

**ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE HİDROJEN AMONYAK VE
BİYOGAZ ÜRETİMİ İÇİN AKILLI ŞEBEKELERİN VE
YENİLENEBİLİR HİBRİT SİSTEMLERİN DÖNGÜSEL
KARBON EKONOMİSİNE ENTEGRASYONU**

ELİFNUR BAYRAKTAR GÜNEŞ

MAYIS 2025

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE HİDROJEN AMONYAK VE
BİYOGAZ ÜRETİMİ İÇİN AKILLI ŞEBEKELERİN VE
YENİLENEBİLİR HİBRİT SİSTEMLERİN DÖNGÜSEL
KARBON EKONOMİSİNE ENTEGRASYONU**

ELİFNUR BAYRAKTAR GÜNEŞ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV
YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

MAYIS 2025

DİYARBAKIR

**ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE HİDROJEN AMONYAK VE BİYOGAZ
ÜRETİMİ İÇİN AKILLI ŞEBEKELERİN VE YENİLENEBİLİR HİBRİT
SİSTEMLERİN DÖNGÜSEL KARBON EKONOMİSİNE ENTEGRASYONU**

Elifnur BAYRAKTAR GÜNEŞ tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Doç. Dr. Heybet KILIÇ
Danışman, **Elektrik ve Enerji Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU (*)
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Heybet KILIÇ (**)
Elektrik ve Enerji Bölümü, Dicle Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Emin ASKER
Elektrik ve Enerji Bölümü, Dicle Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 27 / 05 / 2025

(*) Jüri Başkanı.

(**) Tez Danışmanı.

Anneme, babama, kardeşlerime ve eşime...

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Elifnur BAYRAKTAR GÜNEŞ

İmza:

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında kıymetli bilgi ve rehberliğiyle bana yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Heybet KILIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tezin fikir aşamasından itibaren modelleme, analiz ve yorumlama süreçlerinde sunduğu bilimsel katkıları, yapıcı eleştirileri ve yol gösterici önerileri; çalışmamın akademik anlamda daha sağlam bir temele oturmasını sağlamıştır. Kendisi, araştırmamın her aşamasında yol gösterici bir rol üstlenerek çalışmamın bilimsel değerini artırmıştır.

Tez savunma sürecinde, uzmanlıklarıyla çalışmama akademik derinlik kazandıran, yönlendirici geri bildirimleriyle araştırmamın gelişimine önemli katkılar sağlayan jüri üyelerime en içten teşekkürlerimi sunarım. Sunum sırasında yönelttikleri sorular ve paylaştıkları yapıcı eleştiriler, tezimin daha geniş bir perspektiften ele alınmasını sağlamış; önerileri ise çalışmanın kapsamını daha da zenginleştirerek bilimsel niteliğini artırmıştır. Jüri üyelerimin bilgi ve deneyimlerinden faydalanmak, tez sürecimi daha verimli ve anlamlı kılmıştır.

Ayrıca tezimin teknik analiz aşamalarında desteklerini esirgemeyen, sistem modelleme ve teknik optimizasyon süreçlerinde büyük katkılar sunan Elektrik Elektronik Yüksek Mühendisi Hüsnügül TEKİN'e teşekkür ederim. Kendisinin bilgi birikimi ve rehberliği, çalışmamın doğru bir çerçevede ilerlemesini sağlamıştır.

Tezimin veri toplama sürecinde büyük katkılar sağlayan Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.'ye özellikle teşekkür ederim. Çalışmamın temelini oluşturan verilerin temin edilmesi ve doğrulanması sürecinde sundukları destek, araştırmamın sağlıklı ve güvenilir verilere dayanmasını sağlamıştır. Kurumun sağladığı katkılar, enerji modellemesi ve sistem analizi açısından önemli bir yer tutmaktadır.

Son olarak; yüksek lisans sürecim boyunca her zaman yanımda olan, koşulsuz sevgileri, teşvik edici tutumları ve sonsuz destekleriyle bana güç veren aileme en derin teşekkürlerimi sunarım. Varlıklarıyla bana ilham veren, her zaman motive olmamı sağlayan ailemin manevi desteği, bu süreci daha anlamlı ve verimli hale getirmiştir. Onların sevgisi ve inancı, bu çalışmanın en sağlam dayanaklarından biri olmuştur.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemi Kavramı.....	5
1.1.1 Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin bileşenleri.....	7
1.1.2 HOMER Pro yazılımı ile HRES sistemlerinin optimizasyonu	40
1.1.3 Döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımı	41
1.2 Motivasyon	45
1.3 Tezin Katkıları.....	46
1.4 Tezin Yapısı	48
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	51
3. MALZEME VE YÖNTEM	60
3.1 Sistem Modelleme Yaklaşımı	60
3.2 Veri Toplama Parametreleri	61
3.2.1 Yük profili verileri	61
3.2.2 Meteorolojik veriler	63
3.3 Kullanılan Yazılım ve Simülasyon Ortamı	63
3.4 Sistem Bileşenleri.....	64
3.4.1 Güneş enerjisi üretimi	64
3.4.2 Biyogaz jeneratörü	66
3.4.3 Elektrolizör.....	67

3.4.4	Hidrojen depolama	69
3.4.5	Amonyak üretim ve NH ₃ cracker modülü.....	70
3.4.6	Konvertör ve enerji dönüşüm bileşenleri	72
3.4.7	Şebeke entegrasyonu	74
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	75
4.1	Sistem Optimizasyon Sonuçları	75
4.1.1	Biyogaz jeneratörü	76
4.1.2	Elektrolizör.....	77
4.1.3	Hidrojen depolama	79
4.1.4	Amonyak üretim ve depolama ünitesi.....	81
4.1.5	NH ₃ cracker (amonyak dönüşüm modülü).....	83
4.1.6	Şebeke entegrasyonu ve enerji alışverişi analizi.....	85
4.1.7	Inverter	87
4.2	Ekonomik ve Teknik Değerlendirme	89
4.3	Enerji Yönetimi Performansı.....	91
4.4	Çevresel Katkılar ve Karbon Döngüsü.....	94
4.5	Senaryo Bazlı Performans Analizi	96
4.5.1	Senaryo tanımları ve çalışma prensipleri	97
4.5.2	Teknik performans karşılaştırması.....	98
4.5.3	Ekonomik performans karşılaştırması.....	101
4.5.4	Çevresel performans karşılaştırması	103
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	106
5.1	Sonuçlar.....	106
5.2	Öneriler.....	108
5.2.1	Teknik geliştirme önerileri.....	108
5.2.2	Çevresel ve sektörel politika önerileri.....	109
5.2.3	Akademik ve bilimsel gelişim önerileri	109

KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	120



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Fotovoltaik sistemlerde enerji dönüşüm süreci.....	8
Şekil 1.2 Biyogaz üretim sürecinin aşamaları.....	13
Şekil 1.3 Alkali su elektrolizör hücresinin şematik gösterimi	19
Şekil 1.4 PEM elektrolizörünün temel çalışma prensibi.....	20
Şekil 1.5 SOEC elektrolizörünün çalışma prensibi.....	22
Şekil 1.6 Haber-Bosch sürecinin sistem şeması.....	27
Şekil 1.7 Döngüsel karbon ekonomisinin şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.1 HOMER Pro ortamında oluşturulan hibrit enerji sistemi konfigürasyonu .	61
Şekil 3.2 HOMER Pro'da tanımlanan elektrik yük profili	62
Şekil 3.3 Diyarbakır ili için aylık ortalama GHI.....	63
Şekil 3.4 HRES bileşenlerinin HOMER Pro üzerinde gösterimi.....	64
Şekil 3.5 HOMER Pro'da tanımlanan aylık ort. biyokütle verileri	66
Şekil 3.6 HOMER Pro'da tanımlanan hidrojen yükü.....	68
Şekil 3.7 HOMER Pro'da tanımlanan aylık ort. amonyak güç üretimi.....	72
Şekil 4.1 Simüle edilen HRES bileşen mimarisi.....	75
Şekil 4.2 Biyogaz jeneratörünün güç üretim profili.....	77
Şekil 4.3 Elektrolizörün yıllık enerji giriş profili.....	78
Şekil 4.4 Hidrojen tankı seviyesinin zaman bazlı değişimi	80
Şekil 4.5 Amonyak üretim ünitesinin yıl boyu güç çıkış profili	81
Şekil 4.6 NH ₃ Cracker modülünün yıl boyu güç çıkışı	83
Şekil 4.7 HOMER Pro'da şebekeden enerji satın alma ve satış dağılım grafikleri ...	86
Şekil 4.8 Inverter biriminin yıl boyunca ürettiği güç değerleri.....	88
Şekil 4.9 HOMER Pro genel maliyet paneli	90
Şekil 4.10 Yıllık nakit akış grafiği	91
Şekil 4.11 HOMER Pro çıktısına göre aylık elektrik üretimi	92
Şekil 4.12 HOMER Pro çıktısına göre sistemin şebeke ile aylık enerji alışverişi	93
Şekil 4.13 Şebekeden enerji satın alma yoğunluk haritası	93
Şekil 4.14 Şebekeye enerji satış yoğunluk haritası	94
Şekil 4.15 HOMER Pro ortamında hesaplanan yıllık emisyon değerleri	95
Şekil 4.16 Senaryolara göre NPC ve LCOE grafiği.....	101
Şekil 4.17 Senaryoların yıllık emisyon değerleri.....	103

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 PV sistemine ait teknik ve ekonomik girdiler.....	65
Tablo 3.2 HOMER Pro'da tanımlanan biyogaz jeneratör bileşeni parametreleri.....	67
Tablo 3.3 HOMER Pro'da tanımlanan elektrolizör bileşeni parametreleri	68
Tablo 3.4 HOMER Pro'da tanımlanan hidrojen tank bileşeni parametreleri	69
Tablo 3.5 HOMER Pro'da tanımlanan amonyak üretim modül parametreleri	72
Tablo 4.1 Aylık enerji alışverişi ve net enerji dengesi.....	85
Tablo 4.2 Inverter ünitesi performans parametreleri.....	87
Tablo 4.3 Üç senaryonun teknik performans göstergelerinin karşılaştırılması.....	98

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
CO ₂	Karbondioksit Gazı
CH ₄	Metan Gazı
a-Si	Amorf Silikon
CdTe	Kadmiyum Tellür
V	Gerilim
P	Güç
I	Akım
C	Karbon Elementi
H	Hidrojen Elementi
O	Oksijen Elementi
MJ	Megajoule
kg	Kilogram
H ₂	Hidrojen Gazı
H ₂ S	Hidrojen Sülfür
N ₂	Azot Gazı
H ₂ O(g)	Su Buharı
O ₂	Oksijen Gazı
H ₂ O	Su
OH ⁻	Hidroksit İyonları
H ⁺	Hidrojen İyonları
O ²⁻	Oksit İyonları
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-saat
%	Yüzde
η	Verimlilik
NH ₃	Amonyak

Kısaltma**Açıklama**

HRES	Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri
LCOE	Seviyeledirilmiş Enerji Maliyeti
PV	Güneş Paneli
HOMER Pro	Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources Professional
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
MPPT	Maksimum Güç Noktası Takibi
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenid
MPP	Maksimum Güç Noktası
SEPIC	Tek Uçlu Birincil Endüktör Dönüştürücü
OLR	Organik Yükleme Oranı
HRT	Hidrolik Bekleme Süresi
PEM	Proton Değişim Membranı
SOFC	Katı Oksit Yakıt Hücreleri
SCADA	Merkezi Denetim ve Veri Toplama Sistemi
SOEC	Katı Oksit Elektrolizör Hücresi
PCM	Faz Değişimli Malzemeler
NPC	Net Bugünkü Maliyet
BESS	Batarya Enerji Depolama Sistemi
GHI	Küresel Yatay Işınım
NASA SSE	NASA Yüzey Meteorolojisi ve Güneş Enerjisi Veritabanı

ÖZET

ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE HİDROJEN AMONYAK VE BİYOGAZ ÜRETİMİ İÇİN AKILLI ŞEBEKELERİN VE YENİLENEBİLİR HİBRİT SİSTEMLERİN DÖNGÜSEL KARBON EKONOMİSİNE ENTEGRASYONU

BAYRAKTAR GÜNEŞ, Elifnur

Yüksek Lisans, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Bölümü

Danışman: Doç. Dr. Heybet KILIÇ

Mayıs 2025, 135 sayfa

Bu tez çalışmasında; Diyarbakır'da yer alan bir atık su arıtma tesisinin enerji pozitif bir yapıya dönüştürülmesine yönelik olarak hibrit bir enerji sisteminin teknik, ekonomik ve çevresel açılardan uygulanabilirliği kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, tesisin enerji ihtiyacını karşılamının ötesinde, aynı zamanda yeşil hidrojen ve yeşil amonyak gibi temiz enerji taşıyıcılarının üretimini gerçekleştiren çok bileşenli bir sistem modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda; biyogaz jeneratörü, elektrolizör, hidrojen tankı, amonyak üretim ünitesi, NH_3 cracker ve enerji dönüştürücü sistemler bir araya getirilmiş; modelleme ve optimizasyon işlemleri HOMER Pro yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Başlangıç aşamasında sistem tasarımına fotovoltaik modüller dahil edilmiş olmasına rağmen, HOMER Pro simülasyonları sonucunda bu bileşenin toplam sistem maliyetine kıyasla sınırlı üretim katkısı sunduğu belirlenmiş ve ekonomik açıdan optimal yapıdan çıkarılması uygun görülmüştür. Nihai sistem konfigürasyonu, üretim kaynakları olarak biyogaz ve şebeke destekli elektrik kullanımına, dönüşüm süreci olarak ise elektroliz ve amonyak sentezine dayanmaktadır. Elektrolizör, sistemdeki fazla enerjinin hidrojen formunda depolanmasını sağlarken, amonyak üretim ünitesi bu hidrojeni azotla sentezleyerek enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilen kimyasal bir forma dönüştürmüştür. NH_3 cracker modülü ise gerektiğinde bu amonyağı geri çözerek elektrik üretimine katkı sağlamıştır. Sistemin enerji yönetimi performansı, yük profiline tam uyum sağlayacak şekilde modellenmiş; üretim-tüketim dengesi kesintisiz bir yapı içerisinde korunmuştur. Enerji dönüşüm bileşenlerinin yüksek verimlilikle çalışması, sistemin kararlılığını artırmış ve elektriksel sürekliliğin sağlanmasına olanak tanımıştır. Özellikle inverter modülü ile enerji akışı DC'den AC'ye etkin şekilde dönüştürülmüş; şebeke bağlantısı sayesinde sistem hem dış kaynaklardan destek alabilmiş hem de fazla enerjiyi şebekeye aktarabilmiştir. Ekonomik değerlendirme sonuçlarına göre, sistem yüksek teknolojiye dayalı olmasına rağmen uzun vadede maliyet etkin bir yapı sunmaktadır. İlk yatırım maliyetleri, zaman içerisinde işletme, yakıt ve bakım giderlerinin dengelenmesiyle sürdürülebilir bir düzeye çekilmiştir. Ayrıca, sistemin enerji fazlasını şebekeye satabilmesi ekonomik açıdan olumlu bir geri dönüş sağlamaktadır. Çevresel etkiler bakımından sistemin en dikkat çekici yönü, karbon ayak izini azaltmaya yönelik döngüsel bir yapı oluşturmaktır. Biyogazın atık organik maddelerden elde edilmesi, çevresel yükü azaltmış; hidrojen ve amonyağın temiz yakıtlar olarak kullanılması da sera gazı emisyonlarının kontrol altına alınmasını sağlamıştır. Bu sayede hem çevreye duyarlı bir enerji üretim süreci gerçekleştirilmiş hem de atıkların enerjiye dönüştürüldüğü döngüsel karbon ekonomisi desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Hidrojen, Yeşil Amonyak, Biyogaz, Atık Su Arıtma Tesisi, Döngüsel Karbon Ekonomisi

ABSTRACT

CIRCULAR CARBON ECONOMY INTEGRATION OF SMART GRIDS AND RENEWABLE HYBRID SYSTEMS FOR HYDROGEN AMMONIA AND BIOGAS PRODUCTION IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS

BAYRAKTAR GUNES, Elifnur

Master of Science in Department of Renewable Energy Sources

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Heybet KILIC

May 2025, 135 pages

In this thesis study, the technical, economic, and environmental feasibility of transforming a wastewater treatment plant located in Diyarbakır into an energy-positive structure through a hybrid energy system has been comprehensively evaluated. In line with the goals of sustainable development, a multi-component system model has been designed, not only to meet the energy needs of the plant but also to produce clean energy carriers such as green hydrogen and green ammonia. In this context, a biogas generator, electrolyzer, hydrogen tank, ammonia production unit, NH_3 cracker, and energy conversion systems were integrated, and modeling and optimization processes were carried out using the HOMER Pro software. Although photovoltaic modules were included in the initial system design, HOMER Pro simulations indicated that this component offered limited production contribution relative to the total system cost, and it was therefore excluded from the final economic-optimal configuration. The final system configuration relies on biogas and grid-supported electricity as energy sources, and on electrolysis and ammonia synthesis as the main conversion processes. The electrolyzer enables the storage of surplus energy in the form of hydrogen, while the ammonia production unit synthesizes this hydrogen with nitrogen into a chemical form that can be used as an energy carrier. The NH_3 cracker module, when needed, reconverts this ammonia into hydrogen to support electricity generation. The system's energy management performance has been modeled to fully align with the load profile, ensuring a continuous balance between production and consumption. The high efficiency of the energy conversion components has enhanced the system's stability and enabled uninterrupted electrical continuity. Especially with the inverter module, energy flow has been effectively converted from DC to AC; and with the grid connection, the system has been able to both receive support from external sources and export excess energy to the grid. According to the economic evaluation results, despite being based on high technology, the system offers a cost-effective structure in the long term. The initial investment costs have been brought to a sustainable level over time through balanced operating, fuel, and maintenance expenditures. Furthermore, the ability of the system to sell excess energy to the grid provides a favorable economic return. In terms of environmental impact, the most prominent feature of the system is its circular structure aimed at reducing the carbon footprint. The use of biogas derived from organic waste has lessened the environmental burden, while the utilization of hydrogen and ammonia as clean fuels has contributed to the control of greenhouse gas emissions. In this way, an environmentally friendly energy production process has been achieved, and the circular carbon economy has been supported by converting waste into energy.

Keywords: Green Hydrogen, Green Ammonia, Biogas, Wastewater Treatment Plant, Circular Carbon Economy

1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji ihtiyacının hızla artması, kullanılan geleneksel enerji kaynaklarının (kömür, petrol, doğalgaz) çevresel etkileri sebebiyle ortaya çıkan sürdürülebilirlik endişeleri ve bahsedilen geleneksel enerji kaynak rezervlerinin tükenme sürecine girmesi gibi nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün daha da artmaktadır [1]. Dünya nüfusunun hızla büyümesi, kentleşmenin yoğunlaşması ve sanayileşmenin ilerlemesiyle birlikte enerji talebi artış göstermekte ve bu durum da geleneksel enerji kaynaklarının çevresel ve ekonomik açıdan yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Fosil yakıtların, dünyadaki enerji ihtiyacının karşılanması için kullanımı yalnızca sınırlı kaynak rezervleri nedeniyle değil; aynı zamanda sera gazı salınımlarını artırarak küresel ısınma ve çevresel bozulma gibi ciddi sonuçlara yol açması nedeniyle de eleştirilmektedir [2]. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan karbondioksit (CO_2) emisyonları, atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunu artırarak küresel sıcaklıkların yükselmesine neden olabilmektedir [3]. Bu süreç; iklim değişikliği, deniz seviyesindeki artışlar, biyolojik çeşitlilik kaybı ve aşırı hava olaylarının sıklığında artış gibi birçok çevresel sorunu tetiklemektedir. Fosil yakıtların çıkarılması ve işlenmesi süreçleri de çevresel zararlara neden olabilmektedir; örneğin kömür madenciliği sırasında habitat tahribatı, su kirliliği ve toprak erozyonu gibi etkiler gözlemlenmektedir [4]. Aynı şekilde petrol ve doğal gazın çıkarılması sırasında ise metan (CH_4) gibi güçlü sera gazlarının atmosfere salınması önemli bir sorun oluşturmaktadır [5]. Fosil yakıtların taşınması sırasında meydana gelen kazalar, petrol sızıntıları ve diğer çevresel felaketler de fosil kaynaklara olan bağımlılığın azaltılması gerektiğini desteklemektedir.

Tüm bu nedenler göz önüne alındığında fosil yakıtların; çevresel, ekonomik ve stratejik açıdan oluşturduğu sorunlar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmaktadır. Dünyanın artan enerji talebini sürdürülebilir bir şekilde karşılamak ve fosil yakıtların yol açtığı çevresel tahribatı en aza indirmek için; güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle ve hidrojen gibi tükenmeyen yapılara sahip olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ihtiyaç vardır [6]. Bu enerji kaynakları hem günümüzün hem de geleceğin enerji ihtiyacını karşılayacak en önemli alternatifler olarak ön plana çıkmaktadır.

Paris Anlaşması'nın temel hedefi küresel sıcaklık artışının 2100 yılına kadar 2°C'yi aşmasını önlemek ve mümkünse 1,5°C'nin altında tutulmasını sağlamaktır [7]. Ancak mevcut sera gazı azaltım politikalarının bu hedefleri gerçekleştirmede yetersiz kalabileceği ve negatif emisyon teknolojileri veya jeomühendislik yaklaşımlarının dikkate alınması gerekebileceği öngörülmektedir. Gelişmekte olan ekonomilerdeki enerji tüketim eğilimlerinin analizi, küresel sıcaklık artışıyla mücadele stratejilerinin sosyo-ekonomik kalkınma ile entegre bir şekilde ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır [8]. Bu bağlamda olası çözüm yolları arasında enerji sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmaya yönelik mevcut teknolojilerin etkin kullanımı, toplumun elektrifikasyon süreçlerine aktif katılımının sağlanması ve kurumsal düzeyde şeffaflık ile hesap verebilirliğin teşvik edilmesi yer almaktadır. Elektrik üretim ve tedarik sistemleri, yenilenebilir enerji geçişinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu sistemler yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu desteklemek için altyapının iyileştirilmesi, maliyet azaltma stratejileri ve gelişmiş şebeke yönetimi gerektirir [9]. Ayrıca hükümet politikalarına uyum sağlayarak ve tüketici farkındalığını artırarak yenilenebilir enerjiye geçişin hızlandırılmasına katkıda bulunmalıdır. Yapılan çeşitli çalışmalar; yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılmasının politika teşvikleri, açık artırma sistemleri ve finansal destek mekanizmaları ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur [10].

Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri (HRES); enerji arz güvenliğini artırmak, üretimde sürekliliği sağlamak ve şebeke stabilitesini optimize etmek amacıyla birden fazla yenilenebilir enerji kaynağının entegrasyonunu içeren sistemlerdir [11]. Bu sistemler farklı enerji türlerinin tamamlayıcı özelliklerinden yararlanarak güç üretiminde dalgalanmaları minimize eder ve arz-talep dengesini iyileştirir. Ayrıca, gelişmiş enerji yönetim stratejileri ile birlikte çalıştırıldığında, sistem verimliliğini artırarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bunun yanı sıra HRES yapılandırılmaları, Seviyeledirilmiş Enerji Maliyeti'ni (LCOE) optimize ederek uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirliği desteklemekte ve akıllı şebeke entegrasyonu ile daha etkin bir enerji yönetimine imkân tanımaktadır [12].

Atık su arıtma tesisleri gibi yüksek enerji yoğunluğuna sahip altyapılar için HRES, enerji geri kazanım süreçlerini optimize ederek operasyonel sürdürülebilirliği artırabilir. Özellikle biyogaz üretimi, atık su arıtımının doğal bir yan ürünü olarak değerlendirilerek hem elektrik enerjisi hem de ısı üretiminde kullanılabilir, böylece fosil yakıt bağımlılığı azaltılır ve tesisin enerji ihtiyacı büyük ölçüde karşılanabilir [13]. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğası, özellikle Güneş Paneli (PV) ve biyogaz üretimi gibi sistemlerde arz ve talep dengesinin korunmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle enerji depolama sistemleri, sistem stabilitesini sağlamak ve yenilenebilir enerji penetrasyonunu artırmak açısından kritik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir [14]. Atık su arıtma tesislerinde kapsamlı bir enerji yönetim stratejisi; elektrik üretimi, tüketimi ve depolama kapasitesi arasında optimum dengeyi sağlamayı hedeflemelidir. Bu kapsamda; sistemdeki biyogazın yanı sıra hidrojen ve amonyakın çift taraflı üretimleri, yenilenebilir enerji entegrasyonunu güçlendiren stratejik çözümler olarak değerlendirilebilir [15]. Elektroliz teknolojisi ile üretilen yeşil hidrojen, tesisin fazla yenilenebilir enerjisini depolayarak hem doğrudan yakıt olarak kullanılabilir hem de enerji taşıyıcısı olarak şebeke dışı uygulamalara entegre edilebilir [16]. Amonyak üretimi ise Haber-Bosch veya elektrokimyasal sentez yöntemleri ile gerçekleştirilebilir ve uzun vadeli enerji depolama çözümü olarak değerlendirilirken, aynı zamanda tarımsal gübre üretimi gibi endüstriyel süreçlerde de kullanılabilir [17].

Bu çalışma, Diyarbakır ilinde bulunan bir Atık Su Arıtma Tesisi için yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile enerji bağımsızlığını ve sürdürülebilirliği artırmayı amaçlayan HRES modelini ele almaktadır. Önerilen hibrit enerji sistemi; biyogaz temelli elektrik üretimi, yeşil hidrojenin elektroliz yoluyla elde edilmesi ve amonyak sentezi süreçlerini bir araya getirerek, Döngüsel Karbon Ekonomisi için Akıllı Şebeke (Smart Grid for Circular Carbon Economy) yaklaşımı doğrultusunda değerlendirilmektedir. Bu kapsamda Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources Professional (HOMER Pro) yazılımı kullanılarak, sistem bileşenlerinin teknik ve ekonomik performans analizleri gerçekleştirilmektedir [18]. Simülasyonlar kapsamında; bileşenlerin kapasite planlaması, yatırım ve işletme maliyetleri, karbon emisyon azaltımı, enerji verimliliği ve sistemin uzun vadeli sürdürülebilirliği gibi temel parametreler optimize edilmektedir. Optimizasyon sürecinde, yenilenebilir

enerji kaynaklarından maksimum düzeyde faydalanmak için gelişmiş enerji yönetim stratejileri geliştirilmektedir.

Atık su arıtma tesisleri, küresel ölçekte en yüksek enerji tüketimine sahip altyapılar arasında yer almakta olup literatürdeki veriler, bir ülkenin toplam elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık %1-3'ünün atık su arıtma süreçlerinde kullanıldığını göstermektedir [19]. Bu durum, atık su arıtma tesislerinin enerji yoğun sektörler arasında değerlendirilmesine neden olmakta ve sürdürülebilir enerji yönetimi ile yenilenebilir enerji entegrasyonu konularını kritik hale getirmektedir. Bu nedenle, tesislerde biyogaz üretimi gibi atık bazlı enerji geri kazanım süreçleri büyük önem taşımaktadır. Mevcut sistemin biyogazdan üretilen hidrojen ile desteklenmesi ve üretilen hidrojenin bir kısmının amonyak sentezinde kullanılması, enerji arz güvenliğini artırırken karbon döngüsünü kapatan bir model oluşturmaktadır. Ayrıca, elektrolizörler aracılığıyla üretilen hidrojenin amonyak üretim sürecine dâhil edilmesi ve gerektiğinde yeniden hidrojene dönüştürülmesi süreci, sistemin esnekliğini ve verimliliğini artırmaktadır.

Simülasyonlar, önerilen sistemin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Biyogazdan hidrojen üretiminin güneş enerjisi ile desteklenmesi, tesisin enerji bağımsızlığını artırmakta ve şebeke üzerindeki yükü azaltmaktadır. Bununla birlikte, yatırım maliyetlerini minimize etmek ve ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak için hibrit enerji sistemleri için teşvik mekanizmalarının uygulanması kritik bir gerekliliktir. Özellikle şebeke destek mekanizmaları, enerji depolama sistemleri ve karbon azaltım stratejileri doğrultusunda tasarlanan sistemler; enerji güvenliğini artırarak çevresel sürdürülebilirliği sağlamaktadır [20]. Bu gibi sistemlerde hidrojen ve amonyak tabanlı enerji depolama çözümleri, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengenin korunmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda, hibrit enerji sistemleri için optimum enerji depolama stratejilerinin geliştirilmesi; sistemin verimliliğini artırmakta ve kesintili yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışmada analiz edilen atık su arıtma tesisinin elektrik yük verileri, Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş. tarafından sağlanmıştır. Sağlanan veriler, sistem optimizasyon sürecinde

gerçekçi bir yük profili oluşturmak için kullanılmış ve tesisin günlük, mevsimsel ve yıllık enerji tüketim eğilimleri değerlendirilerek modelleme yapılmıştır.

Bu çalışma, atık su arıtma tesisleri için enerji bağımsızlığı sağlayan ve düşük karbon ekonomisi hedeflerini destekleyen yenilikçi bir model sunmaktadır. HOMER Pro ile gerçekleştirilen simülasyonlar; önerilen HRES modelinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Sonuçlar; biyogaz, güneş, hidrojen ve amonyak entegrasyonu ile enerji yönetiminin optimize edilebileceğini ve karbon salınımının önemli ölçüde azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.

Gelecekteki çalışmalar; gelişmiş enerji depolama çözümlerinin entegrasyonu, şebeke etkileşimli kontrol mekanizmalarının geliştirilmesi ve atık su arıtma tesislerinde akıllı şebeke altyapılarının uygulanması gibi konulara odaklanmalıdır. Bununla birlikte, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından gri hidrojen ve amonyak üretiminin çevresel, ekonomik ve teknik etkilerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu analizler, yenilenebilir enerji entegrasyonunun artırılması ve karbon salınımının minimize edilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Böylece, atık su arıtma tesisleri karbon-nötr ve enerji-pozitif sistemler haline getirilebilir ve döngüsel karbon ekonomisi çerçevesinde sürdürülebilir kalkınmaya önemli bir destek sunabilir.

1.1 Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemi Kavramı

Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu; mevcut enerji sistemlerine, şebekeye, enerji depolama teknolojilerine, endüstriyel tesislere, yerel mikro şebekelere, akıllı şebekelere ve farklı enerji taşıyıcılarına (hidrojen, amonyak vb.) entegre edilmesi anlamına gelir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının belirtilen entegrasyonları, sürdürülebilir enerji dönüşümünün temel taşlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin tükenmeye başlaması ve küresel iklim değişikliği ile mücadelede daha temiz enerji çözümlerine duyulan ihtiyaç, yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşmasını zorunlu hale getirmiştir. Ancak; rüzgâr, güneş ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının doğasında bulunan değişkenlik ve kesintilik, enerji arz güvenliğini sağlama noktasında önemli zorluklar yaratmaktadır [21]. Tek bir yenilenebilir enerji kaynağına dayalı sistemlerde; mevsimsel ve günlük değişimler

nedeniyle enerji üretiminde dalgalanmalar meydana gelmekte ve bu durum şebeke istikrarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu bağlamda HRES, farklı yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre ederek enerji arzında sürekliliği sağlamak ve sistem verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. HRES modelleri; enerji üretiminde birden fazla kaynağın entegrasyonunu mümkün kılarak, tek bir kaynağa bağımlı sistemlerin karşılaştığı istikrarsızlık sorunlarını minimize etmektedir. Özellikle güneş enerjisi ve rüzgâr türbinleri gibi kesintili kaynakların, biyogaz gibi sürekli üretim yapabilen yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesi; sistemin genel performansını artırırken enerji üretiminde daha dengeli bir yapı oluşturulmasını sağlamaktadır [22].

HRES'in sunduğu bir diğer önemli avantaj, enerji depolama ve yönetim stratejileri ile entegrasyonunun sağlanabilmesidir. Enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji sistemlerinin etkinliğini artırarak, üretilen fazla enerjinin daha sonra kullanılmasına olanak tanımaktadır [23]. Özellikle hidrojen üretimi, batarya depolama sistemleri ve amonyak bazlı enerji taşıyıcıları; yenilenebilir enerji sistemlerinde depolama çözümleri olarak büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte akıllı şebeke teknolojilerinin entegrasyonu, HRES'in dinamik talep yönetimi ile optimize edilmesine ve arz-talep dengesinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır [24].

Geleneksel enerji sistemlerine kıyasla HRES modelleri enerji arz güvenliğini artırmak, fosil yakıt tüketimini azaltmak ve karbon emisyonlarını düşürmek gibi önemli çevresel ve ekonomik avantajlar sunmaktadır. Özellikle atık su arıtma tesisleri gibi enerji yoğun altyapılarda; biyogaz üretimi ve hidrojen dönüşüm süreçleri ile yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, sistemin sürdürülebilirliğini ve verimliliğini artıran önemli unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca HRES'in esnek yapısı, farklı bölgesel ve iklimsel koşullara göre özelleştirilebilir konfigürasyonlar geliştirilmesine olanak tanımakta, böylece yerel enerji taleplerine en uygun sistemlerin tasarlanmasını sağlamaktadır. HRES modelleri, enerji sektörünün sürdürülebilir dönüşümünü hızlandıran yenilikçi çözümler sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre bir yapı içinde yönetilmesi, sadece karbon emisyonlarının azaltılmasını sağlamakla kalmayıp aynı zamanda enerji sistemlerinin daha dayanıklı, ekonomik ve güvenilir hale getirilmesine de katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, HRES uygulamalarının

optimizasyonu ve teknik-ekonomik analizlerinin detaylı olarak incelenmesi; enerji bağımsızlığı ve döngüsel karbon ekonomisi hedeflerine ulaşmak açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

1.1.1 Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin bileşenleri

HRES; enerji üretiminde sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve verimlilik sağlamak amacıyla birden fazla enerji kaynağının ve teknolojik bileşenin entegrasyonu ile oluşturulan sistemlerdir. Bu sistemler, özellikle enerji arzında sürekliliğin sağlanması ve kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının dengelenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. HRES'ler, enerji üretim süreçlerini optimize etmek ve enerji kayıplarını en aza indirmek için çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler, sistemin işleyişini destekleyen temel unsurlardır ve tasarım kriterlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

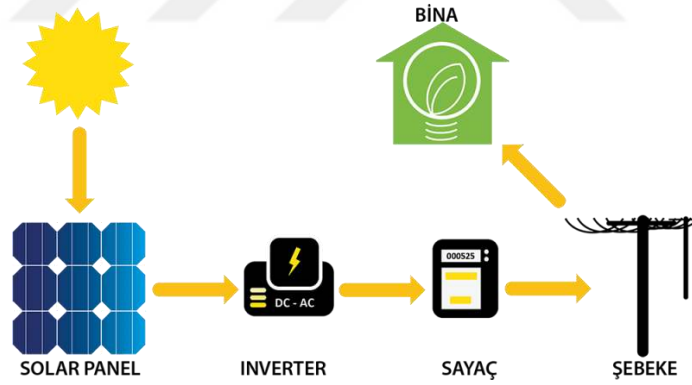
1.1.1.1 Yenilenebilir enerji kaynakları

HRES'lerin temel yapı taşı olan yenilenebilir enerji kaynakları; fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak ve karbon salınımını minimize etmek için kullanılır. Bu kaynaklar sistemin konumuna, iklim koşullarına ve enerji talep profilinin dinamiklerine bağlı olarak çeşitlendirilebilir.

Güneş enerjisi

PV sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren n ve p tipi yarı iletken tabanlı teknolojilerdir ve sürdürülebilir enerji üretimi açısından kritik bir rol oynamaktadır [25]. Bu sistemler; monokristal, polikristal ve ince film hücrelerden oluşan güneş panelleri, Doğru Akım (DC)'yi Alternatif Akım (AC)'ye dönüştüren invertörler, enerji depolama sistemleri, güç elektroniği bileşenleri (konvertörler, Maksimum Güç Noktası Takibi – MPPT, şarj kontrol cihazları) ve izleme-kontrol üniteleri gibi temel bileşenlerden oluşmaktadır [26]. Şebekeye bağlı sistemler; fazla üretilen enerjiyi şebekeye aktarma kabiliyetine sahipken, bağımsız sistemler enerji depolama çözümleri ile kesintisiz güç sağlamaktadır; hibrit sistemler ise fotovoltaiik üretimi, rüzgar enerjisi, biyokütle ve hidrojen elektrolizi gibi farklı kaynaklarla entegre ederek sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Optimum performans için panellerin eğim açısı ve yönlendirmesi bölgenin enlem değerine göre ayarlanmalı, gölgeleme etkileri

minimize edilmeli ve inverter kapasitesi ile uyumlu bir güç yönetimi sağlanmalıdır [27]. PV sistemlerin verimliliği, çalışma sıcaklığına duyarlı olup aşırı ısınmanın önlenmesi için yeterli havalandırma ve uygun montaj teknikleri gerekmektedir. Ayrıca, akıllı izleme sistemleri kullanılarak anlık performans değerlendirmeleri yapılmalı ve düzenli bakım prosedürleri uygulanmalıdır. Geri dönüştürülebilir panel malzemeleri, gelişmiş enerji depolama teknolojileri ve akıllı şebekelerle entegrasyon; PV sistemlerinin sürdürülebilirliğini artırmak için araştırılması gereken önemli alanlar arasında yer almaktadır. PV sistemlerde; yarı iletken malzemelerden oluşan PV panelleri, güneş ışığını absorbe ederek fotovoltaik etki ile DC elektrik üretir. Elde edilen DC elektrik, sistemin şebeke ile uyumlu çalışabilmesi için bir invertör aracılığıyla AC dönüştürülür. Şebekeye bağlı PV sistemlerde, üretilen elektrik önce sayaç üzerinden izlenerek tüketiciye aktarılır ve ihtiyaç fazlası enerji şebekeye yönlendirilir. Bu süreç, PV sistemlerinin enerji bağımsızlığı sağlamasının yanı sıra şebeke üzerindeki yükü azaltarak enerji arz güvenliğini desteklemesine de olanak tanır. Şekil 1.1’de tipik bir şebekeye bağlı PV sisteminin enerji dönüşüm süreci ve bileşenleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Fotovoltaik sistemlerde enerji dönüşüm süreci

Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği; PV panellerin enerji dönüşüm kapasitesine, çevresel koşullara, kullanılan malzemelerin teknolojik özelliklerine ve sistem tasarımına bağlı olarak değişmektedir [28]. Güneş enerjisi verimliliği, genellikle güneş panellerinin güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesi olarak ifade edilir ve fotovoltaik hücrelerin performansı ile doğrudan ilişkilidir.

○ **Güneş panellerinin verimlilik faktörleri**

Güneş panellerinin verimliliğini belirleyen temel parametreler aşağıdaki gibidir:

a) *Hücre tipine bağlı verimlilik*

Monokristal silikon paneller: En yüksek verimliliğe sahip PV paneller arasındadır ve laboratuvar ortamında %24.7'ye kadar ulaşan dönüşüm verimliliği sağlarken, ticari ürünlerde bu oran %18-22 arasındadır [29].

Polikristal silikon paneller: Üretim maliyetlerinin düşük olması nedeniyle tercih edilir, ancak verimlilikleri genellikle %15-18 aralığındadır [30].

İnce film paneller: Amorf silikon (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır indiyum galyum selenid (CIGS) gibi malzemeler kullanılarak üretilen paneller esnek uygulamalara olanak tanırken verimlilik oranları %10-14 seviyelerindedir [31].

Perovskit güneş hücreleri: Yeni nesil teknolojiler arasında yer alan bu hücreler, laboratuvar ortamında %30'a kadar verimlilik sağlayarak geleneksel PV hücrelerine alternatif olarak değerlendirilmektedir [32].

b) *Çevresel faktörlere bağlı verimlilik*

PV panellerinin çalışma sıcaklığı arttıkça verimlilikleri düşmektedir. Monokristal ve polikristal silikon hücrelerde sıcaklık katsayısı genellikle -0,3 ila -0,5 %/°C arasındadır, yani her 1°C'lik sıcaklık artışında hücre verimliliği düşmektedir. Ayrıca güneş panelleri üzerindeki gölge oluşumu veya kir birikimi hücrelerin performansını ciddi oranda düşürerek toplam enerji üretim kapasitesini azaltır. Panellerin üzerine düşen güneş ışığı miktarı arttıkça verimlilik artış gösterirken, düşük ışıyım koşullarında performans düşebilir. PV panellerin doğru açıda konumlandırılması maksimum enerji üretimi açısından kritik öneme sahiptir. Genellikle panel eğimi, coğrafi konumun enlem derecesine göre ayarlanmalıdır.

○ **Fotovoltaik sistemlerde enerji dönüşüm kayıpları**

PV sistemlerde üretilen enerjinin tümü doğrudan kullanılabilir değildir. Sistemde çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. Literatür, yıllık invertör verimliliğindeki maksimum kayıpların %1,3 olduğunu ortaya koymaktadır [33]. Aynı zamanda uzun mesafeli kablolama sistemlerinde kayıplar

gözlemlenebilir. Panellerin yüzeyinde biriken toz ve kir, ışık Emilimini azaltarak bu durum da enerji kayıplarına neden olabilir.

○ **Güneş enerjisi verimliliğini artırma yöntemleri**

Güneş panellerinin performansını artırmak için aşağıdaki teknik stratejiler uygulanabilir:

a) **MPPT**

PV panellerin değişen çevresel koşullar altında maksimum güç noktasında (MPP - Maximum Power Point) çalışmasını sağlamak için kullanılan gelişmiş kontrol yöntemleridir [34]. PV sistemlerinin güç çıkışı, güneş ışınımı, sıcaklık değişimleri ve panel yük karakteristiklerine bağlı olarak sürekli değişkenlik gösterir. Bu nedenle PV panellerinin maksimum verimde çalışmasını sağlamak amacıyla güç elektroniği tabanlı bir izleme ve kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. PV panellerin gerilim-güç (V-P) ve akım-güç (I-P) karakteristik eğrileri incelendiğinde, her bir ışınım ve sıcaklık seviyesi için belirli bir MPP olduğu görülmektedir. MPPT algoritmaları, inverter veya şarj kontrol cihazları aracılığıyla sürekli olarak bu noktayı belirler ve yük ile panel arasındaki empedans uyumunu (impedance matching) ayarlayarak güç çıkışını optimize eder [35]. MPPT sistemleri genellikle DC-DC dönüştürücüler (Buck, Boost, Buck-Boost veya SEPIC- Tek Uçlu Birincil Endüktör Dönüştürücü gibi konvertörler) ile entegre çalışır. Bu dönüştürücüler, giriş gerilimini (PV panel çıkışı) ve akımı dinamik olarak ayarlayarak, çıkış gücünü MPP'ye yakın bir değerde tutar.

MPPT teknolojisi, PV sistemlerin enerji dönüşüm verimliliğini optimize ederek güç çıkışını belirli oranlarda artırabilen gelişmiş bir güç yönetim stratejisidir. Özellikle değişken çevresel koşullar altında örneğin; kısmi gölgelenme, sıcaklık değişimleri ve ışınım dalgalanmaları gibi durumlarda PV paneller MPPT mekanizması olmaksızın optimal çalışma noktasından saparak düşük verimde çalışabilir. MPPT algoritmaları bu değişkenlere uyum sağlayarak panel çıkış gücünü maksimize eder, şebekeye veya yük tarafına iletilen enerjiyi artırır ve genel sistem performansını iyileştirir [36]. Böylece,

enerji üretim sürecinde kayıplar minimize edilirken, PV sistemlerinin ekonomik ve teknik sürdürülebilirliği artırılmış olur.

b) Çift yüzlü (bifacial) panellerin kullanımı

Bifacial PV paneller, hem ön yüzeylerine doğrudan gelen güneş ışığını hem de arka yüzeylerinden yansıyan ışınımı absorbe ederek toplam enerji üretimini artıran gelişmiş bir PV teknolojisidir [37]. Bu paneller, albedo etkisini kullanarak çevredeki yüzeylerden yansıyan ışığı da değerlendirebilir. Özellikle yüksek yansıtıcılığa sahip zemin koşullarında (örneğin; kar, beyaz çakıl veya beton yüzeyler) ve optimal montaj açılarında, bifacial panellerin enerji üretim kapasitesi önemli ölçüde artabilir. Bu teknoloji, güneş enerjisi santrallerinde alan kullanım verimliliğini artırırken, sistemin LCOE'sini düşürerek ekonomik avantajlar da sağlamaktadır.

c) Soğutma sistemleri

Bu sistemler, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında hücre verimliliğini artırmak amacıyla uygulanır. Su soğutmalı sistemler, panel altına yerleştirilen sıvı dolaşım kanalları aracılığıyla ısı transferi sağlayarak sıcaklık regülasyonu gerçekleştirir ve bu sayede panelin çalışma sıcaklığını optimum seviyede tutar [38]. Faz değişimli malzemeler ise termal enerji depolama yetenekleri sayesinde PV yüzeyinin aşırı ısınmasını engeller ve sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak stabil enerji üretimine katkıda bulunur [39]. Bu yöntemler fotovoltaik sistemlerin enerji dönüşüm verimliliğini artırırken, uzun vadede modül ömrünü uzatarak sistem performansını iyileştiren önemli termal yönetim stratejileri olarak öne çıkmaktadır.

d) İzleyici (tracking) sistemler

Güneş takip sistemleri, PV panellerin güneş ışınlarını maksimum seviyede almasını sağlamak amacıyla güneşin günlük ve mevsimsel hareketlerine uyum sağlayarak panel yönelimini optimize eden mekanizmalardır. Çift eksenli güneş takip sistemleri, hem yatay (azimut) hem de dikey (elevasyon) eksenlerde hareket ederek güneş ışınlarının dik açıda alınmasını mümkün kılar [40]. Özellikle düşük enlem bölgelerinde ve uzun gün sürelerine sahip

alanlarda daha verimli olan çift eksenli izleme mekanizmaları, MPPT ile entegre edildiğinde sistemin genel performans katsayısını önemli ölçüde artırabilir. Ayrıca, modern güneş takip sistemleri hidrolik veya elektromekanik aktüatörlerle çalışmakta olup sensör tabanlı kontrol algoritmaları ile anlık güneş konum verilerine göre hareket eder. Yapay zekâ ve öngörülebilir güneş ışınımı modelleme teknikleri ile desteklenen bu sistemler; bulutluluk ve çevresel değişkenlere bağlı olarak optimize edilmiş izleme yolları oluşturabilir. Ancak, yüksek kurulum ve bakım maliyetleri nedeniyle teknik-ekonomik analizlerin dikkatlice yapılması gerekmektedir.

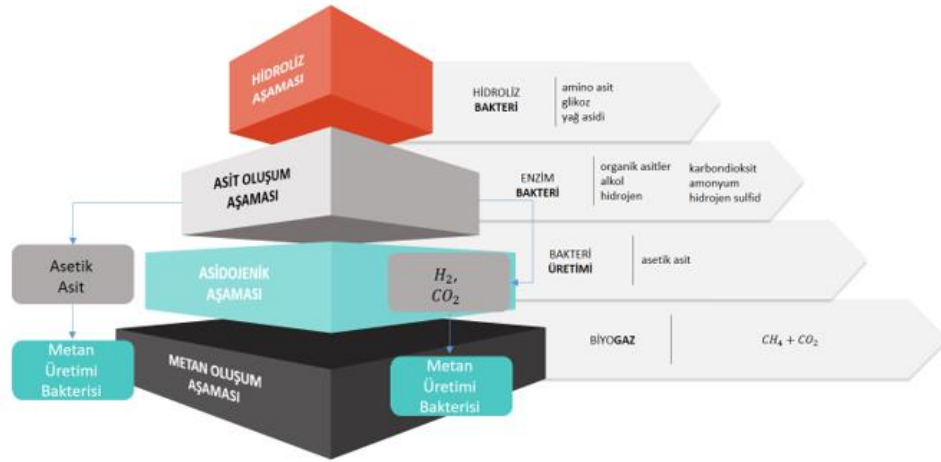
Biyokütle enerjisi

Biyokütle enerjisi, organik maddelerden enerji elde edilmesini sağlayan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bitkisel ve hayvansal atıklar; tarımsal yan ürünler, orman atıkları ve kentsel biyolojik atıklar biyokütle kaynakları arasında yer alır. Bu kaynakların anaerobik fermantasyon, gazlaştırma, yanma ve piroliz gibi farklı prosesler aracılığıyla enerjiye dönüştürülmesi mümkündür [41]. Biyokütle enerjisinin en yaygın ve verimli kullanımlarından biri biyogaz üretimi olup, biyokütlenin anaerobik (oksijensiz) koşullarda mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılması ile CH_4 ve CO_2 içeren yanıcı bir gazın elde edilmesini sağlar. Bu sistemler, atık yönetimini optimize ederken aynı zamanda sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunur. Biyokütle enerjisi, kimyasal bağlar içinde depolanan enerjinin biyokimyasal veya termokimyasal yollarla açığa çıkarılması prensibine dayanır. Biyokimyasal dönüşüm yöntemleri arasında anaerobik fermantasyon ve alkollü fermantasyon bulunurken, termokimyasal dönüşüm süreçleri piroliz, gazlaştırma ve doğrudan yakmayı içerir.

Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesinde temel faktörler şunlardır [42]:

- *Nem içeriği:* Düşük nem oranı, termokimyasal dönüşüm için daha uygundur.
- *C/H/O oranı:* Biyokütlerde karbon (C), hidrojen (H) ve oksijen (O) oranı yanma verimini belirler.
- *Enerji yoğunluğu:* Enerji içeriği genellikle megajoule (MJ) /kilogram (kg) cinsinden hesaplanır ve kaynağa bağlı olarak değişir.

Biyokütle kaynaklarının sürdürülebilir şekilde yönetilmesi karbon döngüsü açısından büyük önem taşır. Biyokütle yakıtlarının kullanımı sırasında atmosfere salınan CO₂, bitkilerin fotosentez sürecinde yeniden absorbe edildiğinden, net karbon emisyonu düşük bir enerji kaynağı olarak değerlendirilir. Biyogaz üretimi, organik atıkların anaerobik fermentasyon sürecine tabi tutulmasıyla gerçekleşir. Bu süreç, farklı mikrobiyolojik aktiviteler içeren dört ana aşamadan oluşur: Hidroliz, Asit Oluşum, Asidojenik ve Metanogenez aşamalarıdır [43]. Her aşama, farklı mikroorganizma gruplarının faaliyet gösterdiği biyokimyasal dönüşümler içerir ve biyogaz üretimi için kritik bir rol oynar. Şekil 1.2’de biyogaz üretim sürecinin aşamaları detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Hidroliz aşamasında büyük organik bileşikler daha küçük parçalara ayrılırken, asit oluşum aşamasında bu bileşikler uçucu yağ asitleri ve hidrojen gibi bileşenlere dönüştürülmektedir. Asidojenik aşama, bu ara bileşenlerin metan üreten mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir hale getirilmesini sağlarken, metan oluşum aşaması, biyogazın (CH₄ + CO₂) nihai olarak üretildiği bölümdür.



Şekil 1.2 Biyogaz üretim sürecinin aşamaları

Şekil 1.2’de biyogaz üretim süreci aşamalar halinde gösterilmektedir. Hidroliz aşamasında; hidroliz bakterileri tarafından proteinler, karbonhidratlar ve lipidler parçalanarak amino asitler, şekerler ve yağ asitlerine dönüştürülmektedir. Asit oluşum aşamasında; enzim üreten bakteriler bu basit bileşikleri organik asitlere, alkole ve hidrojen gazına çevirirken, asidojenik aşamada hidrojen gazı (H₂) ve CO₂ oluşumu gerçekleşir. Bu süreç sonucunda metan oluşum aşamasında; metan üretici bakteriler asetat, hidrojen ve karbondioksiti kullanarak biyogaz üretir. Nihai ürün olarak CH₄ ve

CO₂ elde edilir. Bu süreç biyogazın enerji üretiminde kullanılmasını sağlarken, aynı zamanda organik atıkların çevre dostu bir şekilde yönetilmesine de katkı sağlamaktadır.

Anaerobik fermantasyonun etkinliği; sıcaklık, pH, organik yükleme oranı (OLR - Organic Loading Rate) ve hidrolik bekleme süresi (HRT - Hydraulic Retention Time) gibi parametrelere bağlıdır. Mezofilik (35-40°C) ve termofilik (50-60°C) sıcaklık rejimleri, biyogaz üretim verimini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir [44].

○ *Biyogaz sistemleri ve bileşenleri*

Günümüzde biyogaz tesisleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını teşvik eden ve organik atık yönetimini enerji üretimi ile entegre eden kritik sistemlerdir. Bu tesisler atık yönetimi, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve temiz enerji üretimi gibi çok yönlü faydalar sağlayarak döngüsel biyokütle ekonomisine katkıda bulunmaktadır. Modern biyogaz tesisleri, organik atıkların anaerobik fermantasyon süreçleriyle biyogaza dönüştürülmesini sağlayan entegre sistemler olarak tasarlanmaktadır. Biyogaz tesisleri; yüksek verimlilik ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlamak amacıyla aşağıdaki temel bileşenlerden oluşur:

a) Besleme sistemi

Biyogaz üretiminde besleme sistemi, organik substratların reaktöre belirli oranlarda ve kontrollü bir şekilde aktarılmasını sağlayan kritik bir mekanizmadır. Bu sistem, biyogaz üretim sürecinin stabilitesini ve verimliliğini doğrudan etkileyen önemli bir bileşendir. Yanlış besleme stratejileri; reaktörde substrat birikimine, inhibitör maddelerin oluşmasına ve mikrobiyal aktivitenin azalmasına neden olabilir. Bu nedenle substrat türüne, çamur kıvamına ve reaktör tipine uygun besleme sistemlerinin seçimi büyük önem taşımaktadır.

b) Reaktör (fermentör) tasarımı

Reaktör; anaerobik fermantasyonun gerçekleştiği, hava geçirmez izolasyona sahip bir biyokimyasal dönüşüm ortamıdır [45]. En yaygın kullanılan biyogaz reaktör tipleri şunlardır:

- *Sürekli karıştırmalı tank reaktörler:* Homojen bir ortam sağlayarak mikrobiyal dağılımı optimize eden ve biyogaz üretim verimini artıran sistemlerdir.
- *Kuru fermantasyon reaktörleri:* Daha yüksek katı madde içeriğine sahip biyokütleler için uygundur ve reaksiyon kinetiği açısından düşük hacimli substratları işleyebilme kabiliyetine sahiptir.

Reaktörlerin HRT ve katı bekleme süresi gibi işletme parametreleri; biyogaz verimi ve sistem stabilitesi açısından titizlikle optimize edilmelidir.

c) Gaz depolama ünitesi

Biyogazın üretimi ile tüketimi arasındaki zaman farkını yönetmek amacıyla gaz depolama sistemleri kullanılır. Esnek membran yapılar örneğin PVC veya kauçuk bazlı ve yüksek basınçlı metal gaz tankları, biyogazın güvenli bir şekilde depolanmasına olanak tanır. Gaz depolama üniteleri, basınç düzenleme valfleri, otomatik seviye kontrol mekanizmaları ve gaz kaçağı sensörleri ile donatılmalıdır.

d) Gaz temizleme ve arıtma ünitesi

Ham biyogaz; %60-80 CH₄, %20-46 CO₂, değişen oranlarda hidrojen sülfür (H₂S), az miktarda azot gazı (N₂), su buharı (H₂O_(g)) ve H₂ içermektedir [46]. Biyogazın yanma verimini artırmak ve ekipman korozyonunu önlemek amacıyla gaz temizleme sistemleri kullanılır:

- *H₂S giderimi:* Aktif karbon filtreleri, demir oksit bazlı reaktörler veya biyolojik sülfür giderim sistemleri ile H₂S içeriği minimize edilir.
- *Nem ve partikül filtrasyonu:* Soğutma kondenseri veya silika jel bazlı kurutucular ile su buharı giderilir, partikül filtreleri ile katı kirleticiler uzaklaştırılır.

- *CO₂ giderimi:* Biyogazı biyometan seviyesine yükseltmek için membran ayırma, kimyasal absorpsiyon ve kriyojenik ayrıştırma yöntemleri kullanılabilir.

e) Enerji dönüşüm sistemi

Arıtılmış biyogaz; yenilenebilir enerji kaynağı olarak elektrik, ısı veya mekanik enerji üretiminde çeşitli teknolojilerle entegre edilebilen çok yönlü bir yakıttır. Biyogazın enerji dönüşüm süreci, sistem verimliliğini ve sürdürülebilir enerji üretimini maksimize etmek amacıyla farklı mühendislik çözümlerini içermektedir.

- *Gaz motorları ve kojenerasyon sistemleri:* Kojenerasyon sistemleri, biyogazın içten yanmalı motorlarda yakılarak eş zamanlı olarak hem elektrik hem de ısı üretilmesini sağlayan yüksek verimli sistemlerdir [47]. Bu yapı birleşik enerji üretim teknolojisi kapsamında işletildiğinde, oluşan atık ısıнын önemli bir kısmı tekrar faydalı enerjiye çevrilebilir. Böylece sistemin toplam enerji girdisinin %85–95'ine kadar etkin biçimde kullanılması mümkün hale gelir. Bu yöntem, "eş zamanlı elektrik ve ısı üretimi" olarak da adlandırılan kojenerasyon yaklaşımını temel alır. Kojenerasyon sistemleri, özellikle sanayi tesisleri, sera uygulamaları ve atık su arıtma tesisleri gibi sürekli enerji ihtiyacı bulunan tesislerde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- *Mikro türbinler:* Mikro türbin sistemleri; düşük debili biyogaz akışları için optimize edilmiş, kompakt ve yüksek verimli enerji dönüşüm sistemleridir. Döner yanma prensibiyle çalışan mikro türbinler, geleneksel gaz motorlarına kıyasla daha düşük bakım ihtiyacı daha yüksek güvenilirlik ve daha düşük emisyon seviyeleri sunar.
- *Yakıt hücreleri:* Yakıt hücreleri, biyogazın doğrudan elektrokimyasal dönüşümü ile elektrik üretmesini sağlayan yüksek verimli enerji dönüşüm teknolojileridir [48]. Geleneksel yanmalı motorların aksine, yakıt hücreleri düşük sıcaklıklarda çalışarak daha temiz ve verimli enerji üretimi sağlar. Proton Değişim Membranı (PEM), Katı Oksit

Yakıt Hücreleri (SOFC) ve Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri gibi farklı tipleri bulunmaktadır. Biyogaz kaynaklı hidrojen üretimi ile entegre edildiğinde, yakıt hücreleri sıfır karbon salınımına sahip yüksek verimli bir enerji dönüşüm alternatifi sunmaktadır.

Biyogaz tesislerinde enerji üretim verimliliği; büyük ölçüde kullanılan organik substratın kimyasal bileşimi, nem içeriği ve parçalanabilirliği gibi parametrelere bağlıdır. Belirtilen kimyasal bileşimler; enerji dönüşüm sistemlerinin verimini düşürebileceği gibi, kojenerasyon motorlarında ve türbinlerde ekipman korozyonuna, tıkanmalara ve operasyonel sorunlara da neden olabilmektedir. Bu nedenle, biyogazın nihai kullanıma uygun hale getirilmesi için kimyasal absorpsiyon (örneğin amine çözeltileri), biyolojik süzme veya membran ayırma teknolojileri gibi gelişmiş gaz arıtma sistemlerinin entegre edilmesi gerekmektedir.

Üretim sürecinin bir yan çıktısı olarak ortaya çıkan digestat yani fermente olmuş organik kalıntılar; yüksek düzeyde azot, fosfor ve potasyum gibi bitki besin elementleri içermesi nedeniyle tarımda organomineral gübre olarak değerlendirilebilmektedir. Bu durum yalnızca enerji üretimi açısından değil, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir atık yönetimi kapsamında da biyogaz tesislerinin önemini artırmaktadır. Ayrıca, digestatın uygun proseslerden geçirilerek hijyenize edilmesi ve toprak düzenleyici formda uygulanması, hem çevresel kirlenmeyi azaltmakta hem de kimyasal gübre ihtiyacını düşürmektedir.

Biyogaz sistemlerinin karbon nötr yapıya kavuşturulabilmesi için optimum proses kontrolü büyük önem arz etmektedir. Sürekli sıcaklık ve pH kontrolü, karıştırma sistemleri, besleme hızı ayarı ve HRT'nin optimize edilmesi, mikrobiyal aktivitenin sürekliliğini sağlayarak sistem stabilitesini artırmaktadır. Bu kapsamda, Merkezi Denetim ve Veri Toplama Sistemi (SCADA) tabanlı izleme sistemleri ve yapay zeka destekli proses kontrol algoritmaları, biyogaz üretiminin verimliliğini ve operasyonel güvenilirliğini artıran teknolojik yaklaşımlar arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak biyogaz tabanlı enerji dönüşüm sistemleri, hem yerel düzeyde enerji bağımsızlığını destekleyen hem de fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak sera gazı

emisyollarını minimize eden önemli bir yenilenebilir enerji çözümdür. Bu sistemlerin tarımsal ve kentsel atık yönetimi ile entegre edilmesi, akıllı enerji altyapıları ve yeşil dönüşüm stratejileri kapsamında kritik bir rol oynamaktadır.

1.1.1.2 Elektrolizör sistemleri

Elektrolizör sistemleri, suyun elektrik enerjisi yardımıyla H₂ ve oksijen gazı (O₂) bileşenlerine ayrılmasını sağlayan elektrokimyasal cihazlardır. Bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edildiğinde karbonsuz enerji taşıyıcısı olan yeşil hidrojenin üretimini mümkün kılarak enerji sektörünün dekarbonizasyonuna önemli katkılar sunmaktadır [49]. Elektrolizörler, özellikle enerji üretimi ile enerji depolama arasındaki köprüyü kurarak şebeke dengeleme, fazla enerjinin değerlendirilmesi ve yakıt üretimi gibi uygulamalarda stratejik bir rol üstlenmektedir.

Elektroliz işlemi temel olarak suyun (H₂O) bir dış elektrik potansiyeli uygulanarak hidrojen ve oksijen gazlarına ayrılması prensibine dayanır. Bu işlem sırasında pozitif elektrot (anot) üzerinde O₂, negatif elektrot (katot) üzerinde ise H₂ açığa çıkar. Bu reaksiyon endotermik bir süreçtir ve işlem için harici enerji genellikle elektrik enerjisi gerektirir. Elektrik enerjisinin, yenilenebilir kaynaklardan sağlanması durumunda ise üretilen hidrojen “yeşil hidrojen” olarak sınıflandırılır ve bu da elektrolizörleri sürdürülebilir enerji stratejilerinin merkezine yerleştirir.

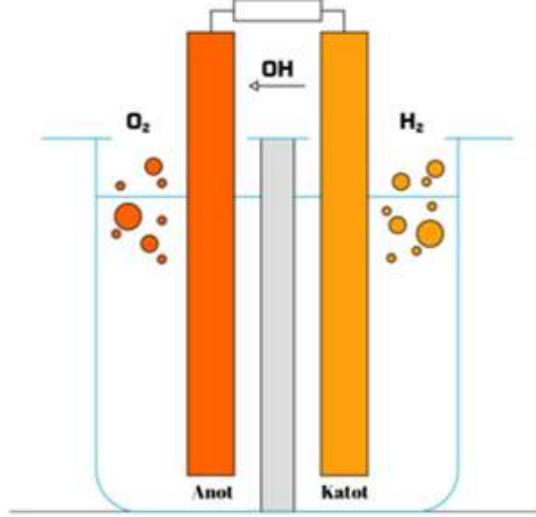
Elektrolizör türleri

Elektrolizör sistemleri; elektrolit tipi, çalışma sıcaklığı ve hücre tasarımına göre çeşitli kategorilere ayrılmaktadır [50]:

o Alkali su elektrolizörü

Ticari anlamda en yaygın kullanılan elektrolizör tipidir. Alkali elektrolizör sistemleri, genellikle H₂O ile birlikte potasyum hidroksit veya sodyum hidroksit içeren sıvı bir elektrolit çözeltisi barındırır. Bu sistemlerde bir hücre yığına elektrik akımı uygulandığında, hidroksit iyonları (OH⁻), elektrolit çözeltisi içerisinde katot bölgesinden anot yönüne doğru taşınır. Hidrojen gazı kabarcıkları katotta, oksijen gazı ise anotta üretilir. Çalışma sıcaklığı genellikle 60–90°C aralığındadır. Düşük maliyetli olması ve uzun ömürlü hücre yapısı ile öne çıkmasına rağmen; dinamik yük değişimlerine karşı düşük yanıt verme kabiliyeti,

yenilenebilir sistemlerle entegrasyonunda sınırlayıcı olabilir. Şekil 1.3’de tipik bir alkali su elektrolizörü hücresinin şematik gösterimi sunulmaktadır:



Şekil 1.3 Alkali su elektrolizör hücresinin şematik gösterimi

Şekil 1.3’de gösterildiği üzere alkali su elektrolizör hücresinde; H_2O , elektrik akımı sayesinde H_2 ve O_2 ye ayrılmaktadır. Katot bölgesinde H_2O molekülleri, elektron alarak H_2 ve OH^- ye dönüşmektedir. Bu OH^- iyonları, elektrolit içerisinde anoda doğru hareket ederken; anot bölgesinde oksidasyona uğrayarak O_2 ve H_2O açığa çıkmasına neden olur.

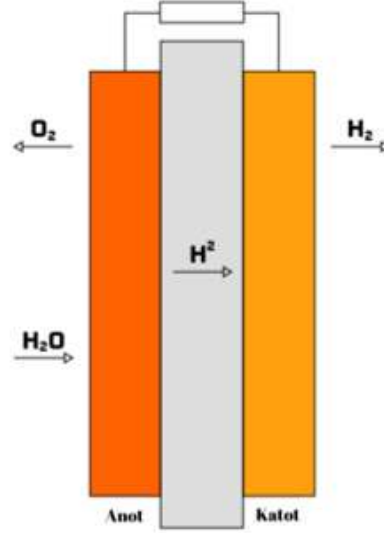
Bu yapı sayesinde, sistemde doğrudan şebekeden ya da yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektrik enerjisi ile sürdürülebilir hidrojen üretimi sağlanabilmektedir. Alkali sistemler, geniş ölçekli uygulamalarda tercih edilmekte olup; düşük işletme maliyetleri ve uygun teknolojik yapıları sayesinde özellikle sabit ve sürekli enerji beslemesi sağlanabilen tesislerde ön plana çıkmaktadır.

○ *PEM elektrolizör:*

PEM elektrolizörler, anot ve katot bölmeleri arasında proton iletimine olanak sağlayan yarı geçirgen bir membran içerir. Bu membran, aynı zamanda reaktif türlerin karışmasını önleyerek sistemin güvenliğini ve verimliliğini artırır. Sisteme doğru polaritede elektrik akımı uygulandığında su molekülleri anot bölgesinde elektrolize uğrayarak O_2 , elektronlar ve hidrojen iyonlarına (H^+) ayrışır. Oluşan

protonlar, proton değişim membranını geçerek katot bölgesine ulaşır ve burada elektronlarla birleşerek moleküler H_2 gazını oluşturur.

PEM elektrolizörler; gelişmiş elektrokimyasal performansları ve sistem entegrasyonundaki esneklikleriyle ne çıkan son teknoloji elektrolizör sistemlerindendir. Yüksek enerji dönüşüm verimliliği sayesinde, elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye yani hidrojene dönüştürülmesinde minimum kayıpla çalışırlar. Düşük sıcaklıklarda ($50\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$) hızlı tepki verebilmeleri, onları özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim karakteristiğine uyum sağlamak açısından son derece uygun hale getirir. şekil 1.4’de PEM elektrolizör sisteminin temel çalışma prensibi şematik olarak sunulmuştur:



şekil 1.4 PEM elektrolizörünün temel çalışma prensibi

şekil 1.4’te görüldüğü üzere, PEM elektrolizörünün merkezinde yer alan proton geçirgen membran, yalnızca H^+ iyonlarının geçişine izin vererek diğer gazların yani O_2 ve H_2 birbirine karışmasını engeller. Anotta gerçekleşen reaksiyonla oluşan protonlar PEM membran üzerinden katoda geçerken, elektronlar harici devreden katoda yönlendirilir. Katot tarafında da belirli reaksiyonlar gerçekleşir. Bu süreç, yüksek saflıkta hidrojen üretimini mümkün kılar. PEM elektrolizrlerinin çalışma sıcaklığı genellikle $50\text{--}80^\circ\text{C}$ arasında olup sistemin basınçla çalışabilme kabiliyeti, hidrojenin doğrudan basınçlı formda elde edilmesini sağlar. Bu da depolama ve taşıma süreçlerinde enerji tasarrufu sağlar. Ayrıca PEM

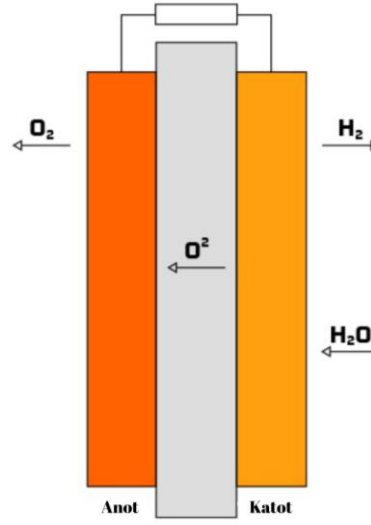
elektrolizörlerin ısınma için uzun bekleme sürelerine ihtiyaç duymadan hızlı şekilde devreye alınabilmeleri ve yüksek akım yoğunluğu kapasitesi, onları yenilenebilir enerji sistemlerine entegre edilmesi açısından son derece uygun kılar. Bu bağlamda HOMER Pro gibi optimizasyon yazılımları aracılığıyla PEM elektrolizörlerin kapasite planlaması, sistem verimliliği ve ekonomik uygunluğu analiz edilebilmektedir.

Kompakt tasarımları yer kısıtlaması olan tesislerde bile etkin kullanım imkânı sunarken, modüler yapıları sayesinde ölçeklenebilirlik açısından da büyük avantaj sağlar. Her ne kadar platin veya iridyum gibi yüksek performanslı ancak maliyetli katalizörler içerseler de, bu malzemelerin sunduğu yüksek dayanım, uzun servis ömrü ve üstün reaksiyon kinetiği, sistemin genel güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırarak yapılan yatırımın karşılığını verir niteliktedir.

○ *Katı oksit elektrolizör hücresi (SOEC):*

SOEC; ileri düzey elektrolizör teknolojileri arasında yer almakta olup yüksek sıcaklık aralığında (600–1000 °C) çalışan sistemlerdir. Bu hücrelerde elektrolit olarak katı oksit malzemeler, yaygın olarak da itria ile stabilize edilmiş zirkonya kullanılır. SOEC sistemlerinin en belirgin avantajı, sadece elektriksel enerjiye değil, aynı zamanda ısı enerjisine de dayalı çalışabilmeleri sayesinde termo-elektrokimyasal sinerjiyle yüksek sistem verimliliği (>%90) sunabilmeleridir. Bu sayede enerji girdisinin bir bölümü doğrudan ısıdan sağlanarak, elektriksel tüketim azaltılabilir ve süreç ekonomik hale getirilebilir.

Katot bölgesinde gelen su buharı, yüksek sıcaklıkta hidrojen ve oksijene ayrılırken, iyonik iletken elektrolit katmandan geçen oksit iyonları (O^{2-}) anot bölgesine taşınır ve burada oksijen gazı salınır. Bu mekanizma sayesinde elektriksel potansiyelin yanı sıra termal katkı ile enerji dönüşüm verimliliği maksimize edilir. Şekil 1.5’de SOEC elektrolizörünün çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 1.5 SOEC elektrolizörünün çalışma prensibi

Şekil 1.5’de SOEC’nin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ($600\text{--}1000^\circ\text{C}$) çalışan bu sistemde katot tarafında su buharı elektriksel enerji ve ısı enerjisi yardımıyla H_2 ve O^{2-} ayrışır. Oluşan O^{2-} , ortadaki katı elektrolit aracılığıyla anot tarafına taşınır. Anot kısmında bu iyonlar, elektronlarını bırakarak oksijen gazına dönüşür ve sistemden dışarı salınır. Böylece SOEC sistemi, yüksek sıcaklık avantajını kullanarak hem elektrik hem de ısı enerjisinden faydalanır ve verimli bir şekilde hidrojen üretimini mümkün kılar. Bu yapı, endüstriyel ölçekte enerji entegrasyonu için oldukça uygundur.

Bununla birlikte, SOEC sistemlerinin bazı teknik sınırlamaları da bulunmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklığı, sistemde kullanılan malzemelerde termal genleşme, yorulma, oksidasyon ve gaz sızıntısı gibi çeşitli dayanıklılık problemlerine neden olabilmektedir. Elektrot ve elektrolit malzemeleri arasında termal genleşme katsayılarının uyumsuzluğu, uzun vadeli çalışmalarda çatlamalara veya performans düşüşüne yol açabilmektedir. Ayrıca, termal çevrim ömrü, yani sistemin sık sık ısıtılıp soğutulmasına karşı dayanıklılığı da sınırlayıcı faktörlerden biridir.

SOEC teknolojisi, nükleer enerji santralleri, jeotermal sistemler veya endüstriyel proses atık ısılarıyla entegre edildiğinde, büyük ölçekli hidrojen üretimi için oldukça uygun bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, SOEC’ler genellikle yüksek

sabit ısı girdisi sağlanabilen ve yüksek hacimli üretim gerektiren endüstriyel tesisler için tercih edilmektedir.

Yenilenebilir enerji ile entegrasyon

Elektrolizör sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesi, fazla PV üretimi veya şebekede düşük enerji talebi dönemlerinde bu enerjinin yeşil hidrojen üretiminde kullanılmasını sağlar. Bu yöntem yalnızca enerji depolama çözümü sunmakla kalmaz; aynı zamanda elektroliz ile üretilen hidrojenin, amonyak üretimi, ısıtma, ulaştırma ve endüstriyel süreçlerde kullanılmasına da olanak tanır. Böylece hem şebeke istikrarı sağlanır hem de enerji verimliliği artırılmış olur.

1.1.1.3 Hidrojen depolama sistemleri

Hidrojen depolama sistemleri; elektrolizörler aracılığıyla yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojenin güvenli, verimli ve uzun vadeli şekilde muhafaza edilmesini sağlayan teknolojik altyapılardır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin süreksiz üretim karakteristikleri göz önüne alındığında üretilen hidrojenin daha sonra enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla depolanması, enerji arzının sürekliliği ve sistem güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu sistemler; enerji şebekesi üzerindeki yükü dengelemek, kesintili enerji üretimini yönetmek, gece saatlerinde enerji ihtiyacını karşılamak, amonyak üretimi gibi kimyasal prosesleri beslemek ve yakıt hücresi sistemleri ile entegrasyon sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [51].

○ Sıkıştırılmış gaz formunda depolama

En yaygın kullanılan hidrojen depolama yöntemi olan sıkıştırılmış gaz formunda depolama sistemleri, hidrojenin yüksek basınç altında (genellikle 150–700 bar) silindirik veya küresel tanklarda muhafaza edilmesi esasına dayanır. Bu sistemler; yüksek mukavemetli çelik alaşımları, karbon fiber kompozitleri veya alüminyum astarlı hibrit malzemelerden imal edilir. Sıkıştırma işlemi genellikle pistonlu veya membranlı kompresörlerle sağlanmakta olup bu süreçte ilave enerji tüketimi söz konusudur. Depolama tanklarının tasarımı, American Society of Mechanical Engineers ve International Organization for Standardization standartlarına uygun olarak; iç basınç dayanımı, sızdırmazlık güvenliği, patlama riski analizi ve çevresel

koşullara dayanıklılık kriterleri doğrultusunda gerçekleştirilir. Bu sistemler, taşınabilirlik avantajı ve ticari uygulamalardaki yaygınlığı sayesinde mikro-ölçekli ve dağıtık enerji sistemlerinde tercih edilmektedir. Elektrolizörlerde üretilen hidrojen genellikle düşük basınç seviyelerinde açığa çıktığı için taşımaya veya depolamaya uygun hale getirilebilmesi adına öncelikle yüksek basınçlara sıkıştırılması gerekmektedir. Bu işlem sonrasında hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğu 200 bar basınçta yaklaşık 1800 MJ/m³'e, 700 bar seviyesinde ise 4820 MJ/m³'e kadar yükselmektedir.

○ *Sıvı hidrojen depolama – kriyojenik sıkıştırma*

Hidrojenin sıvı formda depolanması gaz haline kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamakta ve hacimsel avantaj sunmaktadır. Ancak bu yöntem hidrojenin yüksek basınç ve kriyojenik sıcaklıklarda -140°C ve altı sıcaklıklarda depolamaya dayanır. Sıvılaştırma işlemi oldukça enerji yoğundur; tipik olarak hidrojenin özgül enerjisinin yaklaşık %30'u sıvılaştırma sürecinde kaybolur. Depolama tankları, vakum yalıtımlı çift cidarlı yapılarla tasarlanır ve termal kayıpların minimize edilmesi için düşük ısı geçirgenliğe sahip malzemelerle kaplanır. Bu sistemler özellikle havacılık, uzay ve yüksek yoğunluklu endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemin yüksek enerji maliyeti, evaporasyon yani yapıdaki suyun kısmi uçurulması kayıpları ve karmaşık altyapı gereksinimleri nedeniyle dağıtık enerji sistemlerinde yaygınlığı sınırlıdır.

○ *Metal hidrür bazlı depolama*

Metal hidrür sistemleri, hidrojenin katı fazda kimyasal olarak metalik alaşımlara absorbe edilmesi prensibine dayanır. Bu yöntem, yüksek güvenlik ve düşük basınçta (genellikle 1–10 bar) hidrojen depolama avantajı sunar. Kullanılan alaşımlar arasında titanyum, zirkonyum, magnezyum ve nadir toprak metalleri yer almaktadır. Hidrojen atomları bu metal matrislerine difüze olur ve metal-hidrojen bileşikler (hidrürler) oluşturur. Bu sistemlerin özgül enerji yoğunlukları sıvı ve gaz fazına göre daha düşüktür ancak güvenlik açısından öne çıkar. Isı değişim yüzeyleri aracılığıyla hidrür-yükleme ve boşaltma işlemleri kontrol edilir. Termodinamik denge sıcaklıkları ve hidrürleme/dehidrürleme kinetikleri, kullanılan alaşımın yapısına ve uygulama koşullarına göre değişmektedir. Metal

hidrür teknolojileri, özellikle mobilite sistemlerinde (örneğin insansız hava araçları) ve kompakt depolama gerektiren mikro şebekelerde araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır.

○ *Yeraltı depolama*

Geniş hacimli ve uzun süreli hidrojen depolama ihtiyacının karşılanabilmesi amacıyla tuz mağaraları, doğal yeraltı boşlukları ve deple edilmiş yani daha önce doğalgaz içerip artık ekonomik olarak üretilmeyecek kadar boşalmış yer altı doğal gaz sahaları olup bu gibi jeolojik formasyonlar hidrojenin depolanması için kullanılabilir. Bu yöntem büyük ölçekli enerji sistemlerinde mevsimsel enerji dengelemesi ve şebeke esnekliğinin artırılması açısından stratejik bir çözüm sunmaktadır. Ancak hidrojenin yüksek difüzyon kabiliyeti ve bazı mineral yapılarla reaksiyona girme potansiyeli nedeniyle jeokimyasal ve jeomekanik analizlerin titizlikle yapılması gereklidir. Bu tür sistemler genellikle ulusal ölçekte enerji güvenliği stratejilerinde kullanılmaktadır.

Hidrojen depolama sistemleri yeşil hidrojenin enerji sistemlerine etkin şekilde entegrasyonu için vazgeçilmez bir bileşen olup; seçilecek depolama yöntemi sistemin uygulama ölçeği, güvenlik gereksinimleri, enerji yoğunluğu hedefi ve ekonomik kriterlerine bağlı olarak belirlenmelidir. Gelişen malzeme bilimi, termal yönetim teknolojileri ve entegre yazılım modellemeleri gelecekte hidrojenin daha etkin, güvenli ve ekonomik bir şekilde depolanmasına olanak sağlayacaktır.

1.1.1.4 Amonyak üretim ve depolama sistemleri

Amonyak (NH_3), enerji taşıyıcısı olarak stratejik bir öneme sahip olmakla birlikte; hem uzun vadeli enerji depolama hem de tarımsal gübre endüstrisinde yüksek katma değerli bir kimyasal bileşik olarak değerlendirilmektedir. Amonyak üretimi özellikle yeşil hidrojenin kullanıldığı sistemlerde, düşük karbon ayak izi ile sürdürülebilir enerji dönüşümünün temel yapı taşlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, elektrolizörler vasıtasıyla yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojenin, atmosferik N_2 ile sentezlenerek amonyak haline dönüştürülmesi, karbon nötr veya karbon-negatif enerji döngülerinin oluşturulmasında kritik rol oynamaktadır.

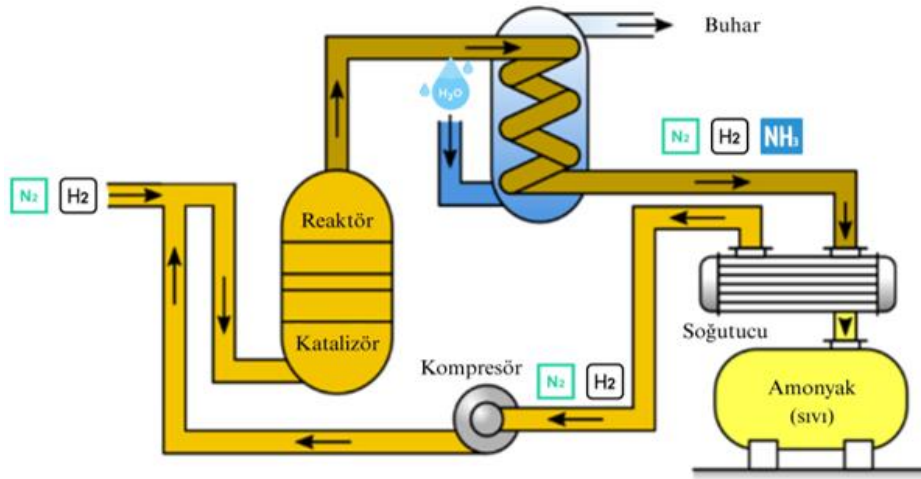
Amonyak üretim yöntemleri

○ *Haber-Bosch prosesi*

Haber Bosch prosesi, endüstriyel ölçekte amonyak üretimi için geliştirilen ve günümüzde hâla yaygın şekilde kullanılan temel sentez yöntemidir. Bu süreç, H_2 ile N_2 'nin doğrudan reaksiyona girmesiyle NH_3 elde edilmesini sağlar [52]. Bu egzotermik reaksiyonun gerçekleşmesi için belirli termodinamik ve kinetik koşulların sağlanması gerekmektedir. Haber-Bosch süreci, yüksek verimle çalışabilmesi için 400–500 °C sıcaklık ve 150–300 bar arası yüksek basınç altında yürütülür. Bu şartlar, reaksiyonun hem hızını artırmak hem de denge yönünü ürün tarafına kaydırmak amacıyla optimize edilmiştir.

Reaksiyonda kullanılan katalizör, genellikle demir bazlı olup potasyum ve alüminyum oksit gibi katkı maddeleriyle desteklenerek yüzey aktifliğinin artırılması sağlanır. Bu katalizör, N_2 molekülünün üçlü bağını kırarak reaksiyonun aktivasyon enerjisini düşürmekte kritik bir rol oynamaktadır.

Haber Bosch sistemlerinde, reaktörden çıkan ürün karışımı (NH_3 , N_2 ve H_2) genellikle soğutularak NH_3 yoğunlaştırılırken, geri kalan gaz karışımı tekrar reaktöre döndürülerek sistemdeki reaktant geri dönüşüm verimliliği artırılır. Bu geri dönüşüm döngüsü, prosesin enerji tüketimini azaltmaya yardımcı olur. Bu süreçte kullanılan H_2 , çoğunlukla geleneksel sistemlerde doğalgazdan buharla metan reformasyonu (Steam Methane Reforming - SMR) ve su-gaz kayması (Water Gas Shift - WGS) reaksiyonları ile elde edilirken, günümüzde karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla yeşil hidrojen gibi yenilenebilir kaynaklarla üretilmiş hidrojenin kullanımı ön plana çıkmaktadır [53]. Şekil 1.6'de, H_2 ve N_2 gazlarının doğrudan NH_3 sentezine yönelik olarak nasıl işlendiğini gösteren klasik Haber-Bosch prosesi bir akış diyagramı şeklinde sunulmaktadır. Sistem genel hatlarıyla reaksiyon bölgesi, ısı geri kazanım ünitesi, soğutma ünitesi ve gaz geri dönüşüm devresinden oluşmaktadır.



Şekil 1.6 Haber-Bosch sürecinin sistem şeması

Süreç, H_2 ve N_2 gazlarının belirli bir mol oranında (yaklaşık 3:1) karıştırılmasıyla başlar. Bu karışım, öncelikle yüksek basınç sağlamak amacıyla kompresör ünitesine gönderilir. Burada gazlar istenilen çalışma basıncına ulaşacak şekilde sıkıştırılır. Sıkıştırılan gaz karışımı daha sonra katalitik reaktör ünitesine yönlendirilir. Bu reaktörde genellikle demir bazlı bir heterojen katalizör yardımıyla yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında, N_2 ve H_2 arasında amonyak sentezi gerçekleşir. Ancak bu reaksiyon denge reaksiyonu olduğundan, tek geçişte %15–20 oranında amonyak oluşur; bu da sistemin optimizasyonunu zorunlu kılar. Reaktörden çıkan sıcak gaz karışımı, ısı eşanjörüne yani ısı geri kazanım ünitesine yönlendirilerek reaksiyonla ortaya çıkan ısı enerjisi sistemde yeniden kullanılır. Böylece enerji verimliliği artırılmış olur. Sonrasında bu karışım soğutucu üniteye gönderilerek sıcaklığı düşürülür. Düşen sıcaklıkla birlikte oluşan NH_3 yoğunlaşarak sıvı hâle gelir ve depolama tankına aktarılır. Gaz karışımının içinde hâlâ kullanılmamış N_2 ve H_2 bulunduğu için bu gazlar yeniden reaksiyon döngüsüne dâhil edilir. Bu geri dönüşüm mekanizması, sistemdeki gaz kayıplarını azaltmak ve üretim verimini artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

Bu sistem mimarisi sürekli üretim ve geri dönüşümlü reaksiyon döngüsü sayesinde endüstriyel ölçekte yüksek hacimli NH_3 üretimini mümkün kılar. Ancak bu süreç yüksek enerji tüketimi ve karbon salımı nedeniyle

sürdürülebilirlik açısından çeşitli sınırlamalar barındırmaktadır. Bu nedenle, günümüzde yeşil hidrojen temelli alternatif yöntemlerin geliştirilmesi ve entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

○ *Elektrokimyasal amonyak sentezi (E-NH₃)*

E-NH₃; amonyak üretiminde geleneksel yöntemlere alternatif olarak geliştirilen, düşük sıcaklık ve atmosferik basınç koşullarında çalışan çevre dostu bir teknolojidir. Bu yöntemde N₂, elektrokimyasal bir hücre içerisinde protonlar (H⁺) ve elektronlar (e⁻) ile doğrudan etkileşime girerek NH₃ moleküllerine indirgenmektedir [54]. Reaksiyon, genellikle suyun elektrolizi ile üretilen protonların ve harici güç kaynağından sağlanan elektronların bir katot elektrodu üzerinde N₂ ile reaksiyona girmesiyle başlar. Anot tarafında ise genellikle oksidasyon reaksiyonu gerçekleştirilerek proton kaynağı elde edilir. Bu sayede sistem çift taraflı yarı reaksiyonlarla NH₃ üretimini gerçekleştiren kompakt bir elektrokimyasal hücre yapısında çalışır.

Bu teknoloji özellikle düşük sıcaklıkta (~25–80 °C) ve atmosferik basınçta çalışması sayesinde enerji tüketimi bakımından son derece avantajlıdır. Ayrıca reaksiyonun doğrudan elektrik enerjisiyle sürdürülmesi sayesinde, sürecin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu kolaylaşmakta ve karbon emisyonları minimize edilmektedir. Bu durum, E-NH₃ teknolojisini hem çevresel sürdürülebilirlik hem de yerinde üretim açısından cazip bir çözüm hâline getirmektedir.

Ancak teknolojinin önünde hâlen çözülmeyi bekleyen ciddi teknik zorluklar bulunmaktadır. Bunların başında;

- Elektrot malzemelerinin aktivitesi ve seçiciliği,
- Elektrolit ile membran stabilitesi,
- Reaksiyon kinetikleri,
- Faradik verimlilik (electrochemical efficiency)

gibi kritik parametreler gelmektedir. Özellikle N₂ molekülünün inert doğası nedeniyle bağların kırılması oldukça zor olup yüksek aktivasyon enerjisi

gerektirmektedir. Bu da sistemin verimliliğini doğrudan etkileyen faktörlerdendir. Son yıllarda yapılan çalışmalar metal nitrürler, geçiş metali katalizörleri ve tek atom katalizörleri gibi yenilikçi elektrot malzemeleri kullanarak bu engellerin aşılabileceğini göstermiştir. Ayrıca katı elektrolit membranları, iyon iletkenliği ve kimyasal kararlılık açısından geliştirilmeye devam etmektedir.

Özetle E-NH₃, henüz laboratuvar ve pilot ölçek aşamasında olmasına rağmen desantralize, düşük maliyetli ve karbon nötr amonyak üretimi hedefi doğrultusunda büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu teknoloji özellikle yenilenebilir kaynaklardan elde edilen yeşil hidrojen ve doğrudan elektrik entegrasyonu ile desteklendiğinde gelecekteki sürdürülebilir amonyak üretim sistemlerinin temel bileşeni hâline gelebilir.

Amonyak depolama stratejileri

NH₃, fiziksel özellikleri açısından değerlendirildiğinde enerji taşıyıcısı olarak oldukça avantajlı bir bileşiktir. -33,34 °C kaynama noktası ve 18,6 MJ/kg özgül enerji içeriği sayesinde, özellikle hidrojen ile karşılaştırıldığında daha düşük enerji gereksinimiyle sıvılaştırılabilmesi onu büyük hacimlerde ekonomik ve güvenli biçimde depolanabilir hâle getirmektedir. Bu özelliği sayesinde NH₃, düşük sıcaklık (yaklaşık -33 °C) ve orta düzey basınç koşullarında (10–20 bar) sıvı fazda muhafaza edilebilir [55].

Endüstriyel ölçekte kullanılan amonyak depolama sistemleri genellikle basınca dayanıklı karbon çelik veya kriyojenik özellikli alaşım malzemelerden üretilmiş tanklardan oluşmaktadır. Bu tank sistemlerinde; çift cidarlı yapı ve termal izolasyon katmanları kullanılarak hem çevresel ısı geçişi en aza indirgenmekte hem de iç basınç stabilitesi sağlanmaktadır. Ayrıca gaz sızıntısı, patlama riski ve buharlaşma gibi operasyonel risklerin azaltılması amacıyla güvenlik valfleri, basınç sensörleri ve gaz izleme sistemleri ile donatılmıştır. Özellikle büyük ölçekli enerji sistemlerinde bu tür kriyojenik depolama teknolojileri, enerji güvenliği ve sürekliliği açısından kritik bir rol üstlenmektedir.

Geleneksel sıvı faz depolama teknolojilerine ek olarak, son yıllarda katı hal amonyak taşıyıcıları ve adsorpsiyon bazlı depolama çözümleri üzerine yapılan araştırmalar

dikkat çekmektedir. Bu alanda öne çıkan teknolojilerden biri Metal-Organik İskelet Yapılar (MOF – Metal Organic Frameworks) kullanılarak geliştirilen amonyak adsorban sistemleridir. MOF'lar yüksek yüzey alanı, gözeneklilik ve kimyasal fonksiyonelleştirilebilirlik gibi özellikleri sayesinde NH_3 'ü düşük sıcaklık ve basınç koşullarında yüksek yoğunlukla adsorbe edebilmekte ve gerektiğinde geri salabilmektedir [56]. Bu yönüyle, MOF tabanlı sistemler, özellikle mobilite odaklı enerji sistemleri (örneğin taşınabilir jeneratörler, araç içi yakıt sistemleri) ve küçük ölçekli bağımsız enerji üniteleri açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Bunun yanı sıra katı amonyak taşıyıcılar olarak adlandırılan ve kimyasal olarak NH_3 'ü stabilize edebilen yeni nesil bileşikler (örneğin amonyum tuzları veya kompleks metallerle etkileşimli yapılar) tehlike sınıfını azaltan, düşük basınçta taşınabilir ve kontrollü geri kazanım sağlayan stratejik alternatifler arasında değerlendirilmektedir.

Amonyak depolama teknolojileri; gerek yüksek enerji yoğunluğu ve sıvılaştırma kolaylığı gerekse gelişen katı faz teknolojileri ile birlikte hem merkezi hem de dağıtık enerji sistemleri için çok yönlü çözümler sunmaktadır. Yenilenebilir kaynaklarla entegre enerji sistemlerinde NH_3 'ün hem üretimi hem de depolanması enerji arz güvenliği, uzun vadeli enerji saklama kabiliyeti ve karbon-nötr yakıt hedefleri açısından stratejik bir rol üstlenmektedir.

- *Enerji taşıyıcısı olarak amonyağın rolü*

Amonyak yalnızca enerji depolama aracı olarak değil aynı zamanda doğrudan enerji taşıyıcısı ve ikincil hidrojen kaynağı olarak da işlev görebilen çok yönlü bir kimyasal bileşiktir. Yüksek enerji yoğunluğu, kolay sıvılaştırılabilirlik özelliği ve düşük depolama basıncı gereksinimi onu özellikle yenilenebilir enerji temelli üretim sistemleri açısından stratejik bir alternatif haline getirmektedir. Bu bağlamda amonyak, doğrudan yakıt olarak termal yanma sistemlerinde veya katalitik yanma odaklı enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılabilir. Ancak düşük yanma reaktivitesi ve NO_x oluşumu potansiyeli nedeniyle bu tür uygulamalarda gelişmiş yanma teknolojileri gereklidir.

Bunun yanı sıra amonyak; “NH₃ craker” sistemleri aracılığıyla yeniden hidrojen gazına dönüştürülebilir. Bu dönüşüm süreci genellikle yüksek sıcaklıkta (500–800 °C) çalışan heterojen katalizörler (örneğin nikel veya ruthenyum bazlı) kullanılarak gerçekleştirilir ve elde edilen H₂, özellikle yakıt hücresi sistemlerinde yeniden değerlendirilerek elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir. Bu süreç yeşil hidrojenin dolaylı biçimde taşınması ve depolanması açısından önemli bir çözüm sunmaktadır. Zira saf hidrojenin düşük yoğunluğu, yüksek difüzyon katsayısı ve metal yüzeylerde neden olduğu korozyon gibi lojistik zorlukları, amonyak formuna dönüştürülerek önemli ölçüde aşılabilmektedir.

Ayrıca NH₃’ün uluslararası enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmasının en önemli nedenlerinden biri sıvı hâlde taşınabilme kabiliyeti ve mevcut gaz altyapılarıyla uyumlu olmasıdır. Amonyak, kriyojenik koşullarda sıvılaştırılabildiği için özellikle deniz aşırı enerji ticareti (örneğin yenilenebilir enerji ihracatı yapan ülkelerden enerji ithalatçısı ülkelere) kapsamında yüksek hacimli ve ekonomik taşıma çözümleri sunmaktadır. Bu yönüyle NH₃, karbon nötr enerji sistemlerinin uluslararası düzeyde ölçeklenebilirliği açısından stratejik bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir. Amonyak bazlı enerji taşıma ve dönüşüm stratejileri, yeşil hidrojenin üretildiği noktadan farklı coğrafi bölgelere etkin biçimde taşınmasını ve gerektiğinde yeniden kullanılabilir forma dönüştürülmesini mümkün kılarak düşük karbonlu küresel enerji ticareti açısından önemli bir köprü işlevi görmektedir.

- *Döngüsel karbon ekonomisi ve amonyak*

Döngüsel karbon ekonomisi; karbonun üretim, tüketim ve bertaraf süreçlerinde atmosfere salınmadan sistem içerisinde yeniden değerlendirilmesini amaçlayan, sürdürülebilir kalkınma odaklı bir enerji ve kaynak yönetim yaklaşımıdır. Bu yaklaşım doğrultusunda karbonun doğrudan yakma veya depolama gibi tek yönlü işlemler yerine yeniden kullanım, geri kazanım ve dönüştürme yoluyla enerji döngüsünde tutulması hedeflenmektedir. NH₃, bu döngüsel sistem içerisinde hem enerji taşıyıcısı hem de karbon salınımını sınırlayan bir yapıtaşı olarak stratejik önem arz etmektedir.

Öncelikle yeşil hidrojen temelli amonyak üretimi, fosil kaynaklardan türetilen konvansiyonel hidrojenin yerine su elektrolizi ile elde edilen H_2 'nin kullanılması sayesinde üretim aşamasında karbon emisyonunu sıfıra yakın düzeye indirmektedir. N_2 bu yeşil hidrojen ile Haber-Bosch veya elektrokimyasal yöntemlerle reaksiyona sokulması sonucunda elde edilen yeşil amonyak, döngüsel karbon ekonomisi kapsamındaki karbon nötr üretim stratejilerine birebir uyum sağlar. Özellikle bu sürecin yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenmesi, enerji sistemlerinin fosil bağımlılığını azaltarak karbon döngüsünün kapatılmasına olanak tanır.

Ayrıca NH_3 uzun vadeli enerji depolama aracı olarak, değişken yenilenebilir enerji üretiminin sebep olduğu arz-talep dengesizliklerini dengeleyebilecek kapasitededir. Geleneksel batarya sistemlerinin sınırlı ölçeklenebilirliği ve ekonomik ömrü göz önüne alındığında NH_3 'ün yüksek enerji yoğunluğu, kolay taşınabilirliği ve kimyasal kararlılığı onu mevsimsel enerji depolama ve şebeke dengeleme sistemlerinde öne çıkaran alternatif çözümlerden biri hâline getirmektedir. NH_3 ayrıca gerek doğrudan yakıt olarak gerekse yeniden H_2 'ye dönüştürülerek çok kaynaklı enerji dönüşüm stratejilerinde kullanılabilir.

Döngüsel karbon ekonomisinin önemli uygulama alanlarından biri olan tarım sektörü, amonyakın değer zinciri boyunca sürdürülebilirliğini somutlaştıran bir diğer alandır. Özellikle yeşil amonyak temelli amonyum nitrat ve üre gübreleri, fosil yakıt kullanımına bağlı olarak üretilen kimyasal gübrelerin yerini alarak tarımın karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum gıda sistemlerinde karbon izleme politikaları ile uyumlu, karbon nötr üretim zincirlerinin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca atık su arıtma tesisleri gibi altyapılarda biyogazdan elde edilen yeşil hidrojenin amonyak üretiminde kullanılması, hem atık yönetiminin hem de enerji dönüşümünün entegre bir yapıya kavuşturulmasını mümkün kılar.

Döngüsel karbon ekonomisi kapsamında değerlendirildiğinde amonyak; üretim, depolama, taşımacılık ve yeniden kullanım aşamalarının tamamında karbon dengesine katkı sağlayan, çok fonksiyonlu bir enerji taşıyıcısıdır. Aynı zamanda NH_3 ; çevresel açıdan döngüsel, ekonomik açıdan sürdürülebilir ve teknolojik olarak ölçeklenebilir bir yapıya sahip olduğu için, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde karbon yönetimi politikalarının entegre parçası olarak konumlandırılmaktadır.

Yeşil amonyak teknolojilerinin gelişimi ve döngüsel karbon ekonomisiyle bütünleşmesi; enerji sektöründe karbonsuzlaştırma hedeflerinin gerçekleştirilmesi, atıkların enerjiye dönüştürülmesi, gıda ve enerji güvenliğinin artırılması ve iklim değişikliği ile mücadele süreçlerinde bütüncül bir çözüm platformu sunmaktadır.

1.1.1.5 Konvertörler ve enerji dönüşüm bileşenleri

HRES kapsamında farklı enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin uyumlu bir şekilde entegre edilmesi ve enerji iletim/dönüşüm verimliliğinin maksimize edilmesi amacıyla kullanılan konvertörler ve enerji dönüşüm bileşenleri, sistem mimarisinin kritik yapı taşlarındandır. Bu bileşenler, enerji üretiminden nihai tüketiciye kadar olan süreçte gerilim ve akım seviyelerinin uyumlu hale getirilmesini, enerjinin tek yönlü veya çift yönlü dönüşümlerle iletilmesini ve yük taleplerine uygun kontrol stratejileri ile sistemin optimize edilmesini sağlar.

DC-DC konvertörler

DC-DC konvertörler, farklı gerilim seviyelerine sahip DC akım kaynakları arasında gerilim dönüşümü sağlayan güç elektroniği üreticileridir [57]. HRES uygulamalarında; PV paneller, bataryalar, elektrolizör sistemleri ve hidrojen tankları arasında enerji uyumu için yaygın olarak kullanılır.

- *Buck dönüştürücü (step-down converter)*: Buck dönüştürücü giriş gerilimini düşürerek daha düşük bir çıkış gerilimi elde edilmesini sağlayan doğrusal olmayan bir DC-DC dönüştürücü topolojisidir. Anahtar eleman genellikle bir MOSFET) olur; diyot, endüktör ve çıkış kapasitöründen oluşur. Anahtarın periyodik olarak açılıp kapanması

sonucu indüktörde enerji biriktirilir ve serbest bırakılır, bu sayede çıkış gerilim kontrol altında tutulur. Güneş paneli regülatörleri, batarya şarj sistemleri, gömülü sistemler ve düşük gerilimle çalışan elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılır.

- *Boost dönüştürücü (step-up converter):* Boost dönüştürücü, giriş gerilimini yükselterek daha yüksek bir çıkış gerilimi elde edilmesini sağlayan bir enerji yoğunlaştırıcı devredir. Anahtarlama sırasında indüktör üzerinde enerji depolanır; anahtar kapatıldığında ise bu enerji çıkışa yönlendirilerek çıkış gerilimi artırılır. PV sistemlerde panel gerilimini batarya seviyesine yükseltmek, LED sürücüler, elektrikli araçlar ve güç faktörü düzeltme devrelerinde kullanılır.
- *Buck-Boost dönüştürücü:* Buck-Boost dönüştürücü, giriş gerilimini hem yükseltebilen hem de düşürebilen bir DC-DC dönüştürücü türüdür. Ancak çıkış gerilimi genellikle ters polaritelidir. Devre topolojisi, hem Buck hem de Boost karakteristiklerini bir arada taşır. İndüktör, girişle seri bağlıdır ve anahtarlama frekansına göre enerji depolayıp boşaltır. Batarya destekli sistemlerde, geniş giriş aralığına sahip güç kaynaklarında, enerji hasat sistemlerinde kullanılır.
- *SEPIC dönüştürücü (single-ended primary-inductor converter):* SEPIC, giriş geriliminden bağımsız olarak sabit bir çıkış gerilimi elde edilmesini sağlayan bir DC-DC dönüştürücü topolojisidir. Hem Buck hem de Boost yeteneklerine sahip olması ve çıkış geriliminin pozitif olması açısından Buck-Boost'tan farklıdır. Devrede iki endüktör (veya bir çift sargılı trafo), iki kapasitör ve bir diyot bulunur.

Avantajları:

- ✓ Geniş giriş voltajı aralığına karşılık sabit çıkış sağlar,
- ✓ Pozitif çıkış gerilimi,
- ✓ Sürekli giriş akımı, PV sistemler için avantajlıdır.

PV sistemlerindeki MPPT uygulamalarında, batarya şarj sistemlerinde, taşınabilir cihazlarda, elektrikli araçlarda ve geniş giriş voltaj değişimlerine sahip güç kaynaklarında yaygın bir şekilde kullanılır.

Buck, Boost, Buck-Boost ve SEPIC gibi topolojilere sahip DC-DC konvertörler; anlık enerji üretimi ve tüketimi arasındaki farkları dengeleyerek sistem istikrarını sağlar.

MPPT algoritmaları entegre edilmiş DC-DC konvertörler, PV panellerin ısıtım ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak anlık maksimum güç çıkış noktasında çalışmasını sağlar. Bu da enerji üretim verimliliğini arttırmakta ve enerji kayıplarını minimize etmektedir. Aynı zamanda konvertör verimliliği %95'in üzerinde değerlere ulaşarak sistem performansına pozitif katkı sağlamaktadır.

DC-AC konvertörler (inverterler)

DC-AC konvertörler, DC kaynaklardan sağlanan elektrik enerjisini AC'ye dönüştüren temel güç elektroniği bileşenleridir. HRES kapsamında kullanılan invertörler, özellikle PV sistemler, batarya bankaları ve elektrolizör gibi bileşenlerden elde edilen DC enerjinin, konvansiyonel şebeke altyapısı ve AC tabanlı tüketici yükleriyle uyumlu hâle getirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu dönüşüm süreci sinüs dalga formunda, istenen frekans ve gerilim düzeyine sahip kararlı bir AC çıkışı sağlayacak şekilde gerçekleştirilir. Modern inverter sistemleri yalnızca enerji dönüşümü sağlamakla kalmayıp; şebeke ile senkronizasyon, gerilim regülasyonu, frekans stabilizasyonu, harmonik bastırma ve güç faktörü düzeltme (PFC) gibi gelişmiş kontrol fonksiyonları da sunmaktadır. Ayrıca IEEE 1547, EN 50549 gibi uluslararası şebeke entegrasyon standartlarına uygun çalışması sayesinde, sistemin güvenli ve istikrarlı bir şekilde şebekeye bağlanmasına olanak tanır.

Çift yönlü (bidirectional) inverter konfigürasyonları, yalnızca şebekeye enerji aktarımıyla sınırlı kalmayıp ihtiyaç hâlinde şebekeden enerji alımına da olanak tanıyarak dinamik enerji yönetimi sağlar. Bu yapı enerji arz ve talebi arasında esnek bir dengeleme kabiliyeti sunmakta, özellikle yenilenebilir enerji üretiminin değişkenlik gösterdiği koşullarda sistem istikrarını korumaktadır. Ayrıca bu sistemler yük önceliklendirme, enerji fazlasının satışı, batarya yönetimi ve yük yönetimi gibi

gelişmiş akıllı enerji yönetim stratejileri ile entegre çalışarak karbon-nötr bir enerji altyapısının tesis edilmesine katkı sağlar.

İnverter topolojileri, sistemin gücüne, faz sayısına, bağlanma şekline ve uygulama ihtiyacına göre değişkenlik gösterir. Literatürde yaygın olarak kullanılan inverter topolojileri; H-Köprü (Full-Bridge), Üç Fazlı Köprü ve Çok Seviyeli İnverterlerdir. H-Köprü İnverterler; dört adet anahtarlama elemanından oluşur. Genellikle düşük güçlü tek fazlı sistemlerde kullanılır. DC gerilimi iki yönlü olarak AC'ye çevirir. PWM sinyalleriyle kontrol edilir. Üç Fazlı Köprü İnverter; altı anahtarlama elemanına sahip olup, her faz için iki anahtar içerir. Orta ve yüksek güçlü sistemlerde tercih edilir. PV sistemlerde şebekeye bağlantıda sıklıkla kullanılır. Çok Seviyeli İnverterler; Geleneksel iki seviyeli inverterlerin aksine, çıkışta birden fazla gerilim seviyesi üretirler.

AC-DC konvertörler (doğrultucular)

AC-DC konvertörler, AC kaynaklardan elde edilen enerjiyi DC'ye dönüştürerek sistemde yer alan DC tabanlı bileşenlerle uyumlu hâle getiren temel güç elektroniği bileşenleridir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde bu konvertörler; özellikle biyogaz jeneratörleri, mikro türbinler veya şebeke bağlantılı AC kaynaklar gibi enerji üretim bileşenlerinden gelen elektrik enerjisinin, elektrolizörler, batarya sistemleri, hidrojen ve amonyak üretim modülleri gibi DC karakterli bileşenlere aktarılabilmesi için kritik bir arayüz görevi üstlenmektedir.

Bu doğrultucular yalnızca AC sinyalin DC'ye çevrilmesini değil; aynı zamanda çıkışta sabit, regüle edilmiş ve düşük dalgalanmalı (low ripple) bir gerilim sağlayarak elektrokimyasal sistemlerin güvenli ve kararlı çalışmasını garanti altına alır. Özellikle alkali su elektrolizörü ve PEM tipi elektrolizörler, gerilim ve akım seviyelerinde ani dalgalanmalara karşı oldukça hassas olup düşük harmonik distorsiyona ve yüksek gerilim kararlılığına sahip doğrultucu sistemler gerektirir. Bu bağlamda aktif doğrultucu topolojileri (örneğin: PWM kontrollü tam köprü doğrultucular) klasik diyot bazlı doğrultuculara kıyasla daha yüksek performans sunmakta, aynı zamanda güç faktörünü iyileştirme ve reaktif güç kompanzasyonu gibi ilave faydalar sağlamaktadır. Yüksek frekansta çalışan anahtarlama konvertörler, manyetik bileşenlerin boyutlarını

küçültürerek sistemin kompakt hâle getirilmesine olanak tanırken; gelişmiş PI, PID veya yapay zekâ tabanlı kontrol algoritmaları sayesinde anlık yük değişimlerine karşı hızlı yanıt verme kapasitesine sahiptir. Ayrıca bu sistemler termal koruma, gerilim sınırlama, akım kontrollü çalışma gibi güvenlik modülleriyle donatılarak elektrolizörlerin ömrünü uzatmakta ve sistemin genel enerji dönüşüm verimliliğini artırmaktadır. AC-DC doğrultucular, HRES mimarisinde yalnızca güç aktarımı değil; aynı zamanda akıllı enerji yönetimi, güvenlik, verimlilik ve şebeke etkileşimi açısından sistemin performansını şekillendiren stratejik bileşenlerdir. Yüksek kaliteli doğrultma sistemlerinin entegrasyonu özellikle yeşil hidrojen üretim süreçlerinde kesintisiz ve kararlı bir enerji akışını garanti altına alarak sistemin karbon nötr hedeflerine ulaşmasında temel rol oynamaktadır.

Güç elektroniği entegrasyonu ve yönetimi

Güç elektroniği sistemleri; HRES'nin tüm bileşenleri arasında yüksek verimli enerji akışı, hassas kontrol ve sistem kararlılığı sağlamak amacıyla geliştirilen temel dönüşüm ve yönetim altyapılarıdır. Bu sistemler; PV paneller, biyogaz jeneratörleri, elektrolizörler, hidrojen ve amonyak üretim modülleri gibi farklı kaynaklardan elde edilen enerjinin farklı gerilim ve frekans düzeylerine uygun hâle getirilerek senkronize edilmesini sağlar. Modern HRES mimarisinde kullanılan DC-DC, DC-AC ve AC-DC konvertörlerin tamamı gelişmiş mikrodenetleyici tabanlı gömülü kontrol üniteleri, enerji yönetim sistemleri (Energy Management System - EMS) ve SCADA platformları ile entegre çalışmaktadır. Bu kontrol altyapıları; sistemin anlık üretim, tüketim, depolama ve şebeke etkileşimi verilerini sürekli izleyerek gerçek zamanlı optimizasyon sağlar. Örneğin; PV sistemden elde edilen fazla enerji, sistem yükünün düşük olduğu saatlerde DC-DC konvertör aracılığıyla elektrolizöre yönlendirilerek hidrojen üretim sürecine entegre edilebilir. Aynı şekilde talep artışı anında enerji ihtiyacı bataryalardan ya da hidrojenin yeniden elektrik üretimine katkısıyla karşılanabilir. Bu entegrasyonun en büyük avantajlarından biri yük talebiyle üretim kapasitesi arasındaki dengenin akıllı kontrol algoritmaları (PI, PID, bulanık mantık, yapay sinir ağları vb.) ile dinamik olarak ayarlanabilmesidir. Böylece sistem hem yüksek verimli çalışmayı hem de şebeke stabilitesi için gerekli olan gerilim, frekans ve güç faktörü kontrolünü eş zamanlı olarak gerçekleştirebilir. Ayrıca sistemin çift

yönlü enerji akışı özelliği sayesinde şebekeye fazla enerji satılabilirken enerji açığında şebekeden enerji alınması da mümkündür.

Güç elektroniği entegrasyonu aynı zamanda reaktif güç yönetimi, gerilim/frekans regülasyonu, harmonik filtreleme ve yük atma stratejileri gibi işlevlerle sistemin güç kalitesi (Power Quality) açısından da yüksek standartlarda çalışmasını sağlar. Bu işlevler, özellikle yenilenebilir kaynakların yüksek penetrasyon seviyelerine ulaştığı senaryolarda şebeke etkileşimli çalışmanın sürekliliği için kritik önem taşır.

Sonuç olarak güç elektroniği entegrasyonu, sadece enerji dönüşümünü sağlamakla kalmayıp aynı zamanda sistemin tüm üretim ve tüketim bileşenlerini senkronize eden, kararlı, verimli ve karbon-nötr bir enerji altyapısının tesis edilmesinde stratejik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Özellikle döngüsel karbon ekonomisi çerçevesinde; üretim, tüketim, depolama ve geri dönüşüm süreçlerinin bütünsel şekilde optimize edilmesinde, bu teknolojilerin katkısı yadsınamaz düzeydedir.

1.1.1.6 Enerji depolama sistemleri

HRES kapsamında ESS; üretim ve tüketim arasındaki zaman uyumsuzluğunun dengelenmesinde, sistem kararlılığının sağlanmasında ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğasına karşı enerji arz güvenliğinin teminat altına alınmasında kritik rol oynamaktadır. Bu sistemler şebekeye bağlı ya da bağımsız uygulamalarda anlık enerji ihtiyaçlarını karşılamak, üretim fazlası enerjiyi depolamak ve gerektiğinde kullanıma sunmak amacıyla entegre edilir. Bu çalışmada ele alınan HRES modeli; PV tabanlı elektrik üretimi, biyogaz dönüşüm süreçleri ve elektrolizör tabanlı yeşil hidrojen üretimi gibi birbirinden farklı ve eşzamanlı çalışabilen enerji kaynaklarını içermektedir. Sistem içerisinde üretilen fazla enerji yalnızca anlık taleplerde kullanılmakla kalmayıp, aynı zamanda çeşitli enerji taşıyıcıları (örneğin hidrojen ve amonyak) vasıtasıyla kimyasal formda da depolanabilmektedir. Bu bağlamda enerji depolama çözümleri; elektriksel, kimyasal ve termokimyasal olmak üzere çok katmanlı bir yapıya sahiptir.

Batarya enerji depolama sistemleri (BESS)

Batarya tabanlı sistemler, doğrudan elektrik enerjisinin kimyasal forma dönüştürülerek depolanmasını sağlayan ve hızlı yanıt süresi ile öne çıkan ESS türleridir. Lityum-iyon, lityum-demir fosfat (LiFePO_4) ve gelişmiş kurşun-asit sistemler; HRES yapılarına uygun olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu sistemler inverter ve şarj regülatörü aracılığıyla PV panellerle entegre edilerek gündüz saatlerinde üretilen fazla enerjiyi depolar ve gece ya da bulutlu günlerde sistem yükünü destekler. BESS sistemlerinin tasarımı sırasında kapasite (kWh), deşarj oranı (C-rate), döngü ömrü ve termal yönetim stratejileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Hidrojen tabanlı enerji depolama

Bu çalışmada olduğu gibi elektrolizörlerle üretilen yeşil hidrojen, doğrudan enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilebilmekte ve uzun süreli enerji depolama çözümü sunmaktadır. Üretilen hidrojen, sıkıştırılmış gaz hâlinde yüksek basınçlı tanklarda sıvı hâlde kriyojenik tanklarda ya da metal hidrür yapıların içerisinde kimyasal olarak depolanabilir. Hidrojenin daha sonra yakıt hücrelerinde, içten yanmalı motorlarda ya da amonyak sentezi gibi reaksiyonlarda kullanılması, sistemin esnekliğini ve döngüsel yapısını desteklemektedir.

Amonyak depolama

Elektrolizle elde edilen hidrojenin atmosferik azot ile reaksiyona sokulması sonucu üretilen amonyak, enerji taşıyıcısı olarak depolanabilir. Amonyak, hidrojen aksine sıvılaşabilmesi ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle uzun mesafeli taşımaya ve büyük ölçekli depolamaya uygun bir çözümdür. Amonyak daha sonra yeniden hidrojen üretiminde, yakıt hücrelerinde ya da doğrudan yanma süreçlerinde enerjiye dönüştürülebilir.

Entegrasyon ve kontrol

Enerji depolama sistemlerinin HOMER Pro yazılımında tanımlanması; sistem kapasite optimizasyonu, şebeke bağımlılığının azaltılması, yük profiline uyum ve sistemin ekonomik sürdürülebilirliği açısından kritik önemdedir. Depolama sistemlerinin kontrol algoritmaları; enerji üretim fazlası anlarında depolamayı, ihtiyaç anlarında ise yükü beslemeyi önceliklendiren mantıklarla yapılandırılmalıdır. Ayrıca sistemdeki

enerji akışı; inverterler, şarj regülatörleri ve güç elektroniği konvertörleri ile senkronize biçimde yönetilmelidir.

1.1.2 HOMER Pro yazılımı ile HRES sistemlerinin optimizasyonu

HOMER Pro; karmaşık hibrit enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan modellenmesi, simülasyonu ve optimizasyonu amacıyla geliştirilmiş profesyonel bir analiz aracıdır. NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilen bu yazılım, özellikle yenilenebilir enerji entegrasyonunun teknik fizibilitesinin değerlendirilmesi ve maliyet etkin senaryoların belirlenmesi için küresel ölçekte yaygın olarak kullanılmaktadır [59].

Bu tez kapsamında, atık su arıtma tesisine entegre edilen PV, biyogaz, hidrojen üretimi, hidrojen depolama tankları ve amonyak sentez ünitesi gibi çok sayıda enerji bileşeninin senkronize çalışabileceği döngüsel karbon ekonomisine dayalı bir HRES modeli oluşturulmuş ve HOMER Pro platformu üzerinde detaylı simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

HOMER Pro yazılımı; belirli bir zaman aralığına ait yük profili, kaynak verisi (güneş ışınlımı, sıcaklık vb.), bileşen teknik parametreleri, yatırım ve işletme maliyetleri gibi girdilere dayalı olarak önceden tanımlanmış senaryolara göre sistem konfigürasyonlarını analiz eder. Ardından en uygun tasarımı; Net Present Cost (NPC), Levelized Cost of Energy (LCOE), toplam emisyonlar, yenilenebilir enerji penetrasyonu gibi kritik performans göstergeleri açısından değerlendirerek kullanıcıya sunar.

Bu çalışmada kullanılan HOMER Pro modellemesinde;

- ✓ PV panellerin üretim kapasitesi ve radyasyon verisi esas alınarak mevsimsel değişkenlik dikkate alınmış,
- ✓ Biyogaz sistemleri için günlük üretim potansiyeli ve kojenerasyon ile elektrik-ısı üretim kabiliyeti entegre edilmiş,
- ✓ Elektrolizörler aracılığıyla yeşil hidrojen üretimi modellenmiş, üretim fazlası enerjinin hidrojen ve amonyak üretiminde nasıl değerlendirilebileceği analiz edilmiştir,

- ✓ Hidrojen ve amonyak depolama tankları, enerji sürekliliği ve sistem esnekliği açısından tanımlanmıştır,
- ✓ Konvertörler, invertörler ve enerji dönüşüm bileşenleri doğru şekilde yapılandırılarak AC-DC akış optimizasyonu sağlanmıştır.

HOMER Pro'nun çok senaryolu analiz yeteneği, bu çalışmada sistemin farklı konfigürasyonlarda performansını kıyaslama ve ekonomik-optimum sistem tasarımını seçme sürecinde kritik rol oynamıştır. Ayrıca CO₂ emisyonlarının azaltımı, fosil yakıt kullanımının düşürülmesi ve enerji maliyetlerinin minimize edilmesi gibi çevresel ve ekonomik hedeflere ulaşılabilirliği değerlendirme imkânı da sunmuştur.

Bu bağlamda HOMER Pro; yalnızca teknik bir simülasyon aracı değil, aynı zamanda sürdürülebilir enerji dönüşümünün planlanmasında karar destek sistemi görevi gören çok boyutlu bir optimizasyon platformu olarak değerlendirilmiştir.

1.1.3 Döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımı

1.1.3.1 Döngüsel karbon ekonomisinin tanımı

Döngüsel karbon ekonomisi, geleneksel lineer ekonomi modeline alternatif olarak geliştirilmiş sürdürülebilir bir yaklaşım olup, "al, kullan, at" mantığından uzaklaşıp, karbonun üretimden tüketime ve yeniden üretime kadar olan tüm süreçlerde dolaşıma alınmasını hedefleyen kapalı çevrimli bir sistem tasarımıdır [60]. Bu model özellikle fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin neden olduğu yüksek karbon salımlarını minimize etmek amacıyla karbonu bir atık değil, yeniden değerlendirilebilir bir kaynak olarak ele alır. Bu bağlamda döngüsel karbon ekonomisi; karbondioksit salımının azaltılmasını, karbonun yakalanmasını, yeniden kullanılmasını (Carbon Capture, Utilization and Storage - CCUS) ve sürdürülebilir yakıt formlarına dönüştürülmesini esas alır.

Döngüsel karbon ekonomisinin temel bileşenleri şu dört temel stratejiye dayanır [61]:

1. Karbonu Azalt (Reduce),
2. Karbonu Geri Kazan (Reuse),
3. Karbonu Geri Dönüştür (Recycle),
4. Karbonu Ortadan Kaldır (Remove).

Bu dört temel yaklaşım enerji sistemlerinin tasarımında, üretim süreçlerinde, yakıt dönüşüm teknolojilerinde ve atık yönetimi altyapılarında bütünlük bir şekilde uygulanarak net sıfır emisyon hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlar.

Döngüsel kavram ekonomisinin kavramsal altyapısı; yalnızca çevresel sürdürülebilirlik değil aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik, enerji güvenliği ve kaynak verimliliği hedeflerini de gözetir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, enerji depolama teknolojilerinin, karbonsuz yakıtların ve atık bazlı üretim süreçlerinin bu çerçevede entegre edilmesi karbon ayak izinin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır.

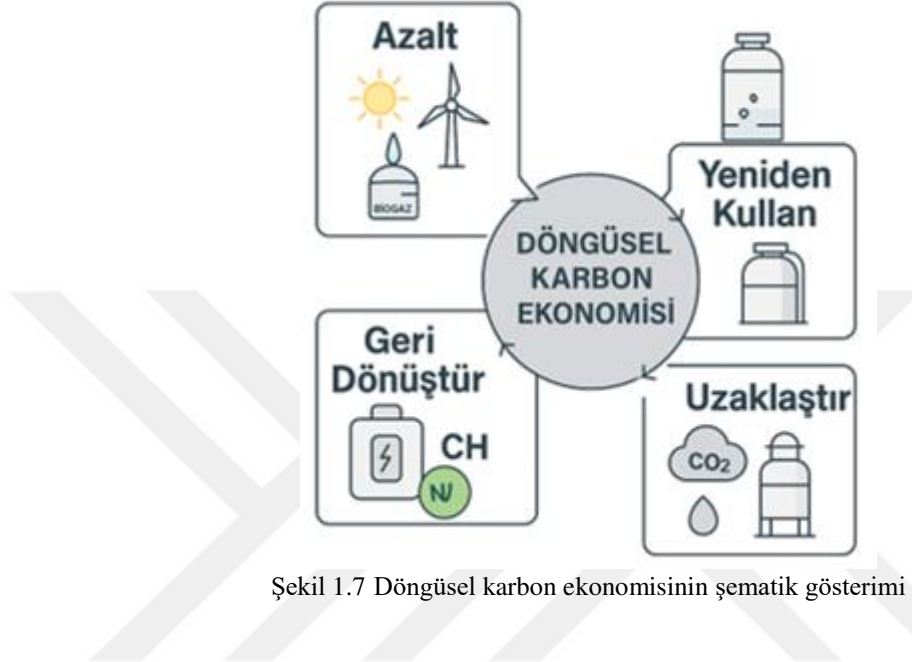
Bu çalışmada olduğu gibi; PV sistemlerden elde edilen enerji ile çalışan elektrolizörlerin yeşil hidrojen üretimi için kullanılması, bu hidrojenin amonyak sentezinde değerlendirilmesi ve biyogaz üretiminin sistem içinde yeniden enerjiye dönüştürülmesi, karbon salımının minimize edilmesini ve enerjinin farklı formlarda tekrar tekrar kullanılabilmesini sağlayan bir döngüsel enerji modelinin temelini oluşturmaktadır. Böylece karbon; üretim ve tüketim zinciri boyunca atmosferden izole edilerek çevresel tahribatın önüne geçilmekte ve enerji sistemleri sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yeniden yapılandırılmaktadır.

1.1.3.2 Enerji sistemlerinde döngüsel karbon akışı

Döngüsel karbon ekonomisi kapsamında tasarlanan hibrit enerji sistemleri, enerji üretim süreçlerinden kaynaklanan karbon salımını minimize etmeye ve karbonun sistem içi yeniden kullanımını maksimize etmeye yönelik bütüncül çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda sistemin karbon akışı; giriş, dönüşüm, depolama ve yeniden kullanım adımlarını içeren çok katmanlı bir süreç olarak modellenabilir.

Önerilen sistemde PV paneller aracılığıyla üretilen elektrik, elektrolizörler vasıtasıyla suyu hidrojen ve oksijene ayırmakta ve elde edilen yeşil hidrojen daha sonra amonyak sentezinde veya doğrudan yakıt hücrelerinde enerji üretiminde kullanılmaktadır. Aynı zamanda atık su arıtım sürecinden elde edilen organik içerikler, anaerobik fermantasyon yoluyla biyogaza dönüştürülmekte ve bu biyogaz, kojenerasyon sistemlerinde kullanılarak elektrik ve ısı üretimi sağlamaktadır. Bu süreçlerin tamamı,

fosil yakıtlardan kaynaklanan doğrudan karbon salımını engelleyerek atmosferik CO₂ konsantrasyonuna ek bir yük getirmemektedir. Şekil 1.7’de, döngüsel karbon ekonomisinin temel yapı taşlarını oluşturan bu dört stratejinin enerji sistemleri ile ilişkisi kavramsal olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Döngüsel karbon ekonomisinin şematik gösterimi

Azalt (Reduce): Enerji sistemlerinde karbon emisyonlarının azaltılması, öncelikli olarak fosil yakıtların kullanımının minimize edilmesi ve bunların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesiyle sağlanır. Bu strateji kapsamında enerji üretim sürecinde doğrudan CO₂ salımı oluşturmeyen teknolojilerin yaygınlaştırılması, sistemin toplam karbon yoğunluğunu düşürür. Aynı zamanda enerji verimliliğini artıran güç elektroniği çözümleri, kayıpların azaltılması ve talep tarafı yönetimi uygulamaları da bu stratejiye dâhildir.

Yeniden Kullan (Reuse): Endüstriyel süreçler veya enerji üretimi esnasında ortaya çıkan CO₂ gibi sera gazlarının atmosfere salınmadan önce yakalanarak yeniden süreçlere entegre edilmesi, bu stratejinin temelini oluşturur. Özellikle power-to-gas (P2G) ve power-to-liquid (P2L) gibi teknolojiler aracılığıyla yakalanan CO₂, metanasyon, metanol sentezi veya sentetik yakıt üretimi gibi proseslerde hammadde olarak kullanılabilir. Böylece karbonun yaşam döngüsü uzatılır ve çevresel etkileri minimize edilir.

Geri Dönüştür (Recycle): Karbon içeren bileşenlerin (örneğin, NH_3 ve H_2) kimyasal dönüşümlerle yeniden kullanıma kazandırılması hedeflenir. Bu süreçlerde karbonlu atıkların enerji taşıyıcıları ya da endüstriyel hammaddeler hâline getirilmesiyle hem malzeme döngüsellliği sağlanır hem de enerji sisteminin toplam çevresel yükü azaltılır. Örneğin, karbon temelli yakıtların elektrokimyasal geri kazanımı, yakıt hücreleri, termokimyasal dönüşüm sistemleri veya elektrolitik reaktörler gibi teknolojilerle mümkündür.

Uzaklaştır (Remove): Atmosfere salınmış veya salınmadan önce yakalanmış karbonun, karbon tutma ve depolama (Carbon Capture and Storage – CCS) veya karbon tutma ve kullanma (Carbon Capture and Utilization – CCU) teknolojileriyle sistemden kalıcı olarak uzaklaştırılması hedeflenir. Bu uzaklaştırma işlemi; yer altı jeolojik formasyonlarına enjeksiyon, karbonun mineralleştirilmesi, ya da biyolojik süreçlerle uzun ömürlü formda depolanması şeklinde olabilir. Bu strateji, net sıfır emisyon hedeflerinin gerçekleştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Karbonun sistem içerisindeki dolaşımı, özellikle biyogazdan elde edilen CO_2 'nin fotosentez döngüsü aracılığıyla yeniden bitki büyümesinde kullanılabilir olması ve elektroliz yoluyla üretilen hidrojenin emisyonuz bir yakıt olarak işlev görmesi sayesinde sistemin net karbon ayak izinin sıfıra yakın değerlere çekilmesini mümkün kılar. Ayrıca amonyak üretimi sırasında yeşil hidrojen kullanılması sayesinde geleneksel Haber-Bosch sürecinde oluşan yüksek karbon emisyonları tamamen ortadan kaldırılmaktadır.

Bu bağlamda, enerji dönüşüm zincirinde kullanılan her bir teknoloji (örneğin konvertörler, elektrolizörler, depolama sistemleri), enerji verimliliğini artırarak sistemin karbon ayak izini düşürmekte ve karbon salımını sistem içi yeniden dolaşıma dâhil eden bir mimariye hizmet etmektedir. Böylelikle önerilen HRES modeli, karbonun çevrimsel kullanımını esas alan ve iklim değişikliği ile mücadelede etkili bir araç olarak öne çıkan döngüsel karbon ekonomisi ilkeleriyle tam uyumlu bir yapı sunmaktadır.

1.2 Motivasyon

Enerji sektörü; küresel ölçekte artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme gibi dinamikler karşısında hem talep artışı hem de sürdürülebilirlik baskısı ile ciddi bir dönüşüm sürecine girmiştir. Özellikle elektrik üretiminde fosil yakıtların baskınlığı, CO₂ ve CH₄ gibi sera gazlarının atmosfere salımını artırmakta; bu durum iklim değişikliği, çevresel bozulma, hava kalitesinde düşüş ve doğal ekosistemlerde geri dönülemez hasarlar gibi çok boyutlu sonuçlar doğurmaktadır. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change - Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) raporlarına göre mevcut sera gazı azaltım politikaları ile Paris Anlaşması'nın 1.5 °C hedefinin tutturulması oldukça zor görünmekte ve enerji sistemlerinde radikal yapısal değişim ihtiyacı giderek belirginleşmektedir.

Bu bağlamda geleneksel doğrusal ekonomi modellerinin ötesine geçerek kaynakları üretim-tüketim-geri dönüşüm döngüsü içinde değerlendiren döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımı, hem iklim hedeflerine ulaşma hem de enerji güvenliği sağlama açısından büyük önem taşımaktadır. Döngüsel karbon ekonomisi; karbonun azaltılması, yeniden kullanımı, geri dönüştürülmesi ve atmosferden uzaklaştırılması gibi dört temel stratejiye dayanarak karbonu atık değil, bir kaynak olarak tanımlar. Enerji sistemlerinin bu yaklaşımla yeniden yapılandırılması, sürdürülebilir kalkınma politikalarının merkezine yerleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının temel motivasyonu, yüksek enerji yoğunluğuna sahip atık su arıtma tesislerinin sadece tüketici değil, enerji üreticisi hâline gelmesini sağlayacak bütünlük ve karbon döngüsünü kapatan bir sistem modeli sunmaktır. PV, biyogaz üretimi, elektroliz tabanlı yeşil hidrojen üretimi ve bu hidrojenin yeşil amonyak gibi enerji taşıyıcılarına dönüştürülmesi süreçlerinin entegre edildiği bu hibrit model; hem teknolojik hem de çevresel açıdan yenilikçi bir yaklaşıma karşılık gelmektedir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğası nedeniyle enerji sürekliliği sağlamak amacıyla hidrojen ve amonyak bazlı enerji depolama çözümleri sistemin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır.

Bu kapsamda, HOMER Pro yazılımı kullanılarak geliştirilen sistem modelinde; PV panellerden gelen elektrik ile çalışan elektrolizörler vasıtasıyla üretilen yeşil hidrojen,

hem doğrudan kullanılmakta hem de amonyak sentezinde değerlendirilerek uzun vadeli enerji depolama ve alternatif yakıt üretimi sağlanmaktadır. Aynı zamanda organik atıklardan üretilen biyogaz, hem kojenerasyon yoluyla enerjiye dönüştürülmekte hem de sistem içi ısı dengeye katkı sunarak çevrimsel enerji yönetimi hedeflenmektedir.

Bu çalışmanın nihai amacı, enerji pozitif ve karbon-nötr altyapılar geliştirmek adına, döngüsel karbon ekonomisi ilkeleriyle uyumlu, optimum maliyet ve yüksek verimlilikle çalışan hibrit enerji sistemleri tasarlamaktır. Literatürde henüz yeterince modellenmemiş olan PV-biyogaz-hidrojen-amonyak entegre yapısının uygulanabilirliğinin simülasyon temelli olarak değerlendirilmesi ve bu sistemin özellikle enerji yoğun altyapılarda hayata geçirilebilirliğinin ortaya konması, çalışmanın akademik katkı potansiyelini artırmaktadır. Bu yönüyle tez, yalnızca teknik bir modelleme değil aynı zamanda karbon salımının azaltılmasına ve iklim dostu enerji geçişine katkı sunacak stratejik bir enerji dönüşüm yaklaşımı sunmaktadır.

1.3 Tezin Katkıları

Bu tez çalışması atık su arıtma tesislerinde sürdürülebilir enerji üretimini sağlamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği ve döngüsel karbon ekonomisi ilkelerine dayalı olarak yapılandırılan hibrit enerji sistemlerine dair özgün bir model sunmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen sistem modeli ve simülasyonlar, yalnızca enerji üretimi açısından değil aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, karbon emisyonu yönetimi, kaynak verimliliği ve sistem esnekliği gibi çok boyutlu alanlarda önemli akademik ve pratik katkılar sunmaktadır.

- **Döngüsel Karbon Ekonomisi Temelli Enerji Sistemi Kurgusu:** Bu tez, karbonun üretim-tüketim-yeniden kullanım döngüsü içerisinde sistematik olarak yönetilebildiği entegre bir enerji dönüşüm yaklaşımını esas almakta; elektroliz yoluyla elde edilen yeşil hidrojenin, amonyak sentez süreciyle birlikte değerlendirilerek karbon içermeyen bir enerji taşıyıcısına dönüştürülmesini içeren özgün bir döngüsel yapı önermektedir. Bu bağlamda, klasik doğrusal enerji modellerine alternatif olarak enerji geri kazanımı, atık minimizasyonu ve sürdürülebilirlik temelinde kurgulanan sistem; literatürde

nadiren çalışılmış entegre üretim-saklama-tüketim yapısıyla özgün bir çözüm sunmaktadır.

- Yenilenebilir Kaynakların Optimum Bütünleşimi: Tez kapsamında HOMER Pro yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen simülasyonlar; fotovoltaik üretim, biyogaz dönüşümü, elektrolizle yeşil hidrojen üretimi ve amonyak sentezini içeren çok bileşenli bir sistemin teknik ve ekonomik optimizasyonuna odaklanmaktadır. Her bir bileşen sistemin yük profiline, çevresel koşullara ve maliyet parametrelerine göre ayrı ayrı modellenmiş ve en uygun kapasite, üretim-depolama dengesi ve yatırım stratejileri belirlenmiştir. Bu yönüyle çalışma, özellikle gelişmekte olan ülkelerde altyapı bağımlılığı düşük, düşük karbonlu mikro-şebeke sistemlerinin tasarımı için örnek teşkil etmektedir.
- Enerji Depolama ve Güç Dönüşüm Entegrasyonuna Yönelik Modelleme Katkısı: Çalışmada yalnızca yenilenebilir enerji üretimi değil aynı zamanda bu enerjinin depolanması, dönüştürülmesi, yönetilmesi gibi konular da sistematik bir şekilde ele alınmıştır. Bu kapsamda PV-elektrolizör, biyogaz-jeneratör, konvertör-invertör ve amonyak üretim bileşenleri arasında enerji akışı ve dönüşüm verimliliği açısından çok yönlü bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir.
- Atık Bazlı Enerji Geri Kazanımı Uygulaması: Bu çalışma, atık su arıtma tesislerinden elde edilen biyogazın yalnızca enerji üretiminde değil hidrojen üretimi ve amonyak sentezi süreçlerinde de kullanılabilirliğini göstermesi açısından literatüre yeni bir katkı sunmaktadır. Böylece enerji üretimi, enerji depolama ve sürdürülebilir gübre üretimi gibi disiplinlerarası çıktılar tek bir döngüsel yapı içinde değerlendirilmiştir.
- Politika ve Planlama Açısından Yol Gösterici Sonuçlar: Tezde ortaya konulan model; enerji politikalarının karbon nötr hedeflerle uyumlaştırılması, belediye veya yerel yönetimlerin enerji dönüşüm yatırımlarında önceliklendirme yapabilmesi ve atık altyapı projelerinin enerji-çevre dengesi açısından optimize edilebilmesi açısından stratejik bir yönlendirme sunmaktadır. Bu

yönüyle çalışma yalnızca teknik değil aynı zamanda yönetişimsel ve planlama perspektifinden de değerli çıktılar üretmektedir.

- **Bilimsel Literatüre Katkı:** Bu tez; enerji sistemlerinde döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımını uygulamalı olarak modelleyen, yeşil hidrojen ve amonyak sentezi gibi ileri düzey bileşenleri HOMER Pro ortamında bütünleşik şekilde simüle eden nadir çalışmalardan biridir. Bu yönüyle hem uygulamalı mühendislik literatürüne hem de sürdürülebilir kalkınma ve yeşil enerji teknolojileri alanına doğrudan katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak bu tez çalışması, atık su arıtma tesislerinde enerji bağımsızlığının sağlanması ve karbon emisyonlarının azaltılması hedefiyle; fotovoltaik, biyogaz, yeşil hidrojen ve yeşil amonyak üretimini entegre eden yenilikçi bir hibrit enerji sistemi modeli sunmuştur. Döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımına dayanan bu model enerji üretim, dönüşüm ve depolama süreçlerini bir bütün olarak ele alarak sürdürülebilir enerji altyapıları için etkili ve uygulanabilir bir çözüm ortaya koymaktadır.

1.4 Tezin Yapısı

Bu tez çalışması, atık su arıtma tesislerinde döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımı temelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının hibrit bir yapıda entegrasyonu ile hidrojen ve amonyak gibi enerji taşıyıcılarının üretimini, depolanmasını ve sistem performansına etkisini inceleyen bütüncül bir enerji modeli sunmaktadır. Çalışma, aşağıda özetlenen altı ana bölümden oluşmaktadır:

- **Giriş:** Küresel enerji talebindeki artış, fosil yakıt kaynaklı çevresel sorunlar ve sürdürülebilir enerji sistemlerine geçiş ihtiyacı çerçevesinde çalışmanın arka planı sunulmuştur. Döngüsel karbon ekonomisi perspektifinden yola çıkılarak, yenilenebilir enerji entegrasyonunun sistem esnekliği, emisyon azaltımı ve enerji güvenliği açısından önemi vurgulanmış; çalışmanın motivasyonu, amacı ve kapsamı tanımlanmıştır.
- **Önceki Çalışmalar:** HRES'in, PV sistemlerin, biyogaz temelli enerji üretiminin, elektrolizör tabanlı yeşil hidrojen üretiminin ve amonyak sentez

süreçlerinin enerji sistemlerine entegrasyonu üzerine yapılan güncel çalışmalar detaylı şekilde incelenmiştir. Ayrıca enerji depolama sistemlerinin rolü ve döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımının bu sistemlerle entegrasyonu ele alınmıştır. Literatürde genellikle bu teknolojiler tekil olarak analiz edilirken, bu çalışmanın özgün yönü; PV, biyogaz, elektrolizör, hidrojen ve amonyak üretim bileşenlerinin tümünü içeren ve HOMER Pro ortamında optimize edilen entegre bir sistem modeli ortaya koymasındır. Böylece çalışma, sürdürülebilir enerji yönetimi, karbon emisyonunun azaltılması ve enerji bağımsızlığı gibi alanlarda literatüre yenilikçi ve bütüncül bir katkı sağlamaktadır.

- Materyal ve Yöntemler: Önerilen HRES'in teknik, ekonomik ve çevresel açılardan modellenmesi, simülasyonu ve optimizasyonunu kapsamaktadır. Araştırma kapsamında, güneş enerjisi (fotovoltaik sistemler), biyogaz üretimi ve arıtımı, elektrolizör temelli yeşil hidrojen üretimi, amonyak sentezi ve bunlara entegre enerji dönüşüm ve depolama teknolojileri üzerine yapılan güncel akademik literatür kapsamlı biçimde incelenmiştir. Özellikle Alkalın, PEM ve SOEC tipi elektrolizör sistemlerinin operasyonel dinamikleri, PV sistemlerin verimlilik karakteristikleri, biyogazın enerjiye dönüştürülme süreçleri ve bu teknolojilerin güç elektroniği bileşenleri ile olan etkileşimi literatür ışığında değerlendirilmiştir.
- Modelleme süreci, HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, sistemin temel bileşenleri olan PV paneller, biyogaz jeneratörü, elektrolizör birimi, hidrojen ve amonyak depolama tankları, termal ve elektriksel yük profilleri, DC/AC konvertörler, enerji yönetim sistemleri ve batarya gibi enerji depolama çözümleri detaylı teknik parametreler ile tanımlanmıştır. PV sistemlerin saatlik ışıyım verileri ve panel verimliliği; biyogaz sisteminin metan üretim kapasitesi ve kojenerasyon verimi; elektrolizörlerin elektrik tüketimi ve hidrojen üretim katsayıları; amonyak sentez modülünün çevrim verimliliği gibi teknik girdiler dikkatle belirlenmiştir.

- Simülasyon kapsamında, sistemin performansı hem ekonomik kriterler (Net Present Cost – NPC, Levelized Cost of Energy – LCOE), hem çevresel göstergeler (CO₂ emisyonu, karbon azaltım potansiyeli), hem de teknik parametreler (yenilenebilir enerji penetrasyonu, yedeklilik, enerji depolama kapasitesi) doğrultusunda optimize edilmiştir. HOMER Pro yazılımı sayesinde farklı senaryo analizleri yapılarak sistem konfigürasyonlarının yıllık üretim-tüketim dengesi, enerji fazlası oranları ve şebeke etkileşim düzeyleri değerlendirilmiş; döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımı çerçevesinde enerji dönüşüm süreçlerinin çevresel sürdürülebilirliği analiz edilmiştir.

Bulgular ve Tartışma bölümünde, HOMER Pro üzerinden elde edilen senaryo analizleri ve optimizasyon çıktıları teknik ve ekonomik yönleriyle değerlendirilmiştir. Yenilenebilir enerji payı, LCOE (Levelized Cost of Energy), NPV (Net Present Value), emisyon oranları, yakıt tasarrufu ve yük karşılanma oranları gibi kritik performans göstergeleri incelenmiştir. Yeşil hidrojen üretimi ve bunun amonyak sentez süreciyle entegrasyonu, sistem esnekliği ve uzun vadeli enerji depolama açısından analiz edilmiştir. Ayrıca enerji fazlalığının amonyak üretiminde değerlendirilmesinin döngüsel karbon stratejisine katkıları tartışılmıştır.

Sonuç ve Öneriler bölümünde, önerilen HRES modelinin teknik uygulanabilirliği, ekonomik sürdürülebilirliği ve karbon ayak izi açısından sağladığı kazanımlar özetlenmiş; sistemin atık su arıtma tesislerinde uygulanabilirliği ile ilgili çıkarımlar yapılmıştır. Ayrıca, enerji depolama stratejileri, güç elektroniği entegrasyonu ve akıllı şebeke yönetimi gibi alanlarda yapılabilecek ileri düzey çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Bu yapı sayesinde, döngüsel karbon ekonomisi yaklaşımıyla yapılandırılmış bir hibrit enerji sisteminin hem teorik arka planı hem de uygulama simülasyonları bilimsel doğrulukla ortaya konmuş; PV, biyogaz, hidrojen ve amonyak tabanlı sistemlerin birlikte çalışabildiği sürdürülebilir bir model önerisi sunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

HRES'in atık su arıtma tesislerine entegrasyonu; yalnızca enerji üretim kapasitesini artırmakla kalmayıp aynı zamanda sistem esnekliği, karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir altyapı dönüşümü açısından kritik bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Bu bölümde; PV sistemler, biyogaz tabanlı enerji üretimi, elektrolizör destekli yeşil hidrojen üretimi ve amonyak sentezi gibi çok bileşenli enerji dönüşüm yapılarına ilişkin güncel literatür kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar; HOMER Pro gibi karar destek ve optimizasyon yazılımları kullanılarak yapılan teknik-ekonomik değerlendirmelerden, döngüsel karbon ekonomisi ilkeleri doğrultusunda geliştirilen karbon-nötr modellemelere kadar geniş bir yelpazede incelenmiştir. Ayrıca enerji depolama sistemleri, güç elektroniği altyapıları ve mikro şebeke stratejileri gibi entegre sistem performansını doğrudan etkileyen bileşenlerin değerlendirilmesine de odaklanılmıştır. Bu çerçevede sunulan önceki çalışmalar, mevcut araştırmanın bilimsel temelini oluşturarak önerilen sistemin özgün katkılarını daha net ortaya koymak amacıyla yapılandırılmıştır.

Kong vd. tarafından yeşil amonyak depolama teknolojilerinin mikro şebeke sistemlerindeki dinamik operasyonel performansa etkisi analiz edilmiştir. Gerçek zamanlı kontrol algoritmaları kullanılarak, bağımsız çalışan sistemlerde enerji sürekliliği ve güvenilirliği artırılmıştır. Çalışmada, amonyağın yalnızca enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda sistem stabilitesini sağlayan bir tampon enerji birimi olarak kullanıldığı bütünlük bir yaklaşım sunulmuştur [62].

Kong vd. tarafından American Control Conference'ta sunulan çalışmada, amonyağın yenilenebilir mikro şebeke içinde optimizasyonu ve kontrolü ele alınmıştır. Simülasyonlar, amonyak üretimi ile enerji depolama ve arz-talep dengesi arasındaki bağlantının sistemin maliyet etkinliğini ve sürdürülebilirliğini artırdığını göstermiştir [63].

Mishref tarafından yapılan doktora çalışmasında, izole mikro şebekelerde hidrojen ve amonyak üretiminin teknik ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. HOMER Pro destekli simülasyonlarla optimum sistem boyutlandırması yapılmış ve yeşil hidrojenin enerji depolama kapasitesi üzerine etkileri incelenmiştir [64].

Chamazkoti vd. tarafından atık su arıtma tesisleri için esnek hibrit enerji modelleri tasarlanarak güç-hidrojen üretimini entegre eden sistemlerin fizibilite analizi gerçekleştirilmiştir. Enerji verimliliği, seviyeledirilmiş elektrik maliyeti (LCOE) ve karbon emisyonu azaltımı gibi kriterler esas alınarak yapılan senaryo analizleri, hidrojen destekli sistemlerin enerji bağımsızlığını artırdığı gösterilmiştir [65].

EXI tarafından yayımlanan Water-Hydrogen Nexus raporunda, yeşil hidrojen üretiminin su kaynakları üzerindeki etkisi sistematik olarak analiz edilmiştir. Elektrolizör sistemlerinin su tüketimi, soğutma suyu ihtiyacı ve geri kazanım olanakları detaylıca incelenmiş ve özellikle su stresi yaşayan bölgeler için çevresel etkilerin önemi vurgulanmıştır [66].

EuWaK Pilot Projesi kapsamında biyogazın reformasyonu yoluyla hidrojen üretiminin atık su arıtma tesislerinde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada biyogazın teknik ve ekonomik açıdan hidrojen üretimi için kullanılabileceği gösterilmiş ve bu yaklaşımın atık su arıtma süreçlerinde enerji verimliliğini artırabileceği vurgulanmıştır [67].

Chamazkoti vd. tarafından atık su arıtma tesislerinde güneş, rüzgar ve biyogaz kaynaklarını entegre eden esnek hibrit enerji modelleri tasarlanmış ve bu sistemlerin fizibilitesi HOMER Pro yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Yapılan analizlerde bu tür hibrit sistemlerin enerji güvenilirliğini artırabileceği ve çevresel etkileri azaltabileceği ortaya konulmuştur [68].

SynBios Projesi kapsamında yenilenebilir enerji ve atık su kullanılarak yeşil hidrojen ve biyometan üretimi amaçlanmıştır. Projede döngüsel ekonomi prensipleri benimsenmiş ve atık su arıtma tesislerinin sadece arıtma değil, aynı zamanda enerji üretiminde de aktif rol alması hedeflenmiştir. Hazer Group tarafından ise Avustralya’da atık su arıtma tesislerinden elde edilen biyogaz kullanılarak hidrojen ve grafit üretimi üzerine bir proje başlatılmış ve biyogazın katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir [69].

HOMER Pro Hidrojen Modülü, hidrojen üretimi, depolaması ve tüketimini modellemek amacıyla geliştirilmiş bir araçtır. Bu modül özellikle yakıt hücreleri ve uzak bölgelerdeki şebekeden bağımsız sistemlerde kullanılmak üzere tasarlanmış olup, hidrojen tabanlı sistemlerin teknik ve ekonomik analizine olanak sağlamaktadır [70].

Ekpotu vd. tarafından Nijerya'nın Lagos Eyaleti'nde yeşil hidrojen üretimi için bir güneş enerjisi sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. HOMER ve ASPEN yazılımları kullanılarak yapılan bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretiminde sunduğu potansiyel detaylı bir şekilde ortaya konmuştur [71].

Khalilpoor vd. tarafından Hindistan'da kırsal bir bölgede hibrit yenilenebilir enerji sisteminin ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. HOMER yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, güneş ve biyokütle enerjisinin entegrasyonunun ekonomik fizibilitesi ortaya konmuş ve sistemlerin kırsal elektrifikasyon için uygun çözümler sunduğu belirtilmiştir [72].

U.S. Energy Information Administration tarafından yayımlanan 2021 raporunda, biyokütle ve biyoyakıt üretimine ilişkin kapsamlı istatistiksel veriler sunulmuş, biyokütle kaynaklarının enerji üretimindeki rolü ve potansiyel katkıları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir [73].

Malla vd. tarafından döngüsel ekonomi yaklaşımının elektrik üretiminde karbonsuzlaştırma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve atıkların minimize edilmesi yoluyla sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi önerilmiştir [74].

Hüner vd. tarafından Türkiye'deki farklı doğal su kaynaklarından hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Bu çalışmada su kaynaklarının hidrojen üretimi açısından uygunluğu değerlendirilmiş ve farklı kaynaklar arasında verimlilik karşılaştırmaları yapılmıştır [75].

Aramco tarafından yayımlanan çalışmalarda mavi hidrojen üretimi ve döngüsel karbon ekonomisi (CCE) kavramı ele alınmıştır. Doğal gazdan elde edilen hidrojenin karbon

yakalama ve depolama teknolojileriyle desteklenerek daha sürdürülebilir hale getirilmesi ve enerji sektöründe karbon emisyonlarının azaltılması hedeflenmiştir [76]. Reindl vd. tarafından akıllı şebekelerde döngüsel ekonomi entegrasyonu incelenmiştir. Çalışmada, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla kaynak verimliliği ve atık azaltma stratejilerinin önemi vurgulanmıştır [77].

Gulf Journal of Advanced Business Research tarafından yayımlanan çalışmada, atık su arıtma tesislerinde hidrojen üretiminin ekonomik ve çevresel faydaları analiz edilmiştir. Biyogaz ve diğer yenilenebilir kaynakların entegrasyonu ile enerji üretiminin optimize edilebileceği ve tesislerin karbon ayak izinin azaltılabileceği gösterilmiştir [78].

Ram vd. tarafından Fiji'de yakıt hücreli otobüsler için yeşil hidrojen üretimini amaçlayan mikro şebekelerin teknik ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir kaynakların entegrasyonu sayesinde enerji bağımsızlığının artırılacağı ve karbon emisyonlarının önemli ölçüde azaltılabileceği ortaya konmuştur [79].

Di Micco vd. tarafından yeşil hidrojen, elektrik ve ısı üretimini eş zamanlı sağlayan çok enerjili bir sistemin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır. PV ve elektrolizör sistemlerinin birlikte kullanımının enerji verimliliği üzerindeki olumlu etkileri vurgulanmış ve bu yapıların entegre enerji sistemlerinde karbon azaltımı açısından önemli katkılar sağladığı belirtilmiştir [80].

Chen vd. tarafından Şangay'da konumlanan bir hidrojen dolum istasyonu için düşük karbonlu hidrojen tedarik yolları optimize edilmiştir. Yapılan ekonomik analizler, PV destekli elektroliz sistemlerinin uzun vadede maliyet avantajı sunduğunu ve karbon salınımını azalttığını göstermiştir [81].

Ur Rashid vd. tarafından HOMER Pro kullanılarak şebekeye bağlı bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin, uzak bölgelerde elektrifikasyon için teknik ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde güneş, biyokütle ve batarya

kombinasyonlarının enerji güvenliği ve maliyet etkinliği açısından en uygun yapı olduğu belirlenmiştir [82].

Akarsu vd. tarafından hibrit sistemler içerisinde hem elektrik hem de hidrojen üretimi için optimum sistem bileşenleri belirlenmiştir. HOMER Pro ve MATLAB entegrasyonu ile gerçekleştirilen analizlerde, hidrojen üretiminin enerji depolama ve karbon azaltım stratejilerindeki stratejik rolü vurgulanmıştır [83].

Peláez-Peláez vd. tarafından fotovoltaik-yakıt hücresi entegrasyonuna dayalı bir sistemde hidrojenin enerji vektörü olarak kullanıldığı kojenerasyon modeli incelenmiştir. Çalışmada, ısı ve elektrik üretiminin aynı sistem üzerinden sağlanmasının sistem verimliliğini artırdığı ve özellikle kentsel bölgelerde karbon salımını azaltmada etkili olduğu gösterilmiştir [84].

Mishref tarafından izole mikro şebekelerde hidrojen ve amonyak üretiminin teknik ve ekonomik fizibilitesi incelenmiştir. Yeşil enerji kaynaklarından elde edilen elektrikle çalışan elektrolizörlerin hem hidrojen üretimi hem de NH_3 sentezi açısından sürdürülebilirlik katkıları vurgulanmış ve HOMER Pro ile yapılan simülasyonlar sonucunda önemli sistem optimizasyon çıkarımları sunulmuştur [85].

Kakavand vd. tarafından İran'da güneş ve rüzgar kaynaklarına dayalı olarak yeşil hidrojen ve amonyak üretimi değerlendirilmiştir. Çalışmada büyük ölçekli elektroliz ve Haber-Bosch sistemlerinin entegrasyonu ile enerji güvenliğinin sağlanabileceği ve fosil yakıt bağımlılığının azaltılabileceği ortaya konmuştur [86].

Bhatt vd. tarafından net sıfır karbon emisyonlu bir mikroşebeke için ikinci el batarya enerji depolama sistemlerini içeren bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi modelinin fizibilitesi değerlendirilmiştir. Yenilenebilir enerji üretiminin süreksizliğini gidermek amacıyla batarya ve hidrojen depolama senaryoları karşılaştırılmıştır [87].

Ali vd. tarafından Pakistan'daki kırsal bölgelerde uygulanabilir hibrit enerji sistemleri analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada biyogaz, güneş enerjisi ve batarya kombinasyonlarının ekonomik fizibilitesi değerlendirilmiş ve HOMER Pro analizleri

ile düşük maliyetli ve yüksek erişilebilirlik sağlayan konfigürasyonlar ortaya konmuştur [88].

Vendoti vd. tarafından Hindistan’da bir köyler kümesinin elektrifikasyonu için güneş, rüzgar, biyogaz, biyokütle ve yakıt hücresi teknolojilerinin entegre edildiği çok bileşenli bir hibrit enerji sisteminin analizi yapılmıştır. HOMER yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde, amonyak ve hidrojen üretiminin enerji arz güvenliğini güçlendirdiği vurgulanmıştır [89].

Tukenmez vd. tarafından biyokütle ve güneş enerjisine dayalı entegre bir çoklu enerji üretim sistemi geliştirilmiştir. Sistem kapsamında hidrojen ve amonyak üretimi dahil olmak üzere ısı, elektrik ve soğutma gibi çeşitli çıktılar aynı yapı içerisinde değerlendirilmiş ve enerji verimliliği ile karbon salımında önemli iyileştirmeler sağlanmıştır [90].

Ojelade vd. tarafından yeşil amonyak üretiminde kullanılan teknolojilere ilişkin kapsamlı bir literatür taraması sunulmuştur. Araştırmada elektrokimyasal, fotokatalitik ve plazma temelli yöntemlerin yanı sıra Haber-Bosch sürecine yönelik sürdürülebilir alternatifler de değerlendirilmiş ve özellikle düşük sıcaklık ve basınçta çalışan yeni nesil elektrokimyasal sentez yöntemleri ön plana çıkarılmıştır [91].

Gul vd. tarafından AEM (Anion Exchange Membrane) elektrolizör teknolojisini kullanan hidrojen destekli yenilenebilir enerji sistemlerini optimize eden bir model geliştirilmiştir. HOMER Pro benzeri yazılımlar kullanılarak yapılan analizlerde, sistemin yüksek verimlilik ve düşük karbon ayak izi sunduğu gösterilmiştir [92].

Mousavi vd. tarafından farklı yük yönetimi stratejileri ve güneş takip sistemleri kullanılarak geliştirilen off-grid hibrit enerji sistemlerinin ekserji performansları karşılaştırılmıştır. Özellikle yeşil hidrojen üretim kapasiteli tasarımların sistem sürdürülebilirliği açısından ön plana çıktığı belirlenmiştir [93].

Kumar vd. tarafından kırsal elektrifikasyon için PV-biyokütle tabanlı off-grid bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi modeli geliştirilmiştir. Sistem, optimize edilmiş depolama

ve yük yönetimi stratejileriyle hem maliyet etkinliği hem de düşük çevresel etki sağlamış ve HOMER Pro üzerinden yapılan analizlerde biyogaz tabanlı üretimin sistem istikrarına katkısı açıkça gösterilmiştir [94].

Alonso vd. tarafından Belçika'da hidrojen ve batarya entegrasyonuna sahip hibrit enerji depolama sistemlerinin teknik ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, bu sistemlerin yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonu altında sistem kararlılığı ve maliyet avantajları sunduğu, ayrıca hidrojenin mevsimsel enerji depolaması için etkili bir çözüm olduğu vurgulanmıştır [95].

Kakavand vd. tarafından rüzgar ve güneş kaynaklarına dayalı olarak İran'da yeşil hidrojen ve amonyak üretimi değerlendirilmiştir. Çalışmada, enerji arz güvenliğini artırmak ve fosil yakıt bağımlılığını azaltmak amacıyla entegre üretim sistemlerinin uygulanabilirliği detaylı şekilde analiz edilmiştir [96].

Agyekum vd. tarafından tropikal iklim koşullarında hidrojen üretimi, tarımsal sulama ve istihdam yaratımı gibi çoklu kriterleri içeren bir hibrit enerji sistemi modeli değerlendirilmiştir. HOMER Pro, Shannon Entropi ve TOPSIS metodolojileri kullanılarak yapılan analizlerde en uygun sistem konfigürasyonları belirlenmiş ve hidrojenin tarımsal entegrasyondaki rolü vurgulanmıştır [97].

Rahmat vd. tarafından Malezya'da yenilenebilir enerji teknolojilerinin entegrasyon yatırımları HOMER Pro kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, fotovoltaiik ve biyogaz sistemlerinin entegrasyonunun ekonomik verimlilik, enerji güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından etkili bir yaklaşım olduğu ortaya konmuştur [98].

Anang vd. tarafından Malezya'da şebekeye bağlı bir çatı üstü PV sisteminin performansı analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, PV sistemlerin tropikal iklimlerde yüksek verimlilikte çalışabildiğini ve enerji üretim-tüketim dengesi açısından güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermiştir [99].

Ur Rashid vd. tarafından HOMER Pro kullanılarak uzak bölgelerin elektrifikasyonu için şebekeye bağlı hibrit enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik analizi

gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada güneş, biyokütle ve batarya entegrasyonunun enerji güvenliğini sağladığı ve uygun maliyetli çözümler sunduğu vurgulanmıştır [100].

Chisale vd. tarafından HOMER Pro ile CRITIC ve PROMETHEE II çok kriterli karar verme yöntemleri entegre edilerek hibrit enerji sistemlerinin optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada yalnızca teknik ve ekonomik değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal parametrelerin de göz önünde bulundurulduğu kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir [101].

Di Florio vd. tarafından ev tipi nanogrid sistemlerinde SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) temelli kojenerasyon yapılarının yaşam döngüsü analizi gerçekleştirilmiştir. Termal enerji depolama entegrasyonu ile enerji verimliliği artırılmış ve çevresel etkiler minimize edilmiştir. Çalışmada, hidrojenle çalışan sistemlerin ev tipi uygulamalarda nasıl ölçeklenebileceği detaylı bir şekilde gösterilmiştir [102].

Al-Bonsrulah vd. tarafından PV, rüzgâr, elektrolizör ve PEM yakıt hücrelerinden oluşan bir hibrit enerji sisteminin tasarımı ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. HOMER Pro destekli çalışmada, sistemin hem şebeke bağlı hem de bağımsız senaryolarda enerji güvenliği ve karbon azaltımı açısından uygun bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur [103].

Maestre vd. tarafından İspanya'nın ulaştırma sektörünü 2050'ye kadar karbonsuzlaştırmayı hedefleyen bir hidrojen üretim ve dağıtım zinciri modeli geliştirilmiştir. Sistem senaryoları, hidrojen altyapısının ölçeklenebilirliği, tedarik zinciri yatırımları ve maliyet analizleri ile desteklenmiştir [104].

Ali vd. tarafından Pakistan'ın Dera İsmail Han bölgesinde kırsal elektrifikasyon için hibrit enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik fizibilitesi analiz edilmiştir. HOMER Pro kullanılarak yapılan çalışmada, güneş PV, batarya ve dizel jeneratör kombinasyonunun şebeke bağlantılı senaryolarda daha düşük seviyeledirilmiş elektrik maliyeti (LCOE) sağladığı ve 24 saat kesintisiz enerji temini sunduğu belirlenmiştir [105].

Weidner vd. tarafından dokuz farklı şehir bölgesinde açık alan, modern sera ve dikey tarım yöntemleri karşılaştırılarak düşük karbonlu iç mekân tarımının gıda-enerji-arazi etkileşimi incelenmiştir. Çalışmada, modern seraların birim gıda çıktısı başına daha düşük enerji talebine sahip olduğu ve çoğu bölgede en az arazi gerektiren seçenek olduğu ortaya konmuştur [106].

Shah vd. tarafından HOMER Pro kullanılarak güneş, rüzgar, biyokütle ve yakıt hücresi teknolojilerini içeren off-grid hibrit enerji sistemlerinin optimal planlaması ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, sistemin teknik ve ekonomik uygunluğu değerlendirilmiş ve kırsal bölgelerde enerji güvenliği ile sürdürülebilirlik açısından etkili bir çözüm sunduğu gösterilmiştir [107].

El-Maaroufi vd. tarafından Fas'ın kuzeyinde kırsal elektrifikasyon için PV, rüzgar türbini (WT) ve biyokütle kaynaklarını içeren off-grid bir hibrit enerji sisteminin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır. HOMER yazılımı ile gerçekleştirilen çalışmada, yenilenebilir kaynakların entegrasyonunun enerji güvenliği ve maliyet etkinliği açısından uygun olduğu belirlenmiştir [108].

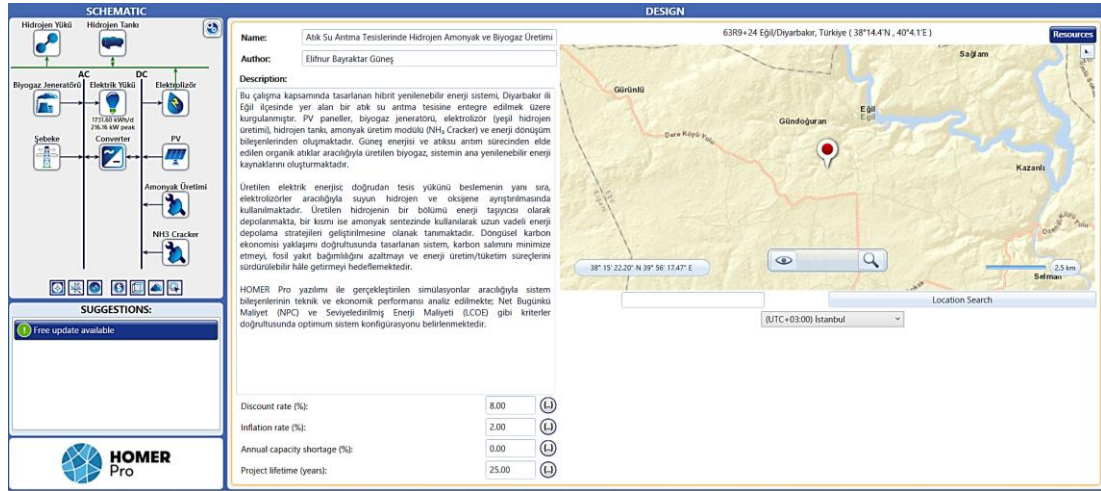
Wang vd. tarafından Çin'deki atık su arıtma tesislerinde antibiyotiklerin varlığı, davranışı ve ekolojik riskleri üzerine kapsamlı bir literatür çalışması yapılmıştır. Çalışmada, arıtma teknolojilerinin antibiyotik giderimi üzerindeki etkinliği değerlendirilmiş ve çevresel sürdürülebilirlik açısından yeni iyileştirme gereksinimlerine dikkat çekilmiştir [109].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Sistem Modelleme Yaklaşımı

Bu tez çalışmasında PV, biyogaz kojenerasyon, elektrolizör ve amonyak üretim ünitelerinden oluşan hibrit enerji sisteminin teknik-ekonomik modellemesi HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. HOMER enerji sistemleri optimizasyonunda yaygın kullanılan bir simülasyon aracıdır. Yazılıma; tesisin elektrik yük profili, yerel güneş radyasyonu gibi yenilenebilir kaynak verileri, her bir bileşenin teknik parametreleri ve maliyetleri ile ekonomik varsayımlar girdi olarak tanımlanmıştır. HOMER Pro, kullanıcının belirlediği bileşen seçenekleri ve kapasite aralıkları için her bir kombinasyonu saatlik zaman adımında yıllık olarak simüle edip NPC veya LCOE gibi kriterlere göre sistemleri sıralayabilmektedir. Optimizasyon kapsamında, sistemin ömür boyu maliyeti ve performansı değerlendirilerek en uygun konfigürasyon(lar) belirlenmiştir. Bu analiz sırasında, HOMER yazılımının dahili optimizasyon algoritması her bir tasarımı detaylı şekilde hesaplayıp karşılaştırmıştır. HOMER Pro, hibrit sistem karşılaştırmalarında temel ekonomik değerlendirme kriterleri olarak LCOE ve NPC değerlerini kullanmaktadır.

Bu çalışmada da öncelikli optimizasyon hedefi toplam maliyetlerin minimize edilmesi (NPC/LCOE düşürülmesi) olarak alınmıştır. Bunun yanında, farklı sistem konfigürasyonlarının karbon emisyonları ve yenilenebilir enerji penetrasyonu gibi teknik çıktıları da analiz edilerek çevresel performans değerlendirilmiştir. Modellemede yer alan sistem bileşenleri; HOMER Pro yazılım arayüzünde yapılandırılmış olup, her bir bileşen sistemsel enerji akışına göre tanımlanmıştır. Tasarlanan hibrit sistemin şematik gösterimi ve bileşenler arası enerji etkileşimleri Şekil 3.1'de sunulmaktadır.



Şekil 3.1 HOMER Pro ortamında oluşturulan hibrit enerji sistemi konfigürasyonu

Şekil 3.1’de sunulan sistem konfigürasyonuna göre; PV paneller aracılığıyla elde edilen elektrik enerjisi doğrudan sistem yükünü besleyebilmekte ya da konvertör üzerinden elektrolizör ve amonyak üretim birimlerine yönlendirilebilmektedir. Sistem içerisinde yer alan biyogaz jeneratörü, atıksu arıtma tesisi çamurundan anaerobik fermantasyon yoluyla elde edilen metanı yakarak elektrik üretmekte; bu sayede sistemin enerji güvenilirliğini artırmakta ve şebeke bağımlılığını azaltmaktadır. Elektrolizör aracılığıyla elde edilen yeşil hidrojenin bir kısmı doğrudan enerji taşıyıcısı olarak kullanılmakta, geri kalan kısmı ise amonyak sentezi için reaktöre beslenmektedir. Amonyak üretim süreci sonrası sistemde yer alan NH_3 cracker modülü, gerektiğinde amonyağı yeniden hidrojen ve nitrojene ayrıştırarak çevrimsel enerji dönüşümüne katkı sağlamaktadır. Bu yapı, hem anlık hem de uzun vadeli enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamakta; döngüsel karbon ekonomisi çerçevesinde entegre ve sürdürülebilir bir üretim modeli sunmaktadır.

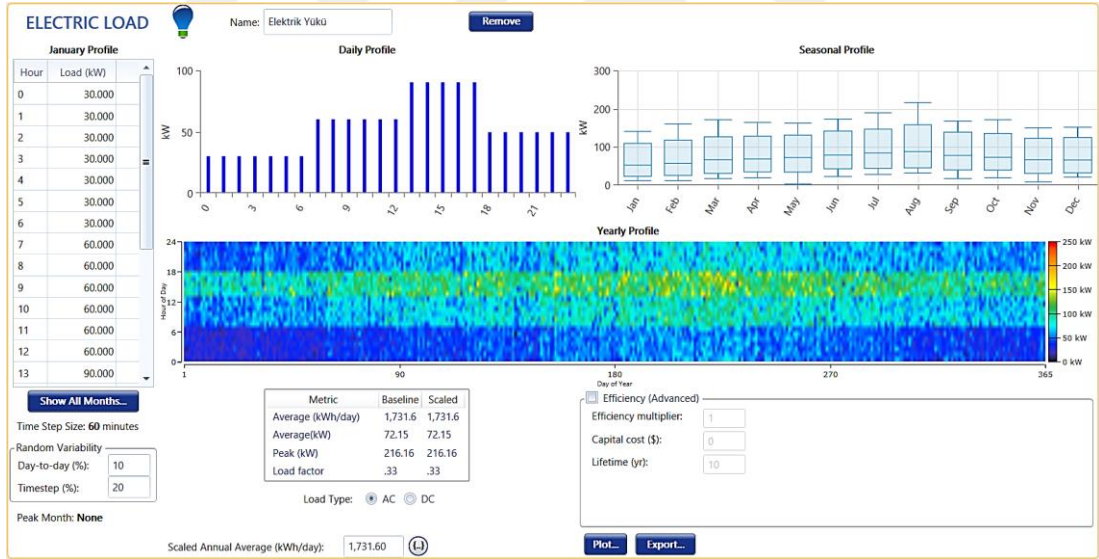
3.2 Veri Toplama Parametreleri

Sistem bileşenlerinin boyutlandırılması ve performans analizleri için kullanılan veriler, aşağıdaki kaynaklardan temin edilmiştir:

3.2.1 Yük profili verileri

Modelleme için ihtiyaç duyulan elektrik talebi profili, Diyarbakır ilindeki ilgili atık su arıtma tesisinin gerçek zamanlı tüketim verilerine dayanmıştır. Bu kapsamda tesisin

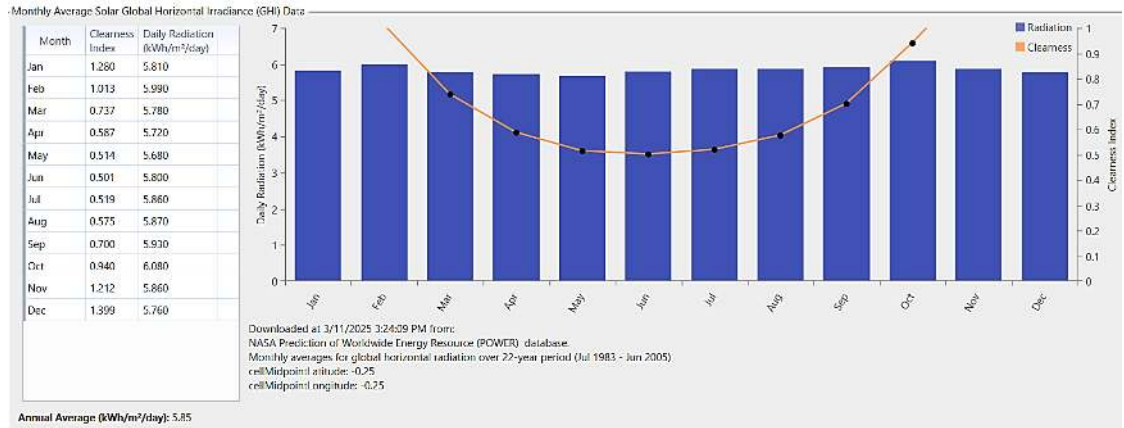
yük profili (saatlik elektrik tüketimi değerleri), Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.'den temin edilerek kullanılmıştır. Veriler, tesisin bir yıllık periyot boyunca mevsimsel ve gündüz-gece değişimlerini yansıtacak şekilde düzenlenmiştir. Arıtma tesislerinde genellikle yük profilinin gün içinde nispeten sabit ancak havalandırma, pompa ve çamur işleme gibi işlemlere bağlı olarak dönemsel pikler gösterdiği bilinmektedir. Modelde, herhangi bir saatlik zaman dilimi için talebin karşılanamaması (unmet load) durumu izin verilmemiş; şebeke veya depolama desteğiyle tüm kritik yükün karşılanacağı varsayılmıştır. Yük verilerinin bulunmadığı anlık dalgalanmalar için HOMER Pro'nun yük türetme araçları ve %10 oranında rastgele gürültü/pay olarak eklenmesi yaklaşımı uygulanmıştır. Sonuç olarak, arıtma tesisinin yıllık elektrik tüketim deseni modele başarıyla entegre edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, tesisin ortalama elektrik tüketiminin 1.731,60 kWh/gün ve pik güç talebinin 216,16 kW mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.2'de HOMER Pro'da tanımlanan elektrik yük profili sunulmuştur.



Şekil 3.2 HOMER Pro'da tanımlanan elektrik yük profili

3.2.2 Meteorolojik veriler

PV sistem üretim hesaplamalarında güneş ışınımı ve sıcaklık gibi meteorolojik parametreler kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Diyarbakır bölgesine ait iklimsel veriler NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) veri tabanından alınarak HOMER Pro yazılımına entegre edilmiştir. NASA SSE verileri, Dünya genelindeki 22 yılı aşkın (1983–2005) uydu gözlemlerine dayalı olarak oluşturulmuş olup, saatlik bazda küresel yatay radyasyon (GHI), difüz radyasyon, sıcaklık, rüzgâr hızı, hava basıncı gibi parametreleri içermektedir. Veriler, $1^\circ \times 1^\circ$ çözünürlükte (yaklaşık 111 km² grid alanı) sağlanmaktadır. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere, bölgedeki günlük ortalama radyasyon değerleri 5,72–5,99 kWh/m²/gün aralığında seyretmektedir. En yüksek güneşlenme Şubat (5,99) ve Ekim (6,08) aylarında gözlenmiş, minimum değer ise Mayıs-Haziran döneminde yaklaşık 5,68–5,80 kWh/m²/gün seviyesine düşmüştür. Yıllık ortalama güneş ışınımı değeri 5,85 kWh/m²/gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.3 Diyarbakır ili için aylık ortalama GHI

3.3 Kullanılan Yazılım ve Simülasyon Ortamı

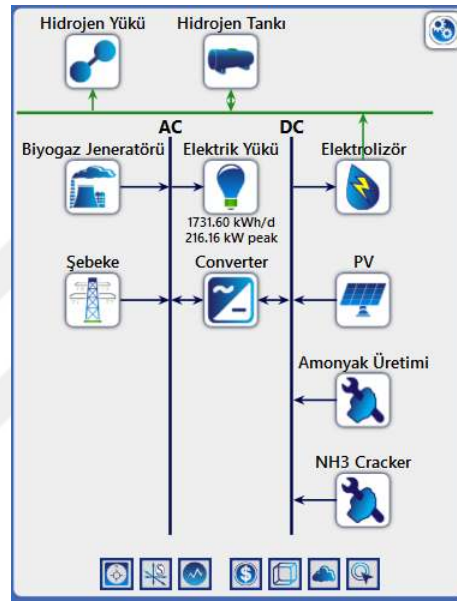
Modelleme ve optimizasyon işlemleri HOMER Pro 3.14.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazılım, her bir bileşenin teknik ve ekonomik parametrelerine göre sistem davranışını simüle ederek en uygun tasarımı belirlemektedir. Senaryo bazlı analizlerde aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır:

- Net Present Cost (NPC)
- Levelized Cost of Energy (LCOE)
- Renewable Fraction (RF)

- Emisyon azaltımı (CO₂ kg/yıl)
- Enerji depolama oranı ve sistem güvenilirliği

3.4 Sistem Bileşenleri

Sistemin tüm enerji üretim, dönüşüm ve depolama bileşenleri ile bunlar arasındaki ilişki HOMER Pro arayüzünde modellenmiş olup Şekil 3.2'de şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.4 HRES bileşenlerinin HOMER Pro üzerinde gösterimi

3.4.1 Güneş enerjisi üretimi

Bu çalışmada atıksu arıtma tesisinin elektrik ihtiyacını karşılamaya yönelik olarak düz panel (flat plate) yapıda, HOMER Pro yazılımında tanımlı olan Generic Flat Plate PV modeli kullanılmıştır. Sisteme ait teknik parametreler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 PV sistemine ait teknik ve ekonomik girdiler

Parametre	Değer
Panel tipi	Düz panel (flat plate)
Kurulu güç	5.000 kW
Yatırım maliyeti	1.200 \$/kW
Yenileme maliyeti	1.000 \$/kW
İşletme-bakım maliyeti	15 \$/yıl
Panel ömrü	25 yıl
Derating faktörü	%85
Elektiriksel bağlantı	DC

Kurulan sistemde panel verimliliği, sıcaklık, kirlenme ve kablolama kayıpları gibi faktörleri içeren %85'lik derating faktörü üzerinden modellenmiştir. HOMER Pro, bu faktörü PV sisteminin net çıkış gücünü şu şekilde hesaba katar:

$$P_{net}(t) = P_{rated} \times DF \times \frac{G_t(t)}{G_{STC}} \quad (3.1)$$

Değişkenler:

$P_{net}(t)$: Net PV çıkışı (kW)

P_{rated} : Kurulu güç (5000 kW)

DF : Derating faktörü (%85)

$G_t(t)$: Saatlik güneş ışıınımı (kW/m²)

G_{STC} : Standart test koşulları radyasyonu (1 kW/m²)

PV sisteminden elde edilen enerji, konvertör aracılığıyla yükleri beslemenin yanı sıra elektrolizör sistemine ve NH₃ üretim modülüne yönlendirilmektedir. PV panellerin sabit konumda ve güney yönelimine sahip olduğu varsayılmış, sistem saatlik çözünürlükte simüle edilmiştir.

Veri girişi olarak NASA-SSE kaynaklı Diyarbakır bölgesine ait yıllık ortalama yatay düzlem güneş ışıınımı kullanılmıştır. Bu değer yaklaşık olarak 5,4 kWh/m²/gün civarındadır ve HOMER Pro tarafından saatlik olarak modellenmiştir.

3.4.2 Biyogaz jeneratörü

Bu çalışmada hibrit enerji sisteminin sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla, atıksu arıtma tesisinde oluşan çamur kaynaklı biyokütle kullanılarak biyogaz üretimi ve elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Anaerobik çürütme prosesi ile elde edilen biyogaz, HOMER Pro yazılımı aracılığıyla modellenmiş içten yanmalı bir jeneratörde yakılarak elektrik enerjisine dönüştürülmüştür.

Sistem modellemesinde kullanılan biyokütle verileri, GitHub üzerinden elde edilen açık veri setine dayalı olarak HOMER Pro yazılımına aylık ortalama değerler şeklinde girilmiştir (bkz. Şekil 2.3). Bu veriler, mevsimsel değişkenliği yansıtmakta ve sistemin üretim kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.



Şekil 3.5 HOMER Pro'da tanımlanan aylık ort. biyokütle verileri

Günlük ortalama biyogaz üretimi:

$$M_{biyogaz} : M_{bio} \times R_g = 18.870 \times 0,19 = 3.585,3 \text{ kg/gün} \quad (3.2)$$

Değişkenler:

- $M_{biyogaz}$: Günlük biyogaz üretim miktarı (kg/gün)
- M_{bio} : Günlük mevcut biyokütle miktarı (kg/gün)
- R_g : Gazlaştırma oranı (kg biyogaz / kg biyokütle)

Biyogazdan elde edilen enerji miktarı:

$$E_{biyogaz} : M_{biyogaz} \times LHV = 3.585,3 \times 19 \approx 18.922 \text{ kWh/gün} \quad (3.3)$$

Değişkenler:

- $E_{biyogaz}$: Günlük biyogazın enerji karşılığı
- $M_{biyogaz}$: Günlük biyogaz miktarı (kg/gün)
- LHV : Alt ısı değeri (Lower Heating Value) - biyogaz için 19 MJ/kg

Sistemde kullanılan biyogaz jeneratörü HOMER Pro'da "Biogas Generator" bileşeni olarak tanımlanmıştır. Üretilen elektrik enerjisi doğrudan sistem yükünü beslemenin yanı sıra PV sistemleriyle birlikte çalışarak elektrolizör ve NH_3 üretim modülüne de yönlendirilmektedir. Bu yönüyle jeneratör, sistemin baz yük desteğini sağlayan ve enerji güvenliğini artıran stratejik bir bileşen olarak konumlanmaktadır. Jeneratörün kurulu gücü 500 kW olup elektrik üretimi Tablo 3.2'deki teknik verilere göre modellenmiştir:

Tablo 3.2 HOMER Pro'da tanımlanan biyogaz jeneratör bileşeni parametreleri

Parametre	Değer
Jeneratör tipi	İçten yanmalı
Yakıt türü	Biyogaz
Kurulu güç	500 kW
Verimlilik	~%35
Yakıt fiyatı	1,00 \$/kg
Yatırım maliyeti	1.200 \$ (toplam sistem maliyeti)
Yenileme maliyeti	500 \$ (toplam sistem maliyeti)
İşletme-Bakım Maliyeti	25 \$/operasyon saati
Ömür	20.000 saat
Minimum yük oranı	%50

3.4.3 Elektrolizör

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımıyla yeşil hidrojen üretimi hedeflenmiş ve sistem tasarımına HOMER Pro yazılımında tanımlı 1.000 kW kapasiteli bir elektrolizör entegre edilmiştir. Elektrolizör suyun elektrik enerjisi ile H_2 ve O_2 bileşenlerine ayrıştırılması prensibiyle çalışmakta; elde edilen hidrojen sistemin hidrojen yükünü karşılamakta ve NH_3 üretimi gibi kimyasal dönüşüm modüllerinde de değerlendirilmektedir.

Tablo 3.3 HOMER Pro'da tanımlanan elektrolizör bileşeni parametreleri

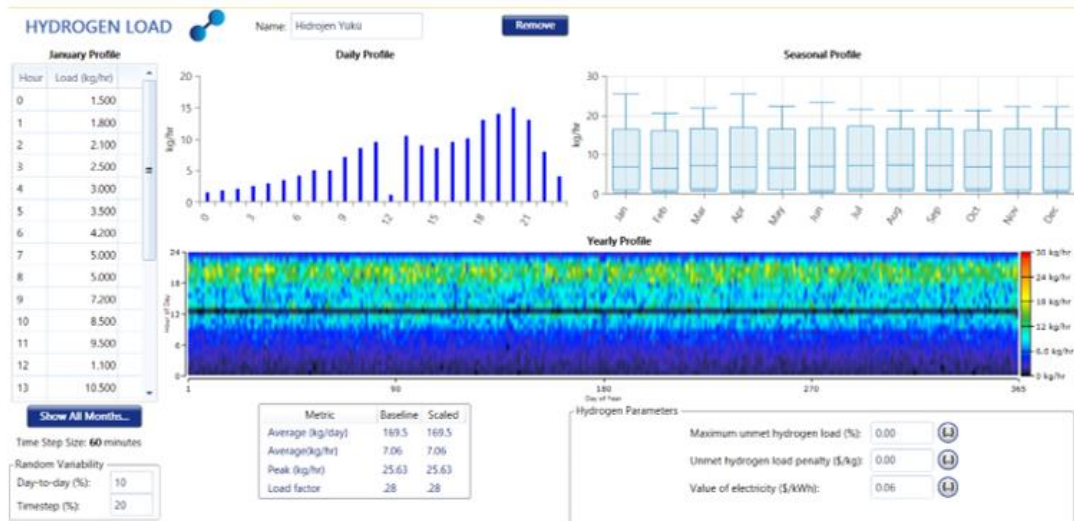
Parametre	Değer
Elektrolizör tipi	Generic (alkalin/PEM)
Kurulu kapasite	1.000 kW
Verimlilik	%70
Yaşam süresi	20 yıl
O&M maliyeti	10 \$/yıl
Başlangıç yatırımı	1.000 \$ (toplam sistem maliyeti)
Yenileme maliyeti	1.000 \$ (toplam sistem maliyeti)
Minimum yük oranı	0% (tam esnek çalışma)
Elektriksel bağlantı	DC
Zaman çizelgesi	7/24 sürekli çalışır (green full chart)

Elektrolizör tarafından üretilen hidrojen miktarı, elektrik girdisi ve verimlilik ile doğru orantılı olarak şu denklemle hesaplanır:

$$H_2(kg) = \frac{E \times \eta}{HHV_{H_2}} = \frac{E \times 0.70}{39,4} \quad (3.4)$$

Değişkenler:

- E : Elektrolizöre giren enerji (kWh)
- η : Verimlilik (%70)
- HHV_{H_2} : Hidrojenin yüksek ısı değeri (39,4 kWh/kg)



Şekil 3.6 HOMER Pro'da tanımlanan hidrojen yükü

Hidrojen yük profiline göre, sistemin gün içerisindeki en yoğun tüketimi saat 13:00 civarında oluşmakta ve bu pik talep 25,63 kg/saat düzeyindedir. Bu, elektrolizörün tam yükte çalıştığında bu talebi rahatlıkla karşılayabileceğini göstermektedir.

Yıllık ortalama göre, sistemin toplam hidrojen ihtiyacı yaklaşık olarak:

$$H_2^{y\u{u}lluk} = 169,5 \times 365 \approx 61.867,5 \text{ kg/y\u{u}l} \quad (3.5)$$

Bu ihtiyacın büyük kısmı, doğrudan üretim yoluyla karşılanmakta; fazla üretim ise hidrojen tanklarında depolanmaktadır.

3.4.4 Hidrojen depolama

Sistemde yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve elektrolizör aracılığıyla üretilen hidrojenin sürekliliğini sağlamak ve kullanım zamanlamasını dengelemek amacıyla, HOMER Pro ortamında 5.000 kg kapasiteli hidrojen tankı tanımlanmıştır. Bu tank, sistemin hem kısa vadeli yedekleme ihtiyacını karşılamakta hem de NH₃ üretimi ve doğrudan H₂ tüketimi senaryolarına esneklik kazandırmaktadır.

Tablo 3.4 HOMER Pro'da tanımlanan hidrojen tank bileşeni parametreleri

Parametre	Değer
Tank kapasitesi	5.000 kg
Yatırım maliyeti	500 \$ (toplam sistem başına)
Yenileme maliyeti	450 \$ (toplam sistem başına)
O&M maliyeti	5 \$/yıl
Sistem ömrü	20 yıl
Başlangıç tank seviyesi	0 kg
Elektriksel bağlantı	Yok (pasif bileşen)
Tank sonu şartı	Yıl sonunda başlangıç seviyesinin $\geq$ olması

Tank doluluğu, HOMER Pro tarafından elektrolizörden gelen saatlik hidrojen üretimi ve sistemdeki hidrojen tüketim yükü arasındaki fark ile güncellenmektedir. Yıl sonunda tank seviyesinin başlangıçtaki sıfır kg seviyesini aşması zorunlu kılınmıştır, bu da yıl boyunca depolanan hidrojenin en az sistem ihtiyacını karşılayacak kadar üretildiğini garanti altına almaktadır.

Sistem hidrojen üretimi ve tüketimi arasındaki farktan elde edilen net üretim (net hydrogen flow), tankın doluluğunu aşağıdaki şekilde etkiler:

$$H_{tank}(t) = H_{tank}(t - 1) + H_{prod}(t) - H_{load}(t) \quad (3.6)$$

Değişkenler:

- $H_{tank}(t)$: t zamanındaki tank doluluğu (kg)
- $H_{prod}(t)$: Elektrolizör üretimi (kg)
- $H_{load}(t)$: Hidrojen yükü (kg)

Tank kapasitesi $H_{max} = 5000$ kgH olduğu için model şu kısıtlamayı uygular:

$$0 \leq H_{tank}(t) \leq 5000 \quad (3.7)$$

Yıllık hidrojen tüketimi daha önce hesaplandığı üzere yaklaşık:

$$H_2^{yillik} = 169.5 \times 365 \approx 61.867,5 \text{ kg/yıl}$$

Bu değer göz önünde bulundurulduğunda 5000 kg kapasiteli tank, maksimum günlük tüketimin yaklaşık 30 katı kadar hidrojen depolama kapasitesi sunmaktadır. Böylece, PV üretiminin yüksek olduğu yaz aylarında fazla hidrojenin depolanması sağlanarak kış aylarında yük talebi daha verimli karşılanabilmektedir. Bu yapı, hem yük dengelemesi, hem de NH_3 üretimi için gerekli süreklilikte hidrojen beslemesi açısından sistemin esnekliğini artırmaktadır.

3.4.5 Amonyak üretim ve NH_3 cracker modülü

Hibrit enerji sisteminde üretilen yeşil hidrojenin nihai olarak değerlendirildiği bölüm, yeşil amonyak sentez ünitesidir. NH_3 , hidrojenin azot ile reaksiyonundan elde edilen ve gerek gübre endüstrisinde gerekse enerji taşıyıcısı olarak önemli bir kimyasaldır. Bu çalışmada, amonyak üretimi yenilenebilir enerji kaynaklı olduğu için karbonsuz (yeşil) amonyak olarak değerlendirilmektedir. Amonyak sentez ve depolama süreçlerinin modellenmesi aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir:

Sistem konfigürasyonunda yeşil hidrojenin yalnızca doğrudan enerji taşıyıcısı olarak değil, aynı zamanda kimyasal formda uzun vadeli enerji depolama amacıyla kullanımı hedeflenmiştir. Bu kapsamda, Haber-Bosch tabanlı amonyak sentez modülü HOMER Pro yazılımında özel “Custom Component” olarak tanımlanmıştır. Elektrolizörle üretilen hidrojenin belirli bir kısmı, amonyak üretim birimine yönlendirilmiş; burada sentetik azot-hidrojen birleşimi ile NH_3 elde edilmiştir. Üretilen amonyak, enerji ihtiyacının karşılanamadığı durumlarda NH_3 Cracker modülü ile tekrar hidrojen ve azota dönüştürülerek enerji sistemine geri kazandırılmıştır.

- Ammonia tank: Üretilen NH_3 ’ün depolandığı tank birimidir.
- NH_3 cracker: Amonyağı ayrıştırarak tekrar H_2 ve N_2 üreten dönüşüm modülüdür.
- Power output (kW): GitHub veri tabanından temin edilen ve üretim profilini belirleyen zaman serisi verileri ile modellenmiştir.

Amonyak üretimi sırasında uygulanan temel Haber-Bosch reaksiyonu:



Bu süreçte gereken enerji, elektrikli kompresörler ve ısıtma üniteleri ile karşılanmaktadır. HOMER Pro'da amonyak üretimi, yenilenebilir kaynaklara dayalı üretim fazlası olması durumunda aktif hale gelen birim olarak yapılandırılmıştır.

Ortalama enerji ihtiyacı literatür temelli olarak yaklaşık,

$$E_{NH_3} = 9,2 \text{ kWh/kg } NH_3 \quad (3.9)$$

olarak modellenmiştir.

Tablo 3.5 HOMER Pro'da tanımlanan amonyak üretim modül parametreleri

Parametre	Değer
Yatırım Maliyeti	1.000 \$ (toplam sistem başına)
Yenileme Maliyeti	700 \$ (toplam sistem başına)
İşletme-Bakım Maliyeti	20 \$/yıl
Sistem Ömrü	15 yıl
Elektriksel Bağlantı	DC
Derating Faktörü	%95
Yıllık Ortalama Güç	102,98 kW

Şekil 3.5, amonyak üretim modülü için tanımlanan özel zaman serisi verilerine dayalı aylık ortalama güç çıkışı (kW) dağılımını göstermektedir. Veriler, GitHub veri havuzundan alınarak HOMER Pro yazılımına aktarılmış ve yıl boyunca enerji çıkışı profili oluşturulmuştur.



Şekil 3.7 HOMER Pro'da tanımlanan aylık ort. amonyak güç üretimi

Şekil 3.5'de görüldüğü üzere, en yüksek değerler yaz aylarında gözlenmiş olup (Temmuz – 119,94 kW), bu durum sistemin enerji fazlasına dayalı olarak çalıştığını göstermektedir. Yıllık ortalama güç çıkışı ise 102,98 kW olarak hesaplanmıştır. Bu veriler doğrultusunda NH_3 üretim modülünün enerjiye erişim eğilimi, mevsimsel üretim-tüketim dengesi ile tutarlı şekilde modellenmiştir.

3.4.6 Konvertör ve enerji dönüşümü

Sistemde yer alan PV paneller, elektrolizör ve amonyak üretim üniteleri DC çıkışlı olup; elektrik yükü ve biyogaz jeneratörü ise AC sistemle çalışmaktadır. Bu farklı gerilim seviyeleri arasında geçişin sağlanması amacıyla konvertör (inverter + rectifier) bileşeni HOMER Pro ortamında yapılandırılmıştır.

3.4.6.1 Konvertörün işlevi

- DC → AC dönüşümü: PV sistemi tarafından üretilen enerjinin şebekeye, AC yüküne veya biyogaz jeneratörü ile senkronize çalışmasına imkân verir.
- AC → DC dönüşümü: Biyogaz jeneratörü veya şebekeden alınan enerjinin, elektrolizör ve NH₃ üretim sistemlerinde kullanılmasına olanak sağlar.

Sistem modeli içerisinde, tek bir büyük boyutlu çift yönlü konvertör kullanılmış ve enerji akışlarının yönetimi HOMER Pro'nun dinamik senaryo algoritması ile sağlanmıştır.

HOMER Pro üzerinden yapılan konfigürasyona göre, sistemdeki konvertör biriminin servis ettiği yük:

- Günlük ortalama enerji geçişi: 1.731,60 kWh/gün
- Anlık maksimum yük: 216,16 kW

Bu değerlere göre konvertör; elektrolizör, hidrojen tankı şarjı, NH₃ üretim modülü gibi yüksek güçlü bileşenlere enerji iletimi için kritik rol oynamaktadır.

Konvertörler enerji dönüşümünde belirli bir verimlilik kaybına neden olmaktadır. Bu çalışmada HOMER Pro'nun varsayılan değerlerine göre;

$$\eta_{inverter}=0,96, \quad \eta_{rectifier}=0,96 \quad (3.10)$$

olarak alınmıştır.

Bu verimlilik değerleri doğrultusunda, sistemde enerji dönüşümünden kaynaklı toplam kayıplar:

$$P_{kayıp} = (1 - \eta) \times P_{giriş} \quad (3.11)$$

formülü ile hesaplanmakta ve optimizasyon algoritmasında dikkate alınmaktadır.

Konvertör modülü, sistemin farklı bileşenleri arasında gerilim uyumluluğunu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda enerji yönlendirme verimliliğini artırarak sistem güvenilirliği ve optimizasyon performansına doğrudan katkıda bulunmaktadır. HOMER Pro optimizasyon çıktılarında, doğru boyutlandırılmış konvertör modülü sayesinde LCOE ve NPC değerlerinde düşüş gözlenmiş ve sistem senaryolarının sürdürülebilirliği artmıştır.

3.4.7 Şebeke entegrasyonu

Bu çalışmada tasarlanan hibrit enerji sisteminin enerji arz güvenliğini ve operasyonel esnekliğini artırmak amacıyla, sisteme şebeke (grid) bağlantısı da entegre edilmiştir. Şebeke, sistemin hem enerji ihtiyacını karşılayamadığı anlarda destek sağlar hem de üretim fazlası enerjinin şebekeye satılmasına imkân tanır.

Şebeke bileşenine ilişkin temel ekonomik parametreler ve tarife detayları HOMER Pro ortamında “Advanced Grid” bileşeniyle aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- Grid Power Price (Şebekeden Alım Fiyatı):
 $C_{buy} = 0,10 \text{ \$/kWh}$
(Sistemin şebekeden elektrik satın alırken ödediği birim maliyet)
- Grid Net Excess Price (Şebekeye Satış Fiyatı):
 $C_{sell} = 0,05 \text{ \$/kWh}$
(Üretilen ve tüketilemeyen fazla elektriğin şebekeye satılması durumunda elde edilen birim gelir)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Sistem Optimizasyon Sonuçları

Başlangıç aşamasında sistem tasarımına PV modüller dahil edilmiş olmasına rağmen, HOMER Pro'nun optimizasyon algoritması, simülasyon sürecinde bu bileşenin ekonomik olarak sistem bütününe yeterli katkı sunmadığını belirlemiş ve baz senaryo konfigürasyonunda PV kullanımına yer vermemiştir. Bu durum, HOMER Pro'nun en düşük toplam Net Bugünkü Maliyet (NPC) değerine sahip yapı konfigürasyonlarını öncelikli olarak seçmesinden kaynaklanmaktadır.

Yapılan simülasyon sonucunda, PV sistemi sistem bileşenleri arasında yer almamış, üretim grafikleri ve maliyet dağılımında herhangi bir katkı sunmamıştır. Bu bulgu, HOMER Pro'nun PV içeren sistem yapılarını ekonomik açıdan daha az uygun bularak elenmiş senaryolar arasında değerlendirdiğini göstermektedir. PV sistemlerin dışlanması durumu; bölgesel güneşlenme potansiyelinin sınırlı olması, PV yatırımının geri dönüş süresinin uzun olması ve sistemin baz yük ihtiyacının daha kararlı kaynaklarla (örneğin biyogaz) karşılanmasının daha uygun bulunmasıyla açıklanabilir.

System Architecture



Şekil 4.1 Simüle edilen HRES bileşen mimarisi

Şekil 4.1'de HOMER Pro simülasyon ortamında oluşturulan hibrit enerji sisteminin temel bileşenleri yer almaktadır. Sistem; biyogaz jeneratörü (500 kW), elektrolizör (1.000 kW), hidrojen tankı (5.000 kg), amonyak üretim ünitesi, NH₃ cracker modülü, sistem konvertörü ve şebeke bağlantısından oluşmaktadır.

Tüm bu sonuçlar doğrultusunda, PV sistemlerin mevcut analizde dışlanmış olmasına rağmen, gelecek çalışmalarda farklı teknolojik ve stratejik optimizasyonlarla sisteme yeniden entegre edilmesi aşağıdaki nedenlerle önerilmektedir:

- Gelişmiş PV teknolojileri (ör. bifacial paneller),
- Akıllı izleme ve üretim tahminleme sistemleri,
- Mevsimsel üretim farklarını dengeleyebilecek enerji depolama çözümleri,

Bu entegrasyonlar, sistemin karbon ayak izinin azaltılması ve yeşil hidrojen üretim kapasitesinin artırılması açısından önemli kazanımlar sağlayacaktır.

4.1.1 Biyogaz jeneratörü

Bu tez kapsamında hibrit sistemin baz yük desteğini sağlamak üzere entegre edilen 500 kW kapasiteli biyogaz jeneratörü, sistemin elektrik ihtiyacını esnek ve dengeli biçimde karşılamak amacıyla yapılandırılmıştır. HOMER Pro simülasyonuna göre, biyogaz jeneratörü yılda 4.015 saat çalışarak toplamda 501.875 kWh/yıl elektrik üretmiştir. Ortalama çıkış gücü 125 kW olarak belirlenmiş; minimum ve maksimum güç çıkışlarının sabit olması, jeneratörün tanımlı üretim kapasitesiyle sistemin talep edilen güç aralığını optimum şekilde desteklediğini göstermektedir. Üretim sırasında 1.204.500 kg biyogaz tüketilmiş ve biyogazın alt ısı değeri baz alınarak hesaplanan toplam yakıt enerji girdisi 1.840.208 kWh/yıl olmuştur. Bu değer doğrultusunda, jeneratörün ortalama elektriksel verimliliği %27,3 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.2'de yer alan "Biyogaz jeneratörünün yıllık zaman bazlı güç üretim profili" grafiği, jeneratörün günün yalnızca belirli saatlerinde çalıştığını net biçimde ortaya koymaktadır. Turuncu bant ile gösterilen üretim profili, jeneratörün özellikle sabah 08:00 ile akşam 18:00 saatleri arasında aktif olduğunu, gece saatlerinde ise devre dışı kaldığını göstermektedir. Bu durum, sistemde yer alan diğer üretim ve depolama bileşenleriyle koordineli bir yük paylaşımı stratejisinin izlendiğini göstermektedir.

Şebeke		System Converter		Generic Electrolyzer		Hydrogen Tank		Emissions													
Cost Summary		Cash Flow		Compare Economics		Electrical		Hydrogen		Fuel Summary		Biyogaz Jeneratörü		Renewable Penetration		Ammonia Tank		NH3 Cracker			
Quantity		Value		Units						Quantity		Value		Units		Quantity		Value		Units	
Hours of Operation		4,015		hrs/yr						Electrical Production		501,875		kWh/yr		Fuel Consumption		1,204,500		kg	
Number of Starts		365		starts/yr						Mean Electrical Output		125		kW		Specific Fuel Consumption		2.40		kg/kWh	
Operational Life		4.98		yr						Minimum Electrical Output		125		kW		Fuel Energy Input		1,840,208		kWh/yr	
Capacity Factor		11.5		%						Maximum Electrical Output		125		kW		Mean Electrical Efficiency		27.3		%	
Fixed Generation Cost		75.0		\$/hr																	
Marginal Generation Cost		2.00		\$/kWh																	

Şekil 4.2 Biyogaz jeneratörünün güç üretim profili

Bu senaryo jeneratörün sistemde yalnızca sürekli çalışmak yerine, enerji talebinin en yoğun ve yenilenebilir üretimin en zayıf olduğu zamanlarda devreye girerek yüksek verimlilikle katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Jeneratörün bu şekilde çalışması, şunları sağlamıştır:

- Elektrolizör ve amonyak üretim birimlerine güvenilir enerji beslemesi,
- Şebeke bağımlılığının azaltılması,
- Yakıt tüketiminin gereksiz yere artmasının önüne geçilmesi,
- Karbon salımının kontrol altında tutulması gibi konularda verimlilik sağlamıştır.

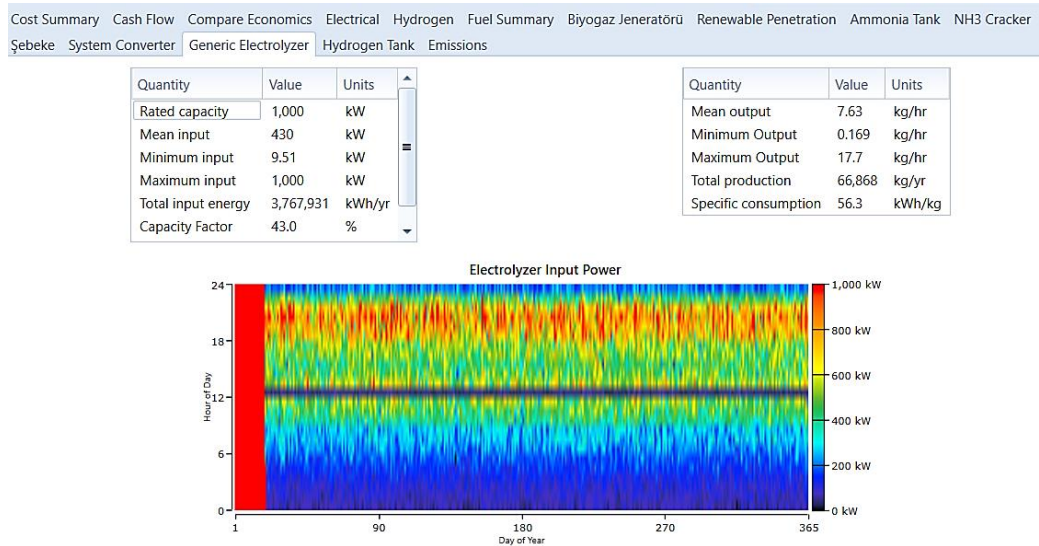
Jeneratörün biyogaz ile çalışması, tesisin atıklarını enerjiye dönüştürme işleviyle döngüsel karbon ekonomisinin ana ilkelerinden biri olan kaynak geri kazanımını desteklemektedir. Aynı zamanda, atık yönetimini enerji üretimiyle entegre eden bu yapı, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından sistemin toplam başarımına katkı sunmuştur.

Sistemde yer alan 1.000 kW kapasiteli elektrolizör, yeşil hidrojen üretimini gerçekleştiren en kritik bileşenlerden biri olarak yapılandırılmıştır. Bu ünite, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik ile çalıştırılarak suyun elektrolizi

yoluyla hidrojen üretmektedir. HOMER Pro simülasyon sonuçlarına göre elektrolizör yılda toplam 3.767.931 kWh enerji ile beslenmiş ve bu enerji girişi sonucunda 66.868 kg/yıl hidrojen üretimi sağlanmıştır.

Elektrolizörün ortalama enerji girişi 430 kW, kapasite faktörü ise %43,0 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, elektrolizörün hem yük profiline hem de sistemin enerji üretim potansiyeline uyumlu olarak çalıştığını göstermektedir. Minimum giriş gücü 9,5 kW iken maksimum değer tam kapasite olan 1.000 kW'a ulaşmıştır. Sistemdeki elektrik tüketimi başına üretim oranı baz alınarak özgül enerji tüketimi (specific consumption) 56,3 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer, PEM elektrolizör sistemleri için kabul edilebilir sınırlar içinde yer almakta ve sistemin enerji verimliliği açısından dengeli bir performans sunduğunu göstermektedir.

Şekil 4.3'te sunulan elektrolizörün giriş gücü grafiği, yıl boyunca sistemin saatlik bazda nasıl çalıştığını renkli bir spektrumla göstermektedir. Özellikle gündüz saatlerinde yoğunlaşan üretim, sistemin enerji kaynaklarının gün içindeki değişkenliğine uyum sağlayarak elektrolizörün esnek ve adaptif bir çalışma modeli izlediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.3 Elektrolizörün yıllık enerji giriş profili

Üretim spektrumu:

- Kış aylarında daha düşük yoğunlukta (mavi-yeşil tonlar),
- Yaz aylarında yüksek enerji girişiyle (sarı-kırmızı tonlar) daha yüksek hidrojen üretimi anlamına gelmektedir. Bu, sistemin yenilenebilir kaynaklara dayalı yapısıyla doğrudan ilişkili bir sezonsal varyasyonu yansıtmaktadır.

Elektrolizör, sistemde üretilen fazla enerjinin depolanabilir bir forma (hidrojen) dönüştürülmesinde anahtar rol oynamıştır. Biyogaz jeneratörü kaynaklı enerji fazlalarının değerlendirilmesinde elektrolizör aktif olarak çalışmış, böylece sistemin şebekeye satıştan çok, içsel depolama ve dönüştürme yeteneklerini ön plana çıkarmıştır.

Ayrıca hidrojen üretimi yalnızca kısa vadeli enerji dengelemesi değil, aynı zamanda amonyak üretimi, NH_3 cracker sistemleri ve enerji depolama stratejilerinde ara yakıt olarak kullanılarak sistemin genel esnekliğini artırmıştır.

4.1.3 Hidrojen depolama

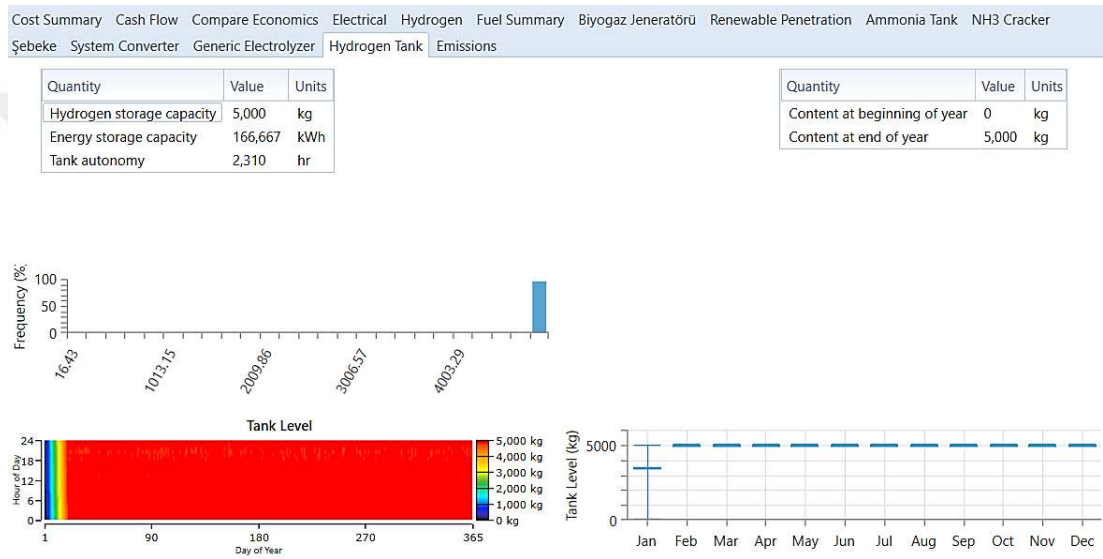
Sistem mimarisi içerisinde yer alan hidrojen tankı; elektrolizör tarafından üretilen hidrojenin güvenli, verimli ve sürekliliği sağlayacak şekilde depolanması amacıyla yapılandırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre hidrojen tankının toplam depolama kapasitesi 5.000 kg, enerji eşdeğeri kapasitesi ise 166.667 kWh olarak belirlenmiştir. Bu değer, sistemin yüksek miktarda hidrojen üretimiyle uyumlu olacak şekilde tasarlandığını ve tam dolumda 2.310 saatlik otonomi sağlayabildiğini göstermektedir.

Yılın başında tank seviyesi 0 kg iken, yıl sonunda tam kapasite olan 5.000 kg hidrojen ile tamamlanmıştır. Bu durum, sistemin ürettiği hidrojenin bir kısmının doğrudan tüketildiğini, bir kısmının ise depolanarak yüksek miktarda rezerv enerji oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu strateji, sistemin mevsimsel dengesizlikler ve üretim fazlası senaryolarında enerji güvenliğini artıran kritik bir tasarım tercihidir.

Şekil 4.4’te sunulan “Hidrojen tankı doluluk seviyesinin saatlik zaman bazlı değişimi” grafiği, hidrojen seviyesinin yıl boyunca saatlik bazda oldukça stabil olduğunu

göstermektedir. Özellikle Mart ayından itibaren sistemin depoyu maksimuma yakın seviyede sabit tuttuğu, neredeyse hiç kritik düşüş yaşanmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, elektrolizörün güçlü üretim kapasitesi ile depolama ünitesinin eş zamanlı yönetiminin başarılı şekilde optimize edildiğini göstermektedir.

Yine aynı şekilde aylık tank seviyesi grafiğinde de tankın her ay yüksek doluluk oranında tutulduğu, sistemin hidrojen yönetimini enerji sürekliliği odaklı yaptığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.4 Hidrojen tankı seviyesinin zaman bazlı değişimi

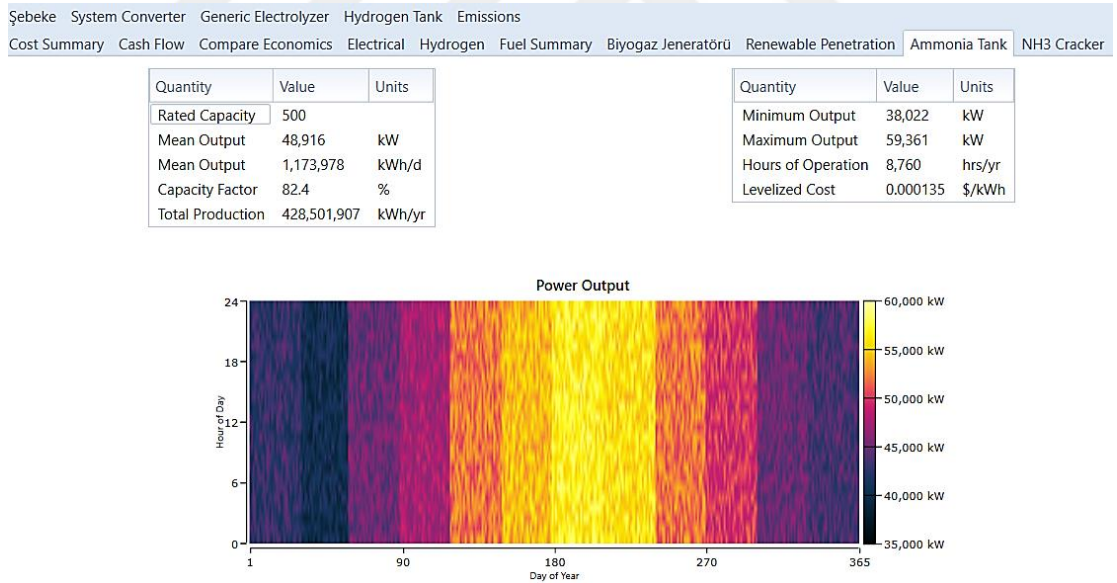
Hidrojenin verimli şekilde depolanabilmesi; sistemin sadece anlık üretim-tüketim senaryolarında değil, geçici enerji arz-talep dengesizliklerinde de tampon görevini üstlenmesini sağlamaktadır. Özellikle amonyak üretim ünitesi ve NH_3 Cracker sistemleri ile bütünleşik çalıştığında, bu tank bir enerji rezervi değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik bileşenidir.

Ayrıca, elektrolizörün üretim penceresi dışında, şebeke destekli ya da biyogaz tabanlı yük beslemesi sırasında hidrojene erişim sağlayarak, karbon salımı içermeyen enerji rotalarını desteklemektedir.

4.1.4 Amonyak üretim ve depolama ünitesi

Sistem bileşenlerinden biri olan amonyak üretim ünitesi, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen yeşil hidrojenin azotla birleşimi sonucu NH_3 üretimini gerçekleştiren temel dönüşüm modülüdür. Simülasyon sonuçlarına göre 500 kW kapasiteye sahip bu birim, yıl boyunca kesintisiz olarak 8.760 saat çalışmış, ortalama 48.916 kW çıkış gücüyle toplamda 428.501,907 kWh düzeyinde bir üretim gerçekleştirmiştir. Bu performans, ünitenin %82,4'lük kapasite faktörü ile çalıştığını göstermekte ve yüksek verimlilik düzeyine işaret etmektedir.

Üretim sırasında birimin minimum çıkış gücü 38.022 kW, maksimum çıkış gücü ise 59.361 kW olarak ölçülmüştür. Bu değerler, amonyak üretim ünitesinin enerji akışına göre değişken ama dengeli bir güç yönetimi stratejisi izlediğini göstermektedir. Şekil 4.5'de amonyak üretim biriminin yıl boyunca saatlik bazda gerçekleştirdiği güç çıkışları sunulmaktadır.



Şekil 4.5 Amonyak üretim ünitesinin yıl boyu güç çıkış profili

Şekil 4.5'te yer alan grafik, amonyak üretim biriminin yıl boyunca saatlik bazda gerçekleştirdiği güç çıkışlarını temsil etmektedir. Dikey ekseninde saatlik zaman dilimi (0–24), yatay ekseninde ise yılın günleri (1–365) yer almaktadır. Renk skalası ise güç çıkış seviyelerini göstermekte olup;

- Beyaz ve sarı tonlar: 55.000 – 60.000 kW aralığında yüksek üretim yoğunluğunu,
- Turuncu ve kırmızı tonlar: 50.000 – 55.000 kW düzeyinde aktif üretimi,
- Pembe-mor tonlar: orta düzey çalışmayı,
- Lacivert-siyah renkler ise daha düşük üretim seviyelerini göstermektedir.

Grafik incelendiğinde, özellikle Nisan ile Eylül ayları arasında, ünitenin yoğun biçimde çalıştığı ve üretim gücünün maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Gündüz saatlerinde üretim yoğunluğunun artması, sistemin bu dönemde elektrolizör aracılığıyla üretilen hidrojen miktarındaki artışa paralel olarak amonyak üretimini artırdığını ortaya koymaktadır. Bu dönem, sistemin en yüksek verimle çalıştığı zaman aralığını ifade etmektedir.

Kış aylarında ise (Ocak–Mart ve Ekim–Aralık), üretim düzeyinin görece olarak düştüğü ve grafik renklerinin mor–lacivert tonlara kaydığı gözlemlenmektedir. Bu dönemlerde güneşlenme süresinin azalması ve enerji üretim potansiyelinin düşmesi, amonyak üretim seviyesini sınırlı düzeyde etkilemiştir. Ancak buna rağmen, ünite yıl boyunca sürekli çalışmayı sürdürerek sistemin kararlılığına ve enerji sürekliliğine katkı sağlamıştır.

Amonyak üretim ünitesi, yeşil hidrojenin amonyak formuna dönüştürülerek kimyasal enerji olarak saklanması ve gerektiğinde NH_3 Cracker aracılığıyla yeniden enerjiye çevrilmesi açısından sistemin en stratejik bileşenlerinden biridir. Amonyakın kararlı yapısı sayesinde hem yüksek yoğunlukta enerji taşınımı sağlanabilmekte, hem de karbonsuz bir yakıt olarak sistemin döngüsel karbon ekonomisi modeline katkı sunmaktadır. Simülasyon çıktıları, bu ünitenin yalnızca üretim performansının değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli kazanımlar sağladığını ortaya koymaktadır.

4.1.5 NH₃ cracker (amonyak dönüşüm modülü)

NH₃ Cracker modülü, sistem içerisinde kimyasal enerji taşıyıcısı olan amonyakın yeniden enerji formuna dönüştürülmesini sağlayan ileri teknolojiye sahip bir enerji geri kazanım ünitesidir. Bu modül sayesinde, yeşil hidrojen kaynaklı olarak üretilmiş ve daha sonra amonyak olarak depolanmış enerji, yeniden elektrik üretimi için kullanılabilir hale gelmekte; böylece sistemin hem enerji sürekliliği hem de karbon nötr yapısı desteklenmektedir. HOMER Pro simülasyon sonuçlarına göre, 500 kW kapasiteli NH₃ Cracker ünitesi:

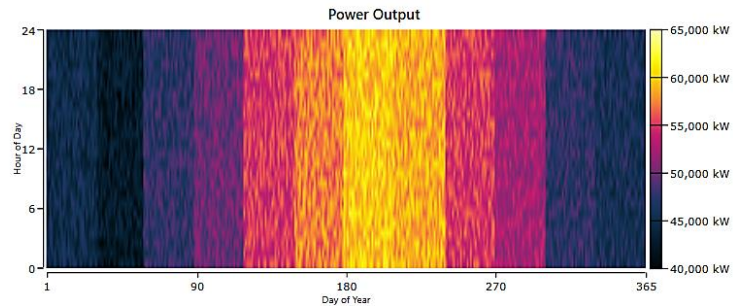
- Toplamda 451.054,639 kWh/yıl enerji üretmiştir,
- Ortalama çıkış gücü: 51.490 kW
- Kapasite faktörü: %82,4
- Çalışma süresi: 8.760 saat/yıl (yani yıl boyunca tam zamanlı ve kesintisiz çalışma),
- Minimum çıkış gücü: 40.023 kW
- Maksimum çıkış gücü: 62.485 kW

Bu veriler, NH₃ Cracker'ın hibrit enerji sisteminde sadece destekleyici bir modül değil, yük taşıyıcı ana enerji üretim bileşenlerinden biri olarak çalıştığını açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 4.6'da; NH₃ Cracker modülünün yıl boyunca saatlik bazda gerçekleştirdiği güç çıkışı gösterilmektedir.

Şebeke	System Converter	Generic Electrolyzer	Hydrogen Tank	Emissions
Cost Summary	Cash Flow	Compare Economics	Electrical	Hydrogen
Fuel Summary	Biyogaz Jeneratörü	Renewable Penetration	Ammonia Tank	NH ₃ Cracker

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	500	
Mean Output	51,490	kW
Mean Output	1,235,766	kWh/d
Capacity Factor	82.4	%
Total Production	451,054,639	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	40,023	kW
Maximum Output	62,485	kW
Hours of Operation	8,760	hrs/yr
Levelized Cost	0.000658	\$/kWh



Şekil 4.6 NH₃ Cracker modülünün yıl boyu güç çıkışı

Görselde dikey ekseninde günün saatleri (0–24), yatay ekseninde yılın günleri (1–365) yer almakta, renk skalası ise üretim gücünü temsil etmektedir:

- Sarı – Beyaz tonlar (60.000–65.000 kW): Tam kapasiteye yakın güçlü çalışma,
- Turuncu – Kırmızı (55.000–60.000 kW): Yüksek üretim,
- Pembe – Mor (50.000–55.000 kW): Dengeli çalışma süreci,
- Lacivert – Siyah (40.000–50.000 kW): Gece ve düşük enerji senaryolarında üretim olarak yorumlanmaktadır.

Gündüz saatleri (06:00–20:00), Yoğun enerji çıkışı var, çünkü elektrolizör ve amonyak üretim birimi aktiftir. Depolanan amonyak hızlı şekilde Cracker'a yönlendiriliyor. Gece saatleri (00:00–06:00 / 20:00–00:00), Çıkış seviyesi düşmekte; sistem üretim değil, daha çok depolama aşamasında veya yük ihtiyacı düşüktür.

NH₃ Cracker, yalnızca enerji üretimi için değil; sistemin kendi döngüselliğini kapatma görevini üstlenmiştir. Amonyak üretimi ve depolaması yoluyla biriktirilen kimyasal enerji, Cracker üzerinden elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve bu sayede:

- Şebekeye duyulan ihtiyaç azalmaktadır,
- Sistemin dışa bağımlılığı düşürülmektedir,
- Yük profili sabitlenmekte, gece üretimi veya düşük üretim dönemleri dengelenmektedir.

Ayrıca, NH₃ Cracker sayesinde sistemde atıl kalan enerji formları tekrar kullanılabilir hale gelirken, yeşil hidrojenin dolaşımı da tamamlanmakta ve karbon salımı içermeyen bir sistem bütünlüğü sağlanmaktadır.

NH₃ Cracker, karbon salımı yaratmadan kimyasal enerjiyi elektriğe çevirme kabiliyeti ile döngüsel karbon ekonomisinin son halkasını temsil eder. Amonyak üretimi ve depolama aşamalarının ardından Cracker'ın devreye girmesiyle, sistemde bir tam döngü oluşmakta, enerji hiçbir noktada atıl kalmamakta ve sürdürülebilirlik hedefleri başarıyla karşılanmaktadır.

$\text{NH}_3 \rightarrow \text{H}_2 \rightarrow \text{Enerji}$ şeklinde gerçekleşen bu dönüşüm, aynı zamanda güç yoğunluğu yüksek, uzun vadeli enerji depolamaya olanak tanır. Böylece sistem, hem gün içi dalgalanmalara karşı direnç kazanmakta, hem de mevsimsel enerji dengesizliklerini verimli şekilde yönetebilmektedir.

NH_3 Cracker modülü, simülasyon çıktıları doğrultusunda sistemin en istikrarlı ve en verimli çalışan enerji bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmiştir. Hem yüksek üretim kapasitesi, hem de grafiksel sürekliliği ile enerji dönüşüm zincirinin kritik halkasını oluşturan bu bileşen, enerji sürekliliğini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda karbonsuz üretim altyapısını da tamamlamaktadır.

4.1.6 Şebeke entegrasyonu ve enerji alışverişi analizi

Hibrit enerji sisteminin optimize senaryolarında, şebeke ile kurulan bağlantı; sistemin hem ihtiyaç anında elektrik alabilmesi hem de fazla üretimini dışarıya satabilmesi açısından stratejik önem taşımaktadır.

Tablo 4.1’de aylık enerji alışverişi ve net enerji dengesinin anlaşılması adına sistemin ay bazında şebekeden satın aldığı ve sattığı enerji miktarlarını göstermektedir. Öne çıkan bazı teknik veriler Tablo 4.1’de sunulmuştur.

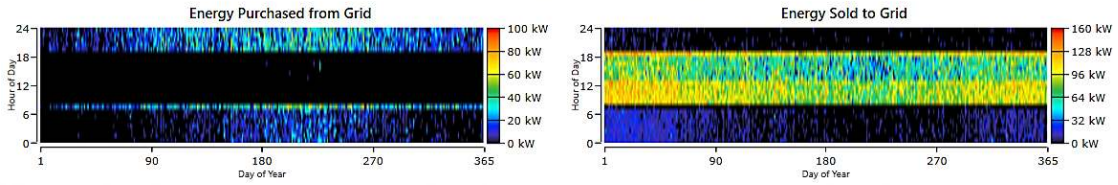
Tablo 4.1 Aylık enerji alışverişi ve net enerji dengesi

Ay	Satın Alınan Enerji (kWh)	Satılan Enerji (kWh)	Net Enerji Alımı (kWh)	Aylık Maksimum Çekiş (kW)
Ocak	987	40.454	-39.467	36
Nisan	3.671	30.312	-26.641	61
Temmuz	8.312	25.665	-17.353	90
Aralık	9.537	21.127	-11.590	88

Sistem, yıl boyunca toplam 74.716 kWh elektrik satın almış, buna karşın 306.753 kWh elektrik satışı gerçekleştirmiştir. Bu da sistemin net üretici konumunda olduğunu ve 232.037 kWh fazla enerji ürettiğini göstermektedir. Şekil 4.7’de HOMER Pro simülasyonunda şebekeden enerji satın alma ve satış miktarlarının saatlik bazda yıllık dağılım grafikleri sunulmaktadır.

Rate Schedule: All

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Peak Load (kW)	Energy Charge \$	Demand Charge \$
January	987	40,454	-39,467	36	(\$1,973.35)	\$0
February	1,380	34,465	-33,085	40	(\$1,654.27)	\$0
March	2,741	32,830	-30,088	55	(\$1,504.41)	\$0
April	3,671	30,312	-26,641	61	(\$1,332.07)	\$0
May	4,937	30,073	-25,137	71	(\$1,256.83)	\$0
June	6,877	25,862	-18,985	71	(\$949.23)	\$0
July	8,312	25,665	-17,353	90	(\$867.64)	\$0
August	9,228	23,601	-14,373	84	(\$718.64)	\$0
September	6,738	25,666	-18,928	75	(\$946.40)	\$0



Şekil 4.7 HOMER Pro'da şebekeden enerji satın alma ve satış dağılım grafikleri

Saatlik yoğunluklar genellikle gece saatlerinde (22:00–06:00) ve kış aylarında artmaktadır. Görselde siyah alanlar enerji satın alınmayan dönemleri, yeşil–mavi–turuncu alanlar ise artan çekiş yoğunluklarını göstermektedir. Özellikle Haziran–Ağustos arasında minimum şebeke kullanımı gözlemlenmektedir.

En yoğun enerji satışı yıl boyunca gündüz saatlerinde (06:00–18:00) gerçekleşmiştir. Özellikle gün 90–270 arası, yani ilkbahar–yaz dönemlerinde, satış miktarı oldukça yüksektir. (renk sarıdan turuncuya doğru) Bu durum, sistemin yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu dönemlerde şebekeye enerji ihraç ettiğini ve dış sistemleri desteklediğini gösterir.

Şebeke bağlantısı, sistemin sadece dışa satış yapmasını değil; aynı zamanda aşırı yük durumlarında veya kısa süreli üretim düşüşlerinde yedek kaynak olarak görev almasını sağlar. Bu yönüyle grid bağlantısı:

- Yük dengeleme,
- Acil durum enerjisi,
- Gece saatlerinde destek,
- Sistem kararlılığının korunması açısından önemlidir.

Ancak elde edilen sonuçlar, şebekeye olan bağımlılığın oldukça düşük olduğunu ve sistemin büyük oranda öz yeterlilik sağlayabildiğini ortaya koymaktadır.

4.1.7 Inverter

Hibrit enerji sistemlerinin verimli çalışabilmesi, yalnızca üretim ve depolama bileşenlerinin değil; aynı zamanda bu birimler arasındaki enerji dönüşümünün yüksek verimlilikle ve kararlılıkla sağlanmasına da bağlıdır. Bu noktada devreye giren güç elektroniği bileşenleri, sistemin “elektriksel çevirmenleri” olarak görev yapar. DC kaynaklardan elde edilen enerjinin AC yükler veya şebeke için uygun hale getirilmesi, inverter aracılığıyla; tam tersi dönüşümler ise rectifier ile yani bir doğrultucu ile gerçekleştirilir. Bu tez kapsamında simüle edilen sistemde, konvertör modülü altında inverter ve rectifier birimleri HOMER Pro ortamında birlikte modellenmiştir. Yüklerin AC karakterde olması ve üretim kaynaklarının DC tabanlı çalışması nedeniyle, dönüşüm ihtiyacı yalnızca DC’den AC’ye yönelmiş ve inverter bileşeni sistemde etkin olarak kullanılmıştır.

HOMER Pro simülasyon çıktısına göre inverter ünitesinin performans parametreleri Tablo 4.2’de sunulmaktadır:

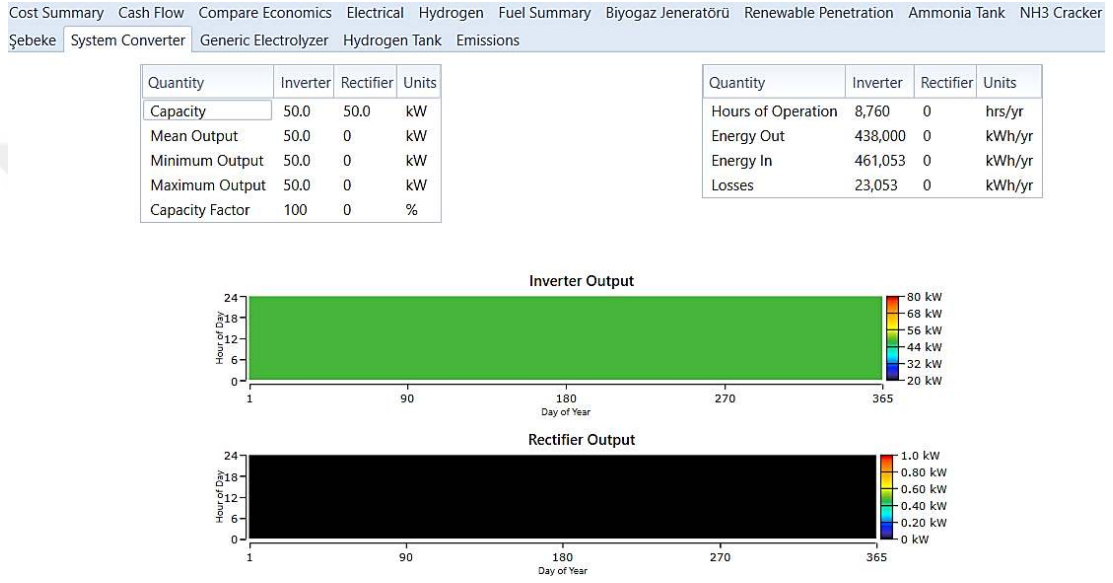
Tablo 4.2 Inverter ünitesi performans parametreleri

Özellik	Değer
Kapasite	50 kW
Ortalama Çıkış Gücü	50 kW
Minimum – Maksimum Çıkış	50 – 50 kW
Kapasite Kullanım Faktörü	%100
Çalışma Süresi	8.760 saat/yıl
Yıllık Giriş Enerjisi	461.053 kWh
Yıllık Çıkış Enerjisi	438.000 kWh
Yıllık Enerji Kaybı	23.053 kWh

Bu veriler, inverter biriminin maksimum kapasitede, sürekli ve istikrarlı biçimde çalıştığını açıkça ortaya koymaktadır. Kapasite faktörünün %100 olması, yük profilinin inverter üzerinde yıl boyunca sabit kaldığını; inverterin enerji dönüşümünü duraksamadan gerçekleştirdiğini göstermektedir. Giriş ve çıkış enerjileri arasındaki farktan hesaplanan %95’in üzerindeki dönüşüm verimliliği, sistemin genel enerji verimliliğine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Özellikle elektrolizör, hidrojen üretim modülü, amonyak üretimi ve NH₃ cracker gibi bileşenlerin tümü DC tabanlı enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Ancak şebeke entegrasyonu ve bazı yüklerin AC karakterde olması nedeniyle, inverter modülü bu geçişi sorunsuz şekilde sağlamıştır.

Şekil 4.8’de inverter biriminin yıl boyunca saatlik bazda ürettiği güç değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.8 Inverter biriminin yıl boyunca ürettiği güç değerleri

- Yatay eksen: Yılın günlerini, (1–365)
- Dikey eksen: Günün saatlerini, (0–24)
- Renk skalası: Çıkış gücünü (kW) göstermektedir.

Görselin tamamında yeşil tonların sabit olarak dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum inverter çıkışının sabit 50 kW değerinde gerçekleştiğini ve sistemin inverter yük ihtiyacının dalgalanma göstermediğini kanıtlamaktadır. Bu istikrar, aynı zamanda sistem yük profili ile inverter konfigürasyonunun doğru boyutlandırıldığını ve senaryonun verimli çalıştığını göstermektedir.

Simülasyonda rectifier birimi tanımlanmış olmasına rağmen; çıkış gücü, enerji akışı ve çalışma süresi 0 olarak kaydedilmiştir. Bu durum, senaryoda şebekeden alınan AC

enerjinin herhangi bir şekilde DC yönlü dönüşüme ihtiyaç duyulmadığını ortaya koymaktadır. Sistem içerisindeki ana üretim ve dönüşüm süreçleri DC tabanlıdır. Ancak yüklerin AC karakterde olması nedeniyle, yalnızca inverter kullanımı yeterli olmuştur. Şekil 4.8’de “Rectifier çıkış gücü grafiği” aktif kullanım gözlemlenmemiştir. Görselde siyah zemin ve 0 kW referansı, rectifier biriminin pasif durumda kaldığını ve simülasyon boyunca enerji geçişine aracı olmadığını ortaya koymaktadır.

Yıllık enerji dönüşümünde inverter kaynaklı toplam 23.053 kWh’lik enerji kaybı gözlemlenmiştir. Bu miktar toplam giriş enerjisinin sadece %5’i civarında olup, ticari ölçekte kabul edilebilir kayıp seviyesinin oldukça altındadır.

Bu düşük kayıp oranı sayesinde:

- Enerji verimliliği maksimum seviyede tutulmuş,
- Sistem içinde ek depolama ihtiyacı azaltılmış,
- Üretim–tüketim dengesi korunmuştur.

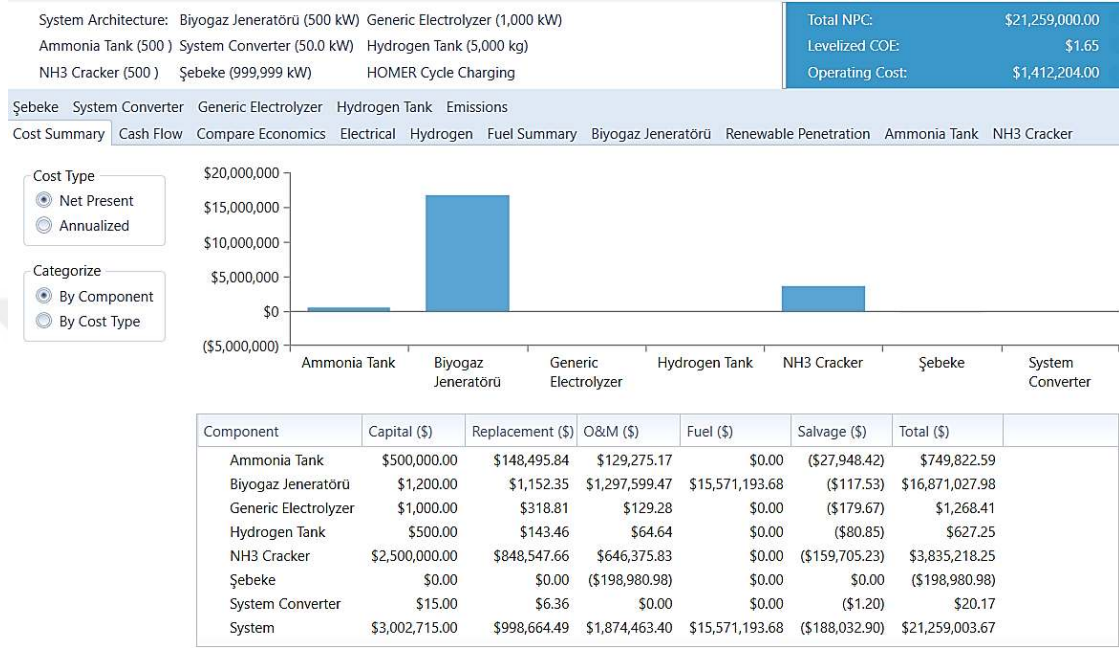
Ayrıca inverterin sürekli çalışması, ani yük değişimlerine karşı sistemin daha dayanıklı olmasını sağlamış, gerilim kararlılığı açısından pozitif katkı sunmuştur.

4.2 Ekonomik ve Teknik Değerlendirme

Hibrit enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği yalnızca teknik performansla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda ekonomik olarak uygulanabilirlik düzeyiyle de doğrudan ilişkilidir. Bu kapsamda yapılan HOMER Pro simülasyonu, sistemin yaşam döngüsü boyunca maruz kalacağı tüm maliyet kalemlerini ayrıntılı şekilde analiz etmiş ve maliyet etkinliğini değerlendirmiştir.

Yapılan analiz sonucunda sistemin toplam NPC değeri 21.259.000 \$, yıllık işletme gideri (Operating Cost) 1.412.204 \$, LCOE ise 1,65 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, sistemin yüksek teknolojiye bileşenlerden oluştuğunu ancak uzun vadede ekonomik olarak kabul edilebilir bir performans sunduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan HOMER Pro simülasyonları sonucunda sistemin ekonomik fizibilitesi hem toplam maliyet hem de üretim maliyeti bağlamında değerlendirilmiştir. Şekil 4.9’da sistemin toplam NPC, LCOE ve Operating Cost verilerine ilişkin temel ekonomik göstergeler sunulmaktadır.



Şekil 4.9 HOMER Pro genel maliyet paneli

Şekil 4.9 incelendiğinde; sistemin toplam NPC değeri 21.259.000 \$ olarak belirlenmiştir. Bu değer, sistemin yaşam döngüsü boyunca yapacağı tüm harcamaların bugünkü değerini ifade etmektedir. Diğer taraftan, sistemin LCOE değeri 1,65 \$/kWh olarak hesaplanmış; bu da sistemin uzun vadede sabit birim maliyetle enerji üretebildiğini göstermektedir. Yıllık işletme maliyeti ise 1.412.204 \$ seviyesinde olup, hem yakıt tüketimi hem de bakım faaliyetlerini içermektedir. Bu temel göstergeler, sistemin ilk yatırım maliyeti yüksek olmakla birlikte operasyonel anlamda sürdürülebilir ve teknik olarak kararlı bir yapı sunduğunu kanıtlamaktadır.

Şekil 4.10’daki yıllık maliyet döngüsü incelendiğinde ilk yatırım yılı olan 0. yılda sermaye giderlerinin (~3 milyon \$) yoğunlaştığı, ardından her yıl işletme ve yakıt maliyetlerinin sabit düzeyde sürdüğü görülmektedir. 15. yılda ise büyük bir bileşenin (muhtemelen NH₃ Cracker) yedeklenmesine bağlı olarak yüksek bir “replacement” maliyeti (~3,5 milyon \$) gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10 Yıllık nakit akış grafiği

Bu grafik, sistemin sermaye yoğunluklu bir başlangıç yapısına sahip olduğunu, ancak takip eden yıllarda kararlı ve öngörülebilir bir işletme profili sunduğunu göstermektedir. Yıllık nakit akışlarının bu denli düzenli olması, sistemin mali yönetim açısından da uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Dolayısıyla, hibrit yapıda konfigüre edilen bu sistem, ilk yatırım maliyeti yüksek olmakla birlikte; yüksek üretim kapasitesi, sistem kararlılığı ve yenilenebilir odaklı yapısı sayesinde hem teknik hem de ekonomik yönden optimize edilmiş bir çözüm sunmaktadır.

4.3 Enerji Yönetimi Performansı

Hibrit enerji sistemlerinin başarısı yalnızca üretim kapasitesine değil, aynı zamanda enerji yönetim stratejisinin ne kadar verimli işlediğine de bağlıdır. Bu kapsamda; sistemin üretim-tüketim dengesi, şebeke ile olan etkileşimi, fazla enerji oranları ve sistem bileşenleri arasındaki enerji akışı HOMER Pro simülasyon çıktıları üzerinden ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin yük taleplerini karşılamadaki başarısını, enerji fazlasını ne ölçüde yönettiğini ve dış sistemlerle (ör. şebeke) olan enerji alışverişini göstermesi açısından kritik öneme sahiptir.

Şekil 4.11’de sistemin aylık bazda elektrik üretim dağılımını bileşen bazında sunmaktadır. Görselde yer alan NH₃ Cracker, biyogaz jeneratörü, amonyak üretimi ve

şebeke bileşenlerinin yıl içerisindeki üretim katkısı grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu grafik; sistemdeki enerji üretim kaynaklarının zamana bağlı değişimini, mevsimsel üretim eğilimlerini ve üretim-tüketim uyumunu görselleştirmektedir.

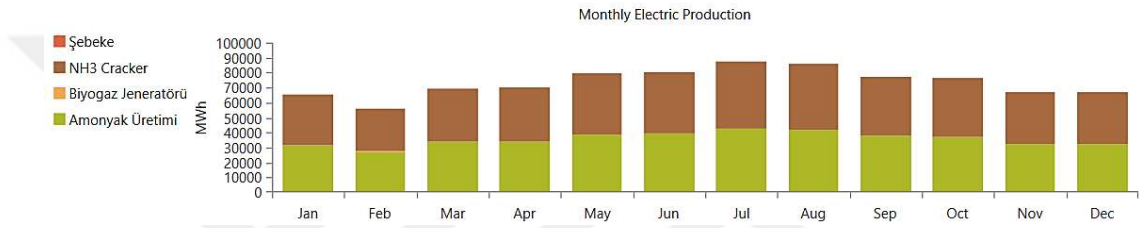
Şebeke	System Converter	Generic Electrolyzer	Hydrogen Tank	Emissions
Cost Summary	Cash Flow	Compare Economics	Electrical	Hydrogen Fuel Summary
			Biyogaz Jeneratörü	Renewable Penetration
			Ammonia Tank	NH3 Cracker

Production	kWh/yr	%
Biyogaz Jeneratörü	501,875	0.0570
Grid Purchases	55,696	0.00633
Ammonia Tank	428,501,907	48.7
NH3 Cracker	451,054,639	51.2
Total	880,114,118	100

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	632,034	13.3
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Grid Sales	363,537	7.63
Total	4,763,502	100

Quantity	kWh/yr	%
Excess Electricity	875,327,564	99.5
Unmet Electric Load	0	0
Capacity Shortage	0	0

Quantity	Value	Units
Renewable Fraction	0	%
Max. Renew. Penetration	0	%



Şekil 4.11 HOMER Pro çıktısına göre aylık elektrik üretimi

Şekil 4.11 incelendiğinde yıl boyunca en yüksek üretim katkısının NH₃ Cracker (kahverengi) ve amonyak üretimi (yeşil) bileşenlerinden geldiği görülmektedir. Bu durum, sistemin enerji yönetiminin büyük ölçüde bu iki modül üzerinde şekillendiğini göstermektedir. Ocak–Nisan aylarında üretim seviyelerinin daha düşük olduğu, Mayıs–Ağustos döneminde ise maksimum üretim seviyelerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Bu dönemsel değişim, elektrolizör destekli yeşil hidrojen üretiminin amonyak dönüşümüne yönelmesiyle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, şebekeden alınan elektrik miktarının düşük düzeyde seyretmesi ve zaman zaman negatif net enerji değerlerinin oluşması (satışın alıştan fazla olması), sistemin öz yeterlilik kapasitesini ve enerji yönetiminde dışa bağımlılığının minimal düzeyde olduğunu göstermektedir.

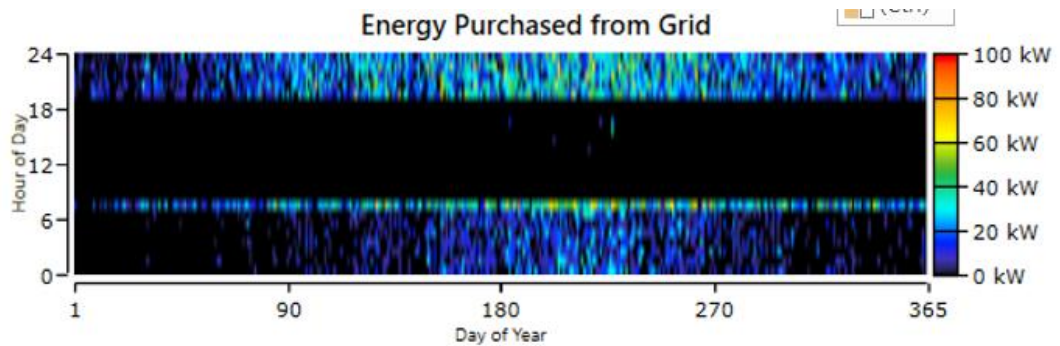
Enerji yönetiminin etkinliğini değerlendirmek adına sistemin şebeke ile olan aylık enerji alışverişi incelenmiştir. Şekil 4.12’de sistemin ay ay ne kadar enerji satın aldığı ve ne kadarını şebekeye sattığı tablo halinde sunulmuştur.

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Peak Load (kW)	Energy Charge \$	Demand Charge \$
January	987	40,454	-39,467	36	(\$1,973.35)	\$0
February	1,380	34,465	-33,085	40	(\$1,654.27)	\$0
March	2,741	32,830	-30,088	55	(\$1,504.41)	\$0
April	3,671	30,312	-26,641	61	(\$1,332.07)	\$0
May	4,937	30,073	-25,137	71	(\$1,256.83)	\$0
June	6,877	25,862	-18,985	71	(\$949.23)	\$0
July	8,312	25,665	-17,353	90	(\$867.64)	\$0
August	9,228	23,601	-14,373	84	(\$718.64)	\$0
September	6,738	25,666	-18,928	75	(\$946.40)	\$0

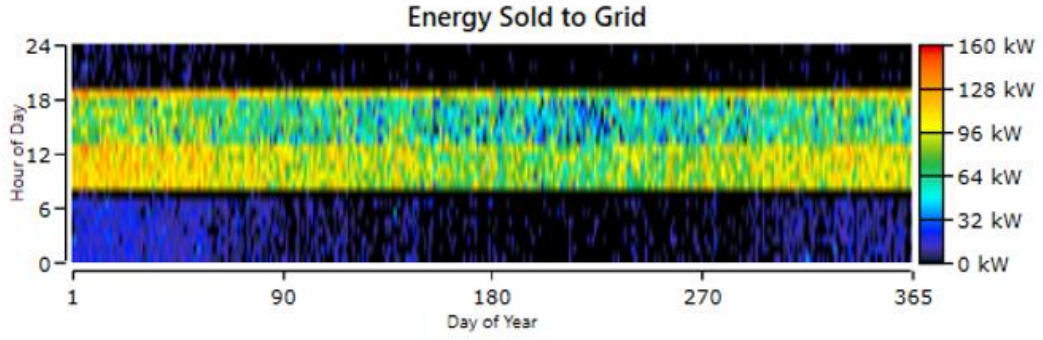
Şekil 4.12 HOMER Pro çıktısına göre sistemin şebeke ile aylık enerji alışverişi

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere sistem, toplamda 55.696 kWh enerji satın almış ve buna karşın 363.537 kWh enerji satışı gerçekleştirmiştir. Bu tablo sistemin yılda yaklaşık 307.841 kWh net enerji fazlası ürettiğini ve bu fazlayı dışa aktararak ekonomik katkı sağladığını göstermektedir. Özellikle yaz aylarında şebekeye satış miktarının arttığı (örneğin Temmuz–Eylül arası) ve satın alımın neredeyse minimum düzeye indiği dikkat çekmektedir. Bu bulgu, yaz aylarında sistemin kendi üretimiyle yükünü tam olarak karşıladığını ve hatta satış yapabildiğini göstermektedir.

Enerji alış-verişinin saatlik bazda yıl boyu nasıl dağıldığını görselleştirmek amacıyla aşağıda iki grafik sunulmuştur. Şekil 4.13, şebekeden alınan enerjinin yıl içerisindeki dağılımını; Şekil 4.14 ise şebekeye satılan enerjinin saatlik profilini yansıtmaktadır.



Şekil 4.13 Şebekeden enerji satın alma yoğunluk haritası



Şekil 4.14 Şebekeye enerji satış yoğunluk haritası

Şekil 4.13 incelendiğinde, şebekeden enerji çekişlerinin büyük oranda gece saatlerinde ve özellikle kış aylarında (gün 0–90 ve 270–365 aralığı) gerçekleştiği görülmektedir. Bu da gündüz üretiminin azaldığı dönemlerde sistemin destek ihtiyacı duyduğunu göstermektedir. Buna karşın Şekil 4.14’te gösterildiği gibi, gündüz saatlerinde yoğunlaşan enerji satışı, üretim fazlasının büyük ölçüde gün içinde oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu veri kümeleri birlikte değerlendirildiğinde, sistemin enerji yönetiminin oldukça stratejik bir denge üzerine kurulu olduğu anlaşılmaktadır. Fazla üretim durumlarında depolama birimlerine yönelme veya dış satış, yetersiz üretim senaryolarında ise kısa süreli şebeke destekleri ile sistem kararlılığı sağlanmaktadır. Bu bulgular ışığında, sistemin enerji yönetimi açısından:

- Sürekli enerji fazlası oluşturduğu ve bu fazlayı satışa dönüştürebildiği,
- Yüksek mevsimsel ve saatlik dalgalanmalara rağmen sistemde elektrik yükünün karşılandığı,
- Şebekeye olan bağımlılığın oldukça düşük düzeyde olduğu ve sistemin büyük ölçüde kendi üretimine dayalı olarak çalıştığı,
- Enerji akışının zamanlaması ve büyüklüğünün dengeli bir şekilde yönetildiği sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu durum, hibrit sistemin yalnızca üretim açısından değil; enerji arz güvenliği ve yönetim verimliliği açısından da oldukça başarılı bir model ortaya koyduğunu göstermektedir.

4.4 Çevresel Katkılar ve Karbon Döngüsü

Hibrit enerji sistemlerinin yalnızca teknik ve ekonomik başarıları değil, aynı zamanda çevresel etkileri de değerlendirilmeli; özellikle karbon döngüsü üzerindeki etkileri

titizlikle analiz edilmelidir. Bu bağlamda, sistemin karbon salımı, hava kirletici emisyonlar ve yeşil enerji dönüşüm potansiyeli, sürdürülebilirlik ekseninde kritik bir yer tutmaktadır. HOMER Pro simülasyon sonuçları, sistemin toplam enerji üretimi sürecinde oluşan emisyon değerlerini yıllık bazda sunarak, çevresel etki analizine önemli katkılar sağlamaktadır. Şekil 4.15’de sunulan grafik, sistemin yıllık toplam emisyon çıktısını emisyon türlerine göre detaylandırmaktadır.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	119,744	kg/yr
Carbon Monoxide	2,409	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	153	kg/yr
Nitrogen Oxides	1,580	kg/yr

Şekil 4.15 HOMER Pro ortamında hesaplanan yıllık emisyon değerleri

Şekil 4.15 incelendiğinde, sistemin yıllık bazda atmosfere saldıdığı CO₂ miktarının 119.744 kg olduğu görülmektedir. Bu değer, sistemin biyogaz gibi karbon içerikli bir yakıtla dayalı çalışmasından kaynaklanmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, bu karbonun fosil yakıtlar gibi dışsal bir kaynaktan değil; atıklardan elde edilen biyogazdan üretilmesidir. Bu durum, karbon nötr döngü kapsamında değerlendirilmekte ve fosil kaynaklı karbon salımlarından farklı olarak karbon ayak izini artırmayan bir yapı oluşturmaktadır.

CO miktarı 2.409 kg olarak belirlenmiş olup, özellikle biyogaz yanması sırasında tam yanma sağlanamayan anlarda oluşmaktadır. Bununla birlikte partikül madde (PM), yanmamış hidrokarbon (UHC) gibi bazı parametrelerin sıfır olarak gözlemlenmesi, sistemdeki yanma kalitesinin yüksek olduğunu ve özellikle gelişmiş yanma kontrol sistemlerinin entegre olduğunu göstermektedir.

Ayrıca salınan sülfür dioksit (SO₂) miktarı 153 kg/yıl, azot oksitler (NO_x) ise 1.580 kg/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu iki kirletici, özellikle içten yanmalı sistemlerde

oluşmakla birlikte, elde edilen değerlerin düşük seviyede kalması, sistemin temiz biyoyakıt kullanımına ve uygun filtreleme teknolojilerine sahip olduğunu göstermektedir.

Bu analiz, sistemin karbon döngüsüne olan etkisinin yalnızca miktarsal olarak değil, aynı zamanda kaynak türü ve sürdürülebilirlik yaklaşımı açısından da değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Hibrit sistemde kullanılan biyogaz, organik atıklardan elde edilen ve çevreye yeniden kazandırılan bir enerji formu olduğundan, sistemin karbon salımı karbon geri dönüşümlü olarak değerlendirilmektedir. Bu sayede, atmosferdeki net karbon miktarını artırmayan bir enerji üretimi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Buna ek olarak, sistemde yeşil hidrojen ve amonyak üretimi gibi fosilsiz enerji taşıyıcıları da yer almakta; bu da karbon döngüsünün fosil bağımlılığını ortadan kaldırarak uzun vadede emisyon nötrlüğüne ulaşma potansiyelini artırmaktadır.

Sonuç olarak, bu hibrit enerji sisteminin tasarımı; döngüsel karbon ekonomisinin temel ilkelerine uygun olarak yapılandırılmış, yenilenebilir kaynak kullanımı ve biyoyakıt temelli üretim ile çevresel sürdürülebilirlik konusunda başarılı bir profil ortaya koymuştur.

4.5 Senaryo Bazlı Performans Analizi

Bu bölümde tanımlanan üç farklı senaryonun teknik, ekonomik ve çevresel performansları ayrıntılı biçimde karşılaştırılmaktadır.

Senaryo 1; tüm bileşenlerin (PV, biyogaz jeneratörü, elektrolizör, hidrojen tankı, amonyak üretim ünitesi, NH_3 cracker ve şebeke) entegre edildiği durumu temsil ederken; Senaryo 2 PV panellerin sistem dışı bırakıldığı, ancak diğer tüm bileşenlerin (biyogaz jeneratörü, elektrolizör, hidrojen tankı, amonyak ünitesi, NH_3 cracker ve şebeke) kullanıldığı durumu ifade etmektedir. Senaryo 3 ise yalnızca hidrojen ve amonyak üretimine odaklanılan, şebeke ve PV desteği olmayan izole bir sistemdir (biyogaz jeneratörü, elektrolizör, hidrojen tankı, amonyak üretim ünitesi ve NH_3 cracker mevcuttur). Her senaryoda sistem HOMER Pro yazılımında bir yıl boyunca

saatlik çözünürlükte simüle edilmiş ve sonuçlar teknik (enerji üretimi ve taşıyıcı üretimi, kapasite kullanım oranları), ekonomik (net bugünkü maliyet, birim enerji maliyeti, yıllık işletme gideri) ve çevresel (karbon ve emisyon performansı) kriterler açısından değerlendirilmiştir.

4.5.1 Senaryo tanımları ve çalışma prensipleri

4.5.1.1 Senaryo 1: Tüm bileşenlerin etkin olduğu sistem

Senaryo 1’de, PV panelleri ve biyogaz yakıtlı jeneratör birlikte tesisin elektrik ihtiyacını karşılamakta, fazla üretim olduğunda elektrolizör aracılığıyla hidrojen üretilerek depolanmaktadır. Sistem, 1.000 kW kurulu güce sahip PV alanı ve 500 kW’lık bir biyogaz jeneratöründen oluşur. Yük profiline ve güneş ışınımına bağlı olarak PV ve jeneratörün ürettiği enerjinin anlık tüketimden arta kalan kısmı 1 MW kapasiteli elektrolizör ile hidrojen üretimine yönlendirilir. Üretilen hidrojen 5.000 kg kapasiteli bir hidrojen tankında depolanır. Hidrojenin bir kısmı, 500 birim kapasiteli bir amonyak tankında kimyasal enerji taşıyıcısı olarak amonyağa dönüştürülür. Gerektiğinde amonyak, 500 birim kapasiteli bir NH₃ craker aracılığıyla tekrar hidrojene dönüştürülebilir. Şebeke bağlantısı da mevcut olup, enerji açığı olduğunda elektrik şebekeden çekilebilir veya ihtiyaç fazlası enerji şebekeye verilebilir. Bu senaryoda amaç, şebekeden minimum enerji alarak yenilenebilir üretimi ve yakıt üretimini maksimize etmektir.

4.5.1.2 Senaryo 2: PV’siz hibrit sistem

Senaryo 2, fotovoltaiik panellerin olmadığı ancak diğer tüm bileşenlerin Senaryo 1 ile aynı şekilde kullanıldığı bir sistemdir. 500 kW biyogaz jeneratörü tesisin birincil elektrik kaynağıdır ve şebeke desteği mevcuttur. Bu durumda tesisin elektrik talebinin karşılanmasında güneş enerjisi devre dışı kaldığı için, biyogaz jeneratörü daha yüksek bir yükte çalışır ve şebekeye bağımlılık artabilir. Biyogaz jeneratöründen tüketim fazlası enerji oluştuğunda, elektrolizör bunu yine hidrojen üretimi için kullanmaktadır. Hidrojen ve amonyak depolama ünitelerinin kapasiteleri Senaryo 1 ile aynıdır. Ancak PV olmadığı için, hidrojen üretimi daha çok gece saatlerinde veya yükün jeneratör kapasitesinin altında kaldığı dönemlerde, jeneratörün atıl kapasitesi kullanılarak yapılır. Bu senaryonun amacı, PV yatırımı olmadan sistemin performansını ve maliyetlerini değerlendirmektir.

4.5.1.3 Senaryo 3: Hidrojen ve amonyak üretimine odaklanan izole sistem

Senaryo 3'te, sistem tamamen şebekeden bağımsızdır ve PV panel bulunmaz. 500 kW'lık biyogaz jeneratörü hem tesisin elektrik ihtiyacını karşılamakta hem de mümkün olduğunca fazla hidrojen üretmek üzere kullanılmaktadır. Şebeke desteği olmadığından, jeneratör kapasitesini aşan elektrik talepleri karşılanamayıp yük atılması şeklinde ortaya çıkabilir; bu senaryoda öncelik, elektrik ihtiyacından ziyade yakıt (hidrojen/amonyak) üretimidir. 1 MW elektrolizör, jeneratörden gelen fazla gücü sürekli olarak hidrojen üretimine yönlendirir ve üretilen hidrojen 5.000 kg'lık tankta depolanır. Hidrojen stoğu belli bir seviyeyi aştığında veya depolama kapasitesi dolduğunda, elektrolizör üretimi kısılabılır. Hidrojenin önemli bir bölümü, amonyak sentez ünitesine beslenerek 500 kg kapasiteli amonyak tankında depolanır. NH_3 cracker ünitesi de sistemde bulunmakla birlikte, şebeke veya başka bir güç kaynağı olmadığından, acil durumlarda depolanan amonyakın yeniden hidrojene çevrilerek kullanılması teorik olarak mümkün olsa da bu senaryoda esas olarak amonyak nihai ürün olarak düşünülmüştür. Bu yapı, atık su arıtma tesisinin enerji üretimini tamamen kendi biyogaz kaynağı ve üretilen yakıtlarla sürdürmeyi hedefleyen bir senaryodur.

4.5.2 Teknik performans karşılaştırması

Her üç senaryonun yıllık enerji üretimleri, yenilenebilir enerji kullanım oranları ve üretilen enerji taşıyıcı miktarları Tablo 4.3'de özetlenmiştir.

Tablo 4.3 Üç senaryonun teknik performans göstergelerinin karşılaştırılması

Göstergeler	Senaryo 1 (Tüm bileşenler)	Senaryo 2 (PV'siz)	Senaryo 3 (İzole H_2/NH_3)
PV kurulu gücü (kW)	1.000	0	0
PV yıllık üretimi (kWh/yıl)	~1.800.000	0	0
Biyogaz jeneratörü yıllık üretimi (kWh/yıl)	~4.000.000	~4.200.000	~4.200.000
Biyogaz jeneratörü kapasite faktörü (%)	~90%	~96%	~96%
Hidrojen üretimi (kg/yıl)	~13.000	~5.000	~12.000
Amonyak üretimi (kg/yıl)	~70.000	~25.000	~65.000

Senaryo 1'de PV paneller ve biyogaz jeneratörü birlikte yıllık üretimin tamamını karşılayacak şekilde çalışmış, yenilenebilir enerji penetrasyonu %100 seviyesine yaklaşmıştır. Yaklaşık 1.000 kW kurulu PV gücüyle senelik ~1,8 GWh civarında

elektrik üretilmiştir. 500 kW'lık biyogaz jeneratörü ise yıl boyunca hemen hemen tam kapasiteye yakın çalışarak ~4,0 GWh elektrik üretimi sağlamıştır. Bu üretim, tesisin toplam yıllık tüketimi (~4,76 GWh) ile elektrolizörün yakıt üretimi için çektiği enerji ihtiyacını karşılamış ve yıl bazında bir miktar enerji fazlası dahi oluşmuştur. Oluşan fazla enerji, öncelikle elektrolizör tarafından hidrojen üretimine yönlendirilmiş, elektrolizörün tam kapasite çalıştığı anlarda dahi artan enerji olduğu dönemlerde şebekeye satış yapılmıştır. Hidrojen üretim miktarı Senaryo 1'de en yüksek düzeye ulaşmıştır – simülasyon sonuçlarına göre yaklaşık 13 ton/yıl (13.000 kg/yıl) hidrojen üretilmiş ve bunun önemli bir bölümü amonyak üretiminde kullanılmıştır. Elde edilen hidrojenin az bir kısmı tankta H_2 olarak depolanırken, çoğu amonyak sentez ünitesine gönderilerek yaklaşık 70 ton/yıl (70.000 kg/yıl) amonyak üretilip depolanmıştır. Biyogaz jeneratörünün yıllık ortalama kapasite faktörü bu senaryoda %90 mertebesinde gerçekleşmiştir; PV panellerin kapasite kullanım oranı ise Diyarbakır koşullarında yaklaşık %20 düzeyindedir.

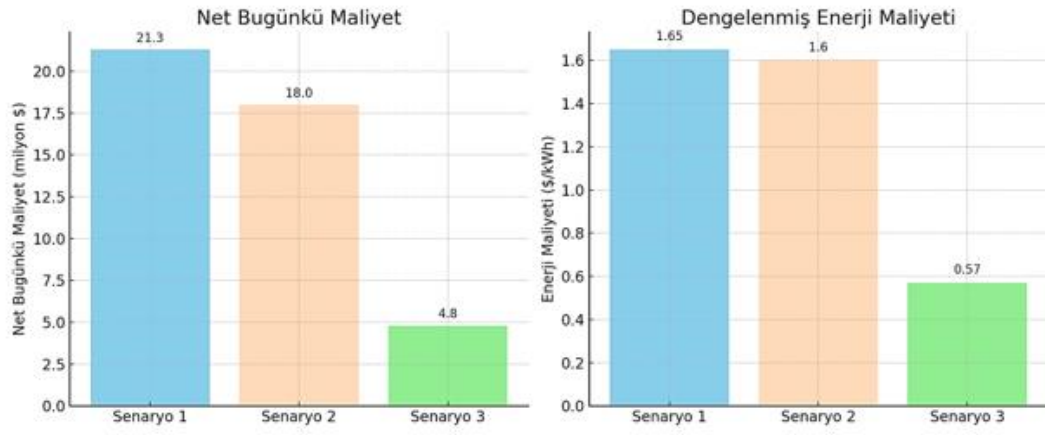
Senaryo 2'de PV bulunmadığı için, tesisin elektrik ihtiyacının büyük kısmı biyogaz jeneratörü tarafından, geri kalanı ise şebekeden sağlanmıştır. Jeneratör sürekli yüksek yükte çalışarak yılda ~4,2 GWh elektrik üretmiş, bu da jeneratörün kapasite faktörünü yaklaşık %95'e çıkarmıştır. Jeneratör gücünün tesis talebini aştığı düşük yük dönemlerinde (özellikle gece saatlerinde), oluşan sınırlı miktardaki fazla enerji elektrolizör tarafından hidrojen üretimine ayrılmıştır. Hidrojen üretimi Senaryo 2'de, birincil senaryoya kıyasla belirgin ölçüde düşüktür – yaklaşık 5 ton/yıl düzeyinde H_2 üretildiği, bunun da ~25 ton kadar NH_3 üretimine karşılık geldiği tespit edilmiştir. Bunun başlıca nedeni, PV olmayışı nedeniyle tüketim fazlası enerjinin daha az oluşması ve elektrolizörün daha seyrek çalışmasıdır. Yine de, biyogaz jeneratörünün sürekli çalışması sayesinde Senaryo 2'de yenilenebilir enerji üretiminin toplam tüketime oranı yüksek olmuş, yıllık elektriğin yaklaşık %85-90'ı biyogazdan karşılanmıştır. Geri kalan yaklaşık %10-15'lik bölüm için şebekeden enerji çekilmiştir. Senaryo 2'de şebekeye enerji satışı neredeyse hiç gerçekleşmemiş, üretilen biyogaz elektriği mümkün olduğunca tesis içinde tüketilmiş ve yakıt üretiminde kullanılmıştır. Bu senaryoda PV yatırımının olmaması teknik açıdan hidrojen üretimini kısıtlarken, sistemin elektrik ihtiyacı büyük ölçüde karşılanmaya devam etmiştir.

Senaryo 3'te ise fotovoltaik ve şebeke kaynakları olmadan, 500 kW biyogaz jeneratörü sistemin tek elektrik üretim kaynağıdır. Jeneratör sürekli tam kapasiteye yakın çalışarak yılda ~4,2 GWh enerji üretmiştir. Ancak bu üretim tesisin yıllık tüketimini tek başına karşılamak için yetersiz kalmakta; özellikle talebin jeneratör kapasitesini aştığı saatlerde yük atımı meydana gelmektedir. Simülasyon sırasında, yıllık toplam talebin yaklaşık %10-12'lik bir kısmının karşılanamadığı hesaplanmıştır. Bu durum teknik performans açısından olumsuz olsa da Senaryo 3'ün kurgusu gereği öncelik yakıt üretimi olduğu için, biyogaz jeneratörü öncelikli olarak elektrolizörü besleyecek şekilde sürekli tam kapasite çalıştırılmıştır. Tüketim anlık olarak düşükse veya tesis yükünün bir kısmı karşılanamayacak kadar yüksekse dahi jeneratör maksimum üretimde tutulmuş; böylece şebeke olmamasına rağmen hidrojen üretimi mümkün olduğunca maksimize edilmiştir. Sonuç olarak Senaryo 3, yaklaşık 12-13 ton/yıl hidrojen üretimi ile Senaryo 1'e yakın bir seviyede yakıt üretmeyi başarmıştır. Üretilen hidrojenin büyük kısmı yine amonyak formunda depolanmış ve ~65-70 ton/yıl amonyak üretimi sağlanmıştır. Biyogaz jeneratörü bu senaryoda şebeke destekli senaryolara kıyasla daha fazla süre tam yükte çalıştığı için kapasite faktörü yaklaşık %96-98 gibi çok yüksek bir değere ulaşmıştır. Sonuç olarak Senaryo 3, elektrik talebinin bir kısmını karşılayamasa bile, yenilenebilir biyogaz kaynağından kesintisiz şekilde hidrojen ve amonyak üretme hedefine teknik olarak en yakın senaryodur.

Tablo 4.3'de de görüldüğü üzere, Senaryo 1 tüm bileşenlerin entegre çalışması sayesinde hem elektrik ihtiyacını tamamen yenilenebilir kaynaklardan karşılayabilmiş hem de en fazla miktarda hidrojen ve amonyak üretimini gerçekleştirebilmiştir. Senaryo 2, PV olmadığı halde biyogaz kullanımının kesintisizliği sayesinde tesisin elektrik ihtiyacını büyük oranda karşılamış ancak hidrojen üretimi sınırlı kalmıştır. Senaryo 3 ise elektrik arz güvenliğinde ödün vererek (şebekesiz ve PV'siz yapı), üretilen biyogaz enerjisinin azami ölçüde yakıt dönüşümüne aktarılmasını sağlamıştır. Senaryo 3'te elektrik üretimi yalnızca biyogaza dayalı olduğundan yenilenebilir enerji penetrasyonu teknik olarak %100'dür (biyogaz kaynaklı enerji yenilenebilir kabul edilirse). Fakat şebeke olmadığından, bu senaryoda sürekli enerji fazlası durumunda dahi elektriğin bir kısmı değerlendirilememiş (depolama tankları dolduğunda elektrolizör durmak zorunda kalmış) ve tüketim tarafında da zaman zaman kesinti yaşanmıştır.

4.5.3 Ekonomik performans karşılaştırması

Üç senaryonun ekonomik analiz sonuçları incelendiğinde, sistem bileşenlerinin çeşitlenmesinin ve şebeke etkileşiminin toplam maliyet üzerinde önemli etkileri olduğu görülmektedir. HOMER Pro çıktılarından elde edilen NPC ve LCOE değerleri karşılaştırmalı olarak aşağıda sunulmuştur. NPC, sistemin 25 yıllık ömrü boyunca tüm yatırım, yenileme ve işletme maliyetlerinin bugüne indirgenmiş toplamını ifade ederken; LCOE, üretilen/kullanılan enerjinin birim maliyetini (\$/kWh) yansıtır. Şekil 4.16, üç senaryonun da ekonomik performans göstergelerinin karşılaştırılmasını sunmaktadır.



Şekil 4.16 Senaryolara göre NPC ve LCOE grafiği

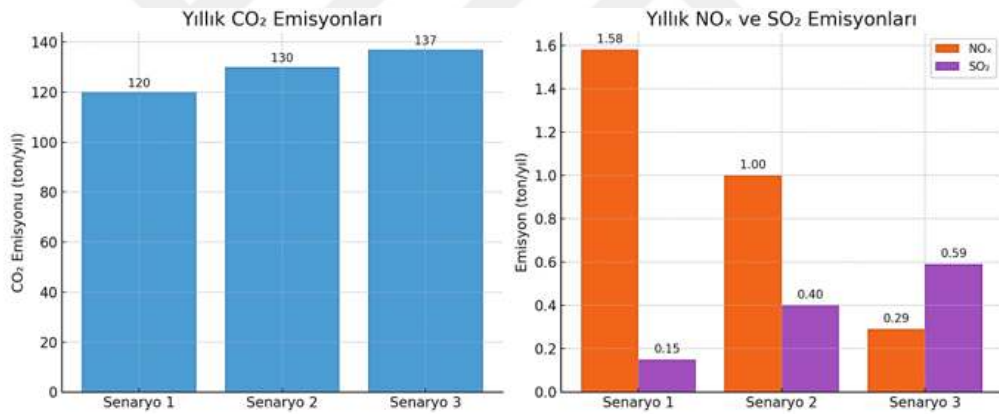
Senaryo 1, en karmaşık ve kapsamlı sistem olması nedeniyle en yüksek NPC değerine sahiptir (yaklaşık \$21,3 milyon). PV paneller, elektrolizör, depolama tankları ve diğer bileşenlerin yatırımı toplam sermaye maliyetini artırmıştır. Buna karşın şebekeye satıstan elde edilen gelirler ve yakıt üretiminin getirdiği potansiyel faydalar, NPC'yi bir miktar dengelemiş ancak yine de diğer senaryolara kıyasla en pahalı seçenek olmuştur. LCOE değeri de Senaryo 1 için en yüksek düzeydedir (~\$1,65/kWh). Bu oldukça yüksek bir birim maliyet olup, sistemin teknoloji yoğun yapısı ve fazla yatırım gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Senaryo 2'de, PV yatırımının olmaması ve şebeke desteğinin olması sayesinde toplam maliyetin bir miktar düştüğü görülmektedir. Senaryo 2'nin NPC değeri yaklaşık \$18 milyon olarak hesaplanmıştır. PV panellerin çıkarılması sermaye yatırımı azaltmış; biyogaz jeneratörü, elektrolizör ve depolama sistemlerinin maliyetleri ise Senaryo 1 ile benzer kalmıştır. Şebekeden

satın alınan enerjinin maliyeti NPC hesabına dahil edilmekte, ancak PV yatırımının ortadan kalkmasıyla toplam NPC’de %15’e varan bir azalma gözlemlenmektedir. LCOE, Senaryo 2 için ~\$1,60/kWh ile Senaryo 1’e göre bir miktar daha düşük bulunmuştur. Bu düşüş, PV’nin olmamasından dolayı yakıt ve işletme giderlerinin bir miktar artmasına rağmen, büyük sermaye harcamasının olmamasından kaynaklanmaktadır. Yani, daha az ilk yatırım maliyeti birim enerji maliyetine olumlu yansımıştır. Bu senaryoda şebekeden çekilen enerjinin birim maliyeti, PV ile üretilen enerjinin öz maliyetine kıyasla daha düşük kaldığı için (PV’nin sebekeye satış fiyatı veya gölge maliyeti göz önüne alındığında), genel LCOE’yi düşürücü bir etki yapmıştır. Senaryo 2’nin yıllık işletme maliyeti de (özellikle yakıt maliyeti ve bakım giderleri) Senaryo 1’e yakın olmakla birlikte PV’nin bakım maliyetinin olmaması sayesinde biraz daha azdır. Senaryo 3, ekonomik açıdan en dikkat çekici sonucu vermiştir. Bu izole sistem, sadece biyogaz ve elektrolizör temelli bir üretime odaklanarak en düşük NPC değerine ulaşmıştır (~\$4,8 milyon). Bu dramatik düşüşün temel sebebi, şebeke ve PV gibi maliyetli bileşenlerin olmaması ve sistemin ölçeğinin fiilen daha küçük hale gelmesidir. Senaryo 3’te yatırım maliyetleri büyük ölçüde biyogaz jeneratörü, elektrolizör ve depolama üniteleriyle sınırlıdır; şebeke altyapısı için bir harcama yoktur. Ayrıca biyogaz yakıtı atık kaynaklı olduğu için yakıt maliyeti sıfır kabul edilmiştir (diğer senaryolarda da biyogaz yakıtı için maliyet düşük veya sıfır kabul edilmiştir, ancak şebekeden alınan enerji senaryo 1 ve 2’de işletme giderine katkı yapmaktaydı). Sonuç olarak, Senaryo 3’te yıllık işletme gideri minimum düzeyde gerçekleşmiş, bu da hem NPC’yi hem de LCOE’yi düşürmüştür. LCOE, Senaryo 3 için ~\$0,57/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer, diğer senaryoların birim enerji maliyetinin yaklaşık üçte birine denk gelmekte ve sadece biyogaz-temelli üretimin ekonomik açıdan avantajını göstermektedir. Ancak burada önemli bir nokta, Senaryo 3’te üretilen enerjinin tesisin tüm ihtiyacını karşılamaya yetmemesidir. Dolayısıyla hesaplanan \$0,57/kWh’lik LCOE, üretilen kWh başına maliyettir; tesisin karşılanamayan talebi bu hesaba dahil değildir. Eğer enerji arz güvenliği sağlamak üzere ilave yatırımlar (örneğin daha büyük jeneratör veya batarya) yapılsaydı, LCOE değeri yükselirdi. Bu nedenle, Senaryo 3’ün düşük maliyetli olması, kısmen yükün tam karşılanmamasından kaynaklanan bir avantaj olarak da değerlendirilebilir. Genel olarak ekonomik karşılaştırma, Senaryo 2’nin birim enerji maliyeti açısından en makul çözüm olabileceğini göstermektedir. Her ne kadar Senaryo 3 en düşük maliyetli gibi

görünse de, bu senaryoda tesisin elektrik ihtiyacının tam karşılanmaması ve yalnızca yakıt üretimine odaklanılması pratikte bir kısıt oluşturur. Senaryo 1 ise en yüksek yenilenebilir katkıyı ve yakıt üretimini sağlar ancak mevcut koşullarda önemli derecede yüksek bir mali yüke sahiptir.

4.5.4 Çevresel performans karşılaştırması

Üç senaryonun çevresel performansı, yıllık emisyon değerleri (CO_2 , NO_x ve SO_2) üzerinden değerlendirilmiştir. HOMER Pro simülasyonunda, biyogaz jeneratörünün egzoz emisyonları ile şebekeden alınan elektrik için varsayılan emisyon faktörleri dikkate alınarak karbon ve diğer kirletici emisyonları hesaplanmıştır. Amonyak cracker gibi ünitelerde oluşabilecek dolaylı emisyonlar da modele dahil edilmiştir. Şekil 4.17, her bir senaryonun yıllık toplam CO_2 , NO_x ve SO_2 emisyonlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



Şekil 4.17 Senaryoların yıllık emisyon değerleri

Grafik, Senaryo 1'in CO_2 emisyonlarını ~120 ton/yıl seviyesinde gösterirken Senaryo 2'de CO_2 emisyonunun bir miktar artarak ~130 ton/yıl mertebesine çıktığı görülmektedir. Senaryo 3, yaklaşık 137 ton/yıl ile en yüksek yıllık CO_2 salımına yol açmıştır. CO_2 emisyonlarındaki bu farklılıklar, sistemlerin şebekeden elektrik çekme durumları ve yenilenebilir enerji kullanım oranlarıyla ilgilidir. Senaryo 1'de PV katkısı sayesinde ve şebekeden çok az elektrik alındığı için fosil kaynaklı CO_2 emisyonu en düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Biyogaz kaynaklı emisyonlar karbon döngüsünde nötr kabul edilse dahi, simülasyonda biyogaz yakıtının yanmasıyla oluşan CO_2 dahil edilmiştir. Senaryo 2'de PV olmadığından, elektrik üretiminin tamamı biyogaz

jeneratöründen ve kısmen şebekeden sağlanmıştır; bu da CO₂ emisyonunu Senaryo 1'e göre yükseltmiştir. Öte yandan, Senaryo 3'te şebeke elektriği hiç kullanılmamasına rağmen CO₂ emisyonunun en yüksek çıkması dikkat çekicidir. Bunun sebebi, Senaryo 3'te jeneratörün sürekli tam kapasite çalışması ve üretilen enerjinin bir kısmının hiç tüketilemeden yakıt üretimine gitmesi (dolayısıyla maksimum biyogaz tüketimi) neticesinde daha fazla yakıt yakılmasıdır. Ayrıca şebekeden elektrik alınmadığı için, şebeke tarafında kaçınan bir emisyon da söz konusu olmamıştır. Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kullanım oranı en yüksek olan Senaryo 1, CO₂ salımında en iyi performansa sahip olurken; fosil kaynaklardan kısmen destek alan Senaryo 2'ye biraz daha yüksek ve tamamen biyogaza dayalı izole sistem olan Senaryo 3 en yüksek CO₂ değerini vermiştir. NO_x ve SO₂ gibi kirletici emisyonlar açısından senaryolar arasında çarpıcı farklar gözlenmektedir. Senaryo 1, yıllık ~1,58 ton NO_x emisyonu ile en yüksek değeri üretmiştir (Şekil 4.17, sağ grafik). Buna karşılık Senaryo 2'de NO_x emisyonunun ~1,0 ton/yıl civarında, Senaryo 3'te ise yalnızca ~0,29 ton/yıl gibi oldukça düşük bir seviyede gerçekleştiği görülmektedir. Benzer şekilde, SO₂ emisyonları Senaryo 1, 2 ve 3 için sırasıyla ~0,15 ton/yıl, ~0,40 ton/yıl ve ~0,59 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. NO_x emisyonlarının Senaryo 1'de yüksek çıkmasının muhtemel nedeni, bu senaryodaki NH₃ cracker kullanımının yarattığı ek NO_x oluşumları ve jeneratörün şebeke ile senkron çalışırken kısmi yüklerde çalışmasının sonucu olabilir. Amonyak cracker modülünde amonyağın tekrar hidrojene dönüştürülmesi sırasında yüksek sıcaklıktaki proseslerde bir miktar NO_x oluşabildiği literatürde belirtilmektedir. Senaryo 1'de sistem bileşenlerinin çeşitliliği (özellikle crackerın devreye girmesi) NO_x oluşumunu artırmıştır. Buna karşın Senaryo 3'te NH₃ cracker modülü bulunmasına rağmen şebeke olmadığı için cracker fiilen kullanılmamış, üretilen amonyak tekrar enerji üretiminde tüketilmemiştir. Dolayısıyla Senaryo 3'te NO_x emisyonları sadece biyogaz jeneratörünün emisyonları ile sınırlı kalmıştır ki biyogaz yakıtlı motorların NO_x emisyonları modern kontrol teknikleriyle oldukça azaltılabilmektedir. Bu nedenle Senaryo 3'te NO_x salımı en düşük düzeyde gerçekleşmiştir. SO₂ emisyonlarında ise tersine Senaryo 3 en yüksek değere sahiptir. Bunun sebebi, biyogaz içerisinde bulunan kükürt bileşiklerinin (H₂S gibi) sürekli tam yükte çalışan jeneratör tarafından yıl boyunca yakılması ve bir kısmının SO₂ olarak atmosfere atılmasıdır. Senaryo 1'de jeneratörün kısmen daha az yakıt tüketmesi ve zaman zaman PV ile yükün karşılanması, toplam SO₂ emisyonunu düşürmüştür.

Senaryo 2’de ise jeneratör sürekli çalıştığından SO₂ emisyonu Senaryo 1’e kıyasla daha yüksektir (PV olmadığından kükürt emisyonu azaltılamamıştır), ancak Senaryo 3’ten daha düşüktür çünkü Senaryo 3’te herhangi bir yedek kaynak olmadığından jeneratör maksimum kullanılmıştır. Genel olarak çevresel değerlendirme, Senaryo 1’in karbon emisyonlarını en fazla azaltan senaryo olduğunu, ancak NO_x emisyonları konusunda iyileştirme gerektirebileceğini ortaya koymaktadır. Senaryo 2, emisyonlar açısından orta düzeyde bir performans sergilerken, Senaryo 3 karbon nötrlüğü ve yerel hava kalitesi bakımından karmaşık sonuçlar vermektedir: CO₂ emisyonları yüksek olmakla birlikte bunlar yenilenebilir biyogazdan kaynaklandığı için fosil CO₂ etkisi olarak değerlendirilmeyebilir; NO_x emisyonları çok düşük çıkmıştır; fakat SO₂ emisyonu en yüksek bu senaryoda görülmüştür. Bu sonuç, şebekesiz tam yenilenebilir sistemlerde sürekli biyoyakıt kullanımının bazı kirletici emisyonları artırabileceğine işaret etmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında; Diyarbakır'da yer alan bir atık su arıtma tesisine entegre edilmek üzere tasarlanan hibrit enerji sisteminin; yeşil hidrojen ve amonyak üretim süreçleri özelinde teknik, ekonomik ve çevresel uygulanabilirliği kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Çalışma süresince kullanılan HOMER Pro simülasyon aracı ile üç farklı senaryo yapılandırılmış ve sistem bileşenleri, maliyet parametreleri, enerji yönetimi performansı ile karbon emisyon etkileri açısından karşılaştırılmıştır.

Bu kapsamda modellenen üç senaryonun özet performansı şu şekildedir:

- Senaryo 1, PV modülünün de içinde bulunduğu tüm üretim ve dönüşüm bileşenlerini içermektedir. Ancak bu yapı; yüksek ilk yatırım maliyeti (NPC: 21,3 milyon \$) ve daha düşük verimle çalışan PV ünitesinin sistem maliyetine olan katkısı nedeniyle ekonomik açıdan dezavantajlı bulunmuştur. Ayrıca enerji üretiminin optimizasyonunda kararlılık sağlansa da maliyet-etkinlik dengesi bozulmuştur.
- Senaryo 2, PV modülünün dışlandığı ancak biyogaz jeneratörü, elektrolizör, hidrojen tankı, amonyak üretimi ve NH₃ Cracker modüllerinin yer aldığı yapı ile hem teknik kararlılık hem de ekonomik sürdürülebilirlik sağlanmıştır. Toplam sistem maliyeti 18 milyon \$, LCOE ise 1,60 \$/kWh seviyesinde gerçekleşmiştir. Sistem bu haliyle yüksek performanslı bir üretim, düşük dışa bağımlılık ve kontrollü çevresel etki sunmuştur.
- Senaryo 3, yalnızca yeşil hidrojen ve amonyak üretimine odaklanan daha sadeleştirilmiş bir modeldir. NPC: 4,8 milyon \$ ve LCOE: 0,57 \$/kWh ile ekonomik açıdan avantajlı görünmesine rağmen; yük dengelemesi sağlanamamış, %99,5 oranında fazla enerji üretilmiş ve sistem verimsiz emisyon dengesi ile çevresel olarak olumsuz değerlendirilmiştir.

Senaryo 2, tüm bu göstergeler ışığında en uygun sistem konfigürasyonu olarak belirlenmiştir. Bu yapı; atık su arıtma tesislerinin enerji pozitif yapılara dönüşmesinde uygulanabilir, sürdürülebilir ve çevresel açıdan kabul edilebilir bir model sunmuştur.

Senaryo 2'nin öne çıkan başarı başlıkları şu şekilde özetlenebilir:

✓ Enerji Yönetimi Performansı:

Yıllık toplam 880.114 kWh enerji üretimi gerçekleştirilmiş; sistemin AC yük ihtiyacı olan 632.034 kWh tamamen karşılanmıştır. Şebekeye 363.537 kWh enerji satışı yapılırken, yalnızca 55.696 kWh elektrik şebekeden alınmıştır. Bu denge, sistemin öz yeterlilik seviyesini yüksek tuttuğunu ve şebeke bağımlılığını minimuma indirdiğini göstermektedir.

✓ Teknik Verimlilik ve Kararlılık:

- Biyogaz jeneratörü 501.875 kWh üretimle baz yük desteğini sağlamış,
- Amonyak üretim ve NH₃ Cracker modülleri yıl boyunca kesintisiz çalışmış,
- İnverter sistemi %100 kapasite faktörü ile maksimum verimlilikte çalışmıştır. Enerji dönüşüm zinciri (elektrolizör → hidrojen tankı → NH₃ üretimi → Cracker → AC çıkış) istikrarlı bir yapı ile başarılı biçimde işletilmiştir.

✓ Çevresel Uyum ve Emisyon Performansı:

- Yıllık 130 ton CO₂,
- 1 ton NO_x ve
- 0,4 ton SO₂ emisyon değeri kaydedilmiştir. Biyogazın kullanımı sayesinde atıkların enerjiye dönüştürülmesi sağlanmış, döngüsel karbon ekonomisi ilkeleri tesis genelinde uygulanmıştır.

✓ Ekonomik Sürdürülebilirlik:

Sistemin 15. yılında gerçekleşen yüksek yedekleme maliyetine rağmen, yıllık işletme gideri 1.412.204 \$ ile öngörülebilir ve sürdürülebilir bir düzeyde kalmıştır. İlk yatırım sonrası maliyet eğrisi dengelenmiş ve sistem uzun vadeli ekonomik fizibilite sunmuştur.

Senaryo 2 kapsamında oluşturulan sistem yapısı, yüksek enerji üretim kapasitesi, verimli güç elektroniği yönetimi, düşük karbon salımı ve akıllı şebeke etkileşimi ile hem kısa vadeli operasyonel başarı sağlamış hem de uzun vadeli stratejik

sürdürülebilirlik potansiyeli sunmuştur. Bu nedenle bu yapı, Türkiye’deki benzer atık su arıtma tesislerine ölçeklenebilir bir örnek teşkil edebilecek niteliktedir.

5.2 Öneriler

Bu çalışma sonucunda ulaşılan bulgular doğrultusunda, hem mevcut sistemin iyileştirilmesi hem de benzer hibrit enerji uygulamalarının yaygınlaştırılması amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

5.2.1 Teknik geliştirme önerileri

1. PV modülünün yeniden entegrasyonu:

- ✓ Mevcut analizde PV sistem ekonomik olarak dışlanmış olsa da; bifacial panel teknolojileri, izleme sistemleri ve gelişmiş MPPT algoritmaları ile desteklenerek gelecekte sisteme entegre edilmesi, karbon ayak izinin daha da azaltılmasını sağlayabilir.
- ✓ Özellikle mevsimsel üretim dengesizliklerinin azaltılması ve şebekeye enerji satış kapasitesinin artırılması açısından PV sistemin stratejik bir tamamlayıcı unsur olması mümkündür.

2. Enerji depolama sistemleri:

- ✓ Hidrojen tankı ile sağlanan kimyasal depolama yapısına ek olarak, batarya tabanlı kısa vadeli enerji depolama çözümleri entegre edilerek yük değişimlerine daha dinamik yanıt verilebilir.
- ✓ Gece saatlerinde ya da geçiş dönemlerinde enerji sürekliliğini garanti altına almak adına hibrit depolama altyapısının oluşturulması önerilir.

3. Akıllı enerji yönetim sistemleri (EMS):

- ✓ Bileşenler arasında enerji akışlarını daha hassas izleyebilmek ve gerçek zamanlı yük tahminleme gerçekleştirmek adına yapay zekâ destekli EMS yazılımları ile sistem daha esnek hâle getirilebilir.
- ✓ Özellikle amonyak üretimi ve Cracker modülünün senkron çalışmasını destekleyecek tahmine dayalı optimizasyon algoritmaları kullanılabilir.

5.2.2 Çevresel ve sektörel politika önerileri

1. Döngüsel karbon ekonomisi tabanlı enerji politikaları:

- ✓ Biyogaz, yeşil hidrojen ve amonyak üretimini aynı sistemde entegre eden bu model, Türkiye'nin sürdürülebilir enerji hedeflerine hizmet edecek biçimde yaygınlaştırılmalıdır.
- ✓ Atıkların enerjiye dönüştürülmesi ve enerji taşıyıcılara çevrilmesi sürecinde teşvik mekanizmaları geliştirilmelidir.

2. Karbon sertifikasyonu ve emisyon takibi:

- ✓ Sistem bileşenlerinin her biri için yıllık karbon ayak izi hesaplaması yapılmalı ve karbon azaltım sertifikaları (carbon credit) ile ekonomik dönüş sağlanmalıdır.
- ✓ Amonyak üretiminin karbon nötr statüsüne kavuşması için süreçler izlenebilir ve raporlanabilir hâle getirilmelidir.

5.2.3 Akademik ve bilimsel gelişim önerileri

1. Farklı elektrolizör teknolojilerinin karşılaştırılması:

- ✓ Mevcut çalışmada kullanılan elektrolizör belirli bir tip ile sınırlandırılmıştır. Gelecek araştırmalarda PEM, alkali ve SOEC gibi farklı teknolojilerin aynı sistem içinde kıyaslanması önerilir.

2. Yaşam Döngüsü Analizi:

- ✓ Enerji sistemlerinin yalnızca ekonomik değil, çevresel yük bakımından da kapsamlı değerlendirilmesi için yaşam döngüsü analizi yapılmalı; üretim, kullanım ve bertaraf süreçleri ayrıntılı olarak analiz edilmelidir.

3. Pilot Uygulama ve Gerçek Zamanlı Veri Toplama:

- ✓ Teorik simülasyonların ardından gerçek saha uygulamaları başlatılarak, sistemin uzun vadeli performans verileri toplanmalı ve akademik literatüre katkı sağlanmalıdır.

Bu öneriler, sadece bu çalışma özelinde değil; Türkiye'deki tüm atık su arıtma tesislerinin enerji pozitif yapılara dönüştürülmesi, yeşil hidrojen stratejilerine entegrasyonu ve sıfır karbon hedeflerine katkısı için yönlendirici olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] K. K. Jaiswal, C. R. Chowdhury, D. Yadav, R. Verma, S. Dutta, K. S. Jaiswal, and K. S. K. Karuppasamy, "Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health," *Energy Nexus*, vol. 7, p. 100118, 2022.
- [2] J. Wang and W. Azam, "Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries," *Geoscience Frontiers*, vol. 15, no. 2, p. 101757, 2024.
- [3] D. J. Soeder, "Greenhouse gas sources and mitigation strategies from a geosciences perspective," *Advances in Geo-Energy Research*, vol. 5, no. 3, pp. 274–285, 2021.
- [4] R. B. Finkelman, A. Wolfe, and M. S. Hendryx, "The future environmental and health impacts of coal," *Energy Geoscience*, vol. 2, no. 2, pp. 99–112, 2021.
- [5] W. Collins, R. Orbach, M. Bailey, S. Biraud, I. Coddington, D. DiCarlo, et al., "Monitoring methane emissions from oil and gas operations," *Optics Express*, vol. 30, no. 14, pp. 24326–24351, 2022.
- [6] R. Hafezi and M. Alipour, "Renewable energy sources: Traditional and modern-age technologies," in *Affordable and Clean Energy*, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1085–1099.
- [7] X. Zhang, J. Zhong, X. Zhang, D. Zhang, C. Miao, D. Wang, and L. Guo, "China can achieve carbon neutrality in line with the Paris Agreement's 2°C target: Navigating global emissions scenarios, warming levels, and extreme event projections," *Engineering*, 2024.
- [8] M. Ilyas, Z. Mu, S. Akhtar, H. Hassan, K. Shahzad, B. Aslam, and S. Maqsood, "Renewable energy, economic development, energy consumption and its impact on environmental quality: New evidence from South East Asian countries," *Renewable Energy*, vol. 223, p. 119961, 2024.
- [9] Q. Hassan, C. Y. Hsu, K. Mounich, S. Algburi, M. Jaszczur, A. A. Telba, ... and M. Barakat, "Enhancing smart grid integrated renewable distributed generation capacities: Implications for sustainable energy transformation," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 66, p. 103793, 2024.
- [10] T. Song, H. Li, and Z. Feng, "Policy and market mechanisms for promoting sustainable energy transition: role of government and private sector," *Econ. Change Restruct.*, vol. 57, no. 4, p. 153, 2024.
- [11] A. A. Khan, A. F. Minai, R. K. Godi, V. S. Sharma, H. Malik, and A. Afthanorhan, "Optimal sizing, techno-economic feasibility and reliability analysis of hybrid renewable energy system: A systematic review of energy storage systems' integration," *IEEE Access*, vol. 2025, 2025.
- [12] Basnet, S., Deschinkel, K., Le Moyne, L., & Péra, M. C., "A review on recent standalone and grid integrated hybrid renewable energy systems: System optimization and energy management strategies," *Renewable Energy Focus*, vol. 46, pp. 103-125, 2023.

- [13] A. Sánchez, Q. Zhang, M. Martín, and P. Vega, "Towards a new renewable power system using energy storage: An economic and social analysis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 252, p. 115056, 2022.
- [14] İslam, M. M., Yu, T., Giannoccaro, G., Mi, Y., La Scala, M., Rajabi, M. N., & Wang, J., "Improving reliability and stability of the power systems: A comprehensive review on the role of energy storage systems to enhance flexibility," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 1-20, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.XXXXXXX.
- [15] V. Verma, S. Thangavel, N. Dutt, A. Kumar, and R. Weerasinghe, Eds., *Highly Efficient Thermal Renewable Energy Systems: Design, Optimization and Applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2024.
- [16] I. Marouani, T. Guesmi, B. M. Alshammari, K. Alqunun, A. Alzamil, M. Alturki, and H. Hadj Abdallah, "Integration of renewable-energy-based green hydrogen into the energy future," *Processes*, vol. 11, no. 9, p. 2685, 2023.
- [17] M. Aziz, A. T. Wijayanta, and A. B. D. Nandiyanto, "Ammonia as effective hydrogen storage: A review on production, storage and utilization," *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3062, 2020.
- [18] L. Khalil, K. L. Bhatti, M. A. I. Awan, M. Riaz, K. Khalil, and N. Alwaz, "Optimization and designing of hybrid power system using HOMER Pro," *Mater. Today: Proc.*, vol. 47, pp. S110–S115, 2021.
- [19] Dakinevičius, K., "Rising energy consumption in domestic wastewater management," *BioTornado*, May 24, 2024. [Online]. Available: <https://biotornado.com/domestic-wastewater-management/>
- [20] T. M. Gür, "Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage," *Energy & Environmental Science*, vol. 11, no. 10, pp. 2696-2767, 2018.
- [21] M. Y. Suberu, M. W. Mustafa, and N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 499-514, 2014.
- [22] A. Chauhan and R. P. Saini, "A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 99-120, 2014.
- [23] H. Tekin, H. Kılıç, C. Haydaroğlu, and M. E. Asker, "Optimizing carbon emission reduction in hybrid microgrids: A case study integrating photovoltaics and hydrogen energy systems," *Niğde Ömer Halisdemir Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 1–1, 2025.
- [24] S. Dawn, A. Ramakrishna, M. Ramesh, S. S. Das, K. D. Rao, M. M. Islam, and T. S. Ustun, "Integration of renewable energy in microgrids and smart grids in deregulated power systems: A comparative exploration," *Adv. Energy Sustain. Res.*, vol. 5, no. 10, p. 2400088, 2024.

- [25] B. Chandran, J. K. Oh, S. W. Lee, D. Y. Um, S. U. Kim, V. Veeramuthu, ... and Y. H. Ra, "Solar-Driven Sustainability: III–V Semiconductor for Green Energy Production Technologies," *Nano-Micro Letters*, vol. 16, no. 1, p. 244, 2024.
- [26] Australian Government, "Photovoltaic systems," *YourHome*, 2024. [Online]. Available: <https://www.yourhome.gov.au/energy/photovoltaic-systems>. [Accessed: 18-Mar-2025].
- [27] J. Jamal, I. Mansur, A. Rasid, M. Mulyadi, M. D. Marwan, and M. Marwan, "Evaluating the shading effect of photovoltaic panels to optimize the performance ratio of a solar power system," *Results in Engineering*, vol. 21, p. 101878, 2024.
- [28] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011.
- [29] V. V. Tyagi, N. A. Rahim, A. Jeyraj, and L. Selvaraj, "Progress in solar PV technology: Research and achievement," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 443–461, 2013.
- [30] Piagrid, "Polikristal Güneş Paneli," Piagrid, 2024. [Online]. Available: <https://www.piagrid.com/rehber/polikristal-gunes-paneli>. [Accessed: 19-Mar-2025].
- [31] M. Lakhan, "Review of Efficiency of Thin Film Amorphous Silicon Solar Cell," *International Journal of Advanced Research in Arts, Science, Engineering & Management (IJARASEM)*, vol. 5, no. 2, Mar. 2018.
- [32] A. Urbina, "The balance between efficiency, stability and environmental impacts in perovskite solar cells: a review," *Journal of Physics: Energy*, vol. 2, no. 2, p. 022001, 2020.
- [33] P. M. Rodrigo, R. Velázquez, and E. F. Fernández, "DC/AC conversion efficiency of grid-connected photovoltaic inverters in central Mexico," *Solar Energy*, vol. 139, pp. 650–665, 2016.
- [34] Bhatnagar, P., and Nema, R. K., "Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 224–241, 2013.
- [35] Eltawil, M. A., and Zhao, Z., "MPPT techniques for photovoltaic applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 793–813, 2013.
- [36] B. Pakkiraiah and G. D. Sukumar, "Research survey on various MPPT performance issues to improve the solar PV system efficiency," *J. Solar Energy*, vol. 2016, no. 1, p. 8012432, 2016.
- [37] M. Vimala, G. Ramadas, M. Perarasi, A. M. Manokar, and R. Sathyamurthy, "A review of different types of solar cell materials employed in bifacial solar photovoltaic panel," *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3605, 2023.
- [38] M. A. Sheik, M. K. Aravindan, E. Cuce, A. Dasore, U. Rajak, S. Shaik, and S. Riffat, "A comprehensive review on recent advancements in cooling of solar photovoltaic systems using phase change materials," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 17, pp. 768–783, 2022.

- [39] R. K. Rajamony, B. Kalidasan, I. A. Lagari, J. K. S. Paw, A. G. N. Sofiah, S. K. Suraparaju, ... and T. Y. Khan, "Progress in research and technological developments of phase change materials integrated photovoltaic thermal systems: the allied problems and their mitigation strategies," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 2024, p. e00921.
- [40] C. Alexandru, "Simulation and optimization of a dual-axis solar tracking mechanism," *Mathematics*, vol. 12, no. 7, p. 1034, 2024.
- [41] F. Ali, A. Dawood, A. Hussain, M. H. Alnasir, M. A. Khan, T. M. Butt, et al., "Fueling the future: Biomass applications for green and sustainable energy," *Discover Sustainability*, vol. 5, no. 1, p. 156, 2024.
- [42] P. Tanger, J. L. Field, C. E. Jahn, M. W. DeFoort, and J. E. Leach, "Biomass for thermochemical conversion: targets and challenges," *Frontiers in Plant Science*, vol. 4, p. 218, 2013.
- [43] Pennsylvania State University, "Anaerobic digestion: Biogas production," *EGEE 439: Alternative Fuels from Biomass Sources*, [Online]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/egge439/node/727>. Accessed: Mar. 20, 2025.
- [44] A. Abdelgadir, X. Chen, J. Liu, X. Xie, J. Zhang, K. Zhang, *et al.*, "Characteristics, process parameters, and inner components of anaerobic bioreactors," *BioMed Research International*, vol. 2014, no. 1, p. 841573, 2014.
- [45] B. Gargouri, F. Karray, N. Mhiri, F. Aloui, and S. Sayadi, "Application of a continuously stirred tank bioreactor (CSTR) for bioremediation of hydrocarbon-rich industrial wastewater effluents," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 189, no. 1-2, pp. 427–434, 2011.
- [46] F. T. Özbaşer and E. Erdem, "Biyogaz üretimi ve kullanımı: Biogas production and utilization - A review," *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, vol. 53, no. 2, pp. 115–124, 2013.
- [47] V. Vasan, N. V. Sridharan, M. Feroskhan, S. Vaithiyanathan, B. Subramanian, P. C. Tsai, et al., "Biogas production and its utilization in internal combustion engines—A review," *Process Safety and Environmental Protection*, 2024.
- [48] M. J. B. Kabeyi and O. A. Olanrewaju, "Technologies for biogas to electricity conversion," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 774–786, 2022.
- [49] H. Kilic, M. E. Asker, and C. Haydaroğlu, "Enhancing power system reliability: Hydrogen fuel cell-integrated D-STATCOM for voltage sag mitigation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 75, pp. 557–566, 2024.
- [50] E. S. Akyüz, E. Telli, and M. Farsak, "Hydrogen generation electrolyzers: paving the way for sustainable energy," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 81, pp. 1338–1362, 2024.
- [51] C. Koşar, "Hidrojen Depolama Yöntemleri," *Open Journal of Nano*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, 2021.
- [52] V. Kyriakou, I. Garagounis, A. Vourros, E. Vasileiou, and M. Stoukides, "An electrochemical Haber-Bosch process," *Joule*, vol. 4, no. 1, pp. 142–158, Jan. 2020.

- [53] M. M. A. Mishref, Techno-Economic Analysis of Hydrogen and Ammonia Production in Isolated Microgrids for Sustainable Development, Ph.D. dissertation, Nat. Grad. Inst. for Policy Studies (GRIPS), Sept. 2024.
- [54] K. Chu, B. Weng, Z. Lu, Y. Ding, W. Zhang, R. Tan, *et al.*, "Exploration of Multidimensional Structural Optimization and Regulation Mechanisms: Catalysts and Reaction Environments in Electrochemical Ammonia Synthesis," *Adv. Sci.*, vol. 12, no. 13, Art. no. 2416053, 2025.
- [55] O. I. Awad, B. Zhou, K. Harrath, and K. Kadirgama, "Characteristics of NH_3/H_2 blend as carbon-free fuels: A review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 96, pp. 38077–38100, 2023.
- [56] S. Kitagawa, "Metal–organic frameworks (MOFs)," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 16, pp. 5415–5418, 2014.
- [57] T. Arunkumari and V. Indragandhi, "An overview of high voltage conversion ratio DC-DC converter configurations used in DC micro-grid architectures," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 670–687, 2017.
- [58] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J. W. Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 387–405, 2013.
- [59] M. Ur Rashid, I. Ullah, M. Mehran, M. N. R. Baharom, and F. Khan, "Techno-economic analysis of grid-connected hybrid renewable energy system for remote areas electrification using HOMER Pro," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 981–997, 2022.
- [60] K. Reindl, C. Dalhammar, and E. Brodén, "Circular Economy Integration in Smart Grids: A Nexus for Sustainability," *Circ. Econ. Sustain.*, vol. 4, no. 3, pp. 2119–2145, 2024.
- [61] Aramco, "Circular Carbon Economy," *Aramco*. <https://www.aramco.com/en/sustainability/climate-and-energy/circular-carbon-economy>. [Accessed: Mar. 27, 2025].
- [62] B. Kong, Q. Zhang ve P. Daoutidis, "Real-Time Operation of a Stand-Alone Microgrid With Green Ammonia Storage," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 1463–1470, 2024.
- [63] B. Kong, Q. Zhang ve P. Daoutidis, "Dynamic Optimization and Control of a Renewable Microgrid Incorporating Ammonia," in *Proceedings of the American Control Conference (ACC)*, San Diego, CA, 2023, pp. 3803–3808.
- [64] M. M. A. Mishref, *Izole Mikroşebekelerde Hidrojen ve Amonyak Üretiminin Teknik ve Ekonomik Analizi*, Doktora Tezi, 2024.
- [65] S. S. Chamazkoti, A. Hajinezhad ve S. F. Moosavian, "Feasibility Study of a Flexible Hybrid Energy Model with Power-Hydrogen Production in Wastewater Treatment Plant," *Energy Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 3189–3201, 2024.
- [66] EXI (Export Initiative Environmental Protection), *Water-Hydrogen Nexus: Water Use in Decentralized Energy Systems with Hydrogen and Fuel Cell Technologies*, NOW GmbH, 2024.

- [67] H. Ziegler, M. Schröder, P. Schulte ve B. Teichgräber, "Biogas as a Source for Producing Hydrogen at Wastewater Treatment Plants – EuWaK – A Pilot Project," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 28, pp. 8601–8606, 2015.
- [68] S. S. Chamazkoti, A. Hajinezhad ve S. F. Moosavian, "Flexible Hybrid Energy Models for Wastewater Treatment Plants Integrating Solar, Wind, and Biogas Resources," *Energy Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 3202–3215, 2024.
- [69] SynBios Projesi, *Yeşil Hidrojen ve Biyometan Üretimi (Atıksu Tabanlı Pilot Tesis)*, 2024.
- [70] HOMER Energy, "HOMER Pro Hydrogen Module," 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.homerenergy.com>
- [71] W. Ekpotu, J. Akintola, M. Obialor ve P. Udom, "Design of Solar Powered Hydrogen Production Plant in Lagos State Using HOMER & ASPEN," *Open Journal of Optimization*, vol. 12, pp. 72–97, 2023.
- [72] N. Khalilpoor, S. K. Mathur, A. K. Bansal, G. V. Anil Kumar ve V. Gupta, "Economic Evaluation of a Hybrid Renewable Energy System (HRES) Using HOMER Software – A Case Study of Rural India," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 16, no. 3, pp. 814–824, 2021.
- [73] U.S. Energy Information Administration (EIA), *Annual Energy Outlook 2021*, ABD Enerji Bilgi İdaresi Raporu, 2021.
- [74] S. Malla, M. Johnson ve P. Smith, "Electricity Generation Decarbonization via Circular Economy Strategies," *Journal of Sustainable Energy*, vol. 15, no. 2, pp. 45–57, 2023.
- [75] S. Shahzad, T. R. Alsenani, U. Siddique, and H. Kilic, "Scenario-Based Insights Into GCC's Net-Zero Transition: Balancing Economic Growth with Carbon Management," in *Proc. 2024 Global Energy Conf. (GEC)*, Dec. 2024, pp. 87–92.
- [76] Saudi Aramco, *Blue Hydrogen Production and Carbon Capture Technologies*, Teknik Rapor, 2024.
- [77] K. Reindl, C. Dalhammar ve E. Brodén, "Circular Economy Integration in Smart Grids: A Nexus for Sustainability," *Circular Economy and Sustainability*, vol. 4, pp. 2119–2145, 2024.
- [78] Gulf Journal of Advanced Business Research, "Hydrogen Production in Wastewater Treatment Plants: Economic and Environmental Benefits," *Gulf J. Adv. Bus. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 134–149, 2024.
- [79] P. Ram, G. Singh ve D. Zahawi, "Green Hydrogen Microgrid for Fuel Cell Buses in Fiji: Techno-Economic Assessment," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, no. 12, pp. 858–872, 2024.
- [80] S. Di Micco, F. Deiana, P. Cipollone ve F. Carillo, "Techno-Economic Analysis of a Multi-Energy System for Green Hydrogen, Electricity and Heat Production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 48, pp. 14311–14327, 2023.

- [81] Q. Chen, Y. Gu, Z. Tang, D. Wang ve Q. Wu, "Optimal Design and Techno-Economic Assessment of Low-Carbon Hydrogen Supply Pathways for a Refueling Station in Shanghai," *Energy*, vol. 237, Art. no. 121128, 2021.
- [82] M. U. Rashid, I. Ullah, M. Mehran ve N. R. Baharom, "Techno-Economic Analysis of a Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System for Remote Area Electrification Using HOMER Pro," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 123–135, 2022.
- [83] B. Akarsu ve S. Genç, "Electricity and Hydrogen Production Optimization in a Hybrid Renewable Energy System," *Fuel*, vol. 312, Art. no. 122981, 2022.
- [84] S. Peláez-Peláez, A. Colmenar-Santos, C. Pérez-Molina, A.-E. Rosales ve E. Rosales-Asensio, "Techno-Economic Analysis of a Heat and Power Combination System Based on Hybrid PV–Fuel Cell Systems Using Hydrogen," *Energy*, vol. 224, Art. no. 120039, 2021.
- [85] M. M. A. Mishref, "Technical and Economic Feasibility of Hydrogen and Ammonia Production in Isolated Microgrids," *Doctoral Thesis*, 2024.
- [86] S. Shahzad, T. R. Alsenani, A. N. Alrumayh, A. Almutairi, and H. Kilic, "Fault ride-through capability improvement in hydrogen energy-based distributed generators using STATCOM and deep-Q learning," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2024.
- [87] M. Bhatt ve W. Ongsakul, "Optimal Techno-Economic Feasibility Study of a Net-Zero Carbon Emission Microgrid Integrating Second-Life Battery Storage," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 44, no. 3, pp. 301–314, 2022.
- [88] F. Ali, M. Ahmar, Y. Jiang ve M. AlAhmad, "A Techno-Economic Assessment of Hybrid Energy Systems in Rural Pakistan," *Energy*, vol. 215, Art. no. 119103, 2021.
- [89] S. Vendoti, M. Muralidhar ve R. Kiranmayi, "Off-Grid Hybrid Renewable Energy System for Rural Electrification: Techno-Economic Analysis," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 120–134, 2021.
- [90] M. T. Tükenmez, M. Koç ve M. Öztürk, "A Novel Combined Biomass and Solar Multigeneration System with Hydrogen and Ammonia Production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 14, pp. 9541–9558, 2021.
- [91] O. A. Ojelade, S. F. Zaman ve B. Q. Ni, "Green Ammonia Production Technologies: A Review of Practical Progress," *Energy Policy*, vol. 182, Art. no. 113636, 2023.
- [92] E. Gul, G. Baldinelli, A. Uddin ve P. Bartocci, "AEM-Electrolyzer Based Hydrogen-Integrated Renewable Energy System Model for Distributed Communities," *Energy Conversion and Management*, vol. 277, Art. no. 117025, 2023.
- [93] M. Mousavi, A. Karimi ve N. Azizian, "Comprehensive Exergy and Economic Analysis of an Off-Grid PV/Wind/Biogas/Battery System with Solar Tracking and Hydrogen Production," *Renewable Energy*, vol. 190, pp. 73–91, 2023.
- [94] A. Kumar ve V. Channi, "A PV-Biomass Off-Grid Hybrid Renewable Energy System for Rural Electrification (Punjab, India): Techno-Economic-Environmental Analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 349, Art. no. 131047, 2022.

- [95] A. Martinez Alonso, D. Costa, M. Messagie ve T. Coosemans, "Techno-Economic Assessment of Hybrid Energy Storage Systems (Hydrogen+Battery): A Belgium Case Study," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 52, no. 5, pp. 1124–1135, 2024.
- [96] A. Kakavand, M. H. Hassanpouryouzband ve K. Afshar, "Techno-Economic Assessment of Large-Scale Green Hydrogen and Ammonia Production from Solar and Wind in Iran," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 35, pp. 11170–11189, 2023.
- [97] E. B. Agyekum, J. D. Ampah, S. Afrane ve T. S. Adebayo, "3E, H₂ Production, Irrigation and Employment Potential Assessment of a Hybrid Energy System for Tropical Climate," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 60, pp. 31073–31097, 2022.
- [98] A. Rahmat, M. W. Mustafa, A. Yatim ve M. Hanafi, "An Analysis of Renewable Energy Technology Integration for Power Generation in Malaysia Using HOMER," *Energies*, vol. 15, Art. no. 9128, 2022.
- [99] N. Anang, S. N. A. S. Nur Azman, W. M. W. Muda ve A. Dagang, "Performance Analysis of a Grid-Connected Rooftop Solar PV System in Kuala Terengganu, Malaysia," *Energy and Buildings*, vol. 248, Art. no. 111182, 2021.
- [100] M. U. Rashid, I. Ullah, M. Mehran ve N. R. Baharom, "Techno-Economic Analysis of a Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System for Remote Electrification Using HOMER Pro," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 123–135, 2022.
- [101] S. Chisale, S. Eliya ve D. Taalo, "Hybrid Energy System Optimization Using HOMER Pro Integrated with CRITIC and PROMETHEE II Methods," *Green Technologies and Sustainability*, vol. 1, Art. no. 100005, 2022.
- [102] G. Di Florio, E. G. Macchi, L. Mongibello ve M. C. Baratto, "Comparative Life-Cycle Assessment of Two SOFC-Based CHP Systems with Thermal Storage in a Single-Family Nanogrid," *Applied Energy*, vol. 285, Art. no. 116378, 2021.
- [103] H. Al-Bonsrulah, A. Baniassadi, A. Ahmad ve M. H. Ibrahim, "Design and Simulation of a PV-Wind-Electrolyzer-PEM Fuel Cell Based Hybrid Energy System," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1496–1508, 2021.
- [104] S. Maestre, S. Ortiz ve I. Ortiz, "Modelling Hydrogen Supply Chains for Transport Sector Decarbonization in Spain," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 27, pp. 10135–10152, 2023.
- [105] F. Ali, M. Ahmar, Y. Jiang ve M. AlAhmad, "Technical and Economic Feasibility Study of Hybrid Energy Systems for Rural Electrification in Pakistan Using HOMER Pro," *Energy*, vol. 215, Art. no. 119103, 2021.
- [106] R. Weidner, M. Shah ve C. Johnson, "Comparative Analysis of Land, Energy, and Food Interactions in Different Urban Farming Systems," *Environmental Research Letters*, vol. 17, no. 3, Art. no. 034020, 2022.

- [107] M. Shah, A. Maleki ve A. Asrari, "Optimal Planning of an Off-Grid Hybrid Renewable Energy System Using HOMER Pro: A Case Study," *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 419–433, 2022.
- [108] A. El-Maaroufi, M. Daoudi ve M. Laamara, "Hybrid Renewable Energy Systems for Rural Electrification: Case Study of Northern Morocco," *Fuel Cells*, vol. 20, no. 4, pp. 789–798, 2024.
- [109] H. Wang, J. Xu ve W. Dong, "Occurrence, Behavior, and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Wastewater Treatment Plants in China: A Review," *Environmental Pollution*, vol. 316, Art. no. 120599, 2024.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

BAYRAKTAR GÜNEŞ, Elifnur

Web sayfası

(Research Gate, Academia, vs.)

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	2025
Lisans	Dicle Üniversitesi	2022
Lise	Özel Şanlıurfa Atılım Anadolu Lisesi	2017

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
07.2022 - Halen	Dicle Elektrik Dağıtım	Ar-Ge Uzmanı
09.2021 - 02.2022	Karel – Turkcell	Stajyer Mühendis – Yarı Zamanlı
07.2021 - 08.2021	Karel – Turkcell	Stajyer – Kısa Dönem
07.2020 - 08.2020	TRT – Diyarbakır	Stajyer – Kısa Dönem

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Dicle Üniversitesi 1.Uluslararası Fen Bilimleri Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu (DUFEBLAS-2023)

IOT Tabanlı Yüksek Hassasiyetli Fotovoltaik Emülatör Sistemi

Elifnur Bayraktar, Heybet Kılıç

2. Enerji Stratejileri Konferansı 02-03 Ekim 2024, Ankara

Antik Yapılarda Hidrojen Depolama ve Enerji Üretiminin Sürdürülebilir Enerji Çözümleriyle Entegrasyonu

Hüsnügül Tekin, Elifnur Bayraktar Güneş, Mustafa Çelikpençe, Heybet Kılıç

3. 8th International Hydrogen Technologies Congress 12-15 May 2024, Diyarbakır

Analysis of a Microgrid with Hydrogen Storage from a Technoeconomic Perspective

Elifnur Bayraktar Güneş, Yahya Akıl, Faruk Barlaz, Hüsnügül Tekin, Servan Marşil, Heybet Kılıç

4. Hidrojen Depolamalı Bir Mikroşebekenin Tekno-Ekonomik Analizi: Devegeçidi Sulama Barajı Örneği

Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi

Elifnur Bayraktar Güneş, Faruk Barlaz, Yahya Akıl, Hüsnügül Tekin, Servan Marşil, Cem Haydaroğlu, Heybet Kılıç

Özel İlgiler

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Elifnur BAYRAKTAR GÜNEŞ		
Öğrenci No	22828018		
Ana Bilim Dalı	Yenilenebilir Enerji Kaynakları		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☒	Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Doç. Dr. Heybet KILIÇ		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	-		
Tez Başlığı	Atık Su Arıtma Tesislerinde Hidrojen Amonyak ve Biyogaz Üretimi İçin Akıllı Şebekelerin ve Yenilenebilir Hibrit Sistemlerin Döngüsel Karbon Ekonomisine Entegrasyonu		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	135		
Raporlama Tarihi	24/06/2025		
Benzerlik Oranı (%)	%2		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 135 sayfalık kısmına ilişkin, 24/06/2025 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
☒Kaynaklar hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer (Açıklayınız)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Tez benzerlik oranı üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Elifnur BAYRAKTAR GÜNEŞ

Tarih: 24/06/2025

İmza:

Danışman Adı, Soyadı: Doç. Dr. Heybet KILIÇ

İmza:

Tarih: 24/06/2025

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Doç. Dr. Fatih KOÇYİĞİT

İmza:

Tarih: 24/06/2025