trityum radyoaktiftir ve füzyon reaksiyonlarının devamlılığı için reaktör içinde üretilmelidir. Trityum üretimi reaktörde trityum üretim oranı ile ifade edilir ve füzyon reaksiyonu sonucunda oluşan nötronun Li atomları ile reaksiyona girmesi sonucunda trityum üretilir [35]. Şekil 2.3 füzyon zincir reaksiyonunu sunmaktadır.

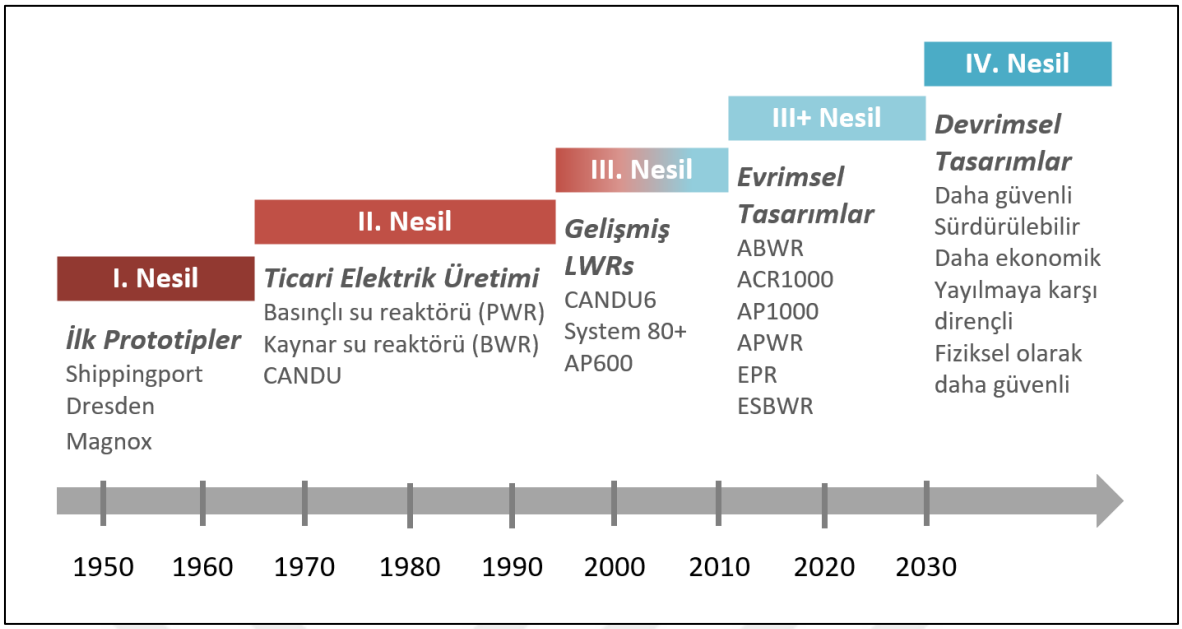


Şekil 2.3. Füzyon zincir reaksiyonu

Günümüzde birçok ülkede füzyon çalışmaları devam etmektedir. Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör (ITER) nükleer füzyon enerjisini ticari olarak mümkün kılmak için yürütülen en büyük projelerden birisidir. Reaktör Fransa'da inşa edilmekte olup tokamak tiptedir. ITER ve diğer füzyon reaktörü çalışmalarında ortak en büyük amaç D-T füzyon reaksiyonu ile ortaya çıkan enerjinin, harcanan enerjiden çok daha fazla olduğunu kanıtlamak yani füzyon enerji eşiğini aşmaktır [20,36]. ITER ile karbon salımı olmayan, sınırsız ve güvenli enerji kaynağı geliştirilecek ve gelecekte ticari olarak kullanılacak füzyon reaktörlerinin önünü açacaktır.

2.1.3. Nükleer reaktörler

Tüm reaktör tipleri için tasarımlar temel bazı hedefler doğrultusunda geliştirilmektedir. Bu hedefler: nükleer enerji ekonomisini iyileştirmek, radyoaktif atıklar da dahil olmak üzere emisyonları azaltmak, kaza riskini minimize etmek ve nükleer enerjinin uygulama alanını genişletmektir [17].



Şekil 2.4. Nükleer reaktörlerin gelişimi (veri: Referans [37,38])

Nükleer reaktörler I. Nesil'den IV. Nesil'e farklı gruplar altında değerlendirilebilir, (Şekil 2.4). I. Nesil reaktörler 1950'lerden başlayarak geliştirilmiştir, ilk prototip ve erken ticari amaçlı reaktörlerdir ve artık kullanımda değillerdir. Shippingport ve Dresden gibi tesisler bu döneme aittir. 1970'lerden itibaren yaygınlaşan II. Nesil reaktörler, ticari kullanıma uygun basınçlı su reaktörü (PWR), kaynar sulu reaktör (PWR) ve Canada Döteryum Uranyum (CANDU) reaktörü tasarımlarından oluşmaktadır. Bu nesile ait tasarımlar günümüzde hala kullanımdadır. III. III+ Nesil reaktörler 1990'dan itibaren yaygınlaşmaya başlamıştır ve uzun işletme ömrü gibi detaylarla dikkat çekmektedir. En güncel nesil, IV. Nesil reaktörlerdir ve henüz araştırma geliştirme aşamasındadır. Bu nesile ait tasarımlar arasında yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörler, erimiş tuz reaktörleri, sodyum soğutmalı hızlı reaktörler ve süperkritik su soğutmalı reaktörler yer almaktadır. Amaçları daha yüksek verimli, daha güvenilir, sürdürülebilir tasarımlar sağlamaktır. Sistemler, temiz ve sürdürülebilir çevre hedeflerine uyumlu şekilde sera gazı emisyonlarını azaltırken, yakıt kaynaklarının uzun vadeli bulunabilirliğini desteklemektedir [39].

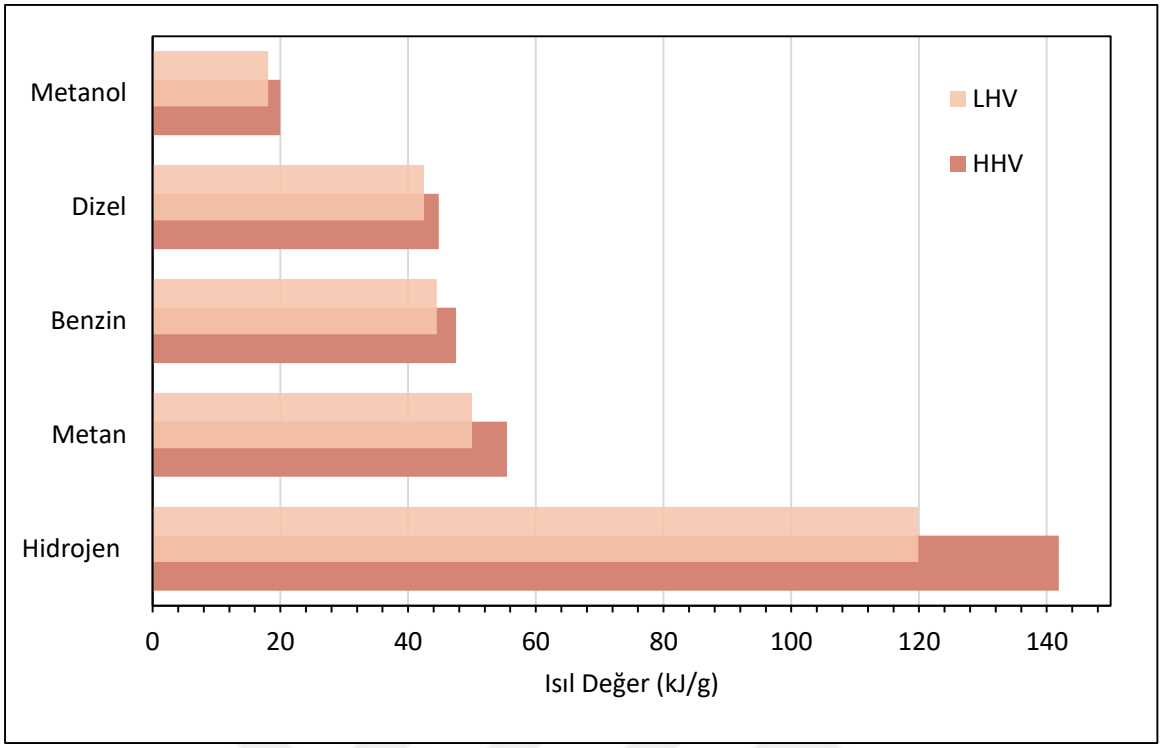
Füzyon reaktörleri hali hazırda araştırma aşamasındadır. Füzyon reaksiyonu için yeterince sıcak plazma eldesi iki farklı şekilde gerçekleşmektedir: manyetik sıkıştırma (magnetic confinement) reaktörleri ve eylemsizlik sıkıştırma (intertial confinement) reaktörleri. Manyetik sıkıştırma reaktörlerinin en önemli örneği Fransa'daki ITER'dir. ITER sıvı helyum ile soğutulan süperiletken elektromıknatıslar kullanır. Eylemsizlik sıkıştırma

reaktörlerinde ise süper güçlü lazerler kullanılır ve ışınlar ile yakıt parçacığının yüzeyi çok yüksek sıcaklıklara çıkarılmaktadır. Bu sayede iç patlamalar oluşturulur ve füzyon reaksiyonu için yakıt yeterince sıcak ve yoğun hale getirilmektedir [36]. Dünyadaki en güçlü lazerlerden birisi Amerika'da Ulusal Ateşleme Tesisi (National Ignition Facility)'nde bulunmaktadır [40]. Manyetik sıkıştırma reaktörleri kapsamında, en yaygın olarak incelenen sistemlerden birisi tokamak tasarımıdır. Tokamak tasarımı plazmayı manyetik alanlar aracılığı ile belli bir hacimde tutarak kontrollü füzyon tepkimelerinin gerçekleşmesini amaçlayan bir tasarımdır. Tasarım toroidal şekillidir ve yüksek sıcaklıklarda plazma oluşturarak döteryum ve trityumun birleşmesi sağlamaktadır [41].

Füzyon çalışmaları kapsamında, daha uygun fiyatlı, kompakt ve daha sağlam bir reaktör olarak ARC füzyon reaktörü fikri ortaya atılmıştır. ARC füzyon reaktörü tokamak tip bir reaktör olup 630 MW termal güce ve yaklaşık olarak 252 MW elektriksel güce sahiptir [21,42]. Tez kapsamında çalışılan ARC füzyon reaktörü, literatür taraması ve sistem tasarımı bölümlerinde detaylı olarak anlatılmıştır.

2.2. Hidrojen

Periyodik tablonun ilk elementi olan hidrojen, evrende en çok bulunan elementtir ve Dünya kabuğunda en bol bulunan onuncu elementtir [43,44]. Hidrojen atomu ilk olarak Henry Cavendish tarafından 1766'da keşfedilmiştir [45]. Hidrojen diatomik bir moleküldür (H_2), atom numarası 1 ve atom ağırlığı 1.00797'dir. Hidrojen 0,08967 kg/m^3 yoğunlukla en hafif elementtir ve havadan 14,4 kat daha hafiftir. Çevre şartlarında (1 atm ve 25°C) renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Sıfırın altında 253°C'de sıvı hale geçmektedir. Düşük yoğunluğu ile havada hızla dağılabilen hidrojen yüksek yayılma kapasitesine sahiptir. Ayrıca, birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir, örneğin; 1 gram hidrojen 2,8 gram benzine eşdeğer enerji sağlamaktadır [46]. Şekil 2.5 hidrojen ve diğer yaygın fosil kaynakların ısıl değerlerini vermektedir. Ayrıca, iki atomlu olan hidrojen üç doğal izotopa sahiptir: protium (^{1}H), döteryum (^{2}H veya D) ve trityum (^{3}H veya T) [45].



Şekil 2.5. Hidrojen ve bazı yaygın fosil yakıtların ısıl değerleri (veri: Referans [47])

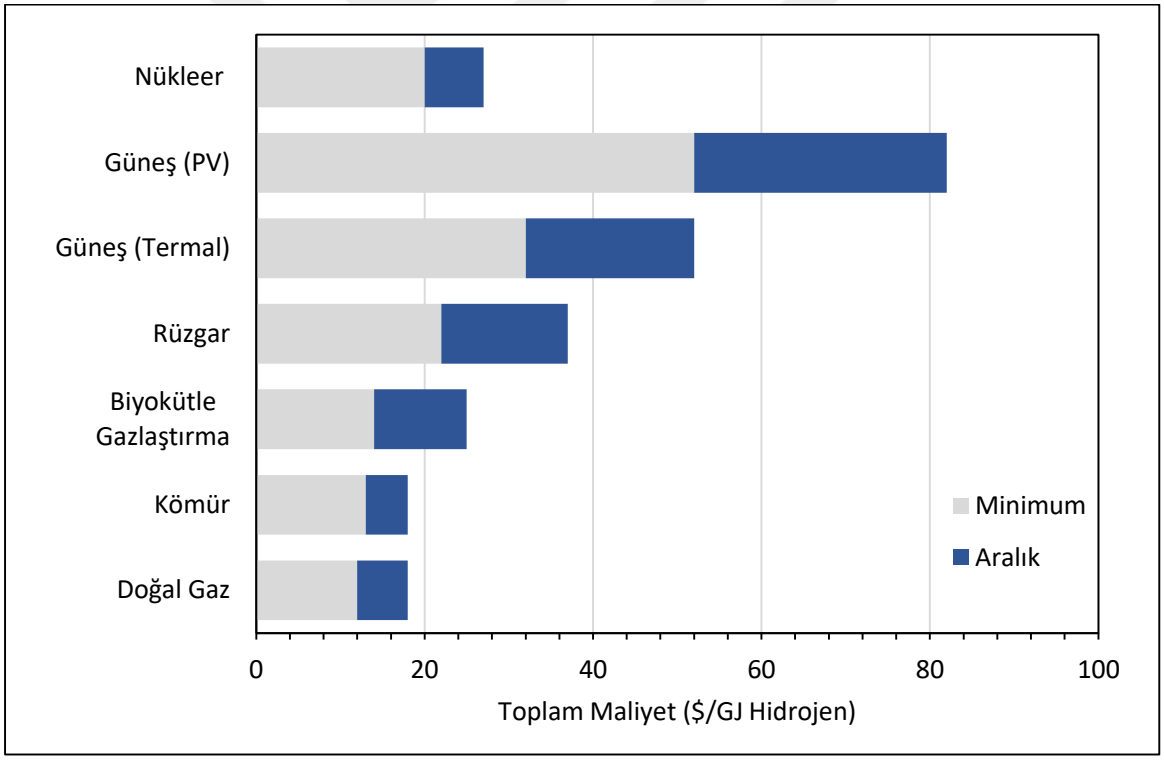
Enerji depolayan ve ileten bir taşıyıcı olarak sürdürülebilir temiz enerji sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır [48]. Benzinin nerdeyse üç katı enerji yoğunluğuna sahip olan hidrojen, bu sayede uzun mesafe taşımacılık gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanım için uygundur. Yanması halinde sadece su buharı üretmesi ile iklim değişikliği etkilerini azaltma hedeflerine katkı sağlamaktadır. Güneş, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları, nükleer enerji ve fosil yakıtlar dahil olmak üzere çeşitli kaynaklar ile üretilebilmektedir. Bütün bu avantajlarının yanı sıra hidrojenin yaygın kullanımını sınırlandıran bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Düşük hacimsel yoğunluğundan dolayı depolanması ve taşınması zordur, hidrojen sıvılaştırılmış halde ya da metal hidritler aracılığıyla depolanabilir. Buna ek olarak, geleneksel yakıtlara oranla yüksek maliyete sahiptir [49].

2.3. Hidrojen Üretim Metotları

Evrende bol miktarda bulunan hidrojen, tatlı su, deniz suyu, biyokütle, hidrojen sülfür ve fosil yakıtlar gibi birçok madde içeriğinde bulunmaktadır. Termal enerji, elektriksel güç, fotonik ve biyokimyasal enerji hidrojen üretiminde kullanılan başlıca enerji kaynaklarıdır [47]. Düşük üretim maliyetleri ile hidrojen üretiminin yaklaşık %96'lık bir oranı fosil

yakıtlardan üretilmektedir [50]. Hidrojenin talebinin yaklaşık %50'si doğal gaz buhar reformasyonundan karşılanırken, %30'u petrol reformasyonu ile, %18'i kömür gazlaştırma ile ve %3,9'u elektroliz ile karşılanmaktadır [47,51].

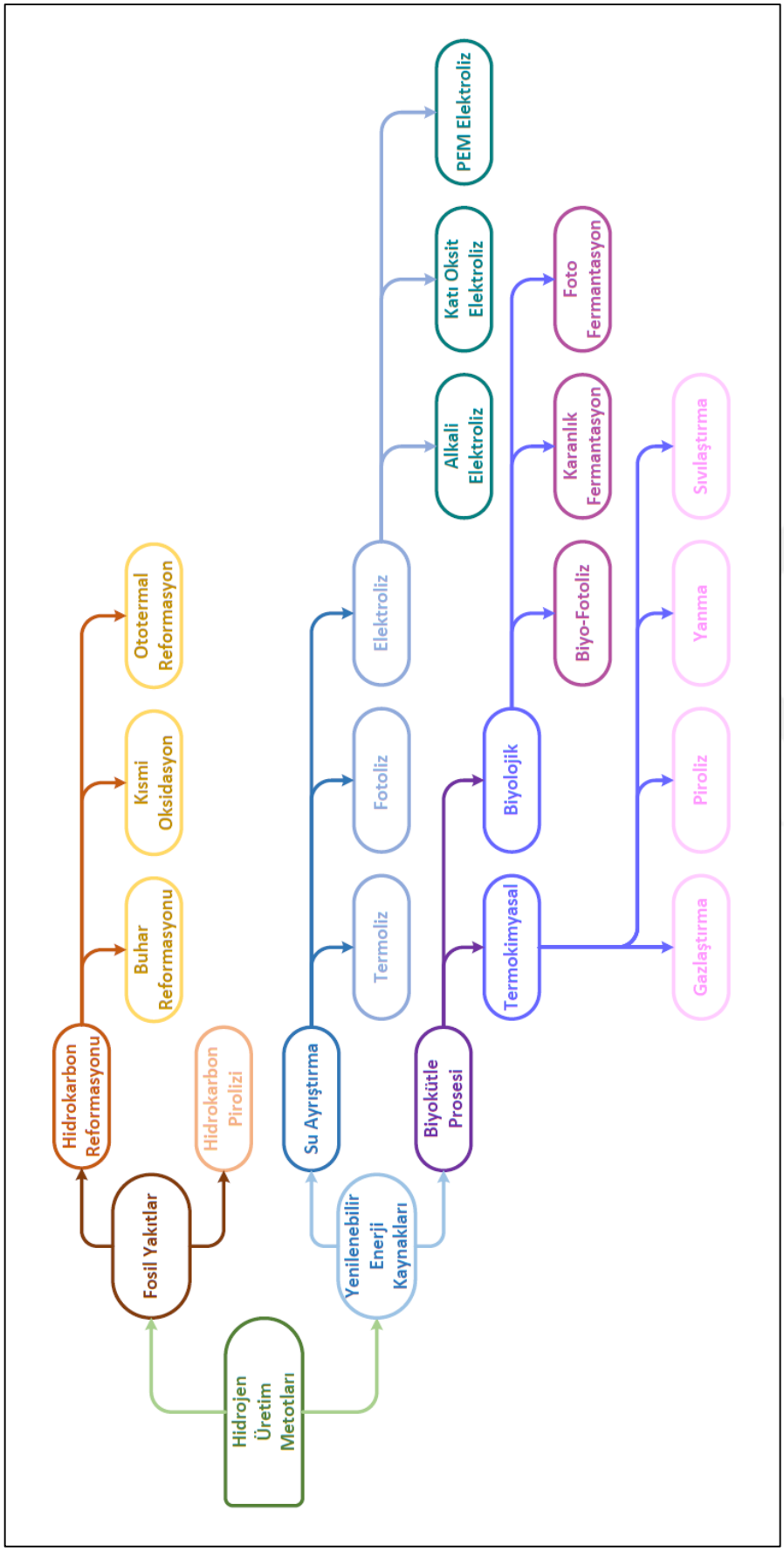
Özellikle güneş, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile üretilen hidrojen yeşil hidrojen teknolojilerinin temelini oluştururken [52], fosil kaynak bazlı hidrojen üretimini azaltmak üzere farklı enerji kaynakları ile hidrojen üretiminin payının artırılması gerekmektedir. Şekil 2.6 farklı enerji kaynaklarıyla üretilen hidrojen maliyetlerini vermektedir. Hidrojen üretim maliyetleri incelendiğinde en uygun üretim yöntemlerinin fosil kaynaklar aracılığı ile olduğu gözlemlenmekle birlikte negatif çevresel etkilerinden dolayı, hidrojen üretimi için nükleer enerjinin kullanımı umut vadeden bir seçenek olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 2.6. Kaynaklara göre hidrojen üretim maliyetleri (veri: Referans [53])

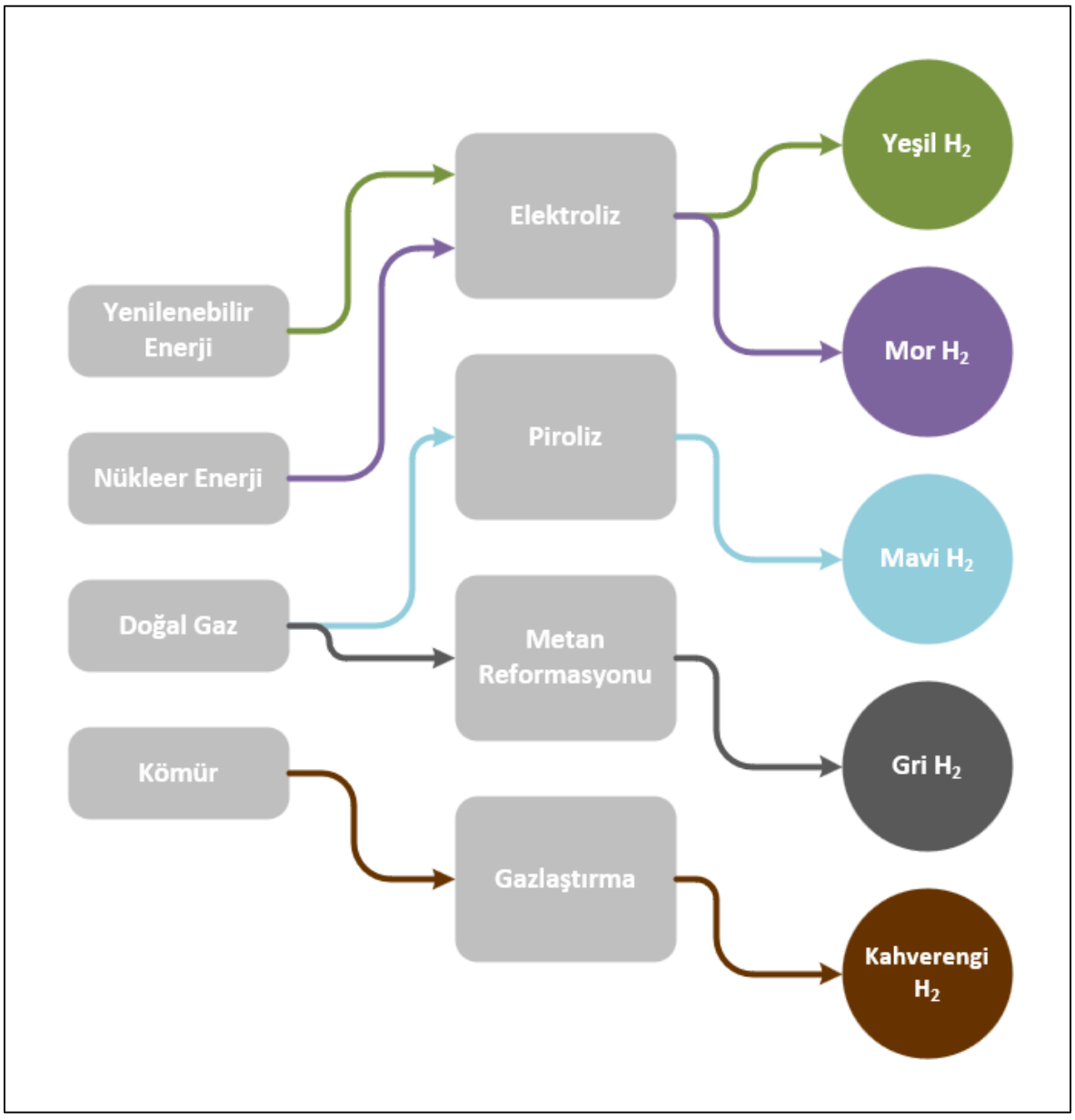
Hidrojen kullanılan enerji kaynağına ve kullanılan metotlara göre çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Genel olarak bu yöntemler fosil yakıt ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Fosil yakıt bazlı üretim metotları arasında buhar reformasyonu, kısmi oksidasyon ve hidrokarbon pirolizi gibi yöntemler öne

çıkmaktadır, fakat karbon salımı ile çevreye olan negatif etkileriyle fosil kaynakların hidrojen üretiminde kullanılması sürdürülebilirlik açısından sınırlıdır. Yenilenebilir enerjiye dayalı hidrojen üretim yöntemleri ile karbon salımının en aza indirilmesi ve temiz hidrojen üretimi hedeflenmektedir. Bu kapsamdaki yöntemler; suyun ayrıştırılması yoluyla elde edilen elektroliz (alkalin, PEM ve katı oksit elektrolizörleri), ışık kaynaklı fotoliz ve termoliz süreçleri ve biyo-kaynaklara dayalı biyokimyasal ve termokimyasal yöntemleri içerir. Hidrojen üretim teknolojilerinin çeşitliliği hem enerji güvenliği hem de karbon nötr hedeflerine ulaşılması bakımından çok yönlü çözümler sunmaktadır [54].



Şekil 2.7. Hidrojen üretim metotları (veri: Referans [54])

Hidrojen birçok metot ile üretilebilmekte ve kullanılan enerji kaynağına göre farklı renk kodları ile ifade edilmektedir. Şekil 2.8 hidrojen renk kodları ve üretim metotlarını sunmaktadır.



Şekil 2.8. Hidrojen renk spektrumu (veri: Referans [55])

Bu tez kapsamında, alt başlıklarda ticari olarak en sık kullanılan yöntemler olan elektroliz ve buhar metan reformasyonuna odaklanılmış ve termokimyasal çevrimlere genel bir bakış açısı sunulmuştur.

2.3.1. Elektroliz

Karbonsuz yapıya sahip net sıfır emisyonlu sürdürülebilir hidrojen ilk kez 1,23 V ile su ayrıştırma deneyi ile üretilmiştir. 1789'da altın elektrotlar kullanılarak suyu hidrojen ve oksijene ayıran ilk elektroliz gerçekleştirilmiştir [56,57]. Temel bir su elektroliz ünitesi bir anot, bir katot, güç kaynağı ve bir elektrolitten oluşur [58]. Elektriksel güç kullanımı ile su, hidrojen ve oksijene ayrışmaktadır, Eşitlik (2.3-2.5) [59].

Katot: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ (2.3)

Anot: $H_2O \rightarrow 0{,}5O_2 + 2H^+ + 2e^-$ (2.4)

Net reaksiyon: $H_2O \rightarrow H_2 + 0{,}5O_2$ (2.5)

Elektronlar, DC kaynağının negatif terminalinden katoda doğru hareket eder ve burada hidrojen iyonları (H^+) ile birleşerek moleküler hidrojen (H_2) oluşturur. Anotta ise su molekülleri oksijen gazı, hidrojen iyonları ve elektronlara ayrışır. Elektronlar, anot reaksiyonunda serbest bırakıldıktan sonra devreyi tamamlayarak DC kaynağının pozitif terminaline geri döner. Böylece toplamda su molekülü ayrıştırılarak hidrojen ve oksijen gazı elde edilir.

Su elektrolizi üç farklı üç farklı tipte gerçekleşebilir: alkali su elektrolizi, proton değişim membranlı (PEM) su elektrolizi ve katı oksit elektroliz hücresi (SOEC) [60].

Alkali elektroliz teknolojisi çok uzun yılladır sürekli olarak kullanılan bir teknolojidir. Ekonomik, yaygın ve dayanıklı olan bu teknoloji bazı dezavantajlara sahiptir: üretilen hidrojenin saflığı, düşük akım yoğunluğu ile yüksek çalışma gücü, düşük basınçta hidrojen üretimi ve düşük enerji verimliliği. Alkali elektroliz hücresi 80°C sıcaklığa kadar çalışmakta ve elektrolit %30 oranında potasyum hidroksit (KOH) içeren bir çözeltidir [56,61,62]. Sistem verimlikleri yaklaşık olarak %75-80 aralığında değişmektedir [63].

Proton değişim membranlı su elektrolizinde DC akım yoğunluğu 10 000 A/m^2 – 20 000 A/m^2 olup, alkali elektrolizin yaklaşık 5 katıdır. Çalışma sıcaklığı 50-80°C arasında olup 5 MPa'dan düşük basınca sahiptir [61]. Bir PEM elektrolizör hücresinde anot bölmesi sıvı

deiyonize su ile beslenir. Su molekülleri, yarı hücre reaksiyonuna ($H_2O \rightarrow 0{,}5O_2 + 2H^+ + 2e^-$) göre katalitik anotta oksitlenir ve bu da oksijen ve proton üretimine yol açar. Oksijen gaz fazında gelişir ve hücreden çıkarılır. Elektronlar dış devrede dolaşır ve hidratlanmış protonlar polimer membrandan geçerek katoda ulaşır ve burada DC güç kaynağı tarafından sisteme verilen elektronlar tarafından indirgenir. Sonuç olarak, yarı hücre reaksiyonuna ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$) göre hidrojen üretilir [64]. Ek olarak, PEM elektroliz verimi yaklaşık olarak %80-90 aralığındadır [65].

Katı oksit elektrolizi, yüksek verimlilikte yüksek saflıkta hidrojen üretimi nedeniyle göze çarpmaktadır. Teknoloji ilk olarak 1985 yılında Donitz ve Erdle tarafından tanıtılmıştır [66]. SOEC'ler yüksek sıcaklıkta yaklaşık 700-1000°C'de çalışmaktadır [67]. Bir SOEC'de su, bir reaktan görevi görür ve hücrenin katot tarafına verilir. Oksijen iyonları elektrolit aracılığıyla anoda taşınır ve katot tarafında hidrojen üretilir [68].

2.3.2. Metan reformasyonu

Reformasyon ve piroliz başta olmak üzre fosil kaynaklar ile hidrojen üretimi için birçok metot bulunmaktadır [54]. Doğal gaz buhar reformasyonu 970-1100 K sıcaklık aralığında ve 3,5 MPa basınçlarda gerçekleşen endotermik ve katalitik bir prosestir. Katalizör olarak nikel kullanılmaktadır [51,69]. Reformasyon basit iki reaksiyondan oluşur:

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n + 0{,}5m)H_2 \quad (2.6)$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (2.7)$$

Buhar metan reformasyonu (SMR), metanol reformlama ve benzin reformlama süreçleri, hidrojen-karbon oranına bağlı olarak farklı işletme koşullarıyla benzer ilkelere dayanır. SMR, yaklaşık 30 atm basınç ve 870°C üzeri sıcaklıkta gerçekleşen endotermik bir reaksiyondur. Bu süreçte, sülfür gibi katalizörleri zehirleyen bileşenler giderilerek besleme gazı ön arıtmadan geçirilir. Ticari uygulamalarda buhar-karbon oranı genellikle 2–3 aralığındadır; bu oran dönüşüm verimini artırır ve istenmeyen yan ürün oluşumunu azaltır. Reformlama süreci sonucunda sentez gazı (syngas) oluşur ve bu gaz tipik olarak 3:1 H_2/CO oranına sahiptir [69,70]. Eşitlik (2.6) reformasyon reaksiyonudur ve Eşitlik (2.7) su gaz değişim (WGS) reaksiyonunu verir. WGS reaksiyonunda, ilk reformerda oluşan CO su ile

reaksiyona girer ve sonucunda karbondioksit ve hidrojen oluşur [71,72]. Buharla reformasyon proseslerinin en büyük dezavantajı, hidrojen üretimi sırasında hem üretim sürecinde hem de ısı kaynağı olarak fosil yakıtların kullanılması nedeniyle atmosfere büyük miktarda CO_2 emisyonunun salımıdır [51]. Karbondioksit emisyonunun azaltılması için CO_2 yakalama ile yeraltında mineral karbonhidratlar olarak depolanabilmektedir. Bu işlem için prosese bir reaksiyon daha eklenir, Eşitlik (2.8) ve bu işlem mineral karbondioksit tutumu (MCS) olarak adlandırılmaktadır [73,74].

$$CO_2 + CaSiO_3 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2 \quad (2.8)$$

Büyük ölçekli SMR'nin dönüşüm verimliliği %74 ile %85 arasında değişmektedir [69,70].

2.3.3. Termokimyasal su ayrıştırma çevrimleri

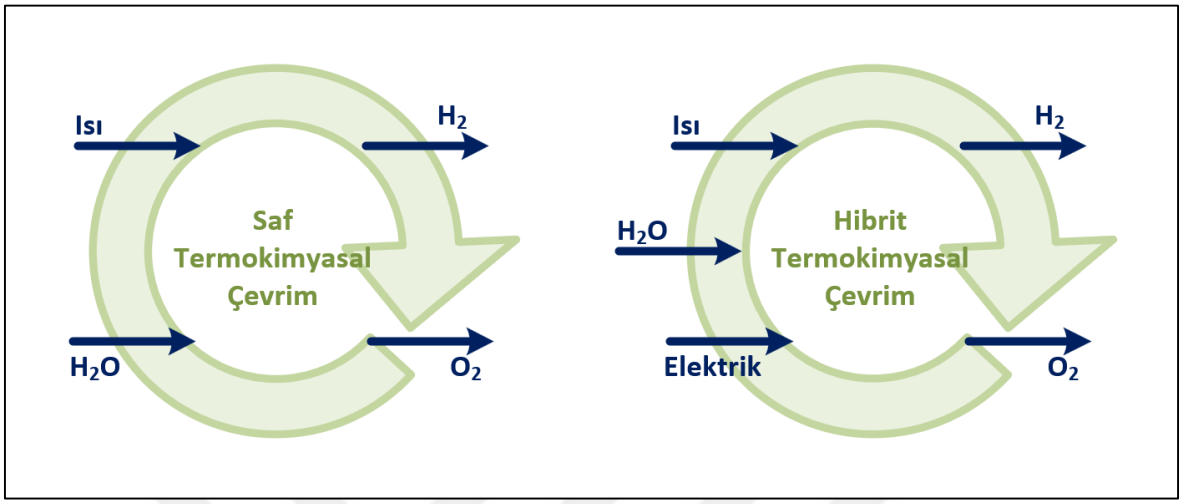
Termokimyasal su ayrıştırma çevrimleri, 1970'lerden beri fosil yakıtlara doğrudan bağımlı olmadan büyük ölçekli hidrojen üretimi için araştırılmaya ve çalışılmaya devam etmektedir. Temel olarak suyun termal enerji ile oksijen ve hidrojene ayrışmasını içermektedir [75]. Tüm çevrimlerin net reaksiyonu Eşitlik (2.9) ile verilmiştir.

$$H_2O + termal\ enerji \rightarrow H_2 + 0{,}5O_2 \quad (2.9)$$

Suyun doğrudan ayrışması mümkün olsa da gereken yüksek sıcaklıklar ve patlayıcı bir karışım oluşturmaktan kaçınılması gibi sebepler ile teknik zorluklar meydana gelmektedir. Bu sebeple, sınırlamaların üstesinden gelmek için çok adımlı termokimyasal çevrimler geliştirilmiştir [76]. Çevrimler, nükleer ya da güneş enerji sistemlerinden aldığı yüksek sıcaklıklı ısıyı hidrojende depolanan kimyasal enerjiye dönüştürmek üzere farklı sıcaklıklarda endotermik ve ekzotermik reaksiyonların birleşiminden oluşur ve karbon içermeyen hidrojen üretim yöntemi oluşturur [75]. Çevrimler kapalı bir döngü olarak çalışır, tüm kimyasallar döngü içinde kalırken, sistemde dışarıdan sadece su girer ve reaksiyonlar sonucunda çevrimden sadece oksijen ve hidrojen ürün olarak çıkar.

Termokimyasal çevrimler iki ana başlık altında incelenebilir: saf termokimyasal çevrimler ve hibrit termokimyasal çevrimler. Saf termokimyasal çevrimler yalnızca termal enerji ile çalışabilirken, hibrit termokimyasal çevrimler hidrojen üretimi için termal enerjinin yanı sıra

elektriksel güce de ihtiyaç duymaktadır. Şekil 2.9 saf ve hibrit termokimyasal çevrimler için şematik bir gösterim sunmaktadır.



Şekil 2.9. Termokimyasal çevrimler için şematik gösterim

Termokimyasal çevrimler, klor bazlı ve sülfür bazlı olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Klor bazlı termokimyasal çevrimler gurubunda, bakır-klor (Cu-Cl), magnezyum-klor (Mg-Cl), demir-klor (Fe-Cl), kobalt-klor (Co-Cl), vanadyum-klor (V-Cl) ve Seryum-Klor (Ce-Cl) çevrimleri bulunmaktadır. Sülfür bazlı çevrimler incelendiğinde ise, hibrit sülfür (HyS), sülfür-iyot (S-I) ve çinko-sülfür-iyot (Zn-S-I) çevrimlerinin gruba dahil olduğu görülmektedir [77].

S-I çevrimi ilk olarak General Atomics tarafından 1970'li yıllarda çalışılmıştır [78]. Çevrim, Bunsen reaksiyonu, H_2SO_4 ayrışma reaksiyonu ve HI ayrışma reaksiyonu adı verilen üç farklı reaksiyondan oluşmaktadır [79,80]. Bunsen reaksiyonu ekzotermik bir reaksiyondur, ayrışma reaksiyonları ise endotermik reaksiyonlardır. Reaksiyon yaklaşık 900°C sıcaklıkta %53 verimle çalışmaktadır [81].

$$2H_2O + I_2 + SO_2 \rightarrow H_2SO_4 + 2HI \quad (2.10)$$

$$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + 0{,}5O_2 \quad (2.11)$$

$$2HI \rightarrow I_2 + H_2 \quad (2.12)$$

V-Cl çevrimi Argonne Ulusal Laboratuvarı tarafından tanıtılmış bir çevrimdir. Çevrimde dört farklı reaksiyon bulunur ve maksimum reaksiyon sıcaklığı 925°C'dir. Yüksek enerji verim değeri ile çevrim ümit verici olarak görünse bile vanadyum oksitler hakkındaki yetersiz termodinamik bilgi ve Deacon reaksiyonunun düşük verimi gibi dezavantajları vardır. Çevrimin enerji verimliliği yaklaşık %42'dir [82,83].

$$2VCl_2 + 2HCl \rightarrow 2VCl_3 + H_2 \quad (2.13)$$

$$4VCl_3 \rightarrow 2VCl_4 + 2VCl_2 \quad (2.14)$$

$$2VCl_4 \rightarrow 2VCl_3 + Cl_2 \quad (2.15)$$

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2HCl + 0{,}5O_2 \quad (2.16)$$

Cu-Cl çevrimi hidroliz, hidrojen üretimi ve ayrışma reaksiyonu verilen üç farklı reaksiyondan oluşur. Hidroliz reaksiyonu 630°C'de gerçekleşen endotermik bir reaksiyondur, ikinci reaksiyon 500°C'de gerçekleşen hidrojen üretim reaksiyonudur ve elektrik ihtiyacı duymaktadır. Son reaksiyon ise ayrışma reaksiyonudur ve yaklaşık 560°C'de gerçekleşir [84,85].

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2HCl + 0{,}5O_2 \quad (2.17)$$

$$2CuCl + 2HCl \rightarrow 2CuCl_2 + H_2 \quad (2.18)$$

$$2CuCl_2 \rightarrow 2CuCl + Cl_2 \quad (2.19)$$

Fe-Cl çevrimi, bol miktarda bulunan ve düşük maliyetli kimyasallar kullanımı ile öne çıkmaktadır. Çevrimle ilgili ilk çalışmalar Almanya'da Aachen Üniversitesi'nde yürütülmüştür [86]. Çevrim suyun ayrışması için dört farklı reaksiyondan oluşmaktadır. Hidroliz (Eşitlik (2.20)) ve ters Deacon (Eşitlik (2.23)) reaksiyonları endotermik, klorlama (Eşitlik (2.21)) ve termal ayrışma (Eşitlik (2.22)) reaksiyonları ekzotermik reaksiyonlardır [87,88].

$$2FeCl_2 + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 6HCl + H_2 \quad (2.20)$$

$$Fe_3O_4 + 8HCl \rightarrow FeCl_2 + 2FeCl_3 + 4H_2O \quad (2.21)$$

$$2FeCl_3 \rightarrow 2FeCl_2 + Cl_2 \quad (2.22)$$

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2HCl + 0{,}5O_2 \quad (2.23)$$

Mg-Cl çevrimi için üç-adımlı ve dört-adımlı iki farklı çevrim söz konusudur. Her iki çevrimde hibrit termokimyasal çevrimlerdir ve elektroliz reaksiyonu içerirler. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi sırasıyla hidroliz, klorlama ve elektroliz reaksiyonlarını içerirken, dört-adımlı Mg-Cl çevriminde iki farklı (gaz ve sulu çözelti) elektroliz gerçekleşmektedir. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi sırası ile hidroliz, ayrışma, sulu çözelti HCl elektrolizi, gaz HCl elektrolizi ve klorlama reaksiyonlarından oluşur [89]. Çevrimlerin enerji verimlilikleri sırası ile yaklaşık %52 [90] ve %44'tür [91].

Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi:

$$MgCl_{2\,(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow MgO_{(s)} + 2\,HCl_{(g)} \quad (2.24)$$

$$MgO_{(s)} + Cl_{2\,(g)} \rightarrow MgCl_{2\,(s)} + 0.5\,O_{2\,(g)} \quad (2.25)$$

$$2\,HCl_{(g)} \rightarrow Cl_{2\,(g)} + H_{2\,(g)} \quad (2.26)$$

Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi:

$$MgCl_{2\,(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow MgOHCl_{(s)} + HCl_{(aq)} \quad (2.27)$$

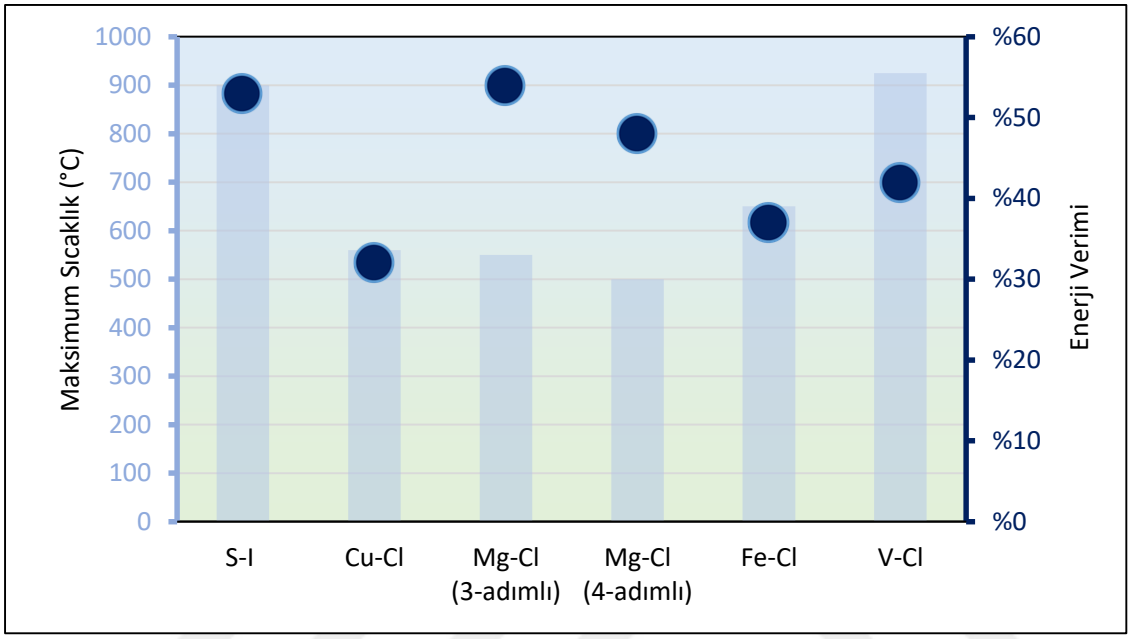
$$MgOHCl_{(s)} \rightarrow MgO_{(s)} + HCl_{(g)} \quad (2.28)$$

$$HCl_{(aq)} \rightarrow 0.5\,Cl_{2\,(g)} + 0.5\,H_{2\,(g)} \quad (2.29)$$

$$HCl_{(g)} \rightarrow 0.5\,Cl_{2\,(g)} + 0.5\,H_{2\,(g)} \quad (2.30)$$

$$MgO_{(s)} + Cl_{2\,(g)} \rightarrow MgCl_{2\,(s)} + 0.5\,O_{2\,(g)} \quad (2.31)$$

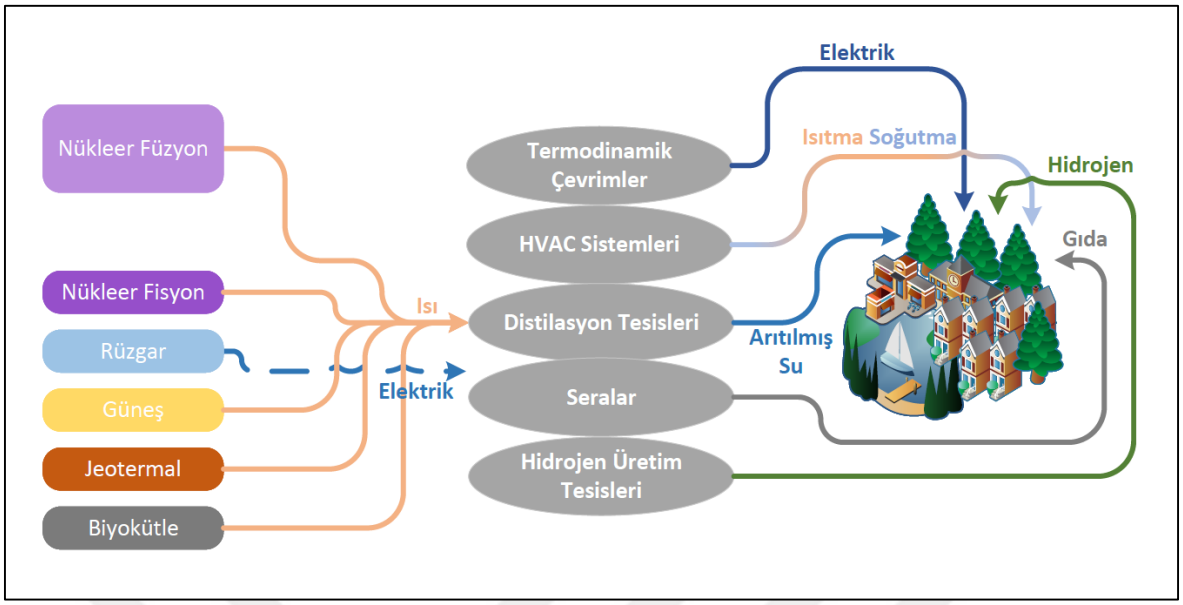
Başlıca bazı termokimyasal çevrimlerin enerji verimlilikleri ve reaksiyonlarının maksimum çalışma sıcaklıkları Şekil 2.10'te verilmiştir.



Şekil 2.10. Hidrojen üretim çevrimlerinin enerji verimleri ve çalışma sıcaklıkları (veri: Referans [81,83,84,87,92])

2.4. Entegre Temiz Enerji Sistemleri

Entegre enerji sistemleri farklı enerji kaynaklarını (nükleer, güneş, rüzgar, jeotermal vb.) ve farklı alt sistemleri bir arada kullanılarak sistemlerin enerji verimliliğini artırmayı amaçlayan enerji sistemleridir. Aynı zamanda, entegre sistemlerde bir alt sistemin atık ısısı/enerji fazlası başka bir sistemin ana girdisi olabilir. Bu sayede, toplam sistemin enerji ve ekserji verimi artırılmaktadır. Alt sistemler arasında bir topluluğun ihtiyaçlarını karşılamak üzere, ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri, termodinamik çevrimler, su artıma tesisleri, seralar ve hidrojen üretim tesisleri bulunabilmektedir. Yaşam alanında ihtiyaç olan soğutma ve ısıtma yükü, elektrik, temiz su ve gıda entegre sistemler ile karşılanırken, füzyon enerjisi yeni bir enerji kaynağı olarak değerlendirebilir, (Şekil 2.11). Entegre sistem kullanımı ile, enerji güvenliği artırılmakta kaynak bağımlılığı azaltılmakta ve sürdürülebilir bir enerji ağı oluşturulmaktadır. Ek olarak, entegre enerji sistemleri ile karbon salımı azaltılarak çevresel etki minimize edilmektedir.



Şekil 2.11. Sürdürülebilir toplumlar için entegre enerji sistemleri

3. LİTERATÜR TARAMASI

Tez kapsamında, nükleer hidrojen üretimi entegrasyonu incelenmiş, entegre sistem için ARC füzyon reaktörü enerji kaynağı olarak seçilmiştir. ARC füzyon reaktörü farklı nötronik parametreler altında analiz edilmiştir. Hidrojen üretim çevrimi olarak iki farklı çevrim (üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimleri) belirlenmiş ve çevrimler simüle edilerek farklı parametrik çalışmalar yürütülmüştür. Son olarak modellenen alt sistemler, ARC füzyon reaktörü, Rankine çevrimi, hidrojen üretim çevrimleri, entegre edilmiş ve termodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Tezin bu bölümünde her alt sistem ve entegre sistemler için literatür taraması yapılmış, kaynaklar özetlenmiş ve bu tezin literatürden farklı vurgulanmıştır.

3.1. ARC Füzyon Reaktörü

ARC füzyon reaktörü fikri ilk olarak kompakt füzyon reaktörlerinin değerlendirilmesi, daha uygun fiyatlı, daha sağlam ve kompakt füzyon reaktörleri geliştirmek amacıyla ortaya atılmıştır. Sorbom ve diğerleri [21] ARC füzyon reaktörünü karmaşıklığı ve maliyeti azaltmak üzere sunmuştur. Küçük boyutlarına rağmen ARC füzyon reaktörü yaklaşık olarak 525 MW füzyon gücüne sahiptir ve 200-250 MW aralığında bir elektriksel güç üretmektedir. ARC füzyon reaktörü bir tokamak reaktördür, REBCO süperiletkenleri, demonte edilebilir toroidal bir alan ve tamamen sıvı FLiBe (Li_2BeF_4) bir manto sistemi ile avantajlar sunmaktadır. FLiBe soğutucu hem elektrik üretiminde ısı sağlarken hem de trityum üretimine destek olmaktadır. Ayrıca, nötron zırhlaması olarak da görev yapmaktadır. ARC füzyon reaktörü 1,1'in üzerinde bir oranla trityum üretimi sağlamaktadır. Tek fazlı FLiBe soğutucu reaktörü yaklaşık olarak 900 K sıcaklıkta terk etmektedir. Modüler yapısı farklı konfigürasyonların test edilmesine uygun olup, bir füzyon nükleer bilim tesisi olarak da değerlendirilmektedir.

Kuang ve diğerleri [42] ARC füzyon reaktörünün güç boşaltımı yönetim konusundaki zorluklar üzerinde çalışmışlardır. 525 MW füzyon gücü ve yaklaşık 628 MW termal enerjiye sahip ARC füzyon reaktörü demonte edilebilir yüksek sıcaklık toroidal alan mıknatısları, toroidal alan içine yerleştirilmiş poloidal manyetik alan bobinleri ve eriyik tuz FLiBe mantosuna sahiptir. Çalışmada, toroidal alan bobinleri içinde konumlanmış poloidal manyetik alan bobinlerinin yeniden tasarımını içermektedir. Tasarım güç kullanımını

iyileştirmek ve güç boşaltımını kolaylaştırmak üzere modellenmiştir. Ayrıca ITER tarafından kullanılan bir geometriye benzer FLiBe soğutucu kanalı tasarlanmıştır.

Segantin ve diğerleri [93] enerji sistemleri üzerine yapılan çalışmaların sadece teknik boyut çalışmalarını değil, ayrıca çevresel, toplumsal ve politik bakış açılarını da kapsayan disiplinler arası bir yaklaşım gerektirdiğini vurgulamıştır. ARC füzyon reaktörü şebeke ile entegre çalışabilir ve yük takip edebilmektedir. Bu özellikleri ile ARC füzyon reaktörü hem temel güç sağlayan bir sistem hem de aynı zamanda yenilenebilir enerji sistemlerinin kesintili ve dalgalı enerji üretimini dengeleyecek bir enerji kaynağı olarak görülebilir. Bu kapsamda, araştırmacılar yük takibi özelliğinin ARC füzyon reaktörünün vakum kabı üzerindeki termal gerilimleri incelemiştir. Günlük farklı oranlardaki ısıl çevrimlere göre, ki bu ısıl döngüler 3, 10 ve 20 çevrim/gün olarak belirlenmiştir, vakum kabının ömrünü analiz etmişlerdir. Sonuç olarak vakum kabının ömrünün 3 yıl ile 5 yıl arasında değiştiğini ortaya koymuşlardır.

ARC füzyon reaktörü gibi kompakt tokamak tasarımlarında ilk duvar ve katı yapılar yüksek nötron yüküne maruz kalmaktadır ve bu da ciddi bir şekilde malzeme hasarına neden olmaktadır. Segantin ve diğerleri [94] bir başka çalışmalarında nötron ışınımlarının malzemeler üzerindeki etkisini ARC füzyon reaktörü için incelemişlerdir. Çalışmada V-Cr-Ti alaşımları ve orijinal ARC füzyon reaktörü tasarımında önerilen Inconel 718 karşılaştırılmıştır. V-Cr-Ti alaşımları, Inconel 718'e göre radyoaktif birikimi azaltmıştır. Alaşımların, izotop ayarlaması ve gaz uzaklaştırma gibi yöntemlerle optimize edilebildiğini, böylece soğutma süresi 20 yıla kadar düşürülebildiğini belirtmişlerdir.

Segantin ve diğerleri [95] ARC füzyon reaktörünün trityum üretim oranı analiz etmişler ve optimize etmişlerdir. Buna ek olarak, santralin ekonomik verimliliğini artırmak için reaktörün trityum üretim oranının ve depolanmasının maksimumda tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, Monte Carlo nötron transport kodları kullanarak farklı konfigürasyonlarda reaktörün trityum üretim oranını incelenmişler ve maksimum trityumu elde etmek için en uygun tasarımı araştırmışlardır. Duvar malzemesi olarak Inconel 718 yerine V-15Cr-5Ti ve Eurofer 97 incelenmiştir. Ayrıca soğutucu kanalı kalınlığı ve ^{6}Li zenginleştirmesinin trityum üretimine etkisi incelenmiştir. V-15Cr-5Ti malzeme kullanılan modellemede Inconel 718 ve Eurofer 97'ye göre daha yüksek TBR değerleri elde edilmiş, soğutucu kalınlığı arttıkça bu değerin düştüğü gözlemlenmiştir. İkinci en yüksek TBR değeri

Eurofer 97 kullanılan konfigürasyonda elde edilmiş ve benzer olarak kanal kalınlığı arttıkça TBR değeri düşmüştür. En düşük TBR değeri ise Inconel 718 malzemede elde edilmiş, fakat diğer malzemelerden farklı olarak kanal kalınlığı arttıkça TBR değerinde az bir artış gözlemlenmiştir. Aynı konfigürasyonlar farklı ^{6}Li zenginleştirme oranlarında TBR değeri için analiz edilmiştir. %20-50 ^{6}Li zenginleştirme oranı konfigürasyonlar için en iyi opsiyon olarak değerlendirilmiştir.

Bir başka çalışmada, ARC füzyon reaktörü için farklı soğutucular analiz edilmiştir. Segantin ve diğerleri [96] dokuz farklı soğutucu analizi gerçekleştirmiş ve TBR değerlerini karşılaştırmışlardır. Analizlerde natural lityum, PbLi, FLiBe, FLiNaK, FLiNaBe, LiFBiBrNaBr, LiFLiBrNaF, LiFLil ve LiFNaFZrF4 soğutucuları kullanılmıştır. En yüksek TBR değerleri PbLi soğutucu da elde edilmiştir. Ancak aşırı nötron üretiminin yapıya binen baskı nedeniyle dezavantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca TBR analizleri farklı ^{6}Li zenginleştirme oranları içinde sürdürülmüştür. TBR oranı genel olarak tüm soğutucular için zenginleştirme oranı arttıkça artmakla beraber, natural lityum için yaklaşık olarak %35 zenginleştirme oranından sonra azalış göstermiştir. Sonuç olarak ise FLiBe soğutucunun düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen diğer soğutuculara oranla daha iyi nötron koruması sağladığı ve yüksek TBR değerlerine her zenginleştirme oranında ulaşması sebepleri ile en dengeli ve verimli soğutucu olarak belirlenmiştir.

ARC füzyon reaktörü MIT tarafından tasarlanan ve umut vadeden ilk füzyon reaktörlerinden birisidir. Nükleer füzyon santrallerinin de diğer enerji santralleri gibi enerji güç dönüşümü için bir termodinamik çevrime bağlanması gerekmektedir. Bu amaçla, Segantin ve diğerleri [97] ARC füzyon reaktörü için kullanılabilecek çeşitli termodinamik çevrimleri incelemiş ve termal verimlilik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında üç farklı çevrim analiz edilirken, Rankine çevrimi, Brayton çevrimi ve birleşik güç çevrimi, bunun yanı sıra, çevrimlerde kullanılan gaz için iki farklı seçenek incelenmiştir, süperkritik helyum ve süperkritik karbondioksit. Çalışmada santral uygulanabilirliği, çevrimin termal verimliliği, bileşen bütünlüğü, ekonomiklik gibi bulgular tartışılmış ve ARC füzyon reaktörü için uygun seçeneğin belirlenmesi tartışılmıştır. Sonuç olarak, ara soğutmalı ve yeniden ısıtmalı rejeneratif bir CO_2 akışkanlı Brayton çevriminin en umut verici seçenek olduğu belirlenmiştir ve bu çevrimin termal verimliliğinin %60'lara ulaşabildiği vurgulanmıştır.

Meschini ve diğerleri [98] ARC füzyon reaktörünün radyolojik güvenlik analizine odaklanmışlardır. Trityum sistemde en fazla bulunan başlıca radyolojik tehlike kaynağı olarak ele alınmış ve FLiBe devresi baz alınarak önemli ekipmanların hasar aldığı kaza senaryosu altında trityum salımı modellenmiştir. FLiBe ve trityum sızıntılarının önlenmesi amaçlanarak çok katmanlı güvenlik bariyerleri önerilmiştir. ARC füzyon reaktörünün güncel hali ile güvenlik limitlerine uyduğu vurgulanırken, daha gelişmiş deneysel analizler ile radyolojik güvenliğin pekiştirilmesini önermişlerdir.

Segantin ve diğerleri bir başka çalışmalarında [99] kompakt tokamaklar için radyasyon kalkanı tasarımları üzerine çalışmışlardır. Çalışmada Open MC kodu kullanılmış ve D şekilli bir model oluşturulmuştur. ARC çekirdeği temel vaka çalışması olarak ele alınmıştır. Analiz sonuçları, yüksek foton akısının absorbe edilebilmesi için yüksek yoğunluklu, ağır element içeren seramiklerin gerekli olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalara ek olarak, Ferrero ve diğerleri [100] ARC füzyon reaktöründeki reaktör kabı ve diverter soğutma sistemlerinin tasarımlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Analizler Monte Carlo metodu ile yürütülmüş ve termal-hidrolik değerlendirmeler yapılmıştır.

3.2. Termokimyasal Hidrojen Üretim Çevrimleri

Farsi ve diğerleri [101] laboratuvar ölçekli bir bakır-klor (Cu-Cl) döngüsü entegrasyonu kurmuşlar ve çevrimi analiz etmişlerdir. Çevrimde dört ana reaksiyonun (hidroliz, termoliz, elektroliz ve kurutma) yanı sıra anyolitin geri dönüştürülmesi gerekmektedir. Anyolit elektroliz sürecinde tüketilmektedir ve elektrokimyasal süreçte yeterince yoğunlaşabilmesi için geri dönüşümü beklenmektedir. Çalışmalarında tüm reaksiyonların termodinamik analizi ve Aspen Plus simülasyonu yapılmıştır. Sonuç olarak, sistemin saatte 100 litre hidrojen üretim kapasitesine sahip olduğu belirtilmiş ve enerji veriminin %11,60 iken ekserji veriminin %34,90 olduğu hesaplanmıştır.

Farsi ve diğerleri bir başka çalışmalarında [102] temiz hidrojen üretimi için Cu-Cl çevrimi incelemişlerdir. Cu-Cl çevrimi için reaktör tasarımlarına yönelik güncel çalışmaları sunmakla birlikte çevrimin güvenilir şekilde modellenmesi ve tasarımı için termo-fiziksel ve termo-kimyasal özelliklerin doğru bir şekilde belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Balta ve diğerleri [103] jeotermal enerji kaynaklı bir Cu-Cl çevrimin enerji ve ekserji analizini yürütmüştür. Analizler yürütülürken referans çevre sıcaklığı, reaksiyon sıcaklıkları ve jeotermal enerji kaynağının verimliliği gibi parametreler kullanılarak analiz detaylandırılmıştır. Çevrimin genel enerji ve ekserji verimleri sırası ile %21,67 ve %19,35 olarak elde edilmiştir. Jeotermal kaynağın veriminin %10'dan %20 değerine yükseltildiğinde Cu-Cl çevriminin veriminde iyileşmeler gözlemlenmiş ve enerji verim değerinin %15,80 ile %27 aralığında değiştiği görülmüştür. Ekserji verimi ise %16,80 ile %20,50 aralığında değişiklik göstermiştir. Buna ek olarak, jeotermal kaynağın verim artışı, Cu-Cl çevrimindeki elektroliz reaksiyonunun gerektirdiği elektriksel gücün termal eşdeğerinin doğrusal olmayan şekilde azaltmıştır. Sonuç olarak, jeotermal enerji kaynaklarının bol olduğu ülkeler için jeotermal kaynaklı Cu-Cl çevriminin uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır.

Kobalt-klor (Co-Cl) çevrimi ilk olarak nükleer hidrojen üretimi için Canavesio ve diğerleri [104] tarafından ortaya atılmıştır. 700°C sıcaklıkta gerçekleşen dört farklı reaksiyon öncelikle enerji ve ekserji verimliliği bakımından hidrojen üretimi için uygunluğunu belirlemek üzere termodinamik analizleri gerçekleştirilmiş, daha sonra ise laboratuvar ortamında konsept kanıtlaması için deneysel olarak çalışılmıştır. Deneysel çalışmalar 550-950°C aralığında gerçekleştirilmiş, reaksiyon basınç değerlerinin artırılmasının hidrojen üretimine pozitif etki yaptığı görülmüştür. Termodinamik analizler sonucunda çevrim veriminin %21-25 aralığında olduğu belirlenmiş ve reaksiyonlarda ekserji kayıplarının oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda modifiye bir Co-Cl çevrimi önerilmiş, ilk iki reaksiyon sıcaklıkları 700°C'den 550°C ve 650°C'ye düşürülürken, son iki reaksiyon sıcaklıkları 950°C'ye yükseltilmiştir. Bu modifiye çevrimin, enerji verimliliğinin iyileştirilmesi konusunda umut vadedici olduğu belirtilmiştir.

Safari ve Dincer [105] sürdürülebilir hidrojen üretimi için Fe-Cl termokimyasal çevrimini incelemişlerdir. Çevrim Aspen Plus programı aracılığıyla simüle edilmiş ve sıcaklık, basınç, buhar/reaktant oranı gibi farklı parametreler altında reaksiyonların parametrik analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, basınç değişiminin reaksiyonlarda büyük değişikliklere sebep olmadığı, sıcaklığın artışının ise hidrojen üretimini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Çevrim 925°C sıcaklık ve 1 bar basınç altında 0,86 kmol/h hidrojen üretmiştir.

Bor-bazlı Mg-Cl çevrimi literatürde sınırlı sayıda çalışmaya konu olmuş ve ilk olarak Abu-Hamed ve diğerleri [106] tarafından ortaya atılmıştır. Çalışmada, borun hidrojen üretiminde kullanılabileceği bir işlem tanımlanmış, bir depolama ve taşıma aracı olarak kullanılması önerilmiştir.

Balta [107] bor bazlı termokimyasal çevrimin Shomate ısı kapasitesi denklemleri kullanılarak analizini gerçekleştirmiştir. Analizlerde her reaksiyonun ve çevrimin enerji verimleri hesaplanmış, ayrıca ekserji verimleri, ekserji yok oluş oranları farklı referans sıcaklık değerlerinde incelenmiştir. Çevrimin ekserji verimliliği 25°C'de %43,93 olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, çevrimin yüksek ekserji verimi ile daha temiz ve sürdürülebilir bir çevre amaçları ile doğru orantılı olarak çalıştığı da vurgulanmıştır.

Ayrıca çevrimde bulunan reaksiyonlar ayrı ayrı da çalışmalara konu olmuştur. Yılmaz ve Balta [108] bor bazlı termokimyasal çevrimin hidrojen üretim reaksiyonunun enerji ve ekserji analizlerini yapmış, çeşitli referans çevre sıcaklıkları altında reaksiyonu enerji ve ekserji yaklaşımları ile incelemişlerdir. Analizler sonucunda reaksiyonun enerji verimi %11,00 ve ekserji verimi %20,34 olarak elde edilmiş, ekserji yıkım oranı 298 K sıcaklık altında 317,02 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Demirci ve Karakaya [109] reaksiyonun $MgCl_2$ elektroliz adımı için çalışmalar yürütürken, Vishnevetsky ve diğerleri [110] bor hidrolizi üzerine çalışmıştır. Ek olarak, Wahbeh ve diğerleri [111] bor hidrolizi reaksiyonunun kinetiği üzerine çalışmalar yürütmüştür.

Ozcan ve Dincer [91], hidroliz, klorlama ve elektroliz olmak üzere üç ana adımdan oluşan Mg-Cl çevrimi incelemişlerdir. Hidroliz reaksiyonu sonucu meydana gelen HCl'in sulu fazda bulunması elektrolizde elektrik ihtiyacını arttırdığı için bu çalışma kapsamında farklı konfigürasyonlar karşılaştırılmış ve elektrik ihtiyacının düşürülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca kuru HCl elektrolizi ile oksijen oluşumu ve klorun suda çözülmesi problemleri ortadan kaldırılacaktır. Kuru HCl elektrolizi içeren yeni bir dört adımlı çevrim önerilmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Dört adımlı çevrimde enerji verimi %43,70 değerine ulaşırken, ekserji verimi de %52,00 olarak hesaplanmıştır.

Balta ve diğerleri [112] üç-adımlı Mg-Cl çevrim için enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirmiştir. Çevrimin genel verimliliği farklı parametreler altında incelenmiştir: referans çevre sıcaklığı ve reaksiyon sıcaklıkları. Çevrimin enerji verimi %63,63, ekserji

verimi ise %34,86 olarak hesaplanmıştır. Çevrimin düşük çevre sıcaklıklarında daha verimli çalıştığı ve çevrimin ilk reaksiyonunun sıcaklığı çevrim ekserji verimini büyük ölçüde etkilediği sonuçlarına ulaşılmıştır. Elektroliz 1,6 V gerilimde mol başına 289,50 kJ elektrik enerjisi tükettiği hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Mg-Cl çevriminin düşük sıcaklıklarda çalışan yenilenebilir enerji sürücülü hibrit sistemlerde kullanımının güçlü bir aday olduğu belirtilmiştir.

3.3. Entegre Enerji Sistemleri

Bu başlık altında, nükleer ve yenilenebilir enerji bazlı entegre enerji sistemlerinin literatürdeki örnekleri sunulmuştur.

3.3.1. Nükleer enerji bazlı entegre enerji sistemleri

Rodríguez ve diğerleri [113] yüksek sıcaklıklı reaktör (HTR-PM) ile iki farklı hidrojen üretim metodunu sırası ile entegre edip tasarımların verimliliklerini karşılaştırmışlardır. Her iki tasarımda da 2 adet 250 MW termal enerji kapasiteli HTR-PM reaktörler kullanılmıştır. Hidrojen üretim metodu olarak ise yüksek sıcaklıkta elektroliz (HTE) ve bakır-klor (Cu-Cl) döngülü termokimyasal çevrim seçilmiştir. HTE metodu saniyede 0,78 kg hidrojeni %27,37 verimlilik ile üretirken, Cu-Cl çevrimi ile daha yüksek verimlilikte fakat daha az miktarda, yaklaşık 0,56 kg/s hidrojen üretilmiştir. Cu-Cl çevriminin verimi %32,12 olarak hesaplanmıştır.

Pinsky ve diğerleri [114] nükleer hibrit enerji sistemleri üzerine bir çalışma yürütmüştür. Çalışma kapsamında hem termal enerji hem de elektrik ihtiyacı olan hidrojen üretim metotlarına odaklanılmış ve bu hidrojen üretim metotları III. Nesil ve IV. Nesil nükleer reaktörler ile çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak entegre edilmiştir. Hidrojen üretim metodu olarak, alkali su elektrolizi, proton değişim membranlı (PEM) elektroliz, katı oksit elektroliz (SOEC), S-I çevrimi, hibrit sülfür (HyS) çevrimi, Cu-Cl çevrimi ve kalsiyum-bromür (Ca-Br) çevrimleri kullanılmıştır. Sonuçlar buhar metan reformasyonu ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, nükleer enerji santrallerinin hidrojen üretim potansiyelini kanıtlamak ve hibrit sistemlerin rekabetçiliğini artırmak için teşvikler gerektiğini vurgulamışlardır. Nükleer hibrit enerji sistemlerinin geleceğin düşük karbonlu enerji altyapısında kilit rol oynamaya aday olduğunu belirtmişlerdir.

Qu ve diğerleri [115] çok yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler (VHTR) ile S-I çevriminin hidrojen ve elektrik kojenerasyonunu incelemektedir. Çalışma kapsamında iki farklı sistem tasarlanmış ve analiz edilmiştir: sistem 1'de hidrojen üretimi için gerekli ısı buhar türbininden sağlanırken, sistem 2'de hidrojen ve elektrik üretim çevrimleri tamamen bağımsız çalışmıştır. Sistemlerin termodinamik analizleri sonucunda ilk sistemin enerji ve ekserji verimleri sırası ile %43,60 ve %12,90 olarak elde edilirken, ikinci sistemde bu değerler %39,20 ve %14,70 olarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar, ilk sistemin ikinci sisteme oranla daha verimli olduğu ve yüksek hidrojen üretim oranlarında daha avantajlı olduğunu vurgularken, buhar üreteçlerinin ve S-I çevrimindeki saflaştırma/yoğunlaştırma ünitelerinin sistemin zayıf noktaları olduğunu belirtmişlerdir.

Marques ve diğerleri [116], süperkritik su reaktörü (SCWR), çok etkili damıtma (MED) ve Na-O-H hidrojen üretim tesisini entegre ederek bir trijenerasyon sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem EES kullanılarak modellenmiş ve enerji ve ekserji yaklaşımları ile analiz edilmiştir. Çalışmada ısı kaynağı olarak kullanılan SCWR 1000 MW termal enerji gücüne sahiptir ve hem hidrojen üretim tesisine hem de MED ünitesine ısı sağlamaktadır. Çalışma sonucunda kütle ve enerji denge eşitlikleri kullanılarak sistemin 5 kg/s hidrojen, 400 MW elektrik ve 960 kg/s tuzdan arındırılmış su elde edilmiştir.

Khalid ve Bicer [117] net sıfır emisyon hedefi ile rüzgar enerjisini ve küçük modüler reaktörü (SMR) entegre eden bir trijenerasyon sistemi tasarlamışlardır. Entegre sistemde elektrik, hidrojen ve sıcak su üretimi gerçekleşmektedir. Hidrojen üretiminde ise hidrojen klorür (HCl) bazlı iki aşamalı bir termokimyasal çevrim kullanılmıştır. Sonuç olarak, trijenerasyon sistemi ile yüksek miktarda hidrojen üretiminin mümkün olduğu, SMR ve rüzgar enerjisinin birlikte kullanıldığı vurgulanırken, analizler sonucunda entegre sistemin enerji verimi %57,50 ve ekserji verimi %38,10 olarak hesaplanmıştır.

Norouzi ve diğerleri [118] hidrojen üretimi için buhar metan reformasyonu (SMR) ile sodyum soğutmalı hızlı reaktör (SFR) teknolojilerinin entegrasyonunu önermektedir. Sistemde 3 farklı enerji çevrimi kullanılmıştır. Buhar çevriminde saatte 620 ton, 540°C sıcaklıkta buhar üretilirken, yüksek sıcaklıklı bir sentez akımı kaynağına 700°C sıcaklıkta enerji sağlayarak buhar-gaz karışımının sıcaklığı artırılmıştır. Önerilen sistem ile saatte 144,50 ton hidrojen üretilmiştir. Ayrıca yapılan analizler ile tesis verimliliği %78,50'e kadar yükseltilmiştir.

Rodríguez ve diğerleri [119] enerji kaynağı olarak nükleer kullanan su ayrıştırma metotlarından en umut verici metot olan sülfür-iyot (S-I) döngülü termokimyasal metot üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında çok yüksek sıcaklıklı nükleer reaktör (VHTR) enerji kaynağı olarak belirlenmiş ve analizler Aspen HSYS aracılığıyla yürütülmüştür. Enerji üretimi için nükleer reaktörün termodinamik çevrimi Brayton olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, güç dönüşüm çevriminde %53,27 verim elde edilmiştir. Ayrıca S-I çevrimin reaksiyonları farklı parametreler altında analiz edilmiştir. Analizler sonucu hidrojen üretim miktarı saniyede yaklaşık olarak 0,56 kg olarak hesaplanırken, entegre sistemin verimi %22,56 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, farklı nükleer reaktörler ile çalışan benzer modellerle karşılaştırıldığında, beklenen verimlilik aralığı içinde yer almıştır.

Rodríguez ve diğerleri bir başka çalışmalarında [120] enerji kaynağı olarak gaz türbini modüler helyum reaktör (GT-MHR) kullanarak hidrojen üretimi ve tuzdan arıtılmış su üretimi üzerine çalışmışlardır. Hidrojen üretim yöntemi olarak Cu-Cl çevrim kullanırken, tuzdan arıtma yöntemi olarak çok kademeli ani buharlaşma (MSF) metodu seçilmiştir. Tuzdan arıtmada gerekli ısı ihtiyacı, oksijen ayrıştırma reaksiyonunda çevreye verilen ısı tarafından karşılanmıştır. Gerekli analizler sonucunda entegre sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri sırası ile %32,47 ve %52,20 olarak hesaplanmış, ayrıca sistemde saniyede yaklaşık 0,22 kg hidrojen ve 4,95 kg saf su üretimi yapılmıştır. Son olarak, HEEP programı aracılığıyla üretilen hidrojenin maliyeti hesaplanmış ve yaklaşık olarak 2,77 USD/kg H_2 olarak belirlenmiştir.

Şahin ve Şahin [121] literatürdeki başlıca hidrojen üretim metotları için kaynak olarak 4. Nesil nükleer reaktörleri değerlendirmiş ve teknolojileri karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada hem elektrik üretim çevrimlerinin hem de nükleer hidrojen üretim teknolojilerinin daha fazla geliştirilmesi gerektiği vurgulanırken, termokimyasal çevrimler ve yüksek sıcaklıkta elektroliz gibi metotların 4. Nesil nükleer reaktörlerle kullanımının umut vadeden sistemler olduğu belirtilmiştir. Buna ek olarak, 4. Nesil reaktörlerde termal verimin artırılması amacı ile farklı soğutucu çeşitlerinin öne çıktığı belirtilmiştir; gaz soğutmalı reaktörlerde helyum kullanımı, sıvı metal soğutucular ve eriyik tuz soğutucular. Ayrıca, karşılaştırılan hidrojen üretim metotları arasında düşük sıcaklık çalışma şartlarından ve maliyet açısından avantajlı olduğundan Cu-Cl çevriminin öne çıktığı vurgulanmıştır.

Wang ve diğerleri [122] çok yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör ve Cu-Cl çevrimi entegre ederek bir termo-ekonomik analiz yürütmüşlerdir. Çalışmada, çeşitli parametrelerin sistem performansına etkisi araştırılmış, enerji kaybı, ekserji kaybı ve maliyet dağılımları incelenmiştir. Sistem maksimum 403,1 mol/s hidrojen ürettiğinde net elektrik üretimi 38,77 MW, enerji ve ekserji verimleri sırası ile %39,30 ve %41,26 olarak hesaplanmış, ayrıca özgül enerj maliyeti 0,0731 USD/kWh olarak bulunmuştur. Hidrojen üretimi olmadan aynı değerler sırası ile, 177,25 MW, %50,64 ve %53,29 bulunmuş, ayrıca maliyet 0,0268 USD/kWh olarak değerlendirilmiştir. Buna ek olarak sistemdeki kayıpların en fazla Cu-Cl çevriminden kaynaklandığı vurgulanmıştır.

Kowalczyk ve diğerleri [123] hidrojen ve elektriğin birlikte üretildiği nükleer tabanlı bir kojenerasyon sistemi modellemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, hidrojen üretilmeyen durumda kojenerasyon sistemi 303,54 MW elektrik üretirken enerji verimi %50,59 olarak hesaplanmıştır. Tam kapasitede hidrojen üretildiğinde, üretim miktarı saatte 4392 kg olarak hesaplanır ve sistemin enerji verimi %55,83'tür. Ayrıca, tasarlanan sistem hidrojen üretimi ile elektrik üretiminin bir arada olduğu sistemlerin kullanımının mümkün ve karlı olduğunu vurgulamaktadır.

Genç [124] Advanced Power Extraction (APEX) füzyon reaktörü ile farklı hidrojen üretim metotlarını entegre etmiş ve karşılaştırmalı bir analiz sürdürmüştür. Füzyon gücü 4000 MW olan APEX füzyon reaktörü minör aktinit kullanımı ile nötronik olarak analiz edilmiştir. Minör aktinit kullanımı ile reaktörün enerji çoğaltım oranı 1,12'den 2,03 değerine kadar artırılabilmiştir. Hidrojen üretim metodu olarak ise üç farklı yöntem belirlenmiştir: SMR, S-I çevrimi ve HTE. Analizler sonucunda sistemin hidrojen üretiminin SMR metodu ile saniyede 426 kg değerine ulaşabildiği gözlemlenmiştir.

Asal ve Acır [125] Lazer Ataletsel Fisyon-Füzyon (LIFE) reaktörünü farklı nötronik parametreler altında analiz etmiş ve Cu-Cl çevrim ile entegre etmişlerdir. Nükleer reaktörün performansı farklı eriyik tuz yakıt oranları, iki farklı yakıt bölgesi kalınlığı ve çeşitli ^{6}Li zenginleştirme oranları ile incelenmiş, analizler MCNP nükleer kodu ile yürütülmüştür. Cu-Cl çevrim için analizler Shomate ısı kapasitesi denklemi aracılığıyla yapılmış ve yakıt bölgesi kalınlığı, yakıt oranı ve ^{6}Li zenginleştirme oranları arttıkça reaktörün gücü artacağından hidrojen üretim potansiyelinin de arttığı gözlemlenmiştir.

3.3.2. Yenilenebilir enerji bazlı entegre enerji sistemleri

Liu ve diğerleri [126] çalışmalarında düşük kaliteli ve esnekliği sınırlı olan jeotermal enerjinin yetersizliklerini aşmak amacı ile, jeotermal ve güneş enerjisini entegre ederek, elektrik ve hidrojen üretimi için yeni bir sistem tasarımı yapmışlardır. Sistemde termodinamik çevrim olarak organik Rankine çevrimi (ORC) ve hidrojen üretim metodu olarak PEM elektrolizör kullanılmaktadır. Sistemin gündüz saatlerinde enerji verimliliği %13,28 ve %14,36 arasında değişirken, önceki jeotermal sisteme oranla yaklaşık %5,67'lik bir iyileşme sağlamıştır. Sistem gündüz 139,98 kg hidrojen üretirken, gece PEM yakıt hücresinde 115,58 kg'ını kullanmaktadır. Jeotermal kaynağın su sıcaklığı ve güneş ışınımı arttıkça sistemin hidrojen üretim kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Nasser ve diğerleri [127] yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgarın hidrojen üretim potansiyeli inceledikleri bir hibrit sistem tasarlamışlardır. Sistemde fotovoltaik paneller ve rüzgar türbinleri kaynak olarak kullanılırken, hidrojen üretimi için elektrolizör kullanılmıştır. Sistemin Mısır'da kullanılması için bir vaka çalışması yapılmış ve 1,91 kg hidrojen üretim kapasitesi olduğu hesaplanmıştır. Hibrit sistemin enerji ve ekserji verimleri sırası ile %16,42 ve %12,76 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, sistemin çalışma ömrü boyunca 689,40 ton CO_2 emisyonu azaltımına neden olacağı belirtilmiştir.

Sadeghi ve diğerleri [128] güneş enerjili yenilikçi bir çoklu üretim sistemi tasarlamıştır. Sistemde, kule tipi yoğunlaştırıcılı güneş enerji sistemi ve gizli ısı depolama ünitesi kullanılarak kesintili güneş enerjisi sürekli olarak kullanılabilmiştir. Hidrojen üretim metodu olarak Cu-Cl çevrim belirlenmiş ve hidrojen ve oksijen üretimi yapılmıştır. Enerji ve ekserji analizleri ile sistem performansı değerlendirilmiş, sonuç olarak sistemde 41,90 MW elektrik, saniyede 12,6 kg buhar, 0,19 kg hidrojen ve 0,76 kg oksijen üretilmiştir. Entegre sistem %49,90 enerji verimine ve %4,90 ekserji verimine sahiptir.

Charvin ve diğerleri [129] konsantre güneş enerjisini kaynak olarak kullanarak farklı termokimyasal hidrojen üretim çevrimlerinin analizini sunmuşlardır. Yüksek verimli ZnO/Zn, Fe_3O_4/FeO ve Fe_2O_3/Fe_3O_4 termokimyasal çevrimleri seçilmiş ve kütle ve enerji dengeleri kullanılarak entegre sistemin enerji dönüşüm veriminin hesabı yapılmıştır. Kimyasal dönüşüm oranları ve ısı geri kazanımı gibi iyileştirmeler yapılarak sistemlerin çalışması optimize edilmiştir. Yapılan analize göre, tasarlanan sistem 40 yıl çalıştığında, 55

MW termal enerjiye sahip bir güneş enerjili hidrojen üretim çevrimi için hidrojen üretim maliyeti 7,98 USD/kg olarak, 11 MW termal enerjiye sahip bir sistem için ise 1 kilogram hidrojen başına 14,75 USD olarak hesaplanmıştır.

Muhammad ve diğerleri [130] yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemi ile entegre katı oksit elektroliz hücresinin (SOEC) tekno-ekonomik analizini yapmışlardır. 1 MW elektrik gücüne sahip sistem, günlü 0,86 ton hidrojen üretirken, maliyeti 8,87 USD/kg H_2 olarak, verimi ise %13,80 olarak hesaplanmıştır. Ek olarak, sistemde üretim kapasitesi artırıldığında, örneğin 8 MW'lık bir sistemde maliyetin 6,10 USD/kg H_2'ye düştüğü gözlemlenmiştir.

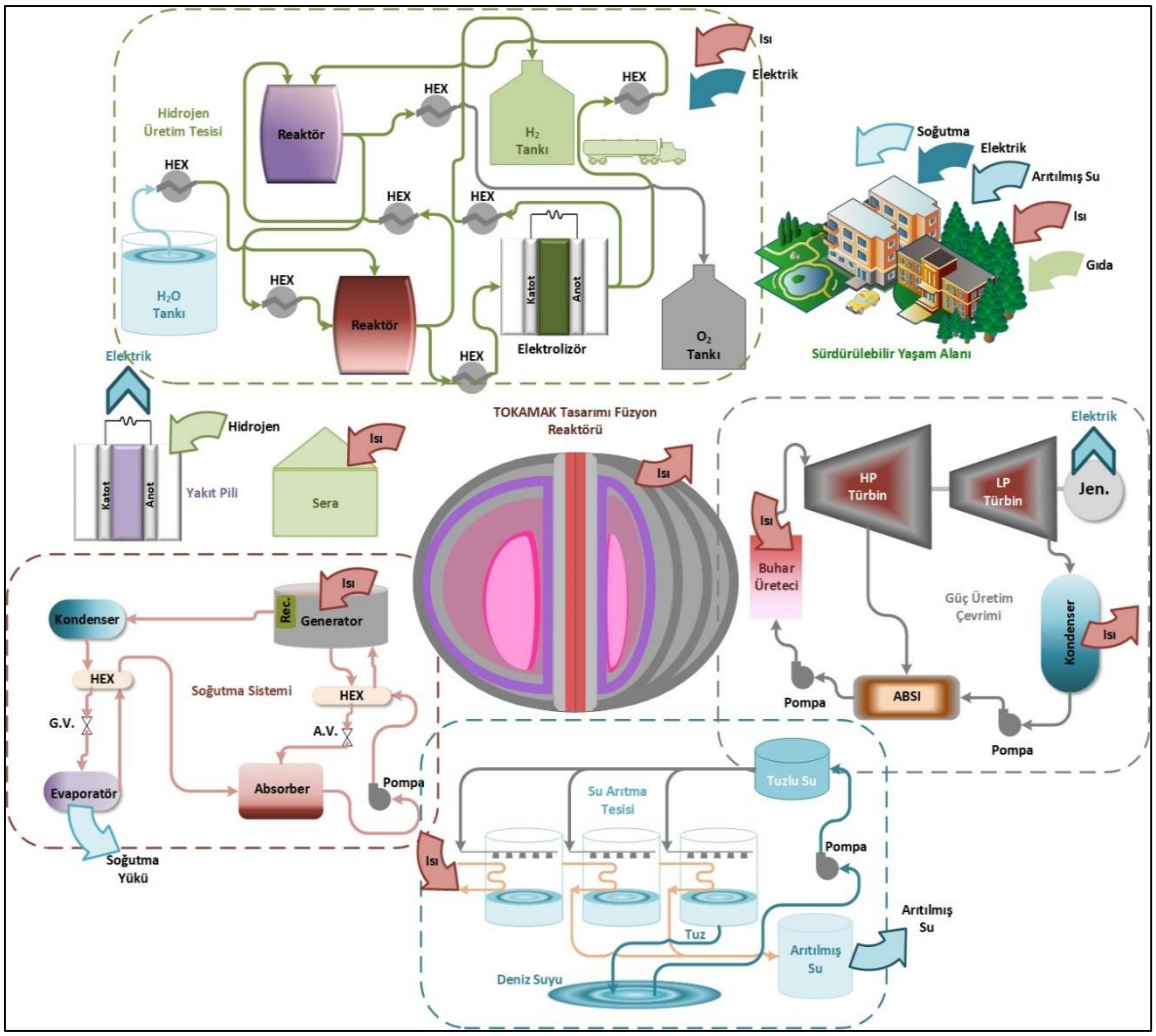
3.4. Literatürdeki Boşluk ve Tezin Literatüre Katkısı

ARC füzyon reaktörü ve üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimleri açık literatürde araştırmacılar tarafından çalışılmıştır. ARC füzyon reaktörü, yeni bir tokamak reaktör fikri olarak ortaya atılmış, farklı nötronik analizler yürütülmüş, reaktör için uygun malzeme seçimi, uygun soğutucu seçimi, termodinamik çevrim belirlenmesi ve kaza analizleri gibi birçok çalışmaya konu olmuştur. Bu tez kapsamında ARC füzyon reaktörü literatürden farklı olarak, farklı malzeme kullanımları ile modifiye edilmiş, eriyik tuz yakıt reaktörde ilk defa kullanılarak nötronik analizler gerçekleştirilmiş, reaktör bir hibrit reaktör olarak modellenmiş ve reaktöre özgü bir termodinamik çevrim her bir adımının sıcaklık, basınç, entalpi, entropi ve ekserji gibi termofiziksel özellikleri belirlenerek tasarlanmıştır. Reaktör ilk kez hidrojen üretim çevrimleri ile entegre edilmiş ve entegre sistemlerin hidrojen üretim kapasiteleri tartışılmıştır.

Üç-adımlı ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimler literatürde birçok kez çalışılmış, optimizasyonları yapılmış ve analizler yürütülmüştür. Bu tez kapsamında, hidrojen üretim çevrimleri bir füzyon reaktörü ile entegre edilmiş, iki farklı metot (Aspen Plus simülasyon programı ve Shomate ısı kapasitesi denklemi) kullanımı ile hidrojen üretim çevrimi simülasyonları doğrulanmıştır.

Açık literatürden farklı olarak bu tezde, gelecekte kullanımı planlanan sınırsız enerji potansiyeline sahip, birçok ülkenin üzerine yol haritaları belirlediği füzyon enerjisinin insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanımını baz alınarak, sistem entegrasyonları

gerçekleştirilmiş, nötronik parametrelerin değişiminin yararlı çıktılara etkisi incelenmiş, ayrıca emisyonların düşürülmesinde umut vadedici olan, temiz hidrojen üretimi sağlanmıştır. Şekil 3.1'de füzyon enerjisinin insanoğlu yararına temel kullanımı için örnek bir entegre enerji sistemi verilmiştir.

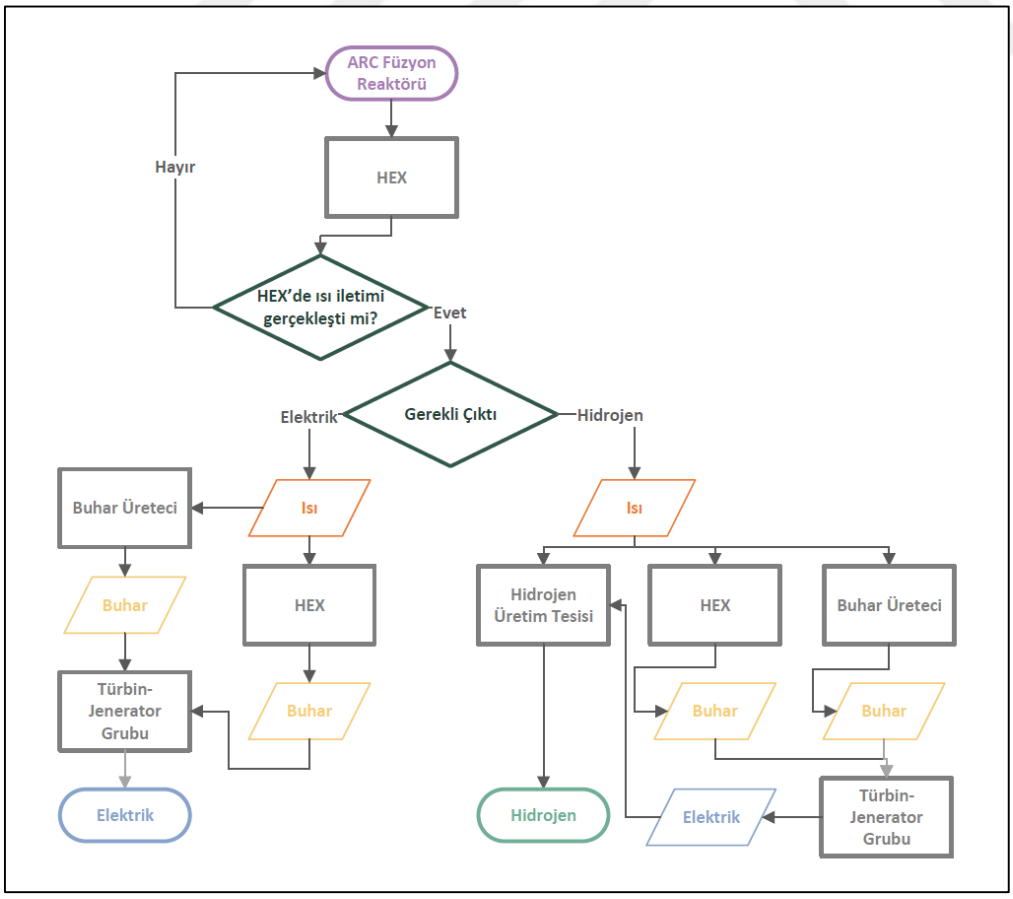


Şekil 3.1. Füzyon bazlı sürdürülebilir enerji sistemi örneği

4. SİSTEM TASARIMI

Bu tez kapsamında, kaynak olarak nükleer füzyon, alt sistemler olarak açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi, üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimi kullanılmış, sistem ürünü olarak elektrik ve hidrojen üretimi incelenmiştir. Sistem tasarımı yapılırken, alt sistemler tek tek incelenmiş; ARC füzyon reaktörü modifiye edilmiş ve optimum tasarım parametreleri belirlenmiş; açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi ARC füzyon reaktörü termal enerji ve elektriksel güç çıktısına, soğutucu giriş çıkış sıcaklıklarına göre tasarlanmış; hidrojen üretim çevrimleri farklı parametreler altında incelenmiştir. Sistem tasarımında, modüler yapıdaki ARC füzyon reaktörü uygun fiyatlı olması, karmaşıklığı azaltmayı amaçlaması gibi avantajları sebebiyle seçilirken, belirlenen hidrojen üretim yöntemlerinin yüksek verimlilikleri dikkate alınmıştır.

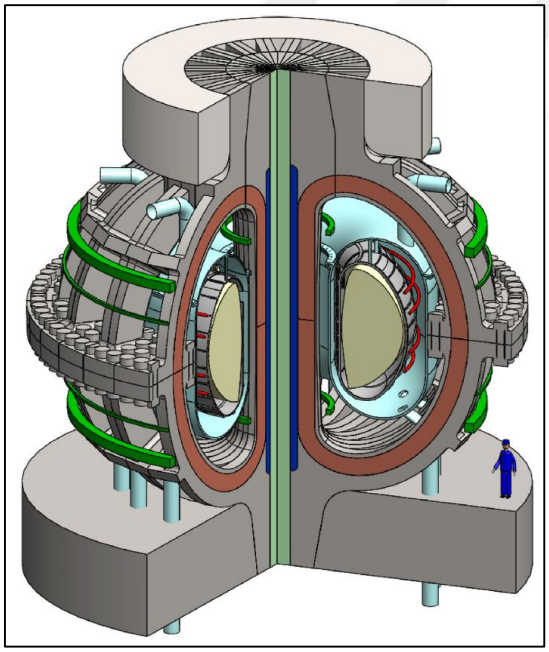
Tezin bu bölümünde, entegre sistemin her bir alt sisteminin tasarımı sunulmuştur. Şekil 4.1 entegre sistemlerin çalışma algoritmasının basit bir halini vermektedir.



Şekil 4.1. Entegre sistem algoritması

4.1. ARC Füzyon Reaktörü Tasarımı

Uygun fiyatlı, sağlam, kompakt (Affordable Robust Compact-ARC) reaktörü, MIT araştırmacıları tarafından modellenmiş bir tokamak reaktörüdür [95]. Reaktörün tasarlanmasında amaç Füzyon Nükleer Bilim Tesisi (FNSF) ve Pilot füzyon enerji tesisinin boyutunu küçültmek, maliyetini azaltmak ve karmaşıklığı basitleştirmektir. ARC füzyon reaktörü modüler yapısıyla, umut vadeden nükleer malzemelerin ve vakum kabı konfigürasyonlarının denenmesine olanak sağlar. Böylece, denenen malzemelerin başarısız olması maliyet ve işletim etkilerini azaltacağı gibi, daha yenilikçi tasarımların da önü açılmış olur [21]. ARC füzyon reaktörünün en yenilikçi özelliklerinden birisi yük takip edebilen bir güç santrali olmasıdır. Bu özellik ile ARC füzyon reaktörü sadece temel yük sağlayan bir sistem olmaktan çıkmakta ve aynı zamanda dalgalı bir üretim potansiyeline sahip olan yenilenebilir enerji kaynaklarını dengeleyebilecek bir enerji kaynağıdır [93]. (Şekil 4.2). ARC füzyon reaktörünün orijinal tasarımının görüntüsünü sunmaktadır.



Şekil 4.2. ARC füzyon reaktörün orijinal tasarım görüntüsü [131]

ARC füzyon reaktörü yüksek sıcaklıklı süperiletkenler kullanmaktadır ve böylece reaktör merkez ekseninde güçlü manyetik alanlar elde edilebilmektedir. Bu durum reaktörün boyutunun küçültülmesinde önemli şekilde olanak sağlamaktadır [21]. Orijinal ARC füzyon

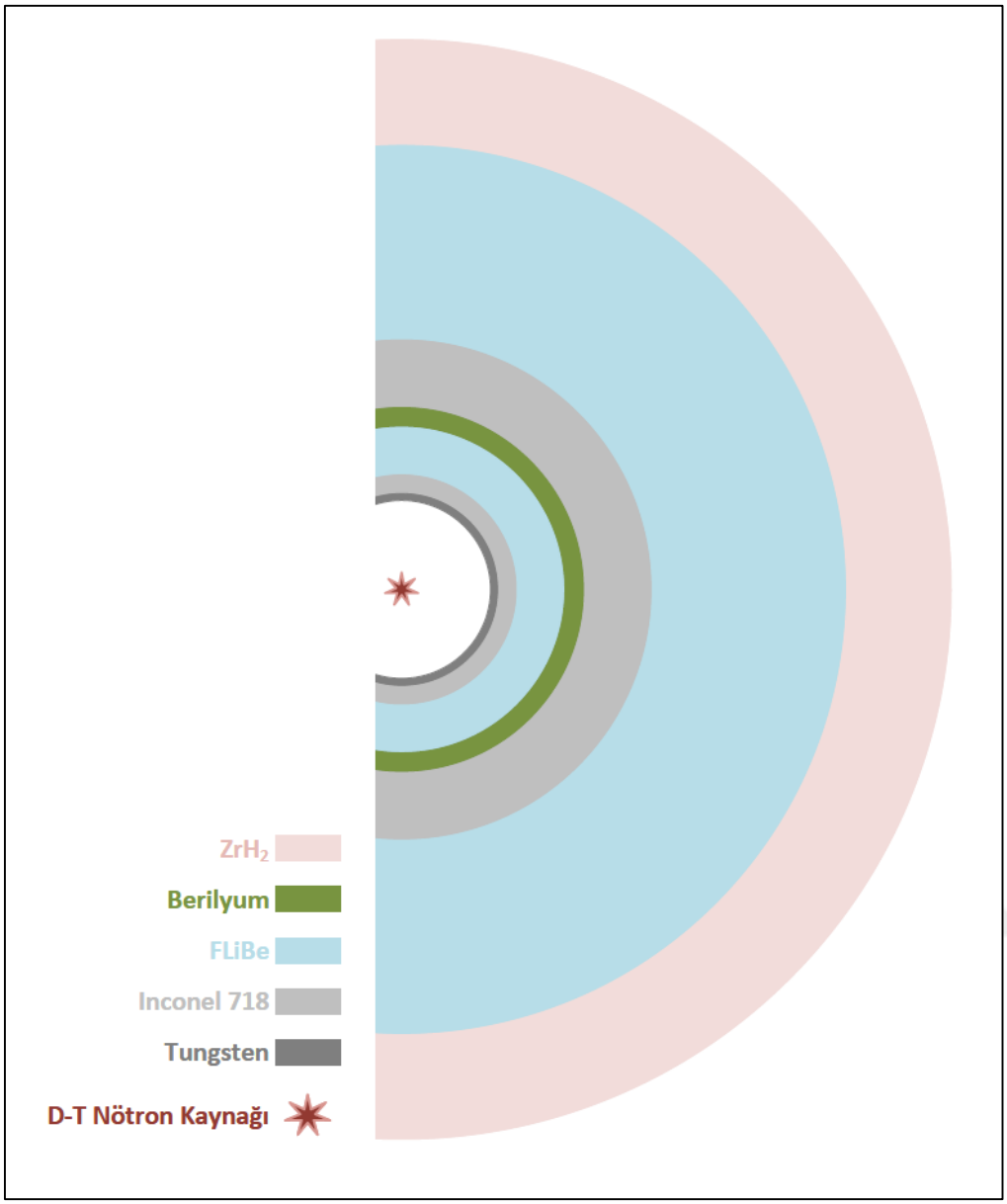
reaktörü, ITER tasarımında olduğu gibi, yaklaşık olarak 500 MW füzyon gücü üretir, fakat ARC füzyon reaktörü hacmi ITER'in 1/8'i kadardır [42].

ARC füzyon reaktörü 525 MW füzyon gücüne sahiptir ve reaktörün füzyon kazancı 13,6'dır [42]. Reaktörün yaklaşık %40 enerji verimli termodinamik çevrimi [21] ile 252 MW elektrik enerjisi üretimi vardır. Ayrıca, ARC füzyon gücüne bağlı olarak nötron üretim oranı saniyede 1,86E+20 nötron olarak hesaplanmıştır [95]. (Çizelge 4.1). orijinal ARC füzyon reaktörü tasarımına ait parametreleri vermektedir.

Çizelge 4.1. ARC füzyon reaktörü orijinal tasarımı parametreleri [21,42,95]

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Füzyon Gücü	P_f	525	MW
Füzyon Kazancı	Q	13,6	-
Termal Enerji	P_{th}	630	MW
Elektriksel Güç	P_{el}	252	MW
Elektrik Üretim Verimi	η_{el}	0,40	-
FLiBe Çıkış Sıcaklığı	T_{out}	900	K
Trityum Üretim Oranı	TBR	1,07	-

ARC füzyon reaktörü REBCO süperiletkenleri, demonte edilebilir bir toroidal alan ve tamamen sıvı haldeki FLiBe soğutucu ile birçok avantaj sunmaktadır. FLiBe soğutucu nötron zırhlaması yaparken aynı zamanda hem elektrik üretimi için termodinamik sisteme ısı sağlamakta hem de reaktör çekirdeğinde füzyon reaksiyonunda kullanılmak üzere trityum üretimine destek olmaktadır [21]. ARC füzyon reaktörü orijinal tasarımı çekirdekten dışarı doğru, D-T füzyon kaynağı, 1 mm tungsten ilk duvar, yapı malzemesi olarak 1 cm Inconel 718 duvar, ardından 2 cm kalınlığında FLiBe soğutucu, nötron çoğaltıcı olarak 1 cm berilyum, 3 cm Inconel 718, yaklaşık 1 m kalınlığında FLiBe soğutucu ve en dışta 25 cm zirkonyum hidrit (ZrH_2)'den oluşmaktadır [95,132]. Şekil 4.3'te orijinal tasarım geometrisi verilmiştir.



Şekil 4.3. ARC füzyon reaktörü orijinal tasarımı [95,132])

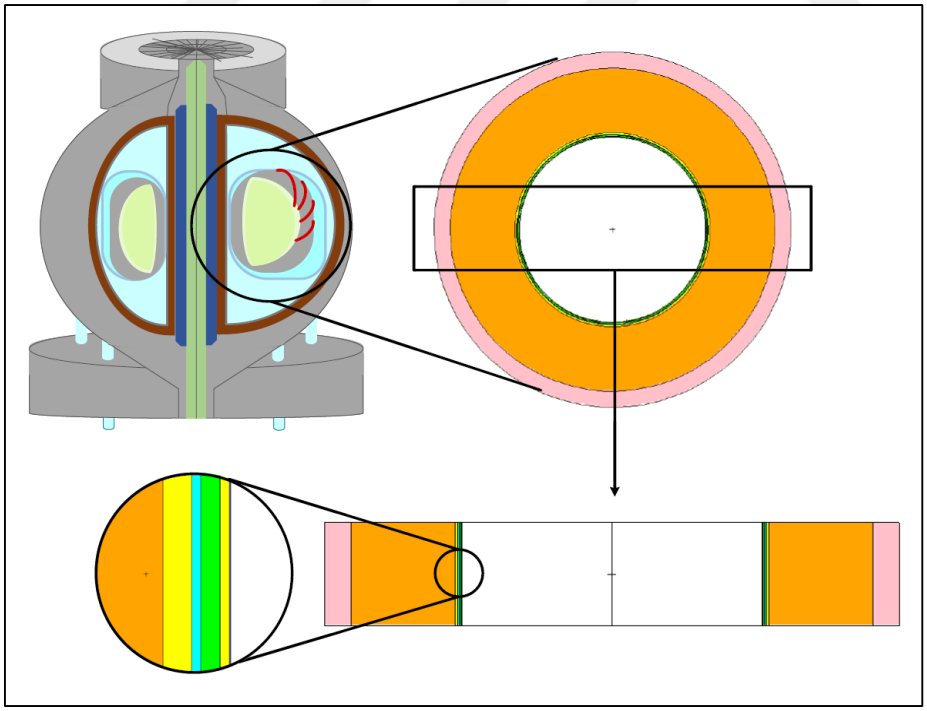
Ek olarak, (Çizelge 4.2). orijinal tasarımdaki her bir malzemenin fiziksel yoğunluk, içerilen atom ve atomik yoğunluk verilerini sunmaktadır. MCNP modellemesinde ilgili veriler kullanılmıştır. MCNP modelinde ARC füzyon reaktörü 100 cm yüksekliğe sahip bir silindir [95] olarak modellenmiştir. Hücre, yüzey ve veri kartları tanımlanmış, fisyon ve trityum üretimi için reaksiyon miktarları hesabı kodlamaları yapılmıştır. Koddan istenen cevapları (tally) belirlerken hücredeki ortalama akış dikkate alınacak şekilde modelleme yapılmıştır (f4). Son olarak *D-T* kaynağı koda işlenmiş ve saniye başına 100 000 nötron akışı belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Orijinal tasarımda kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme	Fiziksel Yoğunluk (g/cm^3)	Atom	Atomik Yoğunluk (atom/barn cm)
Berilyum	1,85	Be	1,23639E-01
Tungsten	19,25	W	6,30672E-02
Inconnel 718	8,19	^{58}Ni	2,99422E-02
		^{60}Ni	1,15336E-02
		^{61}Ni	5,01405E-04
		^{62}Ni	1,59878E-03
		^{64}Ni	4,07282E-04
		^{50}Cr	6,87259E-04
		^{52}Cr	1,32531E-02
		^{53}Cr	1,50280E-03
		^{54}Cr	3,74078E-04
		^{54}Fe	8,81131E-04
		^{56}Fe	1,38194E-02
		^{57}Fe	3,19316E-04
		^{58}Fe	4,21738E-05
		Nb	4,21572E-03
		Mo	2,52279E-03
		Ti	7,71775E-04
		Al	4,31530E-04
		Co	9,12853E-05
		C	1,74272E-05
		^{63}Cu	1,14770E-05
		^{65}Cu	5,12027E-06
FLiBe	1,98	^{6}Li	1,80889E-03
		^{7}Li	2,23097E-02
		F	4,82371E-02
		Be	1,20635E-02
Zirkonyum Hidrit	5,60	^{90}Zr	1,86056E-02
		^{91}Zr	4,05743E-03
		^{92}Zr	6,20186E-03
		^{94}Zr	6,28503E-03
		^{96}Zr	1,01255E-03
		H	7,34207E-02

MCNP nükleer kodu aracılığıyla modellenen reaktör geometrisi Şekil 4.4'te verilmiştir. Reaktörde farklı modifikasyonlar yapılmış ve nötronik sonuçları karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında ARC füzyon reaktöründe yapılan modifikasyonlar aşağıda sıralanmıştır:

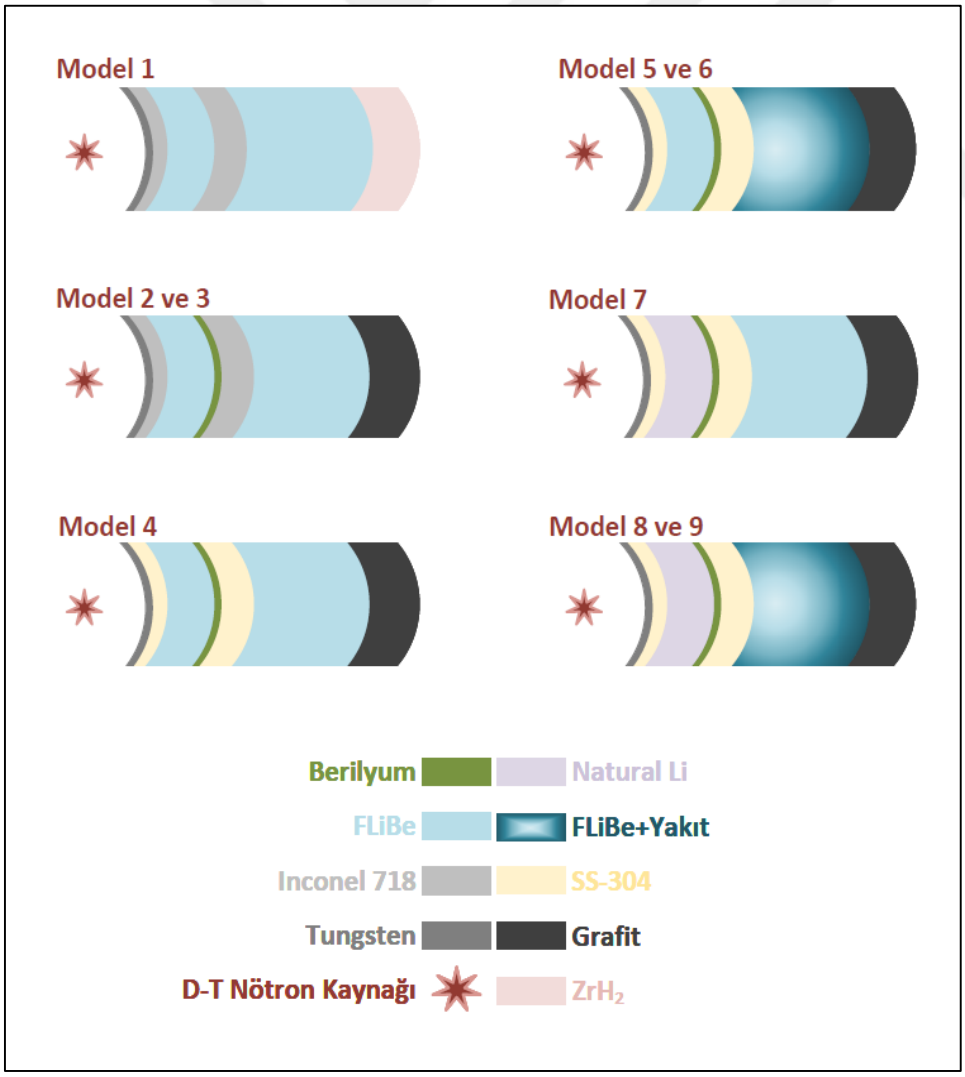
- Model 1: Berilyumun etkisi
- Model 2: Nötron yansıtıcı grafit kullanımının etkisi
- Model 3: Grafit tabaka kalınlığının etkisi
- Model 4: Yapı malzemesi olarak paslanmaz çelik SS-304 kullanımının etkisi
- Model 5: Reaktörün soğutucu katmanında eriyik tuz yakıt kullanımı etkisi (ThF_4)
- Model 6: Reaktörün soğutucu katmanında eriyik tuz yakıt kullanımı etkisi (UF_4)
- Model 7: Reaktörün soğutucu katmanında natural lityum kullanımının etkisi
- Model 8: Natural lityum kullanılan reaktörde soğutucu katmanında eriyik tuz yakıt kullanımı etkisi (ThF_4)
- Model 9: Natural lityum kullanılan reaktörde soğutucu katmanında eriyik tuz yakıt kullanımı etkisi (UF_4)



Şekil 4.4. ARC füzyon reaktörünün MCNP kodunda modellenen geometrisi

Model 1'de berilyum nötron çoğaltıcı katman kaldırılmış ve TBR'ye etkisi incelenmiştir. Model 2'de ise orijinal reaktörde absorban olarak kullanılan zirkonyum hidrit yapısı

kaldırılmış ve yerine grafit eklenmiş ve Model 3'te eklenen grafit yansıtıcının farklı kalınlıklarda nötronik sonuçlara olan etkisi araştırılmıştır. Model 4'te reaktörün yapı malzemesi Inconel 718 yerine paslanmaz çelik SS-304 etkisi incelenmiştir. Model 5 ve 6'da farklı eriyik tuz yakıtları (ThF_4 ve UF_4) FLiBe soğutucuya eklenerek reaktör füzyon-fisyon hibrit bir reaktöre dönüştürülmüş, eriyik tuz yakıt eklenmesinin reaktöre etkisi incelenmiştir. Eriyik tuzlar %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 hacimsel oranlarında FLiBe soğutucu katmana eklenmiştir. Model 7'de reaktörün ilk FLiBe katmanı natural lityum ile değiştirilmiş, soğutucu değişiminin reaktör performansına etkisi analiz edilmiştir. Model 8 ve 9'da ise natural lityum kullanılan modellemede eriyik tuzların etkisi araştırılmıştır. (Şekil 4.5), bu tez kapsamında ARC füzyon reaktöründe yapılan modifikasyonların bir görselini sunmaktadır. Ayrıca yapılan modifikasyonlarda kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 4.3'te sunulmuş ve MCNP modellerinde kullanılmışlardır.



Şekil 4.5. ARC füzyon reaktöründe yapılan modifikasyonlar için kesit görüntüleri

Çizelge 4.3. Modifiye edilen tasarımlarda kullanılan malzemeler ve özellikleri

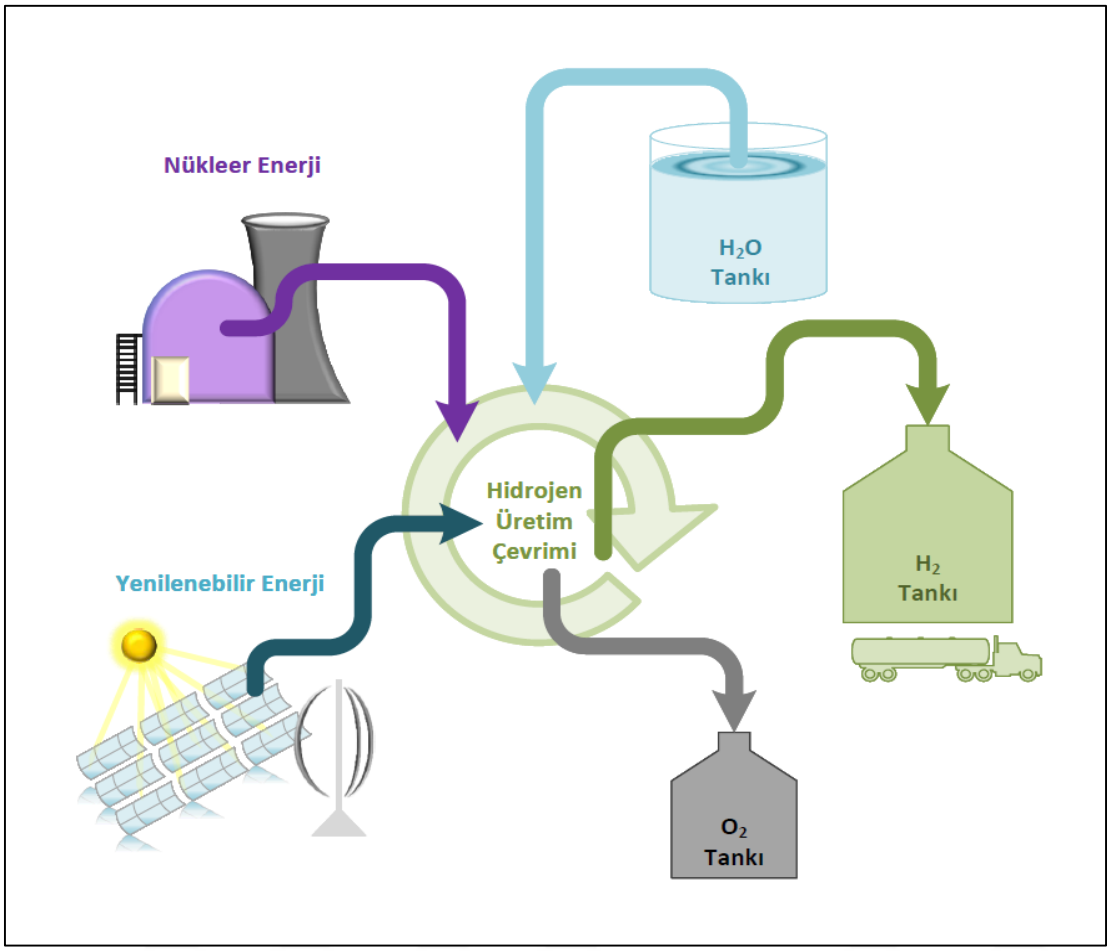
Malzeme	Fiziksel Yoğunluk (g/cm^3)	Atom	Atomik Yoğunluk (atom/barn cm)
Berilyum	1,85	Be	1,23639E-01
Tungsten	19,25	W	6,30672E-02
SS-304	7,93	Fe	5,82626E-02
		Cr	1,72770E-02
		Ni	8,05460E-03
		Si	6,73380E-04
		C	7,87287E-04
FLiBe	1,98	^{6}Li	1,80889E-03
		^{7}Li	2,23097E-02
		F	4,82371E-02
		Be	1,20635E-02
Natural Lityum	0,53	^{6}Li	3,47531E-03
		^{7}Li	4,28621E-02
UF_4	6,70	^{235}U	9,25765E-05
		^{238}U	1,27574E-02
		F	5,14028E-02
ThF_4	6,12	Th	1,19665E-02
		F	4,78662E-02
Grafit	2,26	C	1,15324E-01

4.2. Hidrojen Üretim Çevrimlerinin Tasarımı

Bu tez kapsamında, iki farklı hidrojen üretim metodu analiz edilmiş ve nükleer enerji sürücülü entegre sistemlerde kullanılmıştır. Seçilen hidrojen üretim metotları birer su ayrıştırma metodudur. Çevrimler birer kapalı çevrimdir yani ne kadar reaksiyon içerirlerse içersin tüm kimyasal bileşikler sistem içerisinde kalır. Bir reaksiyonun ürünü çevrim içindeki diğer bir reaksiyonun reaktantıdır. Bu sayede tüm kimyasallar sistem içerisinde kalır. Çevrimlerin net reaksiyonu suyun ayrışma reaksiyonudur, Eşitlik (4.1), çevrime dışarıdan sadece H_2O girer ve ürün olarak O_2 ve H_2 çıkar.

$$H_2O \rightarrow H_2 + 0{,}5O_2 \tag{4.1}$$

Kullanılan çevrimler hem ısı hem de elektrik ihtiyacı duyan çevrimlerdir. Gerekli termal enerji ve elektriksel güç nükleer reaktörden ve nükleer reaktörün termodinamik çevrimi olan Rankine çevriminden elde edilir. Şekil 4.6 sunulan hidrojen üretim çevrimlerinin temel çalışma prensibinin şemasını göstermektedir.



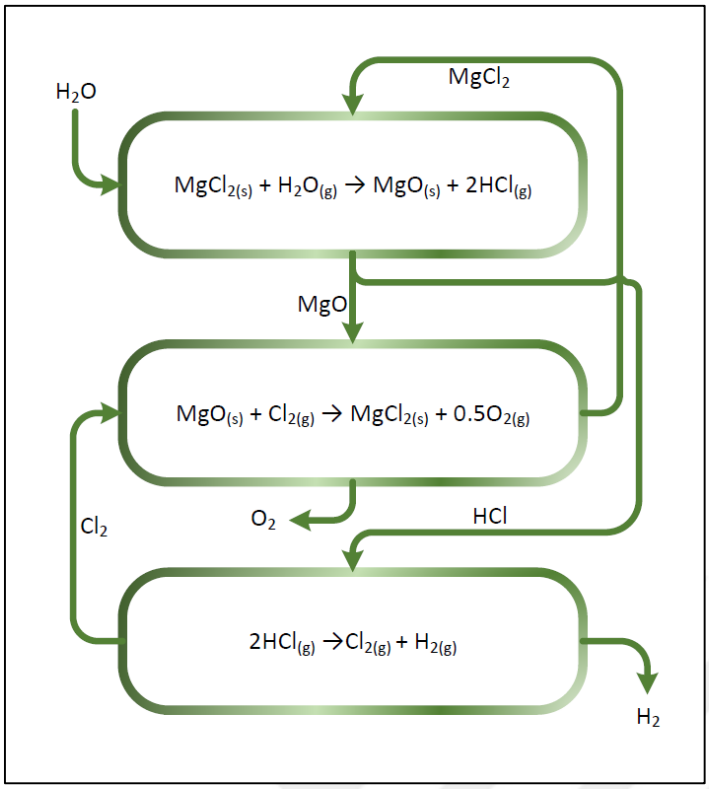
Şekil 4.6. Termokimyasal hidrojen üretim çevrimlerinin temel çalışma prensibi şematik gösterimi

Bu tez kapsamında yüksek verimliliklere sahip iki farklı hidrojen üretim çevrimi seçilmiş ve simülasyon ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

- Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi
- Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi

4.2.1. Üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi tasarımı

Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi üç farklı reaksiyondan oluşmaktadır. Reaksiyonlardan iki tane termokimyasal reaksiyon iken, bir reaksiyon elektrokimyasal bir reaksiyondur. Termokimyasal reaksiyonlar hidroliz ve klorlama reaksiyonları iken, çevrim bir de elektroliz reaksiyonu içermektedir. Üç-adımlı Mg-Cl çevriminin reaksiyonları Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin reaksiyonları ve bileşik akış şeması

Çevrimin ilk reaksiyonu Eşitlik (4.2) ile ifade edilen hidroliz reaksiyonudur. Endotermik bir reaksiyon olan hidroliz reaksiyonu 450-550°C sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Bu tez kapsamında 550°C reaksiyon sıcaklığı olarak alınmıştır. Isı değiştirici aracılığı ile sıcaklığı 550°C'ye yükseltilen katı fazdaki $MgCl_2$ hidroliz reaktörüne gönderilir. Katı fazdaki $MgCl_2$'nin üzerine yine 550°C sıcaklığa ulaştırılan buhar gönderilir. 550°C sıcaklık ve 1 bar basınçta reaksiyon kaynaktan ısı alarak gerçekleşmektedir. Gerçekleşen hidroliz reaksiyonu sonucunda katı fazda MgO ve gaz fazda HCl meydana gelir. Katı fazdaki MgO ikinci reaksiyonda kullanılmak üzere önce bir ısı değiştiriciye ardından ise ikinci reaktöre gönderilirken, gaz fazdaki HCl sırayla ısı değiştirici ve elektroliz hücresine gönderilmektedir.

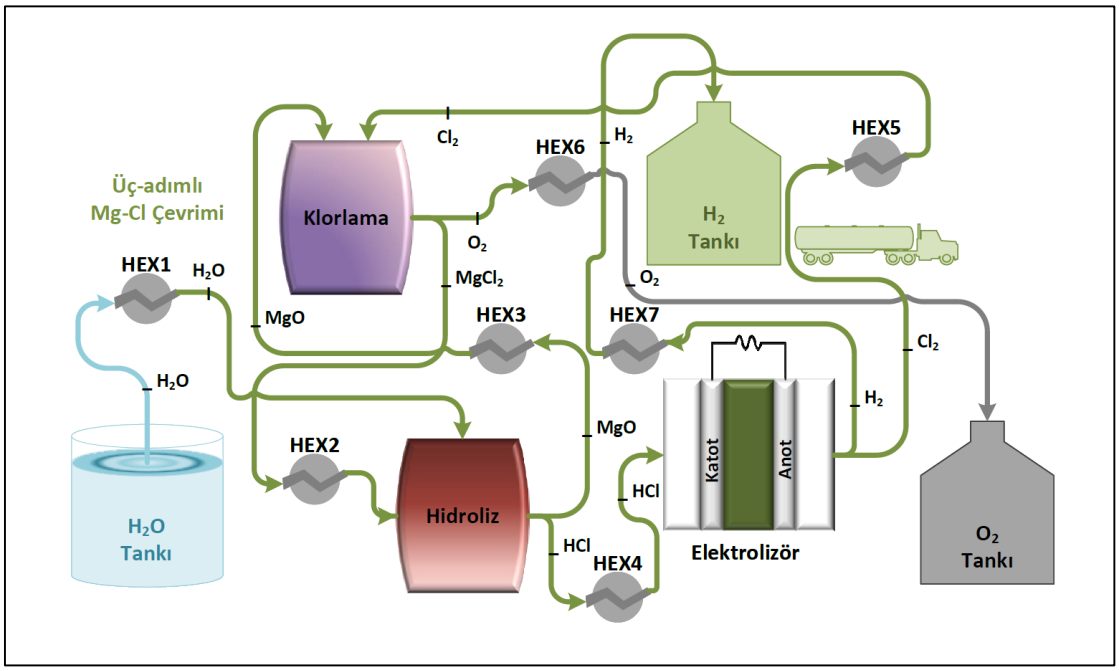
$$MgCl_{2\,(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow MgO_{(s)} + 2\,HCl_{(g)} \tag{4.2}$$

$$MgO_{(s)} + Cl_{2\,(g)} \rightarrow MgCl_{2\,(s)} + 0.5\,O_{2\,(g)} \tag{4.3}$$

$$2\,HCl_{(g)} \rightarrow Cl_{2\,(g)} + H_{2\,(g)} \tag{4.4}$$

İkinci reaksiyon Eşitlik (4.3) ile verilmiştir ve klorlama reaksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Klorlama reaksiyonu 450-500°C sıcaklık aralığında ve atmosferik basınç altında ekzotermik olarak gerçekleşmektedir. Tez kapsamında analizler klorlama reaksiyonu için 500°C sıcaklık altında gerçekleştirilmiştir. Birinci reaksiyon sonucunda reaktant olarak reaktörden çıkan katı fazdaki MgO ile elektroliz sonucunda oluşan klor gazı klorlama reaktöründe gerekli sıcaklık ve basınç altında reaksiyona girerek, katı fazdaki $MgCl_2$ ve gaz fazdaki oksijeni oluşturur. Katı fazdaki $MgCl_2$ tekrar reaktant olarak kullanılmak üzere önce ısı değiştirici ve ardından ilk reaktöre gönderilirken, oksijen çevrimin nihai ürünlerinden biri olarak depolanmak üzere, ısı değiştiricide sıcaklığı çevre şartlarına getirilerek, depolama tankına gönderilir.

Son reaksiyon olan elektroliz reaksiyonu 70-90°C aralığında atmosferik basınç altında gerçekleşmektedir. Eşitlik (4.4) HCl'in elektrolizi reaksiyonunu vermektedir. Elektroliz hücresi için tez kapsamında analizler 90°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Elektroliz reaksiyonunda, nükleer reaktörün termodinamik çevrimi aracılığı ile üretilen elektriksel güç kullanılarak gaz fazdaki HCl'in Cl_2 ve H_2'e ayrışması gözlemlenir. Klor gazı tekrar kullanılmak üzere ikinci reaksiyona iletilirken, H_2 nihai ürün olarak elde edilmektedir. Elektroliz hücresinde standart hücre potansiyeli, E^0, 5 kA/m^2 akım yoğunluğunda -1,4 V olarak kabul edilmiştir [91].

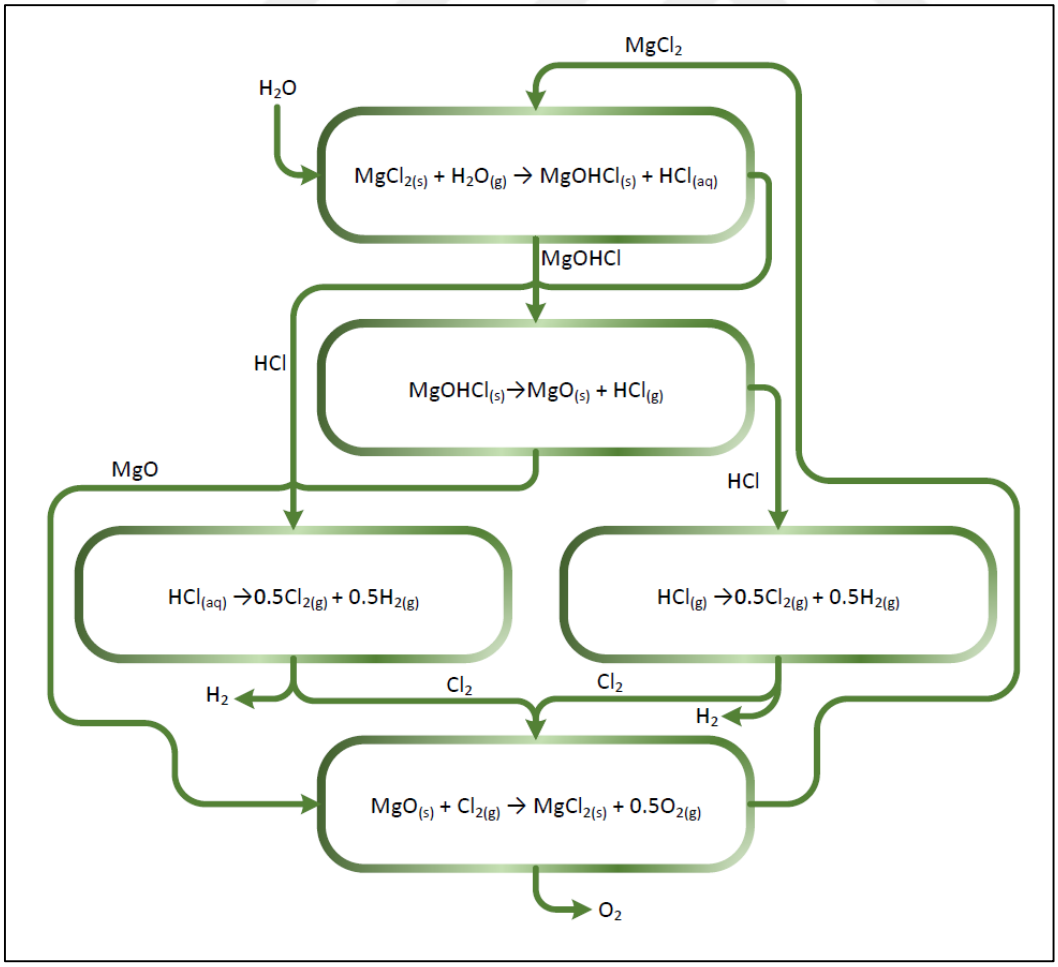


Şekil 4.8. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi akış şeması

Şekil 4.8 çevrimin akış şemasını sunmaktadır. Akış şeması çevrimin net reaksiyonunun girdi ve çıktıları olan su, oksijen ve hidrojen için depolama tankları, her bir bileşiği ilgili reaktörde ilgili sıcaklığa ulaştırmak amacı ile ısı değiştiriciler, reaktörler ve akış hatlarından oluşmaktadır.

4.2.2. Dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi tasarımı

Tez çalışması kapsamında analiz edilen ikinci hidrojen üretim çevrimi dört-adımlı Mg-Cl çevrimidir. Çevrim dört farklı reaksiyon içermektedir, bunlar; hidroliz, ayrışma, elektroliz ve klorlama reaksiyonlarıdır. Çevrim içinde iki farklı elektroliz hücresi bulunmaktadır ve bunlardan birisi gaz fazdaki HCl elektrolizi, diğeri ise sulu çözelti halindeki HCl elektrolizi için kullanılmaktadır. Şekil 4.9'da dört-adımlı Mg-Cl çevrimin reaksiyon akış şeması verilmiştir. Reaksiyonlardan iki tanesi elektrokimyasal iken, üç diğer reaksiyon ise ısı giriş veya çıkışının gerektiği termokimyasal reaksiyonlardır.



Şekil 4.9. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin reaksiyonları ve bileşik akış şeması

Birinci reaksiyon hidroliz reaksiyonu olarak adlandırılır, Eşitlik (4.5). Reaksiyon 280°C sıcaklık ve 1 bar basınç altında ekzotermik olarak gerçekleşmektedir. Katı fazdaki $MgCl_2$ ısı değiştiricide reaksiyonun gerektirdiği sıcaklığa getirildikten sonra hidroliz reaktöründe gönderilir. Aynı zamanda, oda sıcaklığında su ısı değiştiricide kaynaktan ısı çekerek ısıtılır ve 280°C'de buhar elde edilir. Elde edilen buhar hidroliz reaktörüne MgCl2 ile reaksiyona girmek üzere gönderilir. Burada uygun koşullarda reaksiyona giren reaktantlar katı fazda MgOHCl ve sulu çözelti halinde HCl meydana getirir. MgOHCl ısı değiştiricide gerekli sıcaklığa ulaştırıldıktan sonra ikinci reaktöre gönderilirken, sulu çözelti HCl elektroliz hücresine gönderilir.

Çevrimin ikinci reaksiyonu endotermik bir reaksiyondur ve 450°C sıcaklık altında atmosferik basınçta gerçekleşir. Eşitlik (4.6) ile verilen ikinci reaksiyon ayrışma reaksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Hidroliz reaksiyonu sonucunda oluşan katı fazdaki MgOHCl ayrışma reaktöründe 450°C'ye kadar ısıtılarak bünyesindeki HCl'in gaz fazında ayrıştırılır. Reaksiyon sonucunda HCl gaz fazında reaktörden ayrılırken, MgO katı fazda reaktörde kalmaktadır. HCl gerekli sıcaklığa ısı değiştiricisi aracılığıyla düşürüldükten sonra elektroliz hücresine gönderilir. MgO ise çevrimin son adımı olan klorlama reaksiyonunda reaktant olarak kullanılmaktadır.

$$MgCl_{2\,(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow MgOHCl_{(s)} + HCl_{(aq)} \quad (4.5)$$

$$MgOHCl_{(s)} \rightarrow MgO_{(s)} + HCl_{(g)} \quad (4.6)$$

$$HCl_{(aq)} \rightarrow 0.5\ Cl_{2\,(g)} + 0.5\ H_{2\,(g)} \quad (4.7)$$

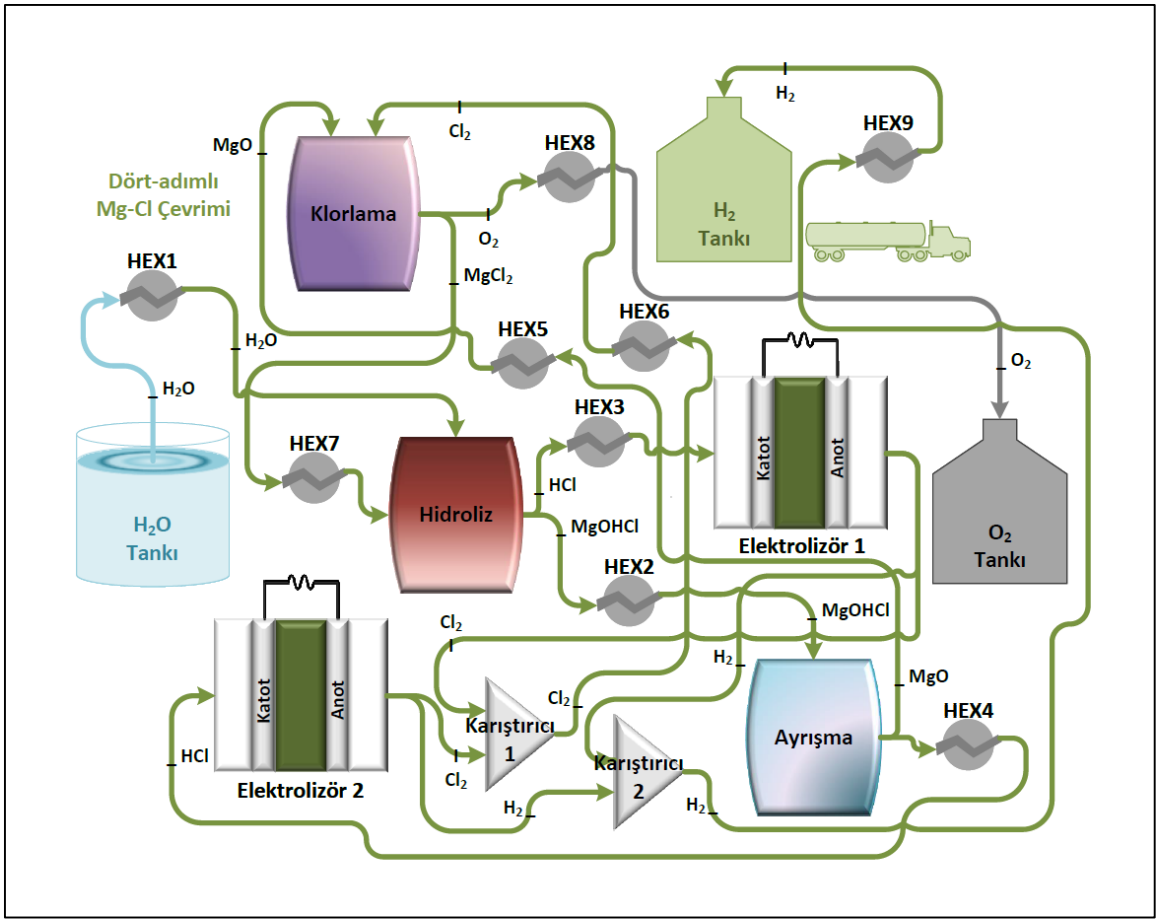
$$HCl_{(g)} \rightarrow 0.5\ Cl_{2\,(g)} + 0.5\ H_{2\,(g)} \quad (4.8)$$

$$MgO_{(s)} + Cl_{2\,(g)} \rightarrow MgCl_{2\,(s)} + 0.5\ O_{2\,(g)} \quad (4.9)$$

Oluşan gaz fazdaki HCl ve sulu çözelti HCl ayrı ayrı elektroliz hücrelerine gönderilir. Burada nükleer reaktörün termodinamik çevriminde elde edilen elektrik ile gaz fazdaki' ve sulu çözelti HCl'ler ayrıştırılır. Elektroliz reaksiyonları 70°C'de gerçekleşmektedir. Reaksiyon sonucunda çevrimin son reaksiyonunda kullanılmak üzere Cl_2 ve nihai ürün

olarak H_2 gazı elde edilir. Sulu çözelti HCl için standart hücre potansiyeli 5 kA/m^2 akım yoğunluğunda -1,8 V iken, gaz fazdaki HCl için bu değer -1,4 V'tur [91].

Dördüncü ve son reaksiyon klorlama reaksiyonu olarak adlandırılan ekzotermik bir reaksiyondur, Eşitlik (4,9). Reaksiyon 500°C sıcaklık ve 1 bar basınç altında gerçekleşmektedir. İkinci reaksiyonda oluşan katı fazdaki MgO ile elektroliz reaksiyonları sonucunda ayrışan klor gazı reaksiyona girer ve çevrim içinde reaktant olarak kullanılmak üzere katı fazdaki $MgCl_2$ ve nihai ürün olarak O_2 meydana gelir. $MgCl_2$ ilk reaksiyonda tekrar kullanılırken, O_2 ısı değiştiricide çevreye ısı vererek depolanmaya hazır hale getirilir.



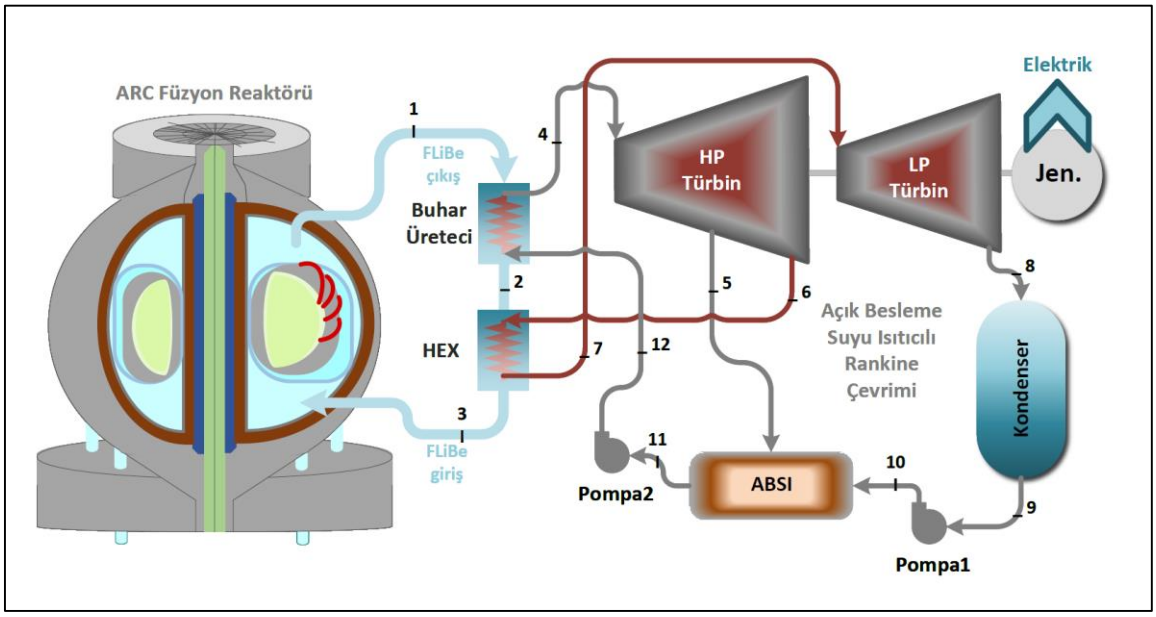
Şekil 4.10. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi akış şeması

Dört-adımlı Mg-Cl çevriminin tüm ekipmanlarının ve akış hatlarının verildiği akış şeması Şekil 4.10'da verilmiştir. Çevrim reaktörler, ısı değiştiriciler ve akış hatlarının yanı sıra üç-adımlı Mg-Cl çevriminden farklı olarak, iki elektroliz hücresi ve karıştırıcılar içermektedir.

4.3. ARC Füzyon Reaktörü Sürücülü Entegre Enerji Sistemlerinin Tasarımı

Tez çalışması kapsamında ARC füzyon reaktörü MCNP nükleer kodu aracılığıyla modellenmiş, hidrojen üretim çevrimleri ise Aspen Plus programı aracılığıyla simüle edilmiş ve analizleri yapılmıştır. İlgili alt sistemlerin, ARC füzyon reaktörü ve hidrojen üretim çevrimleri, entegresi için ilk olarak ARC füzyon reaktörünün termodinamik çevrimi olarak bir Rankine çevrimi modellenmiştir. (Şekil 4.11). ARC füzyon reaktörü sürücülü Rankine çevrimi için akış şemasını sunmaktadır.

Açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi, ARC füzyon reaktörünün literatürde sunulan termal enerji çıktısı ve enerji dönüşüm verimi dikkate alınarak modellenmiştir. Modellemede her bir akış için sıcaklık ve basınç değerleri belirlenmiş, gerekli entalpi, entropi ve ekserji değerleri Engineering Equation Solver (EES) aracılığı ile elde edilmiş ve Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları analizlerinde kullanılmıştır. Açık literatüre bağlı olarak Rankine çevriminin enerji verimi %40 olarak kabul edilmiş [21], füzyon reaktörünün termal enerjisi 630 MW alınmış ve termodinamik çevrimin elektrik üretimi 252 MW [42] olacak şekilde gerekli Rankine çevrimi modellemesi yapılmıştır.

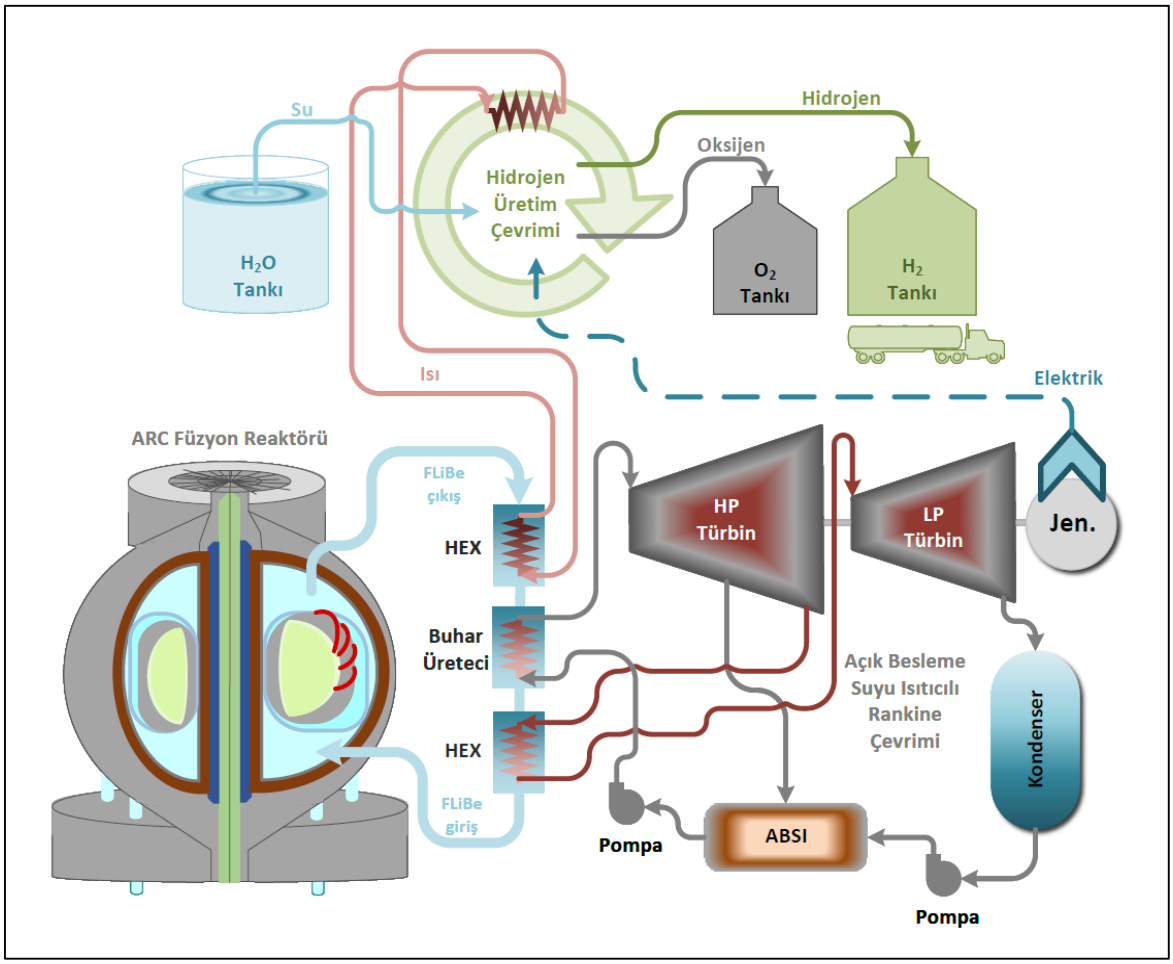


Şekil 4.11. ARC füzyon reaktörü sürücülü Rankine çevrimi akış şeması

ARC füzyon reaktörü sürücülü bir açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi elektrik üretimi için tasarlanmıştır. FLiBe soğutucu reaktörü yaklaşık olarak 627°C'de terk ederken,

100°C bir sıcaklık farkı ile 527°C'de reaktöre geri dönmektedir [21]. Çevrim 76,6 bar yüksek basınç ve 0,035 bar düşük basınç aralığında çalışmaktadır. ARC füzyon reaktörünün soğutucusu reaktör korundan çektiği ısıyı, reaktörden sonra sisteme yerleştirilen buhar üreteci ve paralel akışlı bir ısı değiştirici aracılığıyla Rankine çevriminin termo-akışkanı olan buhara iletir. Buhar, buhar üretecini 525,1°C'de terk ederek, yüksek basınç türbinine girer ve burada türbin kanatlarına çarparak mili döndürür, genişler ve basınç ve sıcaklık düşüşü yaşar. Buharın bir kısmı 313,2°C sıcaklık ve 15,55 bar basınçta direkt olarak açık besleme suyu ısıtıcısına gönderilirken kalan kısım 11,17 bar basınç ve 275,4°C'de yüksek basınç türbininden çıkar. Düşük basınç ve sıcaklıktaki buhar ara ısıtıcı olarak kullanılan ısı değiştiriciye gönderilir. Burada sıcaklığı 275,4°C'den 475,1°C'ye yükseltilir. Alçak basınç türbininde 0,035 bar basınca kadar genişleyen buhar kondensere gönderilir. Burada, akışkanın hal değişimi ile gizli ısı atılır. Pompalar aracılığı ile önce açık besleme suyu ısıtıcısı basıncına daha sonra ise buhar üreteci basıncına sıkıştırılır. Pompaların izantropik verimleri %85 olarak kabul edilmiş ve gerçek akış için termofiziksel özellikler bu verim değerine göre hesaplanmıştır. Buhar çevrimi tamamlarken buhar üretecine 201,6°C sıcaklıkta geri döner.

Şekil 4.12'de ARC füzyon reaktörü sürücülü açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimine hidrojen üretim çevrimi entegrasyonu görülmektedir. ARC füzyon reaktörünün ürettiği ısının bir kısmı direkt olarak hidrojen üretim çevrimine gerekli ısı girdisi olarak iletirken kalan kısım ise hidrojen üretiminde gerekli elektriksel gücün türbin-jeneratör sisteminde üretimi için açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimine gönderilmektedir. ARC füzyon reaktöründe üretilen ısının tamamının hidrojen üretimi için ısı ve elektrik olarak kullanıldığı kabulü ile tüm analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12. ARC füzyon reaktörü sürücülü hidrojen üretimi entegrasyonu genel akış şeması

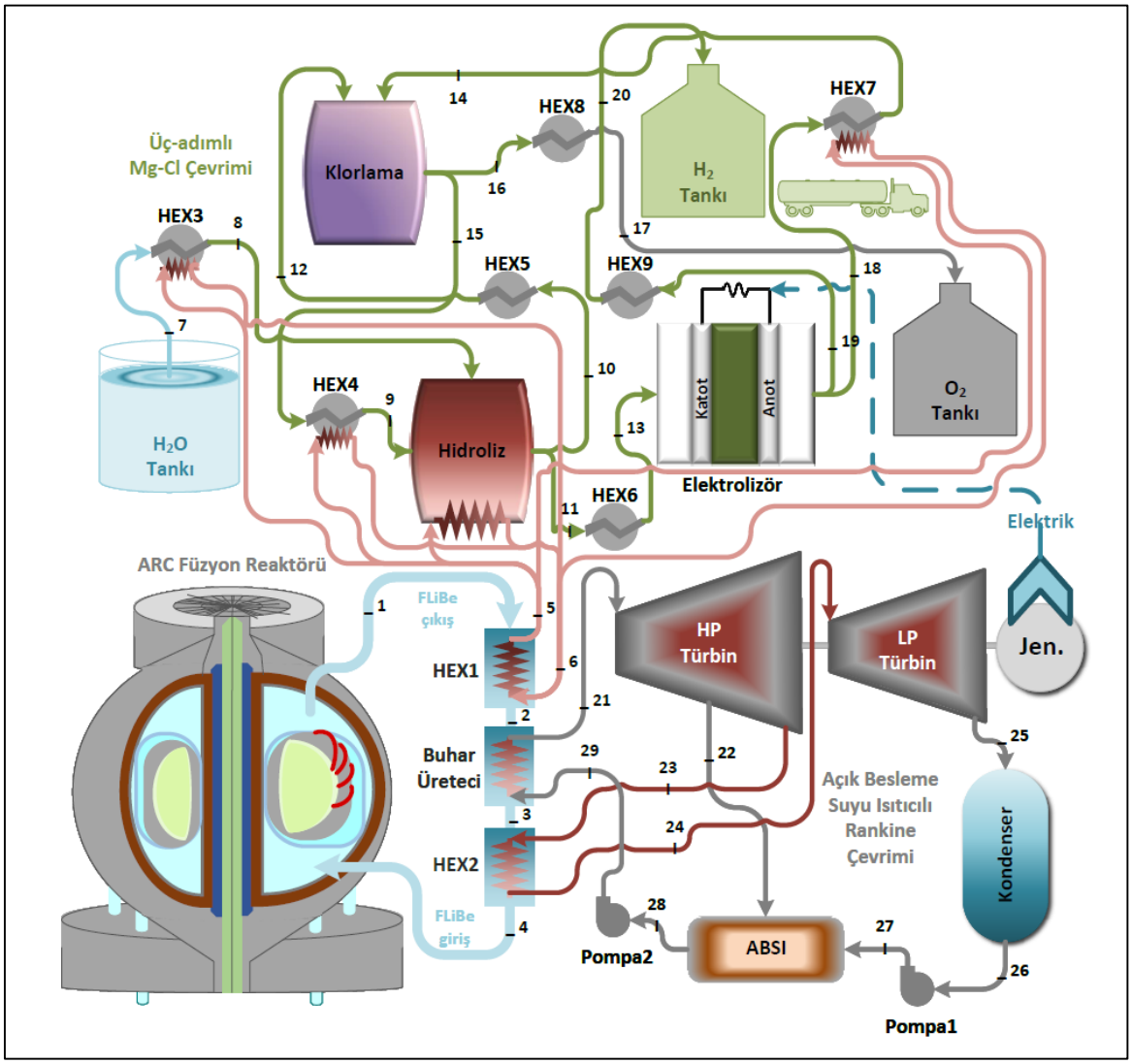
Bu tez kapsamında, Şekil 4.12'de görülen genel akış şemasında hidrojen üretim çevrimi olarak iki farklı çevrimin analizi yapılmıştır. Bölüm 3.3.1 ve 3.3.2'de verilen sisteme üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ve dört-adımlı Mg-Cl çevriminin entegrasyonu detaylı olarak anlatılmıştır.

Son olarak, entegre sistemlerde farklı nötronik parametrelere bağlı olarak modellenen ARC füzyon reaktörü kullanılarak hidrojen üretim potansiyeli incelenmiş ve füzyon reaktörünün nötronik parametrelerinin hidrojen üretim sonuçlarına etkisi araştırılmıştır.

4.3.1. ARC füzyon reaktörü sürücülü üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi

Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ARC füzyon reaktörüne entegre edilmiş ve hidrojen üretimi için gerekli ısı direkt olarak füzyon reaktöründen sağlanırken, gerekli elektriksel güç füzyon

reaktörünün termodinamik çevrimi olan açık beseleme suyu ısıtıcılı Rankine çevriminden karşılanmıştır.



Şekil 4.13. ARC füzyon reaktörü sürücülü üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi akış şeması

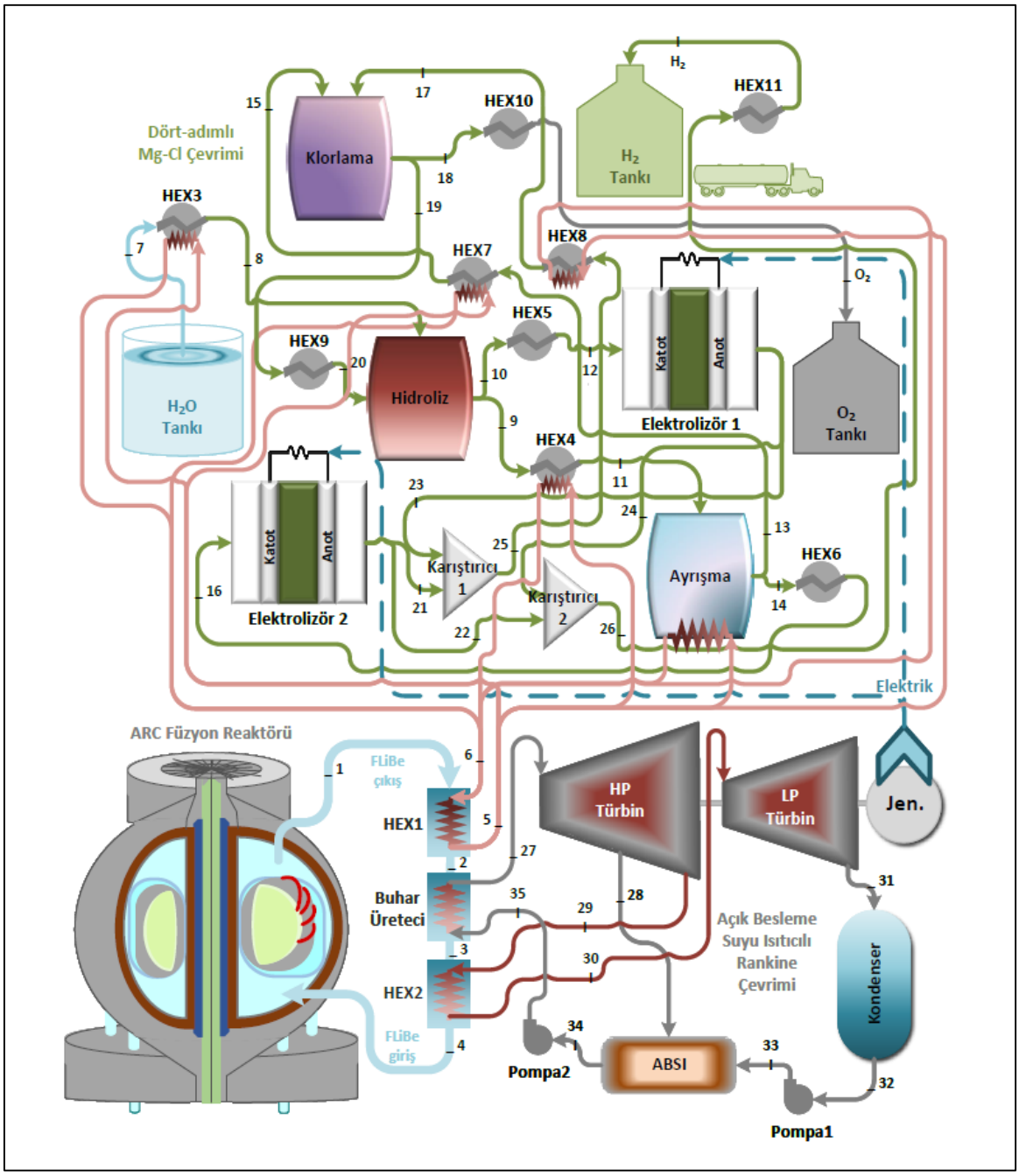
Şekil 4.13'te sunulan ARC füzyon reaktörü sürücülü hidrojen üretimi genel akışında da verildiği gibi ek olarak bir ısı değiştirici daha füzyon reaktörü çıkışına eklenmiş ve hidrojen üretim çevriminde gerekli ısı enerjisi bu ısı değiştirici aracılığıyla ilgili reaktörlere taşınmıştır. Hidrojen üretim tesisi ve ısı değiştirici arasındaki ısı alışverişinde termo-akışkan olarak CO_2 kullanılmıştır. CO_2 birçok avantajı yönünden ön plana çıkan bir ısı taşıyıcısıdır. Suyla karşılaştırıldığında daha düşük viskozite, daha az basınç düşüşü ve daha yüksek debi özellikleri ile öne çıkmaktadır [133]. Ayrıca, ısıyı duyulur ısıdan daha fazla gizli ısı olarak

taşıma kapasitesi [134] ve endüstriyel uygulamalarda halihazırda kullanılıyor olması [135] CO_2'in ısı taşıyıcısı olarak kullanımının avantajlarındandır.

4.3.2. ARC füzyon reaktörü sürücülü dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi

Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi, üç-adımlı Mg-Cl çevrimine benzer olarak ARC füzyon reaktörüne entegre edilmiştir. (Şekil 4.14). ARC füzyon reaktörü sürücülü dört-adımlı Mg-Cl çevriminin akış şemasını vermektedir.

Aynı doğrultuda, ARC füzyon reaktöründen çekilen ısı paralel akışlı ısı değiştiriciler ve buhar üreteci aracılığıyla hem dört-adımlı Mg-Cl çevrimine hem de açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimine iletilir. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin ihtiyacı olan ısı ve elektrik enerjisi ARC füzyon reaktörü aracılığıyla sağlanmış ve gerekli hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir.

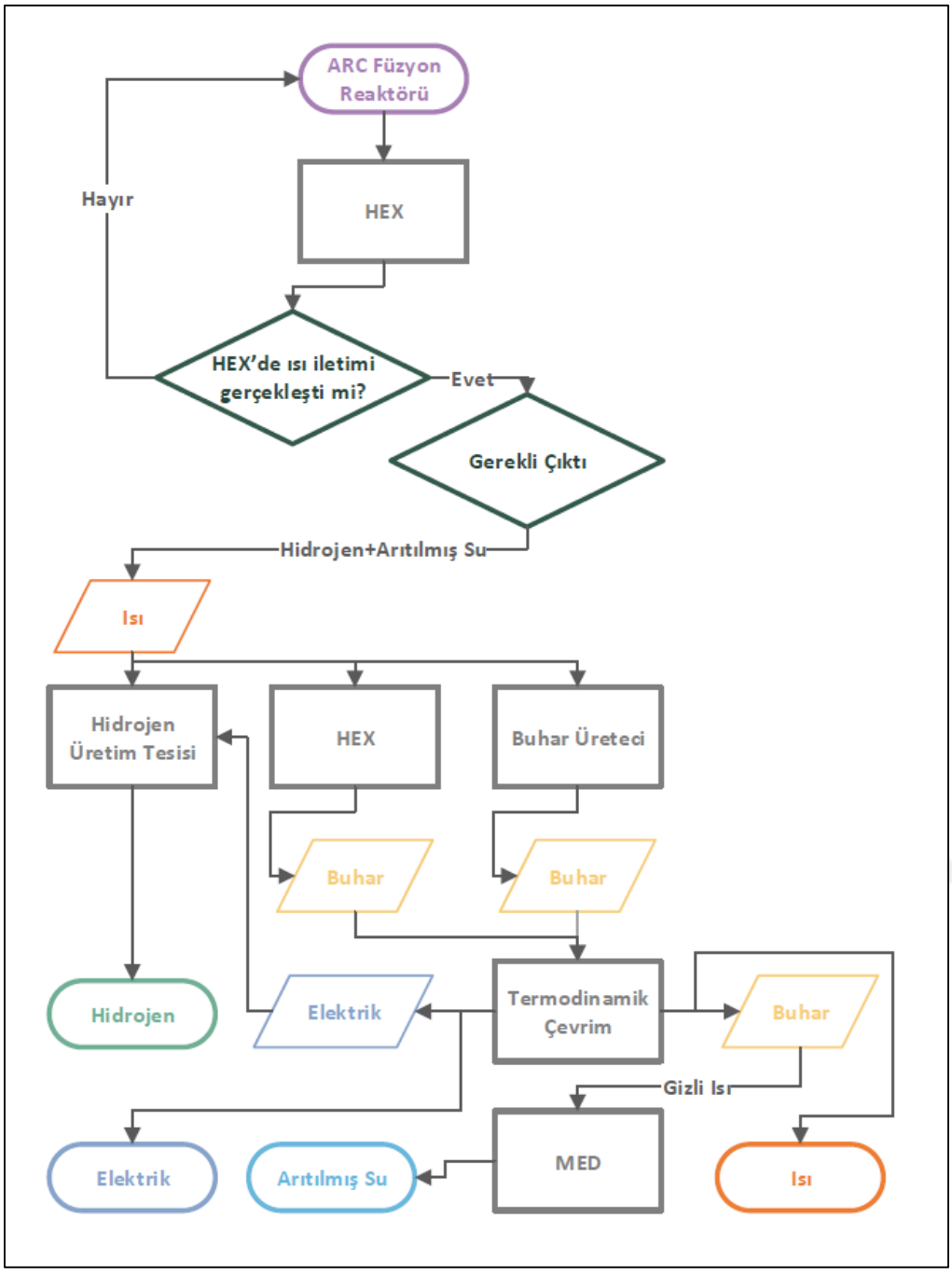


Şekil 4.14. ARC füzyon reaktörü sürücülü dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi akış şeması

Buna ek olarak, hem üç-adımlı Mg-Cl çevrimi kullanılan hem de dört-adımlı Mg-Cl çevrimi kullanılan entegre sistemlerde aynı Rankine çevrimi tasarımı kullanılmıştır. Bu sayede entegre sistemlerin karşılaştırılması daha mantıklı ve doğru açıdan yorumlanabilir sonuçlar verecektir.

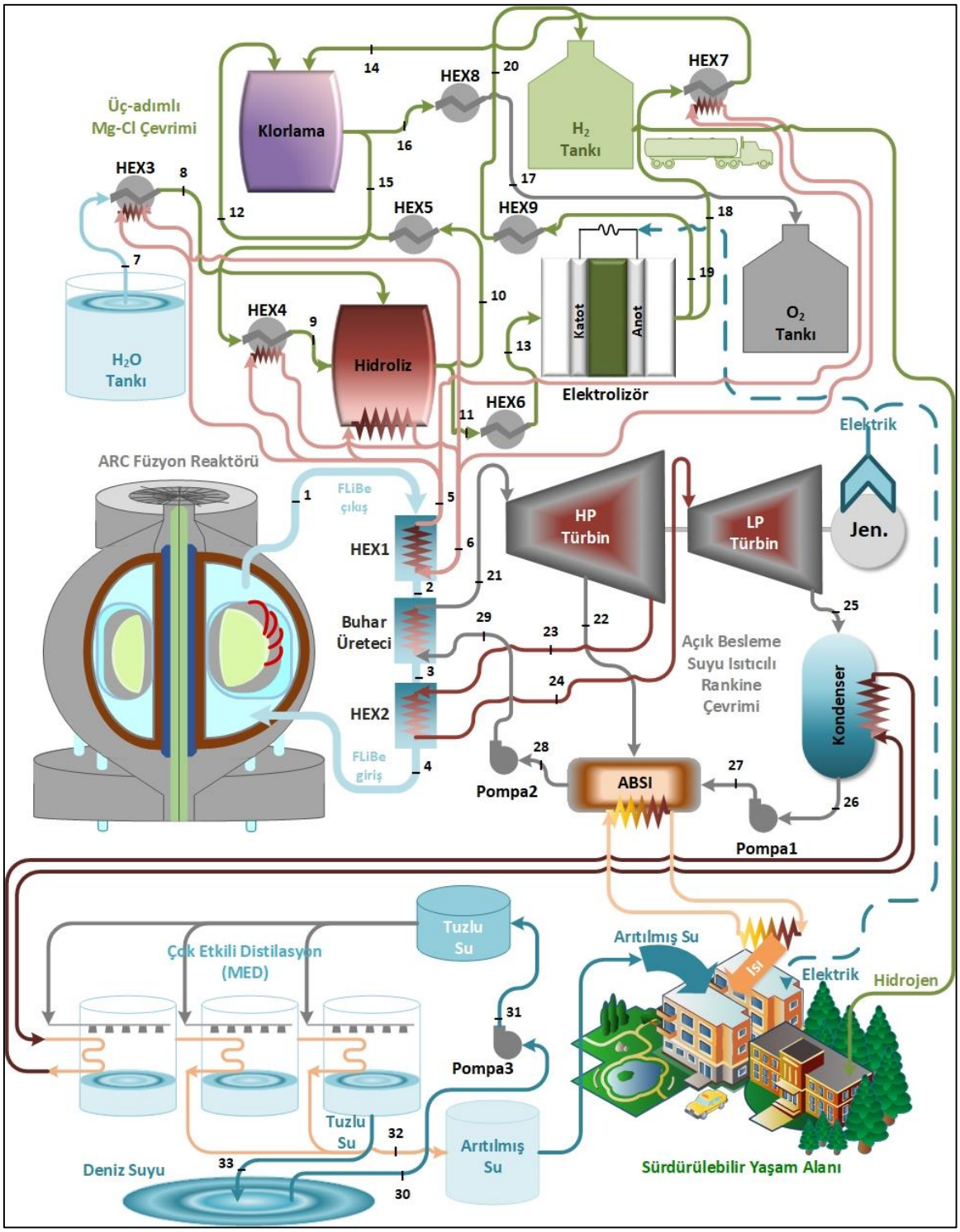
4.4. Vaka Çalışması

Vaka çalışmasında, ARC füzyon reaktörü bir topluluğun ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde bir entegre sistemin enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Entegre sistemde yaşam alanında gerekli elektrik üretimi, mahal ısıtması, temiz su üretimi ve hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Entegre sistemde elektrik üretimi açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi ile karşılanırken, Rankine çevriminin açık besleme suyu ısıtıcısı mahal ısıtmasında, kondenseri ise deniz suyu arıtımında çok etkili distilasyon (MED) tesisinde ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Su arıtımında elektrik ihtiyacı duyan distilasyon tesislerinin yerine ısı kullanan bir tesis belirlenmiştir. Bu sayede üretilen elektriğin su arıtımında kullanılarak, evsel kullanıma daha az elektrik iletimi engellenmiştir. Ayrıca, kondenserdeki atık ısının değerlendirilmesi ve evsel kullanıma daha fazla elektrik gönderilmesi ile sistemin verim değerlerinin artırılması amaçlanmıştır. Hidrojen üretimi ise elektrik ihtiyacı halinde yakıt pillerine gönderilmek üzere üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ile üretilmektedir. Ayrıca (Şekil 4.15), vaka çalışması için tasarlanan sistemin algoritmasını sunmaktadır.



Şekil 4.15. Vaka çalışması için sistem algoritması

MED tesisinde gerekli ısı yaklaşık olarak 40 kPa ve 75°C'de olmalıdır [136]. Bu değerin karşılanması için Rankine çevrimi yeniden modellenmiştir. MED tesisinde gerekli ısı Rankine çevriminin kondenserinden karşılanmıştır. Kondenserde gerçekleşen hal değişimi ile ortaya çıkan gizli ısı MED tesisinde suyu buharlaştırmak üzere kullanılmıştır. Şekil 4.16'da entegre sistemin akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.16. Vaka çalışması için akış şeması

5. ANALİZ VE SİMÜLASYON

Bu bölümde ARC füzyon reaktörünün, üç-adımlı Mg-Cl çevrimin, dört-adımlı Mg-Cl çevrimin ve tasarlanan entegre sistemlerin analiz ve simülasyonu detaylı bir şekilde sunulmuştur. ARC füzyon reaktörü modellemesi Monte Carlo Nötron Parçacık (MCNP) Nükleer Kodu aracılığıyla yapılırken, hidrojen üretim çevrimlerinin simülasyonu Aspen Plus programı ile yürütülmüştür. Hidrojen üretim çevrimlerinin ve entegre sistemlerin analizleri enerji ve ekserji yaklaşımı ile Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları uyarınca yapılmıştır. Termodinamik analizler sırasında gerekli olan entalpi, entropi, sıcaklık, özgül hacim gibi termofiziksel özellikler hem Aspen Plus programı hem de Engineering Equation Solver (EES) aracılığıyla elde edilmiştir. Bu bölümün alt başlıklarında nötronik analiz ve hidrojen üretim çevrimlerinin analizi detaylandırılmış, hidrojen üretim çevriminde model doğrulaması yapılmış ve parametrik çalışmalar özetlenmiştir.

5.1. Nötronik Analiz

Bu tez kapsamında nükleer reaktör olarak belirlenen ARC füzyon reaktörü MCNP nükleer kodu kullanılarak modellenmiş, kütüphane olarak ENDF/B-V nötron kütüphanesi kullanılmıştır [137]. Analizde nükleer yakıt çeşidi, manto malzemesi gibi farklı nötronik parametreler değerlendirilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Analizde değerlendirilen parametreler aşağıda listelenmiştir:

- Berilyum etkisi
- Nötron yansıtıcı malzeme etkisi
- Manto malzemesi değişimi
- Soğutucu bölgesinde eriyik tuz yakıt eklenmesi (UF_4 ve ThF_4)
- Farklı soğutucu kullanımı

MCNP nükleer kodu sürekli enerjili, genelleştirilmiş geometrili ve zamana bağlı nötron, foton ya da elektron taşıma kodudur ve Monte Carlo tekniğini kullanır. Monte Carlo metodu, nükleer parçacıkların malzemeler ile etkileşimi gibi istatistiksel bir süreci teorik olarak modellemek için kullanılabilen bir metottur. Bir süreçteki olasılıklar ardışık olarak simüle edilir. Parçacık taşınmasında Monte Carlo tekniği oldukça gerçekçi bir yaklaşım sunarken;

birçok parçacığın kaynaktan ölümüne (emilim vb.) kadar takibini içermektedir. Monte Carlo metodu karmaşık üç boyutlu problemlerin ve aynı zamanda zamana bağlı problemlerin çözümü için uygun yöntemlerdendir [138].

MCNP kodu girdi dosyası oluştururken aşağıda belirtilen maddelere dikkat edilmelidir [138]:

- Hücre kartları, yüzey kartları ve veri kartları belirlenir.
- Reaktör geometrisi tanımlanır.
- Nötron kaynağı konumu ve özellikleri belirlenir.
- Koddan istenen cevaplar belirlenir (tally).
- Analizin verimini artırmak üzere kullanılacak varyans azaltma tekniği bilgileri girdiye eklenir.

Nötronik analiz sonucunda elde edilen sonuç dosyasına göre; tesir kesitleri, reaktör geometrisi ile belirlenen reaktör hacmi, nötronların hızı, fisyon oranı gibi veriler kullanılarak, modellenen ARC füzyon reaktörünün trityum üretim oranı, enerji çoğaltım faktörü ve reaktör gücü hesaplanmıştır.

5.1.1. Trityum üretim oranı

Trityum üretim oranı (TBR) bir füzyon reaktörünün kendi kendini sürdürebilirliğinin bir ölçüdür. Hidrojenin izotopları olan döteryum ve trityum füzyon kaynağı olarak kullanılır. Döteryum doğada bulunurken, trityum radyoaktiftir ve dünya üzerinde çok az miktarda bulunur. Bu sebeple füzyon reaksiyonunda kullanılmak üzere füzyon zincirine bağlı olarak trityum üretimi devam etmelidir. Trityum üretim oranı 1,05 değerinin üstünde olan reaktörler D-T kaynak bakımından kendini sürdürebilir demektir [139].

D-T füzyon reaksiyonundan saçılan nötronlar soğutucu bölgesinde lityum izotopları ile reaksiyona girerek trityum üretirler. Eşitlik (5.1) ^{6}Li izotopları ile nötron reaksiyonunu verir, sonucunda bir helyum atomu ve 4,784 MeV ısı oluşur. Eşitlik (5.2) ise ^{7}Li izotoplarının nötron ile reaksiyonunu verir, reaksiyon sonucunda bir helyum atomu, bir nötron oluşurken 2,467 MeV ısı çekilir.

$$^{6}Li + n \rightarrow \alpha + T_6 + Q\ [4{,}784\ MeV] \tag{5.1}$$

$$^{7}Li + n \rightarrow \alpha + T_7 + n + Q\ [-2{,}467\ MeV] \tag{5.2}$$

burada, T_6 Eşitlik (5.3) ile ifade edilmektedir. ϕ nötron akısını verir ve Eşitlik (5.5) ile hesaplanır. Σ ise makroskopik tesir kesitini vermektedir. Benzer şekilde, T_7 ise Eşitlik (5.4) ile ifade edilir. Nötron akısı ile makroskobik tesir kesitinin çarpımı ise reaksiyon miktarını vermektedir, $\langle \phi\ \Sigma \rangle$ [140].

$$T_6 = \langle \phi\ \Sigma_{(n,\alpha)T} \rangle = \iint \phi\ \Sigma_{(n,\alpha)T}\ dE\ dV \tag{5.3}$$

$$T_7 = \langle \phi\ \Sigma_{(n,n'\alpha)T} \rangle = \iint \phi\ \Sigma_{(n,n'\alpha)T}\ dE\ dV \tag{5.4}$$

$$\phi = n\ \upsilon \tag{5.5}$$

Nötron akısı, ϕ, birim saniyedeki birim alan başına nötron sayısını vermektedir. n nötron sayısını, υ ise nötron hızını temsil eder [140].

$$\Sigma = N\ \sigma \tag{5.6}$$

Makroskopik tesir kesiti, Σ, bir nötronun bir ortam içinde hareket halindeyken kat ettiği birim uzunluk başına çarpışmaya uğrama ihtimalini verir ve Eşitlik (5.6) ile hesaplanmaktadır [140]. N atomik yoğunluğu verirken, σ mikroskopik tesir kesitini ifade eder.

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \tag{5.7}$$

Atomik yoğunluk Eşitlik (5.7) ile hesaplanır ve bir maddenin 1 cm3'ünün içerdiği atom/molekül sayısını ifade etmektedir. ρ, fiziksel yoğunluğu; N_A, Avogadro sayısını (6,023x1023 atom/gr atom); M ise atom ağırlığını vermektedir [140].

Toplam trityum üretim oranı ise ^{6}Li ve ^{7}Li izotoplarının oluşturduğu toplam trityum oranıdır, Eşitlik (5.8) [35].

$$TBR = T_6 + T_7 \tag{5.8}$$

5.1.2. Enerji çoğaltım faktörü

Enerji çoğaltım faktörü, M, reaktördeki toplam enerji üretiminin bir oranıdır. Eşitlik (5.9) ile hesaplanmaktadır [141,142].

$$M = 1 + \frac{\langle \phi\, \Sigma_f \rangle\, 180\ MeV + \langle T_6 \rangle\, 4{,}784\ MeV - \langle T_7 \rangle\, 2{,}467\ MeV}{17{,}6\ MeV} \tag{5.9}$$

burada, $\langle \phi\, \Sigma_f \rangle$ fisyon reaksiyon miktarını verir, 180 MeV bir fisyon reaksiyonu başına enerjidir, $\langle T_6 \rangle$ ve $\langle T_7 \rangle$ trityum üretim reaksiyonlarıdır, Eşitlik (5.11) ve (5.12). Ek olarak, 17,6 MeV bir füzyon reaksiyonu başına enerjidir [35,143].

$$\langle \phi\, \Sigma_f \rangle = \iint \phi\, \Sigma_f\, dE\, dV \tag{5.10}$$

$$\langle T_6 \rangle = \langle \phi\, \Sigma_{(n,\alpha)T} \rangle \tag{5.11}$$

$$\langle T_7 \rangle = \langle \phi\, \Sigma_{(n,n'\alpha)T} \rangle \tag{5.12}$$

Reaktörün termal gücü Eşitlik (5.13)'de verilen formül ile hesaplanabilir [144].

$$P_{th} = P_i + P_\alpha + MP_n \tag{5.13}$$

burada, P_i füzyon gücünü vermektedir, Eşitlik (5.14) ile hesaplanabilir. Eşitlikteki Q füzyon güç kazancını, P_f ise füzyon güç çıktısını ifade eder. P_α ve P_n sırasıyla, alfa parçacıklarından ve nötron parçacıklarından gelen gücü ifade eder ve aşağıda verilen eşitlikler [145] ile hesaplanmaktadır. x_α ve x_n ise alfa ve nötron parçacıklarının füzyon reaksiyonundaki enerji oranlarını ifade eder, sırası ile 0,2 ve 0,8 olarak kabul edilmiştir [144].

$$P_i = QP_f \tag{5.14}$$

$$P_\alpha = x_\alpha P_f \tag{5.15}$$

$$P_n = x_n P_f \tag{5.16}$$

5.2. Hidrojen Üretim Analiz ve Simülasyonu

Tez kapsamında analiz edilen hidrojen üretim çevrimleri Aspen Plus [146] programı kullanılarak modellenmiş ve modelleme sonuçları üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için Shomate ısı kapasitesi eşitliği kullanılarak doğrulanmıştır. Belirlenen hidrojen üretim çevrimleri sırası ile üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimidir. Aspen Plus simülasyonu her çevrimin her reaksiyonu için uygun çalışma şartlarında detaylı olarak incelenmiştir.

Aspen Plus simülasyon programı kimyasal süreç simülasyonu ve tasarımı yapmak için kullanılan bir yazılım paketidir. Özellikle kimya mühendisliği ve ilgili endüstriyel alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kimyasal mühendislik ve benzeri endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan bu program, çeşitli kimyasal işlemlerin modellenmesine, simülasyonuna ve optimize edilmesine yardımcı olur. Isı değiştiriciler, pompalar, kompresörler, türbinler ve kimyasal reaktörler gibi farklı kimyasal proses ekipmanları için matematiksel modellemeyi sağlar [147]. Aspen Plus simülasyon programı;

- Kimyasal proses simülasyonu
- Proses tasarımı ve analizi
- Termodinamik modelleme
- Enerji entegrasyonu
- Sürdürülebilirlik ve çevresel değerlendirme
- Maliyet analizi

gibi analizlerin sürdürülmesinde kullanılmaktadır.

Aspen Plus simülasyonu için gerekli adımlar aşağıda sıralanmıştır [148]:

- İlk olarak prosesteki kimyasal bileşikler belirlenir. Aspen Plus kütüphanesinden bileşikler seçilir, bileşikler kütüphanede mevcut değilse Aspen Plus programına bileşik özellikleri girilerek, programa tanımlanır.
- Prosesteki bileşiklerin fiziksel özellikleri belirlenir.

- Proses akış şeması oluşturulur. Her ekipman belirlenir, ekipmanlara giren çıkan akışlar belirlenir.
- Tüm akışların sıcaklık, basınç ve bileşim gibi termofiziksel özellikleri belirlenir.
- Kullanılan her ekipman (reaktör, ısı değiştirici vb.) için operasyon özellikleri (sıcaklık, basınç vb.) tanımlanır.
- Tamamlanan proses çalıştırılır ve her akış için kütle, entalpi, entropi, ekserji ve spesifik hacim gibi sonuçlar elde edilir.

Aspen Plus simülasyonu sonuçları, enerji ve ekserji yaklaşımı ile Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları kullanılarak her hidrojen üretim çevrimi için analiz edilmiştir. Analizler yapılırken bazı kabuller yapılmış ve bu kabuller aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Çevrimdeki her ekipman sürekli akışlı açık bir sistemdir.
- Referans sıcaklık ve basınç değerleri sırası ile 25°C ve 1 bar (101,325 kPa) olarak kabul edilmiştir.
- Akışkanın hareketine ve yüksekliğine bağlı olan kinetik enerji ve potansiyel enerji değişimleri, mekanik ve termal enerjilerin yanında çok küçük oldukları için ihmal edilmiştir.
- Sistemdeki ısı ve basınç kayıpları ihmal edilebilirdir.
- Reaksiyon dönüşüm oranları 1 olarak kabul edilmiştir.
- Aspen Plus programında çevrimler 1 mol hidrojen üretimi için simüle edilmiştir.

Analizler yapılırken, tüm komponentlerin sürekli akışlı açık bir sistem olduğu kabul edildiği için her ekipmanın (reaktör, türbin, ısı değiştirici vb.) genel kütle korunumu eşitliği Eşitlik (5.17)'deki gibi ifade edilmiştir [149].

Kütle korunumu denklemi:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \tag{5.17}$$

Termodinamiğin birinci yasası uyarınca, her bir çevrimde kullanılan ekipmanların enerji korunum denklemi aşağıda verilen genel denklemlere göre düzenlenmiştir [149].

Enerji korunumu denklemi:

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \tag{5.18}$$

$$\sum \dot{Q}_{in} + \sum \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_{in}\left(h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gZ_{in}\right) = \sum \dot{Q}_{out} + \sum \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_{out}(h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gZ_{out}) \tag{5.19}$$

Her bir ekipmanın entropi üretimini analiz etmek, sistemdeki düzensizliklerin kaynaklarını belirlemek ve her bir ekipmanı tersinmez birer ekipman olarak analiz etmek üzere entropi korunumu denklemi kullanılmıştır [149]. Denklem her bir ekipman için ayrı ayrı düzenlenmiştir.

Entropi korunumu denklemi:

$$\sum \dot{S}_{in} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{S}_{out} \tag{5.20}$$

$$\sum \dot{S}_{in} + \sum \frac{\dot{Q}_{in}}{T_s} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{S}_{out} + \sum \frac{\dot{Q}_{out}}{T_b} \tag{5.21}$$

burada, $\dot{S} = \dot{m}\, s$ formülü ile ifade edilebilir.

Enerjinin korunumu ilkesi ile Termodinamiğin birinci yasa analizi ile enerjinin nicel değerlendirmesi yapılmıştır. Enerjinin iş yapma potansiyeli ise ekserji analizi ile değerlendirilmiştir, ekserji analizi ile enerjinin nitel bağlamda analizi yapılmıştır. Ekserji korunum denklemi Eşitlik (5.22-5.23) ile verilmiştir [149].

Ekserji korunumu denklemi:

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{out} + \dot{E}x_d \tag{5.22}$$

$$\sum \dot{E}x_{in} + \sum \dot{E}x_{in}^{Q} + \sum \dot{W}_{in} = \sum \dot{E}x_{out} + \sum \dot{E}x_{out}^{Q} + \sum \dot{W}_{out} + \dot{E}x_d \tag{5.23}$$

burada, $\dot{E}x = \dot{m}\, ex$ ve $ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$ şeklinde ifade edilebilir.

Bu tez kapsamında hidrojen üretimi için seçilen çevrimler elektrik kullanımı gerektirmektedir. Elektrik ihtiyacı duyan elektrolizörlerin analizleri Nernst Eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Nernst Eşitliği, Gibbs serbest enerjisine bağlı bir eşitliktir ve aşağıdaki gibi yazılabilir [92].

$$\Delta G = -nFE^0 = -W_{el} \tag{5.24}$$

burada, n değiştirilen elektron mol sayısını, F Faraday sabitini (9,6485x10^4 C/mol) ve E^0 ise standart hücre potansiyelini ifade etmektedir.

Her bir hidrojen üretim çevrimlerinin verim analizleri aşağıda verilen genel enerji ve ekserji verim formülleri ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{Mg-Cl} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{\dot{Q}+\dot{W}} \tag{5.25}$$

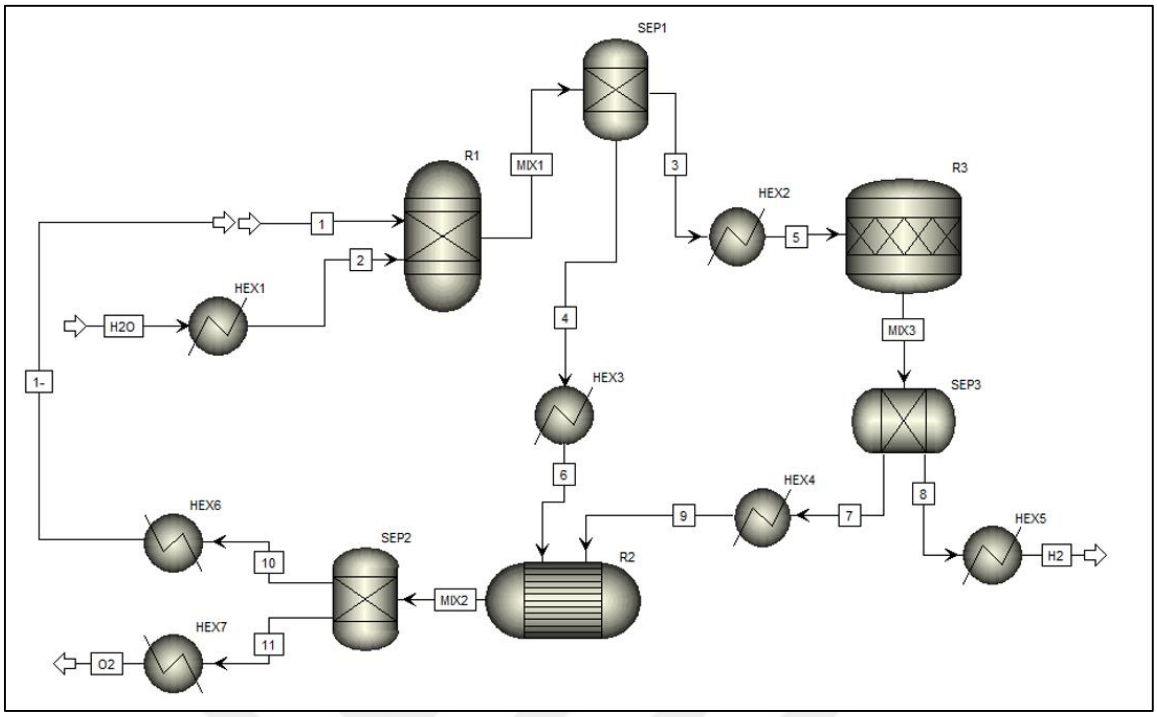
ve

$$\psi_{Mg-Cl} = \frac{\dot{m}_{H_2} ex_{H_2}}{\dot{E}x^Q+\dot{W}} \tag{5.26}$$

burada, LHV hidrojenin alt ısıl değeridir ve 120,00 MJ/kg olarak alınabilir, ayrıca hidrojenin ekserjisi ise 117,12 MJ/kg olarak alınmaktadır [150].

5.2.1. Üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi simülasyonu

Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için Aspen Plus akış şeması Şekil 5.1'de verilmiştir. Çevrim üç farklı reaksiyon içermektedir: hidroliz, klorlama ve elektroliz. Aspen Plus simülasyonunda bu üç reaktörün yanı sıra ısı değiştiriciler ve ayırıcılar da kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için Aspen Plus akış şeması

Çevrimin ilk reaksiyonu hidroliz reaksiyonudur ve Aspen Plus akış şemasında R1 ile gösterilmiştir. Çevre sıcaklığındaki H_2O ısı değiştirici (HEX1) aracılığı ile reaksiyon sıcaklığına getirilir ve R1 reaktörüne gönderilir. Burada, $MgCl_2$ ile reaksiyona girer. Reaksiyon sonucu oluşan ürünler bir karışım halinde reaktörden çıkar ve ayırıcı 1 (SEP1)'de MgO ve HCl'e ayrışır. Ürünler farklı sıcaklık altında başka reaksiyonların reaktantı olmak üzere önce HEX2 ve HEX3 ısı değiştiricilerine ve ardından çevrimin diğer reaktörlerinse gönderilir.

İkinci reaktör R2 ile gösterilen klorlama reaksiyonunun gerçekleştiği reaktördür. Hidroliz reaksiyonu sonucu oluşan MgO ısı değiştiricide ısı atarak gerekli sıcaklığa düşer ve R2'ye reaktant olarak gönderilir. Burada, Cl_2 ile reaksiyona girerek, $MgCl_2$ ve O_2'yi ürün olarak bir karışım halinde oluşturur. Karışım SEP2 ayırıcısında ayrışır ve her bir ürün HEX6 ve HEX7 ısı değiştiricilerine gönderilir. HEX6 ısı değiştiricisi $MgCl_2$'i hidroliz reaksiyonuna reaktant olarak gönderilmek üzere gerekli sıcaklığa ulaştırırken, HEX7 ısı değiştiricisi oksijeni çevrimin nihai ürünlerinden birisi olarak depolanmak üzere 25°C sıcaklığa düşürmek için çevreye ısı atar.

Son reaksiyon elektroliz reaksiyonudur ve reaktör R3 ile gösterilmiştir. Elektroliz hücresinde ilk reaksiyon sonucu oluşan HCl, elektrik girdisi aracılığı ile Cl_2 ve çevrimin nihai ürünü H_2'e ayrışır. Ürünler diğer reaksiyonlarda olduğu gibi bir karışım halinde reaktörden çıkar ve SEP3 ayırıcısı aracılığı ile ayrıştırılır. Cl_2 ürünü ikinci reaksiyonda tekrar kullanılmak üzere ısı değiştirici HEX4'e gönderilir ve ardından R2'ye girer. Çevrimin amacı olarak üretilen hidrojen ise HEX5'e gönderilir burada ısı atar ve depolanmak üzere çevrimin ana ürünü olarak elde edilir.

Aspen Plus analizinde faz dengelerinin hassas bir şekilde belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir metot olması nedeniyle PENG-ROB (Peng-Robinson) [151] temel termodinamik metodu olarak tercih edilmiştir. Bu yöntem, geniş bir sıcaklık ve basınç aralığında güvenilir sonuçlar verdiğinden, çalışma koşullarının tamamında makul sonuçlar elde edileceği öngörülmektedir. Elektroliz hücreleri için ENTRL-SR metodu kullanılmıştır. NRTL-SR özellik yöntemi, electrolyte-NRTL modeline dayanmakta olup Gibbs serbest enerjisi, entalpi ve entropi hesaplamalarında kullanılmaktadır. Analizde elektrolizör için RStoic reaktörü tercih edilirken, hidroliz ve klorlama reaksiyonlarının gerçekleşeceği reaktörler RYield olarak belirlenmiştir. Elektroliz reaksiyonu için RStoic reaktör kullanılmasının sebebi bu reaktör tipinin esas olarak stokiyometriyi ve tepkime dönüşüm oranlarını temel alması ve bu durumda tepkime kinetikleri önemli olmamasıdır. Ayrıca, RYield reaktör tipi ise reaksiyon ürünlerinin normalize edilerek kütle denkliği denkleminin sağlanması amacıyla tercih edilmiştir.

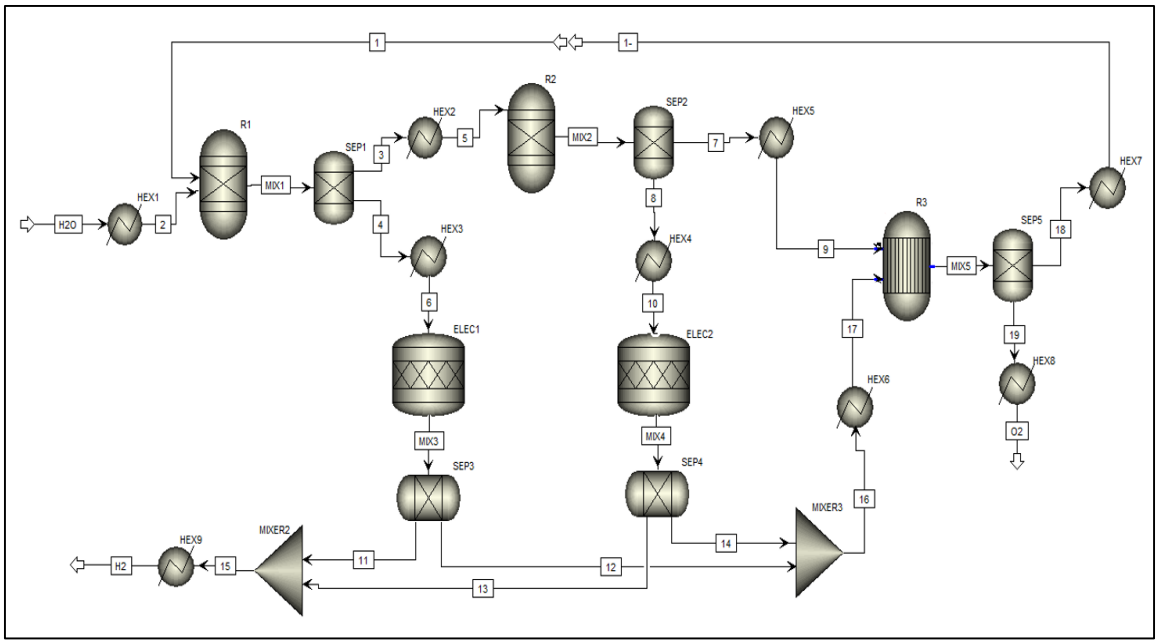
Aspen Plus simülasyonu 1 mol hidrojen üretimi için yapılmış ve analiz sonucunda her bir akış noktası için entalpi, entropi ve ekserji değerleri elde edilmiştir. Elde edilen entalpi, entropi ve ekserji değerleri Termodinamiğin birinci ve ikinci yasası ile analiz edilmiştir. Aspen Plus simülasyonunda kullanılan her bir ekipman için kütle, enerji, entropi ve ekserji korunum denklemleri düzenlenmiş ve hesaplamalar bu denklemler doğrultusunda yapılmıştır. (Çizelge 5.1). üç-adımlı Mg-Cl çevriminin Aspen Plus simülasyonunda kullanılan her bir ekipman için denge eşitliklerini vermektedir.

Çizelge 5.1. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için denge eşitlikleri

Aşama	Kütle Korunumu Denklemi (MBE)	Enerji Korunumu Denklemi (EBE)	Entropi Korunumu Denklemi (EnBE)	Ekserji Korunumu Denklemi (ExBE)
Hidroliz	$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_{MIX1}$	$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{Q}_{hid} = \dot{E}_{MIX1}$	$\dot{S}_1 + \dot{S}_2 + \frac{\dot{Q}_{hid}}{T_s} + \dot{S}_{gen,hid} = \dot{S}_{MIX1}$	$\dot{E}x_1 + \dot{E}x_2 + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_{MIX1} + \dot{E}x_{d,hid}$
Klorlama	$\dot{m}_6 + \dot{m}_9 = \dot{m}_{MIX2}$	$\dot{E}_6 + \dot{E}_9 = \dot{E}_{MIX2} + \dot{Q}_{kl}$	$\dot{S}_6 + \dot{S}_9 + \dot{S}_{gen,kl} = \dot{S}_{MIX2} + \frac{\dot{Q}_{kl}}{T_b}$	$\dot{E}x_6 + \dot{E}x_9 = \dot{E}x_{MIX2} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,kl}$
Elektrolizör	$\dot{m}_5 = \dot{m}_{MIX3}$	$\dot{E}_5 + \dot{W}_{elec} = \dot{E}_{MIX3}$	$\dot{S}_5 + \dot{S}_{gen,elec} = \dot{S}_{MIX3}$	$\dot{E}x_5 + \dot{W}_{elec} = \dot{E}x_{MIX3} + \dot{E}x_{d,elec}$
Ayırıcı 1	$\dot{m}_{MIX1} = \dot{m}_3 + \dot{m}_4$	$\dot{E}_{MIX1} + \dot{Q}_{sep1} = \dot{E}_3 + \dot{E}_4$	$\dot{S}_{MIX1} + \frac{\dot{Q}_{sep1}}{T_s} + \dot{S}_{gen,sep1} = \dot{S}_3 + \dot{S}_4$	$\dot{E}x_{MIX1} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_4 + \dot{E}x_{d,sep1}$
Ayırıcı 2	$\dot{m}_{MIX2} = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11}$	$\dot{E}_{MIX2} + \dot{Q}_{sep2} = \dot{E}_{10} + \dot{E}_{11}$	$\dot{S}_{MIX2} + \frac{\dot{Q}_{sep2}}{T_s} + \dot{S}_{gen,sep2} = \dot{S}_{10} + \dot{S}_{11}$	$\dot{E}x_{MIX2} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_{10} + \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{d,sep2}$
Ayırıcı 3	$\dot{m}_{MIX3} = \dot{m}_7 + \dot{m}_8$	$\dot{E}_{MIX3} + \dot{Q}_{sep3} = \dot{E}_7 + \dot{E}_8$	$\dot{S}_{MIX3} + \frac{\dot{Q}_{sep3}}{T_s} + \dot{S}_{gen,sep3} = \dot{S}_7 + \dot{S}_8$	$\dot{E}x_{MIX3} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_8 + \dot{E}x_{d,sep3}$
Isı Değiştirici 1	$\dot{m}_{H2O} = \dot{m}_2$	$\dot{E}_{H2O} + \dot{Q}_{HEX1} = \dot{E}_2$	$\dot{S}_{H2O} + \frac{\dot{Q}_{HEX1}}{T_s} + \dot{S}_{gen,HEX1} = \dot{S}_2$	$\dot{E}x_{H2O} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_{d,HEX1}$
Isı Değiştirici 2	$\dot{m}_3 = \dot{m}_5$	$\dot{E}_3 = \dot{E}_5 + \dot{Q}_{HEX2}$	$\dot{S}_3 + \dot{S}_{gen,HEX2} = \dot{S}_5 + \frac{\dot{Q}_{HEX2}}{T_b}$	$\dot{E}x_3 = \dot{E}x_5 + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX2}$
Isı Değiştirici 3	$\dot{m}_4 = \dot{m}_6$	$\dot{E}_4 = \dot{E}_6 + \dot{Q}_{HEX3}$	$\dot{S}_4 + \dot{S}_{gen,HEX3} = \dot{S}_6 + \frac{\dot{Q}_{HEX3}}{T_b}$	$\dot{E}x_4 = \dot{E}x_6 + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX3}$
Isı Değiştirici 4	$\dot{m}_7 = \dot{m}_9$	$\dot{E}_7 + \dot{Q}_{HEX4} = \dot{E}_9$	$\dot{S}_7 + \frac{\dot{Q}_{HEX4}}{T_s} + \dot{S}_{gen,HEX4} = \dot{S}_9$	$\dot{E}x_7 + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_9 + \dot{E}x_{d,HEX4}$
Isı Değiştirici 5	$\dot{m}_8 = \dot{m}_{H2}$	$\dot{E}_8 = \dot{E}_{H2} + \dot{Q}_{HEX5}$	$\dot{S}_8 + \dot{S}_{gen,HEX5} = \dot{S}_{H2} + \frac{\dot{Q}_{HEX5}}{T_b}$	$\dot{E}x_8 = \dot{E}x_{H2} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX5}$
Isı Değiştirici 6	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{1-}$	$\dot{E}_{10} + \dot{Q}_{HEX6} = \dot{E}_{1-}$	$\dot{S}_{10} + \frac{\dot{Q}_{HEX6}}{T_s} + \dot{S}_{gen,HEX6} = \dot{S}_{1-}$	$\dot{E}x_{10} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_{1-} + \dot{E}x_{d,HEX6}$
Isı Değiştirici 7	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{O2}$	$\dot{E}_{11} = \dot{E}_{O2} + \dot{Q}_{HEX7}$	$\dot{S}_{11} + \dot{S}_{gen,HEX7} = \dot{S}_{O2} + \frac{\dot{Q}_{HEX7}}{T_b}$	$\dot{E}x_{11} = \dot{E}x_{O2} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX7}$

5.2.2. Dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi simülasyonu

Tezin bu bölümünde dört-adımlı Mg-Cl çevriminin Aspen Plus simülasyonunun detayları verilmiştir. Şekil 5.2'de dört-adımlı Mg-Cl çevrimine ait Aspen Plus akış şeması görülmektedir. Üç-adımlı Mg-Cl çevriminden farklı olarak, dört-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus akış şeması iki elektrolizör ve ek olarak iki adet karıştırıcı içermektedir.



Şekil 5.2. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için Aspen Plus akış şeması

İlk adım hidroliz reaksiyonudur ve reaktör R1 ile gösterilmiştir. H_2O ısı değiştirici HEX1 aracılığı ile reaksiyon sıcaklığına ısınır. H_2O ve klorlama reaksiyonu sonucu oluşan $MgCl_2$ R1'de reaksiyona girer. Reaksiyon sonucunda ürünler bir karışım halinde reaktörden çıkıp SEP1 ayırıcısına girer. Ürünler HEX2 ve HEX3 ısı değiştiricilerine gönderilir. MgOHCl önce HEX2'ye gönderilir ve burada ayrışma reaksiyonu için gerekli sıcaklığa ulaşmak için kaynaktan ısı alır. Daha sonra ayrışma reaktörü R2 ile gönderilir. Aynı zamanda hidroliz reaksiyonu sonucu oluşan HCl HEX3'te çevreye ısı vererek gerekli sıcaklığa ulaşır, ELEC1 elektrolizörüne gönderilir.

Çevrimin ikinci reaksiyonu ayrışma reaksiyonudur ve R2 reaktörü ayrışma reaksiyonunu sembolize eder. Burada, MgOHCl ısı alarak MgO ve HCl e ayrışır. Karışım halinde reaktörden çıkan ürünler SEP2'de ayrışır ve sırası ile HEX5 ve HEX4 ısı değiştiricilerine

gönderilirler. MgO HEX5'ten sonra R3 reaktörüne reaktant olarak girerken, HCl HEX4'te ısı vererek gerekli sıcaklığa düşer ve ELEC2 elektrolizörüne gönderilir.

Dört-adımlı Mg-Cl çevriminde iki adımda elektroliz vardır: gaz fazda HCl elektrolizi ve sulu fazda HCl elektrolizi. ELEC1 elektroliz hücresinde sulu çözelti HCl, H_2 ve Cl_2'ye ayrışırken, ELEC2 elektroliz hücresinde gaz fazdaki HCl elektrolizi gerçekleşir. Her iki elektroliz hücresi sonrasında karışım halindeki ürünlerin ayrışması için SEP3 ve SEP4 ayırıcıları bulunmaktadır. Ayırıcılardan çıkan ürünler MIXER1 ve MIXER2 karıştırıcılarında birleşir ve Cl_2 ve H_2 olarak toplanır. Cl_2 gazı son reaksiyonda reaktant olarak kullanılmak üzere R3 reaktörüne giderken, H_2 bir ısı değiştirici aracılığı ile sıcaklığı düşürüldükten sonra depolanmak üzere çevrimin nihai ürünü olarak toplanır.

Son reaksiyon R3 reaktöründe gerçekleşen klorlama reaksiyonudur. R3 reaktöründe, elektroliz sonucu oluşan Cl_2 ile ayrışma reaksiyonu sonucunda oluşan MgO reaksiyona girer. Ekzotermik olarak gerçekleşen reaksiyon sonucunda ürünler karışım halinde oluşarak SEP5 ayırıcısına gönderilir. Ayırıcıda $MgCl_2$ ve O_2 olarak ayrışan ürünler HEX7 ve HEX8 ısı değiştiricilerine gönderilir. $MgCl_2$ ısı değiştiriciden sonra ilk reaksiyonda tekrar kullanılmak üzere R1'e gönderilir. O_2 ise nihai ürün olarak sıcaklığı düşürüldükten sonra depolanmak üzere çevrimden çıkar.

Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin Aspen Plus simülasyonunda da üç-adımlı Mg-Cl çevrim gibi, hidroliz, ayrışma ve klorlama reaksiyonları için PENG-ROB metodu kullanılmıştır. Ayrıca, elektroliz hücrelerinde ENTRL-SR metodu kullanımı tercih edilmiştir. Reaktör tipleri hidroliz, ayrışma ve klorlama reaksiyonları için RYield olarak belirlenirken, elektroliz hücreleri için RStoic olarak seçilmiştir.

Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus simülasyonu sonucunda elde edilen entalpi, entropi ve ekserji değerleri enerji ve ekserji yaklaşımı ile Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları uyarınca analiz edilmiştir. Çizelge 5.2'de dört-adımlı Mg-Cl çevrimde yer alan tüm ekipmanların kütle, entalpi, entropi ve ekserji korunum denklemleri verilmiştir. Denklemler kullanılarak hem tüm çevrim hem de her bir ekipman ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Çizelge 5.2. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için denge eşitlikleri

Aşama	MBE	EBE	EnBE	ExBE
Hidroliz	$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_{MIX1}$	$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 = \dot{E}_{MIX1} + \dot{Q}_{hid}$	$\dot{S}_1 + \dot{S}_2 + \dot{S}_{gen,hid} = \dot{S}_{MIX1} + \frac{\dot{Q}_{hid}}{T_b}$	$\dot{E}x_1 + \dot{E}x_2 = \dot{E}x_{MIX1} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,hid}$
Ayrışma	$\dot{m}_5 = \dot{m}_{MIX2}$	$\dot{E}_5 + \dot{Q}_{ayr} = \dot{E}_{MIX2}$	$\dot{S}_5 + \frac{\dot{Q}_{ayr}}{T_s} + \dot{S}_{gen,ayr} = \dot{S}_{MIX2}$	$\dot{E}x_5 + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_{MIX2} + \dot{E}x_{d,ayr}$
Elektrolizör 1	$\dot{m}_6 = \dot{m}_{MIX3}$	$\dot{E}_6 + \dot{W}_{elec1} = \dot{E}_{MIX3}$	$\dot{S}_6 + \dot{S}_{gen,elec1} = \dot{S}_{MIX3}$	$\dot{E}x_6 + \dot{W}_{elec1} = \dot{E}x_{MIX3} + \dot{E}x_{d,elec}$
Elektrolizör 2	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{MIX4}$	$\dot{E}_{10} + \dot{W}_{elec2} = \dot{E}_{MIX4}$	$\dot{S}_{10} + \dot{S}_{gen,elec2} = \dot{S}_{MIX4}$	$\dot{E}x_{10} + \dot{W}_{elec2} = \dot{E}x_{MIX4} + \dot{E}x_{d,elec}$
Klorlama	$\dot{m}_9 + \dot{m}_{17} = \dot{m}_{MIX5}$	$\dot{E}_9 + \dot{E}_{17} = \dot{E}_{MIX5} + \dot{Q}_{kl}$	$\dot{S}_9 + \dot{S}_{17} + \dot{S}_{gen,kl} = \dot{S}_{MIX5} + \frac{\dot{Q}_{kl}}{T_b}$	$\dot{E}x_9 + \dot{E}x_{17} = \dot{E}x_{MIX5} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,kl}$
Ayırıcı 1	$\dot{m}_{MIX1} = \dot{m}_3 + \dot{m}_4$	$\dot{E}_{MIX1} + \dot{Q}_{sep1} = \dot{E}_3 + \dot{E}_4$	$\dot{S}_{MIX1} + \frac{\dot{Q}_{sep1}}{T_s} + \dot{S}_{gen,sep1} = \dot{S}_3 + \dot{S}_4$	$\dot{E}x_{MIX1} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_4 + \dot{E}x_{d,sep1}$
Ayırıcı 2	$\dot{m}_{MIX2} = \dot{m}_7 + \dot{m}_8$	$\dot{E}_{MIX2} + \dot{Q}_{sep2} = \dot{E}_7 + \dot{E}_8$	$\dot{S}_{MIX2} + \frac{\dot{Q}_{sep2}}{T_s} + \dot{S}_{gen,sep2} = \dot{S}_7 + \dot{S}_8$	$\dot{E}x_{MIX2} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_7 + \dot{E}x_8 + \dot{E}x_{d,sep2}$
Ayırıcı 3	$\dot{m}_{MIX3} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{12}$	$\dot{E}_{MIX3} + \dot{Q}_{sep3} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{12}$	$\dot{S}_{MIX3} + \frac{\dot{Q}_{sep3}}{T_s} + \dot{S}_{gen,sep3} = \dot{S}_{11} + \dot{S}_{12}$	$\dot{E}x_{MIX3} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{d,sep3}$
Ayırıcı 4	$\dot{m}_{MIX4} = \dot{m}_{13} + \dot{m}_{14}$	$\dot{E}_{MIX4} + \dot{Q}_{sep4} = \dot{E}_{13} + \dot{E}_{14}$	$\dot{S}_{MIX4} + \frac{\dot{Q}_{sep4}}{T_s} + \dot{S}_{gen,sep4} = \dot{S}_{13} + \dot{S}_{14}$	$\dot{E}x_{MIX4} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{d,sep4}$
Ayırıcı 5	$\dot{m}_{MIX5} = \dot{m}_{18} + \dot{m}_{19}$	$\dot{E}_{MIX5} + \dot{Q}_{sep5} = \dot{E}_{18} + \dot{E}_{19}$	$\dot{S}_{MIX5} + \frac{\dot{Q}_{sep5}}{T_s} + \dot{S}_{gen,sep5} = \dot{S}_{18} + \dot{S}_{19}$	$\dot{E}x_{MIX5} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_{18} + \dot{E}x_{19} + \dot{E}x_{d,sep5}$
Isı Değiştirici 1	$\dot{m}_{H2O} = \dot{m}_2$	$\dot{E}_{H2O} + \dot{Q}_{HEX1} = \dot{E}_2$	$\dot{S}_{H2O} + \frac{\dot{Q}_{HEX1}}{T_s} + \dot{S}_{gen,HEX1} = \dot{S}_2$	$\dot{E}x_{H2O} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_2 + \dot{E}x_{d,HEX1}$
Isı Değiştirici 2	$\dot{m}_3 = \dot{m}_5$	$\dot{E}_3 + \dot{Q}_{HEX2} = \dot{E}_5$	$\dot{S}_3 + \frac{\dot{Q}_{HEX2}}{T_s} + \dot{S}_{gen,HEX2} = \dot{S}_5$	$\dot{E}x_3 + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_5 + \dot{E}x_{d,HEX2}$
Isı Değiştirici 3	$\dot{m}_4 = \dot{m}_6$	$\dot{E}_4 = \dot{E}_6 + \dot{Q}_{HEX3}$	$\dot{S}_4 + \dot{S}_{gen,HEX3} = \dot{S}_6 + \frac{\dot{Q}_{HEX3}}{T_b}$	$\dot{E}x_4 = \dot{E}x_6 + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX3}$

Çizelge 5.2. (devam) Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için denge eşitlikleri

Isı Değiştirici 4	$\dot{m}_8 = \dot{m}_{10}$	$\dot{E}_8 = \dot{E}_{10} + \dot{Q}_{HEX4}$	$\dot{S}_8 + \dot{S}_{gen,HEX4} = \dot{S}_{10} + \frac{\dot{Q}_{HEX4}}{T_b}$	$\dot{E}x_8 = \dot{E}x_{10} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX4}$
Isı Değiştirici 5	$\dot{m}_7 = \dot{m}_9$	$\dot{E}_7 + \dot{Q}_{HEX5} = \dot{E}_9$	$\dot{S}_7 + \frac{\dot{Q}_{HEX5}}{T_s} + \dot{S}_{gen,HEX5} = \dot{S}_9$	$\dot{E}x_7 + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_9 + \dot{E}x_{d,HEX5}$
Isı Değiştirici 6	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$	$\dot{E}_{16} + \dot{Q}_{HEX6} = \dot{E}_{17}$	$\dot{S}_{16} + \frac{\dot{Q}_{HEX6}}{T_s} + \dot{S}_{gen,HEX6} = \dot{S}_{17}$	$\dot{E}x_{16} + \dot{E}x^Q = \dot{E}x_{17} + \dot{E}x_{d,HEX6}$
Isı Değiştirici 7	$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{1-}$	$\dot{E}_{18} = \dot{E}_{1-} + \dot{Q}_{HEX7}$	$\dot{S}_{18} + \dot{S}_{gen,HEX7} = \dot{S}_{1-} + \frac{\dot{Q}_{HEX7}}{T_b}$	$\dot{E}x_{18} = \dot{E}x_{1-} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX7}$
Isı Değiştirici 8	$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{O2}$	$\dot{E}_{19} = \dot{E}_{O2} + \dot{Q}_{HEX8}$	$\dot{S}_{19} + \dot{S}_{gen,HEX8} = \dot{S}_{O2} + \frac{\dot{Q}_{HEX8}}{T_b}$	$\dot{E}x_{19} = \dot{E}x_{O2} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX8}$
Isı Değiştirici 9	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{H2}$	$\dot{E}_{15} = \dot{E}_{H2} + \dot{Q}_{HEX9}$	$\dot{S}_{15} + \dot{S}_{gen,HEX9} = \dot{S}_{H2} + \frac{\dot{Q}_{HEX9}}{T_b}$	$\dot{E}x_{15} = \dot{E}x_{H2} + \dot{E}x^Q + \dot{E}x_{d,HEX9}$
Karıştırıcı 1	$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{15}$	$\dot{E}_{11} + \dot{E}_{13} = \dot{E}_{15}$	$\dot{S}_{11} + \dot{S}_{13} + \dot{S}_{gen,mixer1} = \dot{S}_{15}$	$\dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{13} = \dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{d,mixer1}$
Karıştırıcı 2	$\dot{m}_{12} + \dot{m}_{14} = \dot{m}_{16}$	$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{14} = \dot{E}_{16}$	$\dot{S}_{12} + \dot{S}_{14} + \dot{S}_{gen,mixer2} = \dot{S}_{16}$	$\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{14} = \dot{E}x_{16} + \dot{E}x_{d,mixer2}$

5.2.3. Hidrojen üretim çevrimlerinin parametrik analizi

Tez kapsamında kullanılan hidrojen üretim çevrimleri ayrıca Aspen Plus programı kullanılarak bir parametrik analize tabii tutulmuştur. Her bir çevrimin her bir reaksiyonu farklı reaktant oranları, sıcaklık ve basınç değerleri için analiz edilmiş ve reaksiyonların ısı giriş/çıkış değerleri incelenmiştir. Her iki çevrim içinde yedi farklı buhar/$MgCl_2$ oranı belirlenmiş ve reaksiyonlar yeni reaktant ve ürün miktarları için analiz edilmiştir. Buhar/$MgCl_2$ oranları 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75 ve 2,00 olarak belirlenmiştir.

Tüm termokimyasal reaksiyonlar farklı sıcaklık aralıklarında analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi reaksiyonları aşağıda verilen sıcaklık değerleri için analiz edilmiştir:

- Hidroliz: 450°C, 470°C, 490°C, 510°C, 530°C ve 550°C
- Klorlama: 400°C, 420°C, 440°C, 460°C, 480°C ve 500°C

Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için ise verilen sıcaklık aralıklarında her bir termokimyasal reaksiyon için parametrik bir çalışma sürdürülmüştür:

- Hidroliz: 240°C, 260°C, 280°C, 300°C ve 320°C
- Ayrışma: 410°C, 430°C, 450°C, 470°C ve 490°C
- Klorlama: 450°C, 460°C, 470°C, 480°C, 490°C ve 500°C

Parametrik analizde kullanılan sıcaklıklar, her bir reaksiyonun literatürde verilen çalışma sıcaklık aralıkları baz alınarak belirlenmiştir.

Bunun yanı sıra, tüm reaksiyonlar üç farklı basınç değeri için incelenmiştir; 0,5 bar, 1 bar ve 1,5 bar. Çevrimler atmosferik basınç altında çalışan çevrimlerdir, fakat 0,5 bar ve 1,5 bar değerleri ile basınç farkının reaksiyonların entalpisine etkisi incelenmiştir.

5.2.4. Model doğrulaması

Aspen Plus simülasyonları her üç çevrim için de ayrı ayrı gerçekleştirilmiş, farklı metotlar, farklı reaktör tipleri ve ekipmanlar kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen verilere bağlı kalarak Termodinamiğin birinci ve ikinci yasa analizleri her bir çevrim için ve ayrıca her bir çevrimdeki her ekipman için ayrı ayrı yürütülmüştür. Sonuçların doğruluğunun belirlenmesi için literatürle verim ve ısı giriş/çıkış değerlerinin karşılaştırılmasının yanı sıra Shomate ısı kapasitesi eşitliği kullanılarak da sonuçlar doğrulanmıştır. Shomate denklemi, bileşiklerin sıcaklığa bağlı entalpi değerlerinin hesaplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Her bileşiğin termofiziksel özellikleri (entalpi ve entropi) Eşitlik (5.27) ve (5.28) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\bar{h}(T) - \bar{h}_0 = AT + B\frac{T^2}{2} + C\frac{T^3}{3} + D\frac{T^4}{4} - \frac{E}{T} + F - H \tag{5.27}$$

$$s^\circ = Aln(T) + BT + C\frac{T^2}{2} + D\frac{T^3}{3} - \frac{E}{2T^2} + G \tag{5.28}$$

burada, T 1/1000 K cinsinden sıcaklık değerini ifade ederken, A, B, C, D, E, F, G ve H sabitleri National Institute of Standards and Technology (NIST) veri tabanından çekilmiş katsayılardır. Bu katsayılar ampirik olarak elde edilmiştir [152].

Hidrojen üretim analizleri 1 mol/s hidrojen üretimi için gerçekleştirilmiş ve her bir bileşik için kütlesel debi bileşiklerin mol kütleleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Tez kapsamında, Aspen Plus simülasyonlarının doğruluğu üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için Shomate ısı kapasitesi denklemleriyle analiz edilmiştir. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin her reaksiyonunda kullanılan bileşiklerin gerekli sıcaklıklardaki A, B, C, D, E, F, G ve H katsayıları ve her bir bileşiğin oluşum entalpileri Shomate ısı kapasitesi denklemlerinde kullanılmak üzere Çizelge 5.3, Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'te listelenmiştir.

Çizelge 5.3. Üç-adımlı Mg-Cl çevriminin hidroliz reaksiyonu için gerekli sabitler ve oluşum entalpileri [152]

Bileşik	$MgCl_{2(s)}$	$H_2O_{(g)}$	$MgO_{(s)}$	$HCl_{(g)}$
Sıcaklık (K)	823,00	823,00	823,00	823,00
$\bar{h}_f^\circ$(kJ/mol)	-641,62	-241,83	-601,24	-92,31
A	78,307330	30,092	47,25995	32,12392
B	2,435888	6,832514	5,68162	-13,45805
C	6,858873	6,793435	-0,872665	19,86852
D	-1,728967	-2,534480	0,104300	-6,853936
E	-0,729911	0,082139	-1,053955	-0,049672
F	-667,5823	-250,8810	-619,1316	-101,6206
G	179,2639	223,3967	76,4618	228,6866
H	-641,6164	-241,8264	-601,2408	-92,31201

Çizelge 5.4. Üç-adımlı Mg-Cl çevriminin klorlama reaksiyonu için gerekli sabitler ve oluşum entalpileri [152]

Bileşik	$MgO_{(s)}$	$Cl_{2(g)}$	$O_{2(g)}$	$MgCl_{2(s)}$
Sıcaklık (K)	773,00	773,00	773,00	773,00
$\bar{h}_f^\circ$(kJ/mol)	-601,24	0	0	-641,62
A	47,259950	33,0506	30,0235	78,307330
B	5,681621	12,2294	8,772972	2,435888
C	-0,872665	-12,0651	-3,988133	6,858873
D	0,104300	4,38533	0,788313	-1,728967
E	-1,053955	-0,159494	-0,741599	-0,729911
F	-619,1316	-10,8348	-11,32468	-667,5823
G	76,461760	259,029	236,16630	179,2639
H	-601,2408	0	0	-641,6164

Çizelge 5.5. Üç-adımlı Mg-Cl çevriminin elektroliz reaksiyonu için gerekli sabitler ve oluşum entalpileri [152]

Bileşik	$HCl_{(g)}$	$Cl_{2(g)}$	$H_{2(g)}$
Sıcaklık (K)	363,00	363,00	363,00
$\bar{h}_f^\circ$(kJ/mol)	-92,31	0	0
A	32,12392	33,0506	33,066178
B	-13,45805	12,2294	-11,363417
C	19,86852	-12,0651	11,432816
D	-6,853936	4,38533	-2,772874
E	-0,049672	-0,159494	-0,158558
F	-101,6206	-10,8348	-9,980797
G	228,6866	259,029	172,707974
H	-92,31201	0	0

Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimi simülasyonlarında aynı modelleme tarzı, aynı metotlar ve reaktör tipleri kullanıldığı için doğrulama tek çevrim için yapılmıştır.

Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin reaktörler ve ısı değiştiricileri dahil tüm ekipmanları için enerji analizi sonuçları her iki metot, Shomate ısı kapasitesi denklemi ve Aspen Plus simülasyonu, kullanılarak elde edilmiş ve sonuçların mutlak sapması ve hata oranı hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Eşitlikler (5.29) ve (5.30) model doğrulamasında kullanılan denklemleri sunmaktadır.

$$Mutlak\ Sapma = |Shomate\ sonucu - Aspen\ Plus\ sonucu| \tag{5.29}$$

$$Hata\ Oranı\ (\%) = \left(\frac{|S-A|}{\frac{S+A}{2}}\right) * 100 \tag{5.30}$$

burada, S Shomate ısı kapasitesi denklemi kullanılarak elde edilen sonucu ifade ederken, A ise Aspen Plus simülasyon sonucunu ifade etmektedir.

5.3. ARC Füzyon Reaktörü Sürücülü Entegre Enerji Sistemlerinin Analizi

Entegre sistemlerin analizi yapılırken enerji ve ekserji yaklaşımı ile Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları kullanılmıştır. İlk olarak, ARC füzyon reaktörünün diğer alt sistemlere ne kadar ısı aktaracağı ve bu ısıyı aktarırken hangi ekipmanların kullanılacağı belirlenmiştir. ARC füzyon reaktörünün ısısı ısı değiştiriciler ve buhar üreteci aracılığıyla hidrojen üretim

çevrimlerine ve açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimine aktarılmaktadır. Bu durumda, ısı değiştiricilerin tasarımının yapılması ve ısı değiştirici tipinin seçilmesi gerekmektedir. Isı değiştiricide kullanılacak termo-akışkanların ve giriş çıkış sıcaklıklarının belirlenmesi üzerine uygun ısı değiştirici tipi seçilmiştir. Tasarım parametrelerine göre entegre sistemlerde kullanılan ısı değiştiriciler paralel akışlı olarak seçilmiştir. Isı değiştiricilerde aktarılan ısı, kullanılan termo-akışkanların kütlesel debileri gibi verilen Eşitlik (5.31) kullanılarak elde edilmiştir.

$$\dot{Q} = \dot{m}\,\Delta h \tag{5.31}$$

Açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevriminin tüm ekipmanları için genel kütle, enerji, entropi ve ekserji denge eşitlikleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

Buhar türbinleri:

MBE: $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$ (5.32)

EBE: $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} + \dot{W}_{ST}$ (5.33)

EnBE: $\dot{S}_{in} + \dot{S}_{gen,ST} = \dot{S}_{out}$ (5.34)

ExBE: $\dot{E}x_{in} = \dot{E}x_{out} + \dot{W}_{ST} + \dot{E}x_{d,ST}$ (5.35)

Kondenser:

MBE: $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$ (5.36)

EBE: $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} + \dot{Q}_{cond}$ (5.37)

EnBE: $\dot{S}_{in} + \dot{S}_{gen,cond} = \dot{S}_{out} + \frac{\dot{Q}_{cond}}{T_b}$ (5.38)

ExBE: $\dot{E}x_{in} = \dot{E}x_{out} + \dot{E}x^{Q} + \dot{E}x_{d,cond}$ (5.39)

Pompalar:

MBE: $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$ (5.40)

EBE: $\dot{E}_{in} + \dot{W}_{pump} = \dot{E}_{out}$ (5.41)

EnBE: $\dot{S}_{in} + \dot{S}_{gen,pump} = \dot{S}_{out}$ (5.42)

ExBE: $\dot{E}x_{in} + \dot{W}_{pump} = \dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{d,pump}$ (5.43)

Besleme suyu ısıtıcısı:

MBE: $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$ (5.44)

EBE: $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} + \dot{Q}_{FW}$ (5.45)

EnBE: $\dot{S}_{in} + \dot{S}_{gen,FW} = \dot{S}_{out} + \frac{\dot{Q}_{FW}}{T_b}$ (5.46)

ExBE: $\dot{E}x_{in} = \dot{E}x_{out} + \dot{E}x^{Q} + \dot{E}x_{d,FW}$ (5.47)

Çevrimde kullanılan pompalar için izantropik verim hesabı yapılarak, çıkış akımlarının gerçek entalpi değerleri hesaplanmış, bu entalpi değerine ve basınca bağlı olarak gerçek sıcaklık ve entropi değerleri EES programı aracılığıyla çekilmiştir. Pompalarda yapılan hesaplamalar aşağıdaki denklemler ile ifade edilmiştir.

$h_{out} = h_{in} + \upsilon_{@P_{out}}(P_{out} - P_{in})$ (5.48)

$\eta_{pump,is} = \frac{W_s}{W_a}$ (5.49)

Rankine çevrimi analizlerinde FLiBe soğutucu verileri EES'te bulunmadığı için Shomate ısı kapasitesi denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. (Çizelge 5.6). FLiBe için farklı sıcaklık değerlerine göre Shomate ısı kapasitesi denkleminde gerekli sabitleri ve oluşum entalpilerini sunmaktadır.

Çizelge 5.6. FLiBe soğutucu için gerekli sabitler ve oluşum entalpileri [152]

Bileşik	$FLiBe_{(s)}$	$FLiBe_{(l)}$
Sıcaklık (K)	298-732,20	732,30-2500
$\bar{h}_f^{\circ}$(kJ/mol)	-2273,59	-2241,07
A	90,68234	232,0865
B	149,4646	-6,185376E-8
C	-0,348170	3,597135E-8
D	0,109802	-6,826741E-9
E	0,003692	-3,532552E-9
F	-2307,254	-2326,773
G	195,7940	409,3098
H	-2273,590	-2241,072

Tez kapsamında ARC füzyon reaktörünün termodinamik çevrimi olarak tasarlanan Rankine çevriminin enerji ve ekserji verimleri aşağıdaki denklemler aracılığıyla hesaplanmaktadır.

$$\eta_{RC} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{steamgen} + \dot{Q}_{reheater}} \tag{5.50}$$

ve

$$\psi_{RC} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x^{Q}_{steamgen} + \dot{E}x^{Q}_{reheater}} \tag{5.51}$$

Entegre sistemlerin enerji ve ekserji verimleri, elde edilen yararlı çıktıların, enerji girdisine oranı hesaplanarak elde edilmiştir.

$$\eta_{overall} = \frac{\dot{m}_{H_2}\, LHV_{H_2} + \dot{W}_{net} + \dot{Q}}{\dot{Q}_{ARC}} \tag{5.52}$$

ve

$$\psi_{overall} = \frac{\dot{m}_{H_2}\, ex_{H_2} + \dot{W}_{net} + \dot{E}x^{Q}}{\dot{E}x^{Q}_{ARC}} \tag{5.53}$$

5.4. Vaka Çalışması Analizi

Vaka çalışmasında kullanılan açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi ve üç-adımlı Mg-Cl çevrimi Bölüm 5'te diğer alt başlıklarda sunulmuş, vaka çalışması için de analizler aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. MED tesisi için ise analizler yapılırken tuzlu su entalpi, entropi ve ekserji verileri Referans [153]. aracılığıyla elde edilmiştir. Termodinamik analizler aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla yürütülmüştür.

EBE: $\dot{E}_{in} + \dot{Q}_{MED} = \dot{E}_{out}$ (5.54)

EnBE: $\dot{S}_{in} + \frac{\dot{Q}_{MED}}{T_s} + \dot{S}_{gen,MED} = \dot{S}_{out}$ (5.55)

ExBE: $\dot{E}x_{in} + \dot{E}x^{Q} = \dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{d,MED}$ (5.56)

MED için enerji ve ekserji verimleri sırası ile aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmıştır:

$$\eta_{MED} = \frac{\dot{m}_{fw}\,\Delta h}{\dot{Q}_{MED}} \quad (5.57)$$

ve

$$\psi_{MED} = \frac{\dot{m}_{fw}\,\Delta ex}{\dot{E}x^{Q}_{MED}} \quad (5.58)$$

Entegre sistemin toplam enerji ve ekserji verimlilikleri ise Eşitlik (5.59) ve (5.60) aracılığı ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{vaka} = \frac{\dot{m}_{H_2}\,LHV_{H_2} + \dot{m}_{fw}\,\Delta h + \dot{W}_{el} + \dot{Q}}{\dot{Q}_{ARC}} \quad (5.59)$$

ve

$$\psi_{vaka} = \frac{\dot{m}_{H_2}\,ex_{H_2} + \dot{m}_{fw}\,\Delta ex + \dot{W}_{el} + \dot{E}x^{Q}}{\dot{E}x^{Q}_{ARC}} \quad (5.60)$$

6. SAYISAL BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde, ARC füzyon reaktörü için nötronik sonuçlar, üç-adımlı ve dört-adımlı Mg-Cl hidrojen üretim çevrimleri için simülasyon sonuçları, hidrojen üretimi model doğrulama sonuçları, entegre sistemlerin analiz sonuçları ve vaka çalışmasının sonuçları bu başlık altında sunulmuş ve tartışılmıştır.

6.1. Nötronik Analiz Sonuçları

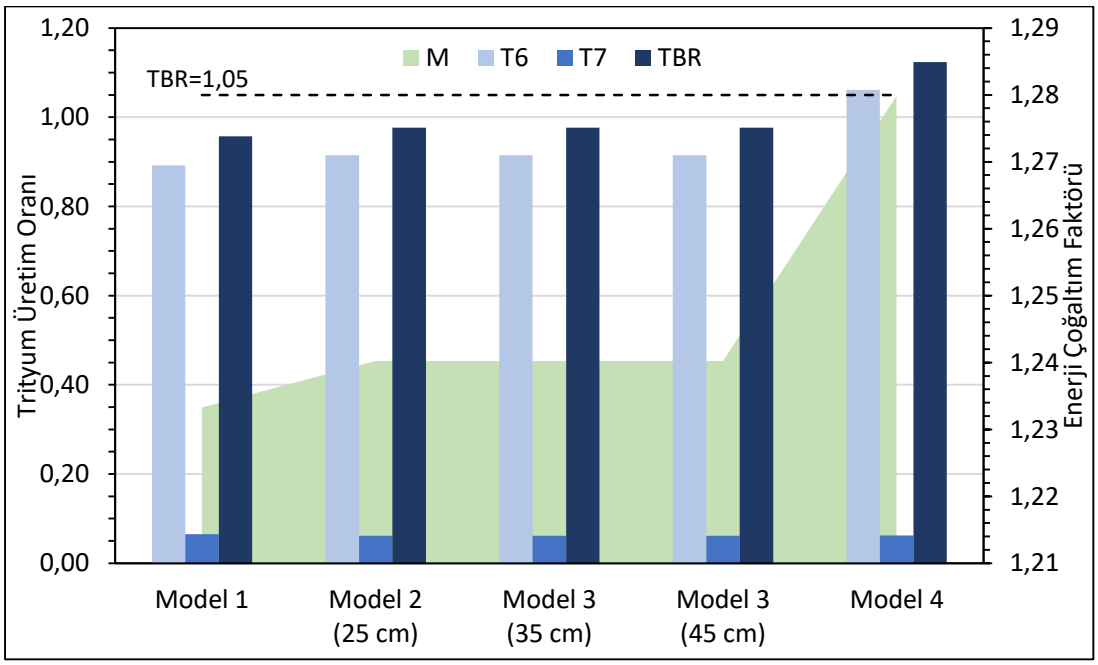
ARC füzyon reaktörü için nötronik analiz MCNP nükleer kodu aracılığıyla tamamlanmış ve dokuz farklı model analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Model 1'de berilyum çoğaltıcı katmanın, reaktörün TBR ve M değerlerine etkisi incelenmiştir. Orijinal tasarımda mevcut, berilyum katmanın kaldırılması ile reaktörün T_6 üretiminde yaklaşık olarak %2,56 oranında düşerken, T_7 üretim oranında yaklaşık olarak %6,64'lük bir artış gözlemlenmiştir. Fakat bu artışa rağmen TBR değeri %1,98 oranında düşmüştür. Berilyum katmanın kaldırılması ile TBR değerindeki düşüş daha az nötronun Li atomları ile reaksiyona girdiği anlamına gelmektedir. Berilyum $(n,2n)$ tepkimesi ile nötron çoğaltıcı olarak görev yapmıştır. TBR değerindeki bir düşüş reaktörün kendi kendini sürdürebilme süresini, yani reaktör ömrünü düşüreceği için berilyum katmanın reaktör tasarımında kalmasına karar verilmiş, sonraki modellemelerde tasarıma dahil edilmiştir. Aynı zamanda, berilyum katmanın kaldırılması fisyon reaksiyonu miktarında artış etkisi yaratmasına rağmen, M değerinde de düşüşe sebep olmuştur.

Model 2'de ZrH_2 nötron yansıtıcı manto kaldırılıp yerine aynı kalınlıkta (25 cm) grafit nötron yansıtıcı katman eklenmiştir. Grafit katman, ZrH_2 katmana göre reaktör performansında herhangi bir değişiklik olmamış, TBR ve M değerleri neredeyse sabit kalmıştır. ZrH_2 grafite göre daha pahalı bir malzeme olduğu için reaktörde maliyeti düşürmek amacı ile ZrH_2 tabaka yerini grafit tabakaya bırakmıştır.

Grafit nötron yansıtıcı kullanılan tasarımda, grafit kalınlığı orijinal tasarıma sadık kalarak 25 cm olarak tutulmuştur. Model 3'te ise grafit tabakanın kalınlığının nötronik performansa etkisi incelenmiş, grafit tabaka kalınlığı 35 cm ve 45 cm'ye artırılarak reaktör tasarımı analiz edilmiştir. 35 cm kalınlıkta grafit kullanılan tasarımda, T_6, T_7 ve TBR değerlerinde sadece

%0,002'lik bir artış olmuştur. 45 cm kalınlıkta grafit kullanılan modelleme de ise, yine aynı değerlerde yaklaşık olarak %0,003'lük bir artış gözlemlenmiştir. M değerinde ise 35 cm ve 45 cm kalınlıkta modellenen tasarımlarda sırası ile %0,0005 ve %0,0007'lik bir artış olmuştur. Artış oranlarının neredeyse sıfıra yakın olması ve reaktör performansına etkisinin neredeyse hiç olmamasından dolayı ve aynı zamanda grafit kalınlığının artışının reaktörün hacminin büyümesi ve doğrudan maliyet artışına sebep olacağı göz önünde bulundurularak, grafit malzemenin kalınlığının sonraki modellemeler için 25 cm'de tutulmasına karar verilmiştir.

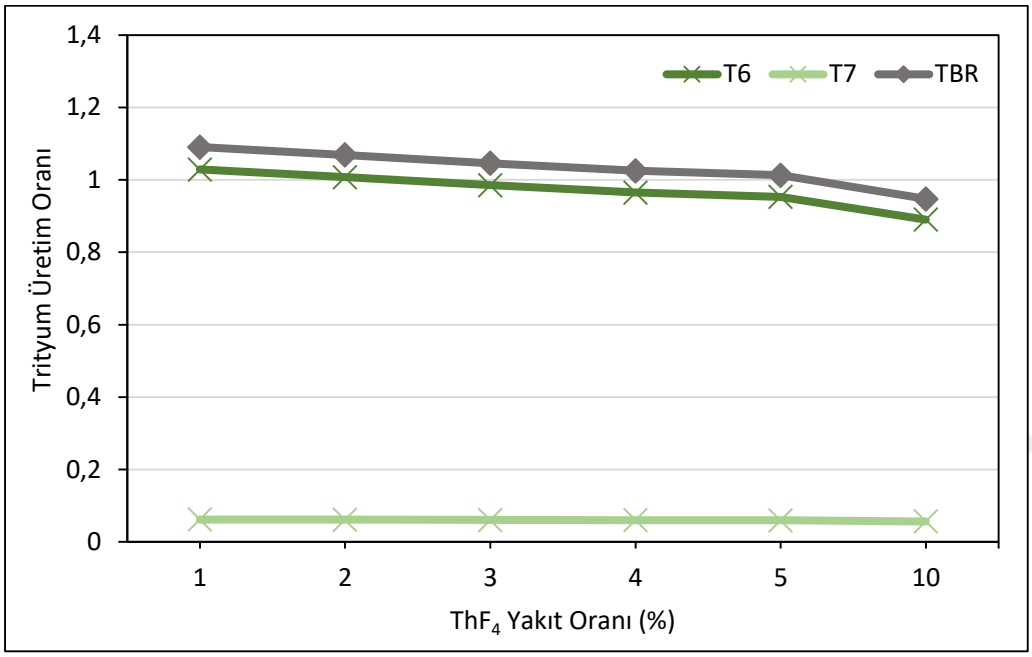
Model 4'te yapı malzemesi Inconel 718 değiştirilerek yerine paslanmaz çelik SS-304 eklenmiş ve reaktör MCNP kodu aracılığıyla analiz edilmiştir. Reaktörün T_6 üretimi %13,78 oranında önemli ölçüde bir artışla 1,06 değerine, T_7 üretimi %1,92'lik bir artışla 0,06 değerine ulaşmıştır. Toplam trityum üretim oranı ise 1,12 değerine yükselmiştir. Enerji çoğaltım faktörü ise 1,24 değerinden 1,27'ye yükselmiştir. Inconel 718 Ni ve Nb içerdiği için nötron yakalama olasılığı yüksektir bu sebeple nötronların soğutucu katmanına geçme ve soğutucu ile reaksiyonu girme ihtimalini düşürmektedir. Yani daha az TBR değerlerine sebep olmaktadır. SS-304 malzemenin reaktör yapısında kullanımı nötronik performansı olumlu yönde etkilediği için reaktör tasarımına dahil edilmiş ve sonraki modellemelerde kullanımına devam edilmiştir.



Şekil 6.1. Model 1, 2, 3 ve 4 için trityum üretim oranı ve enerji çoğaltım faktörü değişimi

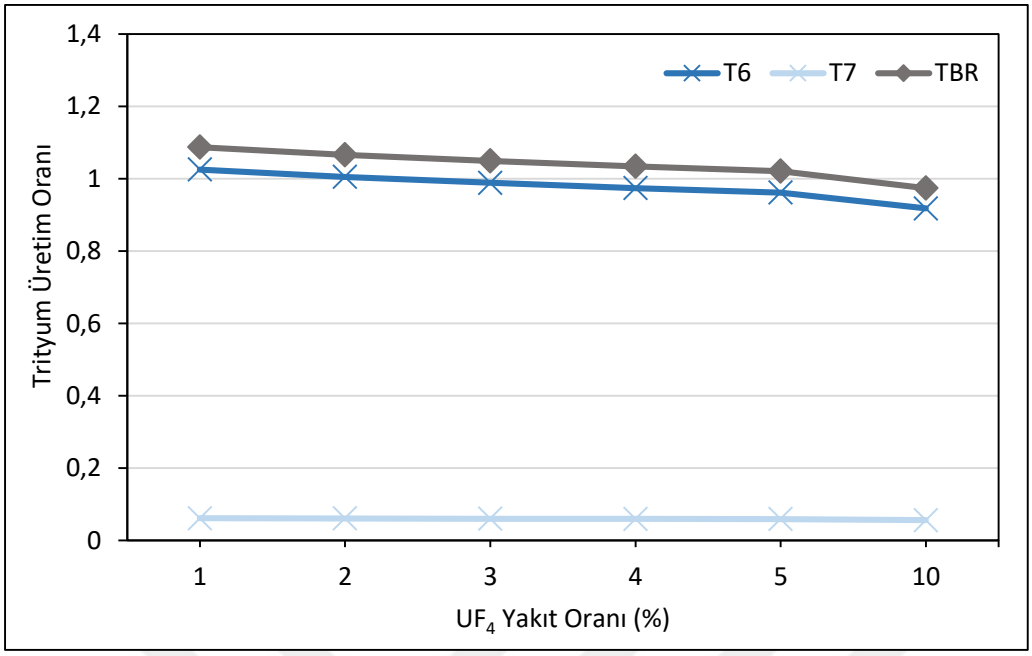
Şekil 6.1 incelendiğinde Model 1, 2, 3 ve 4'te reaktörün kendi kendini sürdürme sınırı olan 1,05 TBR değerini sadece Model 4'te aştığı görülmektedir. Bu sebeple diğer modellemelerde Model 4'te kullanılan parametreler baz alınarak ilerlenmiştir.

Model 5 ve 6'da (berilyum, grafit ve SS-304 kullanılan reaktörler) FLiBe soğutucu katman içine sırası ile eriyik tuz ThF_4 ve UF_4 yakıtlar farklı oranlarda (hacimsel olarak %1, %2, %3, %4, %5 ve %10) eklenerek, reaktör fisyon-füzyon hibrit bir reaktör haline getirilmiş ve modellerin nötronik performansı incelenmiştir.



Şekil 6.2. Model 5 için ThF_4 yakıt oranlarına göre trityum üretim oranı değişimi

Şekil 6.2 farklı ThF_4 yakıt oranları için Model 5'e ait T_6, T_7 ve toplam TBR değerlerini sunmaktadır. Genel olarak, yakıt oranı arttıkça tüm oranlarda bir azalış söz konusudur. Hacimsel olarak FLiBe katmanında yakıt oranının artışı lityum atomlarının azalmasını ifade eder ve böylece lityum atomları azaldıkça D-T füzyon reaksiyonu sonucu saçılan nötronlar daha az lityum atomu ile reaksiyona girerek daha az trityum üretimi gerçekleştirir. Yani, toplam trityum oranı azalır. TBR değeri %1 ThF_4 için 1,09 iken bu değer %3 ThF4 oranında1,05'in altına düşerek, 1,04 olarak elde edilmiştir. %10 ThF4 oranında ise 0,95 değerine kadar düşüş yaşamıştır. %3 ve daha yüksek yakıt oranlarında trityum üretim oranı reaktörün kendi kendini sürdürme sınırı altına düşmüştür, yani reaktör çalışmayacaktır.

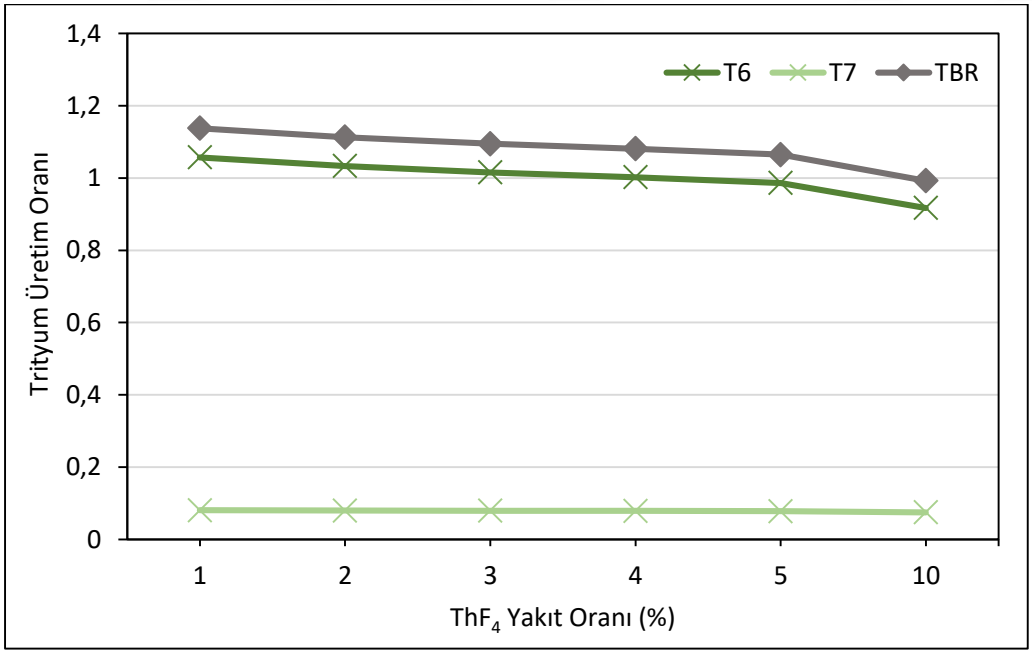


Şekil 6.3. Model 6 için UF_4 yakıt oranlarına göre trityum üretim oranı değişimi

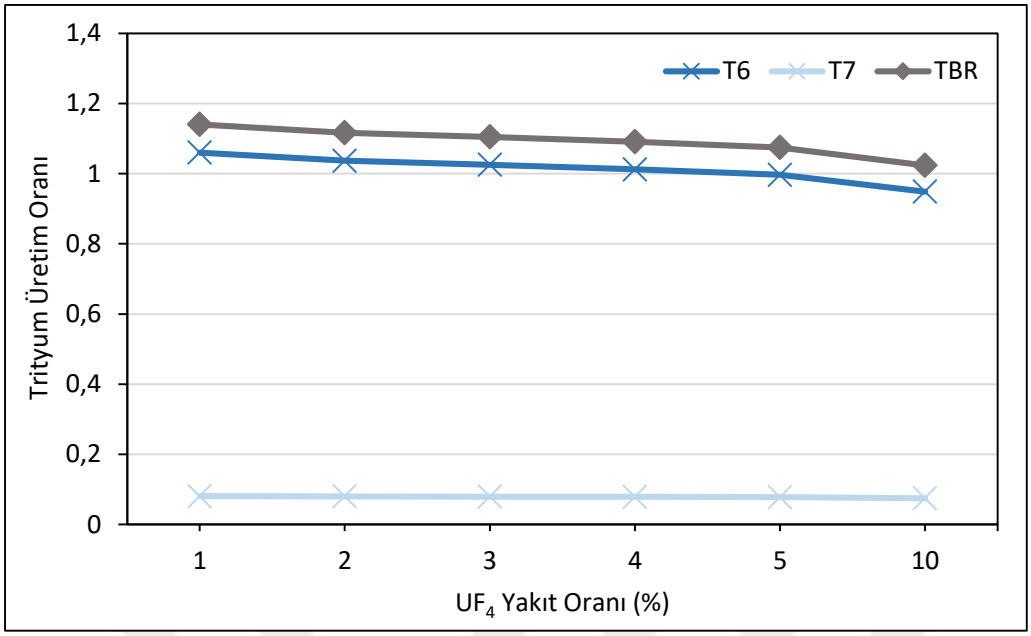
Şekil 6.3 Model 6'da UF_4 yakıt oranlarına göre T_6, T_7 ve toplam TBR değerlerinin değişim grafiğini vermektedir. Benzer olarak, yakıt oranının arttıkça soğutucu ve dolayısıyla lityum oranı azalır ve böylece trityum üretim oranlarının azaldığı gözlemlenir. T_6 üretimi %1 UF_4 yakıt oranında 1,03 iken bu değer %10 UF_4 yakıt oranında 0,92'ye düşmüştür. T_7 üretimi değerleri hesaplandığında ise %1 UF_4 yakıt oranında 0,06 olan değerin 0,05'e düşüşü gözlemlenmiştir. Toplam TBR değeri ise yakıt oranı arttıkça sırası ile 1,09; 1,07; 1,05; 1,03; 1,02 ve 0,97 olarak hesaplanmıştır. Yakıt oranının artışı TBR değerinde düşüşe sebep olmuş, reaktör ömrü kısalmasına sebep olmuştur. Ayrıca %4, %5 ve %10 UF_4 yakıt oranlarında reaktörün TBR değeri 1,05 altında kaldığı için reaktör kendi kendini sürdüremeyecektir.

Model 7'de berilyum, grafit ve SS-304 kullanılan reaktör tipinde ilk FLiBe soğutucu katmanı natural lityum ile değiştirilmiş ve analiz edilmiştir. Analiz sonucunda Model 7'nin, 1,09 T_6 üretimi, 0,08 T_7 üretimi ve toplam 1,18 trityum üretimine sahip olduğu görülmüştür. Böylece, ilk FLiBe soğutucu katmanının natural lityum ile değiştirilmesinin reaktör performansına etkisinin pozitif olduğu gözlemlenmiştir. FLiBe içinde Li atomlarının yanı sıra F ve Be atomları da bulunur, fakat natural lityum soğutucunun tamamı Li atomlarından oluşmaktadır. Bu da D-T füzyon reaksiyonu sonucunda saçılan nötronların daha fazla reaksiyona girip daha fazla trityum üretmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca Model 4'e göre M değeri artmıştır. Bu da reaktörün daha fazla enerji üreteceğini göstermektedir.

Model 8 ve Model 9'da benzer şekilde farklı eriyik tuz yakıt tipleri çeşitli oranlarda FLiBe soğutucu katmanına eklenmiş ve nötronik performans analiz edilmiştir. Şekil 6.4 Model 8'de ThF_4 yakıt oranına göre, Şekil 6.5 ise Model 9'da UF_4 yakıt oranına göre reaktörün T_6, T_7 ve toplam TBR üretimini vermektedir. Model 5 ve 6 ile paralel şekilde yakıt oranları arttıkça Model 8 ve 9 için de T_6, T_7 ve TBR değerlerinde azalış hesaplanmıştır. ThF_4 yakıt kullanılan modellemede T_6 üretimi yakıt oranı arttıkça 1,06'dan 0,92'ye düşmüş, T_7 üretimi ise 0,08 değerinden 0,07'ye düşmüştür. Toplam TBR değeri ise %1 yakıt oranı değerinde 1,14 maksimum değerindedir ve sadece %10 yakıt oranı değerinde 1,05'in altında kalmıştır. %1, %2, %3, %4, %5 ve %10 ThF4 yakıt oranlarında TBR değerleri sırası ile 1,14; 1,11; 1,09; 1,08; 1,06 ve 0,99 olarak hesaplanmıştır. UF4 eriyik tuz 238U içermektedir ve bu fertil izotop $(n,2n)$ reaksiyonu yapabilir böylece nötron üretilir ve daha fazla nötronun Li atomları ile reaksiyona girmesi söz konusudur. Bu da TBR değerinde artışa sebep olur. ThF4 eriyik tuzu ise (n,γ) reaksiyonu yaparak 233U üretir fakat $(n,2n)$ reaksiyonu zayıftır. Bu sebeple UF4 yakıt kullanılan modelleme de ise ThF4'e göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. UF4 kullanılan modelde TBR değeri maksimum 1,14 iken en düşük 1,02 olarak hesaplanmıştır.

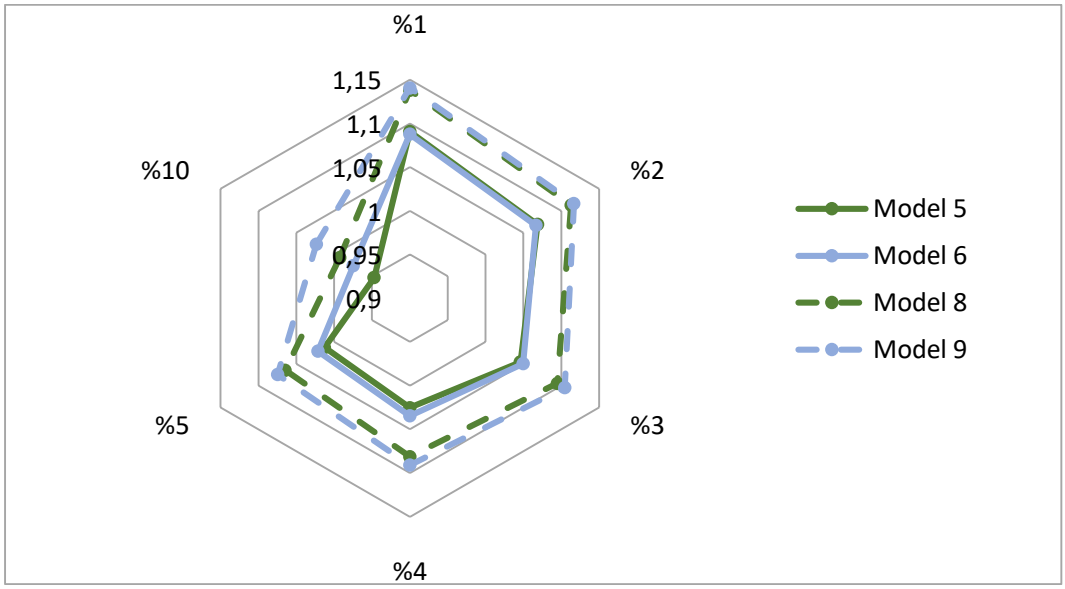


Şekil 6.4. Model 8 için ThF_4 yakıt oranlarına göre trityum üretim oranı değişimi



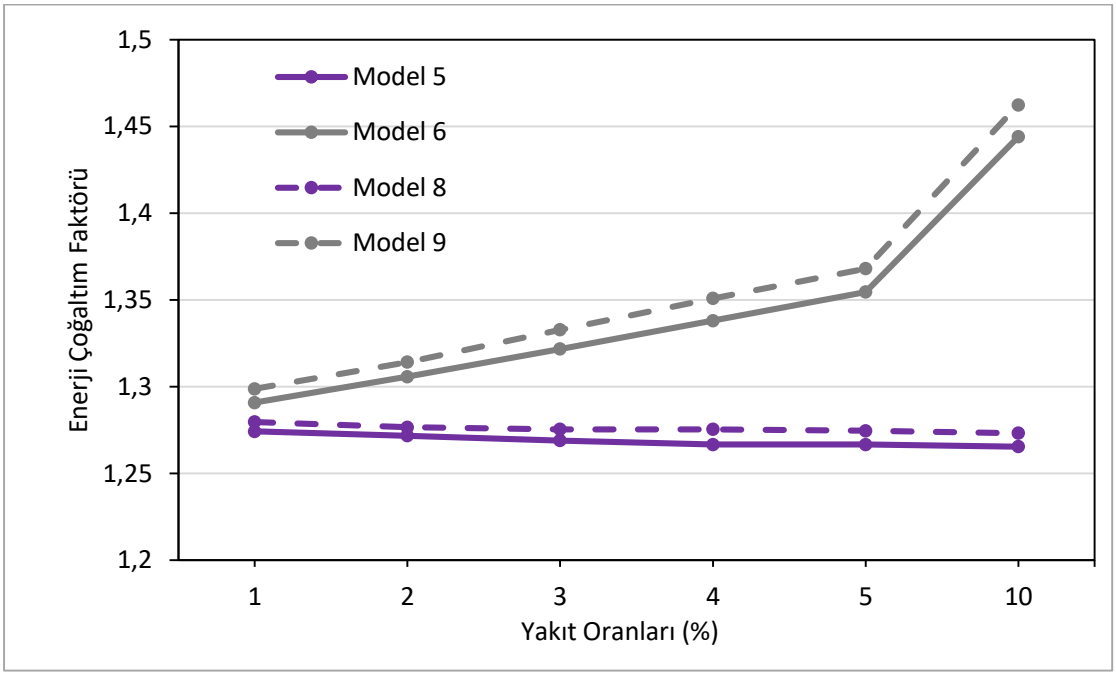
Şekil 6.5. Model 9 için UF_4 yakıt oranlarına göre trityum üretim oranı değişimi

Şekil 6.6'da Model 5, 6, 8 ve 9 farklı yakıt çeşidi ve oranlarında TBR değeri açısından karşılaştırılmıştır. Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, Model 9 tüm yakıt oranlarında en yüksek TBR değerine sahip, Model 5 ise en düşük TBR değerlerine sahiptir. UF_4 yakıt kullanılan modellerde ThF_4 yakıta göre daha yüksek TBR değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, natural lityum kullanılan modellerde de TBR değerleri daha yüksek seyretmiştir.



Şekil 6.6. Model 5, 6, 8 ve 9 için yakıt oranlarına göre TBR değişimi

Şekil 6.7 ise ThF_4 ve UF_4 kullanılan modellerin karşılaştırmalı enerji çoğaltım faktörü, M, grafiğini vermektedir. UF_4 içeren modellerde ThF_4 içeren modellere göre M değeri daha yüksek hesaplanmıştır. UF_4 doğal ve zenginleştrilmiş uranyum içermektedir ve ^{235}U fisildir. ThF_4 eriyik tuzda bulunan ^{232}Th fisil değildir ve nötron yakalayıp ^{233}U üretmesi gerekmektedir. UF_4 doğrudan fisyon yapabilen atom içerdiği için M oranı daha yüksek elde edilmiştir.

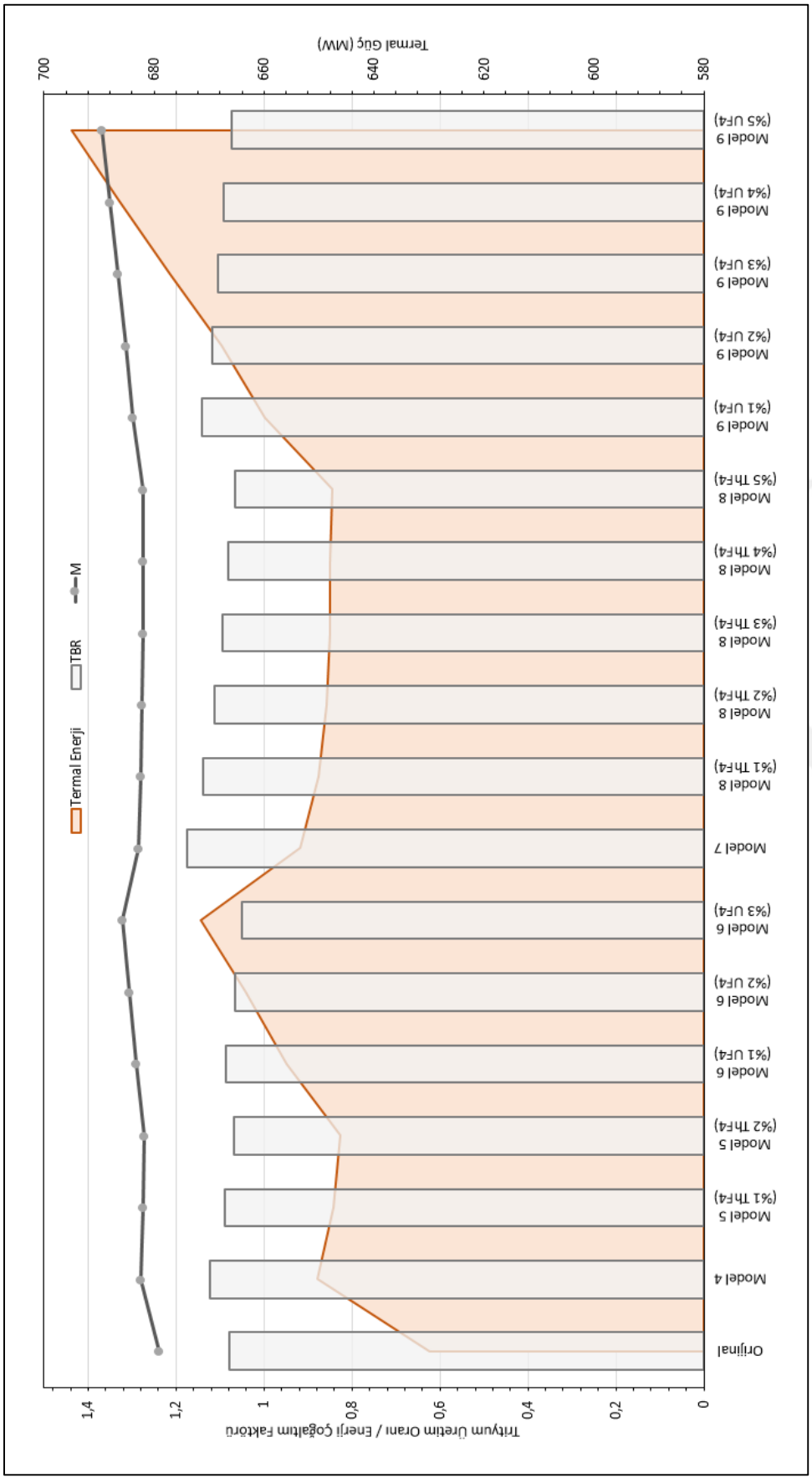


Şekil 6.7. Model 5, 6, 8 ve 9 için yakıt oranlarına göre M değişimi

Şekil 6.8 ARC füzyon reaktörü modellerine ait TBR, M ve termal enerji değişimini göstermektedir. TBR değeri 1,05 değerinin altında kalan reaktör modifikasyonlarından ziyade grafikte sadece kendi kendini sürdürebilen modeller karşılaştırılmıştır. Model 4 için trityum üretim oranı 1,12 olarak hesaplanmış ve önceki modellere kıyasla TBR değeri ilk kez bu modelde 1,05 değerinin üzerine çıktığı için Model 4'te kullanılan parametreler sonraki modellerde de kullanılmaya devam edilmiştir. İlk soğutucu katmanda natural lityum kullanılan modellerde (Model 8 ve 9) FLiBe kullanılan modellere (Model 5 ve 6) göre trityum oranının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek TBR oranı Model 7'de elde edilmiştir.

Modellerde UF_4 yakıt oranları arttıkça hem M değerinde hem de termal enerji değerinde artış gözlemlenmiştir. Bunun sebebi fisil yakıt üretimi ile artan fisyon oranına bağlanabilir.

Reaktör modellemelerinde en yüksek M değeri Model 9'da elde edilmiş, M değeri 1,37 olarak hesap edilirken, termal enerji ise 695,03 MW değerine ulaşmıştır. UF_4 yakıt kullanılan modellerde ThF_4 yakıt kullanılan modellere göre daha yüksek M ve dolayısıyla termal enerji değeri elde edilmiştir.



Şekil 6.8. Yapılan modifikasyonlar için TBR, M ve termal güç değerleri

6.2. Hidrojen Üretim Sonuçları

Tez kapsamında üç-adımlı Mg-Cl ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimleri Aspen Plus programı ile simüle edilmiştir. Elde edilen entalpi, entropi, ekserji ve kütlesel debi gibi sonuçlar enerji ve ekserji yaklaşımı ile Termodinamiğin birinci ve ikinci yasası uyarınca yürütülen analizlerde kullanılmıştır. Simülasyonlar 1 mol hidrojen üretimi için gerçekleştirilmiş, daha sonra entegre sistemlerde üretilen termal enerji ve elektriksel güce göre değerlendirilmiştir.

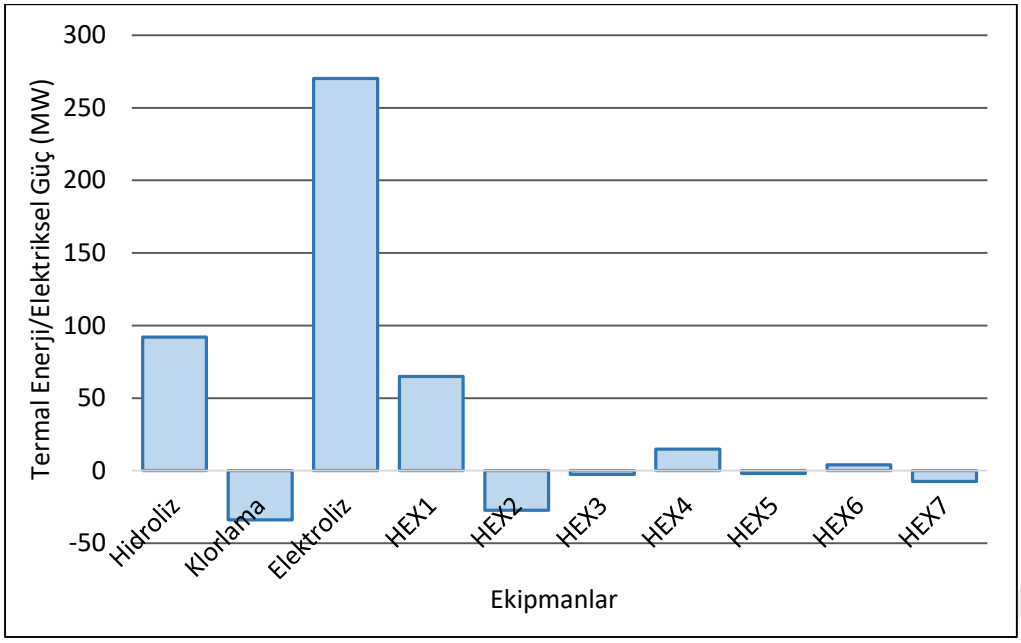
Üç-adımlı Mg-Cl çevriminin her bir akışı için termofiziksel özellikler Çizelge 6.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 6.1. 3-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus simülasyonu termofiziksel özellikleri

Durum	Akış	Sıcaklık (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	ex (kJ/kg)
1	$MgCl_2$	550	95,21	-6302,27	-0,9162	186,44
1-	$MgCl_2$	550	95,21	-6302,27	-0,9162	186,44
2	H_2O	550	18,02	-12374,82	-0,4573	953,67
3	HCl	550	72,92	-2105,73	1,0992	180,73
4	MgO	550	40,30	-14324,43	-1,5520	260,71
5	HCl	90	72,92	-2480,63	0,4342	4,09
6	MgO	500	40,30	-14386,45	-1,6297	221,87
7	Cl_2	90	70,91	30,82	0,0960	2,60
8	H_2	90	2,02	934,14	2,8858	73,00
9	Cl_2	500	70,91	241,10	0,4823	97,73
10	$MgCl_2$	500	95,21	-6345,60	-0,9705	159,30
11	O_2	500	16,00	466,49	0,9287	189,66
H2	H_2	25	2,02	0,27	0,0532	-16,19
H2O	H_2O	25	18,02	-15972,08	-9,3240	0,00
MIX1	MgO/HCl	550	113,23	-6455,16	0,1554	209,20
MIX2	$MgCl_2/O_2$	500	111,21	-5365,57	-0,6973	163,66
MIX3	Cl_2/H_2	90	72,92	56,13	0,3317	4,53
O2	O_2	25	16,00	-0,29	0,0027	-1,02

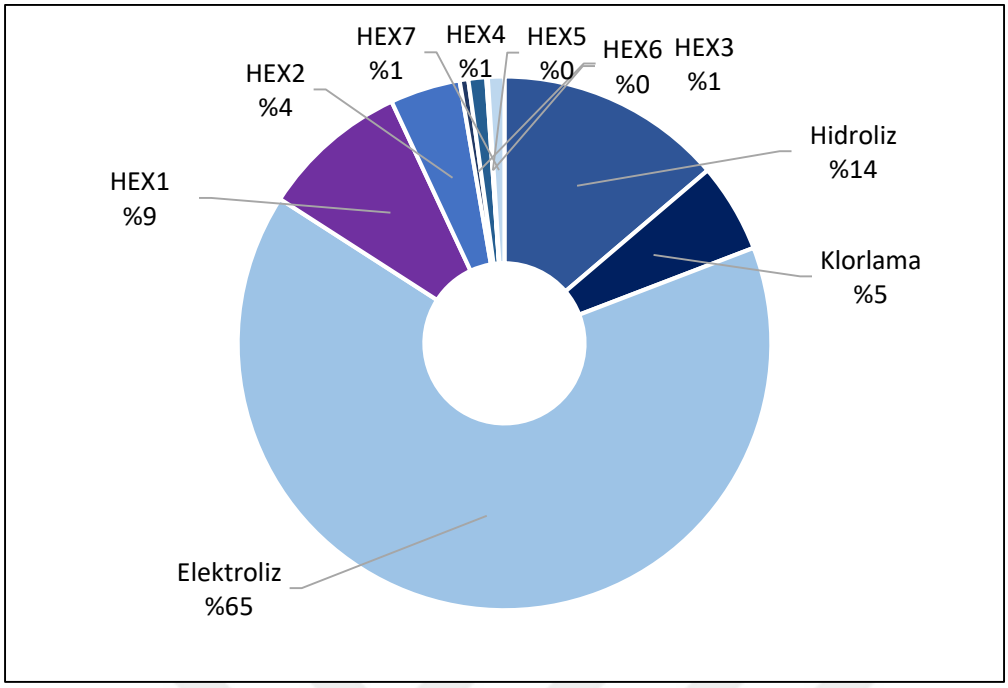
Şekil 6.9 üç-adımlı Mg-Cl çevrime ait ekipmanların termal enerji ihtiyaç ve tüketimlerini ve elektriksel güç verilerini sunmaktadır. Hidroliz reaksiyonu 92,09 MW ısıya ihtiyaç duyarken, klorlama reaksiyonu 33,96 MW ısı yaymaktadır. Elektrolizör yaklaşık 270,16

MW elektrik enerjisine ihtiyaç duyar. Isı değiştiricilerinin bazıları akışı bileşenleri gerekli sıcaklığa yükseltmek için kaynaktan ısı alırken, bazıları çevreye ısı vermektedir. HEX1 64,81 MW, HEX4 14,91 MW ve HEX6 ise 4,13 MW ısıya ihtiyaç duyarken, HEX2, HEX3, HEX5 ve HEX7 çevreye sırası ile 27,34 MW, 2,50 MW, 1,88 MW ve 7,47 MW ısı atmaktadır.



Şekil 6.9. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin ekipmanları için ısı/elektrik giriş ve çıkışları

Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin her bir ekipmanı için ekserji yok oluş oranları Şekil 6.10'da sunulmuştur. Çevrimde ekserji yok oluşuna en büyük katkı sağlayan ekipman elektrolizördür. Elektroliz reaksiyonu için ekserji yok oluşu %65 oranla 184,95 MW olarak hesaplanmıştır. İkinci katkı sağlayan reaksiyon hidroliz reaksiyonudur ve %14'lük bir oran ile 39,24 MW ekserji yok oluşuna sahiptir. Klorlama reaksiyonu için ekserji yok oluşu %5 oranla 15,39 MW olarak hesaplanırken, HEX1 %9 oranla 25,50 MW ekserji yok oluşuna sahiptir. Diğer ısı değiştiricilerin ekserji yok oluşu oranları çevrimdeki diğer ekipmanlara oranla daha düşük elde edilmiştir.



Şekil 6.10. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimin ekipmanları için ekserji yok oluşu oranları

Dört-adımlı Mg-Cl çevrim de üç-adımlı Mg-Cl çevrim ile benzer şekilde Aspen Plus programında simüle edilmiş ve ilgili veriler elde edilmiştir, (Çizelge 6.2).

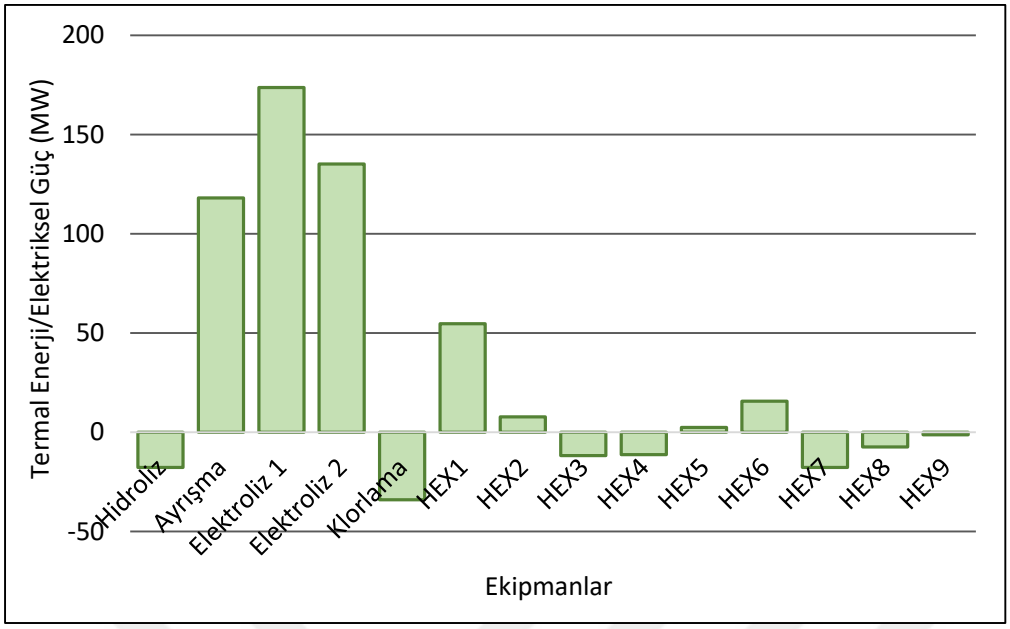
Çizelge 6.2. 4-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus simülasyonu termofiziksel özellikleri

Durum	Akış	Sıcaklık (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	ex (kJ/kg)
1	$MgCl_2$	280	95,21	-6532,29	-1,2543	57,24
1-	$MgCl_2$	280	95,21	-6532,29	-1,2543	57,24
2	H_2O	280	18,02	-12936,09	-1,2814	638,09
3	MgOHCl	280	76,77	-10264,22	-2,5983	42,16
4	HCl	280	36,46	-2327,78	0,7727	56,03
5	MgOHCl	450	76,77	-10162,91	-2,4386	95,85
6	HCl	70	36,46	-2649,44	-1,0111	266,20
7	MgO	450	40,30	-14447,21	-1,7109	185,32
8	HCl	450	36,46	-2189,03	0,9913	129,60
9	MgO	500	40,30	-14386,45	-1,6297	221,87
10	HCl	70	36,46	-2496,70	0,3887	1,59
11	H_2	70	1,01	645,80	2,0691	28,16
12	Cl_2	70	35,45	20,94	0,0680	1,06
13	H_2	70	1,01	645,80	2,0691	28,16

Çizelge 6.3. (devam) 4-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus simülasyonu termofiziksel özellikleri

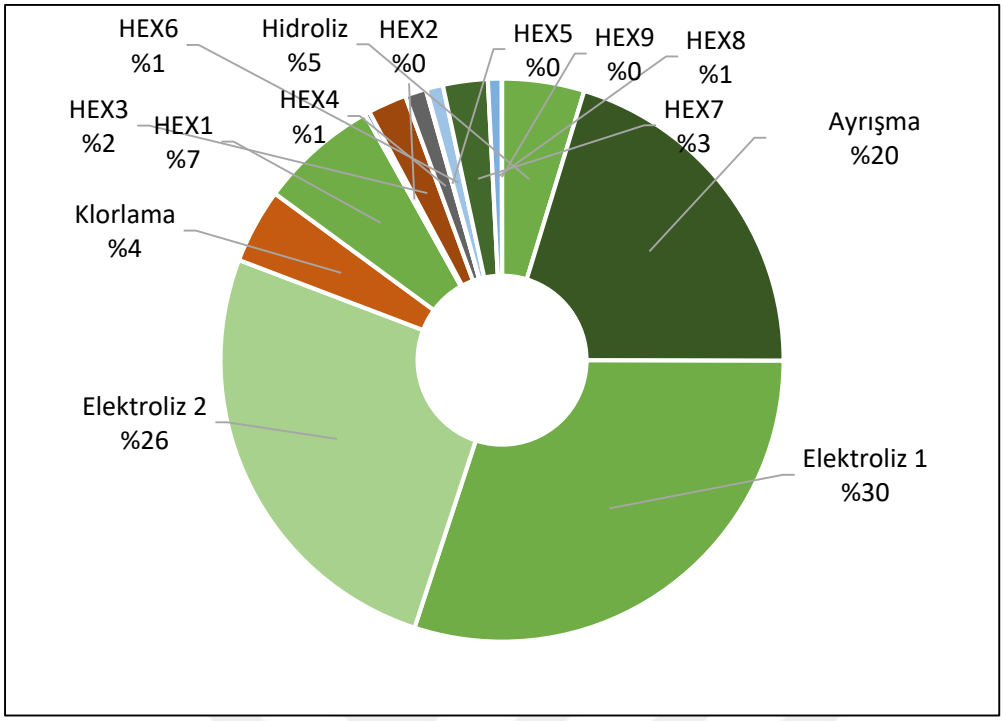
14	Cl_2	70	35,45	20,94	0,0680	1,06
15	H_2	70	2,02	645,80	2,0695	28,18
16	Cl_2	70	70,91	20,94	0,0681	1,06
17	Cl_2	500	70,91	188,90	0,4100	67,09
18	$MgCl_2$	500	95,21	-6345,60	-0,9705	159,30
19	O_2	500	16,00	466,49	0,9287	189,66
H2	H_2	25	2,02	0,27	0,0532	-16,19
H2O	H_2O	25	18,02	-15972,08	-9,3240	0,00
MIX1	MgOHCl/HCl	280	113,23	-7708,55	-1,5128	46,62
MIX2	HCl/MgO	450	76,77	-8625,01	-0,4275	158,86
MIX3	Cl_2/H_2	70	36,46	38,57	0,2820	1,80
MIX4	Cl_2/H_2	70	36,46	38,57	0,2820	1,80
MIX5	$MgCl_2/O_2$	500	111,21	-5365,57	-0,6973	163,66
O2	O_2	25	16,00	-0,29	0,0027	-1,02

Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus akış şemasında kullanılan tüm ekipmanlar için enerji analizleri Çizelge 6.2'de sunulan verilere göre yürütülmüştür. Analizler sonucunda elde edilen termal enerji tüketimleri ve salımları ve ayrıca gerekli elektrik enerjisi hesaplanmış, Şekil 6.11'de karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Hidroliz ve klorlama reaksiyonları dört-adımlı Mg-Cl çevrimde ekzotermik reaksiyonlar olarak sırasıyla yaklaşık 17,82 MW ve 33,96 MW ısı yaymakta, ayrışma reaksiyonu ise 118,06 MW ısıya ihtiyaç duymaktadır. Elektrolizör 1 ve elektrolizör 2 sırası ile 173,67 MW ve 135,08 MW elektriksel güce ihtiyaç duyarken, sistemin toplam elektrik ihtiyacı 308,75 MW olarak hesaplanmıştır. Çevrimde kullanılan ısı değiştiricilerden HEX1, HEX2, HEX5 ve HEX6 kaynaktan ısı alırken, diğer ısı değiştiriciler çevreye ısı yaymaktadır. En büyük kapasiteye sahip ısı değiştirici HEX1'dir ve yaklaşık olarak 54,69 MW ısıya ihtiyaç duyar.

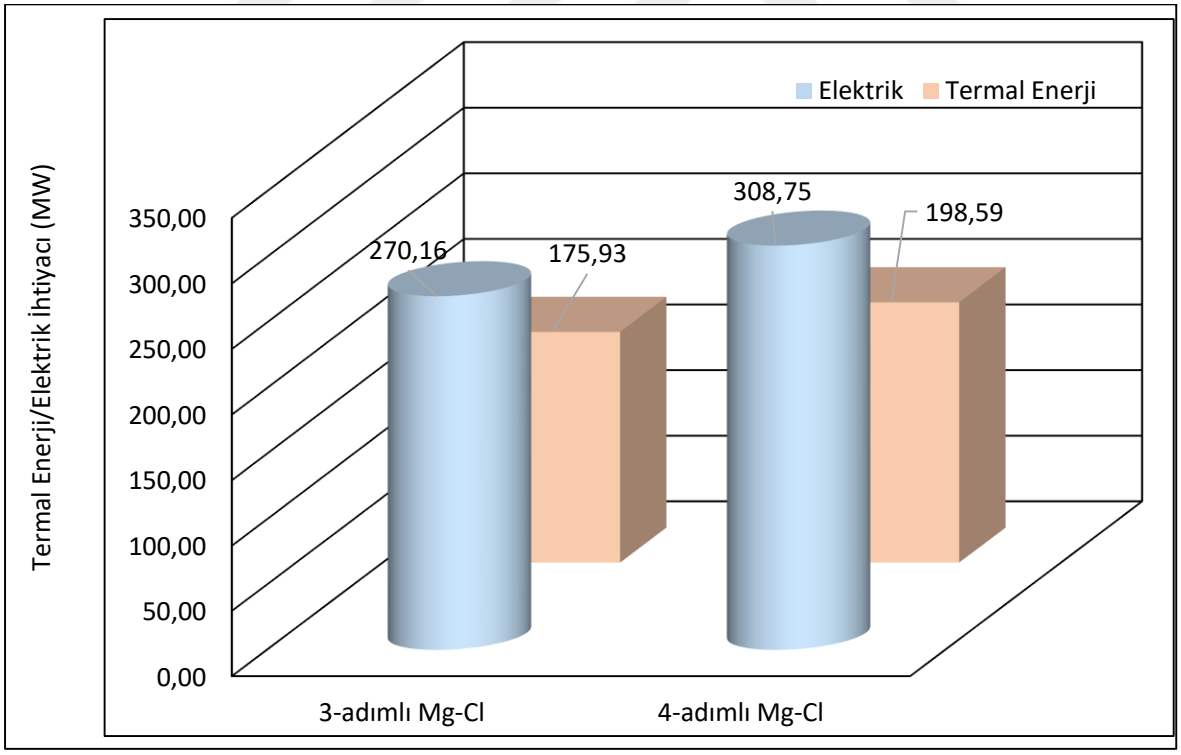


Şekil 6.11. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin ekipmanları için ısı/elektrik giriş ve çıkışları

Şekil 6.12 dört-adımlı Mg-Cl çevrimin ekserji yok oluş oranlarını vermektedir. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimle benzer olarak en büyük ekserji yok oluşuna sahip ekipmanlar elektrolizörlerdir, elektrolizör 1 %30 oranında, elektrolizör 2 ise %26 oranında katkı sağlar. Elektrolizörlerin toplam ekserji yok oluş değeri 200,08 MW olarak hesaplanmıştır. Üçüncü en yüksek ekserji yok oluşuna sahip reaksiyon ayrışma reaksiyonudur, %20 oranla 72,92 MW ekserji yok oluşu değerine sahiptir. Ardından %5 oran ve 16,93 MW ile hidroliz reaksiyonu ve daha sonra %4 oran ve 15,39 MW ile klorlama reaksiyonu gelir. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi simülasyonlarında kullanılan ısı değiştiricilerin ekserji yok oluşu (HEX1 hariç) değerleri reaktörlere nispeten çok düşüktür.



Şekil 6.12. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin ekipmanları için ekserji yok oluşu oranları



Şekil 6.13. 1 mol hidrojen üretimi için gerekli termal enerji ve elektriksel güç değerleri

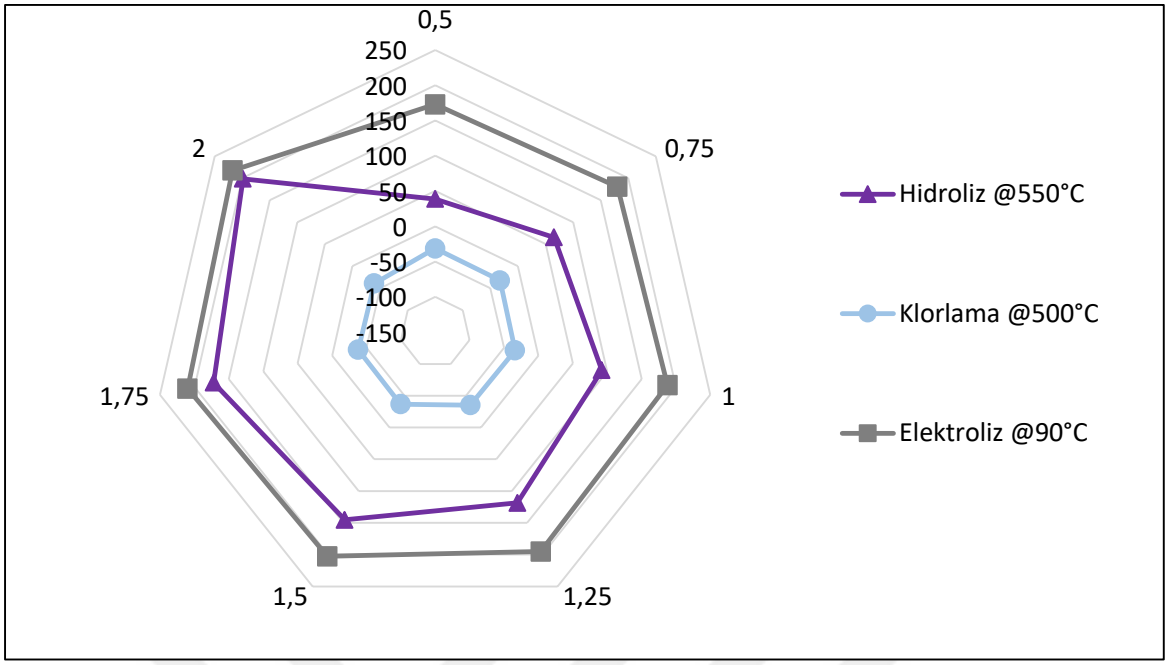
Aspen Plus simülasyonu ve enerji/ekserji analizleri sonucunda her bir çevrimin 1 mol hidrojen üretimi için ne kadar termal enerji ve elektriksel güce ihtiyaç duyduğu hesaplanmış

ve Şekil 6.13'te sunulmuştur. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi saniyede 2,02 kg hidrojen üretmek için 175,93 MW termal enerji ve 270,16 MW elektriksel güce ihtiyaç duyarken, dört-adımlı Mg-Cl çevrimi toplam 198,59 MW termal enerji ve 308,75 MW elektriksel güce ihtiyaç duymaktadır.

Analizler sonucunda, üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %54,23 ve %60,90 olarak hesaplanmıştır. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için ise enerji verimi %47,68 iken, ekserji verimi %53,72 olarak elde edilmiştir.

6.2.1. Hidrojen üretim çevrimlerinin parametrik analiz sonuçları

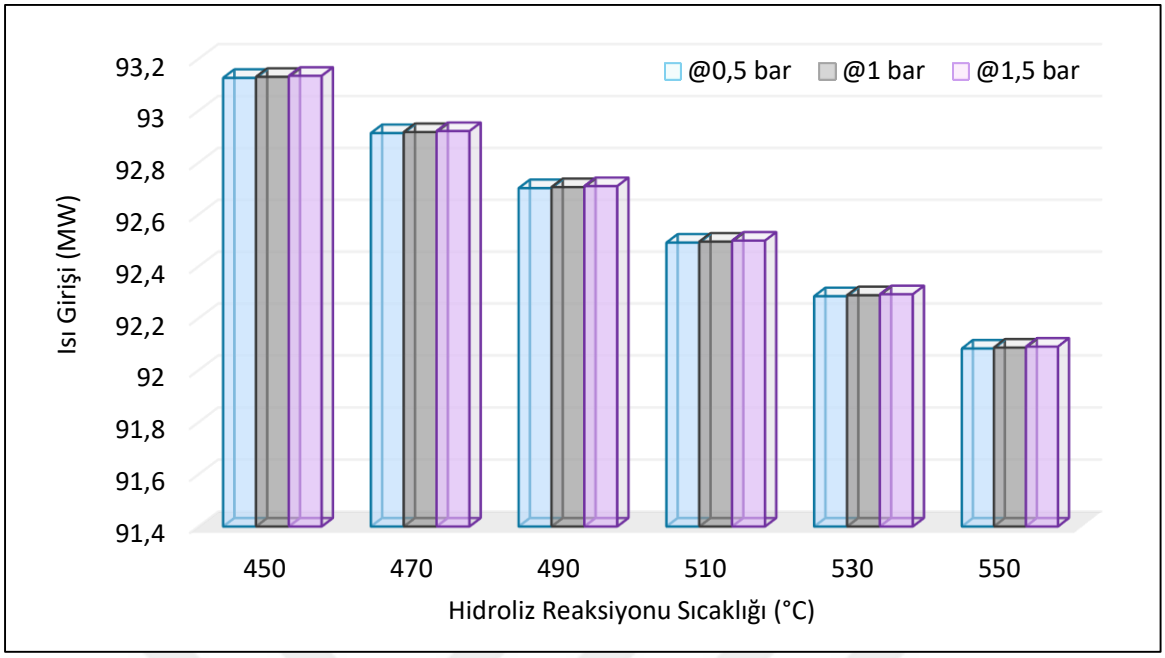
Şekil 6.14, üç-adımlı Mg-Cl çevriminin reaksiyonlarının buhar/$MgCl_2$ oranlarına göre termal enerji ve Gibbs serbest enerjisi değişimlerini göstermektedir. Hidroliz ve klorlama reaksiyonları için termal enerji değişimleri, elektroliz için ise Gibbs serbest enerjisi değişimleri verilmiştir. Endotermik bir reaksiyon olan hidroliz reaksiyonu, buhar miktarı $MgCl_2$ miktarına bağlı olarak arttıkça daha fazla ısı gerektirmektedir. Bu nedenle, daha düşük buhar/$MgCl_2$ oranları hidroliz için daha uygun dönüşüm sağlamaktadır. Klorlama reaksiyonu ekzotermik bir reaksiyondur ve reaksiyon entalpisi artan buhar miktarıyla azalmaktadır. Hidroliz reaksiyonu için ısı girdisi, buhar/MgCl2 oranı arttıkça artmaktadır. Hidrolizin ısı girdisi 0,50 buhar/MgCl2 oranı için 38,76 MW iken, 2,00 buhar/MgCl2 oranı için 198,73 MW olarak hesaplanmıştır. Klorlama reaksiyonu için ısı atımı, artan buhar/MgCl2 oranıyla birlikte artmaktadır. Klorlama reaktörü 0,5 buhar/MgCl2 oranında 31,26 MW ısı açığa çıkarırken, 2,00 buhar/MgCl2 oranında bu değer 39,36 MW olarak hesaplanmıştır. Elektroliz hücresinin Gibbs serbest enerjisi, artan buhar/MgCl2 oranıyla sürekli olarak artmaktadır ve en yüksek Gibbs serbest enerji değişimi 2,00 buhar/MgCl2 oranı için 217,56 MW olarak bulunmuştur.



Şekil 6.14. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi reaksiyonlarının buhar/$MgCl_2$ oranına göre termal enerji ve Gibbs serbest enerjisi değişimi

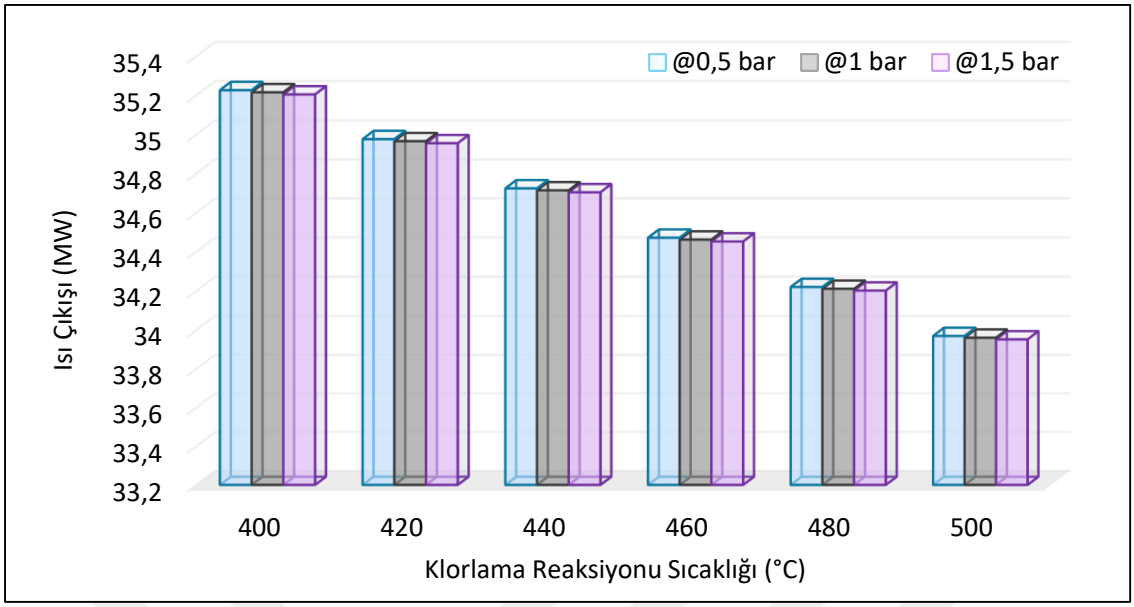
Şekil 6.15 ve 6.16 üç-adımlı Mg-Cl çevrimin hidroliz ve klorlama reaksiyonları için ısı giriş/çıkış değerlerini farklı sıcaklık ve basınçlar altında karşılaştırmaktadır.

Şekil 6.15'e göre, hidroliz reaksiyonunun ihtiyaç duyduğu ısı reaksiyon sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Ayrıca, basınç değişimlerine bağlı olarak ısı girdileri arasında önemli bir değişim görülmemektedir. Isı girişi değerleri, 550°C'de 0,5 bar, 1,0 bar ve 1,5 bar basınçlar için sırasıyla 92,084 MW, 92,087 MW ve 92,091 MW olarak hesaplanmıştır. Hidroliz reaktörünün yüksek sıcaklıklarda çalışması ile reaksiyonun ihtiyaç duyduğu ısı azalır ve böylece çevrim verimi artırılabilir.



Şekil 6.15. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi hidroliz reaksiyonu için ısı girişi değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi

Şekil 6.16 çeşitli sıcaklık ve basınçlara bağlı olarak klorlama reaksiyonunun ısı çıkışının değişimini göstermektedir. Reaktör sıcaklık ve basınç değerleri düştükçe klorlama reaksiyonunun ısı atımı azalmaktadır. 500°C için, ısı atımı değerleri sırasıyla 0,5 bar, 1,0 bar ve 1,5 bar için 33,95 MW, 33,97 MW ve 33,95 MW olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak hem hidroliz hem de klorlama reaksiyonları için atmosferik basınç altında çalışma reaksiyonların gerçekleşmesi uygundur, diğer basınç değerleri ile arasında büyük faklar görülmemiştir. Bu nedenle, bu çevrimde basınçlandırma ekipmanına ihtiyaç duyulmaz ve maliyet artışları önlenebilir. Bununla birlikte, reaktör sıcaklığı bu reaksiyonlar için önemli bir parametredir. Daha yüksek sıcaklık değerleri hidroliz reaksiyonu için daha uygunken, klorlama reaksiyonu için ısı atımı artan sıcaklıkla azalır. Klorlama reaksiyonundan elde edilen ısının başka bir tesiste kullanılması durumunda sistem verimi artacağından, klorlama reaksiyonunun düşük sıcaklıklarda çalışması daha uygun olarak görülmektedir.



Şekil 6.16. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi klorlama reaksiyonu için ısı çıkışı değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi

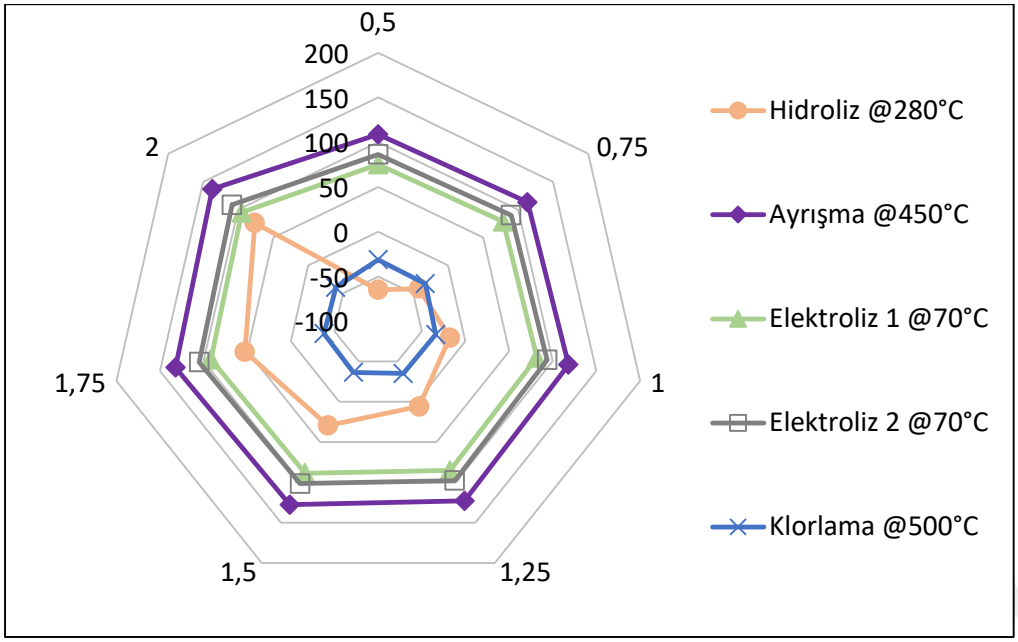
Hidroliz, ayrışma ve klorlama reaksiyonlarının buhar/$MgCl_2$ oranına göre ısı girişi/çıktı değişimleri ve elektroliz hücreleri için Gibbs serbest enerjisi değişimleri Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Hidroliz reaksiyonu, buhar/$MgCl_2$ oranı 1 olduğunda ekzotermik bir reaksiyondur. Ancak, bu durum buhar/$MgCl_2$ oranı değişimi ile değişir ve buhar/$MgCl_2$ oranı arttıkça reaksiyon ekzotermikten endotermiğe dönmektedir. Tepkime oranlarındaki değişim, daha fazla ısı almasına veya vermesine neden olabilir. Ayrıca, reaksiyon sıcaklığı daha fazla buhar eklenerek artabilir. Dolayısıyla, bu sıcaklık değişimi reaksiyon kinetiğini etkileyerek onu ekzotermik bir reaksiyondan endotermik bir reaksiyona dönüştürebilir.

Üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimlerinin hidroliz reaksiyonları karşılaştırıldığında, artan sıcaklığın reaksiyonun entalpisini değiştirebileceği gözlemlenmektedir. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimde hidroliz reaksiyonu 450°C'de endotermik bir reaksiyon iken, dört-adımlı Mg-Cl çevriminde hidroliz reaksiyonu 280°C'de ekzotermik bir reaksiyondur. Dört-adımlı Mg-Cl çevriminin hidroliz reaksiyonu için, reaksiyon daha düşük buhar/$MgCl_2$ oranlarında ekzotermik olduğundan, ısı ihtiyacını azaltmak için daha az buhar verilmesi daha uygundur. Artan buhar miktarı ile reaksiyonun gerçekleşmesi için ısıya ihtiyaç duyulmaya başlamaktadır. Bu da çevrimin verimini negatif yönde etkilemektedir.

Ayrışma reaksiyonu ile ilgili olarak, ısı girişi buhar/$MgCl_2$ oranının artmasıyla artmaktadır. 0,5 buhar/$MgCl_2$ oranı için ısı girişi 108,66 MW iken, 2,0 buhar/$MgCl_2$ oranı için 136,84

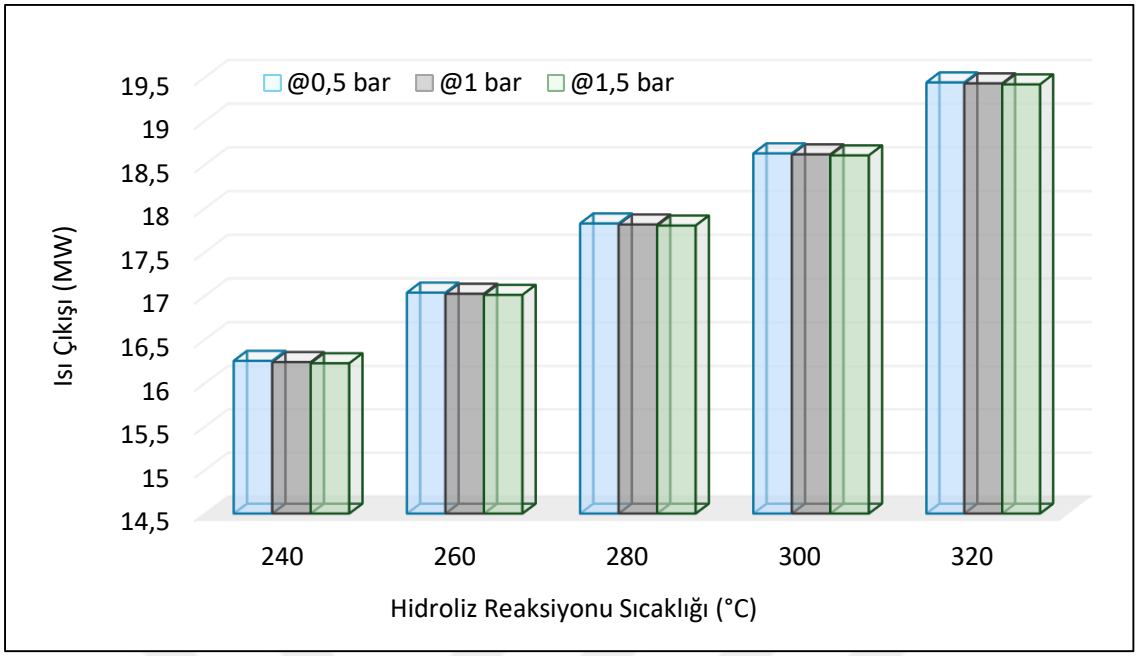
MW değerine yükselmektedir. Son olarak, elektroliz hücreleri için Gibbs serbest enerji değişimi buhar/$MgCl_2$ oranıyla doğru orantılı olarak artmaktadır.

Klorlama reaksiyonu için, buhar/$MgCl_2$ oranı artırılarak ısı çıkışı artmaktadır. Bu nedenle, daha düşük buhar/$MgCl_2$ oranları klorlama reaksiyonu için daha uygundur.



Şekil 6.17. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi reaksiyonlarının buhar/$MgCl_2$ oranına göre termal enerji ve Gibbs serbest enerjisi değişimi

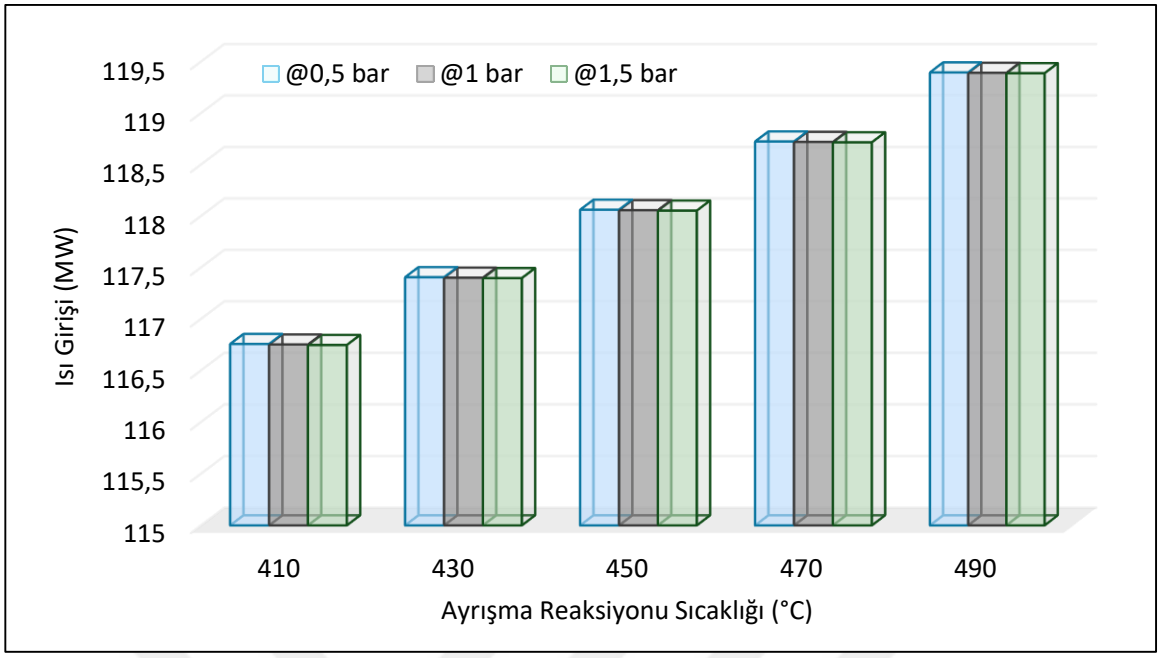
Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için hidroliz, ayrışma ve klorlama reaksiyonları ısı giriş/çıkışları farklı sıcaklık ve basınç değerleri altında değerlendirilmiştir.



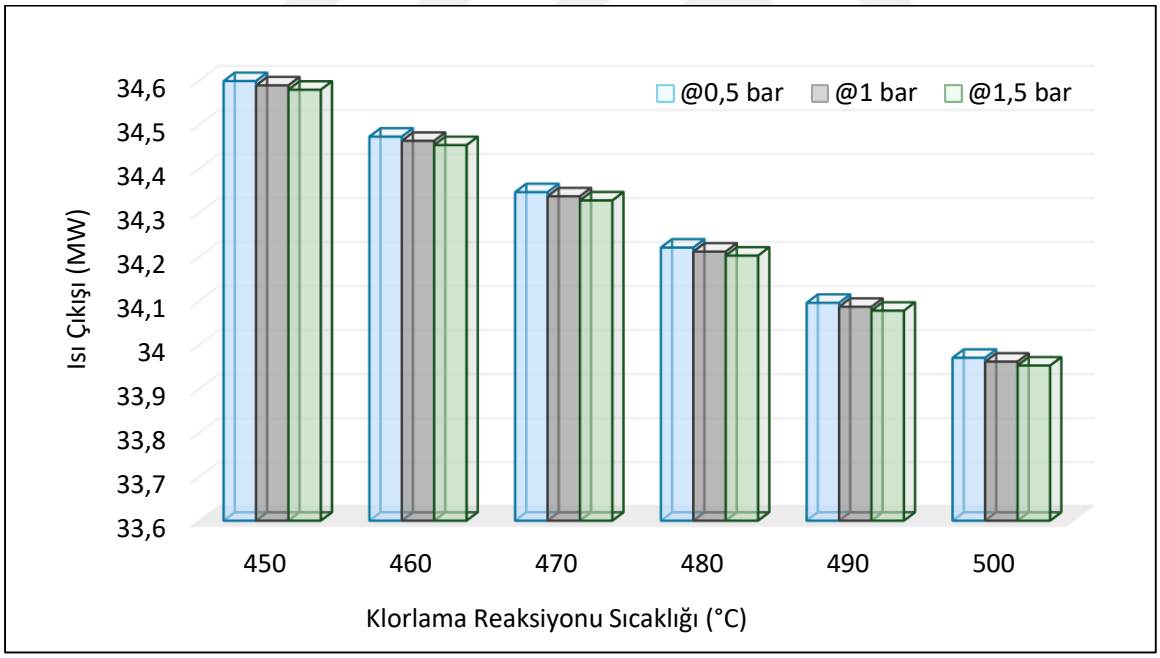
Şekil 6.18. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi hidroliz reaksiyonu için ısı çıkışı değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi

Hidroliz reaksiyonu için ısı çıkışı, reaksiyon sıcaklıkları arttıkça artarken, klorlama reaksiyonu için azalmaktadır. Hidroliz reaksiyonu, 280°C sıcaklık ve 1 bar basınç altında 17,82 MW ısıl güç üretmektedir. Klorlama reaksiyonunun ısı atımı ise, 500°C ve 1 bar basınçta 33,96 MW olarak hesaplanmıştır. Ayrışma reaksiyonunun entalpi değeri, artan sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Ayrışmanın ısıl güç değeri, 450°C ve 1 bar basınçta 117,40 MW olarak hesaplanmıştır. Endotermik olan ayrışma reaksiyonunda düşük sıcaklıklar daha az ısı ihtiyacı gerektirdiğinden çevrim verimini olumlu yönde etkilemektedir.

Ayrıca, sıcaklıklara göre önemli değişimler olmasına rağmen, her üç reaksiyon için de basınçlara bağlı olarak ısıl güçte büyük farklılıklar bulunmamaktadır. Bu nedenle, üç adımlı Mg-Cl çevrimi gibi maliyeti düşürmek için dört adımlı Mg-Cl çevrimi için atmosferik basınç koşulları kullanılabilir. Hidroliz reaksiyonu, daha yüksek sıcaklık koşullarında daha fazla ısı açığa çıkarmaktadır. Bu atık ısı başka bir proseste kullanılırsa, daha yüksek sıcaklıklar daha uygun olabilir. Ancak, yüksek sıcaklıklar sağlamak ve reaktörü izole etmek daha maliyetli olabilir. Daha düşük sıcaklıklar, ayrışma ve klorlama reaksiyonları için daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.19. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi ayrışma reaksiyonu için ısı girişi değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi



Şekil 6.20. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi klorlama reaksiyonu için ısı çıkışı değerlerinin sıcaklık ve basınçla değişimi

6.2.2. Model doğrulama sonuçları

Bu tez kapsamında, Aspen Plus programı ile yapılan hidrojen üretim çevrimi simülasyonların doğrulanması için Shomate ısı kapasitesi denklemleri kullanılarak üç-

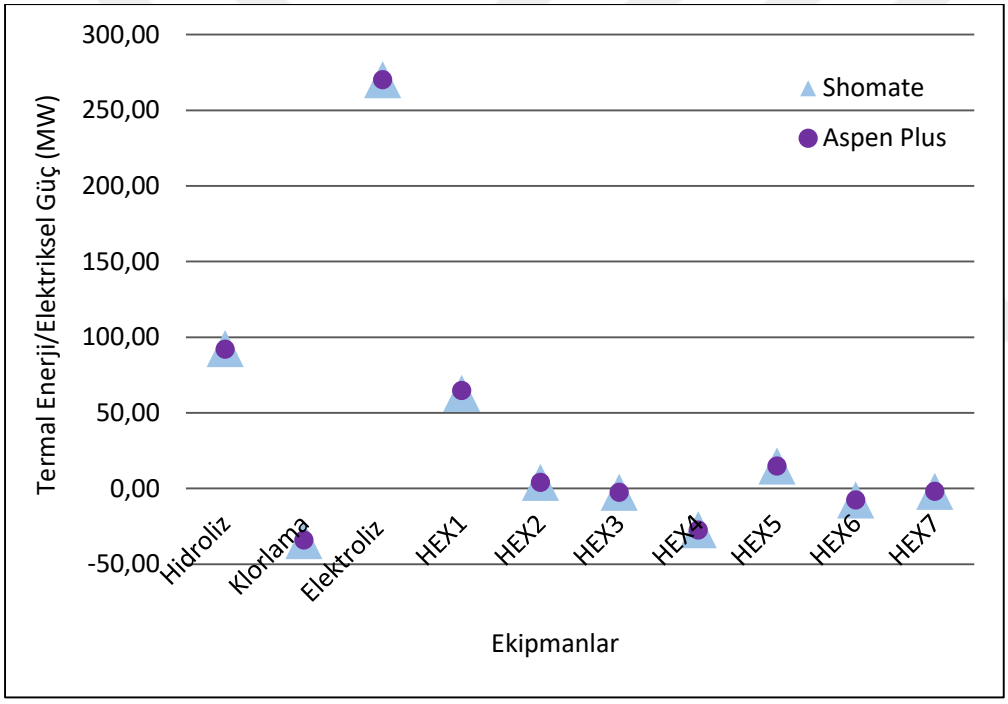
adımlı Mg-Cl çevrim için bir analiz yürütülmüştür. Analiz sonucunda her bir bileşik için kütlesel debiler ve ilgili sıcaklık değerlerinde entalpi, entropi ve ekserji değerleri hesaplanmış, Çizelge 6.3'te sunulmuştur.

Çizelge 6.3. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi Shomate denklemi analizi termofiziksel özellikleri

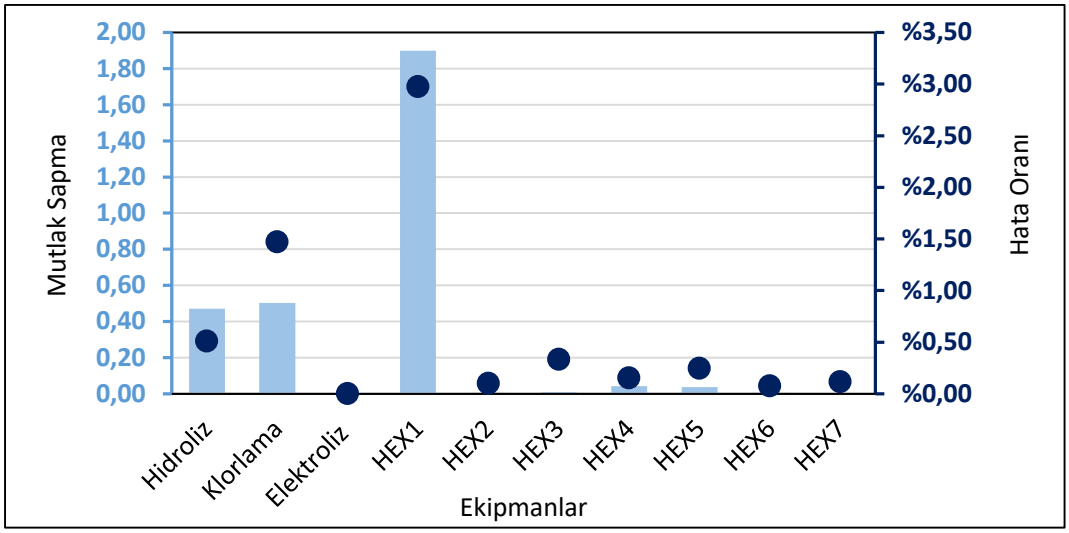
Durum	Akış	Sıcaklık (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	h (kJ/g)	s (kJ/g K)	ex (kJ/g)
0	$MgCl_2$	25	-	-6,7391	0,00094	0
0	MgO	25	-	-14,9181	0,00067	0
0	HCl	25	-	-2,5319	0,00513	0
0	Cl_2	25	-	-0,0001	0,00315	0
3	H_2O	25	18,02	-15,8665	0,00388	0
4	H_2O	550	18,02	-12,3747	0,01249	0,9277
5	$MgCl_2$	550	95,21	-6,3055	0,00177	0,1864
6	MgO	550	40,30	-14,3206	0,00180	0,2604
7	HCl	550	72,92	-2,1057	0,00595	0,1814
8	MgO	500	40,30	-14,3821	0,00172	0,2219
9	HCl	90	72,92	-2,4800	0,00528	0,0050
10	Cl_2	500	70,91	0,2413	0,00363	0,0980
11	$MgCl_2$	500	95,21	-6,3489	0,00172	0,1593
12	O_2	500	16,00	0,4663	0,00734	0,1904
13	O_2	25	16,00	-0,0001	0,00641	0,0000
14	Cl_2	90	70,91	0,0315	0,00324	0,0030
15	H_2	90	2,02	0,9329	0,06766	0,0893
16	H_2	25	2,02	-0,0021	0,06482	0,0000

Shomate ısı kapasitesi denklemi kullanılarak, üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ekipmanları için termal enerji ve elektriksel güç hesabı yapılmış ve Aspen Plus simülasyonu sonucunda hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır, Şekil 6.21. Buna ek olarak, Şekil 6.22'de üç-adımlı Mg-Cl çevrimin her bir ekipmanı için yapılan analizlerin mutlak sapması ve hata oranı verilmiştir. Hidroliz reaksiyonu için entalpi değeri Aspen Plus simülasyonu ile 92,09 MW elde edilirken, 0,47'lik bir sapma ile %0,51 hata oranıyla Shomate ısı kapasitesi

denklemleri ile 92,56 MW elde edilmiştir. Benzer şekilde klorlama reaksiyonu için, Aspen Plus simülasyonu sonuçları 33,96 MW ısı ihtiyacı hesabı yapılırken, 0,50 mutlak sapma ve %1,47 hata oranı ile bu değer Shomate ısı kapasitesi denklemleri aracılığıyla 33,46 MW olarak hesaplanmıştır. Isı değiştiriciler arasında en büyük sapma ve hata oranına sahip olan HEX1'dir. HEX1 için ısı kapasitesi Aspen Plus simülasyonu ile 64,81 MW olarak hesaplanırken, Shomate ısı kapasitesi denklemleri ile 62,91 MW olarak hesaplanmıştır. HEX1 sonuçlarına ait mutlak sapma 1,90 iken, hata oranı %2,97 olarak hesaplanmıştır, ki bu hata oranı çevrimin tüm ekipmanları arasında en büyük hata oranıdır. %3'ten daha az olan hata oranları ile Aspen Plus simülasyonunun doğruluğu Shomate ısı kapasitesi denklemleri hesabı ile vurgulanmıştır.

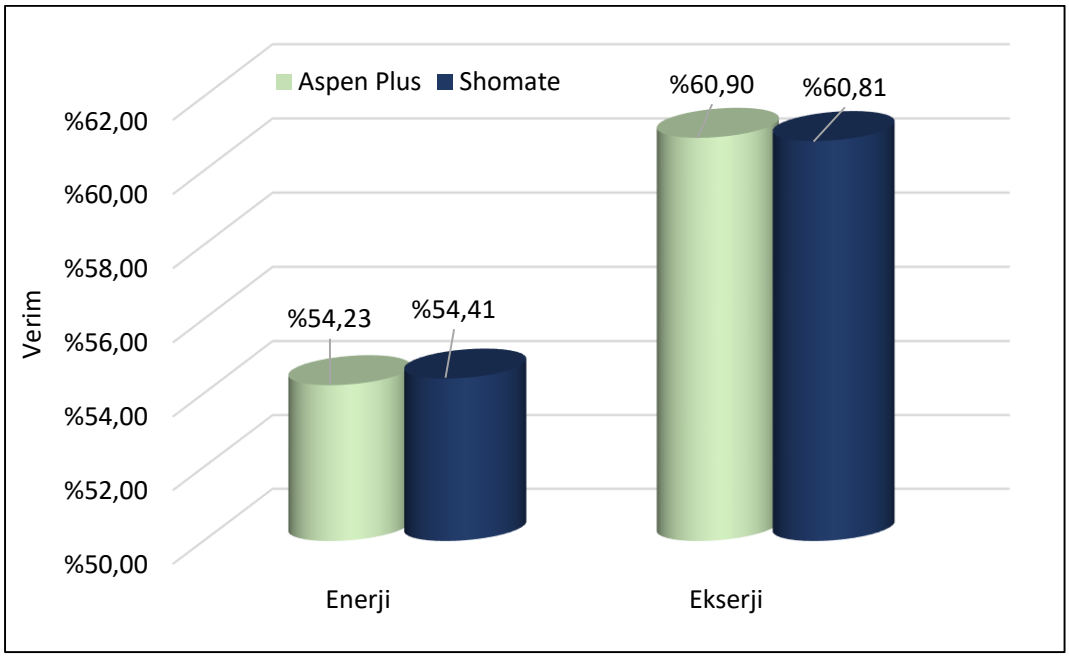


Şekil 6.21. Aspen Plus simülasyonu ve Shomate ısı kapasitesi hesapları karşılaştırması



Şekil 6.22. Model doğrulamasına ait mutlak sapma ve hata oranları

Ek olarak, üç-adımlı Mg-Cl çevrimin enerji ve ekserji verimlilikleri her iki metot (Aspen Plus simülasyonu ve Shomate ısı kapasitesi hesabı) için ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Verim karşılaştırma grafiği Şekil 6.23'te sunulmuştur. Aspen Plus simülasyonu sonucunda bulunan verilere dayanarak çevrimin enerji verimi %54,23 ve ekserji verimi %60,90 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde verim hesapları Shomate ısı kapasitesi denklemleriyle elde edilen entalpi, entropi ve ekserji değerleri kullanılarak tekrar hesaplanmış ve değerler sırası ile %54,41 ve %60,81 olarak elde edilmiştir.



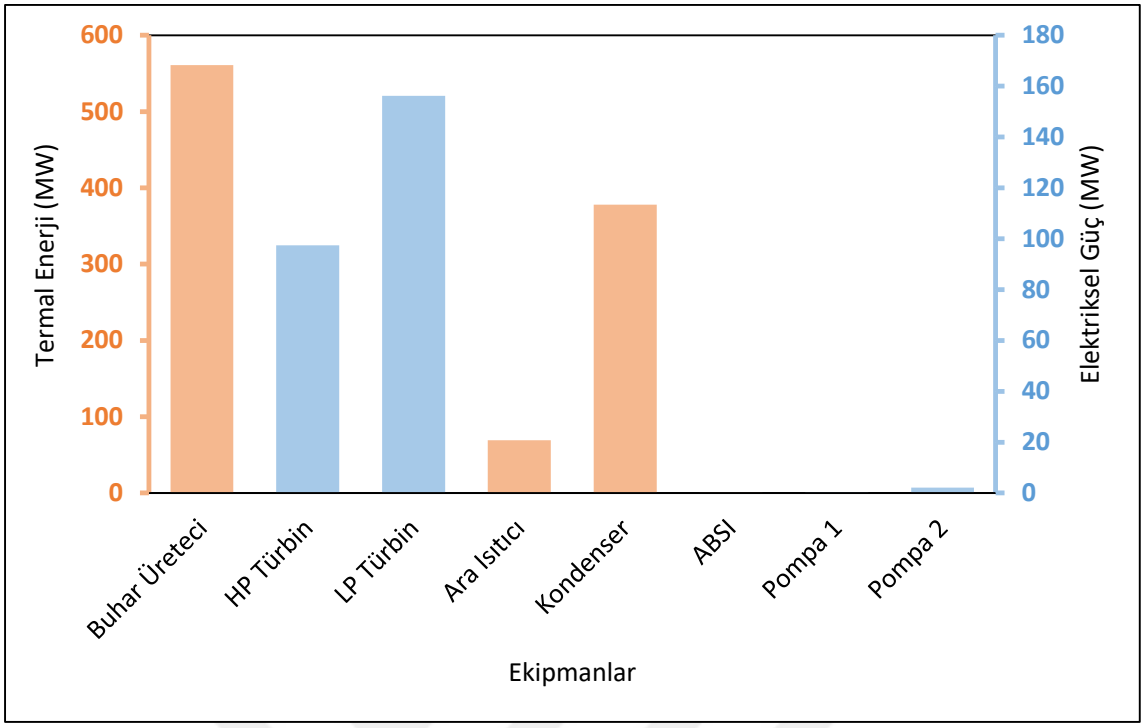
Şekil 6.23. Üç-adımlı Mg-Cl çevrime ait enerji ve ekserji verimleri

6.3. ARC Füzyon Reaktörü Sürücülü Entegre Enerji Sistemleri Analiz Sonuçları

Tez kapsamında, ilk olarak ARC füzyon reaktörünün orijinal tasarımı için bir Rankine çevrimi modellenmiş ve her bir adım için termofiziksel özellikler belirlenmiş, her bir akışın kütlesel debi, entalpi, entropi ve ekserji değerleri belirlenmiştir. (Çizelge 6.4) orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevriminin (Şekil 4.1) analizlerinde kullanılmak üzere her bir akış için gerekli termofiziksel özellikleri sunmaktadır. Her bir akışın sıcaklık ve basınç değerleri belirlendikten sonra ilgili entalpi ve entropi verileri su için EES kullanılarak çekilmiş, FLiBe soğutucu için ise NIST Webbook [152] kullanılarak Shomate ısı kapasitesi denklemleri ile hesaplanmıştır.

Çizelge 6.4. Orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevrimi termofiziksel özellikleri

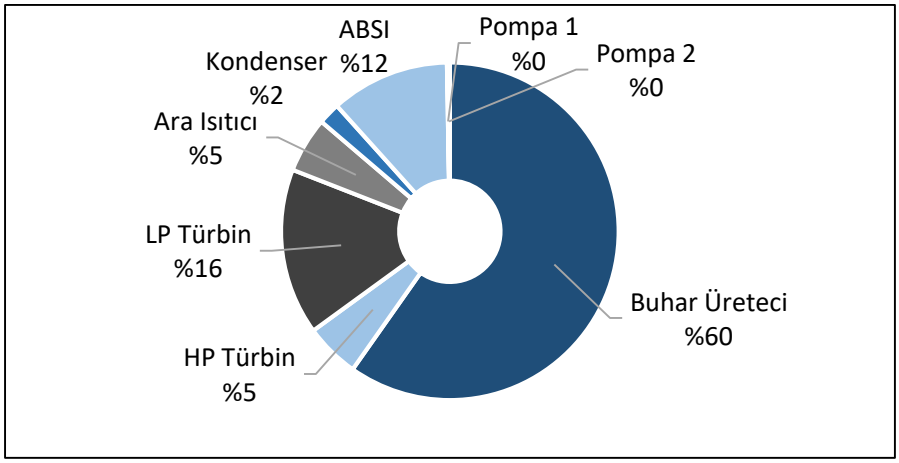
Durum	Akış	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Kütlesel Debi (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	ex (kJ/kg)
0	H_2O	25	1,00	-	104,90	0,3672	0,00
0	FLiBe	25	1,00	-	-22991,76	1319,81	0,00
1	FLiBe	627	60,00	2684,32	-21417,09	3891,85	-764892,12
2	FLiBe	600	60,00	2684,32	-21480,46	3820,36	-743652,47
3	FLiBe	527	60,00	2684,32	-21651,79	3615,42	-682749,95
4	H_2O	525,00	76,60	215,44	3465,00	6,8290	1434,48
5	H_2O	313,20	15,55	54,11	3066,00	6,9520	998,83
6	H_2O	275,40	11,17	161,33	2995,00	6,9740	921,27
7	H_2O	475,10	11,17	161,33	3424,00	7,6410	1151,51
8	H_2O	26,67	0,04	161,33	2456,00	8,2090	14,24
9	H_2O	26,67	0,04	161,33	112,00	0,3912	-0,05
10	H_2O	26,88	15,55	161,33	114,11	0,3930	1,52
11	H_2O	200,00	15,55	215,44	852,00	2,3300	162,19
12	H_2O	202,00	76,60	215,44	861,94	2,3360	170,34



Şekil 6.24. Orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri

Açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi için birinci ve ikinci yasa analizleri yapılmış, çevrimdeki her ekipman ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 6.24 Rankine çevriminde bulunan her ekipmanın hesaplanan ısı kapasitesi ve elektriksel güç değerlerini sunmaktadır. Çevrimin buhar üreteci ve ara ısıtıcısında ARC füzyon reaktöründen gelen toplam 630 MW termal enerji tüketilir ve sonuç olarak %39,86'lık bir enerji verimi ile 251,09 MW elektrik üretimi gerçekleştirilir. Buhar üretecinde 560,79 MW, ara ısıtıcıda ise 69,21 MW termal enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Çevrimin elektrik üretim ve tüketim değerleri HP türbin, LP türbin ve pompalar için sırası ile 97,41 MW, 156,16 MW ve pompalar için toplam 1,59 MW olarak hesaplanmıştır. Kondenser çevreye 378,15 MW ısı atarken ABSI'nda 0,76 MW termal enerji kullanılabilir durumdadır.

Şekil 6.25 Rankine çevrimindeki her ekipmanın ekserji yok oluş oranlarını sunmaktadır. Ekserji yok oluşuna en fazla buhar üreteci neden olurken, en az ekserji yok oluş değerleri neredeyse %0 etki ile pompalara aittir. Buhar üreteci 102,35 MW ile yaklaşık %60 orana sahiptir. İkinci sırada LP türbin %16 oranla, 27,31 MW ekserji yok oluşuna katkı sağlamaktadır. Açık besleme suyu ısıtıcısı için ekserji yok oluşu 19,51 MW olarak hesaplanmıştır. HP türbin ve ara ısıtıcı ise aynı oranı paylaşarak, %5, sırasıyla 30,05 MW ve 30,53 MW ile yaklaşık değerlerde ekserji yok oluşuna sebep olmaktadırlar.



Şekil 6.25. Orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevrimi ekipmanlarının ekserji yok oluş oranları

ARC füzyon reaktörü için açık besleme suyu ısıtıcı Rankine çevrimi modellendikten sonra hidrojen üretimi için sırası ile üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimleri sisteme entegre edilmiştir. Entegrasyonda, hidrojen üretimi için gerekli ısı ARC füzyon reaktöründen sağlanırken, çevrimlerin elektrik ihtiyacı modellenen Rankine çevrimi ile sağlanmıştır. Şekil 4.13'te ve 4.14'te görülen entegre sistemlerin analiz sonuçları grafiklerle aşağıda verilmiş ve sistemlerdeki her akış için termofiziksel özellikler Çizelge 6.5 ve 6.6'da sunulmuştur.

Çizelge 6.5. ARC füzyon reaktörü sürücülü üç-adımlı magnezyum-klor çevrimi termofiziksel özellikleri

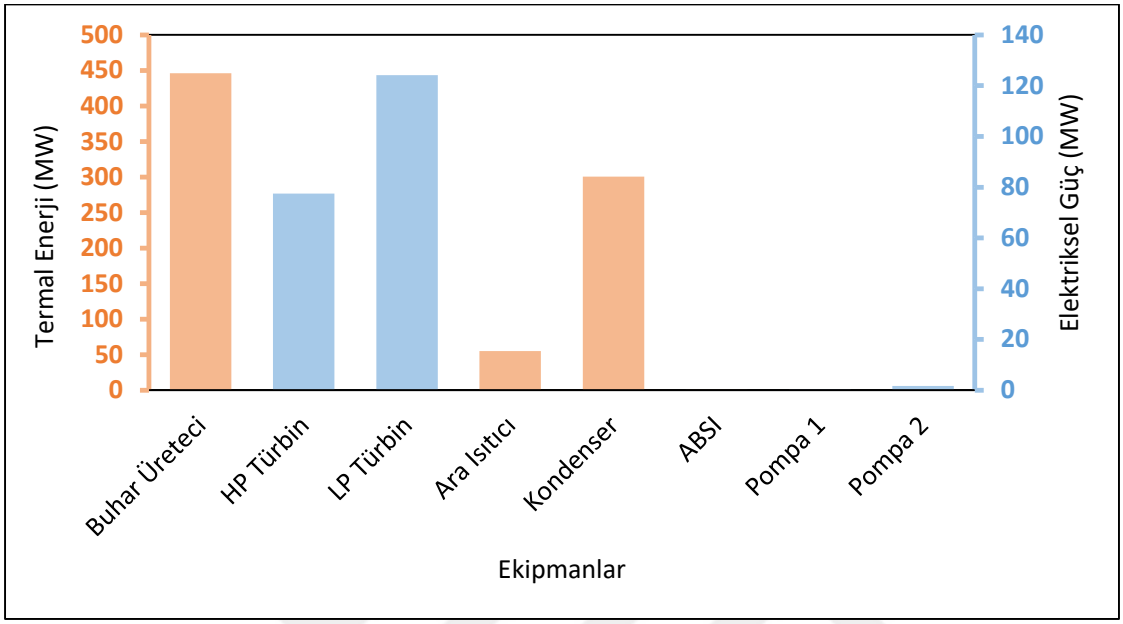
Durum	Akış	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Kütlesel Debi (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	ex (kJ/kg)
0	H_2O	25	1,00	-	104,90	0,3672	0.00
0	FLiBe	25	1,00	-	-22991,76	1319,81	0.00
0	CO_2	25	1,00	-	-0,94	0,0022	0.00
1	FLiBe	627	60,00	2684,32	-21417,09	3891,85	-764892,12
2	FLiBe	607	60,00	2684,32	-21480,46	3820,36	-743652,47
3	FLiBe	607	60,00	2684,32	-21465,13	3837,85	-748849,12
4	FLiBe	527	60,00	2684,32	-21651,79	3615,42	-682749,95
5	CO_2	590	35,00	3592,27	554,00	0,3669	446,26
6	CO_2	560	35,00	3592,27	589,90	0,4093	469,52
21	H_2O	525	76,60	171,34	3465,00	6,8290	1434,48
22	H_2O	313	15,55	43,03	3066,00	6,9520	998,83
23	H_2O	275	11,17	128,30	2995,00	6,9740	921,27
24	H_2O	475	11,17	128,30	3424,00	7,6410	1151,51
25	H_2O	27	0,04	128,30	2456,00	8,2090	14,24
26	H_2O	27	0,04	128,30	112,00	0,3912	-0,05
27	H_2O	27	15,55	128,30	114,11	0,3930	1,52
28	H_2O	200	15,55	171,34	852,00	2,3300	162,19
29	H_2O	202	76,60	171,34	861,94	2,3360	170,34

Çizelge 6.6. ARC füzyon reaktörü sürücülü dört-adımlı magnezyum-klor çevrimi termofiziksel özellikleri

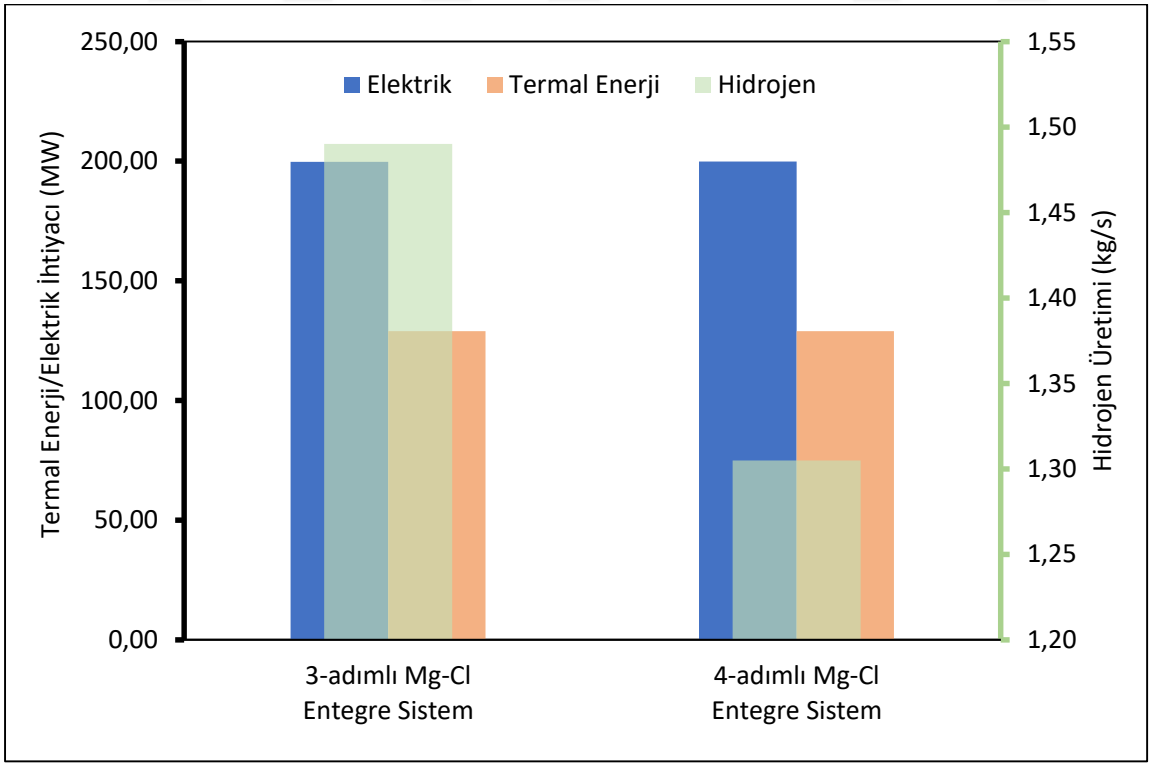
Durum	Akış	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Kütlesel Debi (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	ex (kJ/kg)
0	H_2O	25	1,00	-	104.90	0,3672	0,00
0	FLiBe	25	1,00	-	-22991,76	1319,81	0,00
0	CO_2	25	1,00	-	-0,94	0,0022	0,00
1	FLiBe	627	60,00	2684.32	-21417,09	3891.85	-764892,12
2	FLiBe	607	60,00	2684.32	-21480,46	3820.36	-743652,47
3	FLiBe	607	60,00	2684,32	-21465,13	3837,85	-748849,12
4	FLiBe	527	60,00	2684,32	-21651,79	3615,42	-682749,95
5	CO_2	590	35,00	3592,27	554,00	0,3669	446,26
6	CO_2	560	35,00	3592,27	589,90	0,4093	469,52
27	H_2O	525	76,60	171,48	3465,00	6,8290	1434,48
28	H_2O	313	15,55	43,07	3066,00	6,9520	998,83
29	H_2O	275	11,17	128,41	2995,00	6,9740	921,27
30	H_2O	475	11,17	128,41	3424,00	7,6410	1151,51
31	H_2O	27	0,04	128,41	2456,00	8,2090	14,24
32	H_2O	27	0,04	128,41	112,00	0,3912	-0,05
33	H_2O	27	15,55	128,41	114,11	0,3930	1,52
34	H_2O	200	15,55	171,48	852,00	2,3300	162,19
35	H_2O	202	76,60	171,48	861,94	2,3360	170,34

ARC füzyon reaktörünün orijinal tasarımı için modellenen Rankine çevriminde 630 MW reaktör termal gücü tamamen elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Sisteme hidrojen üretim tesisi entegresinde bu termal gücün belli bir kısmı direkt olarak hidrojen üretim tesisine ve kalan kısmı Rankine çevrimine gönderilmektedir. Bu bağlamda Rankine çevrimine gönderilen termal enerji azalacağından buharın kütlesel debi de azalmaktadır. Böylece, Rankine çevriminde kullanılan her bir ekipmanın termal enerji ve elektriksel güç değerleri değişiklik göstermektedir. Şekil 6.26 hidrojen üretim çevrimlerinin entegre edildiği durum için modellenen Rankine çevrimi ekipmanları için termal enerji ve elektriksel güç değerlerini vermektedir. Buhar üreteci orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevriminde 560,79 MW termal enerjiye ihtiyaç duyarken, bu değer hidrojen üretim çevrimi entegreli sistemlerde 445,99 MW olarak hesaplanmıştır. Çevrimde toplam 200 MW

elektriksel güç üretilirken bunun 124,19 MW'ı LP türbine aittir. Ek olarak, kondenser 300,74 MW ısıyı çevreye atmaktadır.



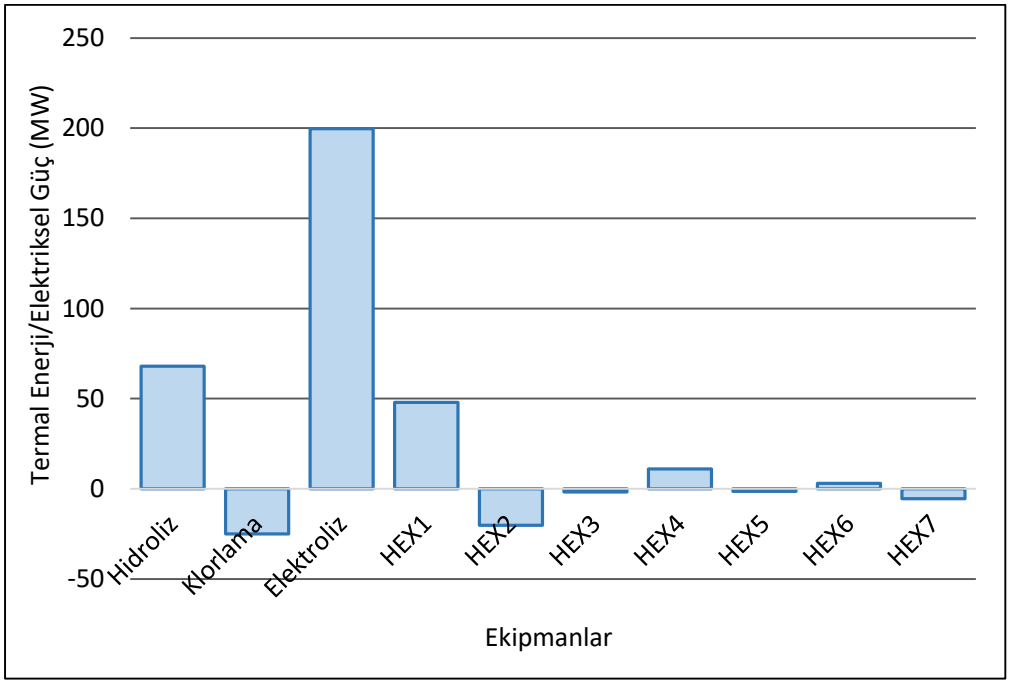
Şekil 6.26. Hidrojen üretim çevrimi entegreli sistemler için modellenen Rankine çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri



Şekil 6.27. ARC füzyon reaktörü entegreli hidrojen üretim sistemlerinin çıktıları

ARC füzyon reaktörü sürücülü üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrim entegre sistemlerinde aynı Rankine çevrimi kullanılarak hidrojen üretim potansiyelleri karşılaştırılmıştır. Aynı termodinamik çevrim kullanılması durumunda, üç-adımlı Mg-Cl çevrimi kullanılan entegre sistem 1,49 kg/s hidrojen üretirken, dört-adımlı Mg-Cl çevrimi kullanılan entegre sistem saniyede 1,30 kg hidrojen üretmiştir. Şekil 6.27 iki farklı çevrim kullanılan entegre sistemlerde hidrojen üretim çevrimine gönderilen termal enerji, elektriksel güç ve çevrimlerde üretilen hidrojen miktarlılarını göstermektedir. Hidrojen üretim çevrimlerine yaklaşık 200 MW elektriksel güç ve 128,96 MW termal enerji gönderilerek sırasıyla 1,49 ve 1,30 kg/s hidrojen üretilmiştir.

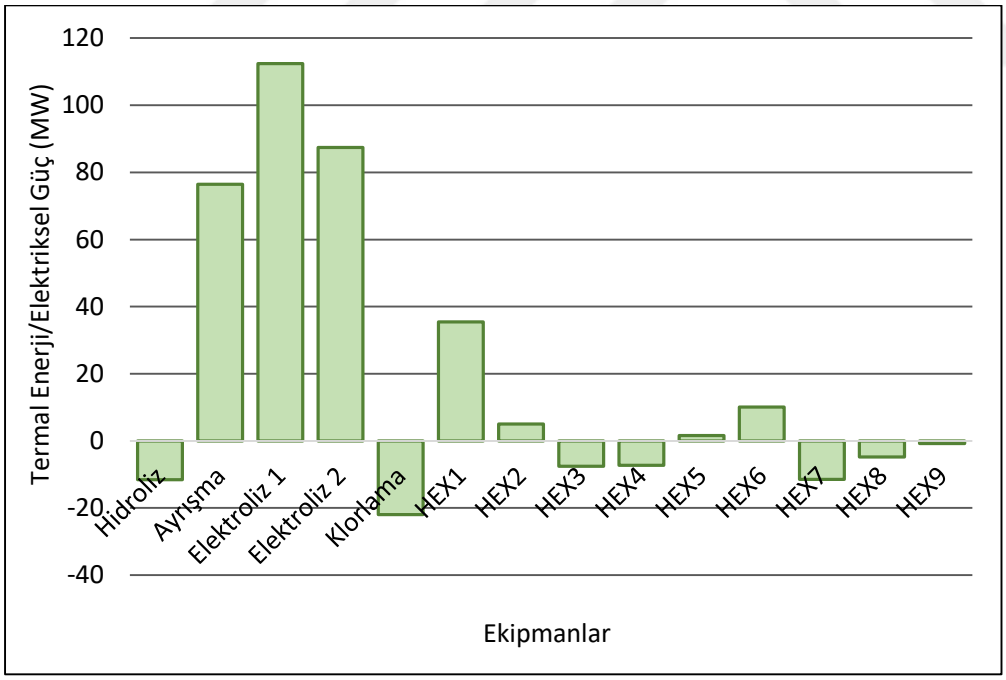
Üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimlerinde üretilen hidrojen miktarları ARC füzyon reaktörünün termal enerjisine bağlıdır. Bu bağlamda, Aspen Plus simülasyon programı sonuçlarına göre, çevrimlerin ekipmanları için hesaplanan termal enerji ve elektriksel güç değerleri üretilen hidrojen miktarına göre tekrar hesaplanmıştır. Şekil 6.9 1 mol/s hidrojen üretimi durumunda kapasiteleri sunarken, Şekil 6.28'de üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için 1,49 kg/s hidrojen üretimi durumundaki sonuçlar sunulurken, Şekil 6.29 dört-adımlı Mg-Cl çevrimin 1,30 kg/s hidrojen üretimi durumunda hesaplanan termal enerji ve elektriksel güç değerlerini sunmaktadır.



Şekil 6.28. Üç-adımlı Mg-Cl çevrim entegreli sistem için hidrojen üretim çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri

Şekil 6.28'e göre 1,49 kg/s hidrojen üreten entegre sistemde elektrolizör 199,69 MW elektriksel güç harcarken, hidroliz reaksiyonu 68,07 MW ısıya ihtiyaç duymaktadır. Klorlama reaksiyonunda ise 25,10 MW ısı atılır. Isı değiştiriciler arasında ise en yüksek ısı gereksinimi 47,90 MW ile HEX1'e aittir.

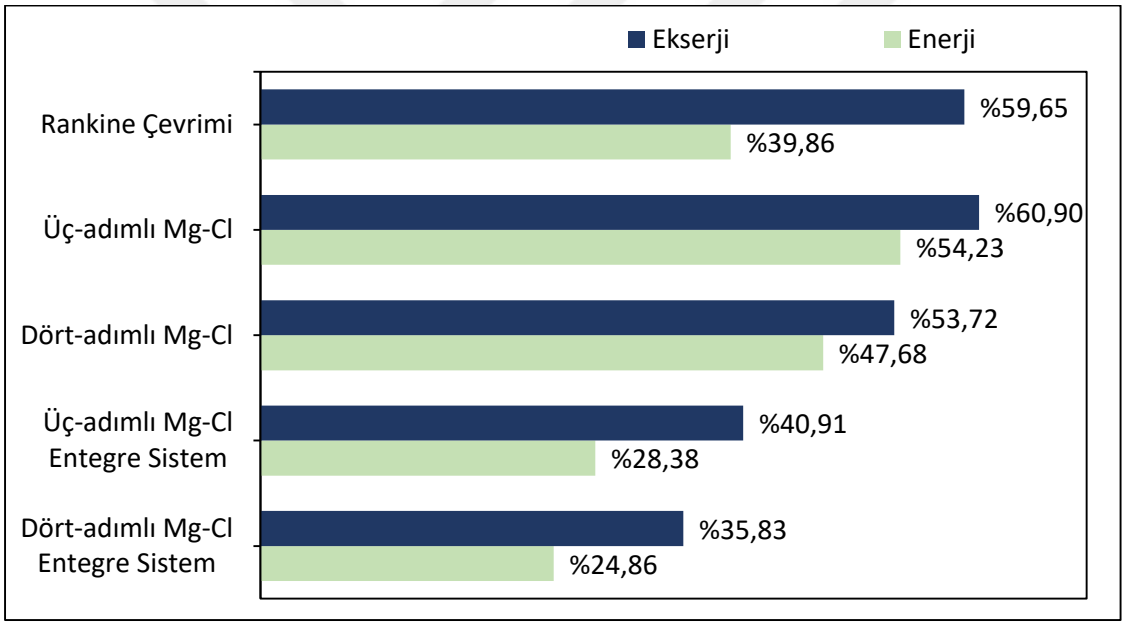
Şekil 6.29'da ise dört-adımlı Mg-Cl çevrimin entegre sistem içerisindeki ısı ve elektrik kapasiteleri sunulmuştur. Çevrim saniyede 1,30 kg hidrojen üretirken, elektrolizör 1 112,42 MW, elektrolizör 2 ise 87,44 MW elektrik ihtiyacı duymaktadır. Yani Rankine çevriminde üretilen yaklaşık 200 MW elektriksel güç elektrolizörlerde tüketilmektedir. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimde ekzotermik olan hidroliz reaksiyonu 11,53 MW ısı atarken, klorlama reaksiyonu sırasında çevreye 21,98 MW ısı yayılır. Endotermik olan ayrışma reaksiyonu 76,42 MW ısıya ihtiyaç duyar. En yüksek ısı gereksinimi olan ısı değiştiriciler sırası ile HEX1 ve HEX6 olarak göze çarpmaktadır. HEX1'de suyun 25°C'den ilgili reaktör sıcaklığına getirilebilmesi için 35,40 MW termal enerjiye ihtiyaç duyulurken, HEX6'da ise 10,11 MW ısı gereksinimi vardır.



Şekil 6.29. Dört-adımlı Mg-Cl çevrim entegreli sistem için hidrojen üretim çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri

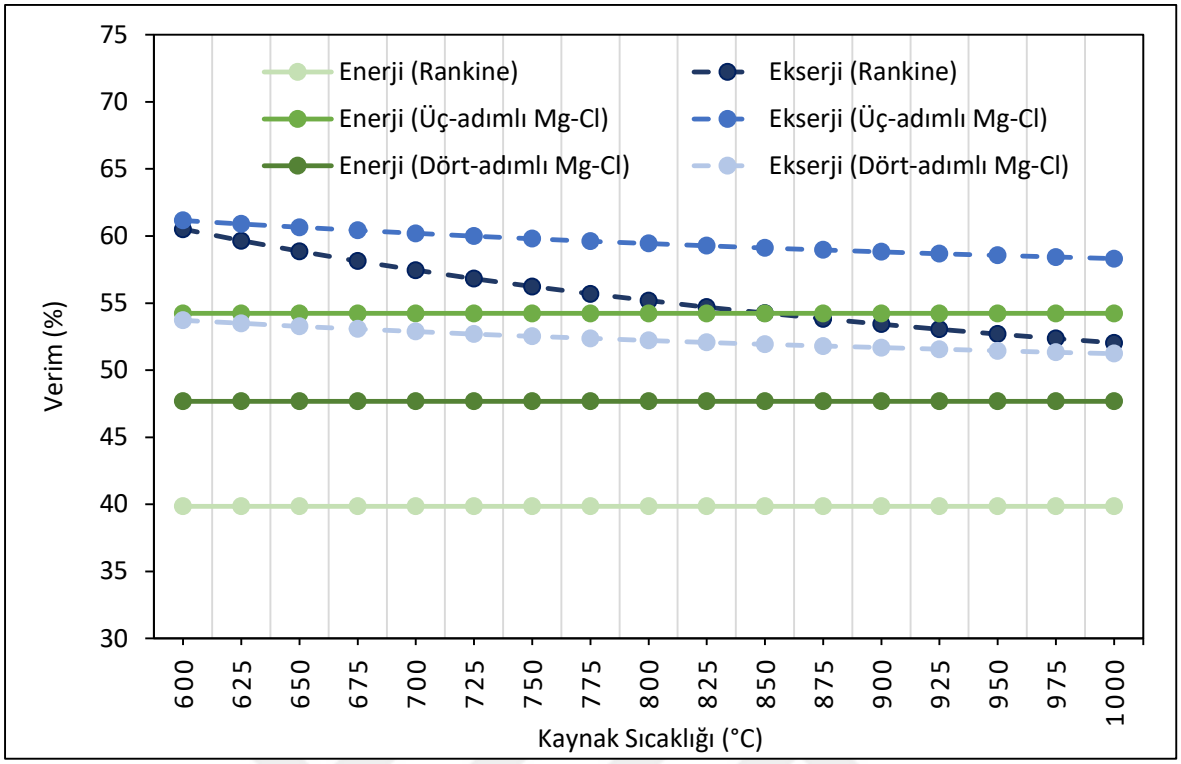
Termodinamiğin birinci ve ikinci yasa analizleri sonucunda elde edilen veriler ışığında, ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevrimi, üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimleri ve

hidrojen üretim çevrimlerinin entegre edildiği enerji sistemlerinin enerji ve ekserji verimleri sistem analizi bölümünde verilen formüller ışığında hesaplanmış ve Şekil 6.30'da sunulmuştur. Literatürdeki %40 olan enerji verimi değerine bağlı kalınarak tasarlanan Rankine çevrimi enerji verimi %39,86 ve ekserji verimi %59,65 olarak hesaplanmıştır. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için enerji verimleri sırası ile %54,23 ve %47,68 iken, ekserji verimleri %60,90 ve %53,72 olarak elde edilmiştir. Dört-adımlı Mg-Cl çevrimin elektriksel güç ihtiyacı üç-adımlı çevrime oranla daha fazla olduğundan verim değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Entegre sistemler incelendiğinde ise, üç-adımlı Mg-Cl çevrim entegreli enerji sisteminin toplam enerji ve ekserji verimleri sırası ile %28,38 ve %40,91 olarak elde edilmiştir. Aynı değerler dört-adımlı Mg-Cl çevrimi entegreli enerji sisteminde düşüş yaşayarak %24,86 ve %35,83 olarak hesaplanmıştır.



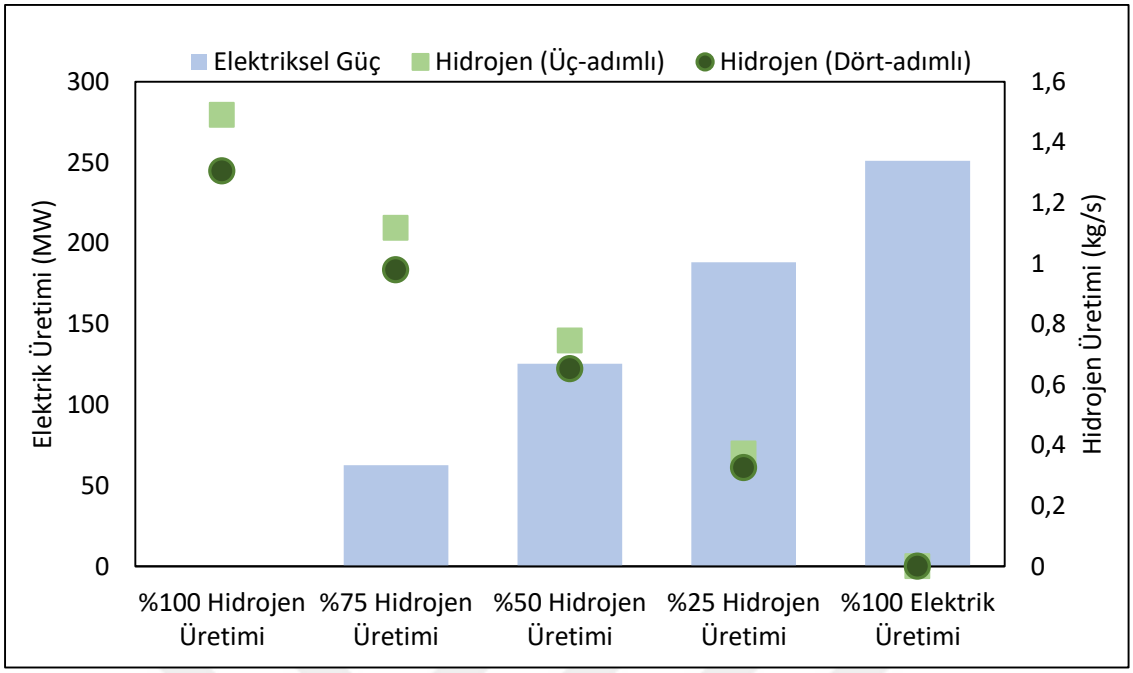
Şekil 6.30. Her bir sistem için enerji ve ekserji verimleri

Şekil 6.31 nükleer kaynak sıcaklığına göre Rankine çevrimi, üç- adımlı Mg-Cl çevrimi ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için enerji ve ekserji verimi değişimini vermektedir. Kaynak sıcaklığının enerji verimine etkisi olmadığı bilinirken, kaynak sıcaklığı arttıkça her çevrimde ekserji veriminin düştüğü gözlemlenmiştir. Verilen grafiğe göre çevrimlerin düşük nükleer kaynak sıcaklığında daha iş yapma potansiyellerinin daha yüksek olduğu yorumu yapılabilir.



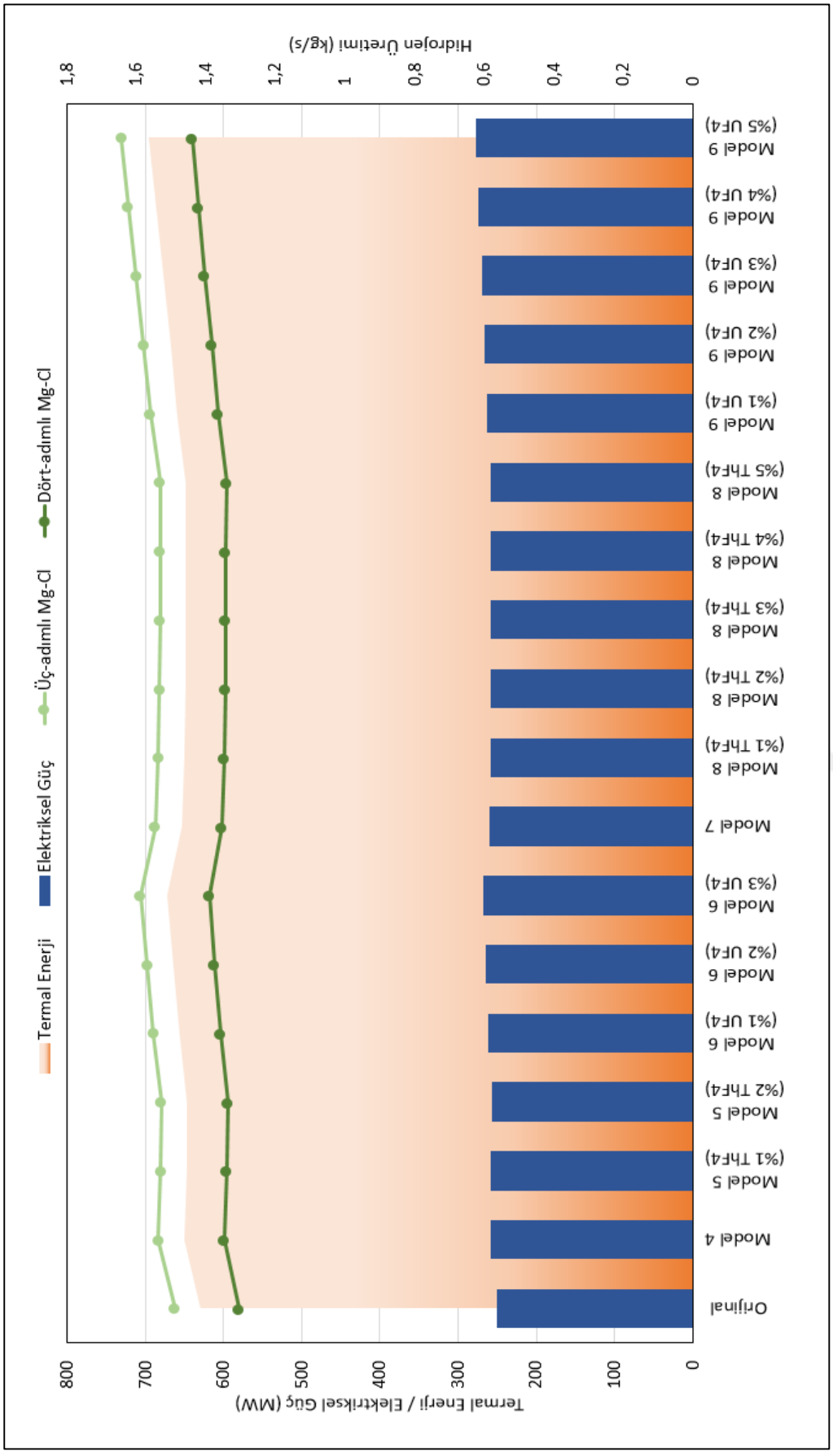
Şekil 6.31. Nükleer kanyak sıcaklığına göre alt sistemlerin verim değişimi

Şekil 6.32 entegre sistemlerde ihtiyaca göre elektrik ya da hidrojen üretim durumlarını baz almıştır. %100 hidrojen talebi olduğunda entegre sistemlerde, üç-adımlı Mg-Cl çevrim kullanılarak 1,49 kg/s hidrojen üretilebilirken, dört-adımlı Mg-Cl çevrim ile 1,30 kg/s hidrojen üretilebilmektedir. Aynı şekilde %100 elektrik ihtiyacı durumunda 630 MW termal enerjinin tamamı Rankine çevriminde kullanılır ve yaklaşık olarak 252 MW elektrik üretilebilir. Hem hidrojen hem de elektrik ihtiyacı duyulduğunda; örneğin %75 hidrojen üretimi ile entegre sistemde 62,77 MW elektrik üretilirken, üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimleri ile sırasıyla 1,12 kg/s ve 0,98 kg/s hidrojen üretilebilmektedir. Termal enerjinin %50'sinin hidrojen üretiminde kullanıldığı durumda ise elektrik üretimi 125,55 MW'a çıkarken, saniyede üretilen hidrojen miktarı üç-adımlı Mg-Cl çevrim ile 0,75 kg, dört-adımlı Mg-Cl çevrim ile 0,65 kg'a düşmektedir. Benzer şekilde, elektrik ihtiyacının daha fazla ve hidrojen ihtiyacının %25 oranında olduğu düşünülürse, entegre sistemde üretilen elektriksel güç 188,32 MW olarak hesaplanır; üç- ve dört-adımlı çevrimler ise sırası ile 0,37 kg/s ve 0,33 kg/s hidrojen üretebilir.



Şekil 6.32. Entegre sistemlerde ihtiyaca göre hidrojen ve elektrik üretimi

Şekil 6.33 ise nötronik parametrelerin hidrojen üretimine etkisinin incelendiği bir grafik sunmaktadır. Grafikte kendi kendini sürdürebilen nükleer reaktör modellemeleri dikkate alınmış ve modellerin üretebildiği termal enerji, elektriksel güç değerleri sunulmuş ve bu üretime karşılık gelen hidrojen üretim miktarları hem üç-adımlı Mg-Cl çevrimi hem de dört-adımlı Mg-Cl çevrimi için verilmiş, değerler karşılaştırılmıştır. Reaktör modellerinde termal enerji değeri arttıkça üretilen elektriksel güçte de artış gözlemlenmiştir. Termal enerji ve elektriksel güç artışı hidrojen üretimine de pozitif etki yaratarak üretilen hidrojen miktarını her iki hidrojen üretim çevrimi için de arttırmıştır. Reaktörde ThF_4 yakıt oranı arttıkça termal enerji değerinin azaldığı ve bazı noktalarda sabit kaldığı gözlemlenirken, UF_4 yakıt kullanılan modellerde yakıt oranı arttıkça termal enerji değeri doğru orantılı olarak artmıştır. ThF_4 yakıt kullanıldığında ^{233}U, ^{235}U fisil yakıtlar ve ^{234}U ve ^{236}U gibi yan ürünler oluşurken, UF_4 yakıt kullanılan modeller başlangıçta doğal veya zenginleştirilmiş uranyum içerir. Ayrıca, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu izotopları üretilir ve ^{241}Am, ^{242}Am, ^{243}Am, ^{244}Cm ve ^{245}Cm gibi aktinitler oluşur. Bu sebeple UF_4 yakıt çok sayıda plütonyum ve aktinit içerdiği için fisil çeşitliliği ve dolayısıyla termal enerji değeri daha yüksek elde edilmiştir. Özetle, nükleer reaktörde SS-304 yapı malzemesi kullanımı, grafit nötron yansıtıcı kullanımı, eriyik tuz yakıt kullanımı, yakıt oranlarının artırılması ve soğutucu olarak natural lityum kullanımı entegre sistemde hidrojen üretimini artırmıştır.



Şekil 6.33. Nükleer reaktör modellemelerine göre üretilen hidrojen miktarı değişimi

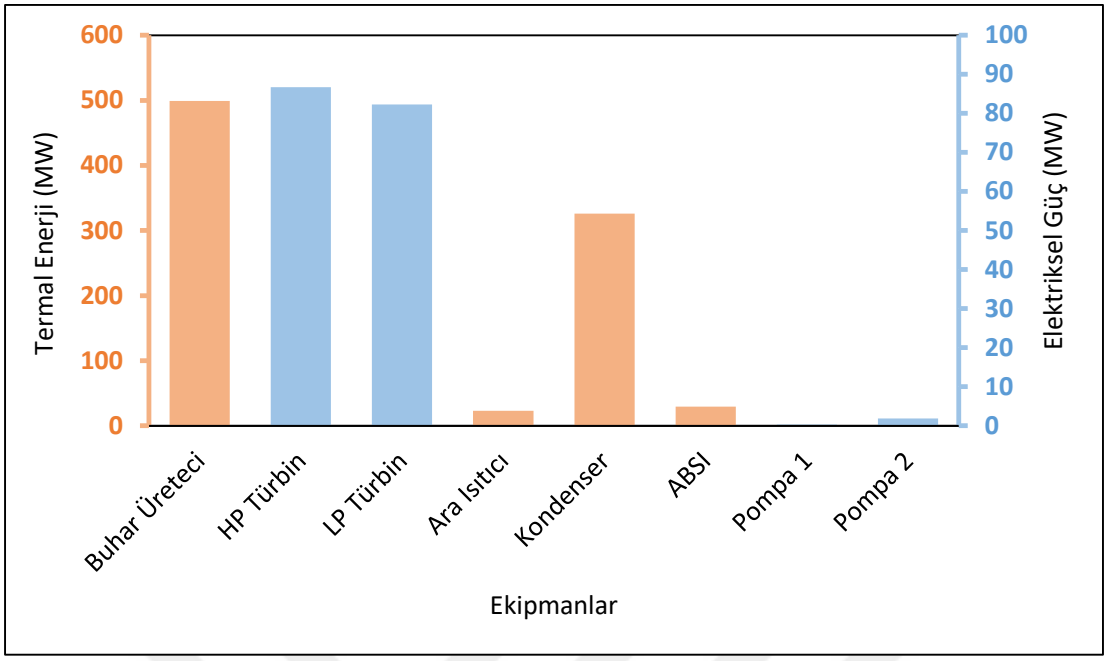
6.4. Vaka Çalışması Sonuçları

Yapılan vaka çalışması sonucunda, 630 MW termal enerjiye sahip ARC füzyon reaktörü kaynak olarak kullanılmış ve bir topluluğun ısınma, elektrik, hidrojen ve temiz su ihtiyaçlarını karşılayacak bir entegre sistem analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda, 630 MW termal enerjinin bir kısmı direkt olarak hidrojen üretim tesisine gönderilirken, bir diğer kısmı ise elektrik üretimi için harcanmış ve açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevrimi ile 166,79 MW elektrik üretilmiştir.

Kondenserden atılan ısı MED tesisinde kullanılacağından, orijinal ARC füzyon reaktörü için tasarlanan açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevriminde değişiklikler yapılmış ve LP türbin çıkış değerleri MED sistemindeki gerekliliklere göre düzenlemiştir. Bu şartlarda açık besleme suyu ısıtıcılı Rankine çevriminin enerji ve ekserji verimleri düşmüş, sırası ile %31,93 ve %47,79 olarak hesaplanmıştır.

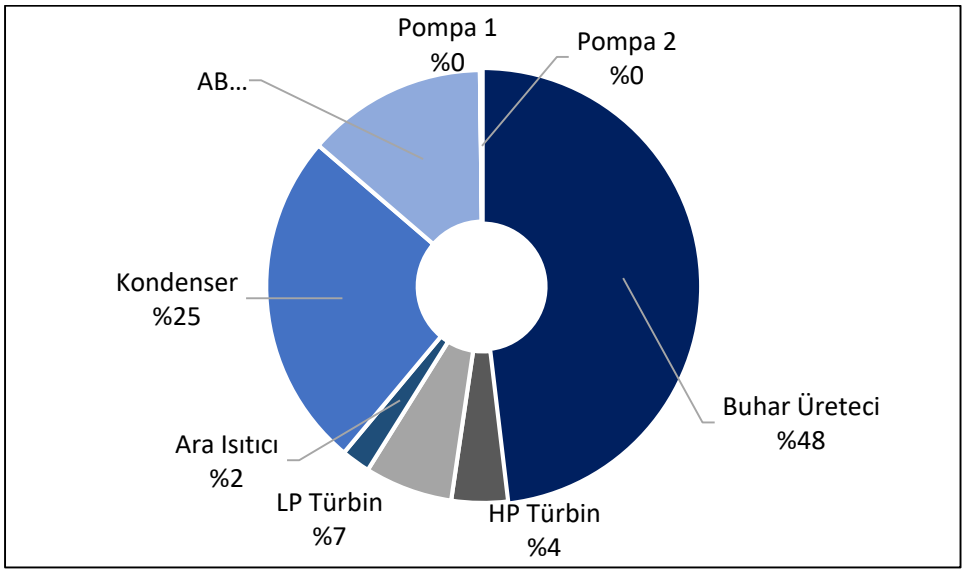
Çizelge 6.7. Vaka çalışması için her adımın termofiziksel özellikleri

Durum	Akış	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Kütlesel Debi (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	ex (kJ/kg)
0	H_2O	25	1,00	-	104,90	0,3672	0,00
0	FLiBe	25	1,00	-	-22991,76	1319,81	0,00
0	CO_2	25	1,00	-	-0,94	0,0022	0,00
1	FLiBe	627	60,00	2684,32	-21417,09	3891,85	-764892,12
2	FLiBe	607	60,00	2684,32	-21480,46	3820,36	-743652,47
3	FLiBe	607	60,00	2684,32	379,52	0,00	416675,14
4	FLiBe	527	60,00	2684,32	-21651,79	3615,42	-682749,95
5	CO_2	590	35,00	3000,32	554,00	0,3669	446,26
6	CO_2	560	35,00	3000,32	589,90	0,4093	469,52
21	H_2O	525	76,60	191,75	3465,00	6,8290	1434,48
22	H_2O	313	15,55	48,16	3066,00	6,9520	998,83
23	H_2O	275	11,17	143,59	2995,00	6,9740	921,27
24	H_2O	350	11,17	143,59	3156,00	7,2490	1000,32
25	H_2O	75	0,38	143,59	2583,00	7,5400	340,61
26	H_2O	75	0,38	143,59	312,00	1,0100	15,55
27	H_2O	75	15,55	143,59	314,06	1,0110	17,31
28	H_2O	200	15,55	191,75	852,00	2,3300	162,19
29	H_2O	202	76,60	191,75	861,94	2,3360	170,34
30	Deniz Suyu (3,5 wt % tuz)	20	1,00	1623,35	79,80	0,2822	0,20
31	Deniz Suyu (3,5 wt % tuz)	20	1,00	1623,35	79,80	0,2822	0,20
32	Arıtılmış Su	70	1,00	243,50	293,00	0,9549	15,50
33	Deniz Suyu (4 wt % tuz)	70	1,00	1379,85	278,50	0,9066	4,40

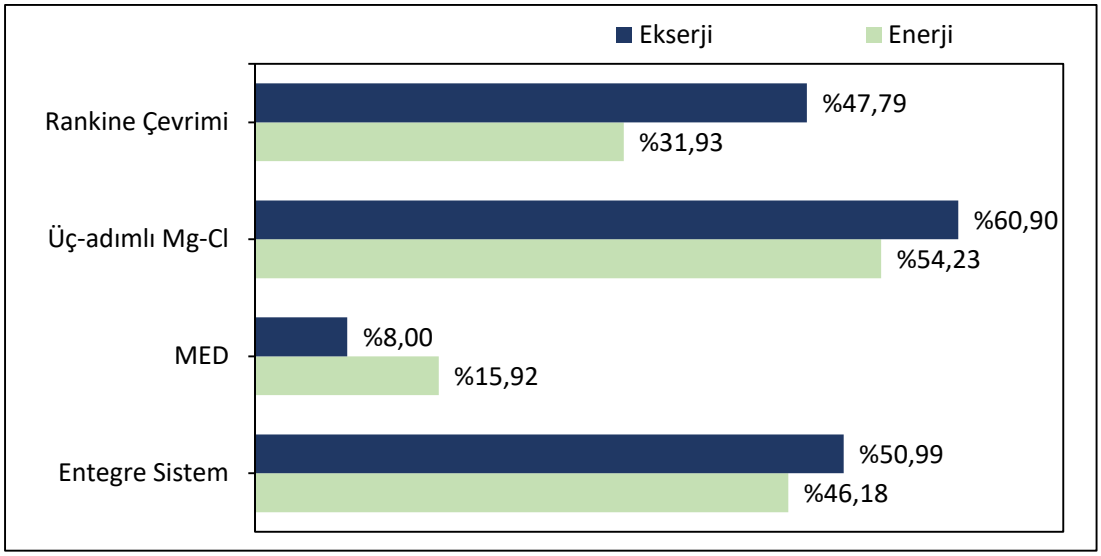


Şekil 6.34. Vaka çalışması için modellenen Rankine çevrimi ekipmanları termal enerjileri ve elektriksel güçleri

Şekil 6.34 Rankine çevrimi ekipmanları için hesaplanan termal enerji ve elektriksel güç değerlerini vermektedir. Buhar üreteci 499,14 MW ısıya ihtiyaç duyarken, ara ısıtıcıda 23,12 MW ısı gereksinimi vardır. HP türbin ile 86,70 MW, LP türbin aracılığı ile ise 82,28 MW elektrik üretilmiştir. Şekil 6.35 ise Rankine çevriminin ekipmanlarına ait ekserji yok oluş oranlarını sunmaktadır. En yüksek ekserji yok oluşu %48 oran ve 91,09 MW ile buhar üretecine aittir.



Şekil 6.35. Vaka çalışması için modellenen Rankine çevrimi ekipmanlarının ekserji yok oluş oranları



Şekil 6.36. Vaka çalışmasındaki her bir alt sistem için enerji ve ekserji verimleri

Vaka çalışması sonucunda entegre sistemde 1,24 kg/s hidrojen ve 243,50 kg/s arıtılmış su üretilmiştir. Ayrıca, mahal ısıtması için 29,38 MW termal enerji yaşam alanına gönderilirken, 59,07 MW elektriksel güç de evsel kullanım için yaşam alanına iletilmiştir. Şekil 6.36 vaka çalışmasındaki alt sistemlerin ve entegre sistemin toplam enerji ve ekserji verim değerlerini vermektedir. Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi Aspen Plus analiz sonuçlarına göre %54,23 enerji ve %60,90 ekserji verim değerlerine sahiptir. Yapılan termodinamik analiz sonucunda MED tesisi enerji verimi %15,92 ve ekserji verimi %8,00 olarak hesaplanmıştır. Vaka çalışmasında tasarlanan entegre sistemin toplam enerji ve ekserji verim değerleri ise sırası ile %46,18 ve %50,99 olarak elde edilmiştir. Vaka çalışmasında, Rankine çevriminin açık besleme suyu ısıtıcısından atılan ısı yararlı çıktı olarak mahal ısıtmasında kullanıldığı ve kondenserden atılan ısı MED tesisinde su arıtımı için kullanılığı için entegre sistem verimlerinde önemli ölçüde artışa sebep olmuştur. Şekil 6.30'da verilen üç-adımlı Mg-Cl entegre sistemin enerji verimi %28,38'den %46,18'e artırılırken, ekserji verimi ise %40,91'den %50,99'a yükselmiştir. Böylece atık ısının değerlendirilmesinin sistem verimine pozitif etkisi vurgulanmıştır.

Son olarak, Çizelge 6.8'de tez çalışması kapsamında tasarlanan entegre sistemler literatürdeki farklı enerji kaynağı kullanan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Sistemlerde üretilen yararlı çıktılar ve enerji/ekserji verimleri doğrultusunda, nükleer füzyon enerjisinin ticarileşmesinden sonra insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanılabilecek bir seçenek olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.8. Enerji kaynakları, faydalı çıktılar ve enerji, ekserji verimliliği açısından çeşitli çalışmaların mevcut çalışmayla karşılaştırılması

Referans	Enerji Kaynağı	Alt Sistemler	Yararlı Çıktılar	Enerji Verimi	Ekserji Verimi
Tez Çalışması	Nükleer Füzyon	Rankine çevrimi Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi	Hidrojen	%28,38	%40,91
Tez Çalışması	Nükleer Füzyon	Rankine çevrimi Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi	Hidrojen	%24,86	%35,83
Tez Çalışması	Nükleer Füzyon	Rankine çevrimi Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi MED	Hidrojen Elektrik Isı Arıtılmış su	%46,18	%50,99
[120]	Nükleer Fisyon	GT-MHR Cu-Cl çevrimi Çok kademeli ani buharlaşma tesisi	Hidrojen Arıtılmış su	%32,47	%52,20
[127]	Güneş ve Rüzgar	PV Rüzgar Türbini Elektrolizör	Hidrojen	%16,42	%12,76
[154]	Nükleer Füzyon	Rankine çevrimi Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi MED RO	Hidrojen Arıtılmış su	%34,67	%36,74
[155]	Nükleer Fisyon	Brayton çevrimi V-Cl çevrimi Rankine çevrimi	Elektrik Hidrojen	%16,94	%21,42
[156]	Güneş	CSP Buhar-metan reformasyonu Gaz türbini RO	Elektrik Arıtılmış su Hidrojen	%50,18	%51,91
[157]	Nükleer Fisyon ve Güneş	CANDU CSP Cu-Cl çevrimi MED Sera Buhar türbini	Elektrik Arıtılmış su Gıda Sıcak su Isıtma Hidrojen	%65,80	%40,10

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, ARC füzyon reaktörü sürücülü üç- ve dört-adımlı Mg-Cl çevrimlerinin entegrasyonu analiz edilmiş, reaktörün ve hidrojen üretim çevrimlerinin farklı parametreler altında çalışma potansiyelleri incelenmiştir. Bu başlık altında tez kapsamında elde edilen sonuçlar ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmaktadır.

Nötronik analiz sonuçları incelendiğinde aşağıda listelenen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Model 1'de berilyum katmanın reaktör performansına etkisi incelenmiş ve katmanın kaldırılması TBR değerini %1,98 oranında düşürdüğü için katmanın reaktör tasarımında kalmasına karar verilmiştir.
- Model 2'de ZrH_2 ve grafit malzemeler karşılaştırılmış, reaktör performansında kayda değer bir iyileşme görülmemesine rağmen maliyeti düşürmek amacı ile grafit malzeme kullanımı tercih edilmiştir.
- Model 3'te grafit malzemelerin farklı kalınlıklarda (25 cm, 35 cm ve 45 cm) kullanımı söz konudur. Fakat, grafit kalınlığının değişimi TBR'de neredeyse hiçbir değişikliğe sebep olmamıştır. Bu sebeple, maliyeti artırmamak adına grafit kalınlığı orijinal tasarımda da olduğu gibi 25 cm'de tutulmuştur.
- Model 4'te Inconel 718 yapı malzemesi yerini SS-304 malzemeye bırakmıştır ve bu değişiklik reaktörün TBR değerinde kayda değer bir değişim yaratmıştır. Toplam trityum oranı 1,12'ye ve M değeri ise 1,27'ye yükselmiştir.
- Model 5'te berilyum, grafit ve SS-304 kullanılan reaktörlerde eriyik tuz ThF_4 yakıtın performansa etkisi incelenmiş ve %1 oranında yakıt kullanımının maksimum TBR değerini verdiği elde edilmiştir. Ayrıca, %3 ve üstü ThF_4 yakıt oranlarında reaktörün TBR değeri 1,05'in altında kalmış, reaktör çalışmamıştır.
- Model 6'da berilyum, grafit ve SS-304 kullanılan reaktörlerde eriyik tuz UF_4 yakıtın performansa etkisi incelenmiş ve en yüksek TBR değeri %1 UF_4 yakıt oranında elde edilirken, %4 ve üstü yakıt oranlarında reaktör kendi kendini sürdürememiştir.
- Model 7'de reaktörün ilk FLiBE soğutucu katmanı natural lityum ile değiştirilmiş ve performansa etkisi incelenmiştir. Trityum üretim oranı 1,18'e yükselmiştir.

- Model 8'de berilyum, grafit, SS-304 ve natural lityum kullanılan reaktör tasarımında eriyik tuz ThF_4 yakıtın performansa etkisi incelenmiş ve TBR değerinin %10 ThF_4 yakıt oranında 1,05'in altında kaldığı ve reaktörün çalışmadığı gözlemlenmiştir.
- Model 9'da berilyum, grafit, SS-304 ve natural lityum kullanılan reaktör tasarımında eriyik tuz UF_4 yakıtın performansa etkisi incelenmiş ve maksimum TBR değeri 1,14 olarak elde edilmiştir.
- Natural lityum ve UF_4 kullanılan reaktör modellerinde reaktör ömrünün daha uzun olacağı gözlemlenmiştir.
- Modellerde UF_4 eriyik tuz yakıt oranı arttıkça M değerinin ve dolayısıyla termal enerji değerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- En yüksek M değeri 1,37 ile Model 9'da elde edilmiştir ve termal enerji değeri 695,03 MW olarak hesaplanmıştır.
- UF_4 eriyik tuz kullanılan modellerde ThF_4 kullanılanlara göre daha yüksek M ve termal enerji değerleri elde edilmiştir.

Hidrojen üretimi simülasyon sonuçları incelendiğinde aşağıda listelenen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Üç-adımlı Mg-Cl çevriminde en büyük ekserji yok oluşu %65 oranı ile elektroliz reaksiyonuna aittir.
- Dört-adımlı Mg-Cl çevriminde ekserji yok oluşuna katkı sağlayan ilk iki ekipman elektroliz hücreleridir, oranları sırası ile %30 ve %26 olarak hesaplanmıştır.
- Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi 1 mol hidrojen üretimi için 270,16 MW elektriksel güç ve 175,93 MW termal enerjiye ihtiyaç duymaktadır.
- Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi 1 mol hidrojen üretmek için 308,75 MW elektriksel güç ve 198,59 MW termal enerjiye ihtiyaç duyar.
- Üç-adımlı Mg-Cl çevrimi için enerji verimi %54,23 ve ekserji verimi %60,90 olarak hesaplanmıştır.
- Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi enerji ve ekserji verimleri sırası ile %47,68 ve %53,72 olarak elde edilmiştir.

ARC füzyon reaktörü sürücülü entegre enerji sistemleri analiz sonuçlarına göre:

- Entegre sistemlerde 630 MW termal enerjinin tamamının kullanılması ile yaklaşık olarak 252 MW elektriksel güç üretilmiştir.
- Orijinal ARC füzyon reaktörü için modellenen Rankine çevrimi enerji ve ekserji verimleri sırası ile %39,86 ve %59,65 olarak hesaplanmıştır.
- ARC füzyon reaktörünün 630 MW'lık termal enerjisinin tamamının kullanıldığı durumda üç-adımlı Mg-Cl çevrimi ile 1,49 kg/s, dört-adımlı Mg-Cl çevrimi ile ise saniyede 1,30 kg hidrojen üretilmiştir.
- Üç-adımlı Mg-Cl çevrim entegre sistemde toplam enerji verimi %28,38 iken, ekserji verimi %40,91 olarak hesaplanmıştır.
- Dört-adımlı Mg-Cl çevrimi entegre sistemde toplam enerji ve ekserji verimleri sırası ile %24,86 ve %35,83 olarak elde edilmiştir.
- Rankine çevrimi, üç-adımlı Mg-Cl çevrim ve dört-adımlı Mg-Cl çevrim için ekserji verimleri nükleer kaynak sıcaklığı arttıkça azalmıştır.
- Nötronik parametrelere bağlı olarak hidrojen üretimi incelendiğinde, nükleer reaktörde SS-304 yapı malzemesi kullanımı, grafit nötron yansıtıcı kullanımı, eriyik tuz yakıt kullanımı, yakıt oranlarının artırılması ve soğutucu olarak natural lityum kullanımı entegre sistemde hidrojen üretimine pozitif etki ederek üretimi artırdığı gözlemlenmiştir.

Vaka çalışması sonuçlarına göre:

- Entegre sistemde 29,38 MW ısı, 59,07 MW elektrik, 1,24 kg/s hidrojen ve saniyede 243,50 kg arıtılmış su üretilmiştir.
- MED tesisi %15,92 enerji ve %8,00 ekserji verimi değerlerine sahiptir.
- Entegre sistemin enerji verimi %46,18 ve ekserji verimi ise %50,99 olarak hesaplanmıştır.
- Entegre sistemde atık ısıdan faydalanılarak enerji ve ekserji verimi değerlerinde büyük ölçüde artış gözlemlenmiştir.

Özetle, bu tez kapsamında nükleer füzyon enerjisinin kaynak olarak kullanımı ile temiz hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmanın devamlılığı niteliğinde gelecekteki çalışmalar için bazı öneriler sunulmuştur:

- Nükleer reaktörde zamana bağlı analiz ile üretim değerleri reaktör ömrü boyunca daha kapsamlı bir şekilde incelenebilir.
- Kullanılan nükleer malzemeler, yakıt çeşitleri, soğutucu çeşitleri gibi parametreler genişletilebilir ve nötronik analizleri gerçekleştirilebilir.
- ARC füzyon reaktörü yerine farklı füzyon reaktörü entegrasyonları gerçekleştirilebilir.
- Bir yaşam alanının ihtiyaçları doğrultusunda entegre sistem genişletilebilir, farklı alt sistem tasarımları yapılabilir.
- Tez kapsamında enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilen füzyon sürücülü sistemlerin çevresel etkileri ve ekonomik analizleri incelenebilir.
- Füzyon enerjisi kullanımının, diğer enerji kaynakları ile karşılaştırmalı ekonomik analizleri yürütülebilir.

KAYNAKLAR

1. Veziroğlu, T.N., Şahin, S. (2008). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Convers Manag*, 49(18), 20–31.

2. İnternet: World Energy Transitions Outlook 2024 n.d. URL: https://www.irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (accessed March 15, 2025). Son Erişim Tarihi: 06.11.2024.

3. Kourougianni, F., Arsalis, A., Olympios., A. V., Yiasoumas., G, Konstantinou., C, Papanastasiou, P. (2024). A comprehensive review of green hydrogen energy systems. *Renew Energy*, 231,120911.

4. İnternet: Our World in Data n.d. URL: https://ourworldindata.org/ Son Erişim Tarihi: 29.03 2025.

5. Dincer, I. (1999). Environmental impacts of energy. *Energy Policy*, 27(2), 845–854.

6. Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., Rosen, M.A. (2005). On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, 255–71.

7. İnternet: Global Warming of 1.5 oC — n.d. URL: https://www.ipcc.ch/sr15/ Son Erişim Tarihi: 09.05 2025.

8. İnternet: The Paris Agreement | UNFCCC n.d. URL: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement Son Erişim Tarihi: 11.03 2025.

9. İnternet: IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change n.d. URL: https://www.ipcc.ch/ Son Erişim Tarihi: 16.03 2025.

10. Panwar, N.L., Kaushik, S.C., Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15,1513–24.

11. Cengel, Y. (2020). *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*, New York: McGraw-Hill Education, 107.

12. Rehm, T.E. (2023). Advanced nuclear energy: the safest and most renewable clean energy. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 39,100878.

13. Mathew, M.D. (2022). Nuclear energy: A pathway towards mitigation of global warming. *Progress in Nuclear Energy*, 143,104080.

14. McCombie, C., Jefferson, M. (2016). Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts. *Energy Policy*, 96,758–69.

15. İnternet: Nuclear Power Reactors in the World | IAEA n.d. URL: https://www.iaea.org/publications/15748/nuclear-power-reactors-in-the-world Son Erişim Tarihi: 05.03 2025.

16. İnternet: Advanced Reactor Information System | Aris n.d. URL: https://aris.iaea.org/TechnicalData/ Son Erişim Tarihi: 19.03 2025.

17. Rashad, S.M., Hammad, F.H. (2020). Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generating systems. *Appl Energy,* 65, 211–229.

18. İnternet: DEMO - EUROfusion n.d. URL: https://euro-fusion.org/programme/demo/ Son Erişim Tarihi: 05.03 2025.

19. İnternet: Fusion 2030 – A Roadmap for Canada - Canadian Nuclear Society - CNS n.d. URL: https://www.cns-snc.ca/about-cns/divisions/fusion/fusion-energy-science-and-technology-cns-fest/fusion-2030-a-roadmap-for-canada/ Son Erişim Tarihi: 19.05.2025.

20. İnternet: On The Road to ITER n.d. URL: https://www.iter.org/project/road-iter#event-us-delivers-all-elements-of-central-solenoid-structure Son Erişim Tarihi:15.04.2025.

21. Sorbom, B.N., Ball, J., Palmer, T.R., Mangiarotti, F.J., Sierchio, J.M., Bonoli, P. (2015). ARC: A compact, high-field, fusion nuclear science facility and demonstration power plant with demountable magnets. *Fusion Engineering and Design,* 100, 378–405.

22. İnternet: World Energy Transıtıons Outlook 2022. https://www.spr.pe/wp-content/uploads/2022/04/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf Son Erişim Tarihi: 21.04.2025.

23. Olabi, A.G., Abdelkareem, M.A., Mahmoud, M.S., Elsaid. K., Obaideen, K., Rezk, H. (2023). Green hydrogen: Pathways, roadmap, and role in achieving sustainable development goals. *Process Safety and Environmental Protection,* 177, 664–687.

24. Midilli. A., Dincer, I. (2007). Key strategies of hydrogen energy systems for sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy,* 32, 511–524.

25. İnternet: THE 17 GOALS | Sustainable Development n.d. URL: https://sdgs.un.org/goals Son Erişim Tarihi: 19.03.2025.

26. Ang, T.Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H.S., Nazari, M.A., Prabaharan, N.A (2022). comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews,* 43, 100939.

27. Verbruggen, A. (2008). Renewable and nuclear power: A common future? *Energy Policy,* 36, 4036–447.

28. Karakosta, C., Pappas, C., Marinakis, V., Psarras, J. (2013). Renewable energy and nuclear power towards sustainable development: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 22,187–197.

29. Abu-Khader, M.M. (2029). Recent advances in nuclear power: A review. *Progress in Nuclear Energy,* 51, 225–235.

30. Adamantiades A, Kessides I. (2009). Nuclear power for sustainable development: Current status and future prospects. *Energy Policy,* 37, 5149–5166.

31. Toth, F.L. (2014). Nuclear energy and sustainable development. *Energy Policy*, 1(2), 4-70.

32. İnternet: What is Nuclear Energy? The Science of Nuclear Power | IAEA n.d. URL: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power Son Erişim Tarihi: 23.03.2025.

33. Lee, J.D. (1986). Nuclear Design and Analysis of a Magnetic Fusion Production Reactor I. *Journal of Fusion Energy*, 5, 317-326.

34. Sahin, S. (1990). Power flattening in a catalyzed deuterium-deuterium fusion-driven hybrid blanket using nuclear waste actinides. *Nucl Technol*, 43(6), 799-815.

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

36. İnternet: ITER - the way to new energy n.d. URL: https://www.iter.org/ Son Erişim Tarihi: 11.03.2025.

37. Abram, T., Ion, S. (2008). Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. *Energy Policy*, 36(12), 4323–4330.

38. İnternet: Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems - GIF - 2014 | GIF Portal n.d. URL: https://www.gen-4.org/resources/reports/technology-roadmap-update-generation-iv-nuclear-energy-systems-gif-2014 Son Erişim Tarihi: 03. 25.2025.

39. Kelly, J.E,. (2014). Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation. *Progress in Nuclear Energy*, 77, 240–246.

40. İnternet: What Is the National Ignition Facility? | National Ignition Facility & Photon Science n.d. URL: https://lasers.llnl.gov/about/what-is-nif Son Erişim Tarihi: 02.26, 2025).

41. İnternet: What is a tokamak? n.d. URL: https://www.iter.org/machine/what-tokamak Son Erişim Tarihi: 04.26. 2025.

42. Kuang, A.Q., Cao, N.M., Creely, A.J., Dennett, C.A., Hecla. J., LaBombard, B. (2018). Conceptual design study for heat exhaust management in the ARC fusion pilot plant. *Fusion Engineering and Design*, 137, 221–242.

43. Ji, M., Wang, J. (2021). Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 38612–3835.

44. Sikiru, S., Oladosu, T.L., Amosa, T.I., Olutoki, J.O., Ansari, M.N.M., Abioye, K.J. (2024), Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 56,1152–1182.

45. Saxena, R.C., Seal, D., Kumar, S. (2008). Goyal HB. Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 1909–1927.

46. Kabir, M.M., Akter, M.M., Huang, Z., Tijing, L., Shon, H.K. (2023). Hydrogen production from water industries for a circular economy. *Desalination,* 554, 116448.

47. Dincer I, Acar C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40,11094–11111.

48. Petrii, O.A. (2009). Chemistry, electrochemistry, and electrochemical applications | hydrogen. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources,* 3(5),751–761.

49. Levikhin, A.A. (2004). Boryaev. Physical properties and thermodynamic characteristics of hydrogen. *Heliyon,* 10, e36414.

50. Hwang, J., Maharjan, K., Cho, H.J. (2023). A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 28629–28648.

51. Kothari, R., Buddhi, D., Sawhney, R.L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 553–563.

52. El-Shafie M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, 20, 101-426.

53. Balat, H., Kirtay, E. (2010). Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35,7416–7426.

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

55. İnternet: How Green Are the National Hydrogen Strategies? URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1930 Son Erişim Tarihi: 08.03.2025.

56. Panigrahy, B., Narayan, K., Ramachandra Rao, B. (2022). Green hydrogen production by water electrolysis: A renewable energy perspective. Materials Today Proceedings, 67(8), 1310–1314.

57. Trasatti S. (1999). Water electrolysis: who first? Journal of Electroanalytical Chemistry 476. *Journal of Electroanalytical Chemistry,* 1(31), 481.

58. Zeng, K., Zhang. D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science,* 36(3). 307–326.

59. Lee, B., Heo, J., Kim, S., Sung, C., Moon, C., Moon, S. (2018). Economic feasibility studies of high pressure PEM water electrolysis for distributed H2 refueling stations. *Energy Conversion and Management,* 162, 139–144.

61. Guo, Y., Li, G., Zhou, J., Liu, Y. (2019). Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science,* 371(4), 042022.

62. Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 146, 111180.

63. de Groot, M.T., Kraakman, J., Garcia Barros, R.L. (2022). Optimal operating parameters for advanced alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy,* 47(83), 34773–34783.

64. Lamy, C., Millet, P. (2020). A critical review on the definitions used to calculate the energy efficiency coefficients of water electrolysis cells working under near ambient temperature conditions. *Journal of Power Sources,* 447(31), 227350.

65. Shwe, Sin, P.P,, Wai, S.H., Ota, Y., Nishioka, K., Suzuki, Y. (2024). Performance recovery of proton exchange membrane electrolyzer degraded by metal cations contamination. *International Journal of Hydrogen Energy,* 53(31), 86–92.

66. Dönitz, W, Erdle E. (1985). High-temperature electrolysis of water vapor—status of development and perspectives for application. *International Journal of Hydrogen Energy,* 10(5), 291–295.

67. Anwar, S, Khan F, Zhang Y, Djire A. (2021). Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy,* 46(48), 32284–32317.

68. Laguna-Bercero, M.A. (2012). Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. *Journal of Power Sources,* 203(1). 4–16.

69. Damen, K, Troost, M. Van, Faaij, A., Turkenburg, W. (2007). A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO2 capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies. *Progress in Energy and Combustion Science,* 32(6), 580-609.

70. Simbeck, D.R., Chang, E. (2002). *Hydrogen supply: cost estimate for hydrogen pathways-scoping analysis.* California: National Renewable Energy Laboratory, 69.

71. Holladay, J.D., Hu, J., King, D.L., Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today,* 139(4), 244–260.

72. Levin, D.B., Chahine, R. (2010). Challenges for renewable hydrogen production from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy,* 35(10),4962–4969.

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

74. Prigiobbe, V., Hänchen, M., Werner, M., Baciocchi, R., Mazzotti, M. (2009). Mineral carbonation process for CO2 sequestration. *Energy Procedia,* 1(1), 4885–4890.

75. Mehrpooya, M., Habibi, R. (2020). A review on hydrogen production thermochemical water-splitting cycles. *Journal of Cleaner Production*, 275(1), 123836.

76. Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., Khalilpour, K.R. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109620.

77. Ghorbani, B., Zendehboudi, S., Zhang, Y., Zarrin, H., Chatzis, I. (2023). Thermochemical water-splitting structures for hydrogen production: Thermodynamic, economic, and environmental impacts. *Energy Convers Manag*, 297, 117599.

78. İnternet: undefined. Thermochemical water-splitting cycle, bench-scale investigations, and process engineering. https://www.osti.gov/servlets/purl/5063416-Hhmrtj/ Son Erişimm Tarihi: 03.05.2025.

79. Zhang, P, Chen, S.Z., Wang, L.J., Xu, J.M. (2010). Overview of nuclear hydrogen production research through iodine sulfur process at INET. Int J Hydrogen Energy 35,(7),2883.

80. Mehrpooya, M., Habibi, R. A. (2020). Review on hydrogen production thermochemical water-splitting cycles. *Journal of Cleaner Production*, 275:123836.

81. Asal, Ş., Acır, A. (2023). Evaluation and comparison of hydrogen production potential of the LIFE fusion reactor by using copper–chlorine (Cu–Cl), cobalt–chlorine (Co–Cl) and sulfur–iodine (S–I) cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(22),791–805.

82. Ghandehariun, S., Yekta, M.A, Naterer, G.F. (2024). Review of low temperature water splitting cycles for thermochemical hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 96(13),10–27.

83. Safari, F., Dincer, I. (2022). Assessment and multi-objective optimization of a vanadium-chlorine thermochemical cycle integrated with algal biomass gasification for hydrogen and power production. *Energy Convers Manag*, 253(11),51-32.

84. Khalid, F., Dincer, I., Rosen, M.A. (2018). Thermodynamic viability of a new three step high temperature Cu-Cl cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(41),18783-18789.

85. Asal Ş, 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(7), 33–42.

86. Cremer, H., Hegels, S., Knoche, K.F, Schuster, P., Steinborn, G., Wozny, G, (1980). Status report on thermochemical iron/chlorine cycles: a chemical engineering analysis of one process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 5(3).231-252.

87. Canavesio, C., Nassini, H.E, Bohé, A.E. (2015). Evaluation of an iron-chlorine thermochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(28),20–32.

88. Safari, F, Dincer, I. (2020). A study on the Fe–Cl thermochemical water splitting cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38),18867-18875.

89. Ozcan, H, Dincer, I. (2016), Thermodynamic modeling of a nuclear energy based integrated system for hydrogen production and liquefaction. *Computers & Chemical Engineering*, 90(12),234-246.

90. Ozcan, H., Dincer, I. (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.

91. Ozcan, H., Dincer, I. (2015). Comparative performance assessment of three configurations of magnesium–chlorine cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2),84–56.

92. Asal, S., Acır, A., Dincer, I. (2024). A study on integrated HTR-PM driven hydrogen production using thermochemical cycles. *Energy Conversion and Management*, 307,118336.

93. Segantin, S., Testoni, R., Zucchetti, M. (2019). The lifetime determination of ARC reactor as a load-following plant in the energy framework. *Energy Policy*, 126,66–75.

94. Segantin, S., Testoni, R., Zucchetti, M. (2020). ARC reactor – Neutron irradiation analysis. *Fusion Engineering and Design*, 159,111792.

95. Segantin, S., Testoni, R., Hartwig, Z., Whyte, D., Zucchetti, M. (2020). Optimization of tritium breeding ratio in ARC reactor. *Fusion Engineering and Design*, 154, 111531.

96. Segantin, S., Testoni, R., Zucchetti, M. (2020). Neutronic comparison of liquid breeders for ARC-like reactor blankets. *Fusion Engineering and Design*, 160, 112013.

97. Segantin, S., Bersano, A., Falcone, N., Testoni, R. (2020). Exploration of power conversion thermodynamic cycles for ARC fusion reactor. *Fusion Engineering and Design* 155, 111645.

98. Meschini, S., Testoni, R., Segantin, S., Zucchetti, M. (2021). ARC reactor: A preliminary tritium environmental impact study. *Fusion Engineering and Design* 167, 112340.

99. Segantin, S., Meschini, S., Testoni, R., Zucchetti, M. (2022). Preliminary investigation of neutron shielding compounds for ARC-class tokamaks. *Fusion Engineering and Design*,185, 113335.

100. Ferrero, G., Meschini, S., Testoni, R., Zucchetti, M. (2023). Exploration of ARC-class reactor vessel and divertor cooling system. *Fusion Engineering and Design*, 192, 113818.

101. Farsi, A., Zamfirescu, C., Dincer, I., Naterer, G.F. (2019). Thermodynamic assessment of a lab-scale experimental copper-chlorine cycle for sustainable hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(17),595–610.

102. Farsi, A., Dincer, I., Naterer, G.F. (202). Review and evaluation of clean hydrogen production by the copper–chlorine thermochemical cycle. *Journal of Cleaner Production*, 276,123833.

103. Tolga Balta M, Dincer I, Hepbasli A. (2010). Energy and exergy analyses of a new four-step copper-chlorine cycle for geothermal-based hydrogen production. *Energy*, 35(8),3263-3272.

104. Canavesio, C, Nassini, D, Nassini, HE, Bohé, A.E. (2020). Study on an original cobalt-chlorine thermochemical cycle for nuclear hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49),90–103.

105. Safari, F., Dincer, I. A. (2020). Study on the Fe–Cl thermochemical water splitting cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38),18867–18875.

106. Abu-Hamed, T., Karni, J., Epstein, M. (2007). The use of boron for thermochemical storage and distribution of solar energy. *Solar Energy*, 81(1),93–101.

107. Balta, M.T. (2020). Thermodynamic performance assessment of boron based thermochemical water splitting cycle for renewable hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(45),79–86.

108. Yılmaz, F., Balta, M.T. (2017). Energy and exergy analyses of hydrogen production step in boron based thermochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(23),6921-6933.

109. Demirci, G., Karakaya, I. (2007). Collection of magnesium in an Mg–Pb alloy cathode placed at the bottom of the cell in MgCl2 electrolysis. *Journal of Alloys and Compounds*, 439(1),237-242.

110. Vishnevetsky, I., Epstein, M., Abu-Hamed, T, Karni, J. (2008). Boron hydrolysis at moderate temperatures: First step to solar fuel cycle for transportation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 130(1),97-120.

111. Wahbeh, B., Tell, S., Abu, T., Kasher, R. (2013). Kinetics of boron hydrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(14),6210–6214.

112. Balta, M.T., Dincer, I., Hepbasli, A. (2012). Energy and exergy analyses of magnesium-chlorine (Mg-Cl) thermochemical cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(6),4855–4862.

113. González Rodríguez, D. (2021). Analysis of the viability of the 2 × 250 MWth HTR-PM project for the hydrogen production by the high temperature electrolysis and the Cu-Cl cycle. *International Journal of Exergy*, 34(2),225-254.

114. 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.

115. Qu, X., Zhao, G., Wang, J. (2021). Thermodynamic evaluation of hydrogen and electricity cogeneration coupled with very high temperature gas-cooled reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(3),65–75.

116. Marques, J.G.O., Costa, A.L, Pereira, C. (2020). Thermodynamic study of a novel trigeneration process of hydrogen, electricity and desalinated water: The case of Na-O-H thermochemical cycle, SCWR nuclear power plant and MED desalination installation. *Energy Conversion and Management*, 209,112648.

117. Khalid, F., Bicer, Y. (2019). Energy and exergy analyses of a hybrid small modular reactor and wind turbine system for trigeneration. *Energy Science Engineering*, 7(6).36–50.

118. Norouzi, N., Talebi, S., Fani, M., Khajehpour, H. (2015). Exergy and exergoeconomic analysis of hydrogen and power cogeneration using an HTR plant. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(8),2753–2760.

119. González Rodríguez, D, (2018). Computational model of a sulfur-iodine thermochemical water splitting system coupled to a VHTR for nuclear hydrogen production. *Energy*, 147(4),59-73.

120. Hernández, C.R.G. (2019). Exergetic evaluation of a conceptual design for hydrogen production and seawater desalination using an advanced nuclear reactor as energy source. *International Journal of Exergy*, 43,380–403.

121. Şahin, S., Şahin, H.M. (2021). Generation-IV reactors and nuclear hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(6),53-71.

122. Wang, Q., Liu, C., Luo, R., Li, X., Li, D., Macián-Juan, R. (2021). Thermo-economic analysis and optimization of the very high temperature gas-cooled reactor-based nuclear hydrogen production system using copper-chlorine cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(7),101-138.

123. Kowalczyk, T., Badur, J., Bryk, M. (2019). Energy and exergy analysis of hydrogen production combined with electric energy generation in a nuclear cogeneration cycle. *Energy Convers Manag*, 198,111805.

124. Genç, G. (2010). Hydrogen production potential of APEX fusion transmuter fueled minor actinide fluoride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10),190–201.

125. Asal, Ş., 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(3),33–42.

126. Liu, G., Ji, D., Qin, Y. (2023). Geothermal-solar energy system integrated with hydrogen production and utilization modules for power supply-demand balancing. *Energy*, 283,128736.

127. Nasser, M., Megahed, T.F., Ookawara, S., Hassan, H. (2022). Performance evaluation of PV panels/wind turbines hybrid system for green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic. *Energy Convers Manag*, 267,115870.

128. Sadeghi, S., Ghandehariun, S., Rezaie, B. (2021). Energy and exergy analyses of a solar-based multi-generation energy plant integrated with heat recovery and thermal energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*, 188,116629.

129. Charvin, P. Stéphane, A., Florent, L., Gilles, F. (2008). Analysis of solar chemical processes for hydrogen production from water splitting thermochemical cycles. *Energy Convers Manag*, 49(15),47–56.

130. Muhammad, H.A, Naseem, M., Kim, J., Kim, S., Choi, Y., Lee, D.Y. (2024). Solar hydrogen production : Technoeconomic analysis of a concentrated solar-powered high-temperature electrolysis system. *Energy*, 298,131284.

131. Segantin, S., Whyte, D., Zucchetti, M. (June 2-5, 2017). *Fusion energy and the ARC project*. 7th International Conference of Ecosystems, Tirana, Albania.

132. Aimetta, A., Abrate, N., Dulla, S., Froio, A. (2022). Neutronic analysis of the fusion reactor arc: monte carlo simulations with the serpent code. *Fusion Science and Technology*, 78(2), 75–90.

133. Suciu, R., Girardin, L., Maréchal., F. (2018). Energy integration of CO2 networks and power to gas for emerging energy autonomous cities in Europe. *Energy*, 157(8),30–42.

134. Weber, C., Favrat, D. (2010). Conventional and advanced CO2 based district energy systems. *Energy*, 35(5),70–81.

135. Ungar, P., Schifflechner, C., Wieland, C., Spliethoff, H., Manfrida, G. (2024). Thermo-economic comparison of CO2 and water as a heat carrier for long-distance heat transport from geothermal sources: A Bavarian case study. *Energy*, 298:131360.

136. Dincer, I., Temiz, M. (2024). *Renewable Energy Options for Power Generation and Desalination*, (2. Edition). New York: Springer International Publishing, 254.

137. Judith, F.(2000). *A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*, Version4B. MCNP: Los Alamos National Laboratory. 790.

138. Team, M.C. (2003). *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*, Los Alamos National Laboratory, 416.

139. Acır, A. (2013). Neutronic analysis of the laser inertial confinement fusion-fission energy (LIFE) engine using various thorium molten salts. *Journal of Fusion Energy*, 32,634–41.

140. Lamarsh, R.L,. Baratta A.J. (2011). *Introduction to nuclear engineering.* (Third Edition). New York: Prentice Hall, 801.

141. Şahin, Ş., Acir, A. (2012). LIFE hybrid reactor as reactor grade plutonium burner. *Energy Convers Manag*, 63,44–50.

142. Sahin S, Al-Eshaikh M. (1987). Fission Power Flattening in Hybrid Blankets Using Mixed Fuel. *Fusion Technology*, 12,395–408.

143. Acir, A., Baysal, E. (2018). Monte Carlo calculations of the incineration of plutonium and minor actinides of laser fusion inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine. *Plasma Science and Technology*, 20,075601.

144. Acır, A., Asal, Ş. (2021). Investigation of the hydrogen production of a laser FUSION driver thorium breeder using various coolants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46,7087–98.

145. Acır, A., Aktı, S. (2019). Investigation of hydrogen production potential of the LASER inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(2),67–79.

146. İnternet: Aspen Plus | Leading Process Simulation Software | AspenTech n.d. URL: https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus Son Erişim Tarihi: 19.04.2025.

147. İnternet: Learn Aspen Plus in 24 Hours | McGraw-Hill Education - Access Engineering n.d. URL: https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781264266654?implicit-login=true Son Erişim Tarihi: 15.03 2025.

148. Al-Malah, K. (2016). *Aspen plus : chemical engineering applications*. (1 Edition). New York: Wiley. 283.

149. Cengel, Y. (2004).. *Thermodynamics An-Engineerin Approach*, (8th). Ankara: Seçkin Yayınları. 1–14.

150. Asal, S., Acir, A., Dincer, I. (2025). Comparative assessment of chloride family hydrogen production cycles driven by a nuclear-geothermal energy system. *Computers & Chemical Engineering*, 194,108967.

151. İnternet: AspenTech: Knowledge Base n.d. URL: https://esupport.aspentech.com/S_Article?id=000062950 Son Erişim Tarihi: 03.07. 2025.

152. İnternet: NIST Chemistry WebBook n.d. URL: https://webbook.nist.gov/chemistry/ Son Erişim Tarihi: 02.29. 2025.

153. Nayar, K.G., Sharqawy, M.H., Banchik, L.D., Lienhard, J.H. (2016). Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence. Desalination, 390,1–24.

154. Asal, S., Acır, A. (2025). Evaluation of the ARC fusion reactor-driven sustainable integrated energy systems for non-electrical outputs. *Energy*, 327, 136369.

155. Ishaq, M., Dincer, I. (2024). A clean hydrogen and electricity co-production system based on an integrated plant with small modular nuclear reactor. *Energy*, 308,132834.

156. Javadi, M.A., Khodabakhshi, S., Ghasemiasl, R., Jabery, R. (2022). Sensivity analysis of a multi-generation system based on a gas/hydrogen-fueled gas turbine for producing hydrogen, electricity and freshwater. *Energy Convers Manag*, 252,115085.

157. Temiz, M., Dincer, I. (2021). Design and analysis of nuclear and solar-based energy, food, fuel, and water production system for an indigenous community. *Journal of Cleaner Production*, 314,127890.



Gazili olmak ayrıcalıktır