



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DOKTORA
TEZİ**

**GEMİLERDE ATIK ISI
KULLANILARAK DENİZ
SUYUNDAN HİDROJEN ELDESİNİN
ARAŞTIRILMASI, ENERJİ VE
EKSERJİ ANALİZİ**

Meryem Gizem SÜNER

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

NİSAN 2024



**GEMİLERDE ATIK ISI KULLANILARAK DENİZ SUYUNDAN
HİDROJEN ELDESİNİN ARAŞTIRILMASI, ENERJİ VE EKSERJİ
ANALİZİ**

Meryem Gizem SÜRER

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2024

Meryem Gizem Sürer tarafından hazırlanan “GEMİLERDE ATIK ISI KULLANILARAK DENİZ SUYUNDAN HİDROJEN ELDESİNİN ARAŞTIRILMASI, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sinop Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....
.....

Başkan: Prof. Dr. Muharrem KARASLAN

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa Kaan BALTACIOĞLU

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Hüseyin YAĞLI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gaziantep Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ

Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, Necmettin Erbakan Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 26 / 04 / 2024

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

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ☒ Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- ☒ Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ☒ Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ☒ Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- ☒ Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ☒ Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

İmza

Meryem Gizem SÜRER

26/04/2024

GEMİLERDE ATIK ISI KULLANILARAK DENİZ SUYUNDAN HİDROJEN ELDESİNİN ARAŞTIRILMASI, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Meryem Gizem SÜRER

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2024

ÖZET

Artan nüfus ve taleplerle birlikte taşımacılık sektörünün yüksek hacimli kullanımı, alternatif enerji kaynaklarının önemini günden güne arttırmaktadır. Dünya ticaretinde ön planda bulunan ve yüksek kullanım alanına sahip taşımacılık araçlarından biri olan deniz araçları daha yeşil bir çevre için yenilenebilir enerji kaynakları konusunda birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu çalışmaların en önemlilerinden biri ise deniz araçlarında bulunan yüksek egzoz gazı sıcaklığına sahip dizel motorlardaki atık ısıdan elektrik üretimidir. Atık ısı geri kazanım sistemi genelde motor verimliliğini arttırmak, CO₂ miktarını azaltmak için uygulanmaktadır. Bu tez çalışmasında, bir yük gemisinin dizel motorunun egzozundan çıkan atık ısıdan üretilen elektrik kullanılarak hidrojen eldesi sağlanmıştır. Elektrik üretimi rankine çevrimi ile sağlanırken, hidrojen üretimi ise deniz suyunun elektrolizi ile sağlanmaktadır. Deniz suyu elektroliz öncesi ters ozmos ile saflaştırılmakta ve hidrojene çevrilmektedir. Sistemin konsept tasarımı yapıldıktan sonra enerji ve ekserji analizi uygulanmıştır.

Deniz suyundan hidrojen üretimi sistemi için bileşenlerin ekserji yıkımlarının yüzdelik oranları büyükten küçüğe olmak üzere şu şekilde hesaplanmıştır: % 55 elektrolizör, % 21 kompresör, % 9 yüksek basınç pompası (9-10), % 7 ters ozmoz (8-9), % 4 yüksek basınç pompası (7-8), % 3 düşük basınç pompası, % 1 ters ozmoz (10-11)'dir. Sediment filtre, ince film membran ve karışık yataklı reçinede ekserji yıkımı çok düşük olduğu için % 0 olarak kabul edilmiştir. Rankine çevrimi için ise ekserji yıkımlarının yüzdelik oranları büyükten küçüğe olmak üzere şu şekilde sonuçlanmıştır: % 86 türbin, % 12 ekonomizer, % 1 pompa, % 1 kondenser. Sonuç olarak, bu çalışma özelinde hem atık ısıdan yararlanılmış hemde deniz suyundan elektroliz yoluyla hidrojen elde edilebilirliğinin enerjetik açıdan imkanı ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler : Atık ısı geri dönüşümü, deniz suyu, hidrojen, rankine çevrimi, ekserji

Sayfa Adedi : 82

Danışman : Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS INVESTIGATION OF HYDROGEN PRODUCTION
FROM SEA WATER USING WASTE HEAT RECOVERY ON SHIPS

(Ph. D. Thesis)

Meryem Gizem SÜRER

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

April 2024

ABSTRACT

Increasing population and demands, as well as high-volume use of the transportation sector, increases the importance of alternative energy sources day by day. Maritime vehicles, which are one of the prominent and highly used transportation vehicles in world trade, have been the subject of many researches on renewable energy sources for a greener environment. One of the most important of these studies is the production of electricity from the waste heat of diesel engines with high exhaust gas temperatures in marine vehicles. Waste heat recovery system is generally applied to increase engine efficiency and reduce the amount of CO₂. In this thesis study, hydrogen production was achieved by using electricity produced from the waste heat from the exhaust of a cargo ship's diesel engine. While electricity production is provided by the rankine cycle (RC), hydrogen production is provided by the electrolysis of sea water. Seawater is purified by reverse osmosis before electrolysis and converted into hydrogen. After the concept design of the system was made, energy and exergy analysis was applied.

For the hydrogen production system from seawater, the percentage rates of exergy destruction of the components were calculated from largest to smallest as follows: 55% electrolyzer, 21% compressor, 9% high pressure pump (9-10), 7% reverse osmosis (8-9), 4% high pressure pump (7-8), 3% low pressure pump, 1% reverse osmosis (10-11). Since exergy destruction in sediment filter, thin film membrane and mixed bed resin is very low, it is accepted as 0%. For the Rankine cycle, the percentage rates of exergy destruction are as follows, from largest to smallest: 86% turbine, 12% economizer, 1% pump, 1% condenser. As a result, in this study, both waste heat was utilized and the energetic possibility of obtaining hydrogen from seawater through electrolysis was demonstrated.

Key Words : Waste heat recovery, seawater, hydrogen, rankine cycle, exergy
Page Number : 82
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Turan ARAT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın yürütülmesi sırasında hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, akademik çalışmanın temellerini öğreten, akademik gelişimimde büyük yardımları bulunan danışmanım Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT'a, çalışmamı yönlendirmeme önerileri ile büyük katkı sağlayan Prof. Dr. Ali KOÇ'a, sağladığı mükemmel çalışma ortamı için annem Özlem SÜRER'e, yoğun çalışmalarım sırasında gösterdiği sabır ve umutsuzluğa düştüğüm anda beni yeniden yüreklendiren Deniz Uluğ GÖREKE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez ve sonuçlarının ülkemize yararlı olması dileklerle.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	37
3.1. Sistem Tanımı ve Metodolojisi	39
3.2. Sistem Bileşenlerinin Seçimi	42
3.3. Enerji ve Ekserji Analiz Denklemleri	46
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	53
4.1. Sistem Ağırlıklarının Analizi.....	53
4.2. Enerji ve Ekserji Analizi.....	55
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR	70
DİZİN	82

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Yaygın renk kodu terminolojisine göre hidrojen üretim metotları	4
Çizelge 1.2. Rankine çevriminin organik rankine çevrimi ile kıyaslanması.....	14
Çizelge 1.3. Bir ısı kaynağının kalite sınıflandırması	16
Çizelge 1.4. Atık ısı kaynakları ve gemideki sıcaklıkları	16
Çizelge 1.5. AE ve PEM arasındaki farklar	21
Çizelge 3.1. Çalışma için seçilen gemi ve motor özellikleri.....	38
Çizelge 3.2. Çalışma için seçilen bileşenlerin kritik özellikleri.....	43
Çizelge 3.3. Deniz suyunun entalpi ve entropi hesaplamalarında kullanılacak sabitler.	49
Çizelge 3.4. Deniz suyunun yoğunluk hesaplamalarında kullanılacak sabitler.....	51
Çizelge 4.1. Komponentlerin ekserji dengeleri.....	57
Çizelge 4.2. Sistemde tanımlı her bir noktanın akış parametreleri ve hesaplanan ekserji değerleri.....	61
Çizelge 4.3. Sistemdeki her bir bileşenin ekserji yıkımı ve ekserji verimliliği	62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Deniz ticaretindeki büyüme, ton ve ton-mil ,2000–2024(Yıllık % değişim).....	1
Şekil 1.2. Deniz ticareti gelişiminin tahmini, 2024–2028 (Yıllık % değişim).....	2
Şekil 1.3. Türkiye 2022 yılı dış ticaretinde deniz yolu taşımacılığının payı.....	2
Şekil 1.4. Bir deniz dizel motoru için enerji haritasının bir örneği	7
Şekil 1.5. Örnek bir klasik rankine çevrimi.....	8
Şekil 1.6. Klasik rankine çevriminin t-s diyagramı.....	9
Şekil 1.7. Sıcaklıklara göre iş akışkanları çalışma aralığı.....	10
Şekil 1.8. Kalina çevrimi şematik gösterimi.....	13
Şekil 1.9. a) Farklı güç çevrimlerinin T-s diyagramları: RC, ORC ve Kalina çevrimi b) gerçek ve ideal buhar çevriminin karşılaştırmalı T-s diyagramı	13
Şekil 1.10. Deniz ortamında uygulanan farklı elektroliz teknolojilerinin şeması	17
Şekil 1.11. Elektroliz teknolojileri a) AE b) PEME c)SOE	20
Şekil 1.12. Tuzdan arıtma sistemlerinin sınıflandırılması.....	22
Şekil 1.13. Tipik bir MSF sürecinin şematik diyagramı	23
Şekil 1.14. Elektrodializ işleminin şeması	24
Şekil 1.15. Örnek bir ters ozmoz prosesi şeması.....	25
Şekil 1.16. Membran teknolojisi karşılaştırması.....	25
Şekil 1.17. Deniz suyundan temiz hidrojen üretmenin yolları	26
Şekil 1.18. Küresel tuzdan arındırma işlemleri için kullanılan su kaynakları.....	26
Şekil 2.1. Energy Observer gemi sisteminin şeması	30
Şekil 3.1. Yürütülen çalışmada izlenen adımlar.....	37
Şekil 3.2. Seçilen gemi görseli	38
Şekil 3.3. Tasarlanan rankine çevrimi elemanları	39

Şekil	Sayfa
Şekil 3.4. Deniz suyundan hidrojen üretimi için tasarlanan sistem	40
Şekil 4.1. Tasarlanan sistemin ağırlık analizi.....	53
Şekil 4.2. RC çevrimi elemanlarının ağırlık yüzdeleri.....	54
Şekil 4.3. Deniz suyundan hidrojen üretimi çevrimi elemanlarının ağırlık yüzdeleri).....	54
Şekil 4.4. Atık ısıdan elde edilen enerjinin dağılımı	55
Şekil 4.5. RC çevrimindeki bileşenlerin enerji harcama yüzdeleri	56
Şekil 4.6. Deniz suyundan hidrojen üretimi çevrimindeki bileşenlerin enerji harcama yüzdeleri	56
Şekil 4.7. Toplam sistemde bileşenlerin enerji harcama yüzdeleri (kW).....	56
Şekil 4.8. Tasarlanan sistemin ekserji hesap noktaları.....	61
Şekil 4.9. Deniz suyundan hidrojen üretimi çevriminde karşılaştırmalı ekserji yıkım oranı	63
Şekil 4.10. RC çevriminde karşılaştırmalı ekserji yıkım oranı	64
Şekil 4.11. RC çevriminde ekserji yıkım yüzdeleri.....	64
Şekil 4.12. Deniz suyundan hidrojen üretimi çevriminde ekserji yıkım yüzdeleri.....	64
Şekil 4.13. Deniz suyundan hidrojen üretim çevrim elemanlarının ekserji verimlilikleri.....	65
Şekil 4.14. RC çevrim elemanlarının ekserji verimlilikleri.....	66
Şekil 4.15. a)RC çevrimi b) deniz suyu hidrojen üretim sistemi bileşenlerindeki ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekipmanların ekserji verimi.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Cl	Klorür miktarı
c_p	Sabit basınçta öz ısı
ex	Özgül ekserji
$\dot{E}x$	Ekerji akısı
$\dot{E}x_{dst}$	Ekserji yıkımı
fz	Fiziksel ekserji
g	Yerçekimi ivmesi
g_{sw}	Spesifik gibss enerjisi
h	Entalpi
in	Giren
ke	Kinetik ekserji
km	Kimyasal ekserji
$\dot{m}$	Kütleli debi
μ	Kimyasal Potansiyel
η	Verimliliği
out	Çıkan
o	Ortam şartları
pe	Potansiyel ekserji
p	Yoğunluk
P	Basınç
R	Tuzluluk iletkenlik oranı
S	Tuzluluk oranı
s	Entropi
sw	Deniz suyu
T	Sıcaklık
USD	Amerikan doları
v	Özgül hacim

Simgeler**Açıklamalar**

V	Hız
Q	Isı Aktarımı
W	İş aktarımı
wt	Su
w_s	Tuzluluk oranı
z	Yükseklik

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AE	Alkalın elektroliz
CO₂	Karbondiyoksit
CCS	Karbon tutma ve depolama
DES	Deniz suyunun direk elektrolizi
DWT	Detveyt ton
EGR	Egzoz gaz resirkülasyonu
GWP	Sera ısınma potansiyeli
HPP	Yüksek basınçlı pompa
IRENA	Uluslararası yenilenebilir enerji ajansı
LPP	Düşük basınçlı pompa
MD	Membran damıtma
MF	Mikrofiltrasyon
MSF	Çok aşamalı flaş damıtma
MSF-OT	Tek geçişli çok kademeli flaş
MSF-BC	Tuzlu su sirkülasyonu çok kademeli flaş
MED	Çoklu etkili damıtma
MEE-FF	İleri beslemeli çok etkili buharlaşma
NF	Nanofiltrasyon
ORC	Organik rankin çevrimi
PEME	Proton değişim membran elektrolizi
RC	Rankin çevrimi
RO	Ters ozmoz

Kısaltmalar**Açıklamalar****SMR**

Buhar metan formu

SOE

Katı oksit elektrolizi

TDS

Toplam çözünmüş katı madde

UPW

Ultra saf su

UF

Ultrafiltrasyon

UNCTAD

Birleşmiş milletler ticaret ve kalkınma konferansı

WHR

Atık ısı geri kazanım sistemi



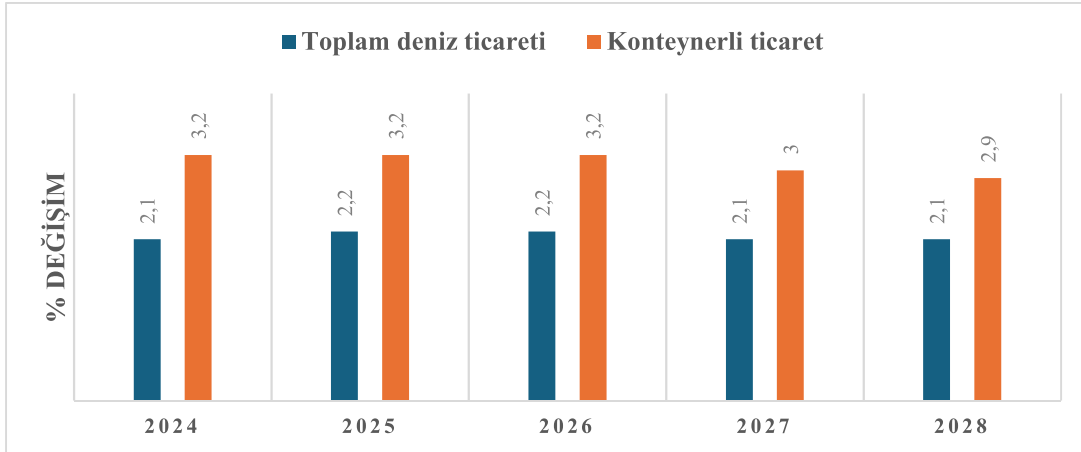
1. GİRİŞ

UNCTAD'a (Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı) göre deniz taşımacılığı, diğer seçeneklere göre daha düşük maliyetli, daha güvenli ve daha büyük kapasiteye sahip olduğu için, hacim olarak dünya ticaretinin % 80'inden fazlasını kapsamaktadır [1-2]. Enerji, hammadde, gıda ve nihai ürünlere yönelik küresel talep; dünya nüfusu ve buna bağlı ekonomiyle birlikte büyüyen deniz taşımacılığı yoluyla karşılanmaktadır [2].

UNCTAD verilerine göre düzenlenen uluslararası deniz ticaretinin gelişiminin grafiği Şekil 1.1' de görülmektedir [3]. Uluslararası deniz ticaretinin yüklü hacmi 2009'dan COVID-19 salgınının ortaya çıkmasına kadar 10 yıl boyunca sürekli bir büyümeye tanık olmuştur. 2008-2009 dünya krizinin ardından pandemi nedeniyle en kötü senaryo 2020 yılında görülmektedir. 2022'nin başlarından itibaren ise deniz ticareti, özellikle de kuru yük ve tanker taşımaları, Ukrayna'daki savaştan etkilenmiştir. Savaş, nakliye modellerinde değişikliklere yol açmakta ve başta petrol ve tahıl olmak üzere emtialar için kat edilen mesafeleri artırmaktadır. Deniz ticareti hacmi 2022'de % 0,4 marjinal bir şekilde daralmış, lakin UNCTAD' a göre 2023'te bu hacmin % 2,4 büyüyeceği tahmin edilmektedir. UNCTAD'ın 2024-2028 yılı için deniz ticareti hacmi değişimi tahmini (yıllık yüzde değişimi) Şekil 1.2'de verilmiştir [3]. 2024-2028 yılları arasında her yıl hacimsel olarak artış beklenmektedir.

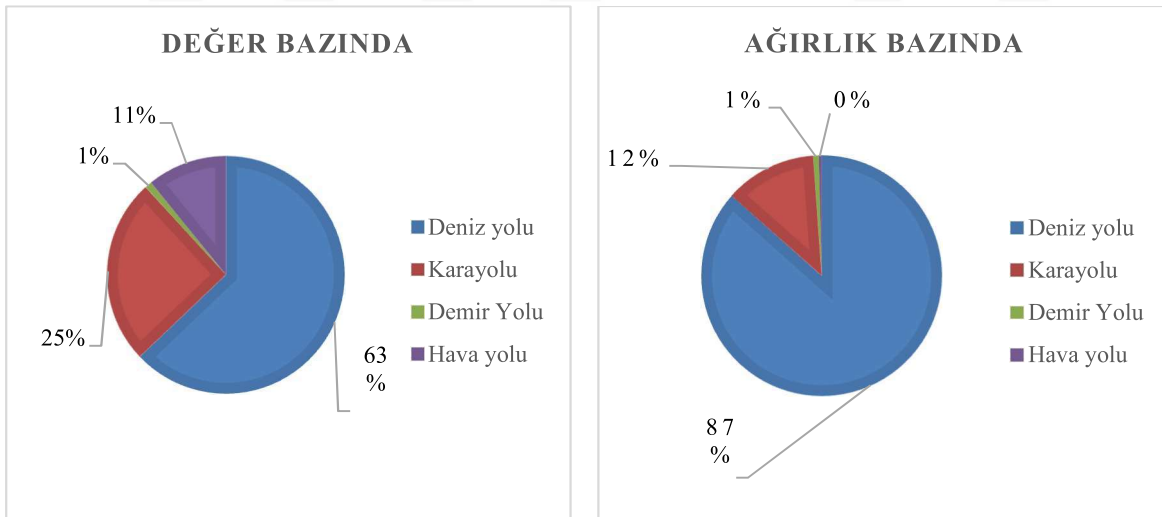


Şekil 1.1. Deniz ticaretindeki büyüme, ton ve ton-mil ,2000–2024 (Yıllık % değişim)[3]



Şekil 1.2. Deniz ticareti gelişiminin tahmini, 2024–2028 (Yıllık % değişim) [3]

Türkiye’deki dış ticaret faaliyetleri taşınan malların değeri ve ağırlığı bazında değerlendirildiğinde denizyolu taşımacılığının en yüksek paya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 1.3’de 2022 yılında Türkiye dış ticaretinin ağırlık ve değer bazında değerlendirildiğinde taşımacılık sektörlerinin payları şematize edilmiştir [4]. Değer bazında % 63’lük, ağırlık bazında % 87’lik payı ile deniz taşımacılığı, diğer taşımacılık sektörüne göre daha öndedir.



Şekil 1.3. Türkiye 2022 yılı dış ticaretinde deniz yolu taşımacılığının payı [4]

Çoğu ticari ve kargo gemisi, ana motor olarak fosil yakıt kullanan dizel motorlara sahiptir. Dolayısıyla deniz taşımacılığının yüksek hacimli kullanımı, yüksek yakıt tüketimi ve yüksek sera gazı emisyonu gibi ekonomik ve çevresel etkilere neden olmaktadır. Ekonomik etkileri arasında deniz taşımacılığının büyümesine bağlı olarak yakıt tüketimindeki ve yakıt fiyatlarındaki artış yer almaktadır [5].

Çevresel etki açısından, deniz taşımacılığı, en verimli nakliye seçeneklerinden biri olmasına rağmen, 2018 yılında 1 076 Mt sera gazı emisyonu salınımı gerçekleşmiş; bunun 1 056 Mt'nunu ise CO₂ emisyonu oluşturmuştur. Bu ayrıca, toplam antropojenik CO₂ emisyonlarının yaklaşık % 3'üne tekabül etmektedir. Ancak bu oranın 2050 yılına kadar % 17'ye çıkacağı öngörülmektedir. Bu da küresel denizcilik CO₂ emisyonlarının önlem alınması gereken bir olgu olduğunu göstermektedir [6]. Ayrıca tüm dünya ile birlikte iklim değişikliği ve karbon ayak izinin minimize edilmesi amacıyla kabul edilen Paris Antlaşmasının, TBMM tarafından uygun bulunması ile birlikte ülkemiz, 2030 yılı itibariyle olası sera gazları emisyonunu %18-21 arasında azaltmayı taahhüt etmiştir [4].

Çevresel faktörler, nüfus artışı ve ekonomik kaygılar sonucunda; araştırmacılar, fosil yakıtlar yerine alternatif enerji kaynaklarına yönelmeye başlamışlardır. Günümüzde birçok araştırmacı ve enerji analisti, hidrojenin alternatif yakıtlara geçişte kilit bir rol oynadığı konusunda hemfikirdir. Hidrojeni alternatif bir yakıt olarak görmekte cazip kılan en önemli özelliklerinden biri sera gazı emisyonu salınımı olmadan kullanılabilmesi ve karbonsuzlaştırmayı sağlamasıdır. Bu bağlamda, saf hidrojen talebi günden güne artmaktadır. 1975 yılında 18,2 milyon ton olan saf hidrojen talebi 2021 yılında 78,6 milyon ton'a çıkmıştır. Buda ortalama yılda %3'lük bir artışa tekabül etmektedir. 2021 yılındaki saf hidrojen talebinin %50,4'ü petrol rafinerisi ve %43'ü amonyak üretimi içindir [7]. Hidrojenin gelecekteki talep profili (taşıma araçlarında yakıt olarak kullanımı vb.), alt pazardaki ürünlerin talebine bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Fosil yakıtların yerine hidrojene tam geçiş ancak hidrojen üretimi, depolanması ve dağıtımıyla ilgili mevcut teknik, çevresel ve maliyet zorluklarının aşılmasıyla başarılabilecektir [1].

Hidrojenin alternatif enerji kaynağı/taşıyıcısı olarak kullanılmasını etkileyen en önemli faktörlerden biri, hidrojenin üretim yöntemidir. Hala çok sınırlı kullanıma sahip olan yeşil hidrojen; deniz, havacılık ve kara taşımacılığında birçok uygulamada kullanılabilen bir enerji taşıyıcısı rolü üstlenmektedir. Hidrojen birçok enerji kaynağından üretilmektedir ve bu üretim ölçeğinin daha özelleştirilebilmesi için IRENA (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı) ortak bir renk kodu terminolojisi kullanmaktadır. Günümüzde hidrojen üretiminin % 95'i fosil yakıtlardan elde edilmektedir [8]. Çizelge 1.1'de hidrojen üretim yöntemleri bu renk kodu terminolojisine göre özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Yaygın renk kodu terminolojisine göre hidrojen üretim metotları [8-10]

Renk	Proses	Kaynak	Açıklama
Gri Hidrojen	SMR(buhar metan formu) veya gazlaştırma	Metan veya kömür	- Fosil yakıtlardan üretilen gri hidrojenin kullanılması CO₂ salınımına neden olur ve hala emisyon minimizasyonunu karşılamamaktadır. - SMR şu anda en ucuz endüstriyel hidrojen üretim kaynağıdır.
Mavi Hidrojen	SMR veya karbon yakalamalı gazlaştırma (%85-95)	Metan veya kömür	- Gri hidrojenden tek farkı üretiminde karbon tutma ve depolama (CCS) sisteminin kullanılmasıdır. - CO₂ taşıma ve depolama için ek maliyetler gerektirir. - CCS sistemi, CO₂'nin % 5-15'inin hala yayıldığı anlamına gelmektedir. - Kısa vadeli bir geçiş yöntemi olarak değerlendirilmektedir.
Turkuaz Hidrojen	Piroliz	Metan	- Metanın içindeki karbon katı karbona dönüştürülür. - Katı Karbon, gaz halindeki CO₂'den daha kolay depolanabilmektedir. - Şu anda turkuaz hidrojen üretimi pilot uygulamalar aşamasındadır.
Yeşil Hidrojen	Elektroliz	Yenilenebilir elektrik	- Yeşil hidrojen yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmektedir. (Güneş, hidrolik, rüzgar, dalga enerjisi gibi) - En yaygın yöntem suyun elektrolizi ile elde edilen hidrojendir.

Birçok avantajının yanında, yeşil hidrojen üretiminin önündeki bariyerler şu şekilde sıralanabilir [8,11]:

- Maliyet: 2019'da ortalama bir yeşil hidrojen üretim tesisinden elektrik kullanılarak üretilen yeşil hidrojenin maliyeti, ortalama olarak gri hidrojenin iki ila üç katıdır. Ayrıca, son yıllarda kullanılan yakıt hücresel araçlar, fosil yakıtlı muadillerine göre en az 1,5 ila 2 kat daha pahalıdır. IRENA, 2020 yılında, elektrolizin sermaye maliyetinin 2010'dan bu yana %60 düştüğünü ve bu dönemde hidrojen maliyetinin 10-15 USD/kg'dan 4-6 USD/kg'a düşmesine neden olduğunu bildirmiştir.

-Yetersiz altyapı: 2020'lerin başında dünya çapında 470 hidrojen yakıt ikmal istasyonu faaliyetteyken, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği'nde 200 000'den fazla benzin ve dizel yakıt ikmal istasyonu bulunmaktaydı. Dünya genelinde doğal gaz için 3 milyon km'den fazla boru hattı bulunurken, hidrojen iletim boru hattı için bu değer 5 000 km civarındadır.

-Enerji Kayıpları: Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi %30-35 civarında enerji (elektrik ve ısı) kaybına neden olmaktadır. Ek olarak, hidrojeni diğer taşıyıcılara dönüştürmek için % 13-25 enerji kaybedilirken, hidrojenin taşınması, enerjisinin % 10-12'sine eşdeğer ek enerji girdileri gerektirmektedir. Yakıt pillerinde kullanılması gerekirse ise yakıt pili verimliliğine bağlı olarak % 40-50 oranında enerji kaybına neden olabilmektedir.

-Değer eksikliği: Yeşil ürünlerin kullanımını teşvik edecek hedeflerin veya teşviklerin azlığı, yeşil hidrojen için olası alt kullanımların bir kısmını engellemektedir.

-Sürdürülebilirlik: “Yeşil” hidrojen sınıfında hidrojen üretimi için, kaynağın sadece yenilenebilir enerjiden elektrik üretilmesi ile uygulanması gerekmektedir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı yerine fosil yakıt tesislerinden elektrik elde ediliyorsa, hidrojenin sürdürülebilirliği değerlendirilirken üretim sırasında oluşan CO₂ miktarı da dikkate alınmalıdır.

Taşımacılık alanında hidrojenin kullanımında, üretimden sonra dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli faktör de hangi depolama yönteminin kullanılacağıdır. Deniz araçları araştırmalarında kullanılan en yaygın depolama yöntemleri sıkıştırılmış H₂ depolama, sıvı H₂ depolama ve metal hidrit depolamadır [12]. Farklı metotlar farklı teknoloji düzeyine ihtiyaç duysa da, tüm yöntemlerin çözülmesi gereken sorunları bulunmaktadır. Bu problemlerin en önemlilerinden biri hidrojenin düşük hacimsel enerji yoğunluğudur.

Sıkıştırılmış hidrojen depolama, diğer tekniklere göre daha basit, daha ekonomik ve gemi taşımacılığında en çok kullanılan yöntemdir. Sıkıştırılmış hidrojen için, sırasıyla 23,3 kg/m³ ve 39,3 kg/m³ yoğunluk veren 350 ila 700 bar arasındaki tanklar kullanılmaktadır. Bu tankların yüksek basınç altında depolama yapmasındaki amaç hidrojen gazını sıkıştırarak yoğunluğu arttırmaktır. Basınç artışı, artan yoğunluk üzerinde olumlu bir etkiye sahip olsa da, çok yüksek basınçlar yakıt ikmali yapmayı zorlaştırmaktadır [13]. Ayrıca, basınç ne kadar yüksek olursa, sıkıştırma için o kadar fazla enerji gerekmektedir. Bununla birlikte, hidrojenin düşük hacimsel enerji yoğunluğu nedeniyle çözüm bekleyen başka bir önemli noktası da ağırlıktır [13-16]. Bu yüzden basınçlı tanklarda malzeme seçimi önemli bir faktördür. Depolama malzemesi olarak kompozit malzemeler kullanıldığında, depolanan hidrojenin tüm depolama ağırlığına oranı % 1-3 civarında iken, kompozit malzeme kullanımı ile bu değer % 11,3'e yükselmektedir [16].

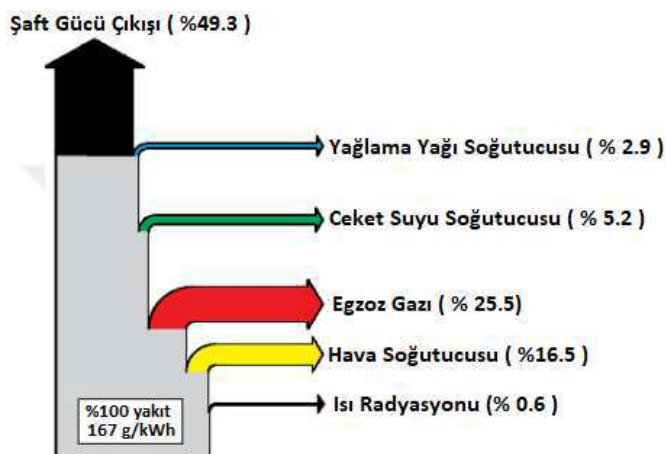
Sıvı hidrojen depolama yönteminde hidrojen, kriyojenik formda depolamak için 21 K sıcaklıkta tutulmakta ve bu sıcaklıkta yaklaşık 71 kg/m³ yoğunluğa sahip olmaktadır. Sıvı hidrojen depolama ile basınçlı hidrojen depolamaya kıyasla, yoğunlukta önemli bir artış meydana gelmektedir. Ayrıca düşük basınçta çalışması nedeniyle tank kütlesinin azaltılmasını mümkün kılmaktadır. Sıvı hidrojen depolama yöntemi ile ağırlık problemi iyileştirilebilmektedir. Sıvı depolama, gaz sıkıştırmaya göre daha düşük basınçlarla çalıştığından daha güvenli olarak değerlendirilmektedir [12,14-20]. Ancak bu yöntem, sıvı hidrojenin 21 K'de depolanması nedeniyle özel depolama teknikleri gerektirmekte ve yakıt sistemi bileşenlerinde daha fazla taşıma aparatlarına (sıvı yakıt pompaları, yakıt hatları, ısı eşanjörleri vb.) sahip olmasına sebebiyet vermektedir [17-18].

Hidrojen; metallerde, alaşımlarda ve ara ürünlerde hidrürler olarak depolanabilmektedir. Metalik alaşımlar olan metal hidritler, hidrojeni emme ve salma yetenekleri ile bir depolama mekanizması olarak kullanılabilirler [14-20]. Metal hidritlerin dezavantajları; çok ağır olmaları, belirli bir doldurma-boşaltma kapasitesine sahip olmaları ve ayrıca nadir bulunan elementlerden oluşmalarıdır [12,14-20]. Metal hidrit tankı; hidrojeni tekrar tekrar depolamak için kullanılabilen ve tankın ömrünü sınırlayan faktör, tankta hidrojenin depolanacağı boşlukta yabancı maddelerin birikmesi ile doğrudan ilintili olmaktadır [20]. Metal hidritlerin yukarıda zikredilen ana dezavantajlarının bulunması nedeniyle ticari kullanım için, hem teknolojinin hem de maliyetlerinin pozitif anlamda geliştirilmesi gerekmektedir [14-20].

Sonuç olarak hidrojenin ‘Yeşil’ olabilmesi için üretim yöntemlerinin de yeşil olması gerekmekte ve verimli olabilmesi için sisteme uygun depolama yöntemi seçilmesi gerekmektedir.

Deniz taşımacılığında, deniz aracının hareket etmesini sağlayan dizel motordan çıkan yüksek ısının geri kazanımı ile kullanılabilir enerjiye çevrilmesi, hidrojen üretimi için atık ısıdan yararlanılarak dönüşüm sağlanacağından dolayı kullanılabilir bir fırsat olarak görülmektedir. Atık ısıdan elde edilen elektrik enerjisi ile, hidrojen üretimi için gerekli elektroliz için ihtiyaç olunan güç sağlanabilecektir.

Dizel ana makineli bir gemi için atık ısının kaynağı dizel motorun kendisidir. Büyük iki zamanlı düşük hızlı dizel motorların enerji haritaları incelendiğinde, yüke ve çalışma koşullarına bağlı olarak kullanılan yakıt enerjisinin maksimum % 53’ü faydalı mekanik iş üretmeyi başarmaktadır. Şekil 1.4’de maksimum 70 MW güç üreten ve yaklaşık % 49 termal verime sahip olan büyük bir deniz aracının dizel motoru için enerji haritasının bir örneğini göstermektedir [21]. Şekilden görüleceği üzere, giren enerjinin % 2,9’u yağlama suyu soğutucusuna, % 5,2’si ceket suyu soğutucusuna, % 25,5’i egzoz gazına, % 16,5’u hava soğutucuna, % 0,6’sı ısı radyasyonuna harcanmaktadır. Buda, yakıt enerjisinden elde edilen teorik işin, % 50’sinden fazlasının kullanılmadığı anlamına gelmektedir [21]. Şekil 1.4’ten de anlaşılacağı gibi dizel motordaki başlıca ısı kaynağı egzoz gazıdır ve enerjinin daha verimli kullanılması ile ilgili literatür çalışmaları, bu atık ısının nasıl geri dönüştürüleceği üzerine yoğunlaşmıştır.

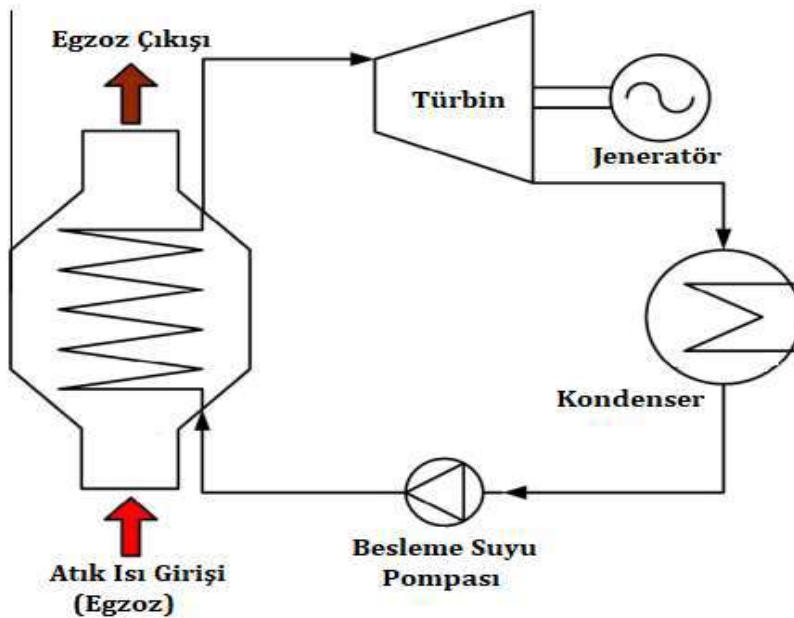


Şekil 1.4. Bir deniz dizel motoru için enerji haritasının bir örneği [21]

Hali hazırda uzak yol vardiyalı gemilerin birkaçı WHR (atık ısı geri kazanımı) sistemlerini kullanmaktadır. Literatüre göre; en çok kullanılan veya enerji dönüşüm potansiyeli olan atık ısı geri kazanım çevrimleri aşağıdaki gibidir [22-24]:

- Rankine döngüsü (klasik rankin çevrimi/ organik rankin çevrimi / süper kritik rankine çevrimi)
- Kalina Çevrimi

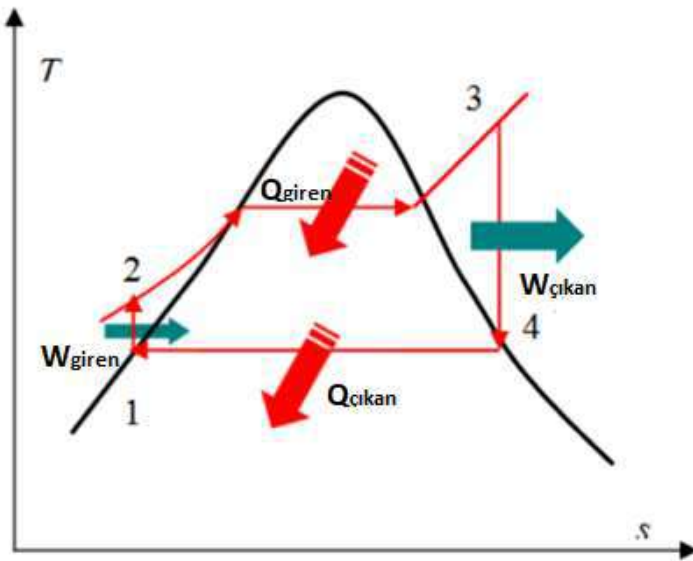
Rankine çevrimi, ısı enerjisini mekanik işe dönüştüren termodinamik bir çevrimdir. Operasyon sırasında dolaşan bir çalışma sıvısı sürekli olarak buharlaştırılır ve yoğunlaştırılır. Rankin çevrimi ile çalışan basit bir enerji santrali temel olarak buhar jeneratörü (kazan + kızdırıcı), genleşme cihazı (türbin), kondansatör ve besleme pompası olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır [22]. Şekil 1.5'te örnek bir rankine çevrimi verilmiştir [22]. Hali hazırda, ısı geri kazanım sistemi için en yaygın olarak kullanılan teknoloji, çalışma akışkanı olarak su kullanan klasik rankine çevrimidir. Çalışma akışkanının su olması nedeni ile en basit ve güvenilir sistem olarak kabul edilmektedir [25].



Şekil 1.5. Örnek bir klasik rankine çevrimi [22]

Şekil 1.5'ten görüleceği üzere, öncelikle çalışma akışkanı dışarıdan mekanik veya elektrik gücü ile beslenen bir besleme suyu pompası ile düşük basınçtan yüksek basınca pompalanmaktadır. Yüksek basınca ulaşan çalışma akışkanı, kızgın buhar haline gelene kadar ısıtıcıda ısıtılır. Kızgın buhar daha sonra türbinden geçerken genişler ve genişlerken türbinde iş üretilir.

Türbin çıkışında kızgın buhar sıcaklığının ve basıncının büyük bir kısmını kaybetmektedir. Çalışma akışkanı bu aşamadan sonra kondensere girmekte ve doymuş sıvı haline gelmektedir. Aynı döngü tekrarlayarak devam etmektedir.



Şekil 1.6. Klasik rankine çevriminin t-s diyagramı [25]

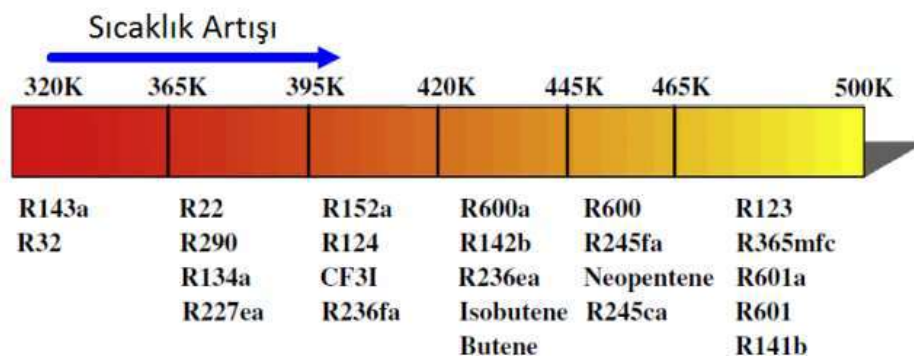
Şekil 1.6 rankine çevriminin T-s diyagramını vermektedir. Bu diyagramdan üretilen güç miktarının genişleme kısmına eşit olduğu (3-4 noktaları arası) ve kullanılan atık ısının miktarının ise buharlaşma ve aşırı ısınma kısmına eşit olduğu (2-3 noktaları arası) anlaşılmaktadır. Ayrıca, yoğuşma kısmında (4-1 noktaları arası) ve su pompalama kısmında (1-2 noktaları arası) yer alan bu çevrimden, hala ısı çıktısının olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle, rankine sistem verimliliğinin aşağıdaki basitleştirilmiş formülle ifade edilebilmektedir [25]:

$$\eta_{RC} = \frac{W_{out(3-4)}}{W_{in(1-2)} + Q_{in(2-3)}} \quad (1.1)$$

Sıcaklık farkından kaynaklanan ekserji tahribatını azaltmak için başka bir yaklaşım süperkritik rankine çevrimidir. Çalışma akışkanı kritik noktalarının ötesinde buharlaştırılır ve bu yaklaşım izotermal faz değişimi yaratmaz. Klasik rankine çevrimi ile arasındaki fark, bu çevrimin herhangi bir sıvı üretmemesi ve dolayısıyla gelişmiş iki fazlı türbin genişleticiye ihtiyaç duymamasıdır. Ancak madde kritik noktasının ötesinde çalışmak, aşırı çalışma koşulları (T, P) gerektirir ve bu da işletme giderlerini önemli ölçüde artırır. Üstelik bu çevrim, çalışma koşulları nedeniyle sağlam malzemeler de gerektirebilir [25].

Klasik rankine çevriminde çevrim akışkanı olarak su kullanılmaktadır. Organik rankine çevriminde ise klasik rankine çevriminden farklı olarak daha düşük sıcaklıklarda ısıyı geri kazanmak için organik bir akışkan kullanılmaktadır [26-28]. Bu yüzden klasik rankine çevrimi, 200-250 °C egzoz gazı sıcaklığının altında, az verimli kabul edilirken, organik rankine çevrimi kullandığı çevrim akışkanlarının özelliği ile verim/sıcaklık konusunda daha avantajlıdır [29]. Organik rankine çevriminde (ORC) çevrim akışkanı tipik olarak hidrokarbon veya halokarbondan oluşmaktadır. Çalışma akışkanı olarak değişken akışkanlar kullanıldığı için çalışma koşulları su bazlı sistemden daha düşük olabilmektedir.

Ek olarak ORC’de, sıvıyı aşırı ısıtmak için daha az miktarda ısı gerekmekte ve dolayısıyla daha yüksek geri kazanım verimliliğine ulaşılabilir. Ancak temel bileşenler olarak hidrokarbon ve halokarbon kullanımı, yanıcı (Etan gibi) ve ozon dostu olmayan (HCFC gibi) bir malzemenin kullanılmasını gerektirebilmektedir. Öte yandan yanıcı olmayan ve CFC içermeyen organik sıvılar genellikle yüksek maliyetleri yanında getirebilmektedir. Bu nedenle bir ORC sisteminde çalışma sıvısı seçimi dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biridir [25]. Organik iş akışkanlarının çalışma aralığı Şekil 1.7’de verilmiştir [30].



Şekil 1.7. Sıcaklıklara göre iş akışkanları çalışma aralığı [30]

Organik Rankine Çevriminde kullanılacak bir akışkanın aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir [31-32]:

- Termodinamik performans: Verimlilik ve/veya çıkış gücü mümkün olan en yüksek seviyede olmalıdır.
- Yüksek buhar yoğunluğu: Özellikle çok düşük yoğunlaşma basıncı gösteren sıvılar için önemlidir.
- Düşük viskozite: Isı eşanjörlerinde yüksek ısı transfer katsayıları ve düşük sürtünme kayıpları ile sonuçlanmaktadır.
- Yüksek termal iletkenlik: Yüksek ısı transfer katsayısı ile alakalıdır.
- Parlama Noktası: Alev almaması için yüksek değere sahip olmalıdır.
- Kabul edilebilir buharlaşma basıncı: Yüksek basınçlar; yüksek yatırım maliyeti ve daha karmaşık bir sistem ile sonuçlanmaktadır.
- Kimyasal Dayanım: Organik akışkanlar yüksek sıcaklıklarda ve basınçlarda kimyasal bozulmaya (korozyon, tutuma vb) maruz kalabilmektedir.
- Erime sıcaklığı: Çalışma sıvısının donmaması için, en düşük ortam sıcaklığından daha düşük olmalıdır.
- Gizli Isı: Verimli ısı geri kazanımı için yüksek olmalıdır.
- Yüksek güvenlik seviyesi: Toksisite, yanıcılık gibi birçok tehlike açısından güvenilir olmalıdır.
- Düşük Ozon Tüketme Potansiyeli: Mevcut akışkanlar için sıfır ya da sıfıra yakın olmalıdır. (CI ve Br içeren tüm soğutucular ozon tahribatına neden olduğu için üretimleri durdurulmuştur.)
- GWP (Sera Isınma Potansiyeli) değeri: Sera etkisi baz alınmaktadır. Küresel ısıtma etkisi olarak tanımlanan bu değer, akışkan seçiminde önemlidir. GWP değerinin 200'ün altında olması beklenmektedir.
- Kolay bulunabilirlik ve düşük maliyet: Maliyet açısından önemlidir.

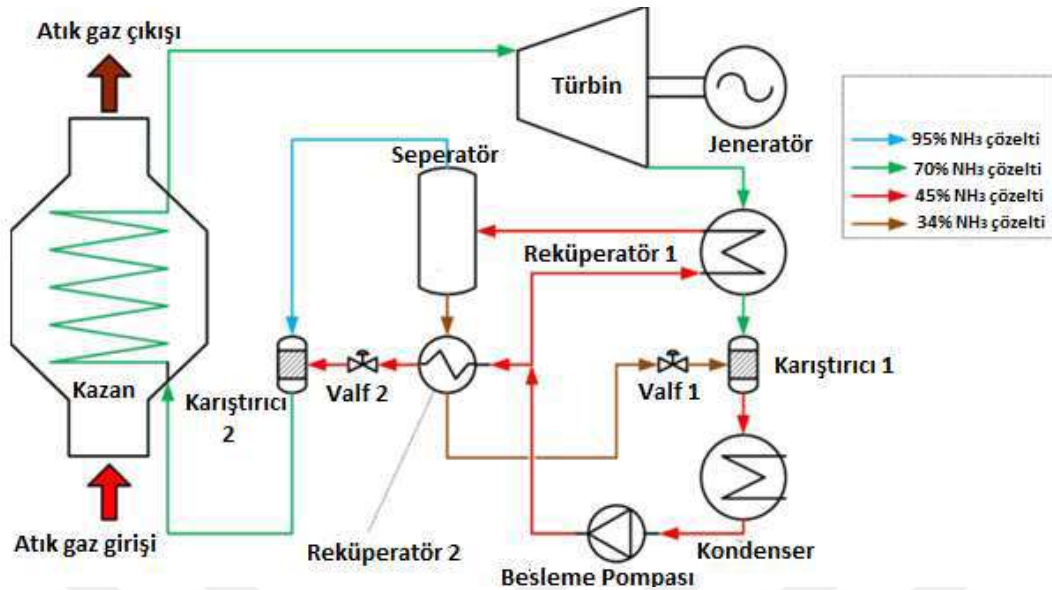
Bir rankin çevriminde suyun iş akışkanı olarak kullanımının avantajları şu şekilde sıralanabilir [33]:

- Yüksek özgül ısıya sahip olması sebebi ile iyi bir enerji taşıyıcı olması,
- Daha az pompalama gücü gibi olumlu etki yaratan düşük vizkoziteye sahip olması,
- Çevre dostu olması ve ucuz tedarik edilebilmesi,

- Yanıcı özelliğe sahip olmaması,
- Termal ve kimyasal olarak stabilizeye sahip olması.

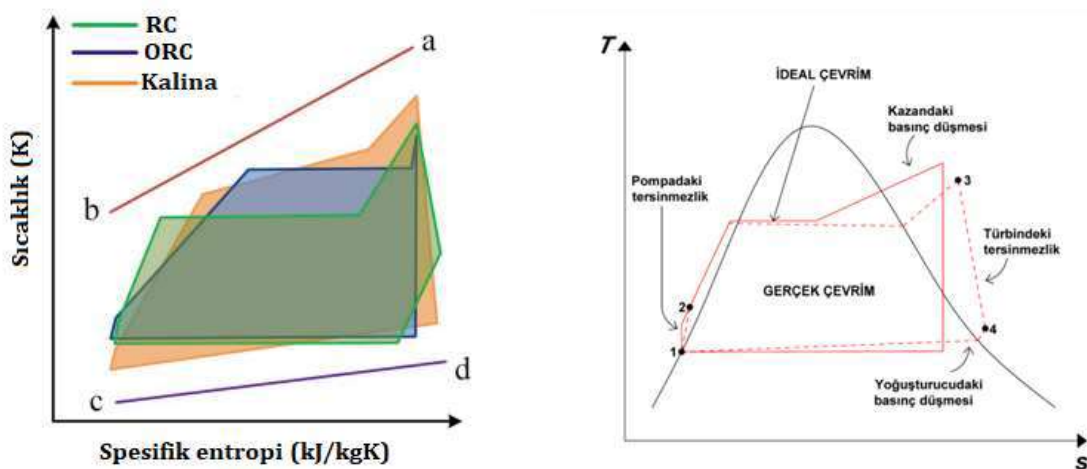
Su akışkan olarak kullanıldığında, tüm bu olumlu özelliklere ek olarak bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar akışkanı aşırı ısıtma ihtiyacı (genleşme sırasında yoğuşmayı önlemek için), türbinin kanatlarında aşınma riski olması vb. dır. Bu yüzden sistem özelliklerinin iyi belirlenmesi ve sistem gereksinimlerine göre doğru akışkan seçilmesi çok önemlidir [33].

Kalina çevriminde (KC) ise; 1983 yılında Dr. Alexander Kalina tarafından önerilen ve amonyak-su karışımına dayalı termodinamik güç çevrimidir, Rankin çevriminin değiştirilmiş bir şeklidir ve çeşitli uygulamalar için daha iyi bir çalışma verimliliğine sahiptir. En umut verici kullanım ve önemli verimlilik kazanımları, düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarında gerçekleştirilmekte ve bu da onu atık ısı geri kazanımı için uygun bir seçenek haline getirmektedir. Kalina döngüsü, amonyağın çok düşük buharlaşma sıcaklığına (-33 °C) sahip olması nedeniyle düşük sıcaklıktaki atık ısı kaynağı için uyumlu şekilde çalışmasıyla oluşur. Donma sıcaklıklarının altında dahi çalışabilme özelliğine sahiptirler [22,25]. Örnek bir Kalina çevrimi Şekil 1.8’de verilmiştir [22]. Çalışmaları açısından akış kontrol valfi, besleme pompasının ayırıcıya akışının toplam kısmını kontrol eden bir regülatör görevi görür. Devrenin kazan-türbin ve kondenser bölümünde farklı amonyak konsantrasyonlarını korumak için akışın hassas kontrolü önemlidir. Reküperatör, ayırıcıya akan akışkanı ısıtmak için türbin çıkışındaki akışkandan ısının bir kısmını geri kazanır. Esas olarak yoğunlaştırıcıda atılan ısı miktarını azaltır. Ayrıca, ayırıcıdan dışarı akan fakir ve zengin karışımın kütle oranının belirlenmesinde çok önemli bir faktör olan ayırıcıya giden sıvının sıcaklığını da kontrol eder. Separatör, reküperatörden gelen akışkanı zengin ve fakir karışımlara ayırmak için kullanılır. Zengin ve fakir karışımların kütleli akış hızı, ayırma verimliliğine, sıcaklığa, giriş karışımının bileşimine ve ayırıcı içindeki basınca bağlıdır. Sistem devresinde gerekli bileşim akışlarını elde etmek için sistemde iki karıştırıcıdan oluşan bir set kullanılır. Birinci karıştırıcı, kondansatörün girişinde bulunur ve burada ayırıcıdan gelen fakir karışım, reküperatörden geçtikten sonra türbinden çıkan egzoz ile karıştırılır. Burada türbin egzozu ve ayırıcı, düşük konsantrasyonlu bir sıvıyı kondansatöre beslemek için fakir sıvıyı karıştırır. İkinci karıştırıcı, kazanın giriş tarafında bulunur; burada akış kontrol vanasından kalan akış ve ayırıcıdan gelen zengin karışım, kazanı yüksek konsantrasyonlu çalışma sıvısıyla beslemek için karıştırılır.



Şekil 1.8. Kalina çevrimi şematik gösterimi [31]

Şekil 1.9’da RC, ORC ve KC çevrimlerinin T-s diyagramları görülmektedir. Olgun bir teknoloji olarak su bazlı buharlı RC, gemilerdeki egzoz ısısının geri kazanılması için başarıyla ticarileştirilmiştir. Ancak yüksek buharlaşma sıcaklığı onu daha az verimli hale getirmektedir. Daha düşük kaynama noktalarına sahip çalışma akışkanlarının seçilmesindeki yüksek esneklik nedeniyle ORC, düşük sıcaklıktaki atık ısı kaynaklarından daha fazla güç geri kazanma kapasitesine sahiptir. Saf bir akışkanla çalışan geleneksel güç çevrimlerinin bir diğer sınırlaması da sabit buharlaşma sıcaklığıdır [25]. Çizelge 1.2’ de ise ORC ve RC çevriminin detaylı kıyaslaması yapılmıştır [34].



Şekil 1.9. a) Farklı güç çevrimlerinin T-s diyagramları: RC, ORC ve kalina çevrimi [25], b) gerçek ve ideal buhar çevriminin karşılaştırmalı T-s diyagramı [31]

ORC’de, başlangıç durumundaki (düşük basınç ve sıcaklık) doymuş su, yüksek basınç ve sıcaklığa sıkıştırılmaktadır. Birim kütle başına düşen iş, iki durum arasındaki entalpi farkları ile hesaplanmaktadır. Sıkıştırılmış su, suyun doyma noktasına kadar sabit basınçta ısıtılır. Doymuş sıvı su, evaporatör veya kazan içerisinde sabit basınç ve sıcaklıkta buharlaştırılır. Yüksek basınçtaki su buharı alçak basınçta doğru genişler. Türbinin izantropik verimine göre hesaplama ve durum belirtilir. Düşük basınçlı buhar, sabit basınç ve sıcaklıkta başlangıç koşullarına yoğunlaşır [35].

Çizelge 1.2 Rankine çevriminin organik rankine çevrimi ile kıyaslanması [34]

	Rankine çevriminin avantajları (ORC’ye kıyasla)	Rankine çevriminin dezavantajları (ORC’ye kıyasla)
Termodinamik Kıyaslama	Daha yüksek buhar sıcaklıkları mümkündür.	Düşük sıcaklıklarda daha az verimlidir.
	Performansı azaltan ayrışma ürünleri yoktur.	Daha düşük türbin izantropik verimleri bulunur.
	Boşluğa genişletmek daha kolaydır.	Daha küçük evaporatör sıkışma noktaları bulunur.
	Daha düşük viskozite – daha düşük sürtünme kayıpları ve daha yüksek değişim katsayıları vardır.	Islak buhar alanına doğru genişleme nedeniyle damlacık erozyonu tehlikesi (negatif doymuş buhar eğrisi) bulunur.
Maliyet, tesis mühendisliği ve operasyonel hususlar	Ara devreye gerek yoktur.	Yatağı yağlama kolayca mümkün değildir.
	Elektronikler doğrudan tesise yerleştirilebilir.	Alaşımsız çelik için su analizi gereklidir.
	Ucuz çalışma sıvısı, imha maliyeti yoktur.	Daha az kompakt ve dolayısıyla daha pahalı aparatlara sahiptir.

Çizelge 1.2 (devam) Rankine çevriminin organik rankine çevrimi ile kıyaslanması [34]

	Rankine çevriminin avantajları (ORC'ye kıyasla)	Rankine çevriminin dezavantajları (ORC'ye kıyasla)
Güvenlik hususları	Yanıcı, patlayıcı, toksik, kanserojen veya teratojenik sıvılar içermez, tehlikeli ayrışma ürünleri yoktur.	Alaşımız çelikte olası korozyona sahip olabilmektedir.
	Küresel Isınma Potansiyeli veya Ozon Tüketimi Potansiyeli Yok	Sızıntılarda daha yüksek buhar hızı bulunur.

Atık ısının geri kazanılması tartışılırken bu kısma kadar bireysel teknolojiler ele alındı. Tartışılan her sistem, verimli çalışma için optimum bir ısı kaynağı sıcaklık aralığına sahiptir ve sistem tasarımına, çalışma akışkanlarının özelliklerine vb. bağlı olarak farklıdır. Ancak mümkün olan en iyi WHR için atık ısıyı farklı kaynaklardan geri kazanmak için farklı sistemler kullanılabilir. Teknolojilerin her birinin tek bir WHR olarak veya ilgili gemi özelliklerine, geri kazanım potansiyeline ve verimlilik hedeflerine bağlı olarak farklı teknolojilerin bir kombinasyonu olarak uygulanabilir. Çeşitli sistemlerin kombinasyonu, atık ısı miktarına ve kalitesine bağlı olarak çeşitli kaynaklardan en iyi verimlilikte çıktı alınması açısından esneklik sağlar. Sistemlerin kombinasyonunun, genel tesis yerleşiminde en az karmaşıklığı sağlayacak şekilde seçilmesi gerekir [22].

Isı kaynağının kalitesi WHR uygulamaları için bir diğer önemli faktördür. Sistem performansı, bileşen boyutu ve maliyetler gibi birçok parametreyi etkileyebilmektedir. Atık ısının kalitesi ise kaynağın sıcaklığı ile ilgilidir. Bir ısı kaynağının kalite sınıflandırması Çizelge 1.3'de verilmiştir [36-37].

Çizelge 1.3. Bir ısı kaynağının kalite sınıflandırması [37]

Kalite	Sıcaklık
Yüksek	>650
Orta	232–649
Düşük	<232

Kaynak sıcaklığı, düşük (232 ve altı), orta (232 – 649) ve yüksek kalitede (650 ve üstü) ısı olarak sınıflandırılabilir. Gemi tipi atık ısı kaynakları ise genelde düşük ve orta kalitede ısılardır. Gemilerdeki atık ısı kaynağının sıcaklığı, Çizelge 1.4'de gösterildiği gibidir. Atık ısının kalitesini etkileyen ikincil bir etken ise; enerji içeriği göstergesi olan ısı miktarıdır [36-37].

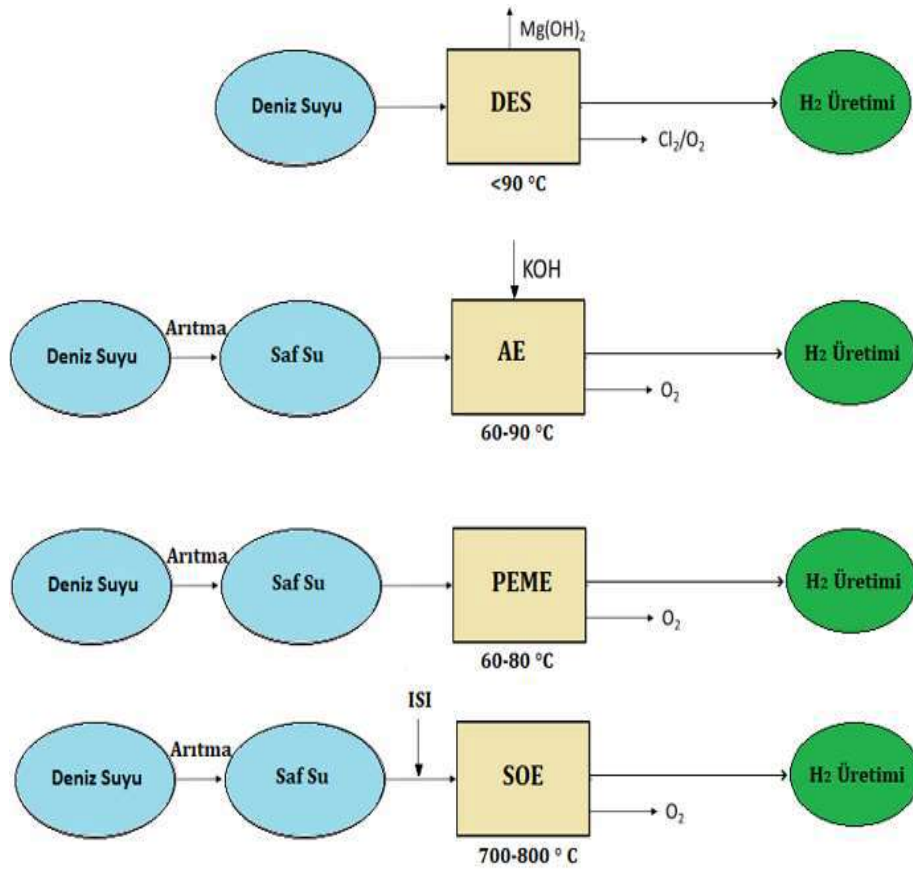
Çizelge 1.4. Atık ısı kaynakları ve gemideki sıcaklıkları [37]

Isı Kaynağı	Sıcaklık (°C)
Yakma Fırını	850-1 250
Egzoz Gazı	200-500
Temizleme havası (Scavenge air)	100-160
Ceket soğutma suyu	70-125

Çizelge 1.4'den görülebileceği gibi egzoz gazı sıcaklıkları çok yüksek olup, atık ısı kaynağı kalite sınıflandırmasına göre egzoz atık ısı orta kalite aralığındadır. Temizleme havasının kompresörden çıkış sıcaklığı ve ceket soğutma suyunun motordan çıkış sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığına kıyasla daha düşüktür; dolayısıyla düşük kaliteli atık ısı kaynaklarıdır [37].

Atık ısıdan elde edilen elektriğin elektroliz yöntemi ile hidrojen üretiminde kullanılması üretilen hidrojenin, temiz enerji sınıfında yer almasını sağlayacaktır. Elektroliz ile yeşil hidrojen üretiminde en büyük bariyerlerden biri ise elektroliz hücresinin yüksek oranda su tüketimidir. Eğer elektroliz ortamı olarak bir deniz aracı seçilecek ise deniz suyundan hidrojen üretimi bu problemin çözümü için kilit bir rol oynayacaktır. Atık ısı geri kazanımı ile ilgili son dönem derleme ve analiz çalışmaları [38-49]'da detaylı olarak verilmiştir.

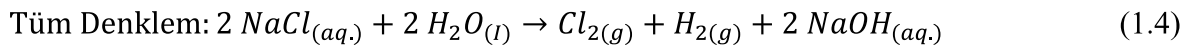
Elektroliz teknolojileri sıklıkla kullandıkları elektrolite göre sınıflandırılmaktadır. Deniz ortamında uygulanan farklı elektroliz teknolojilerinin şeması Şekil 1.10'da verilmiştir.



Şekil 1.10. Deniz ortamında uygulanan farklı elektroliz teknolojilerinin şeması [50-51]

Denizde elektroliz gerçekleştirebilen en yaygın teknolojilerin örnekleri aşağıdaki gibidir [50-56]:

-Deniz Suyunun Doğrudan Elektrolizi (DES): elektrolit, aynı zamanda besleme suyu olan deniz suyudur.



-Alkali Elektroliz (AE): elektrolit, NaOH veya KOH gibi konsantre bir kostiktir, ancak ikincisi, hidroksil iyonları OH^- 'ye karşı daha fazla iletkenlik gösterdiğinden daha sık görülür. Bu durumda besleme saf sıvı su olmaktadır. Alkali su elektrolizi, elektrik varlığında elektrokimyasal bir su ayırma tekniğidir. Elektrokimyasal su bölünmesi, katotta hidrojen

oluşum reaksiyonu ve anotta oksijen oluşum reaksiyonu gibi iki ayrı yarı hücre reaksiyonundan oluşur. Alkali elektroliz işlemi sırasında, başlangıçta katot tarafında iki mol alkali çözelti indirgenerek bir mol hidrojen (H_2) ve iki mol hidroksil iyonu (OH^-) üretilir; üretilen H_2 , katodik yüzeyden elimine edilebilir ve geriye kalan hidroksilyonlar (OH^-) anot ve katot arasındaki elektrik devresinin etkisi altında gözenekli ayırıcı aracılığıyla anot tarafına aktarılır. Anotta, Şekil 1.11.a'da gösterildiği gibi hidroksil iyonları (OH^-) boşaltılarak 1/2 molekül oksijen (O_2) ve bir molekül su (H_2O) üretilir.



-Proton Değişim Membran Elektrolizi (PEME): elektrolit olarak protonlara karşı büyük bir iletkenlik sergileyen, sıklıkla perflorosülfonik olan katı bir polimerdir. Besleme olarak saf sıvı su kullanır. PEM su elektrolizi işlemi sırasında su, elektrokimyasal olarak hidrojen ve oksijene ayrılır. Bu işlemde, başlangıçta anot tarafında su molekülü oksijen (O_2), protonlar (H^+) ve elektronlar (e^-) oluşturmak üzere ayrıştırılır. Üretilen oksijen anodik yüzeyden uzaklaştırılır ve kalan protonlar, proton ileten membrandan katot tarafına, elektronlar ise dış devre üzerinden katot tarafına taşınır. Katot tarafında protonlar ve elektronlar H_2 gazı üretmek üzere yeniden birleşti. PEM su elektrolizinin temel prensibi Şekil 1.11.b'de gösterilmektedir.



-Katı Oksit Elektrolizi (SOE): elektrolit olarak yüksek sıcaklıklarda O_2^- iyonlarına karşı yüksek iletkenlik sunan, genellikle itriyastabilize edilmiş zirkonya (YSZ) olan seramik bir membran kullanır. Bu tip elektroliz teknolojisi aşırı ısıtılmış buharla beslenmektedir. Tipik olarak katı oksit su elektrolizi, buhar formundaki suyun tüketimiyle daha yüksek sıcaklıklarda çalışır ve yeşil hidrojen ve oksijen üretir. Katı oksit su elektrolizi işlemi sırasında, başlangıçta katot tarafında, su molekülü iki elektronun eklenmesiyle hidrojen (H_2)

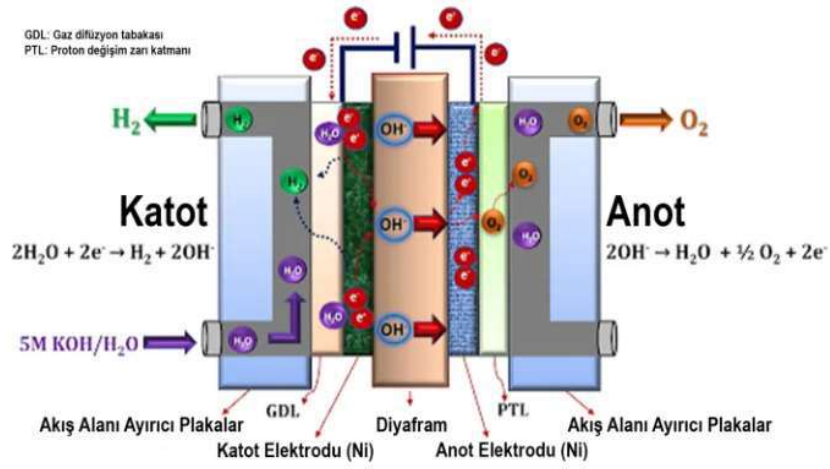
ve oksit iyonuna (O_2^-) indirgenir. Katodik yüzeyden salınan hidrojen ve kalan oksit iyonu (O_2^-), iyon değişim membranı boyunca anot tarafına doğru ilerler. Anot tarafında, oksit iyonları (O_2^-) oksijen ve elektron üretmek için daha da indirgenir, daha sonra üretilen oksijen anodik yüzeyden serbest bırakılır ve elektronlar, dış devre boyunca pozitif çekimle katot tarafına doğru hareket ettirilir. Katı oksit su elektrolizinin temel çalışma prensibi Şekil 11.c'de gösterilmektedir.



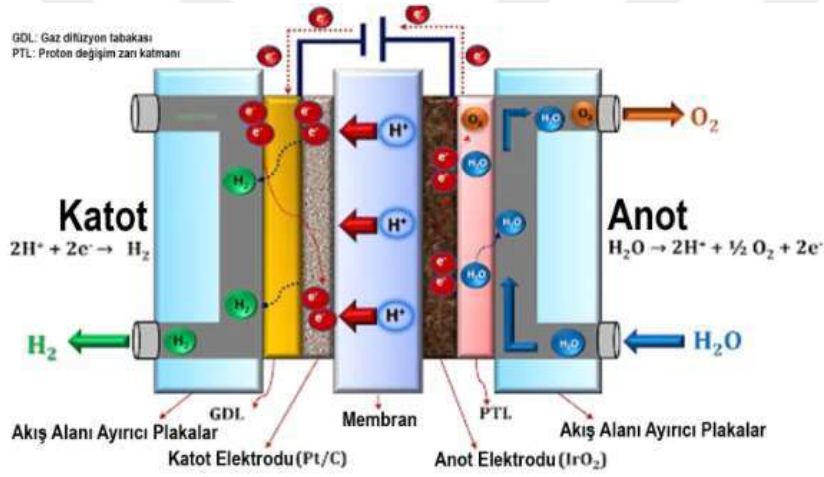
Deniz suyunun doğrudan elektrolizi sistemlerinde birçok dezavantaj da bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları: düşük güç yoğunluklu çalışma ve elektrotlarla temas halindeki suyun sadece küçük bir bölümünün elektroliz olma olasılığı, olası korozyon ve kirlenme sorunları ve klor gibi istenmeyen elektrokimyasal ürünlerin gelişmesidir. Bu sorunları çözmek için yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. En büyük avantajı ise daha düşük sermaye maliyetidir. Ek olarak, deniz suyu bulunduran magnezyum hidroksit formundaki magnezyum gibi ekonomik olarak önemli miktarlarda metallerin geri kazanılmasının mümkün olabilmesidir [52-53].

Elektroliz için en çok tercih edilen teknoloji alkali tipteki elektroliz hücre iken, teknolojinin gelişimi ile daha az bileşen sayısına, daha düşük kütleye ve bakım müdahaleleri için daha az arıza süresine sahip olan PEM (Polimer Elektrolit Membran) ön sıralara yerleşmiştir. PEM su elektrolizi, alkali su elektrolizine göre yüksek çalışma akımı yoğunluğu, yüksek gaz saflığı, daha yüksek çıkış basıncı ve daha küçük ayak izi gibi çeşitli avantajlar sunar. Ancak bu teknolojiyle ilgili en büyük zorluk bileşenlerin maliyetidir. Bu nedenle maliyetin düşürülmesi için önemli gelişmelere ihtiyaç vardır. Şekil 1.11 deniz koşullarında hidrojen üretebilen elektroliz teknolojilerinin basitleştirilmiş bir şemasını göstermektedir [50-51,54-56]. Özellikle günlük kullanım ya da ulaşım sektöründe PEM elektrolizörler daha yaygın şekilde tercih edilmektedir.

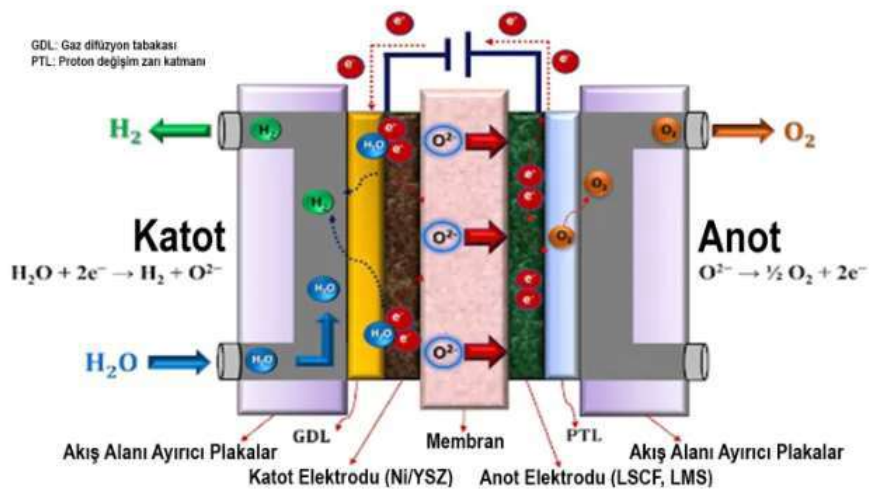
a)



b)



c)



Şekil 1.11. Elektroliz teknolojileri a) AE b) PEME c) SOE [55-56]

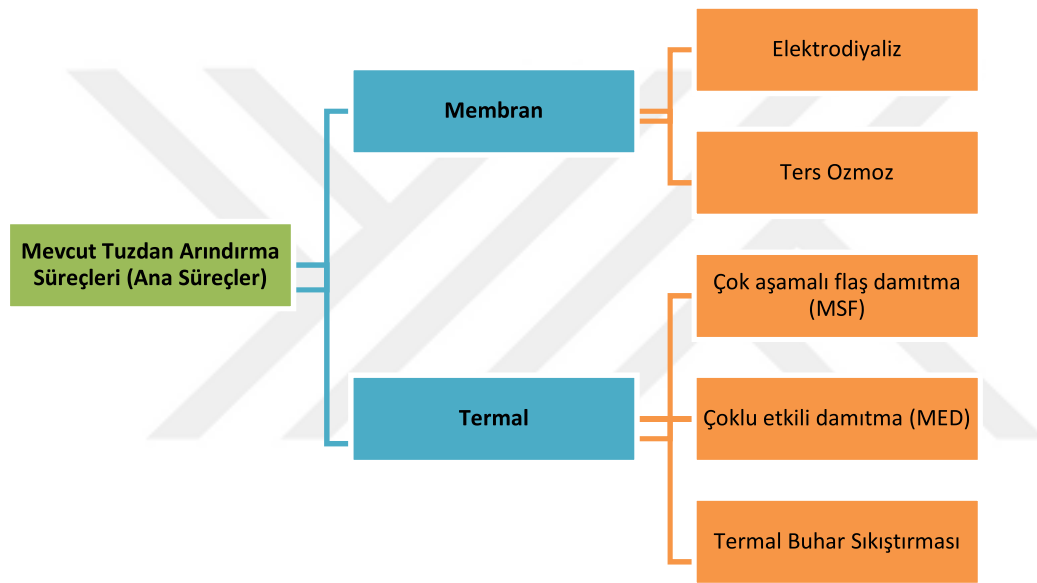
Çizelge 1.5.'te ise, AE ile PEME arasındaki farklılıklar tablolastırılmıştır.

Çizelge 1.5. AE ve PEM arasındaki farklar[57]

Elektrolizör Tipi	AE	PEM
Elektrokatalist	Ni, Cu, Mn, W, Ru	Pt, Ir, Ru, Rh
Hücre sıcaklığı (°C)	30-80	20-80
Hücre basıncı (bara)	< 30	< 70
Maksimum gerçekleşen boyut (MW)	10	3
Verimlilik (LHV'ye dayalı)	70%	80%
Verimlilik (kWh/kgH ₂)	50-78	50-83
Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	250-450	1 000-2 000
Ömür (1000 h)	60	50-80
Avantajları	-Olgun teknoloji -Düşük maliyetli teknoloji (asil olmayan elektrokatalizörler, ucuz elektrolit) - Uzun vadeli istikrar	-Yüksek akım yoğunlukları - Kompakt sistem tasarımı -Hızlı yanıt süresi, dinamik çalışma -Daha yüksek hidrojen üretim oranı
Dezavantajları	-Düşük akım yoğunlukları -Elektrot üzerinde karbonat oluşumu performansı düşürür - daha düşük ürün saflığı	-Bileşenler için gereken pahalı malzemeler (asil metal elektrokatalizörler) -Yüksek saflıkta (< 0,5 ppm kirletici madde) su gereklidir -Asidik ortam, düşük dayanıklılık

AE, PEME ve SOE sistemleri için deniz suyundaki çözünmüş tuzların arıtılması gerekmektedir. Bu yaklaşımın en büyük dezavantajları; su arıtma ve tuzdan arındırma sisteminin ek maliyeti ve artık tuzların atılmasından kaynaklanan çevresel problemlerdir. Avantajları ise, tatlı su için gelişmiş bir teknolojinin mevcut olmasıdır [52-53].

Tuzdan arındırma teknolojileri faz değişimi veya termal işlemler ve membran bazlı ayırma işlemleri olarak ikiye ayrılır. Şekil 1.12’de tuzdan arındırma sistemlerinin sınıflandırması verilmiştir.

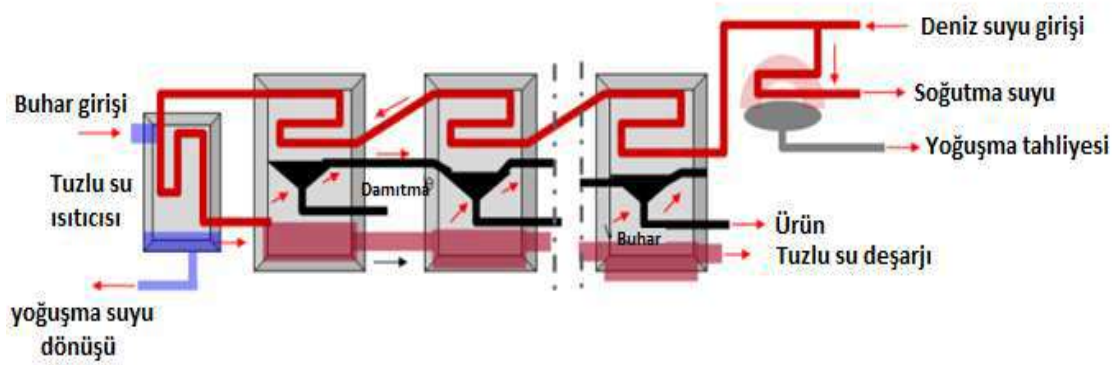


Şekil 1.12. Tuzdan arıtma sistemlerinin sınıflandırılması [58-60]

Tüm işlemler, kireçlenmeyi, köpürmeyi, korozyonu, biyolojik büyümeyi ve kirlenmeyi önlemek için ham deniz suyunun kimyasal olarak ön arıtılmasını gerektirmektedir ve ayrıca kimyasal bir son arıtma gereksinimine ihtiyaç bulunmaktadır [61].

Termal tuzdan arındırma işlemleri; tuzlu suyun buharlaştırılmasını, soğutulmasını ve yoğunlaşmasını içermekte ve geride yüksek konsantrasyonlu su (tuzlu su) kalmaktadır. Termal tuzdan arındırma işlemleri arasında çok aşamalı flash (MSF) en yaygın kullanılan teknolojidir [58-59]. Çok Aşamalı Flaş (MSF)’da başlangıçta deniz suyu bir kapta ısıtılmakta, daha sonra ortam basıncının daha düşük olduğu başka bir kaba aktarılacak suyun hemen kaynaması sağlanmaktadır. Kaynama ancak su soğuyana kadar devam edeceğinden bu suyun yalnızca küçük bir yüzdesi su buharına dönüşmektedir. MSF süreçleri genellikle,

yaklaşık 4 000 ila 57 000 m³/gün tatlı su üreten birimlerde inşa edilmektedir. MSF' nin doğal verimliliği ve bu tesislerin nispeten düşük bakım talebi, onları özellikle Orta Doğu'da ihtiyaç duyulan büyük ölçekli uygulamalara uygun hale getirmektedir [60,62-63]. Tipik bir MSF sürecinin şematik diyagramı Şekil 1.13'te verilmiştir[60].



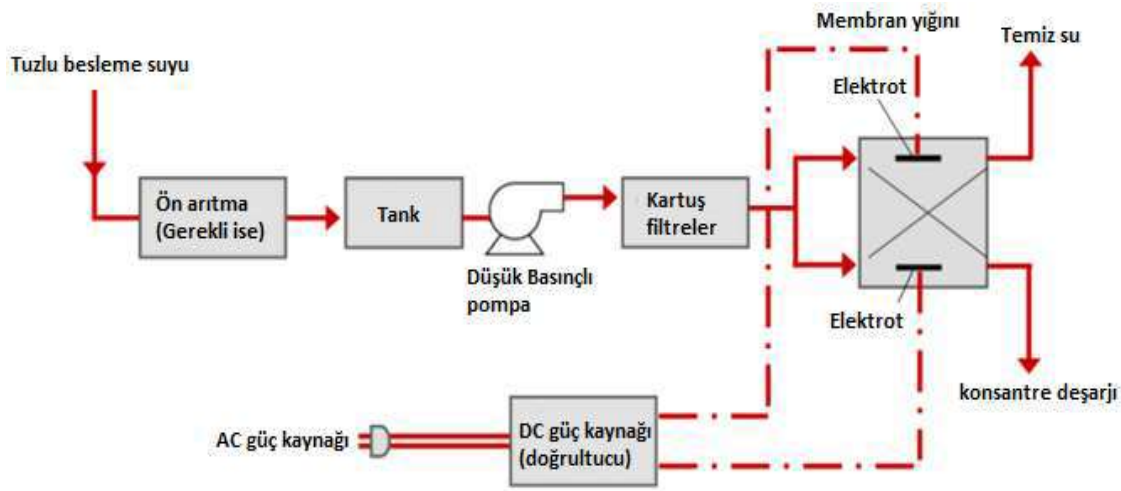
Şekil 1.13. Tipik bir MSF sürecinin şematik diyagramı [60]

Çok Etkili Damıtma (MED)'da ise MSF'ye benzer şekilde, azaltılmış ortam basıncında yoğunlaşma ve buharlaşma ilkelerini kullanan bir dizi kapta meydana gelmektedir. MED prosesi, buharın çeşitli kaplarda çoklu yoğuşması yoluyla, ilk etkiden sonra ek ısı sağlamaya gerek kalmadan deniz suyunun kaynamasına olanak tanımaktadır. MED sürecini kullanan ünitelerin kurulu kapasitesi dünya toplam kapasitesine göre hala küçük olsa da sayıları ve popüleritesi giderek artmaktadır [60,62-63].

Buhar Sıkıştırımlı Damıtma (VC) ise, damıtma işlemi genellikle diğer işlemlerle (örneğin MED işlemi) birlikte veya küçük ve orta ölçekli deniz suyu tuzdan arındırma uygulamaları için tek başına kullanılmaktadır. Deniz suyunun buharlaştırılmasına yönelik ısı kaynağı, kazanda üretilen buharın doğrudan ısı değişimi yerine buharın sıkıştırılmasından kaynaklanmaktadır [60].

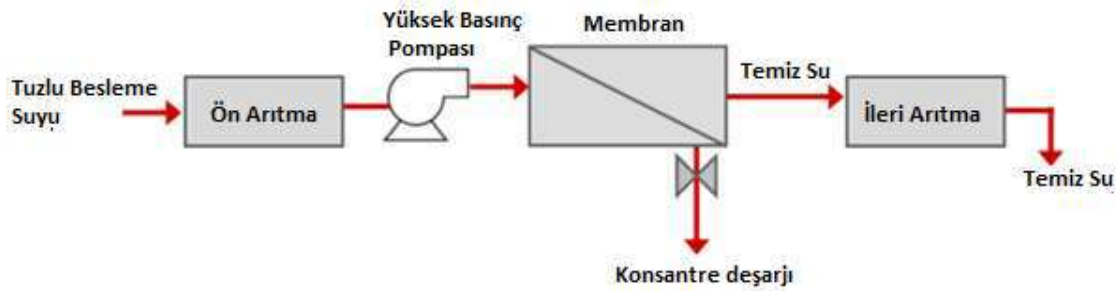
Membran teknolojileri; tuzları deniz suyundan ayırmak için membranlardan yararlanır ve elektrodializ ve ters ozmoz olmak üzere iki ticari tuzdan arındırma işleminde kullanılırlar. Membran, deniz suyundan tuzu ve diğer yabancı maddeleri uzaklaştıran, seçici geçirgenliğe sahip düz bir yüzeydir.

Elektrodiyaliz işlemi, tuzları bir zardan geçirmek ve tatlı suyu ürün suyu olarak geride bırakmak için bir elektrik potansiyeli (voltaj) kullanmaktadır. Ham besleme suyu ön işlemden geçirilerek membranlara zarar verebilecek veya hücrelerdeki kanalları tıkayabilecek maddelerin membran yığınına girmesini önler. Besleme suyu daha sonra düşük basınçlı bir pompayla membran yığını içinde dolaştırılır. Daha sonra suyun stabilize edilmesi ve dağıtımına hazırlanması için son arıtma gerçekleştirilmektedir [60]. Örnek bir elektrodiyaliz şeması Şekil 1.14 'de verilmiştir.



Şekil 1.14. Elektrodiyaliz işleminin şeması[60]

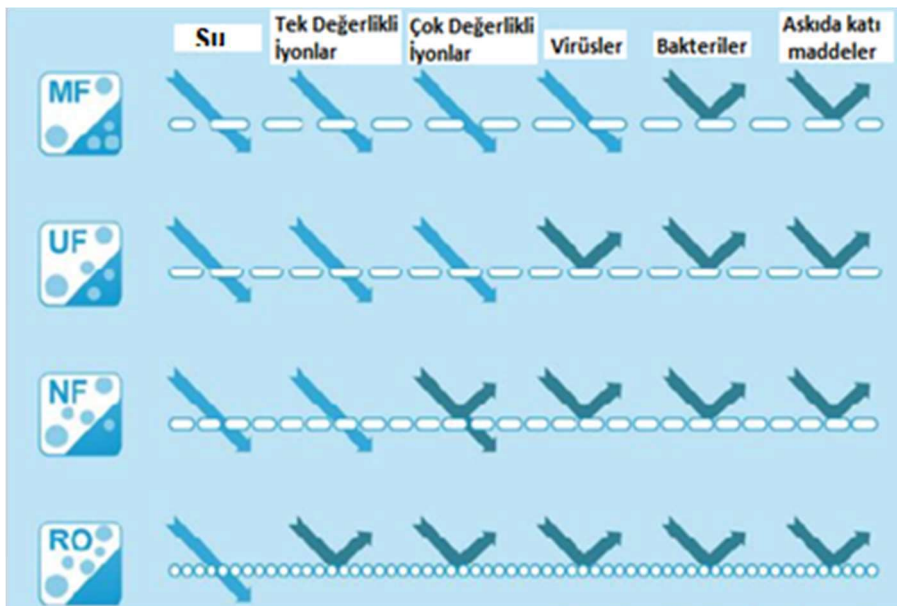
Ters ozmoz ise tüm membran bazlı tuzdan arındırma işlemleri arasında yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Prensip olarak, tuzlu suya yüksek basınç uygulanarak bir membrandan geçmesi sağlanır. Bu işlem sırasında membrandan sadece su molekülleri geçebildiğinden ve tuzlar geride kaldığından tatlı su üretilir. Başlangıçta; besleme suyu, membranları korumak amacıyla kum, kabuk veya deniz yosunu gibi parçacıkları uzaklaştırmak için ön filtreleme işlemine tabi tutulur. Besleme suyu daha sonra yüksek basınçlı bir pompa aracılığıyla membrana karşı basınç uygulanır. Daha sonra besleme suyunun bir kısmı membranalardan geçerek tuzları geride bıraktığında tatlı su elde edilir. Membranlardan geçemeyen kalan besleme suyunun tuz içeriği artarak deşarj edilmektedir [60-65]. Örnek bir ters ozmoz prosesi şeması Şekil 1.15'te verilmiştir.



Şekil 1.15. Örnek bir ters ozmoz prosesi şeması[60]

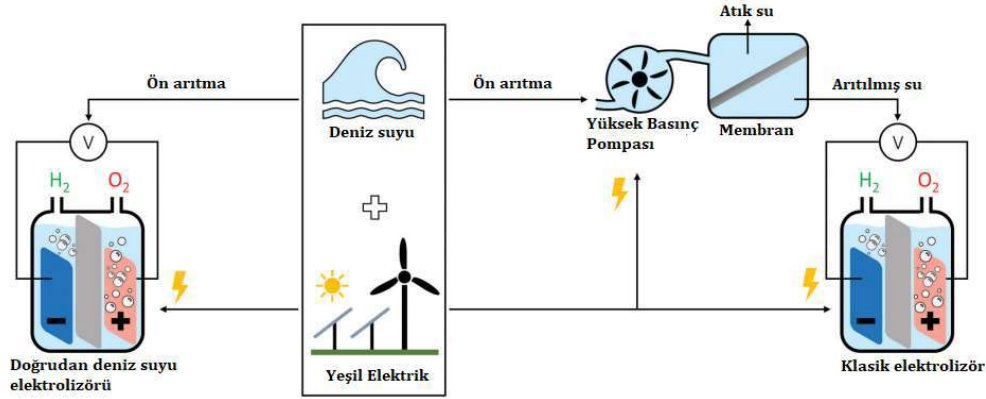
Şekil 1.16'da görsel karşılaştırması verilen ana filtreleme/membran sistemleri aşağıdaki gibi değerlendirilebilir [64]:

- Mikrofiltrasyon (MF) membranları; bulanıklığı azaltır ve askıdaki katı maddeleri ve bakterileri giderir. MF membranları, UF veya NF membranlara göre daha düşük basınç altında bir eleme mekanizması aracılığıyla çalışmaktadır.
- Ultrafiltrasyon (UF) membranları; rengi etkileyen kirleticileri, yüksek ağırlıkta çözünmüş organik bileşikler, bakterileri ve bazı virüsleri giderir. UF membranları ayrıca bir eleme mekanizması aracılığıyla da çalışır.
- Nanofiltrasyon (NF) membranları suyu yumuşatır, organik maddeleri ve sülfatları giderir ve bazı virüsleri ortadan kaldırır. Çıkarma, eleme ve çözelti difüzyonu ile birleştirilir.
- Ters ozmoz (RO) membranları hem acı suyu hem de deniz suyunu tuzdan arındırır ve bazı organik kirleticileri giderebilir.



Şekil 1.16. Membran teknolojisi karşılaştırması [64]

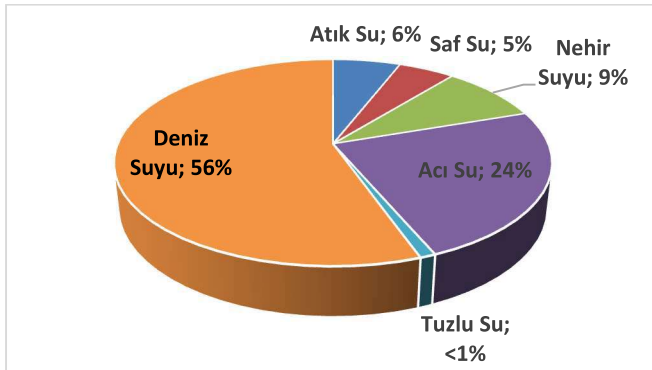
Deniz suyundan temiz hidrojen üretmenin iki yolu Şekil 1.17’de şematize edilmektedir. Soldaki yol yalnızca bir cihazın gerekli olduğu DES'yi göstermektedir. Sağdaki yolda ise deniz suyu önce ters ozmoz yöntemiyle tuzdan arındırılmakta, ardından su ayrıştırma işlemi yapılmaktadır. Bu yol için hem tuzdan arındırma hem de suyun fiili olarak ayrıştırılması için elektrik ve elektroliz cihazı gerekmektedir [66].



Şekil 1.17. Deniz suyundan temiz hidrojen üretmenin yolları [66].

Deniz suyu elektroliz işlemi sırasında en büyük işletme maliyeti elektrik enerjisi maliyetidir. Bu nedenle; enerji tüketimi, açık deniz uygulamaları için elektrokimyasal hücrelerin tasarımında kritik bir rol oynamaktadır.

Şekil 1.18. küresel tuzdan arındırma işlemleri için kullanılan su kaynaklarını göstermektedir. Deniz suyunun besleme suyu olarak kullanılması, dünya çapında üretilen toplam kapasitenin yarısından fazlasına katkıda bulunmaktadır [67].



Şekil 1.18. Küresel tuzdan arındırma işlemleri için kullanılan su kaynakları [67]

Deniz suyu potansiyel olarak dünyadaki olası tüm safsızlıkları içermektedir. Sadece su ve çözülmüş inorganik tuzların (ortalama ağırlık olarak %3,5) bir karışımı değildir, aynı zamanda yüklü ve yüksüz küçük organik moleküller, polimerler (mikroplastik), canlı organizmalar ve çözülmüş gazlar içerirler. Ayrıca, deniz suyunun bileşimi konumun, hava durumunun, mevsimin bir fonksiyonu olarak değerlendirilir ve mikroplastik veya küresel ısınmanın ortaya çıkması gibi antropojenik etkiler nedeniyle zamanla değişmektedir [68-69].

Suyun en önemli özelliklerden biri iletkenliğidir. Saf su molekülü elektrik geçirmezken sudaki safsızlıklar suyun iletkenliğini arttırmaktadırlar. Suyun iletkenliğinin ölçü birimi mikroSiemens /cm (veya kısaltılmış olarak mikroS/cm veya mS/cm.)'dir. Tuzluluk, farklı yöntemler ile ölçülebilmektedir. Ölçüm metodu titrasyon ile klorürün tespit edilebilmesine dayanmakta olup, tespit edilen klorür miktarından aşağıdaki ampirik ifade (1.14) ile tuzluluk miktarı belirlenmektedir [68-69].

$$S = 1,8655 * Cl^- \quad (1.14)$$

Ayrıca deniz suyunun tuzluluğunun tespitinde ise elektriksel iletkenlik ölçüm metodu yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ampirik olarak belirlenmiş bir formül ile suyun iletkenlik değeri tuzluluğa dönüştürülmektedir. Deniz suyu tuzluluğu iletkenlik oranı (R) olarak indislendiğinde; R değeri için denklem (1.3) şeklinde kullanılmaktadır [68-69].

$$R = \frac{\text{Deniz suyu iletkenliği}}{\text{Standart KCl çözeltisi iletkenliği}} \quad (1.15)$$

R değeri 15 °C ve 1 atm basınçtaki şartlarda elde edilerek denklem (1.16)'de yerine koyularak tuzluluk hesaplanmaktadır [68-69].

$$S = 0,008 - 0,169 \cdot 2R_{15}^{1/2} + 25,385 \cdot 1R_{15} + 14,0941 \cdot R_{15}^{3/2} - 7,0261 \cdot R_{15}^2 + 2,7081 \cdot R_{15}^{5/2} \quad (1.16)$$

Deniz suyu yüksek konsantrasyonda tuz içermektedir. Elektriksel iletkenlik (EC) seviyeleri 55 mS.cm⁻¹ civarında, toplam çözülmüş katı madde miktarı 35 000 mg.L⁻¹ ve sodyum (Na⁺) konsantrasyonu 10 400 mg.L⁻¹'in üzerindedir [64].

Özellikle PEM elektrolizörlerinin kirletici maddelere karşı toleransı çok düşük olduğundan toplam çözünmüş katı madde (TDS) konsantrasyonunun 0,5 ppm'den az olmasını gerektirir. Referans olarak, tipik deniz suyunun TDS konsantrasyonu yaklaşık 35 000 ppm'dir. Elektrikle çalışan bir filtreleme işlemi olan ters ozmoz, yaklaşık 400 ila 600 ppm TDS konsantrasyonuna sahip su üretmektedir ve bu nedenle PEM ile uyumlu değildir. Ancak iki aşamalı bir ters ozmoz sisteminden sonra uygun seçenek olarak değerlendirilebilmektedir [69].

Hidrojenin elektrolizi ile ilgili son dönem detaylı derleme ve analiz çalışmalarına [70-90]'den ulaşılabilir. Deniz suyu arıtma yöntemleri ile ilgili son dönem detaylı derleme ve analiz çalışmalarına ise [91-109]'den ulaşılabilir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan sistemde, bir yük gemisindeki dizel motordan çıkan atık ısı kullanarak elde edilen elektrik enerjisi ile deniz suyunun desalinasyonu ve PEM yakıt hücresinde temiz hidrojen üretilmesi amaçlanmıştır.

Seyir halindeki geminin dizel motorundan çıkan atık ısı rankine çevrimi ile elektriğe çevrilirken, hali hazırda uluslararası yolculuk yapan yük gemisi yolculuk esnasında bu elektrik enerjisi ile deniz suyunu arıtmakta ve PEM ile hidrojene çevirmektedir.

Üretilen hidrojen gaz formunda sıkıştırılmış gaz olarak depolanabilecektir. Uzun süreli yolculuk yapan yük gemilerinde bu sistemin uygulanması yolculuk esnasında geminin egzozundan atılacak atık ısının faydalı enerjiye çevrilmesi ve minimum maliyetle hidrojen üretimi gerçekleştirmesi anlamına gelmektedir.

Depolanan hidrojen yolculuk esnasında belirli istasyonlarda satışı gerçekleştirilerek kar elde edilebilecek, gemi içi ocaklarında yakıt olarak kullanılabilir veya hidrojen üretiminin ön planda olduğu günümüz koşullarında temiz hidrojen üretimine katkı sağlayabilecektir. Hidrojenin bu şekilde hem deponalabilecek halde hem de kullanılabilir halde bulunması pek çok avantajı beraberinde getirecektir.

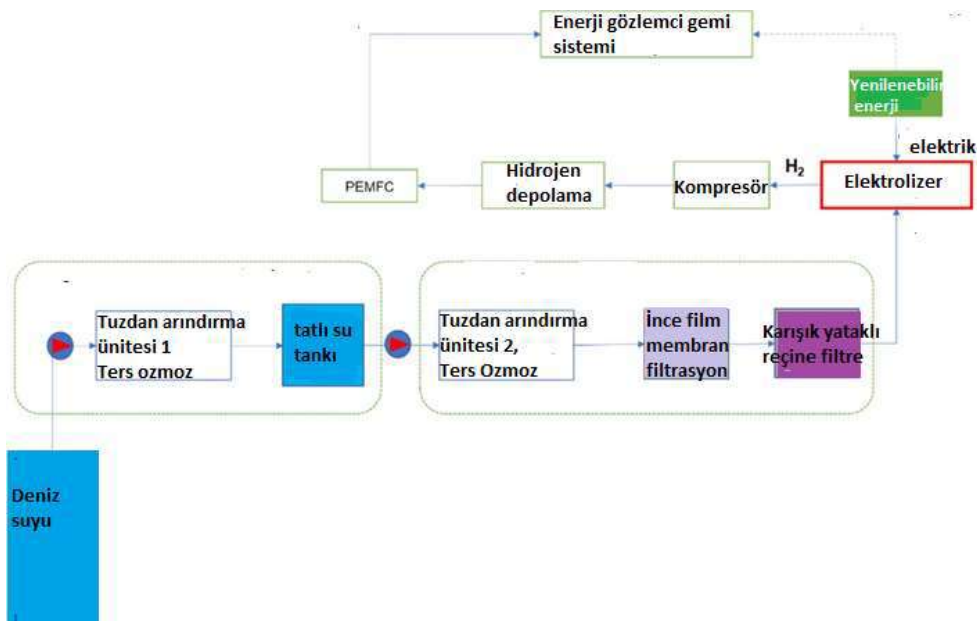
Literatürde gemilerde WHR sistemlerinin kullanımı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Farklı çevrimler içinde geliştirilmiş, atık egzoz gazından yararlanılmaya çalışılmıştır. Fakat deniz suyundan hidrojen üretimi ile ilgili çok kısıtlı sayıda çalışma mevcuttur. Deniz araçlarında deniz suyundan hidrojen elde edilerek enerji kaynağı olarak kullanılması ve bu enerji kaynağının enerji/ekserji analizleri ile yapılan çalışma ise yok denecek kadar azdır.

Ana amacı bir yandan atık ısının enerjisinden yararlanarak elektrik elde etmek, diğer yandan bu elektriği deniz suyundan elektrolizle hidrojene çevirebilmek için enerji analizlerinin yapılmasını sağlamak olan bu tez çalışması ile, bir gemideki atık ısıyı ve deniz suyunu kullanarak hidrojen üreten bir tasarım sunularak literatüre katkı sağlanacaktır.

Bu çalışmanın yeniliği, hem dizel motor egzozundaki atık ısının geri kazanımı ile atıl olan enerjinin değerlendirilebilme potansiyeli hem de bu potansiyel ile elektroliz için deniz suyunun ters osmoz ile yapılarak enerji açısından analiz edilmesidir ve böylelikle literatürdeki boşluğu doldurma açısından önemli bir katkı sağlayacak olmasıdır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2017 yılında denize indirilen dünyanın kendi kendine yetebilen ilk hidrojen üreten gemisi Energy Observer, Enerji Yelkenli Gemisi konseptine ilişkin farkındalığı artırmak ve zorlu ortamlardaki performansını test etmek için dünya çapında yedi yıllık bir yolculuğa çıkan, araştırma ve kavram kanıtlama katamaranıdır [110]. Hidrojen üretmek için arıtılmış deniz suyunu kullanan bir PEME'e sahip olan Enerji Observer, enerjiyi bir güneş paneli ve rüzgar türbininden almaktadır. PEME arıtılmış deniz suyu kullanmakta ve onu hidrojene dönüştürmektedir. Hidrojen daha sonra sıkıştırılarak, depolanmakta ve bir Toyota yakıt hücresi yığını aracılığıyla gemiye güç sağlamak için kullanılmaktadır [111-112]. Energy Observer gemi sisteminin örnek bir şeması Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Bacquart ve ark [111] bu gemide arıtılmış deniz suyunu kullanan bir elektrolizörden ilk hidrojen kalitesi ölçümünü sunmaktadır. Bu çalışma, Energy Observer'daki mevcut sistemin ISO 14687:2019 ile uyumlu hidrojen yakıtı sağladığını ve karmaşık kalite izleme gerektirmeyebileceğini göstermektedir [111]. Energy observer, geniş çaplı yenilenebilir enerji sistemleri kullanılan ve bu işlemlerde deniz suyundan yararlanılarak hidrojen elde edilen; ve hidrojen sisteminin elde edilmesi aşamasında bu tez çalışmasına benzeyen, tek ticari katamarandır.



Şekil 2.1. Energy Observer gemi sisteminin şeması [95]

Kandil ve Hussein [113] çalışmalarında bir yolcu gemisindeki tatlı su üretimini incelemiştir. Ana motor egzozundan üretilen atık ısı enerjisi kullanılarak suyun tuzdan arındırılması gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma için üç yöntem kullanılmıştır; İleri Beslemeli Çok Etketli Buharlaştırma MEE-FF, Tek Geçişli Çok Kademeli Flaş MSF-OT ve Tuzlu Su Sirkülasyonu Çok Kademeli Flaş MSF-BC. Motordan gelen atık ısı, tuzdan arındırma tesisinin işletimi için kullanılır. Tuzdan arındırma tesisi özelliklerini hesaplamak için bir VB programı geliştirilmiştir. Program doğrulanmış ve daha sonra ısı transferini hesaplamak için kullanılmıştır. Sonuçlar, MSF-BC'nin gerekli distilat akış hızı için minimum ısı transfer alanını verdiğini göstermiş; diğer iki yönteme göre %30 daha az olduğu bulunmuştur. Örnek olayda önerilen tuzlu su tuzdan arındırma yönteminin optimum seçiminin uygulanması, limanlardaki ortalama tatlı su maliyetine kıyasla minimum 2,7 \$/m³ tasarruf sağlamıştır. Bu tasarruf en fazla altı yılda sistemin sermaye maliyetini karşılayabilmektedir. Son olarak, motorun termal verimliliği %2 oranında artırılmış olduğuna değinilmiştir.

Secades, González ve Rivera [114] yaptıkları çalışmada, WHR ve dolayısıyla dekarbonizasyon için kullanılabilecek en popüler teknolojileri araştırmışlardır. Çalışma aynı zamanda hangi yazarların ve ülkelerin bilimsel açıdan en üretken olduğunu, diğer araştırma grupları ve ülkelerle olan işbirliklerini ve bu ulusların deniz ticaretindeki önemini de araştırmıştır. Bu yazıda analiz edilen 17 WHR teknolojisi deniz dizeli ve çift yakıtlı motorlara uygulanmıştır. LNG'nin buharlaştırılmasından soğuk enerjinin çıkarılması iyi bir enerji geri kazanım stratejisi olarak kabul edilmesine rağmen uygulamada çift yakıtlı motorlarla sınırlıdır. İncelenen sistemler uygulanabilirlikleri, karmaşıklıkları ve geri kazanabildikleri ısı dereceleri açısından farklılık göstermektedir ancak bunların birkaçının birleşimi, deniz dizel motorunun verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğine değinilmiştir. Öte yandan, her uygulamanın kendine has dezavantajlarında bulunduğu bildirilmiştir. Geleneksel Rankine ve Brayton çevrimleri yüksek sıcaklıklar için tasarlanmış ve motordaki tek uygun ısı kaynakları egzoz gazı ve temizleme havası olduğuna değinilmiştir. Tersine, organik döngüler, Kalina, Flash ve Trilateral gibi varyasyonlar, düşük dereceli ısıyı çıkarabilen organik sıvılarla çalışmaktadır. Çevre etkileşimi açısından bakıldığında, organik sıvıların küresel ısınma potansiyeli CO₂'den yüzlerce kat daha fazla olabileceğinden, organik sıvıların kullanımına dikkat edilmesi gerekliliği üzerine durulmuştur. Amonyak gibi bazı çalışma sıvıları sera etkisine katkıda bulunmayıp (GWP = 0), ancak insanlar için zararlı olduğu söylenmiştir. Esas olarak soğutma amaçlı amonyak sistemleriyle donatılmış gemilerde ölümlerinde görüldüğüne değinilmiştir. İncelemelerin ardından yazarlar, atık

ısının geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak için tek bir sistemin değil, birkaç cihazın birleşiminin en iyi seçenek olacağı sonucuna varmışlardır. Isının kalitesine bağlı olarak termodinamik çevrim, absorpsiyonlu soğutma, termoelektrik ve mümkünse soğuk enerji geri kazanımı ile birleştirilebileceği not edilmiştir. Egzoz gazı atık ısını geri kazanmak için birçok sistemin kurulması, bu sistemlerin egzoz hattındaki karşı basıncı ve dolayısıyla motorun yakıt tüketimini artıracığından pek tavsiye edilmediği sonucuna varılmıştır. Bu durumda EGR (egzoz gaz resirkülasyonu) gibi bir emisyon azaltım sistemi ile kombinasyonun düşünülmesi gerektiği bildirilmiştir.

Shu, Liang, Wei, Tian, Zhao ve Liu [115] gemilerde mevcut olan farklı atık ısı geri kazanım teknolojilerini teknik prensip ve uygulama yapılabilirliği açısından ele alınmışlardır. Çalışmalarında başlıca amaç, hem yakıt tüketiminde hem de emisyonda daha en iyileştirme sağlamak için WHR hakkında kapsamlı bilgi sağlamaktır. Bu teknolojiler, bu WHR teknolojilerinden ikiden fazlasını kullanan türbin, soğutma, Rankine çevrimi, tuzdan arındırma ve kombine çevrim sistemlerini içermektedir. Türbin teknolojisi onaylanmış ve gemilerde yaygın olarak benimsenmiştir. Teorik açıdan bakıldığında, atık ısının geri kazanılması yoluyla soğutma sağlamak için soğutma sistemlerinin mevcut olduğu bildirilmiştir. Ancak gemilerde uygulanmasına ilişkin literatür henüz yayınlanmamıştır. Hem ısı kaynağının hem de soğutma kaynağının elde edilmesi için uygun olan Rankine çevrimi ve tuzdan arındırma teknolojileri halihazırda olgunlaşmaya başlamıştır. Kombine çevrim sistemleri yaygın olarak kullanılsa da, daha yüksek ısı verim elde etme ve atmosfer kirliliği sorununu hafifletme yönündeki önemli gelişme potansiyelleri nedeniyle daha fazla ilgi göreceği söylenmektedir. WHR teknolojisinin deniz araçlarında kullanılmasının ana araştırma yönelimi olacağı zikredilmiş, atık ısının daha fazla kullanılması amacıyla yeni bir sistem geliştirilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda bu sistemin performansının da araştırılacağı çalışmaların yapılabileceği rapor edilmiştir.

Wang, Zhang , Xia, Miao ve Yuan [116] enerji üretimi ve hidrojen üretimi için deniz aracında bulunan dizel motoruna sahip entegre bir SOE'yi araştırmışlardır. Dizel motorun atık ısısı, suyun buhara dönüştürülmesi için ön ısıtma amacıyla geri kazanılmakta ve dizel motordan elde edilen güç SOE için kullanılmaktadır. Bir ORC sistemi kullanarak deniz dizel motorundan ve SOE çıkış akışlarından kaynaklanan atık ısdan yararlanılmıştır. Çalışmalarının sonucunda SOE, deniz dizel motorunun atık ısından faydalananarak 0,431 kg/s oranında hidrojen üretebilmekte ve verimliliği %104,41 olmaktadır. Verimlilik, termal

enerji içermeyen geleneksel SOE sistemiyle karşılaştırıldığında neredeyse %20 artırılmıştır. Bu arada ORC sisteminin eklenmesiyle 2286,12 kW güç %12,12 verimle üretilmektedir. Üretilen bu elektriğin, SOEC sistemine ek olarak kullanılabileceği bildirilmiştir. Deniz dizel motor atık ısının geri kazanıldığı buhar elektrolizi açısından tasarım koşullarında SOEC, ORC ve entegrasyon sistemi için 0,431 kg/sn hidrojen üretimi ve 32 386,45 kW güç çıkışı ile %104,41 , %12,12 ve %53,56 verimlilik sağlanabilmiştir. Entegrasyon sistemi, motor atık ısının %44,13'ünü geri kazanabilmekte ve ORC döngüsünün kullanılması, sistemin genel verimliliğinde yüzde 1,45 puanlık bir iyileşme ile sistem çıkışını 2 286,12 kW artırmakta olduğu sonucuna varılmıştır.

Andreasen, Meroni ve Haglind [117] son teknoloji ürünü çift basınçlı RC prosesi ile ORC prosesi arasında tasarım ve tasarım dışı performans karşılaştırmasını sunmuşlardır. Prosesler arasındaki karşılaştırma, 4 500 TEU'luk bir konteyner gemisi için iki dizel motor atık ısı geri kazanım durumu baz alınarak yapılmıştır. Motor, ilk durumda yüksek kükürtlü bir yakıt, ikinci durumda ise düşük kükürtlü bir yakıt için denenmiştir. Yüksek kükürtlü yakıt durumu için, tek uygun akışkanlar su (RC) ve hexamethyldisiloxane/MM (ORC) olarak bildirilmiştir. Geriye kalan çalışma akışkanları, reküperatörde ön ısıtma için mevcut ısının yeterli olmaması nedeniyle 148 °C kazan besleme sıcaklığına ulaşamamaktadır. RC prosesi için temizleme havası ve ceket suyuyla ön ısıtma, yeterince yüksek bir kazan besleme sıcaklığı sağlamaktadır. MM çok kuru bir akışkandır ve bu nedenle tek organik çalışma akışkanı olarak, reküperatördeki çalışma akışkanını yeterince önceden ısıtabilmektedir. RC prosesi, çalışma akışkanı olarak MM'yi kullanan ORC prosesinden %19 daha büyük net güç çıkışı elde etmiştir. Düşük kükürtlü bir yakıt durumu için en yüksek net güç çıkışlarına ulaşan WHR üniteleri, çalışma akışkanı olarak MM ve n-pentan içeren ve ORC üniteleri ve RC ünitesi olduğu analiz edilmiştir. RC ünitesi için, düşük kükürtlü yakıt durumu için tasarım gücü, yüksek kükürtlü yakıt durumuyla karşılaştırıldığında %18 daha yüksek bulunmuşken, çalışma akışkanı olarak MM kullanan ORC ünitesi için tasarım gücü %33 daha yüksek bulunmuştur. RC ve ORC prosesleri eşit türbin verimlerine göre karşılaştırıldığında; RC prosesi yüksek motor yüklerinde daha yüksek net güç çıkışlarına ulaşmışken, ORC prosesleri düşük motor yüklerinde daha yüksek performansa ulaşmışlardır. RC süreci, proses düzeninin ORC düzeninden daha gelişmiş olması nedeniyle yüksek motor yüklerinde daha yüksek performansa ulaşabilmektedir. ORC işlemi, RC işlemine kıyasla türbin kısılmasının sınırlı kullanımı nedeniyle düşük motor yüklerinde daha yüksek performans sağlamıştır. ORC ünitesinin, RC ünitesi ile mümkün olmayan, temizleme

havası ve ceket suyu ısısı gibi daha düşük sıcaklıktaki kaynaklardan yararlanmak için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Gue [118] atık ısı kullanarak gemilerdeki balast suyunun tuzdan arındırma işlemleri ile tatlı su üretimini teorik olarak sağlamıştır. Atık ısı geri kazanım potansiyelini belirlemek için 52 000 deadweight tonajlı (DWT) bir dökme yük gemisi (M/V Rosita) üzerinde çalışılmıştır. Bu gemi, ana motorda % 85 yükte normal çalışma koşuluyla elektrik üretimi için 7,8 MW'lık bir ana motora ve üç set 480 kW'lık yardımcı motora sahiptir. Tuzdan arındırma ünitesi olarak ters ozmoz yöntemi (% 45 su geri kazanım verimliliğine sahip) kullanılmıştır. Çalışmada atık ısıyla çalışan bir termoelektrik jeneratör ünitesini ters ozmoz ünitesiyle entegre etmek için bazı teorik hesaplamalar ve pratik hususlarla yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım ile denizcilik endüstrisindeki balast suyu arıtımı ve tatlı su üretimi konularının ele alınmasına olanak sağlanmış ve bu sayede çevre kirliliği ile karbon ayak izi azaltılması amaçlanmıştır. Ancak bu çalışma da termoelektrik jeneratörlerin dönüşüm verimliliğinin %5 civarında olduğu, bu değerin çok düşük olduğu ve bu alanda daha fazla araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Wageningen araştırmacıları ve proje ortağı Hydron Energy [119], deniz suyundan hidrojene dönüştürme projesinde (Sea₂H₂), deniz suyundan ultra saf su üretmiş ve bu su daha sonra Hydron Energy tarafından elektrokimyasal olarak hidrojene dönüştürülmüştür. SEA₂H₂ projesi, açık deniz yeşil hidrojen üretiminin geliştirilmesine ve maliyetlerinin azaltılmasına katkıda bulunmak için gerçekleştirilmiştir. Ana amacın, membran damıtma (MD) ile polimer elektrolit membran su elektrolizini entegre ederek deniz suyundan hidrojene ön pilot tesis için bir konsept kanıtı sağlamak olduğu bildirilmiştir. Hibrit ön pilot MD-PEMWE sistemi, saatte yaklaşık 1 kg hidrojen üretimine karşılık gelen 50 kWe'lik nominal yığın gücüne sahiptir. "Deniz suyundan Hidrojene" (Sea₂H₂) kavramının kanıtlanması için entegre bir MD-PEMWE sistemi geliştirilmiş ve gerçekleştirilmiş ve termal sinerji yoluyla başarıyla gösterilmiştir. 50 kW'lık nominal yığın gücünde entegre sistem, saatte yaklaşık 1 kg hidrojen üretirken, PEMWE sistemi için gerekenin neredeyse üç katı kadar UPW üretmiştir. Sistem, 2021 yılının Ekim ve Kasım aylarında yaklaşık 1 000 saatlik bir süre boyunca sert deniz iklimine tamamen maruz kalan bir sahada test edilmiştir. Sistem, üretilen ultra saf su için arada bir tampon bulunan MD ve PEMWE alt sisteminden oluşmaktadır. PEMWE sistemi, MD sistemi tarafından artık ısı ve deniz suyundan üretilecek UPW miktarını belirlemektedir. Tuzdan arındırılmış su, 1. sınıf UPW'ye kadar arıtılmaktadır ve PEMWE sistemine

beslenmektedir. PEMWE sistemi, UPW'yi elektrokimyasal olarak hidrojen ve oksijene ayırmak için elektrik akımı kullanmaktadır. Gerekli ultra saf su üretimi minimum 9,6 l/saat olarak hesaplanmıştır.

Ishaq, Dincer ve Naterer [120] yaptıkları çalışmada hidrojen, tatlı su ve elektrik üretimi için yeni bir entegre trijenerasyon sistemi geliştirmiş ve analiz edilmiştir. Bu sistemde ısı kaynağı olarak cam eritme fırınından çıkan baca gazı kullanılmaktadır. Sistem bir atık ısı kaynağı, bir Rankine döngüsü, bir termokimyasal Cu-Cl döngüsü ve ters ozmoz tuzdan arındırma ünitesinden oluşmaktadır. Hidrojen üretimi, hibrit bir elektrik ve termokimyasal su ayrıştırma döngüsü yoluyla gerçekleştirilmiştir. Cam eritme fırınından çıkan egzoz gazı ısı kaynağı olarak kullanılmakta olup akış hızı 6,4 kg/s'dir. Elektroliz reaksiyonu sonucu üretilen hidrojen gazı ayrıca hidrojen sıkıştırma sistemine doğru ilerlemekte ve hidrojen 750 bar basınç ve 25°C sıcaklıkta depolanmaktadır. Sistemin net hidrojen üretim hızı 12 g/s'dir. Rankine çevrimi 1,9 MW elektrik üretmektedir. Rankine çevriminin enerji verimliliği %28,9, ekserji verimliliği ise %31,2 olarak değerlendirilmiştir. Ters ozmoz (RO) tuzdan arındırma ünitesinin enerji verimliliği %62,8, ekserji verimliliği ise %29,6 olarak sunulmuştur. Trijenerasyon entegre sisteminin genel enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla % 39,3 ve % 40,8 olarak bulunmuştur.

Maheswari, Murugavel ve Esakkimuthu [121] yürüttükleri çalışmada, düşük kapasiteli bir içten yanmalı motorun egzoz gazında boşa harcanan ısı enerjisini, pompalama sistemi için kullanılan herhangi bir harici enerjinin yardımı olmadan, dalgıç yatay borulu düz geçişli evaporatör ve yoğunlaşma ünitesi kullanılarak tuzdan arındırma amacıyla kullanmıştır. Çalışmalarında buharlaşan buharın yoğunlaştırılması için yatay borulu düz geçişli evaporatör ve su soğutmalı kondenser imal etmişlerdir. Deneyler, yatay borulu düz geçişli evaporatörün çeşitli yük koşulları altındaki performansını analiz etmek için 5 hp'lık bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Motorun performansını etkilemeden, motor egzoz gazından 3,0 l/saat tuzlu suyun tuzundan arındırılabilir. Kondenser ünitesinde yaklaşık 24 litreden fazla su 60 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Atık egzoz gazı ısı enerjisinin yanı sıra kondenser suyundaki ısı enerjisinden de yararlanılarak sistemin genel verimliliği artırılmakta ve termal kirlilik de önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Önceki çalışmalar değerlendirildiğinde, bu çalışma özelinde atık ısı geri kazanımı ile elde edilen enerjinin, deniz suyundan elde edilecek hidrojenin üretilmesi için kullanılması ve bu kullanımın enerjitik açıdan değerlendirilmesi modellenen deniz aracı için; daha önce yapılan bir çalışma olmadığını göstermektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında bir yük gemisi dizel motorundan çıkan atık ısıyı kullanarak elektrik üreten ve bu üretilen elektrik ile deniz suyundan hidrojen üreten bir sistem tasarlanmıştır. Çalışma sırasında izlenen yol Şekil 3.1’de verilmiştir. Öncelikle çalışma için literatür araştırması yapılarak talepler için uygun bir gemi ve dizel motor seçilmiştir. Sonra dizayn parametreleri seçilmiş ve sistem omurgası oluşturulmuştur. Burada belirlenen parametrelere göre ise sistem bileşenleri belirlenmiş ve enerji ekserji analizi yapılmıştır. Son olarak yapılan analizler değerlendirilmiş ve sonuçlar tartışmalı olarak sunulmuştur.

Literatürdeki gemiler ve özellikleri ile birlikte çalışmada planlanan amaç için girdiler araştırılarak, bu çalışma için seçilen gemi Şekil 3.2’de ve özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çalışma için 25 000 DWT kapasiteli bir kargo dökme yük gemisi seçilmiştir. Gemide tahıl, metal konsantreleri, demir cevheri, hurda metal, tuz, şeker gibi kuru dökme ve kırık dökme yükler, rulo dahil çelik ürünleri, orman ürünleri, paketlenmiş yük ve paletli kargo gibi genel kargolar, torbalı çimento, torbalı kargolar, kütük, kereste, kontrplak gibi ürünler taşınmaktadır. Çalışmada yük gemisi seçilmesinin ayrı bir önemi vardır. Yük gemileri ülkeler arası uzun süreli seyahatler yaparken seçilen sistem ile hidrojen üretiminde daha verimli olacaktır.



Şekil 3.1. Yürütülen çalışmada izlenen adımlar



Şekil 3.2. Seçilen gemi görseli örneği [122]

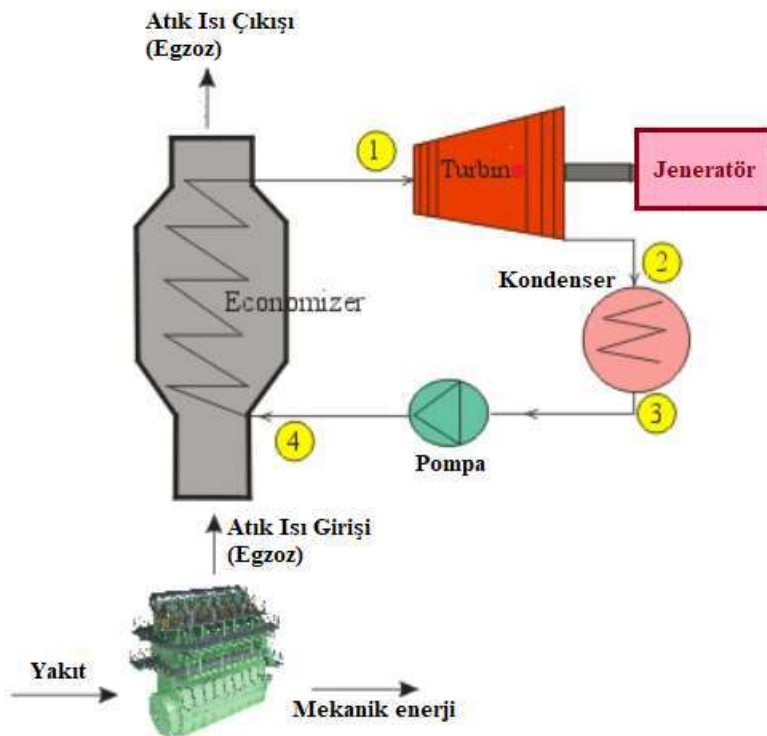
Çizelge 3.1. Çalışma için seçilen gemi ve motor özellikleri [122-123]

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Gemi Tipi	25 000 DWT Dökme Yük Gemisi
Tam uzunluk (m)	159,2
Genişlik (m)	25
Ana Motor	MAN B&W 8S35MC – 5 920 kW 173 rpm
Hız Özelliği	yaklaşık. 13 knots (@85% MCR)
Menzil	% 90 yakıt kapasitesiyle yaklaşık 12 000 deniz mili
Yükleme Özelliği	Gemi ambarlarında çift dipte yükleme: 20 t/m ² Ana güvertede yükleme: 4 t/m ²
Motor Egzoz Gazı Sıcaklığı (°C)	260 (5 220 kW, 167,0 r/min) 256 (4 698 kW, 158,7 r/min)
Motor Egzoz Gazı Kütle Akışı	40 100 kg/h (5 220 kW) 36 000 kg/h (4 698 kW)

Motorun egzoz gazı, yüksek enerji ve ekserjetik içeriği nedeniyle en dikkat çekici atık ısı kaynağıdır. Asit oluşma probleminden dolayı egzoz gazı minimum 140 C'ye kadar soğutulmaktadır. Bu çalışmada turboşarj işleminden sonra egzoz gazı özellikleri alınmıştır.

3.1. Sistem Tanımı ve Metodolojisi

Gerekli gereksinimler dikkate alınarak yapılan literatür araştırması sonrası gemi seçimi tamamlandıktan sonra dizayn parametrelerinin seçilmesi ve sistem omurgasının oluşturulması sağlanmıştır. Çalışma için öncelikle atık ısı geri kazanım sistemi için araştırma yapılmış ve motor özellikleri dikkate alınarak Rankine Çevrimi kullanılmaya karar verilmiştir. Bu aşamada atık ısı geri kazanım sistemi için motorun egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazı miktarı önemli parametrelerdir. Şekil 3.3.'de atık ısı geri kazanım sistemi gösterilmiştir.

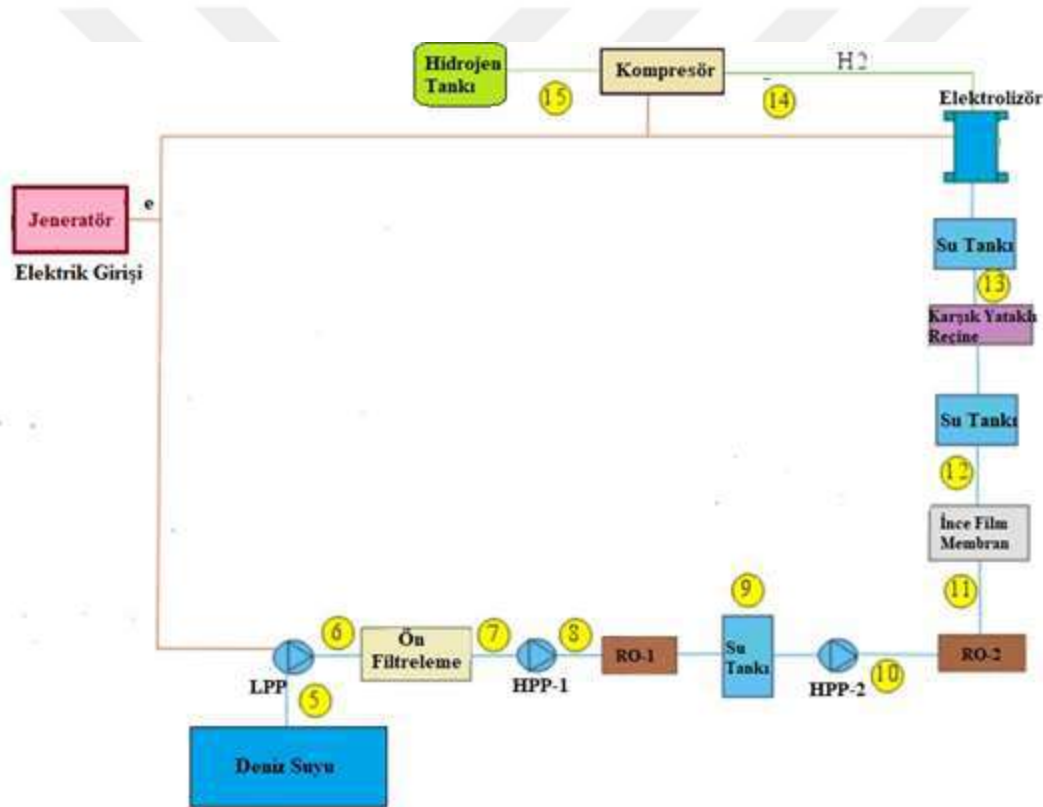


Şekil 3.3. Tasarlanan rankine çevrimi elemanları

Seçilen rankine çevrimi 4 komponentten oluşmaktadır: Ekonomizer, güç türbini+jeneratör, kondenser ve besleme pompası. Kondenserden gelen doymuş sıvı halindeki su türbin girişinde olması gereken basınç değerine sıkıştırılır. Pompa ile sıkıştırılan su bir ısı değiştirici olan ekonomizerden geçerek türbin girişinde olması gereken sıcaklığa çıkarılarak

kızgın buhar haline getirilir. Kızgın buhar daha sonra türbin içindeki kanatçıklara çarparak mekanik güç elde edilir. Mekanik güç jeneratör ile elektrik enerjisine çevrilir. Türbin kanatçıklarına çarparak mekanik güç üreten kızgın buhar türbin çıkışı sonrası kondenser'e girerek doymuş sıvı haline getirilir. Aynı çevrim sürekli olarak tekrarlanır.

Bu çalışmada egzoz atık ısısından üretilen elektrik, deniz suyundan hidrojen üretmek için gerekli olan enerji olarak kullanılacaktır. Deniz suyundan hidrojen üretimi için tasarlanan sistem Şekil 3.4'te verilmiştir. Deniz suyundan hidrojen üretimi deniz suyunun arıtılarak elektroliz hücresine verilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bunun için ticari olarak da kendini kanıtlamış bir yöntem olan ters ozmoz yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Deniz suyundan hidrojen üretimi için tasarlanan sistem

Tasarlanan sistemde öncelikle denizden deniz suyunu alan düşük basınçlı pompa deniz suyunu membrandan önce ön filtrelemeye gönderir. Ön filtreleme membranı korumak ve ömrünü arttırmak için kritiktir. Bu filtrasyon metodu fiziksel eleme yöntemi kullanılarak yapılır ve 5 µm'ye kadar partikülleri yakalayan sediment filtresi kullanılır.

Sediment filtreler sudaki kum, silt, gevşek kireç, kil veya organik madde gibi askıda kalan maddeleri temizler. Sediment filtreleri ayrıca çözünmeyen (çözülemeyen) veya asılı demir ve manganezi de giderebilir [124].

Bu aşamadan sonra deniz suyunun tuzdan arındırılması için iki ayrı tuzdan arındırma ünitesi (ters ozmoz) kullanılmıştır. RO çıkışındaki su tek kademeli arıtmalarda istenilen kalitede olmayabilmektedir. Bu yüzden iki kademeli ters ozmoz kullanılmıştır. Ters ozmoz membranlarının gözenekleri yaklaşık 50-150 dalton değerinde yüksek arıtım değerlerine sahip olup, bunun yanı sıra çözünmüş tuzlar ve organik maddelerin arıtılmasında bariyer görevi görmektedir [125]. Yüksek basınç pompası ile ön filtrelemeden çıkan deniz suyu basınçlandırılarak ters ozmos membranına gönderilir ve bu yüksek basınç ile membran gözeneklerinden geçmeye zorlanırken bir yandan arıtma işlemi gerçekleşir.

Tuzdan arındırma işleminden sonra, yabancı maddeleri daha da uzaklaştırmak için ek adım olarak ince film kompozit membran eklenmiştir. Poliamid ince film kompozit membran yüksek bir tuz reddi elde edebilen yarı geçirgen membranlardır. Ters ozmoz ünitelerinde ince film kompozit membran kullanmanın ana sebepleri yüksek su akışı ve tuz reddi sergileme yeteneği, mükemmel termal ve kimyasal stabilite, kirlenmeye karşı dirençli ve aynı zamanda klor saldırısına karşı iyi toleranslı olmasıdır [66].

Nihai saflaştırma ise, suda çözünmüş iyonları uzaklaştırmak için karışık yatak reçineleri ile yapılır. Karışık yatak reçinelerinde tasarlanan kolonlar anyon ve katyon reçinelerinin karıştırılması ile oluşur. Yüksek saflıktaki suyun eldesi için kullanımı önemlidir [126].

Suyun nihai olarak saflaştırılmasından sonra, saf su elektrolizöre (PEME) girerek hidrojene dönüştürülmektedir. Daha sonra elde edilen hidrojen bir kompresör vasıtası ile hidrojen tankında depolanmaktadır.

3.2. Sistem Bileşenlerinin Seçimi

Sistem metodolojisi belirlendikten sonra gereksinimler dikkate alınarak literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırma sonrası her bir sistem için bileşenler literatürden analiz edilerek seçilmiş ve özellikleri belirlenmiştir. Çizelge 3.2 çalışma için seçilen bileşelerin termodinamik hesaplamalarda kritik rol oynayan özelliklerini içermektedir.

Rankine çevrimi için seçilen kritik elemanlar:

- Ekonomizer
- Türbin
- Kondenser
- Pompa

Elemanların seçimi sonrası tasarlanan rankine sisteminin toplam ağırlığının yaklaşık 322 kg olacağı ve atık ısıdan elektrik elde etmek için sistemin harcayacağı gücün 0,5 kW olacağı görülmüştür.

Deniz suyundan hidrojen üretim sistemi için seçilen kritik elemanlar:

- Elektrolizör
- Hidrojen kompresör
- Hidrojen tankı
- Su tankı
- Ters ozmoz membran
- Sediment filtre
- Karışık yataklı reçine filtre
- İnce film membran
- Yüksek Basınç Su pompaları
- Düşük Basınçlı Su Pompaları

Elemanların seçimi sonrası tasarlanan deniz suyundan hidrojen üretimi sisteminin toplam ağırlığının yaklaşık 624,5 kg olacağı ve atık ısıdan elektrik elde etmek için sistemin harcayacağı gücün 13,34 kW olacağı görülmüştür.

Çizelge 3.2. Çalışma için seçilen bileşenlerin kritik özellikleri [127-146]

Sistem	Sistem Bileşeni	Özellikleri
RC Sistemi (Atık ısıdan elektrik üretimi)	Ekonomizer 	- Ağırlık: yak. 200 kg - Egzoz gaz sıcaklığı <700°C
	Türbin (jeneratör ile birlikte) : 	- Giriş koşulları: Kızgın buhar (200-220 °C)/ 10-12 bar - Çıkış koşulları: 40 °C / 0,1 bar 15 kW için buhar tüketimi: 0,04 kg/sn - Türbin ağırlık: 25 kg - Güç üretimi: 15 kW
	Kondenser 	- Ağırlık: 83 kg - Tüketilen güç: 0,13 kW
	Pompa 	- Ağırlık: 14 kg - Tüketilen güç: 0,37 kW
	Toplam RC sistem ağırlık	322 kg
	Toplam RC sistem tüketilen güç	0,5 kW
Deniz suyundan H₂ üretim ünitesi	Elektrolizör 	- Ağırlık: 250 kg - Tüketilen güç: 10 kW - Hidrojen üretimi: 2 Nm³/h = 4,31 kg/24 h = 0.000049884 kg/sn - Su tüketim: 1,7 l/h
	Hidrojen Kompresör 	- Ağırlık: 80 kg - Güç tüketimi: 1,5 kW

Çizelge 3.2. (devam) Çalışma için seçilen bileşenlerin kritik özellikleri [127-146]

Sistem	Sistem Bileşeni	Özellikleri
	Hidrojen Tankı 	- Depolama kapasitesi: 19,1 kg - Ağırlık: 244,1 kg (hidrojen ağırlığı dahil) - Servis basıncı: 350 bar
	Su Tankı (3 adet) 	- Ağırlık : 6 kg (toplam) - Kapasite: 5L
	K. Y. reçine filtre 	Ağırlık: 0,5 kg
	İnce film membran- (TW30-2026 RO Membrane) 	- Ağırlık: 0,9 kg 99,5% tuz reddi - Maksimum besleme akış hızı: 1,1 m³/hr - Maksimum çalışma basıncı: 41 bar - Maksimum basınç düşüşü: 0,9 bar
	RO membrane (2 adet) 	- Ağırlık: 8,6 kg (toplam) 99,4 % tuz reddi - Maksimum besleme akış hızı: 1,4 m³/h - Uygulanan basınç: 55 bar

Çizelge 3.2. (devam) Çalışma için seçilen bileşenlerin kritik özellikleri [127-146]

Sistem	Sistem Bileşeni	Özellikleri
	Sediment filtre (2 adet) 	- Ağırlık: 1,2 kg (toplam) 5 Mikron gözenek - Maks. önerilen akış hızı: 38 lpm - Maksimum akış hızında basınç düşüşü: <2 PSI - Önerilen maksimum su basıncı: 6,9 bar
	Yüksek Basınç Su Pompası (2 adet)- Elektrik motoru ile birlikte 	- Ağırlık (pompa+ elektrik motoru): 17,4 kg (toplam) - Güç tüketimi: 1,6 kW (Toplam)
	Düşük Basınç Pompası 	- Ağırlık: 15,8 kg - Güç tüketimi: 0,240 kW
	Toplam Sistem Ağırlığı	624,5 kg
	Toplam Sistem Tüketilen Güç	13,34 kW

Çizelge 3.2. (devam) Çalışma için seçilen bileşenlerin kritik özellikleri [127-146]

Sistem	Sistem Bileşeni	Özellikleri
Öngörülemeyen ağırlıklar (DC/DC dönüştürücüler vb)		50 kg
Toplam sistem ağırlığı		996,5 kg
Sistem için gerekli güç		13,88 kW

3.3. Enerji ve Ekserji Analiz Denklemleri

Sistemlerin düzgün çalışabilmesi için belli bir enerjiye ihtiyaçları bulunmaktadır. Bu enerjinin hangi kaynaktan üretildiğinin yanında; ne kadar üretildiği, verimi, dengesi ve yararlı enerji verimlerinin hesaplanması, üreticiler ve kullanıcılar için büyük önem taşımaktadır. Terminoloji olarak en basit şekli ile; enerji, iş yapabilme kabiliyeti göstergesi ve ekserji, enerjinin yararlı iş potansiyeli şeklinde ifade edilebilmektedir. Her iki ifade de termodinamik kurumların bir parçasıdır ve iş/güç-enerji ikilisinin vazgeçilmez öğelerindendir.

Kinetik ve potansiyel enerji değişimini göz ardı ederek ve kararlı durum koşulu altında, bir kontrol hacmi için enerji dengeleri şu şekilde ifade edilebilir[31]:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (4.1)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (4.2)$$

Burada $\dot{Q}$ ve $\dot{W}$ sırasıyla ısı akışı ve işi temsil eder.

Ekserji, bir sistem çevresiyle etkileşime girdiğinde ve dengeye geldiğinde mevcut olan maksimum iş yapma potansiyeli olarak tanımlanabilir. Ekserji analizi, bir sistemdeki enerji kaybı noktasının türlerini, yerlerini ve büyüklüklerini belirlemek için bir araç olarak kullanılır. Bu nedenle, daha iyi sistem verimlilikleri ve sürdürülebilir üretimler için bu kayıpları belirlemek ve ölçmek çok önemlidir. Bir kütle akışının ekserjisi kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal olmak üzere 4 alt kategoriye ayrılabilir. Genel ekserji denklemleri aşağıdaki gibidir [147-148].:

$$ex_{toplamlam} = ex_{pe} + ex_{ke} + ex_{fz} + ex_{km} \quad (4.3)$$

$$\dot{E}x = \dot{m} ex \quad (4.4)$$

ex özgül ekserjiyi temsil ederken, ekserji akışı $\dot{E}$ ile gösterilir.

$$\dot{E}x_{ke} = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 \quad (4.5.1)$$

$$\dot{E}x_{pe} = \dot{m} g (z_2 - z_1) \quad (4.5.2)$$

Akışın çevreye göre hareketsiz olduğu varsayıldığından ex_{pe} ve ex_{ke} 'nin ihmal edilebilir olduğu kabul edilir.

Bir kontrol hacmi için genel ekserji denklemleri aşağıda verilmiştir [148]:

$$\frac{d\dot{E}_{cv}}{dt} = \dot{E}x_Q - \dot{E}x_W + \sum \dot{m}_{in} ex_{in} - \sum \dot{m}_{out} ex_{out} - \dot{E}x_{dst} \quad (4.6)$$

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (4.7)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (4.8)$$

$\frac{d\dot{E}_{cv}}{dt}$ kontrol hacmindeki ekserjinin değişim oranını verir. Kararlı durumda, $\frac{d\dot{E}_{cv}}{dt} = 0$

$$0 = \dot{E}x_Q - \dot{E}x_W + \sum \dot{m}_{in} ex_{in} - \sum \dot{m}_{out} ex_{out} - \dot{E}x_{dst} \quad (4.9)$$

Yukarıda verilen denklemlere göre ekserji verimleri genel bir formda şu şekilde yazılabilir:

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} \quad (4.10)$$

Rankin çevrimi baz alındığında aşağıdaki denklemler ile sistemin performansını takip etmek mümkündür[31]:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{egzoz}(h_{in} - h_{out}) \quad (4.11)$$

$\dot{Q}_{in}$ bu formülde egzozdan çalışma akışkanına aktarılan toplam ısı miktarıdır.

$$\dot{W}_{net,RC} = \dot{W}_{türbin,RC} - \dot{W}_{pompa,RC} \quad (4.12)$$

$\dot{W}_{türbin,RC}$ çevrimden elde edilen net gücü ifade ederken, $\dot{W}_{pompa,RC}$ ise pompa tarafından harcanan güçtür.

$$\dot{E}_{in,RC} = \dot{m}_{egzoz}(e_{in} - e_{out}) \quad (4.13)$$

$\dot{E}_{in,RC}$ Egzoz gazından sisteme ekserji girişi olarak Kabul edilirse sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_{enerji} = \frac{\dot{W}_{net,RC}}{\dot{Q}_{in}} \quad (4.14)$$

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{W}_{net,RC}}{\dot{E}_{in,RC}} \quad (4.15)$$

Deniz suyunu arıtma sisteminde ise akımlar saf su ve deniz suyudur. Su ve deniz suyu akımlarının fiziksel ve kimyasal ekserjisi, entalpi ve entropi değerleri Sharqawy tarafından önerilen ve doğrulanan korelasyonlarla hesaplanabilmektedir (maksimum $\pm\%1,5$ sapma ile) [148-151].

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4.16)$$

burada h_0 , T_0 ve s_0 sırasıyla ölü durumdaki akışın entalpisi (kJ/kg), sıcaklığı (K) ve (kJ/kgK) entropisidir.

Su ve deniz suyu için entalpi ve entropi değerleri, Çizelge 4.1 'de sunulan sabitlerle birlikte aşağıdaki denklemlerle verilir:

$$h_{wt} = 141,335 + 4\,202,070T - 0,535T^2 + 0,004T^3 \quad (4.17)$$

$$h_{sw} = h_{wt} - w_s[b_1 + b_2w_s + b_3w_s^2 + b_4w_s^3 + b_5T + b_6T^2 + b_7T^3 + b_8w_sT + b_9w_s^2T + b_{10}w_sT^2] \quad (4.18)$$

w_s (kg/kg) akımın tuzluluk oranıdır.

$$h_{sw(total)}(T, p, w_s) = h_{sw}(T, p_0, w_s) + v(P - P_0) \quad (4.19)$$

Bu denklemde v özgül hacim, P basıncı ifade etmektedir.

$$S_{wt} = 0,1543 + 15,383T - 2,996 * 10^{-2}T^2 + 8,193 * 10^{-5}T^3 - 1,370 * 10^{-7}T^4 \quad (4.20)$$

$$s_{sw} = S_{wt} - w_s[c_1 + c_2w_s + c_3w_s^2 + c_4w_s^3 + c_5T + c_6T^2 + c_7T^3 + c_8w_sT + c_9w_s^2T + c_{10}w_sT^2] \quad (4.21)$$

Çizelge 3.3. Deniz suyunun entalpi ve entropi hesaplamalarında kullanılacak sabitler [147-150]

b_1	$-2,3480 \times 10^4$	c_1	$-4,231 \times 10^2$
b_2	$3,152 \times 10^5$	c_2	$1,463 \times 10^4$
b_3	$2,803 \times 10^6$	c_3	$-9,880 \times 10^4$
b_4	$-1,446 \times 10^7$	c_4	$3,095 \times 10^5$
b_5	$7,826 \times 10^3$	c_5	$2,562 \times 10^1$

Çizelge 3.3. (devam)Deniz suyunun entalpi ve entropi hesaplamalarında kullanılacak sabitler [148-151]

b ₆	-4,417 x 10 ¹	c ₆	-1,443 x 10 ⁻¹
b ₇	2,139 x 10 ⁻¹	c ₇	5,879 x 10 ⁻⁴
b ₈	-1,991 x 10 ⁴	c ₈	-6,111 x 10 ¹
b ₉	2,778 x 10 ⁴	c ₉	8,041 x 10 ¹
b ₁₀	9,728 x 10 ⁴	c ₁₀	3,035 x 10 ⁻¹

Saf su ve deniz suyu akışının kimyasal ekserjisi, akışın ölü durum konsantrasyonundan farklı bir tuz konsantrasyonuna sahip olması durumunda üretilir [148-150].

$$ex_{km} = \sum_i^n w_i (\mu_i^* - \mu_i^0) \quad (4.22)$$

Yukarıdaki denklemde “*” bulunan özellikler, ortamın sıcaklık ve basıncında (T₀, P₀), ancak başlangıç akış akışı durumunun aynı bileşimi veya konsantrasyonunda belirlenir. Bu, yalnızca sıcaklık ve basıncın çevresel değerlere değiştirildiği sınırlı ölü durum olarak adlandırılır. Ancak yukarıdaki denklemde “0” olan özellikler , küresel ölü durum olarak adlandırılan ortamın sıcaklık, basınç ve konsantrasyonunda (T₀, P₀, w₀) belirlenir.

$$\mu_w = \frac{dG_{sw}}{dm_w} = g_{sw} - w_s \frac{dg_{sw}}{dw_s} \quad (4.23)$$

$$\mu_s = \frac{dG_{sw}}{dm_s} = g_{sw} + (1 - w_s) \frac{dg_{sw}}{dw_s} \quad (4.24)$$

μ_s ve μ_w sırası ile deniz suyunun ve suyun kimyasal potansiyelini ifade etmektedir.

$$g_{sw} = h_{sw} - (T + 273,15)s_{sw} \quad (4.25)$$

$$\frac{dg_{sw}}{dw_s} = \frac{dh_{sw}}{dw_s} - (T + 273,15) \frac{ds_{sw}}{dw_s} \quad (4.26)$$

$$-\frac{dh_{sw}}{dw_s} = b_1 + 2b_2w_s + 3b_3w_s^2 + 4b_4w_s^3 + b_5T + b_6T^2 + b_7T^3 + 2b_8w_sT + 3b_9w_s^2T + 2b_{10}w_sT^2] \quad (4.27)$$

$$-\frac{ds_{sw}}{dw_s} = c_1 + 2c_2w_s + 3c_3w_s^2 + 4c_4w_s^3 + c_5T + c_6T^2 + c_7T^3 + 2c_8w_sT + 3c_9w_s^2T + 2c_{10}w_sT^2] \quad (4.28)$$

g_{sw} deniz suyunun spesifik Gibbs enerjisidir. $\frac{dg_{sw}}{dw_s}$ spesifik Gibbs enerjisinin tuz konsantrasyonuna göre farklılaşmasıdır. $\frac{dh_{sw}}{dw_s}$ ve $\frac{ds_{sw}}{dw_s}$ ise tuz konsantrasyonuna göre entalpi ve entropinin farklılaşmasını ifade eder.

Spesifik hacim, yoğunluğun tersidir. Deniz suyu yoğunluğu aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir. Denklemler Sharqawy ve ark tarafından [135] hesaplanmışlardır. 0-180 °C sıcaklık aralığı ve 0-0,16 kg/kg tuz konsantrasyonu için % 0,1 doğruluk oranına sahiptir.

$$v_{sw} = 1 / p_{sw} \quad (4.29)$$

$$p_{sw} = p_{wt} + w_s (a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5w_sT^2) \quad (4.30)$$

$$p_w = 9,999 \times 10^2 + 2,034 \times 10^{-2}T - 6,162 \times 10^{-3}T^2 + 2,261 \times 10^{-5}T^3 - 4,657 \times 10^{-8}T^4 \quad (4.31)$$

v_{sw} ve deniz suyunun spesifik hacim (m³/kg), p_{sw} ve p_w deniz suyunun ve saf suyun spesifik yoğunluğu (kg/ m³)'dür.

Çizelge 3.4. Deniz suyunun yoğunluk hesaplamalarında kullanılacak sabitler [148]

a1	a2	a3	a4	a5
8,020 x 10 ²	-2,001	1,667 x 10 ⁻²	-3,060 x 10 ⁻⁵	-1,613 x 10 ⁻⁵

Genel RO ekserji verimliliği, gereken minimum ayırma işinin toplam giriş ekserjisine oranı olarak tanımlanır [149].

$$n_{ekserji} = \frac{W_{min}}{E_{input}} \quad (4.32)$$

Ekserji hesaplamalarında hidrojen ideal gaz varsayılmıştır ve aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [148]:

$$ex_{ph} = c_p T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \quad (4.33)$$

Ayrıca, bir maddenin kimyasal ekserjisi, kimyasal bileşiminin çevresine göre sapması ile ilişkilidir. Genel olarak, bir gaz karışımı için kimyasal ekserji şu şekilde yazılabilir:

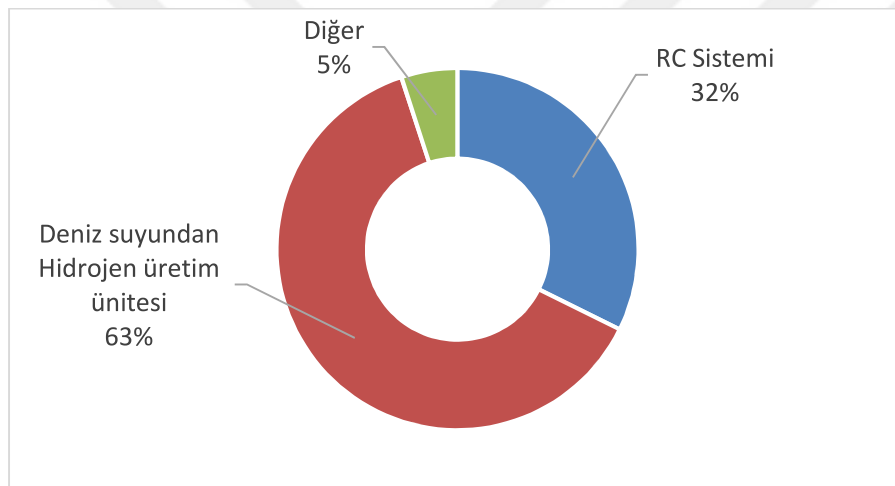
$$ex_{ch} = \sum x_{H_2} ex_{0,H_2} + R_{H_2} T_0 \sum x_{H_2} \ln x_{H_2} \quad (4.34)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, önerilen sisteminin performansı ve verimliliği hakkında analiz yapılabilmesi için ağırlık, enerji ve ekserji çalışmaları yapılmıştır.

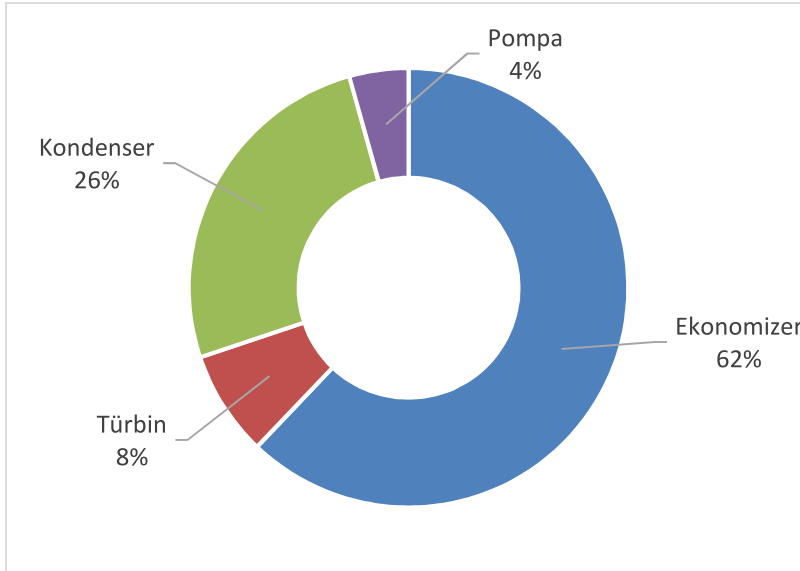
4.1. Sistem Ağırlıklarının Analizi

Şekil 4.1’de tasarlanan sistemin ağırlık değerlendirmesi verilmiştir. Bu analize göre alt sistemlerin ağırlık yüzdeleri şu şekilde sıralanabilir; % 63 deniz suyundan hidrojen üretim ünitesi, % 32 rankine çevrimi ve % 5 diğer ağırlıklardır.

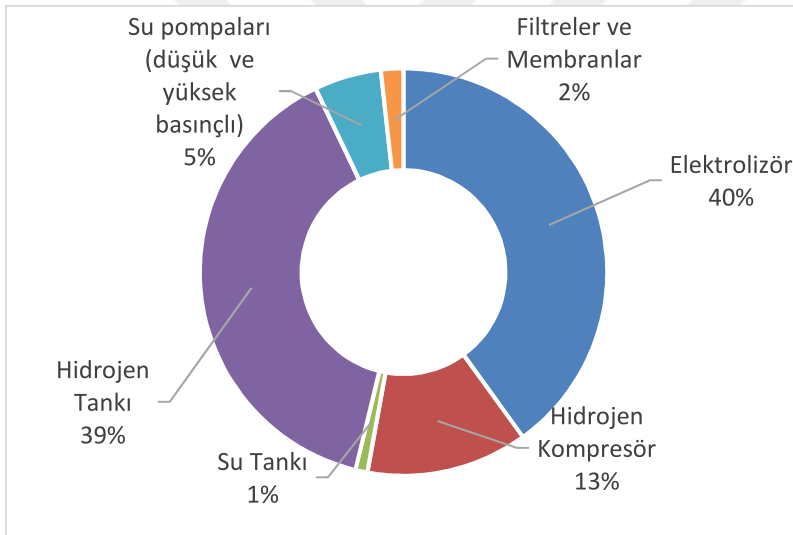


Şekil 4.1 . Tasarlanan sistemin ağırlık analizi

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 ise sırası ile RC ve deniz suyundan hidrojen üretim alt sistemlerinin kendi içerisindeki detaylı ağırlık yüzdelerini göstermektedir. RC çevriminde ağırlık sıralaması şu şekildedir: % 62 ekonomizer, % 26 kondenser, % 8 türbin ve % 4 pompa. Deniz suyundan hidrojen üretim ve depolama sisteminde ise ağırlık sıralaması; % 40 elektrolizör, % 39 hidrojen tankı, % 13 hidrojen kompresör, % 5 su pompaları, % 2 filtreler ve membranlar, % 1 su tankı şeklindedir.



Şekil 4.2. RC çevrimi elemanlarının ağırlık yüzdeleri



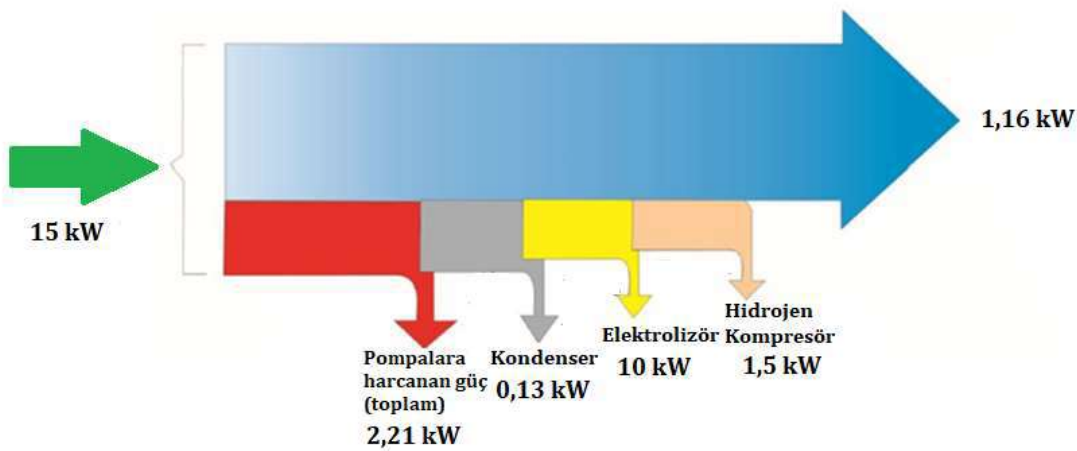
Şekil 4.3. Deniz suyundan hidrojen üretimi çevrimi elemanlarının ağırlık yüzdeleri

Sistem ağırlıklarının analizi, güç/ağırlık oranlarında ve verim hesaplamalarında çok önemli parametrelerdir. Özellikle büyük ağırlıkların olduğu bu tip uygulamalarda, ağırlığın olabildiğince minimize edilmesi gerekmektedir. Bu ağırlıkları azaltmak için ekonomizer, elektrolizör ve hidrojen tankı elemanlarının ağırlığının optimizasyonu ile ilgili çalışmalara daha fazla önem verilmesinin gerekliliği bu çalışmada da ortaya konmaktadır.

4.2. Enerji ve Ekserji Analizi

Enerji Analizi

Sistem enerji açısından incelendiğinde atık ısı geri kazanımı ile elde edilen 15 kW gücün dağılımı Şekil 4.4’de verilmiştir. Elde edilen enerjinin en büyük payı 10 kW ile elektrolizere harcanmıştır. Daha sonra sırası ile 2,21 kW ile pompalara, 1,5 kW ile kompresöre, 0,13 kW ile kondenser’e harcanmıştır. Geriye kalan 1,16 kW enerji gemi elektrik ihtiyacı için harcanabilecek artan enerji olarak bulunmuştur.



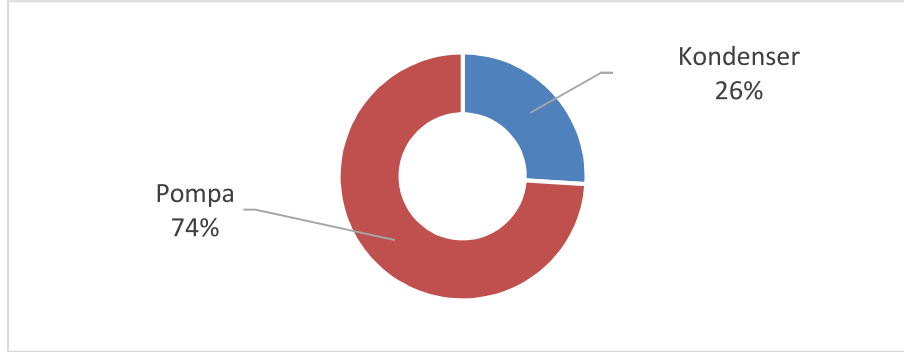
Şekil 4.4. Atık ısıdan elde edilen enerjinin dağılımı

Geriye kalan ve düzenli olarak üretilen 1,16 kW güç ile gemide birçok elektrikli alet çalıştırılabilir. Örneğin[151];

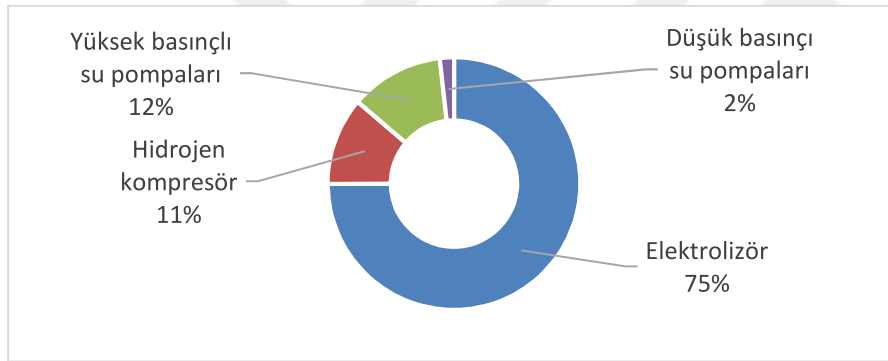
- 60 ekran televizyon, saatte ortalama 36 W,
- A+ orta boyutlarda bir buzdolabı (410 Litre) günde 950 W, A++ enerji sınıfına sahip ve 630 litre hacme sahip bir buzdolabı bir günde ortalama olarak 1 000 W,
- A++ enerji sınıfına sahip ve 5 kg kapasiteli çamaşır makinesi saatte ortalama 650 W,
- A+++ enerji sınıfında ve 10 kg kapasiteli çamaşır makinesi saatte ortalama 1 000 W elektrik harcamaktadır.

Her bir sistemin kendi içerisindeki enerji harcama dağılımı ise Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir. RC çevriminde enerji harcayan bileşenlerin enerji harcama yüzdeleri sırası ile %74 pompa, %26 kondenserdir.

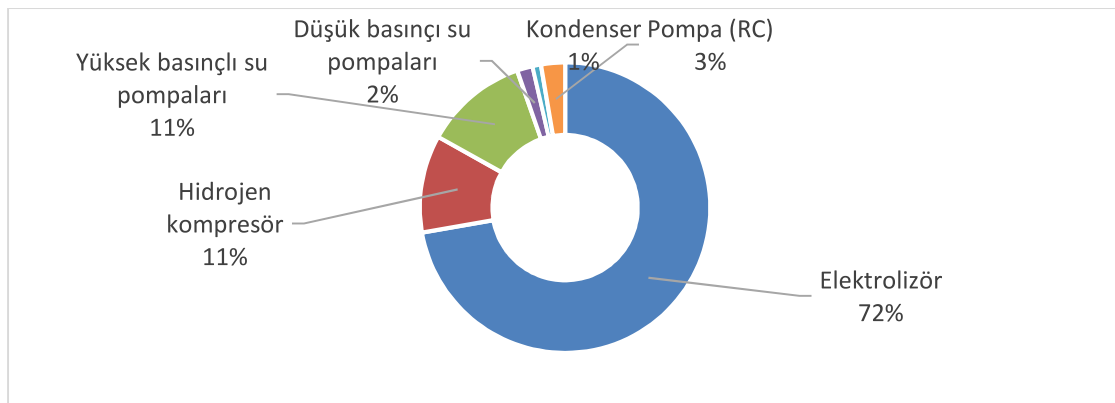
Deniz suyundan hidrojen üretimi sisteminde ise bileşenlerin enerji harcama yüzdeleri: %75 elektrolizör, %12 yüksek basınçlı su pompaları, %11 hidrojen kompresör, %2 düşük basınçlı su pompalarıdır. Sistemler ayrı ayrı değilde bir bütün halinde değerlendirildiğinde ise (Şekil 4.7) en çok güç tüketen bileşen %72 ile elektrolizördür.



Şekil 4.5 . RC çevrimindeki bileşenlerin enerji harcama yüzdeleri (kW)



Şekil 4.6. Deniz suyundan hidrojen üretimi çevrimindeki bileşenlerin enerji harcama yüzdeleri (kW)

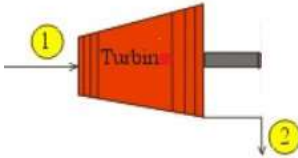
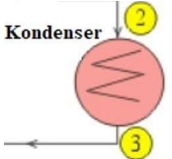
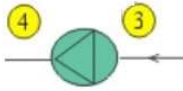
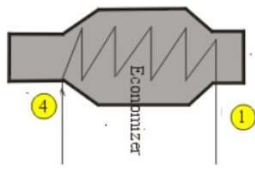


Şekil 4.7. Toplam sistemde bileşenlerin enerji harcama yüzdeleri (kW)

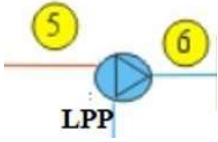
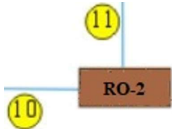
Ekserji Analizi

Tasarlanan sistemdeki elemanlara ait ekserji dengeleri ve verimlilik formülleri Çizelge 4.1'te verilmiştir.

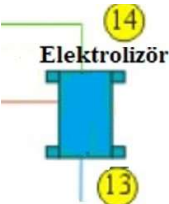
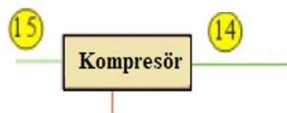
Çizelge 4.1. Komponentlerin ekserji dengeleri [152-153]

Komponent	Ekserji Yıkımı	Ekserji Verimliliği
Atık Isı Geri Kazanım Sistemi		
Türbin(1-2) 	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_1 - \dot{E}x_2 - W$	$n_{ekserji} = \frac{(\dot{E}x_2 + \dot{W})}{\dot{E}x_1}$
Kondenser (2-3) 	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_2 - \dot{E}x_3 + W$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_3}{(\dot{E}x_2 + \dot{W})}$
Pompa(3-4) 	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_3 - \dot{E}x_4 + \dot{W}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_4}{(\dot{E}x_3 + \dot{W})}$
Ekonomizer(4-1) 	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_4 - \dot{E}x_1 + Q$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_1}{(\dot{E}x_4 + \dot{Q})}$
TOPLAM RC SİSTEM		$n_{ekserji} = \frac{(W_{net})}{\dot{E}in}$

Çizelge 4.1. (devam) Komponentlerin ekserji dengeleri [152-153]

Komponent	Ekserji Yıkımı	Ekserji Verimliliği
Deniz Suyundan Hidrojen Üretim Sistemi		
Düşük Basınç Pompası(5-6)	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_5 - \dot{E}x_6 + \dot{W}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_6}{(\dot{E}x_5 + \dot{W})}$
		
Ön Filtreleme (6-7)	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_6 - \dot{E}x_7$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_7}{\dot{E}x_6}$
		
Yüksek Basınç Pompası(7-8)	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_7 - \dot{E}x_8 + \dot{W}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_8}{(\dot{E}x_7 + \dot{W})}$
		
Ters Ozmoz (8-9)	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_8 - \dot{E}x_9$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_9}{\dot{E}x_8}$
		
Yüksek Basınç Pompası(9-10)	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_9 - \dot{E}x_{10} + \dot{W}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{10}}{(\dot{E}x_9 + \dot{W})}$
		
Ters Ozmoz (10-11)	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_{10} - \dot{E}x_{11}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{11}}{\dot{E}x_{10}}$
		

Çizelge 4.1. (devam) Komponentlerin ekserji dengeleri [152-153]

Komponent	Ekserji Yıkımı	Ekserji Verimliliği
İnce Film Membran (11-12) 	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{12}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{12}}{\dot{E}x_{11}}$
Karışık Yataklı Reçine (12-13) 	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_{12} - \dot{E}x_{13}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{13}}{\dot{E}x_{12}}$
Elektrolizör (13-14) 	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_{13} - \dot{E}x_{14} + \dot{W}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{14}}{(\dot{E}x_{13} + \dot{W})}$
Kompresör (14-15) 	$\dot{E}x_{dst} = \dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{15} + \dot{W}$	$n_{ekserji} = \frac{\dot{E}x_{15}}{(\dot{E}x_{14} + \dot{W})}$
TOPLAM RC SİSTEM		$n_{ekserji} = \frac{(\dot{W}_{min})}{\dot{E}in}$

Bu çalışmadaki ekserji varsayımları ve kabulleri aşağıdaki gibidir:

- Hidrojen tankından kaçak veya kayıp yoktur.
- Hidrojen ideal bir gazdır.
- Sistemin çalıştığı çevrenin sıcaklığı ve basıncı 25 °C ve 1 atm olarak kabul edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel ekserji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Hibrit sistem sabit durumda çalışır (steady-state).
- Deniz suyu arıtma sistemlerinde, tuzdan arındırma tesisinin deniz suyu alma durumu, ortam ölü durumu olarak alınır.
- Saf su ve deniz suyu akışının kimyasal ekserjisi, akışın ölü durum konsantrasyonun dan farklı bir tuz konsantrasyonuna sahip olması durumunda üretilir.
- Boru hatlarındaki basınç düşüşleri ihmal edilmiştir.
- Bileşenler adyabatiktir.
- RC döngüsünde herhangi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmediğinden, kimyasal ekserji ihmal edilebilir. Böylece, her bir durum noktasındaki ekserji, fiziksel ekserjiye eşittir.

Tasarlanan sistemdeki bileşenlere ait spesifikasyonlar göz önüne alınarak Şekil 4.8’de tanımlanan her noktadaki akış için basınç, sıcaklık, akış hızı gibi ekserji hesabından kullanılacak parametreler belirlenmiş ve her bir noktadaki ekserji değerleri hesaplanarak Çizelge 4.2’te belirtilmiştir. Çizelge 4.3’te ise ekserji yıkım değerleri ve ekserji verimlilikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2.(devam) Sistemde tanımlı her bir noktanın akış parametreleri ve hesaplanan ekserji değerleri

Akım No	T (Sıcaklık- K)	P (Basınç- kPa)	M (Akış oranı- kg/sn)	Tuzluluk (kg/kg)	Ettotal(kW)
1. ÇEVİRİM (DENİZ SUYU ARITMA ÜNİTESİ)					
11	298,15	1 500	0,004	0,000001224	0,005287118
12	298,15	800	0,0039	0,0000000612	0,002699378
13	298,15	200	0,0039	0,0000000612	0,00038432
14	298,15	3 000	0,00049884	-	6,139966397
15	298,15	35 000	0,000049884	-	6,191035226
2. ÇEVİRİM (ATIK ISIDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ)					
1	493,15	1 200	0,04	-	34,98
2	313,15	100	0,04	-	0,062
3	303,15	100	0,04	-	0,0043
4	303,15	1 200	0,04	-	0,051

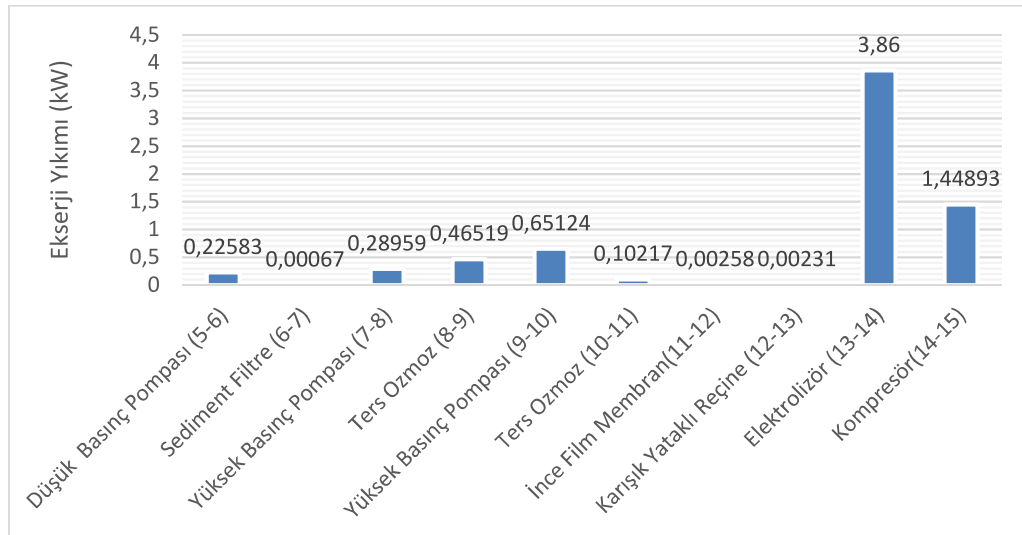
Çizelge 4.3.Sistemdeki her bir bileşenin ekserji yıkımı ve ekserji verimliliği

Akım No	Edes (kW)	Ekserji Verimliliği (%)
1. ÇEVİRİM (DENİZ SUYUNDAN HİDROJEN ÜRETİMİ)		
Düşük Basınç Pompası (5-6)	0,225833	% 6
Sediment filtre (6-7)	0,000679	% 95
Yüksek Basınç Pompası (7-8)	0,28959	% 64
Ters ozmos (8-9)	0,465191	% 11
Yüksek Basınç Pompası (9-10)	0,651244	% 14

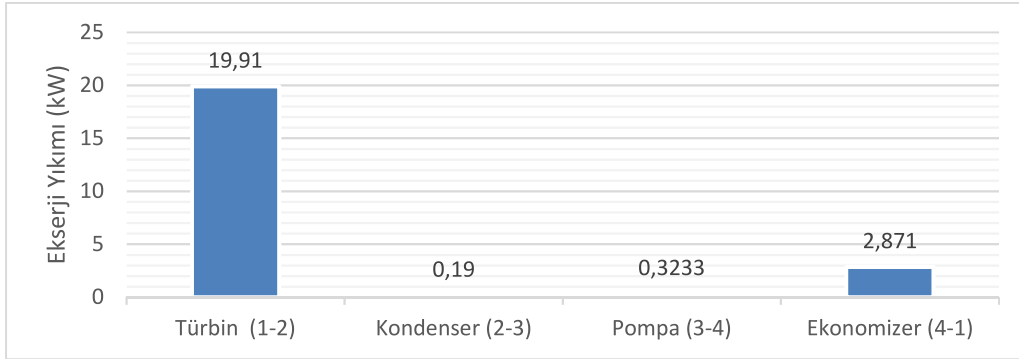
Çizelge 4.3.(devam)Sistemdeki her bir bileşenin ekserji yıkımı ve ekserji verimliliği

Akım No	Edes (kW)	Ekserji Verimliliği (%)
1. ÇEVİRİM (DENİZ SUYUNDAN HİDROJEN ÜRETİMİ)		
Ters ozmos (10-11)	0,102178	% 5
İnce film membrane (11-12)	0,002588	% 51
Karışık Yatak reçine filtre (12-13)	0,002315058	% 14
Elektolizör(13-14)	3,86	% 61
Kompresör (14-15)	1,448931	% 81
2. ÇEVİRİM (ATIK ISIDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ)		
Türbin (1-2)	19,91	% 43
Kondenser (2-3)	0,19	% 2
Pompa(3-4)	0,3233	% 14
Ekonomizer(4-1)	2,871	% 92

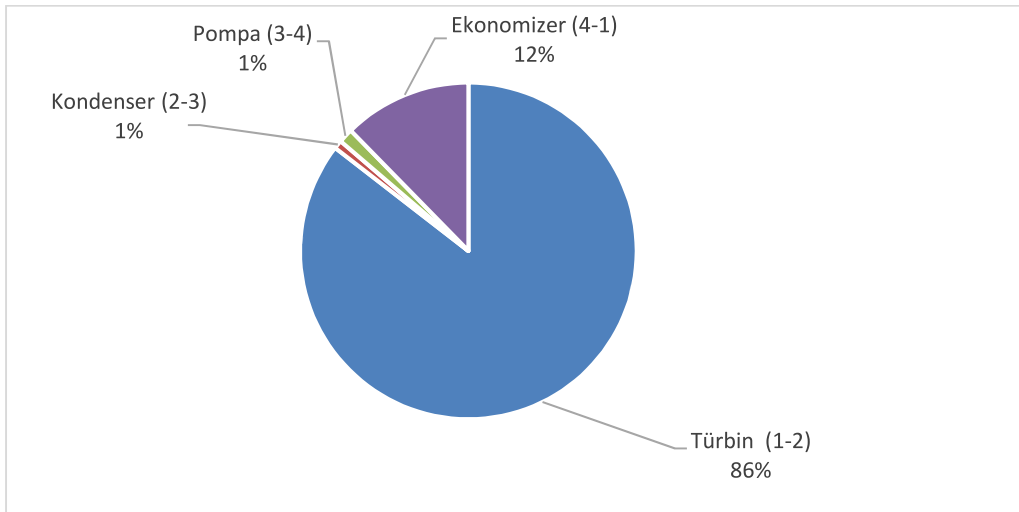
Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 sırası ile deniz suyundan hidrojen üretimi ve atık ısıdan elektrik üretimi çevrimlerindeki ekserji yıkımlarını karşılaştırmalı vermektedir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 ise sırası ile deniz suyundan hidrojen üretimi ve atık ısıdan elektrik üretimi çevrimlerindeki ekserji yıkımlarının yüzdelik dilimlerini vermektedir.



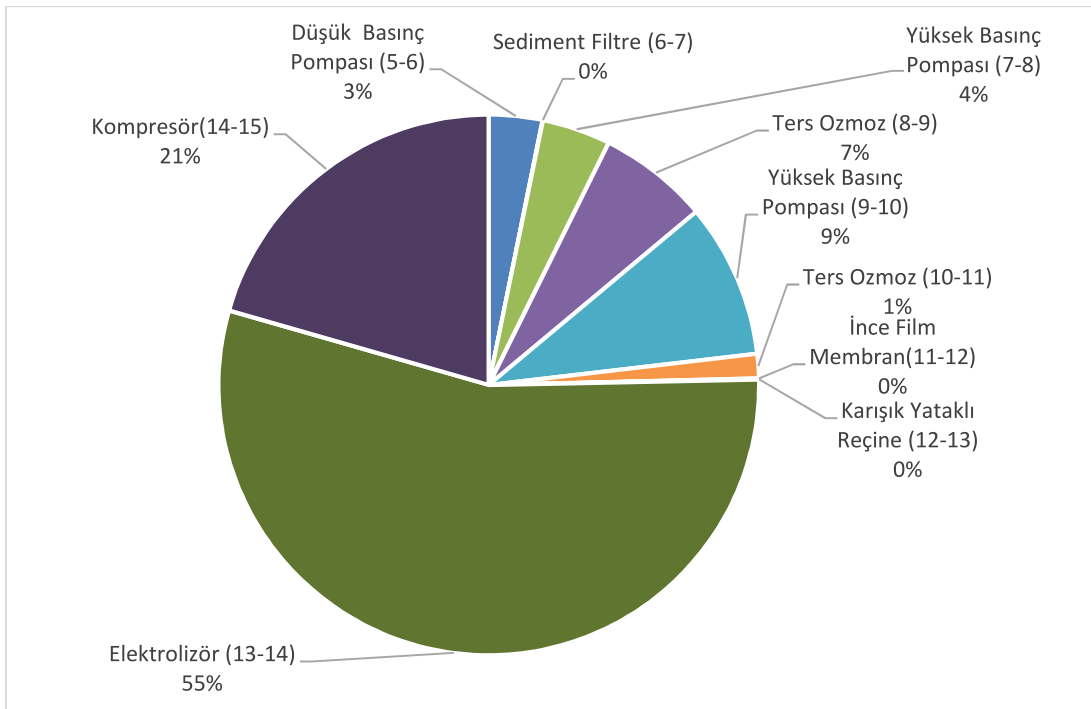
Şekil 4.9. Deniz suyundan hidrojen üretimi çevriminde karşılaştırmalı ekserji yıkım oranı



Şekil 4.10. RC çevriminde karşılaştırmalı ekserji yıkım oranı



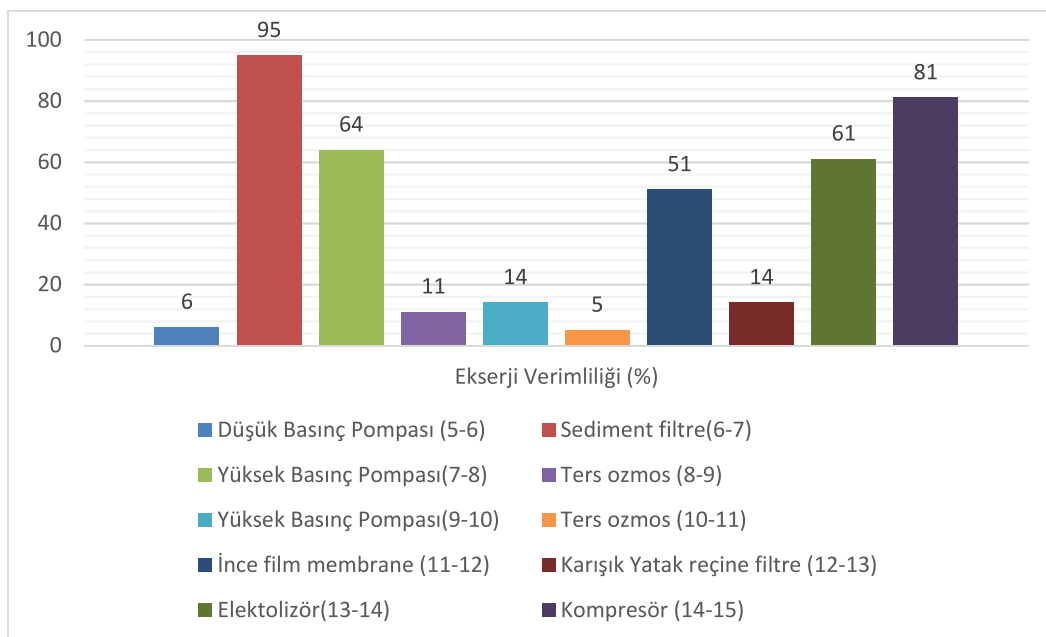
Şekil 4.11. RC çevriminde ekserji yıkım yüzdeleri



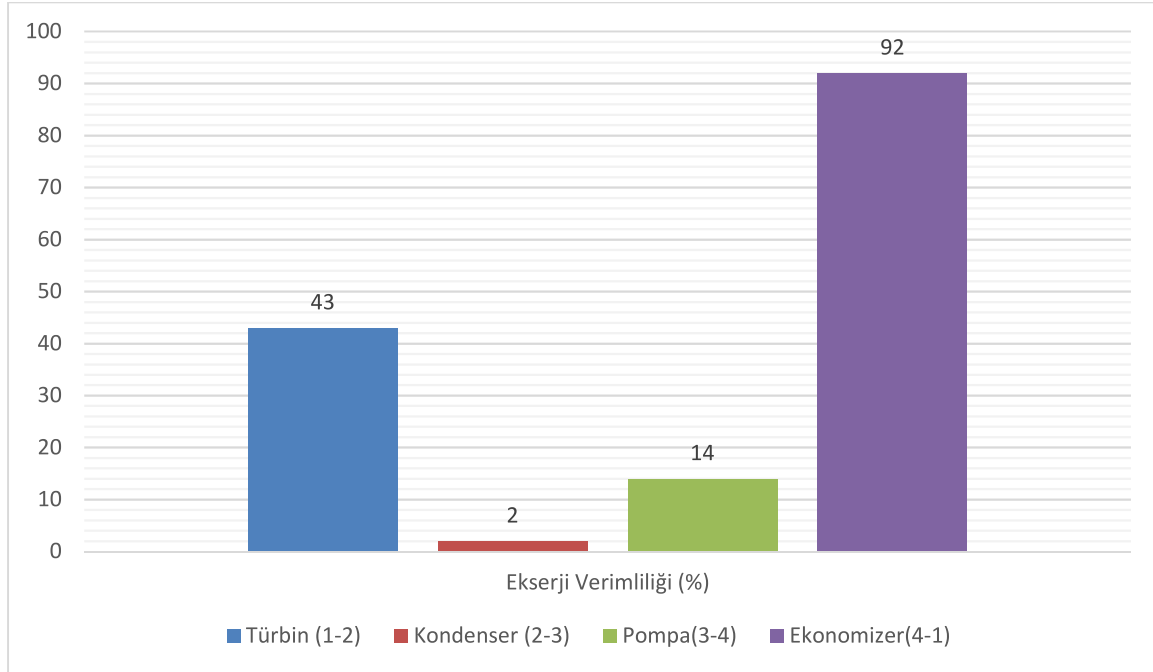
Şekil 4.12. Deniz suyundan hidrojen üretimi çevriminde ekserji yıkım yüzdeleri

Deniz suyundan hidrojen üretimi sistemi için bileşenlerin ekserji yıkımlarının yüzdelik oranları büyükten küçüğe olmak üzere şu şekilde sıralanmıştır: % 55 elektrolizör, % 21 kompresör, % 9 yüksek basınç pompası (9-10), % 7 ters ozmoz (8-9), % 4 yüksek basınç pompası (7-8), % 3 düşük basınç pompası, % 1 ters ozmoz (10-11)'dir. Sediment filtre, ince film mebran ve karışık yataklı reçinede ekserji yıkımı çok düşük olduğu için % 0 olarak hesaplanmıştır. RC çevrimi için ise ekserji yıkımlarının yüzdelik oranları büyükten küçüğe olmak üzere şu şekilde sıralanmıştır: % 86 türbin , % 12 ekonomizer , % 1 pompa, % 1 kondenser. Sistem performansını iyileştirmek için bileşenlerin tersinmezlikleri ve ekserji yıkımı azaltılmalıdır. Yani sistemin performansını arttırmak için elektrolizör, kompresör, türbin ve elektrolizör bileşenlerindeki tersinmezliklere ve ekserji yıkımını azaltacak çalışmalara odaklanmak en faydalı çalışma olacaktır.

Şekil 4.13 ve 4.14 ise ekserji verimliliklerini göstermektedir. Rankine çevriminde en yüksek ekserji verimliliğine sahip olan çevrim elemanları % 92 ile ekonomizer ve % 43 ile türbindir. Deniz suyundan hidrojen üretim sisteminde ise en yüksek ekserji verimliliğine sahip olan çevrim elemanları % 95 ile sediment filtre,% 81 ile kompresör ve % 64 ile yüksek basınç pompasıdır. En düşük ekserji verimliliğine sahip ilk 3 eleman ise % 5 ile ters ozmoz (10-11),% 6 ile düşük basınç pompası ve % 11 ile ters ozmozdur (8-9).Ekserji verimi bize işlemin ne derece iyi ve ideale yakın olduğunun incelenebilmesini sağlar.



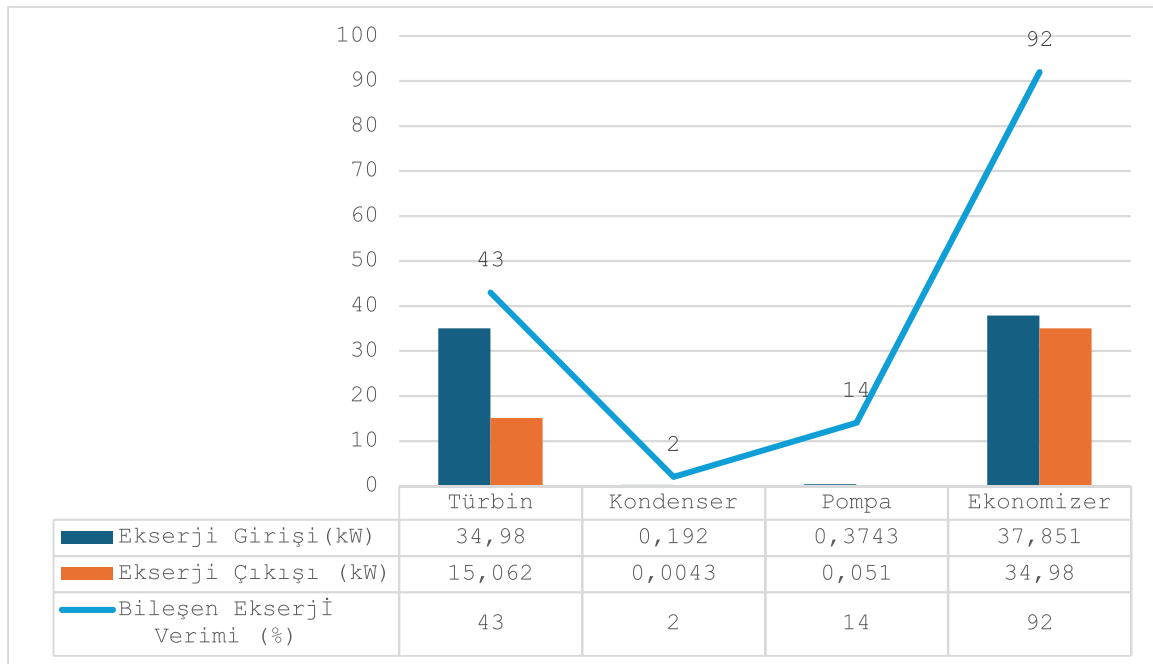
Şekil 4.13. Deniz suyundan hidrojen üretim çevrim elemanlarının ekserji verimlilikleri



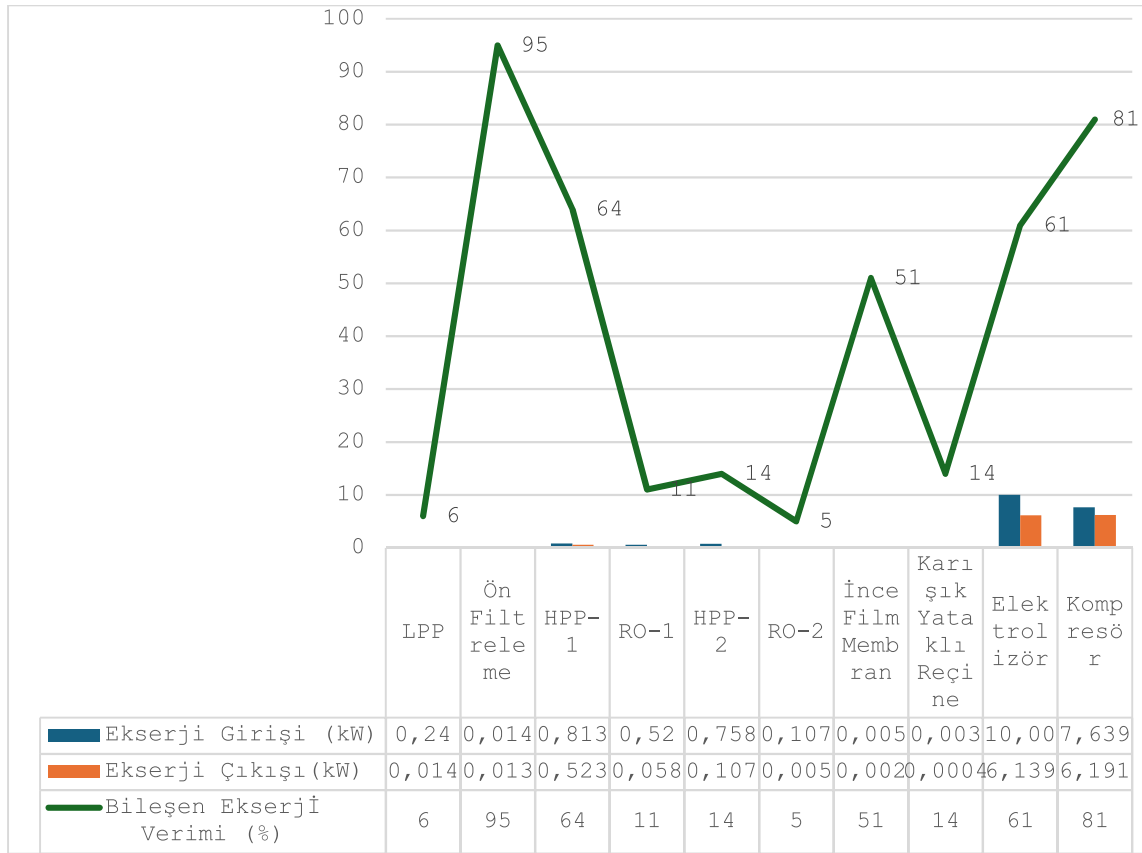
Şekil 4.14. RC çevrim elemanlarının ekserji verimlilikleri

Şekil 4.15 RC ve deniz suyundan hidrojen üretim sistemindeki bileşenlerindeki ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekipmanların ekserji verimini verilmektedir.

a)



b)



Şekil 4.15.a)RC çevrimi b) deniz suyu hidrojen üretim sistemi bileşenlerindeki ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekipmanların ekserji verimi

Şekil 4.15’de verilmekte olan sütunlar ekipmanlardaki ekserji akısını (giren ve çıkan ekserji) temsil ederken çizgi ise bileşenin ekserji verimini temsil etmektedir. Bu grafik incelendiğinde RC çevriminde maksimum ekserji girişi türbinde görülmektedir. Deniz suyundan hidrojen üretim sisteminde ise kompresörde görülmektedir. Maksimum ekserji çıkışı açısından değerlendirdiğimizde ise RC çevriminde dikkat çeken eleman ekonomizer iken, deniz suyundan hidrojen üretim sisteminde ise kompresör olarak görülmektedir. Ayrıca RC çevriminde minimum ve maksimum ekserji verimliliği sırası ile kondenser ve ekonomizerde görülürken, deniz suyundan hidrojen sisteminde ise sırasıyla RO-2 ve ön filtrelemede görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada atık ısıdan elde edilen elektriği kullanarak deniz suyundan hidrojen elde eden bir sistem tasarlanmıştır. Çalışma için 25 000 DWT (Deadweight tonaj) kapasiteli dökme yük gemisi kullanılmıştır.

Tasarlanan sistem ağırlığına göre değerlendirildiğinde en yüksek ağırlık % 63 ile deniz suyundan hidrojen üreten sistemdir. Bu sistemde daha detaya indiğimizde en ağır bileşenler sırasıyla % 40 ile elektrolizör ve % 39 ile hidrojen tankıdır. Rankine çevriminde ise en yüksek ağırlığa sahip bileşen % 62 ile elektrolizördür. Literatürde elektrolizör, hidrojen tankı ve ekonomizer ağırlığını azaltmaya yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalara ağırlık verilmesi, yeni teknolojiler geliştirilmesi tasarlanan sistemin ağırlığının düşmesine fayda sağlayacaktır. Çünkü sistem ağırlıklarının analizi, güç/ağırlık oranlarında ve verim hesaplamalarında çok önemli parametrelerdir. Özellikle büyük ağırlıkların olduğu bu tip uygulamalarda, ağırlığın olabildiğince minimize edilmesi gerekmektedir.

Tasarlanan sistem enerji analizi açısından 15 kW olarak üretilen güç, hidrojen üretim ünitesinde tüm elektrik ihtiyacına dağıtılmaktadır. Gerekli dağıtımlar yapıldığında 1,16 kW elektriğin fazlaca kaldığı belirlenmiştir. Bu elektrik, gemideki ihtiyaçların karşılanması için depolanacak veya kullanılabilir. Örneği gemide televizyon, buzdolabı, çamaşır makinesi gibi elektrikli aletlere güç sağlayabilecektir.

Sistemde tüketilen güçler değerlendirildiğinde rankine çevriminde en çok güç tüketen bileşen %74 ile pompa iken, deniz suyundan hidrojen üretim sisteminde ise % 75 ile elektrolizördür. Toplam sistem değerlendirildiğinde ise en çok güç tüketen bileşen % 72 ile diğer bileşenlere oldukça fark atan elektrolizördür. Seçilen elektrolizör 10 kW güç tüketerek 4,31 kg /24 h oranında hidrojen üretebilmektedir. Aynı güçte daha yüksek hidrojen üretimini sağlayacak çalışmalar bu tasarımda enerji anlamında büyük fayda sağlayacaktır.

Ekserji analizi açısından hidrojen üretim sisteminde en fazla ekserji yıkımı alan iki bileşen sırasıyla elektrolizör ve kompresördür. RC çevriminde en fazla ekserji yıkımını alan bileşenler ise türbin ve ekonomizerdir. Bu bileşenlerin ekserji verimliliğinin artırılmasına yönelik yapılacak çalışmalar sistemin verimliliğine büyük katkı sağlayacaktır.

Ekserji verimliliği açısında değerlendirdiğimizde ise hidrojen üretim sisteminde en yüksek ekserji verimliliğine sahip bileşenler sırasıyla % 95 ile sediment filtre ve % 81 ile kompresördür. Hidrojen üretim sisteminde en düşük ekserji verimliliğine sahip bileşenler sırasıyla % 5 ile ters ozmoz (10-11),% 6 ile düşük basınç pompası. RC çevriminde ise % 2 ile kondenser ve % 14 ile pompadır. Ekserji verimliliği sistemin ideale ne kadar yakın olduğunun göstergesidir. Sistemin performansını arttırmak için düşük ekserji verimliliğine sahip bileşenler üzerine durulmalıdır.

Yapılan hesaplamalara göre sistemin hidrojen üretim kapasitesi saatte 0,18 kg'dır. Örnekleme gerekirse; bir kargo gemisinin 4 günü seyir, 1 günü limanda konaklama olmak üzere toplam 30 günlük bir yolculuk yaptığı varsayımı toplamda yaklaşık 103 kg hidrojen üretebilecektir.

Sonuç olarak RC sistemi % 38 ekserji verimliliğine, deniz suyundan hidrojen üretim sistemi ise % 47 ekserji verimliliğine sahip olup, sistem uygun karakterlidir.

Bu çalışmanın devamı olarak; ekzergoekonomik analiz, yaşam döngüsü analizleri, ters ozmoz verimliliğinin artırılabilmesi için filtrasyon malzemelerinin geliştirilmesi, farklı elektrokatalistlerle çalışılarak elektrolizörlerin veriminin artırılması, sadece büyük yük taşıma gemileri değil; filika ve teknelerde de bu sistemlerin enerji analizlerinin yapılması, güneş enerjisi sistemleri ile hibritleştirilmesi gibi gelecek vaat eden çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Al-Enazi, A., Okonkwo, E. C., Bicer, Y., ve Al-Ansari, T. (2021). A Review of Cleaner Alternative Fuels for Maritime Transportation. *Energy Reports*, 7, 1962-1985.
2. Bassam, A. (2017). Use of Voyage Simulation to Investigate Hybrid Fuel Cell Systems for Marine Propulsion. University of Southampton.
3. UNCTAD.(2023). Review of Maritime Transport 2023. United Nations,Geneva.
4. UTİKAD.(2022).UTİKAD Lojistik Sektörü Raporu 2022.
5. Tran, T. A. (2020). Effect of Ship Loading on Marine Diesel Engine Fuel Consumption for Bulk Carriers Based on The Fuzzy Clustering Method. *Ocean Engineering*, 207, 107383.
6. Deng, S., ve Mi, Z. (2023). A Review on Carbon Emissions of Global Shipping. *Marine Development*, 1(1), 4.
7. Hakyemez, C., Tangüner, E., Yıldızca ve O.,Altan,U.(2023). Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu Güncellemesi.
8. Bianco, E., ve Blanco, H. (2020). Green Hydrogen: a Guide to Policy Making.
9. Anouti, Y. Elborai,S., Kombargi, Y. ve Hage, R.(2020). The Dawn of Green Hydrogen, Strategy
10. Gandolfi, A., Patel, A., Vigna, M. D., Pombeiro, M., ve Pidoux, M. (2020). Green Hydrogen-the Next Transformational Driver of the Utilities Industry. Goldman Sachs.
11. Energy Sector Management Assistance Program. (2020). Green Hydrogen in Developing Countries.
12. Goodwin, A. (2015). Hydrogen in The Maritime Sector , Norwegian School of Economics.
13. Raucci, C., Calleya, J., Suarez De La Fuente, S., ve Pawling, R. (2015). Hydrogen on Board Ship: a First Analysis of Key Parameters and Implications. University of Strathclyde.Sürer, M. G., ve Arat, H. T. (2018). State of Art of Hydrogen Usage as a Fuel on Aviation. *European Mechanical Science*, 2(1), 20-30.
14. Sürer, M. G., ve Arat, H. T. (2018). State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation. *European Mechanical Science*, 2(1), 20-30.
15. Burke, A., ve Gardnier, M. (2005). Hydrogen Storage Options: Technologies and Comparisons for Light-Duty Vehicle Applications.
16. Gong, A., ve Verstraete, D. (2017). Fuel Cell Propulsion in Small Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles: Current Status and Research Needs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 21311-21333.

17. Mendez, A., Leo, T. J. ve Herreros, M. A. (2014). Current State of Technology of Fuel cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles. *Energies*, 7(7), 4676-4693.
18. Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S. W., ve Lenaerts, S. (2021). Challenges in The Use of Hydrogen for Maritime Applications. *Energy & Environmental Science*, 14(2), 815-843.
19. İnternet: Hidrojen Depolama. URL: https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_depolama, Son Erişim Tarihi: 27.03.2024.
20. Colozza, A. J., ve Kohout, L. (2002). Hydrogen Storage for Aircraft Applications Overview. National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center.
21. Suárez De La Fuente, S. (2016). Reducing Shipping Carbon Emissions Under Real Operative Conditions: a Study of Alternative Marine Waste Heat Recovery Systems Based on The Organic Rankine Cycle, University College London.
22. Singh, D. V., ve Pedersen, E. (2016). A Review of Waste Heat Recovery Technologies for Maritime Applications. *Energy Conversion and Management*, 111, 315-328.
23. Vahvanen, J. (2020). Waste Heat to Electricity Recovery Techniques on Large Ships.
24. Akman, M. (2016). Bir Petrol Tankeri İçin Organik Rankine Çevrimi Atık Isı Geri Kazanım Sisteminin Termodinamik Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
25. Hilmyawan Yustiarza, F. (2023). Analysis of Waste Heat to Power Technologies in a Maritime Engine System, Universitat Politècnica de Catalunya.
26. Zhu, S., Zhang, K., ve Deng, K. (2020). A Review of Waste Heat Recovery From the Marine Engine with Highly Efficient Bottoming Power Cycles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109611.
27. Lion, S., Vlaskos, I., ve Tacani, R. (2020). A Review of Emissions Reduction Technologies for Low and Medium Speed Marine Diesel Engines and Their Potential for Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management*, 207, 112553.
28. Ma, Z., Yang, D., ve Guo, Q. (2012). Conceptual Design and Performance Analysis of an Exhaust Gas Waste Heat Recovery System for a 10 000 TEU Container Ship. *Polish Maritime Research*, 19(2), 31-38.
29. Konur, O., Pamık, M., ve Çolpan, C. Ö. (2017). Liman Sahasındaki Gemilerde Organik Rankin Çevriminin Yakıt Kazancı ve Egzoz Salımına Etkisi.
30. Akman, M. (2021). Gemilerde Organik Rankine Çevrimine Dayalı Atık Isı Geri Kazanım Sistemlerinin İleri Termal Analizleri ve Termo-Ekonomik Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi

31. Köse, Ö. (2022). Bir Gaz Türbininin Egzoz Gazı Isısı Kullanılarak Sistemin Genel Verimliliğini Artırmak İçin Yeni Nesil Atık Isı Geri Kazanımı ve Güç Sistemlerinin Tasarımı, Optimizasyonu ve Ekserji Analizi, İskenderun Teknik Üniversitesi
32. Türker, A.B.(2022). Organik Rankine Çevrimi Kullanılarak Transformatörde Atık Isının Geri Kazanımı, Gazi üniversitesi.
33. Küçük, E. Ö. (2022). Organik Rankine Çevriminin Termodinamik Analizi ve Termoekonomik Optimizasyonu, Bursa Uludağ Üniversitesi
34. Raab, F., Klein, H., ve Opferkuch, F. (2021). Steam Rankine Cycle Instead of Organic Rankine Cycle for Distributed High Temperature Waste Heat Recovery—Pros and Cons. In Proceedings of the 6th International Seminar on ORC Power Systems.
35. Boz, B. (2017). A Numerical Study of Waste Heat Recovery Potential of the Exhaust Gases from a Power Generation Diesel Engine, Izmir Institute of Technology.
36. Hazar, C. (2019). Gemi Dizel Ana Makinelerinde Atık Isı Geri Kazanım Yöntemlerinin Termodinamik Analizi,Dokuz Eylül Üniversitesi
37. Akman, M., ve Ergin, S. (2019). An Investigation of Marine Waste Heat Recovery System Based on Organic Rankine Cycle Under Various Engine Operating Conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 233(2), 586-601.
38. Liu, X., Nguyen, M. Q., Chu, J., Lan, T., ve He, M. (2020). A Novel Waste Heat Recovery System Combing Steam Rankine Cycle and Organic Rankine Cycle for Marine Engine. Journal of Cleaner Production, 265, 121502
39. Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., ve Khaled, M. (2022). A Recent Review on Waste Heat Recovery Methodologies and Applications: Comprehensive Review, Critical Analysis and Potential Recommendations. Cleaner Engineering and Technology, 6, 100387.
40. Men, Y., Liu, X., ve Zhang, T. (2021). A Review of Boiler Waste Heat Recovery Technologies in The Medium-Low Temperature Range. Energy, 237, 121560.
41. Varshil, P., ve Deshmukh, D. (2021). A Comprehensive Review of Waste Heat Recovery from a Diesel Engine Using Organic Rankine Cycle. Energy Reports, 7, 3951-3970.
42. Elsaid, K., Sayed, E. T., Yousef, B. A., Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., ve Olabi, A. A. (2020). Recent Progress on The Utilization of Waste Heat for Desalination: A Review. Energy Conversion and Management, 221, 113105.

43. Li, H., Liu, C., Xu, Z., Liu, J., Du, Z., Li, M., ve Pan, X. (2023). Performance Comparison of Thermal Power Generation-Organic Rankine Cycle Combined Cycle System for Ships Waste Heat Utilization Under Different Bottom Cycle Ratios. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(2), e13993.
44. Pesyridis, A., Asif, M. S., Mehranfar, S., Mahmoudzadeh Andwari, A., Gharehghani, A., ve Megaritis, T. (2023). Design of The Organic Rankine Cycle for High-Efficiency Diesel Engines in Marine Applications. *Energies*, 16(11), 4374.
45. Lebedevas, S., ve Čepaitis, T. (2024). Complex Use of the Main Marine Diesel Engine High-and Low-Temperature Waste Heat in the Organic Rankine Cycle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 521.
46. Radulovic, J. (2023). Organic Rankine Cycle: Effective Applications and Technological Advances. *Energies*, 16(5), 2329.
47. Wieland, C., Schiffechner, C., Dawo, F., ve Astolfi, M. (2023). The Organic Rankine Cycle Power Systems Market: Recent Developments and Future Perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 224, 119980.
48. Wieland, C., Schiffechner, C., Braimakis, K., Kaufmann, F., Dawo, F., Karellas, S., ... ve Markides, C. N. (2023). Innovations for Organic Rankine Cycle Power Systems: Current Trends and Future Perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120201.
49. Porto-Hernandez, L. A., Vargas, J. V. C., Munoz, M. N., Galeano-Cabral, J., Ordonez, J. C., Balmant, W., ve Mariano, A. B. (2023). Fundamental Optimization of Steam Rankine Cycle Power Plants. *Energy Conversion and Management*, 289, 117148.
50. d'Amore-Domenech, R., Santiago, Ó., ve Leo, T. J. (2020). Multicriteria Analysis of Seawater Electrolysis Technologies for Green Hydrogen Production at Sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110166.(38)
51. d'Amore-Domenech, R., ve Leo, T. J. (2019). Sustainable Hydrogen Production from Offshore Marine Renewable Farms: Techno-Energetic Insight on Seawater Electrolysis Technologies. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(9), 8006-8022.
52. Abdel-Aal, H. K., Zohdy, K. M., ve Kareem, M. A. (2010). Hydrogen Production Using Seawater Electrolysis. *The Open Fuel Cells Journal*, 3(1).
53. Gül, İ. Ç. (2002). Küçük Hidroelektrik Santraller Yardımıyla Deniz Suyundan Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Eldesi, Elde Edilen Hidrojenin Depolanması ve İletimi İle İlgili Maliyet Analizleri, Yıldız Teknik Üniversitesi

54. Khan, M. A., Al-Attas, T., Roy, S., Rahman, M. M., Ghaffour, N., Thangadurai, V., ... ve Kibria, M. G. (2021). Seawater Electrolysis for Hydrogen Production: a Solution Looking for a Problem?. *Energy & Environmental Science*, 14(9), 4831-4839.
55. İnternet.Yeşil Hidrojen Üretiminde Elektroliz Yöntemleri. URL: <https://yeserenerji.com/yesil-hidrojen-uretiminde-elektroliz-yontemleri/>, Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
56. Kumar, S. S., ve Lim, H. (2022). An Overview of Water Electrolysis Technologies for Green Hydrogen Production. *Energy Reports*, 8, 13793-13813.
57. Berry, Katie. (2021). Hydrogen Production from Seawater Electrolysis: Investigation of Potential Processes and Technologies, Strathclyde Üniversitesi
58. Yadav, A., Labhasetwar, P. K., ve Shahi, V. K. (2021). Membrane Distillation Using Low-Grade Energy for Desalination: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105818.
59. Mansour, T. M., Ismail, T. M., Ramzy, K., ve Abd El-Salam, M. (2020). Energy Recovery System in Small Reverse Osmosis Desalination Plant: Experimental and Theoretical Investigations. *Alexandria Engineering Journal*, 59(5), 3741-3753.
60. Le Roux, M. (2010). Investigation of Marine Components of Large Direct Seawater Intake & Brine Discharge Systems for Desalination Plants, Towards Development of a General Design Approach, Stellenbosch: University of Stellenbosch.
61. Kalogirou, S. A. (2005). Seawater Desalination Using Renewable Energy Sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(3), 242-281.
62. Maalouf, S. (2014). Planning and Design of Desalination Plants Effluent Systems, California Üniversitesi).
63. Gude, V. G. (2015). Energy Storage for Desalination Processes Powered by Renewable Energy and Waste Heat Sources. *Applied Energy*, 137, 877-898.
64. Kaya, C. (2014). A Comparative Study for Seawater Desalination by ED, NF and RO Membranes-Quality Analysis of Product Water. Ege Üniversitesi
65. Gude, V. G. (2022). Membrane Desalination of Ballast Water Using Thermoelectric Energy from Waste Heat. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 21(5), 249-256
66. Hausmann, J. N., Schlögl, R., Menezes, P. W., ve Driess, M. (2021). Is Direct Seawater Splitting Economically Meaningful?. *Energy & Environmental Science*, 14(7), 3679-3685.

67. Misdan, N., Lau, W. J., ve Ismail, A. F. (2012). Seawater Reverse Osmosis (SWRO) Desalination by Thin-Film Composite Membrane—Current Development, Challenges and Future Prospects. *Desalination*, 287, 228-237.
68. Başaran, Y. (2015). Türkiye’de Deniz Suyundan İçme Suyu Üretiminin Maliyet Değerlendirmesi. *Orman ve Su İşleri Bakanlığı*.
69. Akdemir, E. (2002). Deniz Suyundan Tatlı Su Üretiminin Teknik ve Ekonomik Etüdü, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 7, Sayı 1.
70. Kojima, H., Nagasawa, K., Todoroki, N., Ito, Y., Matsui, T., ve Nakajima, R. (2023). Influence of Renewable Energy Power Fluctuations on Water Electrolysis for Green Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), 4572-4593.
71. El-Shafie, M. (2023). Hydrogen Production by Water Electrolysis Technologies: a Review. *Results in Engineering*, 101426.
72. Zhao, H., ve Yuan, Z. Y. (2023). Progress and Perspectives for Solar-Driven Water Electrolysis to Produce Green Hydrogen. *Advanced Energy Materials*, 13(16), 2300254.
73. Hassan, N. S., Jalil, A. A., Rajendran, S., Khusnun, N. F., Bahari, M. B., Johari, A., ve Ismail, M. (2023). Recent Review and Evaluation of Green Hydrogen Production via Water Electrolysis for a Sustainable and Clean Energy Society. *International Journal of Hydrogen Energy*.
74. Hassan, Q., Sameen, A. Z., Salman, H. M., ve Jaszczur, M. (2023). Large-Scale Green Hydrogen Production via Alkaline Water Electrolysis Using Solar and Wind Energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(88), 34299-34315.
75. Akdağ, O. (2023). The Operation and Applicability to Hydrogen Fuel Technology of Green Hydrogen Production by Water Electrolysis Using Offshore Wind Power. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138863.
76. Akdağ, O. (2023). The Operation and Applicability to Hydrogen Fuel Technology of Green Hydrogen Production by Water Electrolysis Using Offshore Wind Power. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138863.
77. Sampangi, S. K., ve Lim, H. (2023). Recent Advances of Hydrogen Production Through Proton Exchange Membrane Water Electrolysis—A Review. *Sustainable Energy & Fuels*.
78. Niblett, D., Delpisheh, M., Ramakrishnan, S., ve Mamlouk, M. (2024). Review of Next Generation Hydrogen Production from Offshore Wind Using Water Electrolysis. *Journal of Power Sources*, 592, 233904.
79. Al-Douri, A., ve Groth, K. M. (2024). Hydrogen Production via Electrolysis: State-of-The-Art and Research Needs in Risk and Reliability Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 63, 775-785.
80. Yu, Z., ve Liu, L. (2023). Recent Advances in Hybrid Seawater Electrolysis for Hydrogen Production. *Advanced Materials*, 2308647.

81. Prosser, J. H., James, B. D., Murphy, B. M., Wendt, D. S., Casteel, M. J., Westover, T. L., ve Knighton, L. T. (2024). Cost Analysis of Hydrogen Production by High-Temperature Solid Oxide Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 207-227.
82. Tang, C., Yao, Y., Wang, N., Zhang, X., Zheng, F., Du, L., ve Ye, S. (2023). Green Hydrogen Production by Intermediate-Temperature Protonic Solid Oxide Electrolysis Cells: Advances, Challenges, and Perspectives. *InfoMat*, e12515.
83. Rustana, C. E., Muchtar, S. J., Sugihartono, I., Sasmitaningsihhiadayah, W., Madjid, A. D. R., ve Hananto, F. S. (2021, October). The Effect of Voltage and Electrode Types on Hydrogen Production from the Seawater Electrolysis Process. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2019, No. 1, p. 012096). IOP Publishing.
84. Liu, Z., Han, B., Lu, Z., Guan, W., Li, Y., Song, C., ve Singhal, S. C. (2021). Efficiency and Stability of Hydrogen Production from Seawater Using Solid Oxide Electrolysis Cells. *Applied Energy*, 300, 117439.
85. Jiang, S., Suo, H., Zhang, T., Liao, C., Wang, Y., Zhao, Q., ve Lai, W. (2022). Recent Advances in Seawater Electrolysis. *Catalysts*, 12(2), 123.
86. Dresch, S., Dionigi, F., Klingenhof, M., ve Strasser, P. (2019). Direct Electrolytic Splitting of Seawater: Opportunities and Challenges. *ACS Energy Letters*, 4(4), 933-942.
87. Wang, C., Shang, H., Jin, L., Xu, H., ve Du, Y. (2021). Advances in Hydrogen Production from Electrocatalytic Seawater Splitting. *Nanoscale*, 13(17), 7897-7912.
88. Bolar, S., Shit, S., Murmu, N. C., ve Kuila, T. (2021). Progress in Theoretical and Experimental Investigation on Seawater Electrolysis: Opportunities and Challenges. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(23), 5915-5945.
89. Guo, J., Zheng, Y., Hu, Z., Zheng, C., Mao, J., Du, K., . ve Ling, T. (2023). Direct Seawater Electrolysis by Adjusting the Local Reaction Environment of a Catalyst. *Nature Energy*, 8(3), 264-272.
90. Mishra, A., Park, H., El-Mellouhi, F., ve Han, D. S. (2024). Seawater Electrolysis for Hydrogen Production: Technological Advancements and Future Perspectives. *Fuel*, 361, 130636.
91. Gohil, P. P., Desai, H., Kumar, A., ve Kumar, R. (2023). Current Status and Advancement in Thermal and Membrane-Based Hybrid Seawater Desalination Technologies. *Water*, 15(12), 2274.
92. Lim, Y. J., Goh, K., Kurihara, M., ve Wang, R. (2021). Seawater Desalination by Reverse Osmosis: Current Development and Future Challenges in Membrane Fabrication—A Review. *Journal of Membrane Science*, 629, 119292.

93. Ayaz, M., Namazi, M. A., ud Din, M. A., Ershath, M. M., ve Mansour, A. (2022). Sustainable Seawater Desalination: Current Status, Environmental Implications and Future Expectations. *Desalination*, 540, 116022.
94. Aende, A., Gardy, J., ve Hassanpour, A. (2020). Seawater Desalination: A Review of Forward Osmosis Technique, Its Challenges, and Future Prospects. *Processes*, 8(8), 901.
95. Al-Obaidi, M. A., Zubo, R. H., Rashid, F. L., Dakkama, H. J., Abd-Alhameed, R., ve Mujtaba, I. M. (2022). Evaluation of Solar Energy Powered Seawater Desalination Processes: a Review. *Energies*, 15(18), 6562.
96. Shokri, A., ve Fard, M. S. (2022). Corrosion in Seawater Desalination Industry: A Critical Analysis of Impacts and Mitigation Strategies. *Chemosphere*, 307, 135640
97. Fayyaz, S., Masjedi, S. K., Kazemi, A., Khaki, E., Moeinaddini, M., ve Olsen, S. I. (2023). Life Cycle Assessment of Reverse Osmosis for High-Salinity Seawater Desalination Process: Potable and Industrial Water Production. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135299.
98. Nurjanah, I., Chang, T. T., You, S. J., Huang, C. Y., ve Sean, W. Y. (2024). Reverse Osmosis Integrated with Renewable Energy as Sustainable Technology: A Review. *Desalination*, 117590.
99. Zubair, M. M., Saleem, H., ve Zaidi, S. J. (2023). Recent Progress in Reverse Osmosis Modeling: An Overview. *Desalination*, 116705.
100. Harby, K., Emad, M., Benghanem, M., Abolibda, T. Z., Almohammadi, K., Aljabri, A., ve Elgendi, M. (2024). Reverse Osmosis Hybridization with Other Desalination Techniques: An Overview and Opportunities. *Desalination*, 117600.
101. Alrashidi, A., Aleisa, E., ve Alshayji, K. (2024). Life Cycle Assessment of Hybrid Electrodialysis and Reverse Osmosis Seawater Desalination Systems. *Desalination*, 578, 117448.
102. Park, K., Kim, J., Yang, D. R., ve Hong, S. (2020). Towards a Low-Energy Seawater Reverse Osmosis Desalination Plant: A Review and Theoretical Analysis for Future Directions. *Journal of Membrane Science*, 595, 117607.
103. Kurihara, M. (2020). Sustainable Seawater Reverse Osmosis Desalination as Green Desalination in the 21st Century. *Journal of Membrane Science and Research*, 6(1), 20-29.
104. Wang, Z., Zhang, Y., Wang, T., Zhang, B., ve Ma, H. (2021). Design and Energy Consumption Analysis of Small Reverse Osmosis Seawater Desalination Equipment. *Energies*, 14(8), 2275.
105. Im, S. J., Jeong, S., Jeong, S., ve Jang, A. (2020). Techno-Economic Evaluation of an Element-Scale Forward Osmosis-Reverse Osmosis Hybrid Process for Seawater Desalination. *Desalination*, 476, 114240.

106. Lai, X., Long, R., Liu, Z., ve Liu, W. (2021). Solar Energy Powered High-Recovery Reverse Osmosis for Synchronous Seawater Desalination and Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, 228, 113665.
107. Khan, M., Al-Absi, R. S., Khraisheh, M., ve Al-Ghouti, M. A. (2021). A Better Understanding of Seawater Reverse Osmosis Brine: Characterizations, Uses, and Energy Requirements. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100165.
108. Okampo, E. J., ve Nwulu, N. (2021). Optimisation of Renewable Energy Powered Reverse Osmosis Desalination Systems: A State-of-the-Art Eeview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110712.
109. Shalaby, S. M., Sharshir, S. W., Kabeel, A. E., Kandeal, A. W., Abosheishah, H. F., Abdelgaied, M., ... ve Yang, N. (2022). Reverse Osmosis Desalination Systems Powered by Solar Energy: Preheating Techniques and Brine Disposal Challenges—A Detailed Review. *Energy Conversion and Management*, 251, 114971.
110. Assenai, T., ve Hendey Bröte, O. (2020). Energy Sail Ships. KTH School of Industrial Engineering and Management.
111. Bacquart, T., Moore, N., Wilmot, R., Bartlett, S., Morris, A. S. O., Olden, J., ve Mattelaer, V. (2021). Hydrogen for Maritime Application—Quality of Hydrogen Generated Onboard Ship by Electrolysis of Purified Seawater. *Processes*, 9(7), 1252.
112. Toyota Europe Newsroom. Toyota Develops Specially Designed Fuel Cell System for Energy Observer's 2020 Tour. Available Online: <https://newsroom.toyota.eu/toyota-develops-specially-designed-fuel-cell-system-for-energy-observers-2020-tour/> [Son Erişim Tarihi. 27.03.2024]
113. Hussein, A., ve Kandil, H. (2020). Seawater Desalination Using Waste Heat Recovery on Passenger Ship. *Port-Said Engineering Research Journal*, 24(1), 82-101.
114. Díaz-Secades, L. A., González, R., ve Rivera, N. (2023). Waste Heat Recovery from Marine Engines and Their Limiting Factors: Bibliometric Analysis and Further Systematic Review. *Cleaner Energy Systems*, 100083.
115. Shu, G., Liang, Y., Wei, H., Tian, H., Zhao, J., ve Liu, L. (2013). A Review of Waste Heat Recovery on Two-Stroke IC Engine Aboard Ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 385-401
116. Wang, F., Wang, L., Zhang, H., Xia, L., Miao, H., ve Yuan, J. (2021). Design and Optimization of Hydrogen Production by Solid Oxide Electrolyzer with Marine Engine Waste Heat Recovery and ORC Cycle. *Energy Conversion and Management*, 229, 113775.
117. Andreasen, J. G., Meroni, A., ve Haglind, F. (2017). A Comparison of Organic and Steam Rankine Cycle Power Systems for Waste Heat Recovery on Large Ships. *Energies*, 10(4), 547.

118. Gude, V. G. (2022). Membrane Desalination of Ballast Water Using Thermoelectric Energy from Waste Heat. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 21(5), 249-256
119. Internet: Medevoort J., Kuipers N., Hoopen P. (2022), Sea2H2 - Hydrogen from Seawater, Wageningen University&Research. URL: <https://www.wur.nl/en/project/hydrogen-from-seawater.htm> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
120. Ishaq, H., Dincer, I., ve Naterer, G. F. (2018). New Trigenation System Integrated with Desalination and Industrial Waste Heat Recovery for Hydrogen Production. *Applied Thermal Engineering*, 142, 767-778.
121. Maheswari, K. S., Murugavel, K. K., ve Esakkimuthu, G. (2015). Thermal Desalination Using Diesel Engine Exhaust Waste Heat—an Experimental Analysis. *Desalination*, 358, 94-100.
122. Internet : 25000 DWT Double Hull Bulk Carrier. URL: http://www.cicekshipyard.com/pdf/25000%20DWT%20DOUBLE%20HULL%20BULK%20CARRIER_BRIEF_SPEC.pdf , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
123. Internet : MAN 51/60DF Project Guide – Marine Four-Stroke Dual Fuel Engine Compliant with IMO Tier II/IMO Tier III. URL: https://www.academia.edu/40197048/S35MC_C , Son Erişim Tarihi: 14.12.2023
124. Kocher, J., Dvorak, B. I., ve Skipton, S. (2003). Drinking Water Treatment: Sediment Filtration. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln.
125. Yurtsever, A., Deniz, U. Ç. A. R., ve şahinkaya, E. (2019). Biyolojik Olarak Arıtılmış Tekstil Endüstrisi Atıksularının Laboratuvar Ölçekli Çapraz Akış Sisteminde Ters Osmoz Membranları Kullanılarak Geri Kazanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 735-750.
126. Portakal Akçin, O. Y. T. U. N., Küçük, S., Yücel, D., Zengin, O., Topçuoğlu, C., Kösem, A., ve Kosova, S. (2019). Klinik Laboratuvarlar İçin Saflaştırılmış Suyun Hazırlanması, Dağıtımı ve Test Edilmesi Kılavuzu.
127. Internet: Exhaust Gas Heat Exchangers .URL: https://www.valutechinc.com/wp-content/uploads/2015/11/ExhaustGasBrochure_Issue_K.pdf ,Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
128. Internet : Alva Naval Economizer, URL: <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/boilers/exhaust-gas-economizer/aalborg-av-6n/> ,Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
129. Internet :Green Turbine, URL: <https://www.gonextgrid.com/wp-content/uploads/2015/10/15-KW-Green-Turbine-Brochure.pdf> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024

130. Internet : Bora Air Cooler Condenser, URL: https://www.kaltra.com/wp-content/uploads/2020/01/SB_Bora-Condensers_Ver.1.2_EN.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
131. Internet : GRUNDFOS CMB3-37PT 0.5HP 10BAR Water Booster Pump 0.50KW, URL:https://www.machinerytools.com.my/index.php?ws=showproducts&products_id=3884598 , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
132. Internet: Endüstriyel Ev Hidrojen Jeneratörü 10 kW, URL: https://tr.aliexpress.com/item/1005006185166941.html?src=google&aff_fcid=cd093d86e665445594808a632cda55c9-1700399184892-08669-UneMJZVf&aff_fsk=UneMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff_trace_key=cd093d86e665445594808a632cda55c9-1700399184892-08669-UneMJZVf&terminal_id=06a3650ea98a4c1b87cd7924197b3e72&afSmartRedirect=y, Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
133. Internet : PEM Electrolyser. URL: <https://nelhydrogen.com/product/h-series/> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
134. Internet: Driven Hydrogen Boosters. URL: <https://hiigroupasia.com/electric-driven-hydrogen-boosters/> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
135. Internet: Booster Pump (GBP). URL: <https://www.spectronik.com/uploads/topics/16993534228076.pdf> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
136. Internet : Luxfer Gas Cylinder. URL: <https://luxfercylinders.com/specifications/>, Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
137. Internet : Su Tankı. URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/plastic-coolant-tank-22084330133.html> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
138. Internet : Mixed Bed DI Resin Filter, URL: <https://www.amazon.com/Filter-Changing-Resin-Filter-Aquariums/dp/B07TW7N38K> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
139. Internet : DOW Filmtec TW30-2026 RO Membrane 220 GPD. URL:<https://www.filterwater.com/p-599-dow-filmtec-tw30-2026-ro-membrane-220-gpd.aspx> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
140. Internet : Filmtec Membranes TW30-2026, URL: <https://www.lenntech.com/products/Filmtec-Membranes/80635/TW30-2026/index.html> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
141. Internet : FilmTec™ Membranes. URL: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-FilmTec-SW30-Seawater-PDS-45-D01519-en.pdf> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
142. Internet : Filmtec SW30-4040 seawater desalination membrane. URL: <https://www.amazon.com/Filmtec-SW30-4040-seawater-desalination-membrane/dp/B007KDYX5S> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024

143. Internet : ClearPlus WH1B+ 5 Micron Whole House Sediment Filter Package. URL: <https://www.home-water-purifiers-and-filters.com/WH1B-sediment-water-filter.php#parentHorizontalTab3> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
144. Internet : Alpha 1.4.80.D19. URL: <https://www.mixtron.it/wp-content/uploads/2022/03/Alpha-1.4.80.D19.pdf> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
145. Internet : Engine Starter, 12v 0.8 kW Water Pump/Diesel/Inmotor Starter Electric Motor Reverse Rotation. URL: <https://www.amazon.com.tr/starter%EF%BC%8C12v-inmotor-starter-electric-rotation/dp/B091FCNRN8> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
146. Internet : MARCH Pump, 3.5-5.0 GPM RO Feed (30 GPM Max), 115/230 Volt. URL: <https://www.boundlessoutfitters.com/product/march-pump-3-5-5-0-gpm-ro-feed-115-230-volt/> , Son Erişim Tarihi: 27.03.2024
147. Fellaou, S., Ruiz-Garcia, A., ve Gourich, B. (2021). Enhanced Exergy Analysis of a Full-Scale Brackish Water Reverse Osmosis Desalination Plant. Desalination, 506, 114999.
148. Sharqawy, M. H., ve Zubair, S. M. (2011). Second Law Analysis of Reverse Osmosis Desalination Plants: An Alternative Design Using Pressure Retarded Osmosis. Energy, 36(11), 6617-6626.
149. Atab, M. S., Smallbone, A., ve Roskilly, A. P. (2019). Exergy Analysis of Reverse Osmosis for Potable Water and Land Irrigation. International Journal of Chemical and Molecular Engineering, 13(3), 118-122.
150. Evrin, R. A., & Dincer, I. (2019). Thermodynamic Analysis and Assessment of An Integrated Hydrogen Fuel Cell System for Ships. International Journal of Hydrogen Energy, 44(13), 6919-6928.
151. Internet: Tüketim Hesaplama, URL: <https://www.ckbogazici.com.tr/tr/tuketim-hesaplama> , Son Erişim Tarihi: 26.03.2024
152. Feili, M., Ghaebi, H., Parikhani, T., ve Rostamzadeh, H. (2020). Exergoeconomic Analysis and Optimization of a New Combined Power and Freshwater System Driven by Waste Heat of a Marine Diesel Engine. Thermal Science and Engineering Progress, 18, 100513.
153. Yağlı, H. (2018). Basit ve Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi (ORC) Tasarımları Kullanılarak Biyogaz Yakıtlı Isı-Güç Kombine (CHP) Motorunun Atık Isısının Geri Dönüştürülebilirliği, Enerji ve Ekserji analizi. İskenderun Teknik Üniversitesi

DİZİN

A

Abstract · v
Akışkan ·
8,9,10,11,12,13,15,33,48
Atık Isı ·
iv,7,8,9,12,13,15,16,28,29,31,
32,33,34,35,36,37,39,40,42,43
,55,57,62,63,68
Ağırlık
·2,6,25,27,43,44,45,46,53,54,5
5,68

B

Basınç ·
iv,6,9,11,14,24,25,27,33,35,39
40,41,42,44,45,50,56,58,60,61
,62,65,69
Besleme Suyu · 9,17,24,26

C

CO₂ · iv,v,3,4,5,31

Ç

Çıkış sıcaklığı · 16

D

Deniz suyu · 16,17,19,22,23,
,25,26,27,28,29,30,34,36,37,4
0,41,42,43,48,49,50,51,53,54,
56,58,60,63,64,65,66,67,68,69
Depolama · 4,5,6,7,44,53

E

Elektroliz
4,5,7,16,17,18,19,20,21,26,28,
29,30,33,35,40
Enerji ·
1,3,4,5,6,7,8,11,16,26,28,29,3
0,31,32,33,35,36,37,39,40,46,
47,48,51,53,55,56,68,69
Ekserji ·
10,29,35,37,46,47,48,50,52,53
,55,57,58,59,60,61,62,63,64,6
5,66,67,68,69
Egzoz gazı ·
7,10,16,29,32,35,38,39,48
Entalpi · 14,48,49,50,51
Entropi · 48,49,50,51

Ekserji Yıkımı ·
57,58,59,62,63,64,65,68
Ekonomizer · 39,42,43,53,54,57,6
3,65,67,68

F

Fosil yakıt · 2,3,4,5
Filtre · 24,25,28,40,41,42,44,45,53
,58,62,63,65,67,69

G

Gemi ·
2,6,7,8,13,15,16,28,29,30,31,3
2,33,34,37,38,39,55,68,69
Güç · 7,9,12,13,19,30,32,33,39,40,
43,45,46,48,54,55,56,68

H

Hidrojen ·
3,4,5,6,7,16,17,18,19,21,26,28
,29,30,32,33,34,35,36,37,40,4
1,42,43,44,52,53,54,56,58,60,
63,64,65,67,68,69
Hidrojen üretimi ·
3,4,5,7,16,28,29,32,33,34,35,3
7 40,42,43,54,56,63,64,65,68

İ

İçindekiler · vii

K

Kalina Çevrimi · 8,12,13
Kızgın Buhar · 9,40,43
Kondenser · 9,12,35,39,42,43,53,5
5,57,63,65,67,69
Kompresör · 16,41,42,43,53,55,56,
59,63,65,67,68

M

Membran
· 18,19,22,23,24,25,34,40,41,4
2,44,53,59,63

O

Organik rankine · 10,11,14,15

Ö

Özet · iv

P

PEME · 18,20,21,22,28,30,41
Pompa · 6,8,9,11,12,24,35,39,40,4
1,42,43,45,48,53,55,56,57,58,
62,63,65,68,69

R

Rankine ·
8,9,10,11,14,15,28,31,32,35,3
9,42,53,65,68

S

su buharı · 14,22
saf su · 27,34,35,41,48,50,51,60

T

Ters ozmoz ·
22,23,24,25,26,28,34,35,40,41
,42,58,65,69
Tuzdan arındırma ·
22,23,24,26,31,32,35,41,60
Tuzluluk · 27,49,61,62
Türbin · 8,9,10,12,14,30,32,33,39,
40,42,43,53,57,63,65,67

Y

yenilenebilir enerji · 3,4,5,30



TEKNOVERSİTE



teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

