

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
GÖNEN JEOTERMAL ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ/

BİYOKÜTLE KAYNAKLARI İLE HİDROJEN ÜRETİMİ VE MALİYET ANALİZİ:
BANDIRMA ÖRNEĞİ

Hakkı ÖNER

Alternatif Enerji Kaynakları Anabilim Dalı

Alternatif Enerji Kaynakları Programı

HAZİRAN 2024

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
GÖNEN JEOTERMAL ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİYOKÜTLE KAYNAKLARI İLE HİDROJEN ÜRETİMİ VE MALİYET ANALİZİ:
BANDIRMA ÖRNEĞİ

Hakkı ÖNER

DANIŞMAN

Doç. Dr. Adem DALCALI

II. DANIŞMAN

Dr. Kahraman ÇOBAN

Alternatif Enerji Kaynakları Anabilim Dalı

Alternatif Enerji Kaynakları Programı

HAZİRAN 2024

ONAY

Hakkı ÖNER tarafından hazırlanan “**BİYOKÜTLE KAYNAKLARI İLE HİDROJEN ÜRETİMİ VE MALİYET ANALİZİ: BANDIRMA ÖRNEĞİ**” adlı tez çalışması 28/06/2024 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Gönen Jeotermal Enstitüsü Alternatif Enerji Kaynakları Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ / olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Ünvanı, Adı ve Soyadı

(Danışman)

Ünvanı, Adı ve Soyadı

(Üye) (varsa)

Ünvanı, Adı ve Soyadı

(Üye) (varsa)

İmza

Doç. Dr. Adem DALCALI

Doç. Dr. Abdullah YEŞİL

Doç. Dr. Cemil OCAK

Bu tezin kabulü, Gönen Jeotermal Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. İsmail KOÇAK

Enstitü Müdürü

BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ GÖNEN JEOTERMAL ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Gönen Jeotermal Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**BİYOKÜTLE KAYNAKLARI İLE HİDROJEN ÜRETİMİ VE MALİYET ANALİZİ: BANDIRMA ÖRNEĞİ**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 28/06/2024

Hakkı ÖNER
İmza

ÖNSÖZ

Küresel iklim değışikliği günümüzde dünyamızı etkileyen en büyük sorunlardan biri haline gelmiştir. Birçok ülkede bu konuda farkındalık çalışmaları yapılmıştır. Küresel iklim değışikliğinin en büyük nedeni karbon emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Karbon emisyonları oluşmasına en büyük etken fosil yakıtların kullanımüdür. Fosil yakıtlar enerji verimi yüksektir. Fakat ülkemizde petrol, doğalgaz gibi önemli enerji kaynakları ithal edilmektedir. Bu durum küresel ısınmanın yanında ekonomik anlamda da önemli bir sorun haline gelmektedir.

Hidrojen enerjisi fosil yakıtların yerini alabilecek olan bir enerji kaynağıdır. Ülkemizde hidrojen üretimi konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Hidrojen üretimi, birçok alternatif enerji kaynaklarından üretilebilmektedir. Bu çalışmamızda alternatif enerji kaynakları kullanılarak hidrojen üretimi fizibilitesi yapılmıştır.

Bu tez çalışması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden başlayarak son aşamaya kadar her konuda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. Adem DALCALI ve Dr. Kahraman ÇOBAN' a şükranlarımı sunarım.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan annem Saliha TÜRE' ye teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasında bana destek olan Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ ve Prof. Dr. Necla TEKTAŞ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİYOKÜTLE KAYNAKLARI İLE HİDROJEN ÜRETİMİ VE MALİYET ANALİZİ: BANDIRMA ÖRNEĞİ

Hakkı ÖNER

Bandırma Onyeddi Eylül Üniversitesi
Gönen Jeotermal Enstitüsü
Alternatif Enerji Kaynakları Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Adem DALCALI
İkinci Danışman: Dr. Kahraman ÇOBAN

Haziran 2024, 79 sayfa

Sera gazı salınımının önlenmesi için fosil yakıtların kullanımının azaltılması tüm dünya tarafından bilinmektedir. Fosil enerji kaynaklarına yönelik arzın azaltılmasındaki en etkin rolün alternatif enerji kaynağı potansiyelinin artırılmasıdır. Bu sebeple alternatif enerji kaynakları ile elektrik üretimi her geçen yıl artmaktadır. Fosil yakıtlar yüksek enerji potansiyeline sahip olduğu için endüstri ve ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Hidrojen, endüstri ve ulaşım alanında fosil yakıtların yerini alabilecek olan temiz bir enerji kaynağıdır. Hidrojen üretimi farklı enerji kaynakları ile üretilebilir. Günümüzde daha çok fosil yakıtlar ile hidrojen üretimi gerçekleşmektedir ve bu durum sera gazı salınımı artmasına sebep olmaktadır. Hidrojenin alternatif enerji kaynakları ile üretilmesi son derece önemlidir. Ülkemizde alternatif enerji kaynakları ile hidrojen üretim potansiyeli yüksektir. Bu çalışmada biyokütle gazlaştırma sistemi ile yeşil hidrojen üretimi fizibilitesi yapılmıştır. Pilot bölge olarak alternatif enerji kaynakları yönünden yüksek potansiyele sahip olan Bandırma ilçesi seçilmiştir. 1500kg/gün hidrojen üretim kapasiteli biyokütle gazlaştırma sistemi fizibilite çalışması yapılmıştır. Ayrıca biyokütle

gazlaştırma sisteminin elektrik ihtiyacının biyogaz kojenerasyon sistemi, rüzgar türbini, GES santrali veya şehir şebekesinden alınması durumundaki hidrojen üretim maliyetine etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen enerjisi, biyokütle, yeşil hidrojen



ABSTRACT

M.Sc. THESIS

HYDROGEN PRODUCTION AND COST ANALYSIS WITH BIOMASS RESOURCES: THE CASE OF BANDIRMA

Hakkı ÖNER

**Bandırma Onyedi Eylül University
Gönen Geothermal Institute
Department of Alternative Energy Sources**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Adem DALCALI

Co-Supervisor: Dr. Kahraman ÇOBAN

June 2024, 79 pages

To prevent the emission of greenhouse gases, the use of fossil fuels should be reduced. The most effective role in reducing the supply of fossil energy sources is the increase in the use of alternative energy sources. Therefore, electricity production with alternative energy sources is increasing every year. Fossil fuels are used in the industry and transportation sectors because they have high energy potential. Hydrogen is a clean energy source that can replace fossil fuels in the industry and transportation sectors. Hydrogen production can be achieved with different energy sources. Currently, hydrogen production mostly relies on fossil fuels, leading to an increase in greenhouse gas emissions. It is extremely important for hydrogen to be produced with alternative energy sources. In Turkey, there is a high potential for hydrogen production with alternative energy sources. In this study, the feasibility of a biomass gasification system with a green hydrogen production capacity of 1500 kg/day has been realized. The Bandırma, which has high potential in terms of alternative energy sources, has been selected as the pilot region. Additionally, the effect of the biomass gasification system's electricity demand on the cost of hydrogen production has

been investigated under the conditions of biogas cogeneration system , wind turbine, solar system or obtaining electricity from the grid.

Keywords: Hydrogen energy, Biomass, Green Hydrogen

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	I
ABSTRACT	III
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİL LİSTESİ	VII
TABLO LİSTESİ.....	IX
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1 LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
2. ENERJİ GÖRÜNÜMÜ	6
2.1 DÜNYA ENERJİ GÖRÜNÜMÜ	6
2.2 TÜRKİYE ENERJİ GÖRÜNÜMÜ	10
2.3 YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	15
3. BİYOKÜTLE ENERJİSİ ÜRETİM PROSESLERİ.....	19
3.1 TERMOKİMYASAL PROSESLER.....	23
3.1.1 Yakma.....	23
3.1.2 Piroлиз.....	24
3.1.3 Gazlaştırma	25
3.2 BİYOKİMYASAL DÖNÜŞÜM PROSESLERİ	26
3.2.1 Fermantasyon	26
3.2.2 Aneorabik Bozunma.....	27
4. HİDROJEN ENERJİSİ.....	29
4.1 DÜNYADA VE TÜRKİYE' DE HİDROJEN ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ	31
5. HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	35
5.1 BİYOKÜTLE ENERJİSİNDEN HİDROJEN ÜRETİMİ	38

5.1.1	Termokimyasal Yöntemler	38
5.1.1.1	Piroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretimi	38
5.1.1.2	Gazifikasyon ile Hidrojen Üretimi.....	39
5.1.1.3	Süper Kritik Gazlaştırma	40
5.1.1.4	Plazma Gazlaştırma	40
5.1.2	Biyolojik Yöntemler	41
6.	MATERYAL VE YÖNTEM	43
6.1	BANDIRMA İLÇESİNİN ÖZELLİKLERİ.....	43
6.2	BİYOKÜTLE GAZLAŞTIRMA SİSTEMİ	47
7.	BULGULAR.....	54
7.1	YATIRIM VE MALİYET ANALİZİ	54
7.1.1	Biyogaz Kojenerasyon Sistemi	54
7.1.2	Rüzgar Türbini	58
7.1.3	Güneş Enerjisi Sistemi	59
7.1.4	Gazlaştırma Sistemi Yatırım ve İşletme Maliyeti.....	65
8.	TARTIŞMA VE SONUÇ	72
9.	KAYNAKLAR.....	73
	ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2-1: Dünya tahmini enerji ihtiyacı (GEO,2024).	6
Şekil 2-2: Enerji kaynaklarının karbon emisyon salınım oranları (Konyalı, 2019).....	7
Şekil 2-3: Dünyada son yılda yapılan enerji üretim santral kapasiteleri (IRENA,2024)...	8
Şekil 2-4: Yıl bazında dünyada yapılan enerji yatırımları (GEO,2024).....	9
Şekil 2-5: 2050 yılında hedeflenen karbon emisyonları azalımı faaliyetlerin etki oranı (IRENA,2022).....	9
Şekil 2-6: Yıllara göre enerji arzı ve GSYİH değişimi (TÜİK,2023).....	10
Şekil 2-7: 2015-2022 yılları enerji arzı değişimi (EİGM, 2024).....	10
Şekil 2-8: 2010-2023 yılları arasında enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi kurulu gücü (EİGM,2023).....	11
Şekil 2-9: 2023 Enerji kaynaklarına göre elektrik üretim ve kurulu gücü dağılımı.....	12
Şekil 2-10: 1990-2020 CO ₂ emisyon miktarları (TÜİK,2022).....	13
Şekil 2-11: 2021 yılı CO ₂ emisyon miktarı dağılım oranları (TÜİK,204).....	13
Şekil 2-12: 2012-2023 yılları Dünya yenilenebilir enerji kurulu gücü görünümü (IRENA.2024).....	15
Şekil 2-13: 2012-2023 yılları Türkiye yenilenebilir enerji kurulu gücü görünümü (IRENA.2024).....	15
Şekil 2-14: Türkiye Biyolojik Atık Türü Potansiyeli (BEPa, 2022).....	17
Şekil 3-1. Biyokütlenin kullanım alanları (Deloitte, 2014).....	19
Şekil 3-2. Biyokütle kaynaklarında enerji üretiminde ana süreçler (Deloitte, 2014).....	20
Şekil 3-3. Biyokütlenin farklı yakıt formları (Deloitte, 2014).....	20
Şekil 3-4. Fiziksel prosesler akış şeması (Küsek, 2015).....	22
Şekil 3-5. Basit yakma sistemi akış diyagramı (Ayan,2022).....	23

Şekil 3-6.	Piroliz sistemi akış diyagramı (http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/3_35.html)	24
Şekil 3-7.	Gazlaştırma işlemi akış diyagramı.....	25
Şekil 3-8.	Fermentasyon işlemi akış diyagramı.....	26
Şekil 3-9.	Anaerobik bozunma işlemi akış diyagramı.....	27
Şekil 4-1.	Yakıtların enerji içeriği MJ/kg (Çevik, 2017).....	31
Şekil 4-2.	Tahmin edilen hidrojen üretimi (IEA,2021)	32
Şekil 5-1:	Hidrojenin kaynaklara göre üretimi ve sınıflandırılması (https://utahcleancities.org/ . 2021)	35
Şekil 5-2:	Piroliz işlemi akış şeması (Özdemir, Mutlubaş, 2019).	39
Şekil 5-3:	Biyoyakıt reformasyonu ile hidrojen eldesi (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021). ...	39
Şekil 6-1.	Bandırma bölgesi rüzgar potansiyeli (REPA,2024).....	43
Şekil 6-2.	Bandırma bölgesi Güneş enerjisi potansiyeli (GEPA,2024)	44
Şekil 6-3.	Bandırma bölgesi aylara göre global radyasyon değeri ve güneşlenme süresi (GEPA, 2024)	44
Şekil 6-4.	Gazlaştırma sistemi akış diyagramı.....	48
Şekil 7-1.	GES uygulaması için öngörülen alan bilgileri	59
Şekil 7-2.	Günlük güneşlenme radyasyonu ve yer sıcaklığı.....	60
Şekil 7-3.	540 W PV panel yıllık elektrik üretim kapasitesi	61
Şekil 7-4.	PV panel yıllık enerji üretim kapasite bilgileri.....	63

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
Tablo 2-1.	Yenilenebilir ve fosil enerji kaynaklarına göre 2023 yılı elektrik toplam üretim ve kurulu güç değerleri (TEİAŞ, 2024).....	12
Tablo 3-1:	Biyokütle kaynaklarında kullanılan çevrim yöntemleri, elde edilen yakıt türleri ve uygulama alanları (Baş,2018)	21
Tablo 3-2:	Yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması (Karan, 2014).	28
Tablo 4-1.	Hidrojen gazının özellikleri (Şenaktaş, 2005).	30
Tablo 4-2.	2023 yılında bazı ülkelerin hidrojen birim fiyatları (https://about.bnef.com,2024).....	33
Tablo 4-3.	Türkiye de hidrojen teknolojilerinde izlenecek yol haritaları (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021)	34
Tablo 5-1:	Alkali, polimer membran (PEM) ve katı oksit elektrolizin (SOE) tipik özellikleri (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021).....	36
Tablo 5-2:	Biyohidrojen üretim mekanizmaları, kullanılan mikroorganizmalar, katalizör enzimleri, avantaj ve dezavantajları (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021).	42
Tablo 6-1.	Bandırma bölgesindeki RES kurulu güçleri(https://www.enerjiatlası.com/ruzgar/).....	44
Tablo 6-2.	Bandırma bölgesindeki GES kurulu güçleri (GEPA,2024)	45
Tablo 6-3.	Bandırma hayvansal biyokütle değeri (BEPA,2024).....	45
Tablo 6-4.	Bandırma belediye atıkları biyokütle değeri (BEPA,2024)	46
Tablo 6-5.	Bandırma orman atıkları biyokütle değeri (BEPA,2024).....	46
Tablo 6-6.	Biyogaz tesis bilgileri(https://www.enerjiatlası.com/biyogaz/)	46
Tablo 6-7.	Odun talaşı kimyasal içeriği (Abuadala, 2010).....	47
Tablo 6-8.	Gazlaştırma sistem parametreleri.....	48
Tablo 6-9.	Gazların ampirik spesifik sıcaklık hesaplama katsayıları.....	50
Tablo 6-10.	Gazların sabit entalpi değerleri (Abuadala, 2010).....	50
Tablo 7-1.	Biyogaz kojenerasyon sistem bilgileri (Aktaş M.,2019).	55

Tablo 7-2.	2019-2024 Unit Costs(Aktaş M.,2019).	56
Tablo 7-3.	500 kW Biyogaz kojenerasyon sistemi yatırım ve işletme maliyeti	57
Tablo 7-4.	1000 kW rüzgar türbini sistemi yatırım ve işletme maliyeti	58
Tablo 7-5.	PV sistem ekipman bilgileri	62
Tablo 7-6.	Güneş enerjisi santrali kurulum ve işletme maliyeti	64
Tablo 7-7.	Sermaye maliyeti faaliyetleri - toplam ekipman maliyetinin artış yüzdeleri (Alves, 2021).	65
Tablo 7-8.	Ekipman maliyetleri, güncelleme maliyet faktörleri ve ekonomik analiz için ölçek faktörleri.	66
Tablo 7-9.	Gazlaştırma sistem maliyeti	67
Tablo 7-10.	Yıllık tüketimler	68
Tablo 7-11.	Gazlaştırma sistemi operasyon maliyeti	68
Tablo 7-12.	Enerji kaynaklarına göre toplam yatırım ve işletme maliyeti	69
Tablo 7-13.	Fizibilite sonucu	69
Tablo 7-14.	Bandırma 25 yıllık hidrojen üretim kapasitesi	70
Tablo 7-15.	Bandırma ilçesindeki toplam biyokütlenin kullanımı durumundaki enerji üretim sistem verileri	70
Tablo 7-16.	Biyokütle gazlaştırma sistemi ile üretilen hidrojen birim fiyatları	71

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simge	Açıklama
C_p	:Sabit basınç ve sıcaklıkta spesifik ısı değeri
C_v	:Sabit hacimde ve sıcaklıkta spesifik ısı değeri
C_{actual}	:Ekipmanın toplam yatırım maliyeti (€)
$CapEx$:Ekipmanın toplam yatırım maliyeti (€)
C_{equip}	:Ekipmanın güncel maliyeti (€)
C_{old}	:Ekipmanın önceki yatırım değeri (€)
$En_{Biomass}$:Biokütle enerji miktarı
En_{H_2}	:Hidrojen enerji miktarı
En_{Steam}	:Buhar enerji miktarı
$h_{e,SR}$: Buhar reformasyonu çıkış toplam entalpi kj/kmol
$h_{i,SR}$:Buhar reformasyonu giriş toplam entalpi kj/kmol
$h_{e,WGS}$:Su gaz ayırımı reaktörü çıkış toplam entalpi kj/kmol
$h_{i,WGS}$:Su gaz ayırımı reaktörü giriş toplam entalpi kj/kmol
$I_{PPI actual}$:Üretici güncel fiyat endeksi
$I_{PPP old}$:Üretici önceki yılda baz alının fiyat endeksi
$LHV_{Biomass}$: Biyokütle alt ısı değeri
$\dot{m}_{e,SR}$: Buhar reformasyonu çıkış toplam kütle miktarı kg/s
$\dot{m}_{i,SR}$:Buhar reformasyonu giriş toplam kütle miktarı kg/s
$\dot{m}_{e,WGS}$:Su gaz ayırımı reaktörü çıkış toplam kütle miktarı kg/s
$\dot{m}_{i,WGS}$:Su gaz ayırımı reaktörü giriş toplam kütle miktarı kg/s
$MW_{e,SR}$:Buhar reformasyonu çıkış toplam mol kütlesi kg/mol
$MW_{i,SR}$:Buhar reformasyonu giriş toplam mol kütlesi kg/mol
$MW_{e,WGS}$: Su gaz ayırımı reaktörü çıkış mol kütlesi kg/mol
$MW_{i,WGS}$: Su gaz ayırımı reaktörü giriş mol kütlesi kg/mol
$\dot{N}_{e,SR}$:Buhar reformasyonu çıkış toplam mol oranı
$\dot{N}_{i,SR}$:Buhar reformasyonu giriş toplam mol oranı
$\dot{N}_{e,WGS}$: Su gaz ayırımı reaktörü çıkış toplam mol oranı
$\dot{N}_{i,WGS}$: Su gaz ayırımı reaktörü giriş toplam mol oranı

n	:Ekipman boyut faktörü
η	:Verim
P	: Basınç
R	: Gaz sabiti
S_{equip}	:Ekipman kapasitesi
S_{ref}	:Ekipman referans kapasitesi
T	: Sıcaklık (Kelvin)

Kısaltmalar	Açıklama
--------------------	-----------------

CH_4	:Metan
CO	:Karbonmonoksit
CO_2	:Karbondioksit
EES	:Engineering Equation Solver
GES	:Güneş enerji santrali
GSYH	:Gayrisafi yurt içi hasıla
H_2	:Hidrojen
RES	:Rüzgar enerji Santrali
PV	: Photovoltaics
TEP	:Ton eşdeğer petrol

1. GİRİŞ

Küresel ısınma, yirmi birinci yüzyılın çevre kirliliği açısından en büyük tehdit unsuru olarak bilinmektedir. Küresel ısınmanın oluşmasının en büyük nedeni, fosil enerji kaynaklarının kullanılması sonucu oluşan karbon emisyonlarıdır. Fosil yakıtlar kullanılarak elektrik üretimi, karbon emisyonlarının oluşumunda en büyük etkidir. Dünyamızda küresel ısınma artışının önlenmesi için 2050 yılına kadar sıfır karbon emisyonu salınımı hedeflenmektedir. Bu amaçla birçok ülkede fosil yakıtların kullanımlarının azaltılması yönünde çalışmalara başlanmıştır. Karbon yoğunluğunun azaltılmasında, enerji verimliliği çalışmaları, yenilenebilir enerji kullanımının artırılması en etkili olan yöntemlerdir.

Enerji verimliliği çalışmaları ile birim enerji yoğunluğunun düşürülmesi amacıyla birçok ülkede enerji yönetim politikaları geliştirilmektedir. Enerji yönetim politikalarının amacı; enerjinin daha etkin kullanılması için gerekli olan tüm teknolojik yatırımların ve uygulamaların yapılarak enerji yoğunluğunun düşürülmesini sağlamaktır. Enerji yoğunluğunun düşürülmesinin yanında talep edilen enerjinin yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilmesi karbon salınımlarının azaltılmasında büyük bir öneme sahiptir.

Fosil yakıtların elde edilen enerjinin yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanması küresel ısınmanın önlenmesinde çok büyük katkı sağlamaktadır. Bunun için ulaşım sektöründe elektrikli araçların kullanımı, endüstriyel işletmelerde ise elektrikli cihazların kullanımı veya fosil yakıtlardan daha yüksek enerji kapasitesine sahip olan hidrojen enerjinin kullanımı yaygınlaştırılmalıdır.

Hidrojen doğada bol bulunabilen bir elementtir. Fosil yakıt, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılarak çeşitli proseslerle hidrojen elde edilebilmektedir. Günümüzde daha çok fosil yakıtlar kullanılarak hidrojen üretilmektedir. Kömür, doğalgaz yakıtlarının gazlaştırılması sonucu hidrojen üretimi gerçekleşir. Fosil yakıtlardan hidrojen üretiminde karbonsuzlaştırma teknolojileri kullanılarak zararlı emisyon salınımları engellenmektedir.

Hidrojenin temiz enerji kaynağı olarak değerlendirilebilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elde edilen elektrik enerjisi ile suyun elektrolizi sonucu hidrojen üretimi yapılmaktadır. Suyun elektrolizör ile hidrojen üretimi maliyeti yüksektir.

Yenilenebilir diğer bir enerji kaynağı olan biyokütleden, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Biyokütleden hidrojen üretiminde az miktarda karbon emisyonu oluşmaktadır. Karbonsuzlaştırma işlemi yapılarak temiz hidrojen elde edilebilir.

Türkiye’ de biyokütle enerjisi potansiyeli yüksektir. Ülkemizde biyokütle potansiyelinden aktif olarak %10 oranında enerji üretim amacıyla yararlanılmaktadır. Bu tez çalışmasında Türkiye’de bölgesel koşullara göre biyokütlenin kapasitesinin gazlaştırma prosesiyle üretilebilecek hidrojen enerjisi miktarı ve maliyet analizi incelenmiştir.



1.1 LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çin' in Sichuan bölgesinde biyokütle atıkların, gazlaştırma yoluyla hidrojen üretiminin kimyasal reaksiyonların termodinamik modellenmesi yapılmıştır. Biyokütle atıklarının aylık bazda değişimi incelenerek yıllık üretilebilecek hidrojen potansiyeli belirlenmiştir. (Guo, Gu, 2022).

Mısır koçanı ve okiluptus odun atıklarının, düşey akışlı biyokütle gazlaştırma sisteminde hidrojen üretim verimlilikleri incelenmiştir. Okiluptus odun atıklarının hidrojen üretim miktarının, mısır koçanından daha yüksek olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir (Kumar, Vijay, 2023).

300 kW kapasitedeki biyokütle gazlaştırma hidrojen üretim tesisinin, termokimyasal denklemleri ile analizi yapılarak sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen verilere göre sıcaklık, oksijen oranı ve reaktör kapasitelerindeki değişimin fizibilitesi yapılmıştır. Daha büyük bir kapasitedeki hidrojen üretim tesisi kuruları için örnek kaynak oluşturulmuştur (Ewang, 2020).

Kömür ve biyokütle karışımının gazlaştırmadaki en iyi hidrojen kapasitesinin üretilebilmesi için gerekli olan parametreler incelenmiştir. Çan ilçesinde çıkarılan linyit kömürü ve sorgum bitkisi kullanılarak gazlaştırma sistemi deney çalışması yapılmıştır. Reaksiyon 600-900 °C sıcaklıklarda ve karışımın biyokütle oranının %25 oranında olduğu durumda en verimli sonuç elde edilmiştir. Daha düşük sıcaklıklarda en verimli hidrojen üretimi için akış hızının ve biyokütle oranının düşük seviyelerde olabileceği deneysel çalışmada gözlemlenmiştir (Seçer, 2019).

Çeşitli biyokütle atıklarının kinematik denklemler ile Aspen Plus, Matlab programları kullanılarak gazlaştırma sistemi modeli geliştirilmiştir. Gazlaştırma sistemi hesaplama modeli sonuçları ile deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler ile hesaplama sonuçlarında %70' in üzerinde verim ve gaz içerik sonuçları elde edilmiştir. Sistemin farklı biyokütle atıklarının gazlaştırılmasından elde edebilecek olan değerlerin, tahmin değerlerine uygun olabileceği öngörülmüştür. Ayrıca elde edilen verilerin regresyonu hesapları sonucu ile gazlaştırma sistem kapasite artırımını hesabında yardımcı olacak olan denklem geliştirmiştir (Rabea, Pourkashanian, 2022).

Kolombiya da bulunan 19,2 ton/saat manyok ve 15 ton/saat pirinç sapı atığı biyokütlenin gazlaştırma sisteminde işlenmesi sonucu 3,9 ton hidrojen üretimi simülasyon çalışması Aspen Plus programında yapılmıştır. Ayrıca çevresel etki ve risk değerlendirmeleri, proses güvenilirliği bakımından değerlendirmiş ve uygun sonuçlar elde edilmiştir (Meramo-Hurtado, Cabarcas, 2020).

Kauçuk ve ağaç atıkların belirli nem ve oksijen oralarında düşey akışlı gazlaştırma sisteminin termodinamik yaklaşımlar ile tahmin edilmiş ve deneysel sonuçları ile

karşılaştırılmıştır. Düşey akışlı biyokütle gazlaştırma sisteminin katran, tar ve kirlenici gazların miktarı ve kontaminasyonu termodinamik yaklaşımlar ile hesaplamasında gerçeğe uygun değerler vermiştir. Tahmin sonuçlarının deneysel verilere uygun değerlerde olduğu görülmüştür (İbrahim, Veremieiev, Gaskell,,2022).

Ağaç kabukları, fındık kabukları badem kabuğu ve mısır biyokütle atıklarının gazlaştırma yolu ile hidrojen üretimi Aspen HYSYS programında simülasyonu yapılmıştır. En yüksek hidrojen verimi ağaç atıklarında elde edilmiştir. Hidrojen verimi %74 oranında bulunmuştur (Özkara, 2018)

Bursa'da bulunan meyve suyu fabrikasının meyve posası atıklarının süperkritik gazlaştırma yöntemiyle hidrojen üretimi deneysel çalışması yapılmıştır. Sıcaklık, süre, biyokütle oranı, katalizör tüpü ve oranı incelenmiştir. En uygun reaksiyon sıcaklığı 600 °C, reaksiyon süresi katalizör çeşidine göre 30 ve 60 dk arasında değişmektedir. Reaksiyon için en uygun biyokütle oranı tespit edilmiştir (Demirel, 2018).

Jeotermal ve organik rankine çevrimi ile biyokütle gazlaştırma sistemi için gerekli olan elektrik ihtiyacının karşılanarak 3 kg/s sentez gazı üretimi simülasyonu Aspen HYSYS programı ile yapılmıştır. Biyokütle gazlaştırma sisteminin 14.889 kWe elektrik ihtiyacı bulunmaktadır. Organik Rankine çevrimi ve jeotermal enerji ile 47.649 kWe elektrik üretimi gerçekleştirileceği hesaplanmıştır. Gazlaştırma sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının önemli katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir (Mert., Yüksel, Burulday, 2019).

Atık lastiklerin gazlaştırma yoluyla hidrojen üretimi simülasyon çalışması Aspen Plus programı ile yapılmıştır. En verimli hidrojen üretimi 800 °C' de gerçekleşmektedir. Gazlaştırma maddesi olarak hava, buhar ve CO₂ kullanılmıştır. Gazlaştırma maddesi olarak CO₂ nin kullanımı ile en yüksek verim ve en düşük CO₂ oranı elde edilmiştir (Santasnachok, Nakyai, 2022).

Yukarı çekişli gazlaştırma sisteminde pirinç kabuklarından hidrojen üretimi deneysel çalışması yapılmıştır. Hava ve buhar kullanımı ayrı ayrı denenmiştir. Buhar kullanımında %9,6 mol H₂ üretilmiştir. Dolomit katalizörünün ilavesiyle bu oran %15,4' e çıkartılmıştır (Tuan, Nhi, Huong, Feng, 2022).

Sabit yataklı gazlaştırma sistemi optimizasyon çalışması Monte Carlo ve Rastgele tahmin yöntemi yapılmıştır. Kinetik gazlaştırma modeli oluşturulmuş ve deneysel veriler ile doğruluğu karşılaştırılmış. Monte Carlo yöntemi ve Rastgele tahmin yöntemi işlemi yapılmıştır. Elde sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Tahmin sonuçlarının %12 hata oranında gerçekleşmiştir (Fang, You, 2022).

Bangladeş' teki biyokütle atıklarının gazlaştırma prosesiyle hidrojen üretimi ekonomik analiz çalışmasını yapmıştır. Biyokütleden hidrojen üretim maliyeti ve benzin fiyatları karşılaştırılmıştır (Salam, 2018).

Çörek otu atıkların biyolojik yöntemlerle hidrojen elde edilmesini incelemiştir. Yapılan çalışmalara göre çörek otu atıklarının biyolojik hidrojen üretimi için kullanılabilir bulgular elde etmiştir. Bu bulgulara ölçekli proseslerin tasarlanmasında yardımcı olabilecek bir çalışma yapılmıştır (Dursun, 2018).

Hidrojen üretimi için metal katalizörler geliştirerek metanın doğrudan dekompozisyonu ve biyokütle model gazının kısmi oksidasyonu sürecince test edilmiştir. Daha yüksek metan dönüşümleri ve hidrojen üretimi sağlanması için uygun katalizörler belirlenmiş ve bu katalizörlerin dayanımlarının artırılması için gerekli mineraller belirlenmiştir (Karaismailoğlu, 2019).

Jeotermal ve güneş enerjisi sistemlerinden ihtiyaç duyulan elektrik ve ısı üretimi sağlandıktan sonra fazla enerjisinin elektrolizle hidrojen elde edilmesinde kullanılmasının fizibilite çalışması gerçekleştirmiştir. Enerjinin verimli bir şekilde kullanılması için yapay sinir ağları ve genetik algoritma yöntemleri kullanarak optimizasyon çalışması gerçekleştirmiştir (Şen, 2021).

Konutlarda güneş enerjisi sistemi ile enerji üretimi yapılması ve üretilen fazla enerjinin de hidrojene dönüştürülerek depolanması incelenmiştir. Depolanan hidrojenin ısıtma ihtiyacının karşılanması sonucu sağlanan emisyon azalım miktarları değerlendirilmiştir (Çevik, 2017).

Güneş enerjisinden elde edilen elektriğinin suyun hidrolizinde kullanılması sonucu hidrojen üretimi ve depolanması, depolanan hidrojenin yakıt pili kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi prosesi incelemiştir. Prosesin veriminin artırılması için gerekli etkenlerin neler olabileceği araştırılmıştır (Habash, 2018).

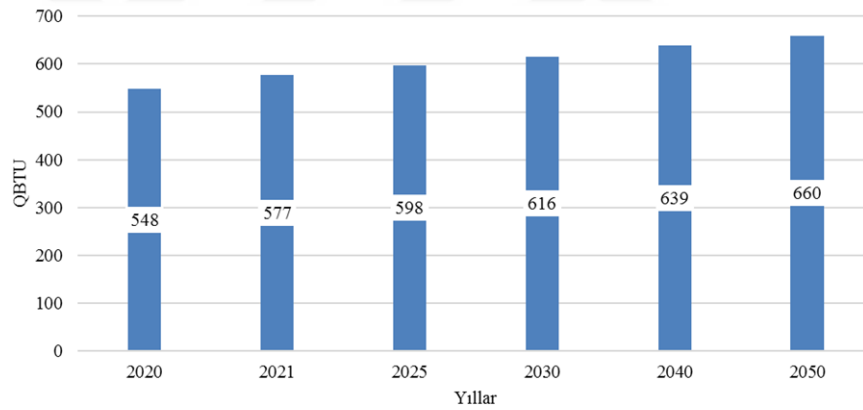
Yenilebilir enerji ile hidrojen üretilmesi ve doğalgaz ile karıştırılarak kullanımı incelenerek, doğalgaz ve hidrojen karışımı kullanımı, gazlı ocak, kombi, gaz motoru, gaz türbini gibi ünitelerde değerlendirilmiştir. Doğalgaz %20 hacimsel olarak hidrojen ilave edilerek fosil yakıttan % 6,75 oranında tasarruf sağlanabileceği tespit edilmiştir (Sorgulu, 2023).

2. ENERJİ GÖRÜNÜMÜ

Teknolojinin gelişimi, sanayileşme, küresel ısınma, nüfus yoğunluğu dünyamızda ve ülkemizde enerjinin enerji kaynaklarının potansiyel durumunu etkileyen günümüzde başlıca önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Bu etkileri baz alarak dünyada enerji politikaları geliştirilerek enerji arz ve talebini sürekli dengede tutmak için araştırmalar yapılmaktadır. Bu bölümde dünya ve ülkemizin enerji görünümü iki başlık altında incelenmiştir.

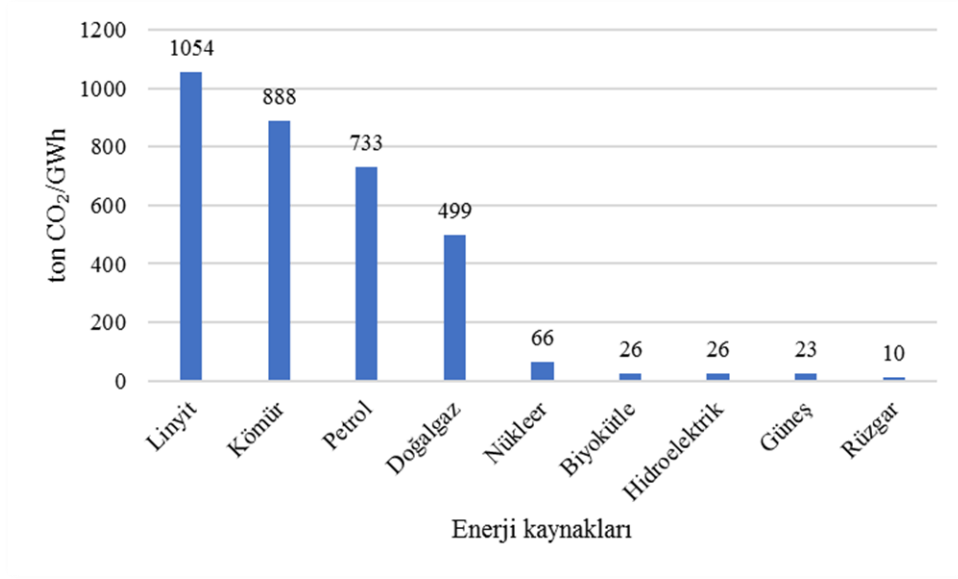
2.1 DÜNYA ENERJİ GÖRÜNÜMÜ

Dünyamızda nüfusun artmasından kaynaklanan sanayileşme ve kentsel alanların gelişmesi sonucu enerji tüketimi sürekli artmaktadır. Dünya nüfusu 2050 yılına kadar 9,5 milyar ve enerji ihtiyacının 660 QBTU olacağı tahmin edilmektedir (GEO,2024). Enerji tüketimindeki tahmin edilen artış miktarı Şekil 2.1 de görülmektedir.



Şekil 2-1: Dünya tahmini enerji ihtiyacı (GEO,2024).

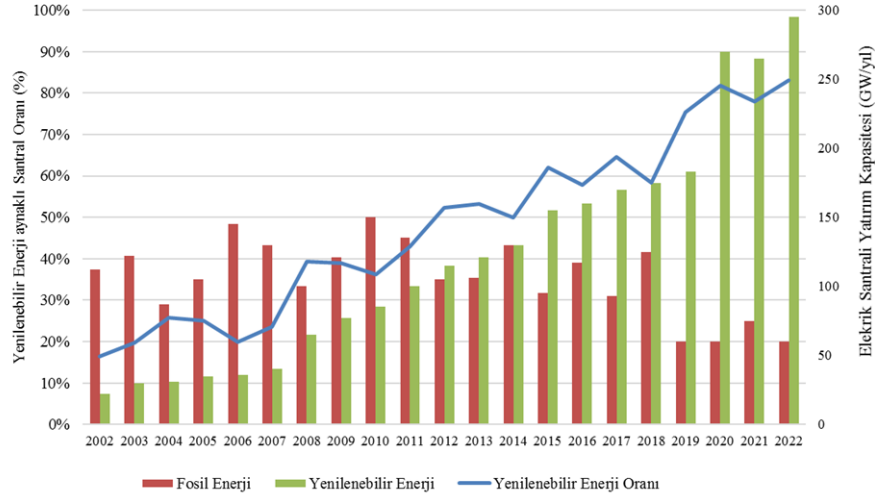
Enerji talebinin karşılanmasının yanında ayrıca yakıtların kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını çevresel yönden küresel ısınmaya yol açmaktadır. Sera gazı salınımı karbonmonoksit, karbondioksit, metan, azot ve flor içerikli gazlardan oluşmaktadır. Sera gazı oluşumuna etki eden en önemlileri karbondioksit gazıdır. Fosil yakıtların kullanımı karbondioksit, karbonmonoksit gibi zararlı gazların oluşunu en çok etki eden enerji kaynaklarıdır. Şekil 2.2' de yakıtların sera gazı emisyon miktarları yer almaktadır.



Şekil 2-2: Enerji kaynaklarının karbon emisyon salınım oranları (Konyalı, 2019)

Linyit, kömür, petrol ve doğalgaz yakıtlarının kullanım sera gazı emisyon miktarları yüksek olduğu görülmektedir. Biyokütle, hidroelektrik, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki sera gazı emisyon miktarları düşüktür.

Fosil yakıtların kullanımı ile oluşan sera gazı dünyamızı küresel ısınma yönünde olumsuz olarak etkilemektedir. Küresel ısınma dünyada iklimini değiştirerek, canlı yaşamını tehdit etmektedir. 2005 yılında Birleşmiş Milletler ve diğer devletlerin katılımıyla Kyoto protokolü yürürlüğe girmesiyle küresel ısınmanın önlenmesine kapsamında bir adım atılmıştır. Kyoto protokolü ile sera gazı salınımını artışı önlenmesi ve belirli sınırlar içinde tutulması amaçlanmaktadır. Bu amaçla 2005 yılından itibaren alternatif enerji kaynakları alanında önemli gelişmeler dünyamızda yaşanmaktadır (Konyalı, 2019). Bu kapsamda dünyada gerçekleşen yenilenebilir enerji kaynaklı üretim santral kapasiteleri, fosil kaynaklı enerji üretim santral kapasitelerinden daha fazla kurulum yapıldığı Şekil 2.3' de görülmüştür.



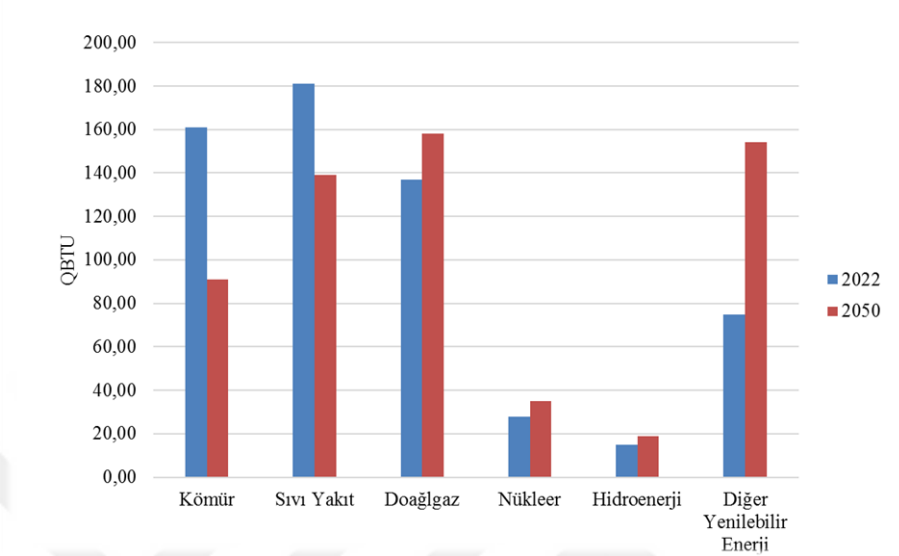
Şekil 2-3: Dünyada son yılda yapılan enerji üretim santral kapasiteleri (IRENA,2024)

2015 yılında düzenlenen Paris Konferansında İklim değişikliği ile mücadele bağlamında ulusal katkılar, emisyon azalımı, uyum, kayıp ve zararların belirlenmesi, finansman, teknoloji geliştirme ve transferi, kapasite geliştirme konularına ilişkin uygulama usulleri belirlenmek üzere, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi bir çerçeve oluşturmuştur. Hazırlanan bu sözleşme, iklim değişikliğinin olumsuz etkileriyle karşılaşan ülkelerin uyum ve direnç kabiliyetlerinin artırılması ile sera gazı emisyon azalım kapasitelerinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle gelişmiş ülkelerin, en az gelişmiş ülkeler ve küçük ada devletleri başta olmak üzere, ihtiyacı olan gelişmekte olan ülkelere finansman, teknoloji transferi ve kapasite geliştirme imkanları sağlamalarını öngörmektedir.

Bu kapsamda daha planlı yol alınabilmesi için Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansının 2021 yılına küresel ısınmanın önlenmesi için bir rapor oluşturmuştur. Hazırlanan raporda küresel ısınmadan kaynaklanan sıcaklık artışının 2050 yılına kadar 1,5 °C ye düşürülmesi hedeflenmektedir (IEA,2022).

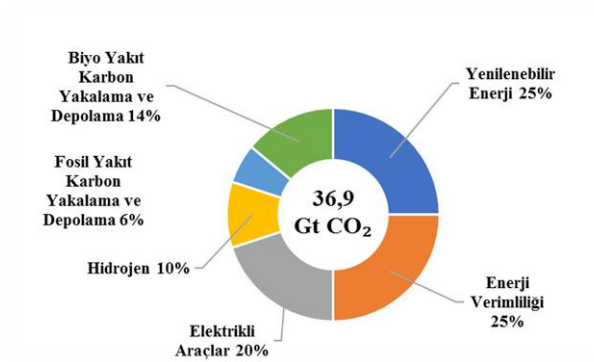
Sera gazı emisyonlarının büyük bir bölümü elektrik enerjisi üretiminden kaynaklanmaktadır. Teknolojinin ve endüstriyel faaliyetlerin gelişmesi nüfusun artması 2022 yılı toplam elektrik enerjisi ihtiyacının 2050 yılına kadar 3 katı artacağı öngörülmüştür. Elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarının engellenmesi için elektrik üretimi 2030 yılına kadar %65'i ve 2050 yılına kadar ise %90' nı yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi hedeflenmektedir. (IRENA,2022).

Hedeflenen elektrik üretim santrali kurulu gücündeki yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı 2030 yılında %76, 2050 yılında ise %92'dir. 2022-2050 yılların arasında öngörülen enerji kaynaklarına göre enerji üretim kapasiteleri Şekil 2.4' te gösterilmektedir.



Şekil 2-4: Yıl bazında dünyada yapılan enerji yatırımları (GEO,2024)

2050 yılına kadar karbon salınım emisyonları azalım hedeflerine ulaşılması için gerekli olan faaliyetler ve bu faaliyetlerin etki oranları Şekil 2.5' te gösterilmiştir.



Şekil 2-5: 2050 yılında hedeflenen karbon emisyonları azalımı faaliyetlerin etki oranı (IRENA,2022).

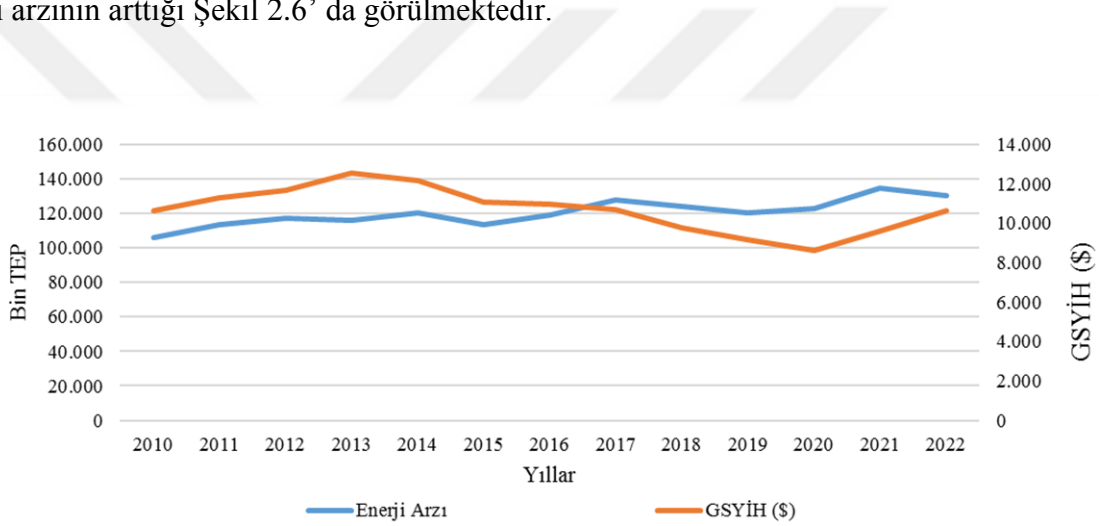
Dünyada yenilenebilir enerji kullanımı ve enerji verimliliği uygulamaları ile karbonsuzlaştırma oranının %50 civarlarında olacağı tespit edilmiştir.

Fosil yakıtlar ile kullanılan ulaşım araçlarının ve ısıtma sistemlerinin elektrik enerjisi ile kullanılması sağlanarak karbon emisyonlarının azaltılması hedeflenmektedir. Biyoyakıtın karbonsuzlaştırılarak kullanımı %14, fosil yakıtların karbonsuzlaştırılması %6 oranında etkiye sahip olacağı belirlenmiştir (IRENA,2022).

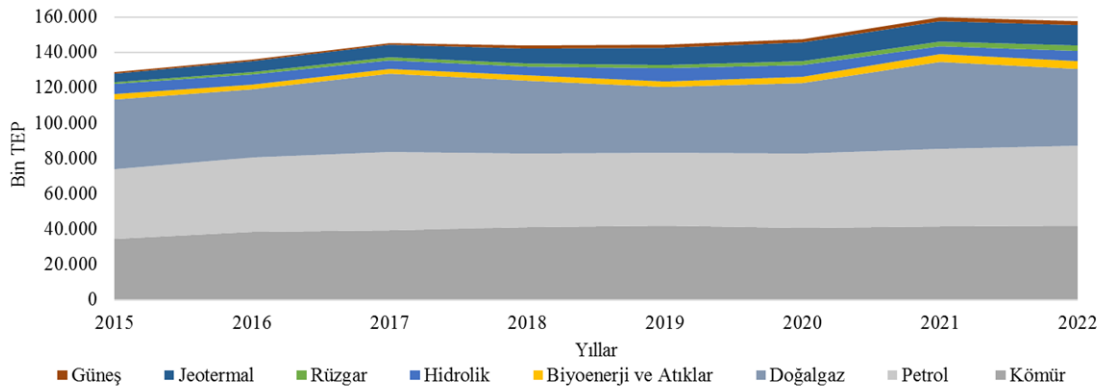
Hidrojen kullanımı önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde artacaktır. Özellikle temiz hidrojen üretiminin ve kullanımının yaygınlaştırılması ile %10 oranında karbon emisyonu engelleneceği öngörülmektedir. 2030 yılına kadar 18 GtCO₂/yıl ve 2050 yılına kadar ise 36,9 GtCO₂/yıl karbon emisyonu azalımı hedeflerine ulaşılması beklenmektedir (IRENA,2022).

2.2 TÜRKİYE ENERJİ GÖRÜNÜMÜ

Ülkemizde son yıllarda nüfus artışı ve ekonomik büyüme gözlenmektedir. Ekonominin büyümesi sonucu gerekli olan enerji talebini karşılanması için kurulu gücün sürekli olarak artmaktadır (Dalcalı, 2022). Ülkemiz artan bu enerji arzının büyük bölümünü ithal etmektedir. Bu nedenle 2022 yılında , GSYİH değeri 2010 yılı döviz bazında göre yakın değerlerde olduğu ve enerji arzının arttığı Şekil 2.6’ da görülmektedir.

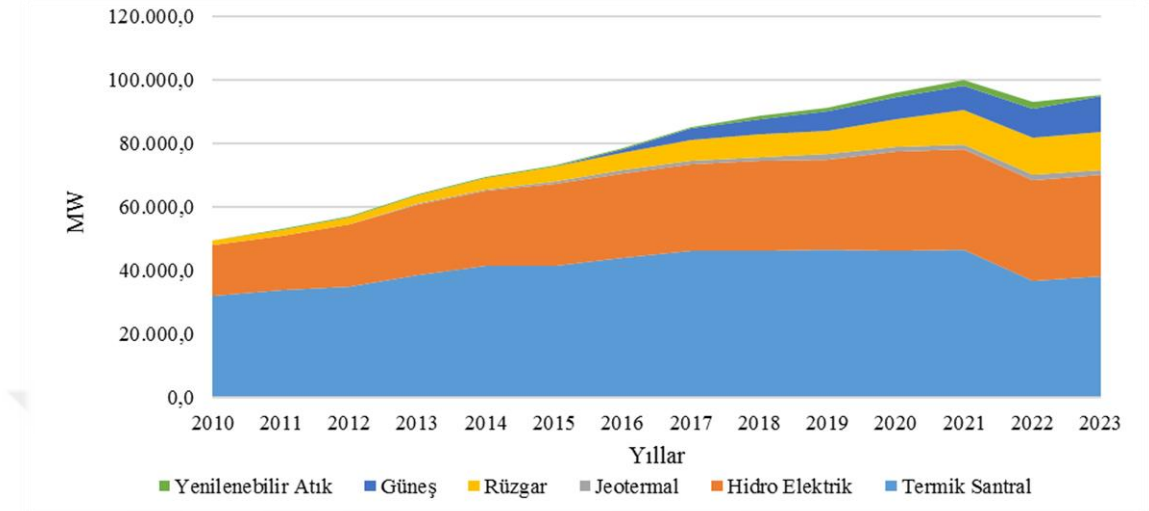


Şekil 2-6: Yıllara göre enerji arzı ve GSYİH değişimi (TÜİK,2023)



Şekil 2-7: 2015-2022 yılları enerji arzı değişimi (EİGM, 2024)

Enerji arzının sağlanmasında 2015 ve 2022 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı sürekli arttığı Şekil 2.7’ de görülmektedir. Toplam enerji arzının sağlanmasındaki yenilenebilir enerji oranı 2015 yılında %14, 2022 yılında %21’dir.



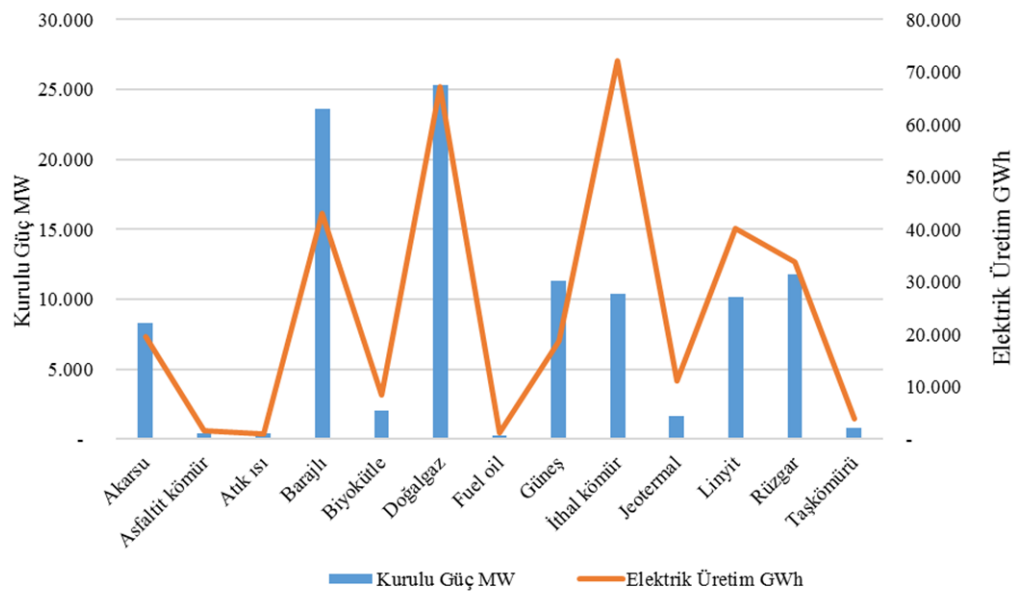
Şekil 2-8: 2010-2023 yılları arasında enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi kurulu gücü (EİGM,2023)

2010 yılında elektrik üretimi toplam kurulu gücü 49.524 MW’ tır ve kurulu gücün %35’ i yenilebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. 2023 yılında ise toplam kurulu gücü kapasitesi 106.659 MW’ tır ve kurulu gücün %64,3’ ü yenilebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. 2010 yılında yenilebilir enerji kaynağı kurulu gücü 17.353 MW tır ve 2023 yılında 4 katı olarak artarak 68.597 MW’ a ulaşmıştır. Kurulu gücün yıl bazında artış miktarları Şekil 2.8 de detaylı olarak gösterilmektedir (EİGM,2024)

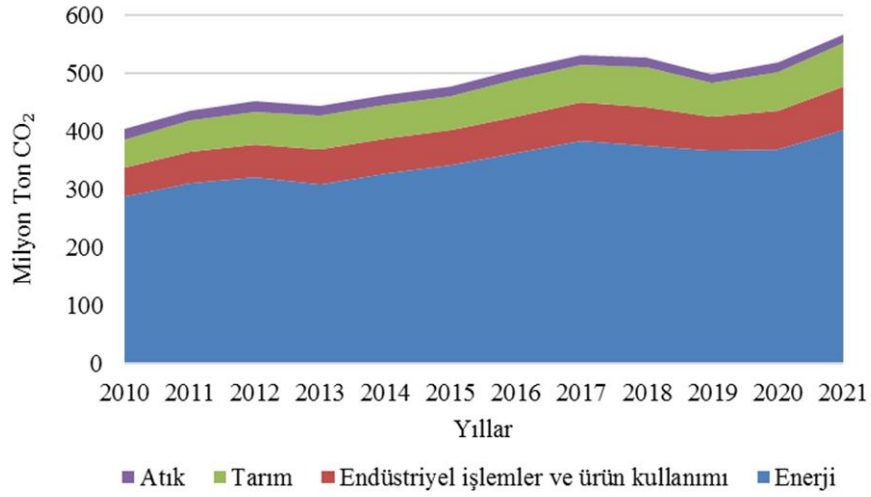
Tablo 2-1. Yenilenebilir ve fosil enerji kaynaklarına göre 2023 yılı elektrik toplam üretim ve kurulu güç değerleri (TEİAŞ, 2024)

Enerji Türü	Kurulu Güç		Elektrik Üretim	
	MW	%	GWh	%
Akarsu	8.314	8%	19.502	5%
Asfaltit Kömür	405	0%	1.578	0%
Atık Isı	385	0%	952	0%
Barajlı	23.650	22%	43.104	13%
Biyokütle	2.077	2%	8.537	2%
Doğalgaz	25.350	24%	67.277	18%
Fuel Oil	260	0%	1.141	0%
Güneş	11.316	11%	18.789	5%
İthal Kömür	10.374	10%	72.101	20%
Jeotermal	1.691	2%	11.047	3%
Linyit	10.194	10%	40.276	11%
Rüzgar	11.803	11%	33.883	9%
Taşkömürü	841	1%	3.972	1%
Toplam	106.659	100%	364.311	100%

2023 yılı on aylık toplam elektrik kurulu gücü 106.659 MW ve üretimi 364.311 GWh' tır. Toplam elektrik kurulu %56 ve toplam elektrik üretiminin %42' si yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları dağılımına göre üretim ve kurulu gücü Tablo 2.1' ve Şekil 2.9 da gösterilmiştir.

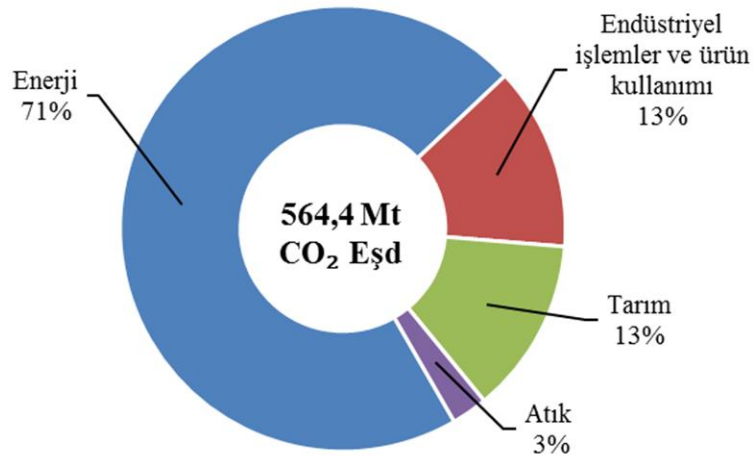


Şekil 2-9: 2023 Enerji kaynaklarına göre elektrik üretim ve kurulu gücü dağılımı



Şekil 2-10: 1990-2020 CO₂ emisyon miktarları (TÜİK,2022)

Ülkemizde enerji ihtiyacının karşılanması karbon emisyon oluşumuna önemli derecede etkisi olduğu bilinmektedir. 2010 yılından itibaren CO₂ emisyon miktarı 2021 yılına kadar yaklaşık 1,5 kat arttığı Şekil 2.10' de görülmektedir. Türkiye de 2021 yılında CO₂ emisyon miktarının sektörlere göre dağılımları Şekil 2.11' de görülmektedir Sektörlere göre CO₂ emisyon oranı %66 enerji, %19 ulaşım, %14 endüstriyel tesislerden oluşmaktadır. 2040 yılında elektrik talebinin yaklaşık iki kat artacağı tahmini göz önüne alındığında enerji sektöründe karbon emisyon azalımı için temiz enerji kullanımı artması hedeflenmektedir.



Şekil 2-11: 2021 yılı CO₂ emisyon miktarı dağılım oranları (TÜİK,2024)

2007 yılında Enerji Verimliliği Kanunu ve 2010 yılında ÇŞİDB tarafından 2012-2023 iklim değişikliği stratejisi yayınlanmıştır. Strateji planında sera gazı emisyonlarının ve birincil enerji yoğunluğunun %20 azaltılmasıdır. 2012-2020 yılları arasında birincil enerji yoğunluğu %12,7 oranında azalmıştır ve çalışmalar devam etmektedir.

Enerji verimliliği kanununa göre endüstriyel, bina ve ulaşım alanlarında enerji verimliliği konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Endüstriyel işletmelere yönelik çevre dostu verimlilik artırıcı proje yatırımlarının %70' i hibe olarak ETKB tarafından karşılanmaktadır. Gönüllü anlaşmalar ile enerji yoğunluğunun 3 yıllık ortalamasında %10 azaltılması hedefine ulaşan endüstriyel işletmelerin taahhüdün imzalandığı yıldaki enerji faturasının %30 ETKB tarafından hibe olarak verilmektedir. 2019 yılında kamu binalarında %15 enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmiştir ve fizibilite çalışmaları yapılarak yatırımlar destekleri sağlanmaktadır. Enerji verimliliği yüksek bina sayısının artırılması için Enerji Kimlik Belgesi sınıfı yüksek konutlara yönelik, değerinin %85-90' nı oranları arasında kredi olanakları sağlanmaktadır. Bu şekilde sanayi ve bina alanında enerji verimliliğinin sağlanması için çalışmalar devam edilmelidir.

Türkiye 2021 yılında Paris Anlaşmasının onaylayarak 2053 yılında net sıfır emisyon hedeflerini belirlemiştir. Bu amaçla yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması ve fosil yakıt kullanımının azaltılması yönünde hedefler belirlenmiştir.

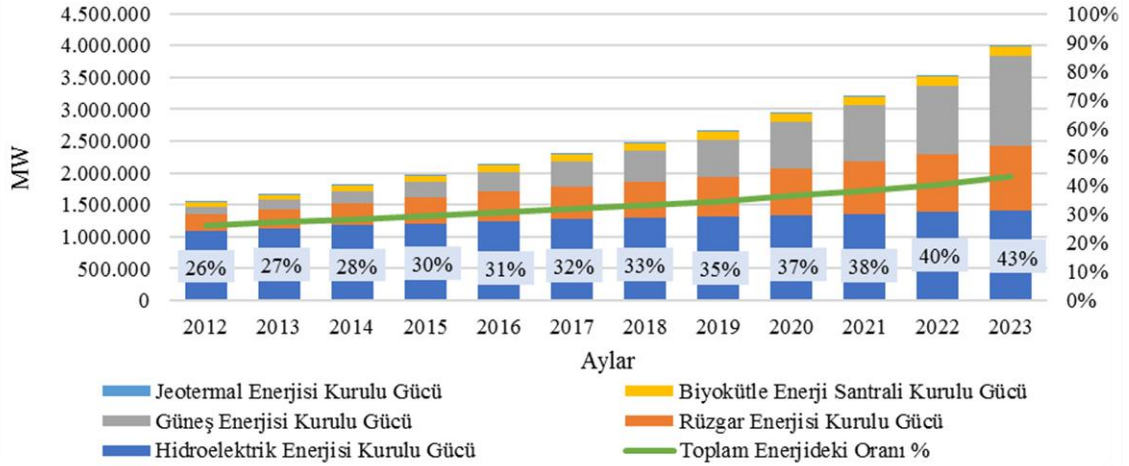
Birincil enerji kaynağı tüketen cihaz ve ekipmanlarda elektrifikasyon uygulanmasına hızla artmalıdır. Elektrifikasyon ile artan enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanması karbon emisyonlarının önlenmesinde etkili olacağı bilinmektedir. Bina ısıtmalarında ısı pompası sistemleri kullanılarak doğalgaz yerine yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi tüketimi sağlanmalıdır. Fosil yakıt kullanan ulaşım araçlarının yerini hızla elektrikle çalışan araçlar almalıdır.

Mersin Akkuyu nükleer santralin faaliyete geçmesiyle ülkemizin yaklaşık %10 oranında enerji ihtiyacının karşılanacağı öngörülmektedir. Bu şekilde fosil yakıtların azaltılması yolunda önemli adımların atılması sağlanmış olacaktır.

Ülkemizde temiz hidrojen enerjisi teknolojileriyle ilgili çalışmalara başlanmıştır. ETKB tarafından hidrojen enerjisi teknolojileri stratejisi ve yol haritası hazırlanmıştır. Ülkemizde hidrojen üretimi ve kullanımı ile ilgili pilot çalışmalar yapılmaktadır. Hidrojenin özellikle sanayide yüksek ısı enerjisi gereksinimi olan tesislerde kullanılarak fosil yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir.

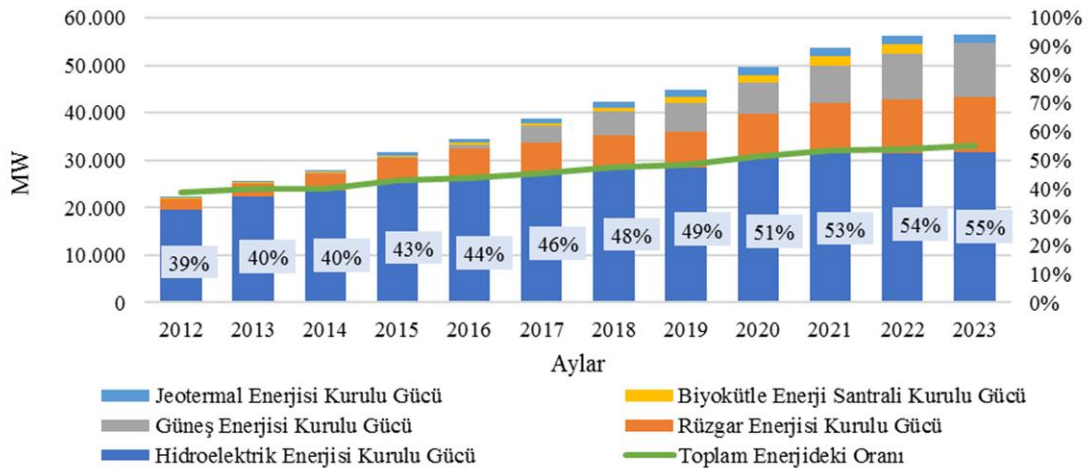
2.3 YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Yenilenebilir enerji, sürekli doğada var olan ve kullanıldıktan sonra tekrardan kendini yenileyebilen doğal yollarla elde edilen enerji kaynağıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle, hidroelektrik olarak günümüzde kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları temiz enerjidir ve doğaya zararları yok denecek kadar azdır.



Şekil 2-12: 2012-2023 yılları Dünya yenilenebilir enerji kurulu gücü görünümü (IRENA.2024)

Dünyada ve ülkemizde yenilenebilir enerji kaynakları 2012-2023 yılları arasında dünyada ve ülkemizde yenilenebilir enerji kaynakları kurulu görünümü Şekil 2.12 ve Şekil 2.13' te gösterilmiştir. Toplam kurulu güçteki yenilenebilir enerji kaynakları oranı dünyada %38, ülkemizde %54 'tür (IRENA.2024).



Şekil 2-13: 2012-2023 yılları Türkiye yenilenebilir enerji kurulu gücü görünümü (IRENA.2024)

Türkiye de güneş enerjisinden yararlanma süresi günlük ortalama 7,5 saat ve yıllık 2.741 saattir (Konyalı, 2019). Türkiye’de güneş ışınımlarından 1.527 kW/m^2 enerji oluşur (ETKB,2022). 2023 yılında güneş enerjisi kurulu güç kapasitesi 11.316 MW ’ ta ulaşmıştır ve toplam kurulu güçteki güneş enerjisi oranı %11 dır (TEİAŞ, 2024).

Güneşten kaynaklanan radyasyon enerjisi dünyanın coğrafi özelliklerine göre yer yüzünün farklı olarak ısınmasını sağlamaktadır. Yer yüzeyinin farklı ısınması hava sıcaklığı, nem ve basıncın farklı olmasına neden olur. Farklı basınç, havanın hareketiyle rüzgarı oluşturur. Dünya ulaşan güneş ışınımlarının %2’ ü rüzgar enerjisine dönüşür (ETKB,2022).

2023 yılında rüzgar enerjisi kurulu gücü 11.803 MW ’ tır, rüzgar enerjisinin toplam kurulu güçteki oranı %11’ dir (TEİAŞ, 2024).

Jeotermal enerji, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısı ve basıncın sıcak su, buhar ve gazlar ile yeryüzüne taşınan ısı enerjisidir. Bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde ve çevresindeki yeraltı ve yer üstü sularına göre daha fazla çözülmüş mineral içerirler. Jeotermal enerji 3 farklı alanda kullanılmaktadır. Jeotermal sahalarda açılan kuyulardan elde edilen akışkan separatörlerde buhar ve su ayrıştırıldıktan sonra türbin ve jeneratörde elektrik elde edilir. Düşük sıcaklıklardaki jeotermal akışkan sera, organik tarım, ürün kurutma ve bölgesel ısıtma olarak kullanılmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıkta yararlı mineraller içeren jeotermal kaynaklı sular termal turizm ve sağlık amaçlı kullanılmaktadır (ETKB,2022).

Ülkemizde jeolojik ve coğrafi özelliklerinden dolayı aktif tektonik kuşak üzerinde yer almaktadır. Bu konumu itibariyle jeotermal kaynak açıdan zengin konumdadır. Değişik sıcaklıklarda ve doğal yeryüzüne çıkan yaklaşık 1.000 adet jeotermal kaynak mevcuttur. Türkiye jeotermal potansiyel bakımından Avrupa’ nın birincisi dünyanın dördüncüsü konumundadır. Dünya sıralamasında jeotermal enerjiden elektrik üretiminde Türkiye beşinci sıradadır (ETKB,2022).

En çok batı bölgelerimiz jeotermal potansiyel bakımından zengindir. Jeotermal suların %90 düşük sıcaklıklardır ve ısıtma ve turizm amaçlı, %10 ise yüksek sıcaklıklılıdır ve elektrik üretiminde kullanımına uygundur (ETKB, 2022).

Ülkemizde 1691 MW jeotermal elektrik santrali kurulu gücü bulunmaktadır ve toplam kurulu güçteki jeotermal elektrik santralinin oranı %2’ dir (TEİAŞ, 2024).

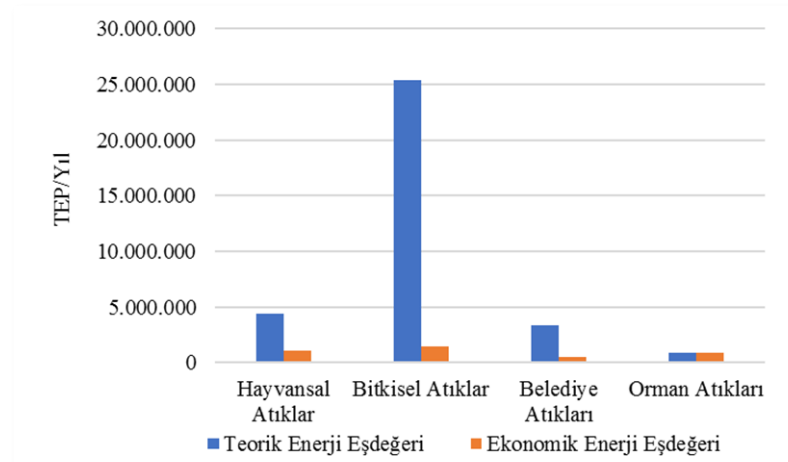
Hidroelektrik santralleri suyun debi gücü ile elektrik üretimini sağlayan sistemleridir. Hidroelektrik santrallerinde ilk olarak suyun yüksek bir yerde depolanması gerekmektedir. Su doğal veya pompa vasıtasıyla depolanabilir. Depolanan suyun akışının sağlanması ile suyun potansiyel enerjisi kinetik enerjiye çevrimi sağlanır. Hidroelektrik, su akışının yarattığı kinetik

enerjinin türbinlere aktarılarak mekanik enerjiye ve mekanik enerjinin jeneratöre aktarılmasıyla elektrik enerjisi dönüştüren yenilenebilir enerji sistemidir. Dünyada en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Çevreye uyumlu, temiz, yüksek verimli ve uzun ömürlü bir enerji kaynağıdır. Enerji birim maliyeti düşüktür. Hızlı bir şekilde devreye alınabilir ve devreden çıkarılabilir. Yatırım maliyetleri yüksek, bakım maliyetleri ise düşüktür. 2023 yılında hidroelektrik santrali kurulu gücü toplam 31.961 MW tır. Hidroelektrik santrallerinin 2023 yılında toplam kurulu güçteki oranı %30' dur (TEİAŞ, 2024).

Su gücü ile okyanuslarda dalga ve gel-git enerjisiyle elektrik üretimi dünyada yapılmaktadır. Bu teknolojiler fazla gelişmemiştir. Dünyada pilot uygulamaları vardır. Ülkemizde 2017 yılında Zonguldak bölgesinde pilot bir uygulama yapılmıştır. Karadeniz bölgesinde 77 MW kurulu güce sahip dalga enerji santrali kurulması planlanmaktadır.

Türkiye biyokütle enerjisi potansiyel bakımından zengindir. İç Anadolu bölgesinde tarımsal ürün çeşitliliği yönünden oldukça fazladır. Doğu Anadolu, Karadeniz bölgesinin doğusu ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde yükseltinin fazla olması, arazinin fazla engebeli olması ve nüfus yoğunluğunun az olmasından dolayı biyokütle enerjisi yönünden diğer bölgelere göre daha düşük potansiyele sahiptir. Biyokütle enerjisi en fazla olan iç Anadolu bölgesindedir. Batı bölgelerine ise biyokütle enerji üretim santraline diğer bölgelere göre daha fazladır. Ulaşım, altyapı eksikliği, hayvancılık ve tarımın küçük işletmelerce yapımı, anız yakımı, tesislerin yetersizliği, yenilikçi ve dönüşüm teknoloji yetersizlikleri, teşvik yatırımların geç kalınmış olması Türkiye' deki biyokütle enerjisinin verimli bir şekilde kullanılmadığının göstergesidir (Ayan, 2022).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının verilerine göre Biyokütle Enerjisi Potansiyeli teorik ve ekonomik eşdeğeri Şekil 2.14' da yer almaktadır.



Şekil 2-14: Türkiye Biyolojik Atık Türü Potansiyeli (BEPA, 2022)

Türkiye de mevcut biyokütle potansiyelinin %10 ekonomik enerji olarak kullanılmaktadır, %90' ekonomik olarak değerlendirilememektedir (BEPA,2024).

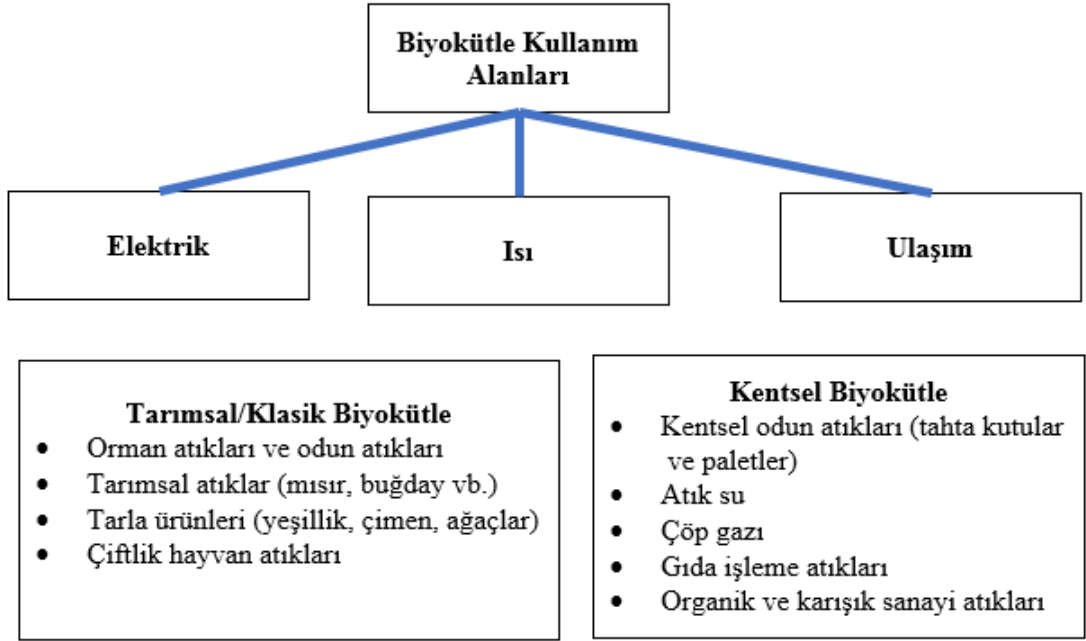
2023 yılında toplam biyokütle kaynaklı santral kurulu güç kapasitesi 2.77 MW, toplam kurulu güçteki oranı %2' tür. 2023 yılına biyokütle enerjisinden üretilen elektrik enerjisi 8.537 GWh' tır. Biyoenerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin toplam elektrik enerjisi üretimindeki payı %2' dir (TEİAŞ,2024).

Tez çalışmasında biyokütle enerjisinden hidrojen üretim yöntemleri incelenmiştir. Biyokütle enerjisi ve hidrojen enerjisi üretim yöntemleri detaylı olarak diğer başlıklarda sunulmuştur.



3. BİYOKÜTLE ENERJİSİ ÜRETİM PROSESLERİ

Biyokütle enerjisi, bitkisel ve hayvansal kökenli organik maddelerden oluşan biyolojik yapıda bulunan bir enerji kaynağıdır. Biyokütle enerjisi ısıtma, elektrik üretimi ve ulaşım alanlarında kullanılmaktadır (Baş,2018). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Kullanımına ilişkin 5346 sayılı kanununa göre' organik atıkların yanı sıra bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat atıkları dahil olmak üzere tarım ve orman ürünlerinden ve bu ürünlerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynaklar' olarak tanımlanmaktadır.

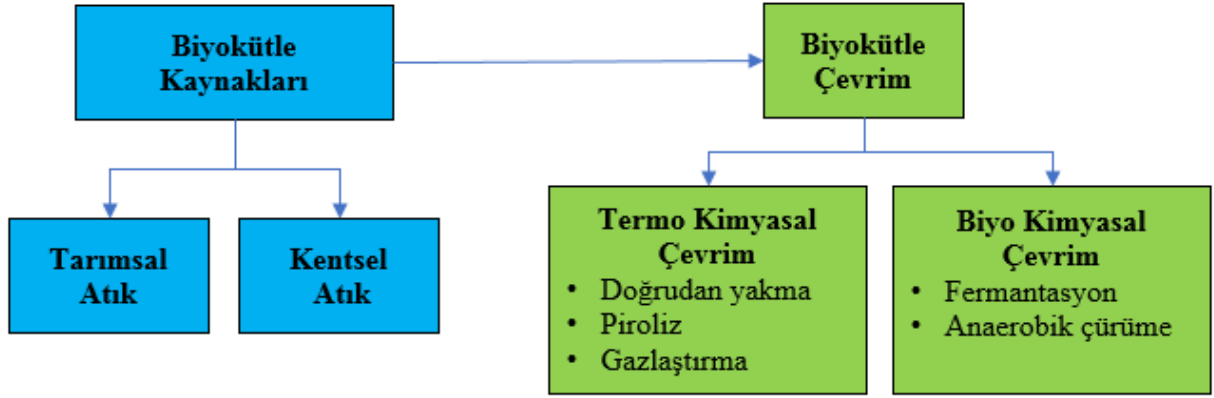


Şekil 3-1. Biyokütlenin kullanım alanları (Deloitte, 2014)

Biyokütle enerjisi Şekil 3.1 te gösterildiği gibi tarımsal ve kentsel atıklar olmak üzere iki grupta toplanır. Tarımsal atıklar ormanlarda bulunan ağaçlar, tarla ürünleri ve bitkileri, hayvansal atıklarından oluşmaktadır. Klasik biyokütle bu atıkların yakılması sonucu elde edilen enerjidir. Çoğunlukla gelişmekte olan ülkelerde kırsal kesimlerde orman ürünleri kullanılmaktadır. Asya, Afrika ve Güney Amerika' nın içinde bulunduğu ormanları gelişmemiş ülkelerde hayvanlardan elde edilen tezeklerden ısı enerjisi elde edilmektedir (Aslantaş, 2018).

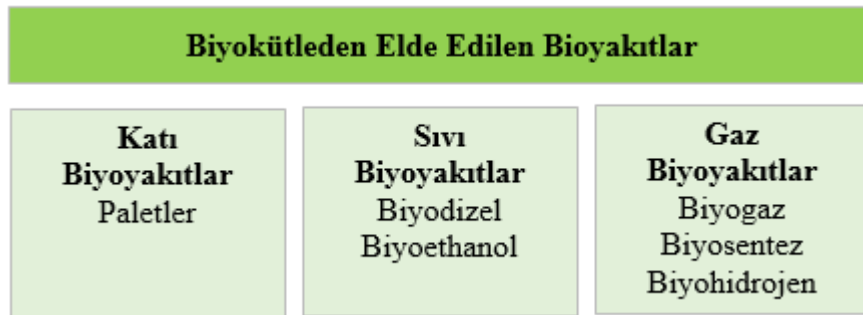
Kentsel atıklar ise, sanayi atıkları, evsel atıklar ve kanalizasyon çamurlarından oluşan geniş bir yelpazeye sahiptir. Kentsel atıkların teknolojiler kullanılarak katı, sıvı ve gaz formunda biyoyakıtla dönüştürülmesi işlemidir. Avusturalya, Finlandiya gibi gelişmiş sanayiye sahip ülkelerde biyoyakıttan sağlanan enerji verimliliği %60-80 arasındadır. Gelişmekte olan ülkelere

ise klasik biyokütle enerjisinin kullanılmaktadır ve biyoyakıttan sağlanan enerji verimliliği ise %2-20 arasında değişmektedir (Aslantaş, 2018).



Şekil 3-2. Biyokütle kaynaklarında enerji üretiminde ana süreçler (Deloitte, 2014)

Tarımsal alan atıkları tarımsal biyokütle, endüstriyel ve kentsel çöp atıkları kentsel biyokütle olarak adlandırılmaktadır. Biyokütle çevrimi, termokimyasal ve biyokimyasal olarak iki farklı uygulama ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.2 da her iki çevrimin uygulama yöntemleri gösterilmiştir. İlk çağlardan itibaren katı yakıt olarak kullanılan biyokütle enerjisi günümüzde gaz ve sıvı yakıt olarak ta kullanılmaktadır. Biyokütlenin fiziksel özelliklerine göre elde edilen yakıtlar Şekil 3.3 de gösterilmiştir. Orman katı atıkları paletleme yapılarak ısı enerjisi olarak kullanılmaktadır.










Şekil 3-3. Biyokütlenin farklı yakıt formları (Deloitte, 2014)

Bitkisel yağlar, evsel atıklar, hayvansal yağlardan biyodizel elde edilmektedir. Biyodizel petrol kökenli dizelle karıştırılarak ulaşım araçlarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Yaş biyokütle mikrobiyolojik bakteriler ile parçalanması sonucu oksijensiz alanda biyokimyasal fermantasyon

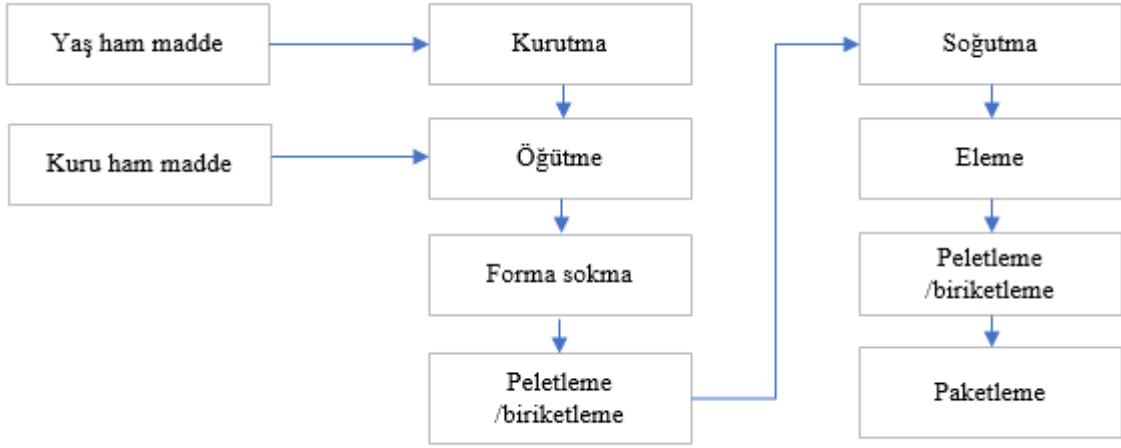
oluşur ve biyogaz enerjisi elde edilir. Biyogaz, gaz motorunda kullanılmasıyla ısı ve elektrik enerjisi elde edilir (Baş,2018).

İçerisinde çok fazla şeker bulunan biyokütlenin oksijensiz ortamda fermantasyonu sonucu biyoetanol olarak adlandırılan etil alkol üretilmektedir. Biyoetanol benzinle karıştırılarak benzinin oktan miktarı artırılarak emisyon miktarı azaltılmaktadır. Biyoetanol sağlık ve gıda alanında da kullanılmaktadır (Baş,2018). Biyokütle kaynaklarından elde edilen yakıtlar Tablo 3.1' te bulunmaktadır.

Tablo 3-1: Biyokütle kaynaklarında kullanılan çevrim yöntemleri, elde edilen yakıt türleri ve uygulama alanları (Baş,2018)

Biyokütle	Çevrim Yöntemi	Yakıt	Uygulama Alanı
Orman Atıkları 	Havasız Çürütme	Biyogaz	Elektrik Üretimi
Tarım Atıkları 	Piroliz	Etanol	Isınma
Enerji Bitkileri 	Doğrudan Yakma	Hidrojen	Su Isıtma
Hayvansal Atıklar 	Fermantasyon	Metan	Otomobiller
Organik Çöpler 	Gazlaştırma	Metanol	Uçaklar
Algler 	Hidroliz	Sentetik Yağ	Roketler
Enerji Ormanları 	Biyofotoliz	Dizel	Ürün Kurutma

Biyokütle termo ve biyo kimyasal dönüşümlere ön hazırlık olarak fiziksel olarak kurutma, öğütme, peletleme ve biriketeleme ön işlemlerine tabi tutulabilir. Fiziksel prosesler akış şeması Şekil 3.4' de gösterilmektedir.



Şekil 3-4. Fiziksel prosesler akış şeması (Küsek, 2015)

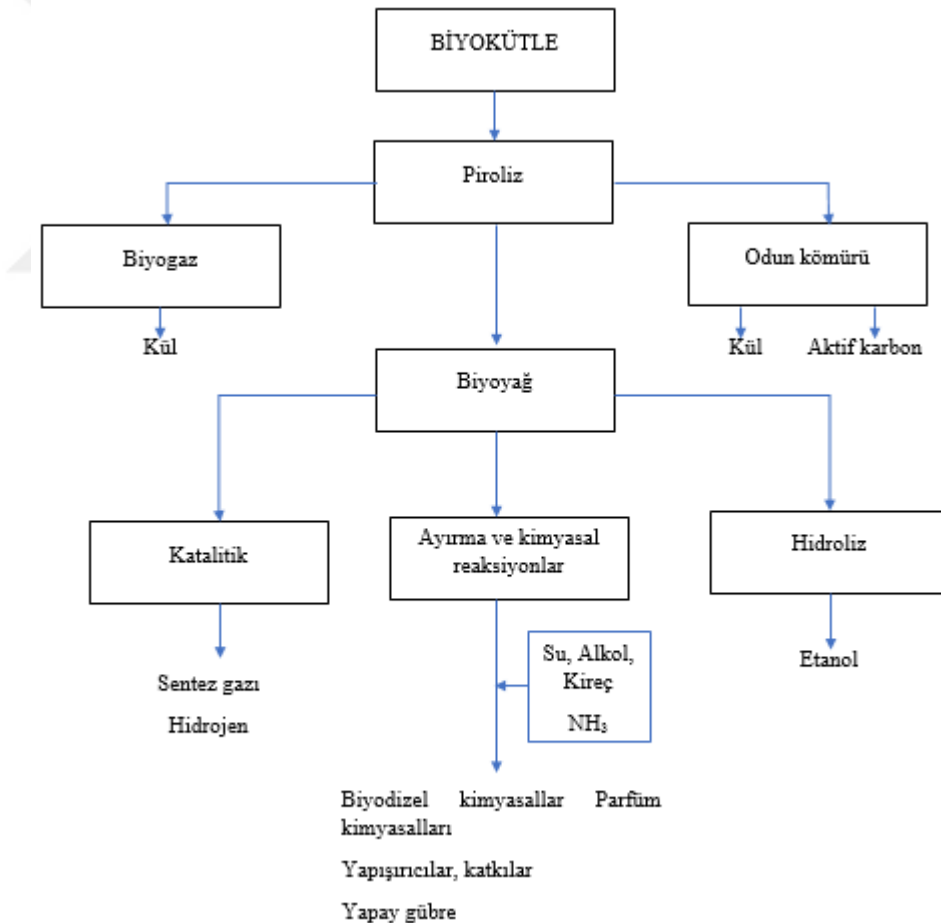
Biyokütlenin çürümeden ve enerji değerini kaybetmeden uzun süre depolanması için yapılan işlemdir. Kurutma işlemi güneş ışınları ile açık havada veya endüstriyel fırınlar gibi modern teknolojilerle yapılmaktadır. Biyokütlenin içerisinde bulunan nemi alarak, birim hacimdeki enerji yoğunluğu artırılır. Kurutma sırasında biriketeleme işlemi ile hacmi küçültülerek enerji yoğunluğu artırılır (Ayan 2022).

Kuru biyokütlenin uygulama prosesi için gerekli olan boyutlara getirilmesi işlemidir. Öğütme işlemi bıçaklar ve bilyeleme gibi yöntemler kullanılmaktadır (Ayan 2022).

Peletleme orman biyokütlelerinin nem miktarının alınarak küçük parçalara ayrılmasından sonra yüksek basınç altında preslenmesi ile boyutlandırma işlemidir. Boyutlar 6-10 mm arasında yapılmaktadır. Biriketeleme işlemi ise peletlemeye benzerdir. Biriketelemenin farkı sadece biyokütlenin 5-20 cm arasında boyutlandırma işleminin yapılmasıdır. Farklı boyutlara sahip biyokütlenin peletleme ve biriketeleme ile proses için istenilen boyutlara getirilir. Ayrıca peletleme ve biriketeleme ile enerji verimleri de artmaktadır (Ayan 2022).

3.1.2 Piroliz

Biyokütlenin organik bileşenlerinin oksijensiz bir ortamda ısıl bozulmaya maruz kalma işlemidir. Isıl bozulma sonucunda biyokütle içerisindeki verimli olan katı, sıvı ürünlerin elde edilmesi sağlanır. Biyokütlenin türü, bileşimi, reaksiyon sıcaklığı, basıncı, katalizör çeşidi elde edilecek olan ürünlerin miktarını ve özelliklerini değiştirmektedir. Yavaş ve hızlı olmak üzere iki piroliz yöntemi vardır. Yavaş piroliz uzun sürede gerçekleşir ve daha çok odun kömürü elde edilmesi için yapılır. Hızlı piroliz ise yüksek sıcaklıkta biyokütlenin oksijensiz ortamda ısıtılarak bozulması sağlanır ve çeşitli gazlar elde edilir. Bu gazların yoğunlaştırılmasıyla piroliz sıvısı, piroliz yağı, biyo yağ, biyo petrol, biyo yakıt gibi adlandırılan sıvı yakıt elde edilir. Bu yakıt benzin, dizel yakıtı veya çeşitli kimyasalların elde edilmesi için kullanılmaktadır (Çağal 2009). Piroliz işlemi akış diyagramı Şekil 3.6' de gösterilmiştir.

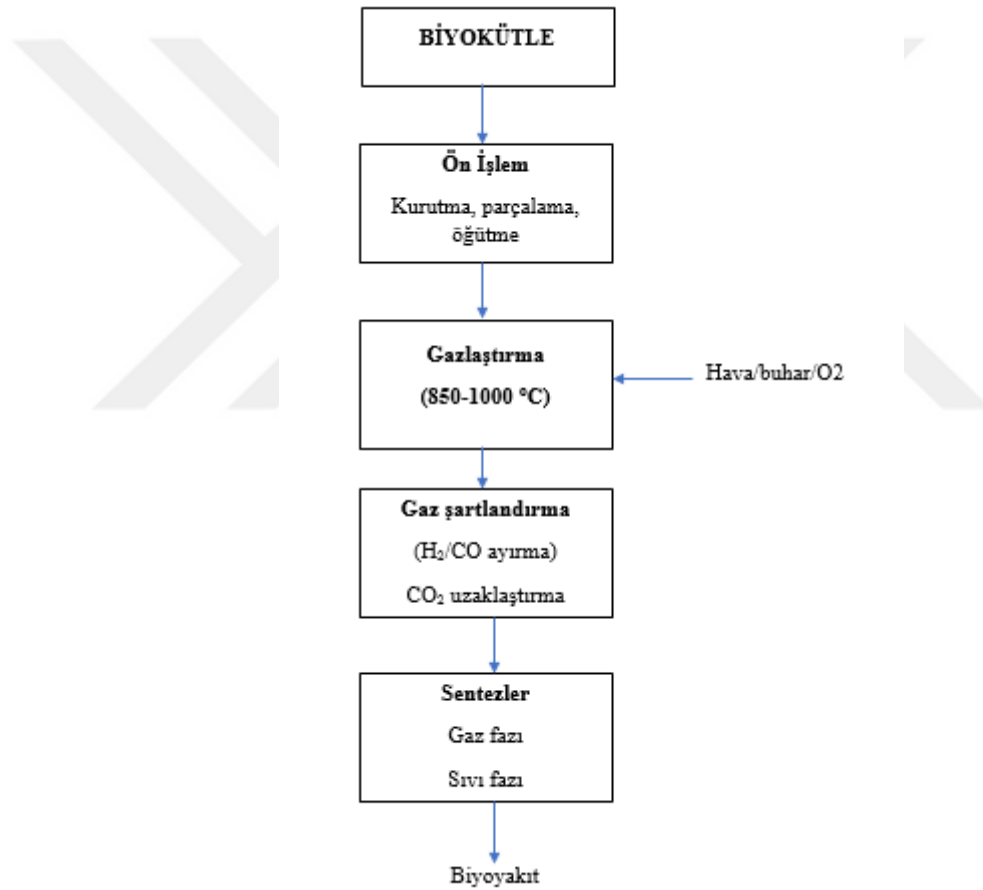


Şekil 3-6. Piroliz sistemi akış diyagramı (http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/3_35.html)

3.1.3 Gazlaştırma

Biyokütleyi karbonmonoksit, hidrojen ve metandan oluşan yanabilir gaz karışımına dönüştürme işlemidir. Düşük ve orta seviyeli enerji yakıt gazları ve çeşitli kimyasal ürünler elde etmek için yapılır. Biyokütle içerisinde uçucu madde içermektedir. Orta sıcaklıkla biyokütlelerin birçoğu yüksek oranda uçucu madde içermektedir. Bu organik uçucular orta sıcaklıkta gaz haline gelir. Gazlaştırma sistemi akış şeması Şekil 3.7' de gösterilmiştir.

Gazlaştırma işlemi katı yakıtın oksidanlar ile temas edebileceği yakıt yatağı olarak tasarlanmış bir reaktörde gerçekleştirilmektedir (Çağal 2009).



Şekil 3-7. Gazlaştırma işlemi akış diyagramı

İki tip gazlaştırma vardır.

Isıl gazlaştırıcılar; ocaklarda ve kazanlarda yakıtın alevli yanması

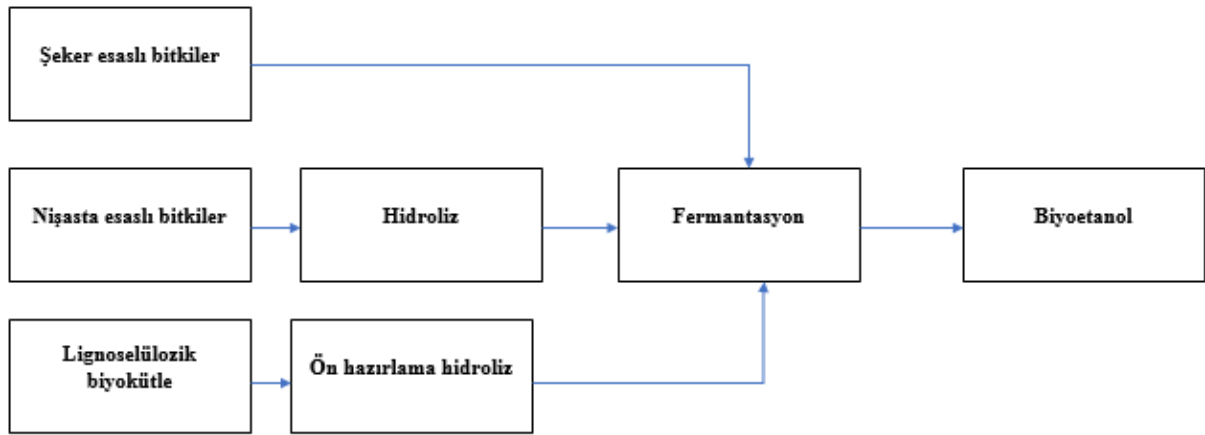
Güç kaynağı gazlaştırıcılar; içten yanmalı motorlarda milin mekanik gücünü sağlamak için kullanılır.

Gazlaştırma reaktörleri sabit, akışkan ve entegre yatak özellikli olmak üzere 3 tiptir. Akışkan ve entegre yataklı gazlaştırıcılar güçlü ve işlevseldir fakat proje kurulum maliyetlerin yüksek olmasından dolayı düşük ölçekli projelerde önerilmez. Sabit yataklı gazlaştırıcılar yatırım ve bakım masrafları daha uygundur ve gelişmekte olan ülkelerde daha çok kullanılmaktadır. Gaz ve buhar sistemleri birleşik çalışan gazlaştırıcılarda verim %50' nin üzerindedir (Çağal 2009).

3.2 BİYOKİMYASAL DÖNÜŞÜM PROSESLERİ

3.2.1 Fermantasyon

Biyokütle içerisindeki mikroorganizmaların çürümeye benzer bir proseste gerçekleşmesi işlemidir. Elde edilen ürünler alkol ve organik asitlerdir. Odunsu biyokütle içerisinde selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi karbonhidratlar bulunmaktadır. Selülozik biyokütle glikozdan oluşmuş bir polimerdir. Bu maddelerin hidroliz edilmesi sonucu basit şekerler elde edilir. Bu basit şekerlerin fermente edilmesiyle etanol üretilir. Fermantasyon işlemi akış diyagramı Şekil 3.8' de bulunmaktadır (Çağal 2009).

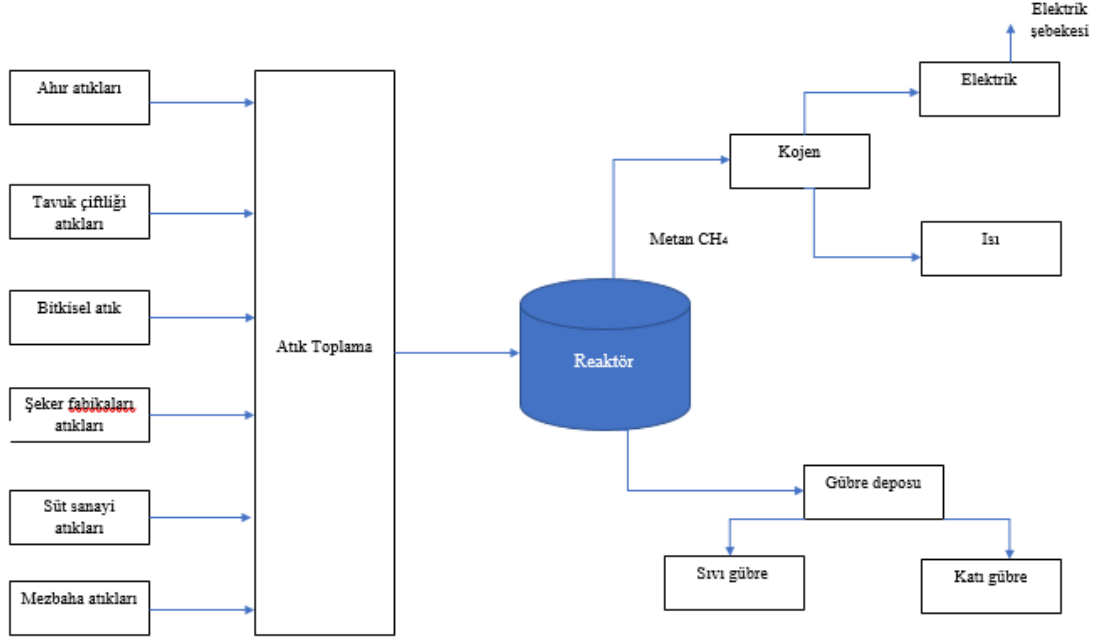


Şekil 3-8. Fermantasyon işlemi akış diyagramı

Biyokütlelerin çeşidine göre selüloz, hemiselüloz ve lignin miktarı farklıdır. Basit şeker içeriği yüksek olan hemiselüloz ve lignin gibi biyokütleden etanol üretim verimi yüksektir (Çağal 2009).

3.2.2 Anaerobik Bozunma

Biyokütleden metan gazı elde edilme prosesidir. Anaerobik bozunma metan, karbondioksit ve az miktarda hidrojen sülfür ve oksijenden gibi diğer gazlar ortaya çıkmaktadır. Anaerobik bozunma hayvan gübresi ve insan atıklardan biyogaz elde edilir. Doğal gazın alternatif bir yakıtıdır (Çağal 2009).



Şekil 3-9. Anaerobik bozunma işlemi akış diyagramı

Gelişmiş ülkelerde, küçük ve orta ölçekli çiftliklerde hayvan dışkılarından anaerobik bozunma ile biyogaz elde edilmektedir. Elde edilen biyogaz ile küçük ölçekli ısıtma veya elektrik üretmek için kullanılır. Hayvan gübresi bulunma potansiyeli yüksek olan ülkelerde büyük kapasiteli kojenerasyon sistemi ile elektrik üretimi yapılarak şebekeye verilmektedir (Çağal 2009). Biyogaz üretim işlemi akış diyagramı Şekil 3.9' de gösterilmiştir.

Biyogaz renksiz ve kokusuzdur. Kimyasal içeriği % 40-70 metan,%30-60 karbondioksit, %0-3 oranında hidrojen sülfür ve az miktarda azottan oluşur. Biyogaz elde edildiğine atmosfere salınan karbondioksit miktarı bitkilerin atmosfere saldığı karbondioksit miktarı kadardır (Karan, 2014).

Biyogazın ısıl değeri 4.700-6.000 kcal/m³ değerleri arasındadır. Biyogazın sağladığı enerji miktarı karşılaştırılması aşağıdaki Tablo 3.2' de verilmiştir (Karan, 2014).

Tablo 3-2: Yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması (Karan, 2014).

Yakıt Türü	Birimi	Enerji Değeri (MJ)	Yanma Verimi (%)	Kullanılabilir Enerji (MJ)	Biyogaz Enerji Eşdeğeri
Biyogaz	m ³	20	60	11,8	1 m ³
Elektrik	kWh	3,6	70	2,5	4,7 kWh
Gazyağı	lt	38	50	19	0,62 lt
Bütan	lt	46	60	27,3	0,43 lt
Odun Kömürü	kg	29	28	8,1	1,49 kg

4. HİDROJEN ENERJİSİ

Dünyada enerji gereksiniminin büyük bir bölümü fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı sonucu çevre kirliliğine neden olduğu bilinmektedir. İleriki zamanlarda fosil yakıtlarında tükeneceği söz konusudur. Hidrojen, fosil yakıtların yerini alabilecek bir enerji taşıyıcısıdır. Bu sebeple birçok ülke tarafından hidrojen enerjisi ve teknolojileri alanında çalışmalar yapılmaktadır. Hidrojen diğer yakıtlara göre en çok enerji veren yakıt türüdür (Çevik, 2017). Hidrojen son kullanımda yakıt veya elektrik olarak kullanılmaktadır (Şenaktaş, 2005).

Yanıcılığı diğer yakıtlara göre daha yüksektir. İleriki yıllarda petrolün alternatifi bir yakıt olarak kullanılması tahmin edilmektedir (Özarslan, 2021).

Hidrojen doğada bileşik halinde geniş bir alanda bulunur. Su %11,2' si, insan vücudunun %10' nu hidrojenden oluşmaktadır. Kömür, ham petrol, kil, mineraller, nebati ve hayvansal maddelerde hidrojen bulunmaktadır (Şenaktaş, 2005).

Hidrojen 16. Yüzyılda Paracelsus tarafından keşfedilmiştir ve Van Helmot hidrojen gazının havanın özel bir türü olarak tanımlamıştır. 1671 yılında Robert Boyle demir tozu ile seyreltik asit arasında reaksiyonu tanımlarken reaksiyon sonunda hidrojen gazını elde etmiştir. 1766 yılında Henry Cavandish hidrojenin tanımlamasını yapmış ve hidrojenin asitlerden daha çok metallere elde edilebileceğini savunmuştur. Ayrıca suyun hidrojen ve oksijenden meydana geldiğini tanımlamıştır. 1783 yılında A. L. Lavoisier bu gaza hidrojen adını vermiştir. 1839 yılında William Rober Grove genellikle hidrojenden elektrik enerjisi üretebilmek için yakıt pilini keşfetmiştir. Bu keşif sonrasında hidrojen gazının önemi daha fazla artmaya ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak düşünceler oluşmaya başlamıştır. 1800-1900 yılları arasında kömürden elde edilen şehir gazı üretilmiştir. Şehir gazının %50' si hidrojen, % 3-6 karbondioksit ve bir miktar metan gazından oluşmuştur. Daha sonra doğalgazın keşfedilmesiyle ve şehir gazının yerine kullanılmaya başlanmıştır. Carl Bosh tarafından hidrojen ve nitrojen gazları ile gübre üretim çalışmaları yapılmıştır. 1970 yıllarından itibaren hidrojen gazının enerji taşıyıcısı olarak düşünülmüştür. 1974 yılında T. Nevzat Veziroğlu' nun başkanlığın da Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı hidrojen enerjisinin kullanımı için bir başlangıç olmuştur ve Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği kurulması kararlaştırılmıştır. Böylece hidrojen enerjisi, hidrojen ekonomisi ve hidrojen enerji sistemi kavramları oluşmuştur (Şenaktaş, 2005).

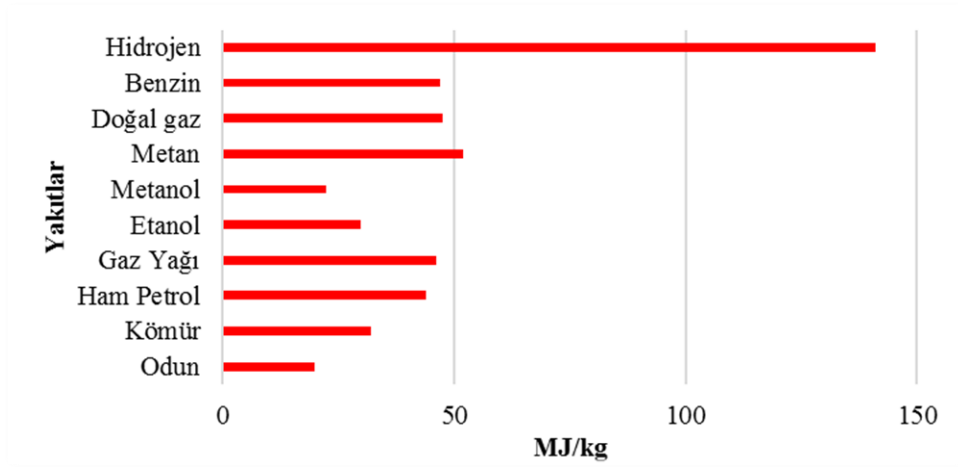
Tablo 4-1. Hidrojen gazının özellikleri (Şenaktaş, 2005).

Formül	H₂
C/H Oranı	0
Mol Ağırlığı	2,02
Özgül Kütle	
Sıvı:(kg/lt)	0,07
Gaz : (kg/lt)	0,84.10 ⁻⁴
Isıl değer	
Alt (MJ/kg)	119,93
Üst (MJ/kg)	141,86
Stokiyometrik Karışım İçin	
Hava/Yakıt (kütlese) (kj/l)	34,32
Hava/Yakıt (hacimsel) (kj/l)	2,38
Buharlaşma Isısı	0,447
Tutuşma Sınırı	
Hacim %' si	4,1-74
Laminer Alev Hızı (m/s)	2,91
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C)	2110
Difüzyon Katsayısı (m ² /s)	0,61
Kaynama Noktası (°C)	-252,35
Donma Noktası (°C)	-259
Kendi Kendine Tutuşma (°C)	574-591

Hidrojen en hafif elementtir. Hidrojen gazının kimyasal özellikleri Tablo 4.1 'de verilmiştir. Hidrojen karalı bir moleküldür. Farklı elementlerle bileşik oluşturabilir. Reaktif özelliğinden dolayı petrol arıtımı, amonyak sentezi, gıda ve metal sanayisi gibi alanlarda kullanılır. Enerji sektörü için ayrı bir öneme sahiptir (Karaismailoğlu, 2019).

Şekil 4.1 da hidrojenin diğer yakıtlarına göre birim kütle enerjisi bakımından daha üstün olduğu görülmektedir. Sıvı hidrojenin birim kütlelerinin ısı değeri petrolden 3,2 kat daha fazladır, birim hacminin ısı değeri petrolün %28' i kadardır. Hidrojenin birim kütlelerinin ısı değeri doğalgaz gazın 2,8 katı, birim hacminin ısı değeri ise doğalgazın %32,5 kadardır. Hidrojen yakıtı

ile çalışan motorlar diğer yakıtlarla çalışan motorlara göre sorunsuz çalışmaktadır (Şenaktaş, 2005).



Şekil 4-1. Yakıtların enerji içeriği MJ/kg (Çevik, 2017)

Hidrojen yakıtlı motorlar benzinli motorlara göre yüksek verimli, atık ürünün su olması en önemli üstün özelliklerindedir. Çevre dostudur. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması yerine yakıt pili elektrik üreterek elektrik motorları ile çalışan taşıtlarda da kullanılması mümkündür (Şenaktaş, 2005).

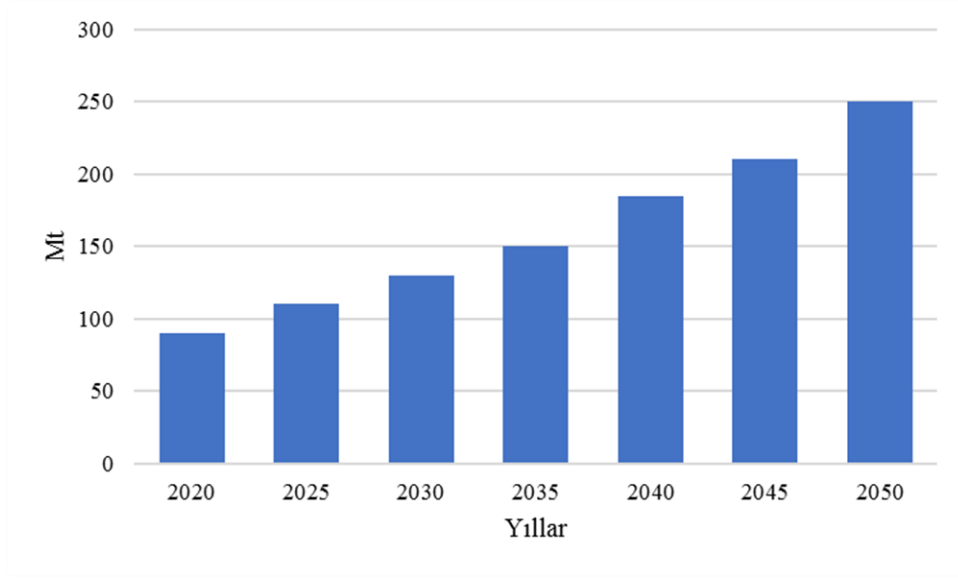
Bunlara ilaveten iklimlendirme, pişirme gibi evsel uygulamalar, endüstri, uzay teknolojilerinde ulaşım araçlarında kullanılmaktadır (Özarslan, 2021).

Hidrojen gazı sıvı halde tanklarda ve fiziksel olarak nanotüplerde veya hidrür şeklinde kimyasal olarak depolanabilir. Hidrür depolama yöntemi katı halde metallerde ve alanatlarda veya sodyum bor bileşiğinde sıvı halde olmaktadır. Birim hacim depolanabilecek hidrojen açısından hidrür gaz ve sıvı depolamalardan daha iyi olduğu görülmektedir (Şenaktaş, 2005).

4.1 DÜNYADA VE TÜRKİYE' DE HİDROJEN ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ

Hidrojen, fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji, biyokütle gibi enerjilerin kullanılmasıyla üretilebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojen enerjisi çevreye dostu bir ürün olmuş olur (Kılınç, 2008)

Günümüzde hidrojen, %59 doğalgaz, %21 petrol, %19 kömür ve %1' lik kısmı suyun elektrolizi ile elde edilmiştir (IEA,2021). Dünyada 2020 yılına 90 Mt hidrojen üretimi gerçekleşmiştir. 2050 yılına kadar tahmin edilen yıllık hidrojen üretim miktarı Şekil 4.2' de gösterilmiştir (IEA,2021).



Şekil 4-2. Tahmin edilen hidrojen üretimi (IEA,2021)

Türkiye’ de hidrojen araştırma ve geliştirme çalışmaları 2010 yılında UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) öncülüğünde başlamıştır. Bozcaada Hidrojen Adası Projesi gerçekleştirilerek, kaymakamlık ve sağlık ocağı binalarının enerji ihtiyacı yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojen enerjisi ile karşılanması planlanmıştır. Fakat projenin sürekliliği olmamıştır. Hidrojen enerjisi resmi belgelerle ilk olarak 2007 yılında ”Enerji Verimliliği Kanununda” hidrojen, biyoyakıt ile birlikte kullanımı özendirilmesi gereken alternatif bir yakıt olarak belirlenmiştir. Ayrıca 2011 yılında hidrojen yakıtlı araçlarla ilgili yönetmelik çıkarılmıştır. Söz konusu yönetmelikte hidrojen yakıtıyla çalışan araçların tip ve onayına yönelik düzenleme yapılmıştır ve bu araçların bir süre sonra gündemde olacağı beklentisiyle bir ön hazırlık gerçekleştirilmiştir (TSKB, 2021).

2020 yılına kadar hidrojen, enerji politikalarında konu olmuş fakat teknolojik anlamda bir gelişme yaşanmamıştır. 2020 yılında Hidrojen Arama Konferansı düzenlenmiştir. Bu kapsamda yenilenebilir enerjiyi sisteme dahil etmek, yerli kömürden hidrojen üretiminin gerçekleştirmek, hidrojen depolama ve tutucusu olarak borun kullanımını arttırması konularına değinilmiştir. Ayrıca hidrojenin %2-6 oranında doğalgaz ile karıştırılarak dağıtım hattına verilmesi hedeflerinden bahsedilmiştir (TSKB, 2021).

GAZBİR öncülüğünde 2021 yılında Konya’ da kurulan bir laboratuvarında %80 doğalgaz, %20 hidrojen karışımı ile test amaçlı kullanımı gerçekleştirilmiştir. Doğalgaz hatlarında ve kullanım ekipmanlarında herhangi bir değişiklik yapılmadan %20 hidrojen karıştırılarak kullanılabilirliği test edilmiştir (TSKB, 2021).

2023 yılında ETKB ülkemizde Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası çalışması yayınlanmıştır. Raporda hidrojen üretimi, depolanması, kullanım teknolojilerinin geliştirilmesi için atılması gereken planlar ve hedefler ele alınmıştır. Hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile temiz hidrojen elde edilmesi sağlanacaktır. Yerli ve milli teknolojilerin kullanılarak yeşil hidrojen üretiminin sağlanması ve üretilen ihtiyaç fazlası hidrojenin ihraç edilerek ülkemize döviz girdisinin oluşması hedeflenmektedir.

Tablo 4-2. 2023 yılında bazı ülkelerin hidrojen birim fiyatları (<https://about.bnef.com>, 2024)

Ülkeler	Yeşil hidrojen		Mavi	Gri
	Minimum	Maksimum	Hidrojen	Hidrojen
	\$/kg	\$/kg	\$/kg	\$/kg
Japonya	8,3	8,7	3,5	2,65
Birleşik Arap Emirlikleri	7,5	8,1	2,3	1,15
Türkiye	7,6	8,2	4,3	2,65
Birleşik Krallık	4,8	5,3	3,2	2,3
Almanya	4,8	5,3	3,2	2,3
Hindistan	5	6	3,9	2,35
Amerika	4,8	5,3	2,5	1,65
Kanada	4,8	5,3	2,4	1,5
Fransa	4,3	4,8	3,1	2,2
Çin	2,7	5,5	3	2,4
İspanya	4,2	4,7	3,1	2,15
Brezilya	4,3	4,8	3,1	2,35

Bazı ülkelerin hidrojen birim fiyatları Tablo 4.2' de bulunmaktadır. Ülkemizde yeşil hidrojen üretim birim fiyatı 8,3-8,7 \$/kg arasındadır. Mavi hidrojen 4,3 €/kg, gri hidrojen 2,65 \$/kg civarındadır. Dünya ortalamasına göre, ülkemizde hidrojen birim fiyatlarının yüksek olduğu görülmektedir. Yeşil hidrojen üretiminin 2035 yılında 2,4 \$/kg, 2053 yılında 1,2 \$/kg seviyelerine düşmesi hedeflenmektedir.

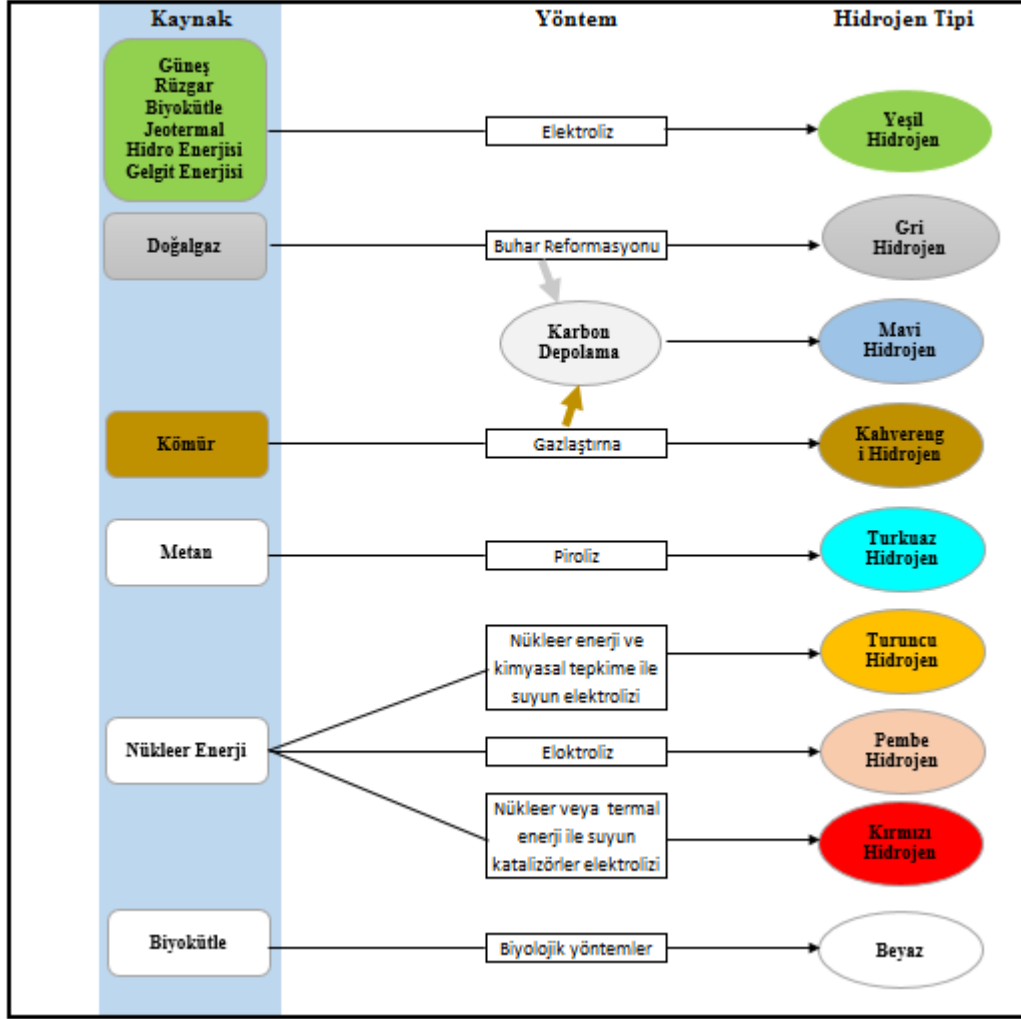
Ülkemizde hidrojen üretim yöntemleri için gerekli olan ham madde yönünden oldukça zengindir. Ayrıca hidrojenin depolamasında kullanılan bor madeni kaynaklarına fazlasıyla sahiptir (Kükrer, 2007). Türkiye' de hidrojen kullanımı ile ilgili yol haritası Hidrojen derneği tarafından çalışma yapılmıştır ve Tablo 4.3 de gösterilmektedir.

Tablo 4-3. Türkiye de hidrojen teknolojilerinde izlenecek yol haritaları (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021)

2020-2025	2025-2030	2030-2040	2040-2050
Doğalgaz ekleme	Büyük kapasite uygulamaları	Sektör çeşitlendirilmesi	Sektör arasında hidrojen
Politikalar geliştirme	Dođalgaza eklenerek	Ekonomik olarak yenilenebilir	kullanımının genişletilmesi
Sektörün gelişimi çalışmaları	kullanma	enerji kaynaklarına	Üretim performansının
Prototip ve pilot uygulamaların gerçekleştirilmesi	Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretimi	bağlı sektörlerin oluşumu ve maliyet ekonomisinin	iyileştirilerek üretim maliyetlerin düşürülmesi
Ar-Ge ve inovasyon çalışmaları	Artan hidrojen talebinin yeni teknolojilerle desteklenmesi	şekillenmesi Hidrojen boru hattının geliştirilmesi Hidrojen üretim ölçeklerinin büyütülmesi	Farklı araç modellerinin geliştirilmesi Ticarileşme ve olgun teknolojiye geçilmesi

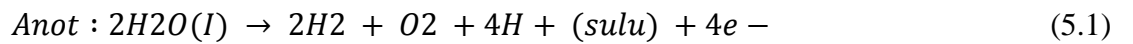
5. HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

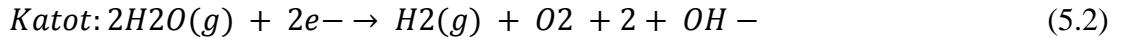
Hidrojen üretim yöntemlerine göre renklendirilerek sınıflandırılmaktadır. Hidrojen üretim yöntemleri, hidrojen içeren kaynaklar ve bunların üretim yöntemlerine göre sınıflandırılması Şekil 5.1 de gösterilmiştir.



Şekil 5-1: Hidrojenin kaynaklara göre üretimi ve sınıflandırılması (<https://utahcleancities.org/>, 2021)

Yeşil hidrojen, güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal, hidroelektrik ve gelgit enerjisi vasıtasıyla üretilen elektrik enerjisi ile suyun elektrolizi sonucu elde edilen hidrojendir. Elektrolit eklenmiş suyun içerisine elektrik akımı geçirilir. Katot tarafından hidrojen gazı, anot tarafında ise oksijen gazı toplanır. Elektroliz denklemi aşağıda gösterilmiştir.





Genel reaksiyon;



En yaygın olarak kullanılan alkali elektrolizör üniteleridir. Küçük ölçekli hidrojen üretiminde proton değişim elektrolizörleri daha çok kullanılmaktadır. Alkali, PEM, SOE ve Kloralkali olarak birçok elektroliz yöntemi vardır. Alkali elektroliz %80 verimliliktedir. Kloralkali işlemi, cıva hücreleri, diyafram hücreli ve membran hücreli olarak üç farklı yöntemden biri kullanılarak hidrojen üretimi sağlanabilir. Alkali ve PEM elektrolizörü 80 °C de SOE' e ise 700-1000 °C de çalışır. Elektrolizörler dalgalı voltaj ile elektrik üreten rüzgar türbinleri ile çalışmaya uygundur. Tablo 5.1 de bazı elektrolizlerin karşılaştırılması yapılmıştır (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021).

Tablo 5-1: Alkali, polimer membran (PEM) ve katı oksit elektrolizin (SOE) tipik özellikleri (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021).

Özellikler	Alkali	PEM	SOE
Hücre Sıcaklığı, °C	60-80	50-80	900-1000
Hücre Basıncı, bar	<30	<30	<30
Akım Yoğunluğu, A/cm ²	0,2-0,4	0,6-2,0	0,3-1,3
Hücre Voltajı, V	1,8-2,4	1,8-2,2	0,95-1,3
Güç Yoğunluğu, W/cm ²	1,0'e kadar	4,4' e kadar	-
Spesifik Sistem Enerji Tüketimi, kWh/Nm ³	4,5-7,0	4,5-7,5	2,5-3,5
Hidrojen Üretimi, Nm ³	<760	<300	-
Sistem Ömrü, yıl	20-30	10--20	-
Hidrojen Saflığı, %	>99,8	>99,99	-

Gri hidrojen doğalgazın buharla reformasyonu ile elde edilen hidrojendir. Buhar reformasyonu ekzotermik reaksiyondur. Amonyak ve hidrojen üretiminin ilk aşamasıdır. Su gaz karışımıyla zehirli gazların temizlenmesi işlemidir. 200-250 C sıcaklıklarda bakır esaslı katalizör kullanılır. 320-450 C sıcaklıkta demir esaslı katalizörler kullanılır. Doğalgazın buharla reformasyonu sonucu oluşan sıcak gazların soğutulması ile elde edilen ısıyla proste bulunan suyun buharlaşmasında kullanılır. CO ile su tepkimeye girer ve CO₂ ve H₂ oluşur. Üretilen hidrojenin yarısı sudan diğer yarısı ise hidrokarbonlardan elde edilir (Özdemir, Mutlubaş, 2019).

Kömürün gazlaştırılması yöntemiyle elde edilen hidrojen kahverengi hidrojen olarak adlandırılmaktadır. Kömür gazlaştırma prosesi iki aşamalıdır. Birinci aşama piroliz, ikinci aşama kömür gazlaştırmadır. Piroliz 300-500° C sıcaklıklarda düşük molekül ağırlığına sahip bileşikler ele alınır. Temelde yoğunlaşamayan gazlar veya katrandır. Normal şartlar altında piroliz kalıntısı kömürün %55-70 oranını içerir. Sabit yataklı, akışkan yataklı, hareketli yataklı olarak üç farklı gazlaştırma yöntemleri vardır.

Sabit yataklı gazlaştırma: kömür sisteme üsten verilir ve aşağıda doğru inmesiyle reaksiyon başlar. Kurutma, ısıl bozulma ve gazlaşma aşamaları oluşur. Alt kısımda biriken karbon içerikli bileşikler ve kok, reaktör kısmında su buharı ile verilen oksijenle yakılır. Bu metotla şişmeyen veya daha az şişen linyit, turba ve artansit kokları 10-50 mm büyüklüğe getirilerek gazlaştırılır.

Akışan yataklı gazlaştırma: Kömür yada kok tanecikleri tamamen karışarak 800-900° C sıcaklıkta gazlaştırma odasında oluşur. Katı parçalar 30 dk, gazlar ise 1 dk bekletilir. Şişme yapan büyük tanecikli kömürler bu yöntemle gazlaşır. Reaksiyon 5.4 da gösterilmiştir.



Hareketli yataklı gazlaştırma: 1mm kadar çok ince öğütülmüş kömür, oksijen, su buharı ile karıştırılmış halde reaktöre gönderilir 1300 °C derece gerçekleştiği için her türlü kömür ve kok gazlaştırılmasında kullanılır.

Doğalgazın buharla reformasyonu ve kömürün gazlaştırılması sonucu elde edilen karbonun ayrılması ile mavi hidrojen elde edilir.

Turkuaz hidrojen, metan gazından piroliz yöntemiyle elde edilen hidrojendir. Arge aşamasındadır. Pembe hidrojen, nükleer enerji yöntemiyle elde edilen elektrik ile, turuncu hidrojen nükleer enerji ve kimyasal tepkime ile suyun elektroliziyle, kırmızı hidrojen nükleer veya termal enerji ile katalizörle suyun elektrolizi ile elde edilen hidrojendir. Beyaz hidrojen, biyokütlenin biyolojik yöntemlerle elde edilen hidrojendir.

Tez çalışmamızda biyokütle enerjisinden hidrojen üretimi ve maliyet analizi yapılmıştır. Bu amaçlar biyokütleden hidrojen üretimi detaylı olarak incelenmiştir.

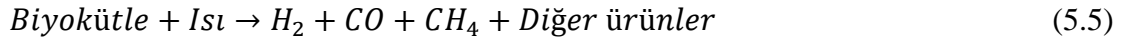
5.1 BİYOKÜTLE ENERJİSİNDEN HİDROJEN ÜRETİMİ

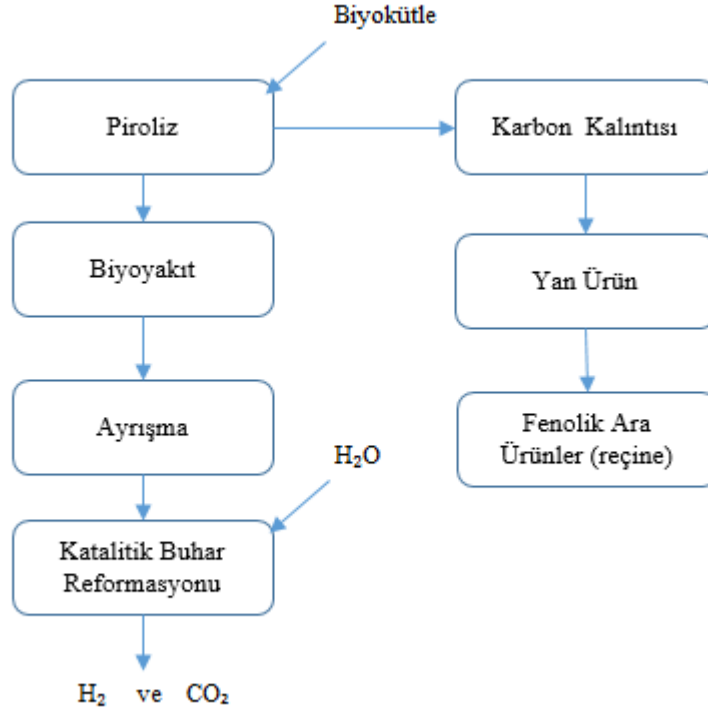
Biyokütle enerjisinden hidrojen üretimi termokimyasal ve biyolojik proseslerle yapılmaktadır. Termokimyasal prosesler süperkritik su, gazifikasyon, plazma ve proliz yöntemleridir. Biyolojik prosesler direk fotoliz, dolaylı fotoliz, foto fermantasyon, biyolojik yoldan suyun gaza dönüşümü ve karanlık fermantasyondur.

5.1.1 Termokimyasal Yöntemler

5.1.1.1 Piroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretimi

Piroliz işlemi, biyokütle, katı organik kömür gibi maddelerin sıvı yağ ve gaz içerikli bileşiklere dönüştürülmesi işlemidir. Piroliz işlemi oksijensiz ortamda 0,1-0,5 MPa basınçta ve 650-800 K sıcaklıkta gerçekleşir. Yavaş ve hızlı piroliz işlemi vardır. Organik ürünlerde yavaş piroliz tercih edilmez. Hızlı piroliz yüksek sıcaklıkta gerçekleşir ve ürünler katı, sıvı ve gaz olarak elde edilir. Katı ürünler, saf karbon materyallerdir. Asetik asit (CH₃COOH) ve aseton (C₃H₆O) gibi ürünler sıvı materyallerdir. Karbondioksit (CO₂), karbonmonoksit (CO), metan (CH₄), hidrojen (H₂) gibi ürünler gaz materyallerdir (Özdemir, Mutlubaş, 2019). Piroliz işlemi kimyasal denklemi 5.5 ve akış şeması Şekil 5.2' de gösterilmiştir.

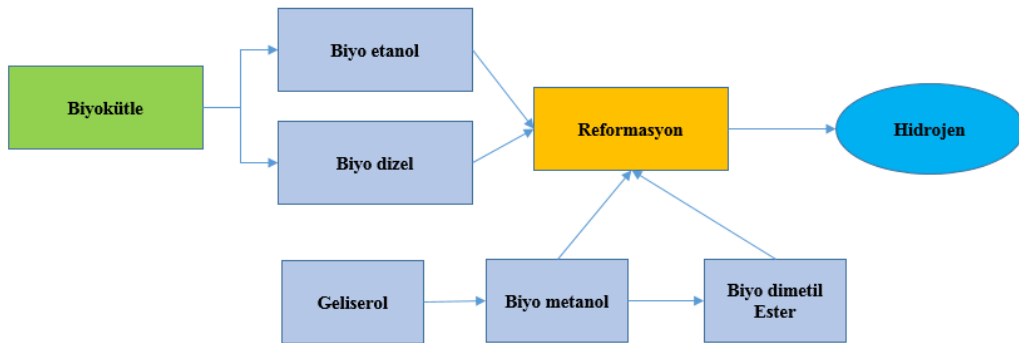




Şekil 5-2: Piroliz işlemi akış şeması (Özdemir, Mutlubas, 2019).

5.1.1.2 Gazifikasyon ile Hidrojen Üretimi

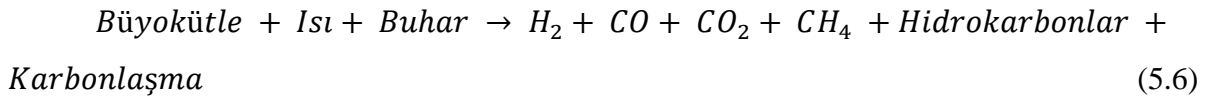
Yakıtlar hidrojen ve sentez gazına dönüştürülmesi işlemine gazlaştırma denir. Sentez gazına dönüştürüldüğünde bu proses reformu olarak adlandırılır. Birincil kaynak olarak fosil yakıt kullanımında tüm süreci yeşil yapmak için karbon tutulması işlemi uygulanabilir. (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021). Biyoyakıttan hidrojen elde edilmesi Şekil 5.3 da gösterilmiştir.



Şekil 5-3: Biyoyakıt reformasyonu ile hidrojen eldesi (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021).

Gazlaştırma adyabatik bir işlemdir. Gazlaştırma ortamının özelliğine göre gazlaştırıcının adyabatik sıcaklığı değişir. Yüksek sıcaklıkta hava ile yapılan gazlaştırma verimi buhar ile yapılan gazlaştırmadan daha yüksektir (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021).

Gazlaştırma işleminde oluşan katran ve kül, negatif etki yaratmaktadır. Katran oluşumunu düşürmek için, gazlaştırıcı tasarımı, çalışma ortamı uygunluğu, kontrol panelinin ayarlanması, katkı maddelerinin ve katalizör seçimi yöntemleri kullanılır. Gazlaştırmada negatif etki yaratan kül damıtma işlemi ile giderilir. Gazlaştırma prosesi, Denklem 5.6 da gösterilmiştir (Özdemir, Mutlubaş, 2019).



5.1.1.3 Süper Kritik Gazlaştırma

Gazlaştırma süreçlerinde suyun oluşması kimyasal reaksiyon için önemli bir parametredir (Özdemir, Mutlubaş, 2019). Su 374 °C' den ve 22 MPa basınçtan yüksek olduğu durumlarda süper kritik koşullara ulaşır. Kritik koşullar altındaki su, sıvı ve gaz fazından farklı özelliklere sahip olur. Süper kritik koşullarda su, sıvı ve gaz fazı arasındadır. Süper kritik koşullarda organik bileşikler tamamen çözülebilir (Karakuş 2013). Süper kritik gazlaştırma yöntemiyle ıslak biyokütleyi kurutmadan gazlaştırma işlemi yapılabilir.

5.1.1.4 Plazma Gazlaştırma

Gazlaştırma proseslerinde plazma torçlarının kullanılması, gazlaştırma teknolojisinde önemli bir gelişmedir. Gazlaştırma ürünlerinin kısmi yanması yerine, elektrikle çalışan kısmi bağımsız bir enerji kaynağı ile çalışır. Plazma gazlaştırmada proste yüksek sıcaklıkta ısı sağlanır. Yakıtın tamamen elementlerine ayrılır. Plazma gazlaştırmada gazın geçtiği noktada iki elektrot arasında yoğun elektrik arkı oluşur. Ark sıcaklığı 13000 °C sıcaklıklarına kadar ulaşabilir. Yakıt sıcaklığı ise 2700-4500 °C arasında olabilmektedir. Üretilen gaz gazlaştırıcıdan yüksek sıcaklıkla ayrılır. Plazmada yüksek sıcakta katran ürünleri çatlar ve dioksi, furan gibi zararlı ürünler yok olur (Martins, 2022).

Plazma gazlaştırma sistemi en gelişmiş teknolojiye sahiptir. Maliyetleri oldukça yüksektir. Plazma gazlaştırma ünitesinde hammadde sınırlaması yoktur. Bazı atıklarda klorun yüksek sıcaklıklarda reaktörü kaplaması nedeniyle reaktör ömrünü kısaltabilir. Sabit ve hareketli yataklı, sürüklemeli akışlı, plazma püskürtmeli akışkan yataklı reaktörler kullanılır (Martins, 2022).

Plazma sabit yataklı gazlaştırıcıda, gazlaştırma malzemesi sabitlenir ve plazma enjekte edilir. Üretilen gaz, gazlaştırıcının üst kısmından, kül ise gazlaştırıcının altından çıkarılabilir. Plazma hareketli yataklı gazlaştırıcıda malzeme beslemesi sürekli olarak yukarıdan aşağıya doğru gerçekleşir ve plazma akışa enjekte edilir. Plazma sürüklemeli yataklı reaktörde malzeme, plazma ortamı yoluyla verilir. Plazma püskürtmeli yataklı gazlaştırıcı, akışkanlaştırılmış yatak ve plazma püskürtmenin bir karışımıdır (Martins, 2022).

5.1.2 Biyolojik Yöntemler

Oksijensiz ortamda gerçekleşen doğal bir reaksiyon olan biyohidrojen; biyofotoliz, indirekt biyofotoliz, ışısız fermentasyon ve ışıklı fermentasyon olmak üzere dört farklı uygulamaları vardır. Uygulamaların karşılaştırılması Tablo5.2 de verilmiştir (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021).

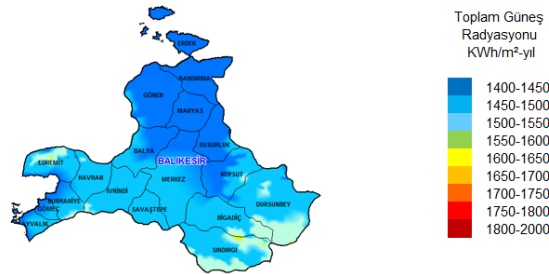
Tablo 5-2: Biyohidrojen üretim mekanizmaları, kullanılan mikroorganizmalar, katalizör enzimleri, avantaj ve dezavantajları (Dinçer, Eroğlu, Öztürk, 2021).

Yöntem	Organizma/Enzim	Avantaj	Dezavantaj
Biyofotoliz	Yeşil/Mavi-yeşil algler [FeFe] Hidrojenaz	Su ve güneş ışığında üretilir	O ₂ duyarlılığı reaktör tasarım zorlukları düşük H ₂ verimi
İndirekt Biyofotoliz	[NiFe] Hidrojenaz Nitrojenaz	Heterosist oluşumu H ₂ üretimini O ₂ üretiminden ayırır	Reaktör tasarım zorlukları
Fermantasyon	Anaerobik bakteriler Hidrojenaz	Yüksek H ₂ üretim hızı atıkların kullanılabilmesi, karışık mikroorganizma kültürleri kullanılabilir	Organik maddelerin tam olarak parçalanamaması sonucu düşük verim
Foto-Fermantasyon	Mor kültürsüz bakteriler Nitrojenaz	Küçük organik asitlerden veya organik asit atıklarından güneş enerjisi ile hidrojen üretilir	Biyoreaktör tasarım zorlukları, düşük hidrojen üretim hızı

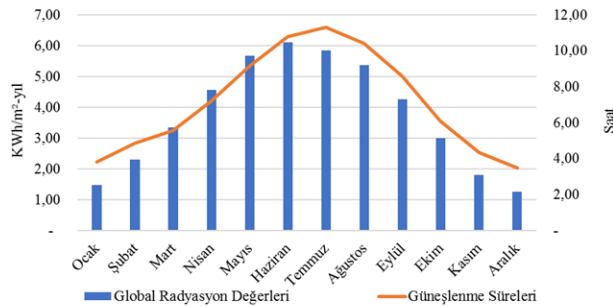
Tablo 6-1. Bandırma bölgesindeki RES kurulu güçleri(<https://www.enerjiatlası.com/ruzgar/>)

Santral Adı	Firma	Kurulu Güç (MW)
<u>Şah Rüzgar Santrali</u>	Galata Wind Enerji	105
<u>Bandırma Kurşunlu RES</u>	Borusan EnBW Enerji	87
<u>Edincik Rüzgar Santrali</u>	Edincik Enerji	77
<u>Bandırma RES</u>	Bilgin Enerji	50
<u>Bandırma 3 RES</u>	Bursa Temiz Enerji	42
<u>Ayyıldız RES</u>	Akenerji	28
<u>Kalfaköy RES</u>	Kırca Enerji Yatırım	10

Bandırma ilçesi toplam güneşlenme radyasyonu yılda $1400-1550 \text{ kWh/m}^2$ dir. Şekil 6.2’ de güneş potansiyeli haritası bulunmaktadır. Şekil 6.3’ te Bandırma ilçesinin aylık ortalama günlük güneş radyasyon değeri ve ortalama günlük güneşlenme süresi dağılımı yer almaktadır. (GEPA,2024)



Şekil 6-2. Bandırma bölgesi Güneş enerjisi potansiyeli (GEPA,2024)



Şekil 6-3. Bandırma bölgesi aylara göre global radyasyon değeri ve güneşlenme süresi (GEPA, 2024)

Bandırma bölgesinde toplam lisanslı 2,47 MW kurulu gücünde GES elektrik üretim santrali bulunmaktadır.

Tablo 6-2. Bandırma bölgesindeki GES kurulu güçleri (GEPA,2024)

Santral Adı	Firma	Kurulu Güç (MW)
Enerjisa Bandırma Güneş Enerji Santrali	Enerjisa	1,99
Mumcu Teneke Güneş Enerjisi Santrali	Mumcu Teneke	0,48

Bandırma bölgesinin ikliminin elverişli olmasından dolayı tarım ve hayvancılık gelişmiştir. Özellikle kanatlı kümes hayvanları üretiminde gelişmiştir. Tablo 6.3' te hayvansal veriler yer almaktadır.

Tablo 6-3. Bandırma hayvansal biyokütle değeri (BEPA,2024)

Hayvan/Bitki Adı	Hayvan Sayısı (adet)/ Bitkisel Üretim (ton)	Atık Miktarı (ton)	Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)
Büyük Baş Hayvan	16.727	145.506	319
Küçük Baş Hayvan	32.740	34.208	6,4
Kanatlı Kümes Hayvanı	8.138.861	313.331	19.039
Tarım Bitkileri	238.509	113.276	1.545

Bandırma belediyesine ait atıklar Tablo 6.4 te verilmiştir. Biyometanizasyona uygun 190 TEP/yıl ve yakmaya uygun belediye atıkları 825 TEP/yıl değerlerindedir.

Tablo 6-4. Bandırma belediye atıkları biyokütle değeri (BEPA,2024)

Biyometanizasyona Uygun Belediye Atıkları (ton/yıl)	Yakmaya Uygun Belediye Atıkları Miktarı (ton/yıl)	Biyometanizasyona Uygun Belediye Atıkları Eşdeğeri (TEP/yıl)	Yakmaya Uygun Belediye Atıkları Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)
29.410	35.946	190	825

Orman atıklarının toplam enerji karşılığı 38.203 TEP/yıl' dır. Tablo 6.5' te detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 6-5. Bandırma orman atıkları biyokütle değeri (BEPA,2024)

Endüstriyel Olarak Değerlendirilmeyenler (ster/yıl)	Süceyrattan Edilebilecekler (ster/yıl)	Elde Toplam Eşdeğeri (TEP/yıl)	Enerji
150.241	21.725	38.204	

Bandırma çevre ilçelerinde biyogaz tesisleri bulunmaktadır. Toplam kurulu gücü 21,9 MW değerindedir ve Tablo 6.6 da biyogaz tesis bilgileri yer almaktadır.

Tablo 6-6. Biyogaz tesis bilgileri(<https://www.enerjiatlasi.com/biyogaz/>)

Firma	Konum	Kurulu Güç (MW)
Astosan	Gönen	1
Balıkesir Biyogaz	Şamlı	1,5
Energom Biyogaz	Merkez	3,2
Karbio Biyogaz	Edincik	2,1
Mutlular Enerji	Gönen	10,5
Toros Gübre	Gönen	3,6

6.2 BİYOKÜTLE GAZLAŞTIRMA SİSTEMİ

Biyokütle termal gazlaştırma sistemi teorik olarak Aspen Plus, Matlab ESS programları kullanılarak hesaplanmaktadır. Deneysel çalışmalar ile teorik hesaplamalar birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada biyokütle gazlaştırma sistemi olarak odun talaşı seçilmiştir ve kimyasal içeriği Tablo 6.7 'de verilmiştir.

Tablo 6-7. Odun talaşı kimyasal içeriği (Abuadala, 2010)

Element	Ağırlık oranı (%)
C	48,01
H	6,04
O	45,43
N	0,15
S	0,05
Ash	0,32
LHV kj/kg	19.005
Uçucu Madde	76,78
Sabit Karbon	18,7

Bu çalışmada gazlaştırma sistemi için EES programı kullanılarak termodinamik yaklaşımlarla dayalı enerji ve kütle denklıkları hesaplanmıştır. Tasarlanan sistemde günlük hidrojen üretim miktarı 1500 kg ve enerji karşılığı 50 MWh' tır. Sistem için gerekli biyokütle miktarı 12,5 ton/gün' dür.

Düşey akışlı gazlaştırma sistemi seçilmiştir. Maliyeti düşüktür. Katan ve kömür az miktarda oluşur. Kurulumu basit ve güvenilir bir teknolojiye sahiptir.

Literatürdeki çalışmalara dayanarak gazlaştırma sistemi sıcaklığı 1023 K olarak belirlenmiştir. Gazlaştırma reaktanı buhar seçilmiştir ve buhar sıcaklığı 500 K değerindedir. Sistemin atık ısısından yararlanılarak gazlaştırma ve diğer reaksiyonlar için gerekli olan buhar elde edilmektedir. Gazlaştırma sistemi parametreleri Tablo 6.8' de ve sistem akış diyagramı Şekil 6.4' te gösterilmektedir.

$$C: \alpha l = b + c + d + e + 6f \quad (6.2)$$

$$H: \alpha m + 2\gamma = 2\alpha + 4d + 6f \quad (6.3)$$

$$O: \alpha n + \gamma = b + 2c \quad (6.4)$$

$$N: a + b + c + d + e + f \quad (6.5)$$

Tar (f) mol katsayısı Denklem 6.6 ile hesaplanır. T reaksiyon sıcaklığıdır ve denklem de K değeriyle kullanılır (Abuadala, 2010).

$$Tar = 35.98 \exp(-0.0029T) \quad (6.6)$$

Denklem 6.7 gazlaştırma denklemindeki mol katsayılarını bulmak için kullanılır (Abuadala, 2010)



İdeal gaz denkleği olan Gibss fonksiyonu Denklem 6.8 ve 6.9 kullanılarak, Denklem 6.7' deki mol katsayıları belirlenir. "K" ideal gaz sabitidir a hidrojen, d karbon mol katsayısıdır. Denklem 6.7 çözülerek Denklem 6.2-6.5 ' teki mol katsayıları hesaplanır (Abuadala, 2010)

$$K = \frac{a^2 N}{d} \quad (6.8)$$

$$K = \exp\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right) \quad (6.9)$$

Her bir reaksiyon için kütle ve enerji denklikleri yapılmıştır. Gaz fazdaki elementlerin her birinin c_p değeri Denklem 6.10 ile hesaplanır (Abuadala, A. G. 2010).

$$C_p = a' + b'T + c'T^2 + d'T^3 \quad (6.10)$$

Her bir gaz elementi için a' , b' , c' ve d' değerleri Tablo 6.9 dan alınmıştır (Abuadala, 2010)

Tablo 6-9. Gazların ampirik spesifik sıcaklık hesaplama katsayıları

Gas	a'	b'	c'	d'
CO	28.16	0.1675x10 ⁻²	0.5372x10 ⁻⁵	-2.222x10 ⁻⁹
CO ₂	22.26	5.981x10 ⁻²	-3.501x10 ⁻⁵	-7.469x10 ⁻⁹
H ₂ O	32.34	0.1923x10 ⁻²	1.055x10 ⁻⁵	-3.595x10 ⁻⁹
H ₂	29.11	-0.1916x10 ⁻²	0.4003x10 ⁻⁵	-0.8704x10 ⁻⁹
CH ₄	19.89	5.2040x10 ⁻²	1.269x10 ⁻⁵	-11.01x10 ⁻⁹

Hesaplanan spesifik sıcaklık değerleri ile her bir reaksiyonda gazın entalpi değerleri Denklem 6.11, 6.12 ile hesaplanmıştır (Abuadala, 2010)

$$\Delta h = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT \quad (6.11)$$

$$h = h_f^0 + \Delta h \quad (6.12)$$

Her bir gazın 298.15 K' deki entalpi değeri Tablo 6.10 dan alınmıştır.

Tablo 6-10. Gazların sabit entalpi değerleri (Abuadala, 2010)

Element	Standart Kimyasal Enerji (kJ/kmol)	Entalpi (kJ/kmol)
CH ₄	831.650	-74.850
CO	275.100	-110.530
CO ₂	19.870	-393.520
H ₂ O	9.500	-241.820
H ₂	236.100	0
C	410.260	0
C ₆ H ₆	3.303.600	82.930

Buhar reformasyonu endotermik bir reaksiyondur. Metan ve buhar reaksiyona girerek hidrojen ve karbonmonoksit elde edilir. Reaksiyon Denklem 6.13 ile ifade edilir. Her bir gazın

moleküler ve kütleli ağırlıklarına göre Denklem 6.14-6.19 ile reaksiyonun enerji denklemleri hesaplanır (Abuadala, 2010)



$$\sum_i \dot{m}_{i,SR} h_{i,SR} = \sum_e \dot{m}_{e,SR} h_{e,SR} \quad (6.14)$$

$$\sum_i \dot{N}_{i,SR} \bar{h}_{i,SR} = \sum_e \dot{N}_{e,SR} \bar{h}_{e,SR} \quad (6.15)$$

$$\sum_i \dot{m}_{i,SR} h_{i,SR} = \sum_i \dot{N}_{i,SR} \bar{h}_{i,SR} \quad (6.16)$$

$$\sum_e \dot{m}_{e,SR} h_{e,SR} = \sum_e \dot{N}_{e,SR} \bar{h}_{e,SR} \quad (6.17)$$

$$\sum_i \dot{N}_{i,SR} \bar{h}_{i,SR} = \dot{N}_{CH_4,16} \bar{h}_{CH_4,16} + \dot{N}_{CO,16} \bar{h}_{CO,16} + \dot{N}_{CO_2,16} \bar{h}_{CO_2,16} + \dot{N}_{H_2O,16} \bar{h}_{H_2O,16} \quad (6.18)$$

$$\sum_e \dot{m}_{e,SR} h_{e,SR} = \dot{N}_{H_2O,17} \bar{h}_{H_2O,17} + \dot{N}_{CO,17} \bar{h}_{CO,17} + \dot{N}_{CO_2,17} \bar{h}_{CO_2,17} \quad (6.19)$$

Isı değiştirici-1 ile buhar reformasyonu çıkışı gazın sıcaklığı dūřürölür ve sistem için gerekli olan buhar miktarı elde edilir. Denklem 6.20 ile ısı değiştirici-1 enerji denkleği hesaplanır (Abuadala, 2010)

$$\dot{m}_7(h_7 - h_8) = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{18}) \quad (6.20)$$

Su gaz dönüşüm reaksiyonu endotermik bir reaksiyondur. Karbonmonoksit buhar ile tepkimeye girerek karbondioksit ve hidrojen elde edilir. Hidrojen miktarı artar. Her bir gazın moleküler ve kütleli ağırlıklarına göre Denklem 6.21-6.27 ile reaksiyonun enerji denklemleri hesaplanır (Abuadala, 2010)



$$\sum_i \dot{m}_{i,WGS} h_{i,WGS} = \sum_e \dot{m}_{e,WGS} h_{e,WGS} \quad (6.22)$$

$$\sum_i \dot{N}_{i,WGS} \bar{h}_{i,WGS} = \sum_e \dot{N}_{e,WGS} \bar{h}_{e,WGS} \quad (6.23)$$

$$\sum_i \dot{m}_{i,WGS} h_{i,WGS} = \sum_i \dot{N}_{i,WGS} h_{i,WGS} \quad (6.24)$$

$$\sum_e \dot{m}_{e,WGS} h_{e,WGS} = \sum_e \dot{N}_{e,WGS} h_{e,WGS} \quad (6.25)$$

$$\sum_i \dot{N}_{i,WGS} h_{i,WGS} = \dot{N}_{H_2,18} \bar{h}_{H_2,18} + \dot{N}_{CO,18} \bar{h}_{CO,18} + \dot{N}_{CO_2,18} \bar{h}_{CO_2,18} + \dot{N}_{H_2O,18} \bar{h}_{H_2O,18} \quad (6.26)$$

$$\sum_e \dot{N}_{e,WGS} h_{e,WGS} = \dot{N}_{H_2,19} \bar{h}_{H_2,19} + \dot{N}_{CO_2,19} \bar{h}_{CO_2,19} \quad (6.27)$$

Isı değiştirici-2 ile su gaz dđnüşüm reaksiyonu çıkışı gazın sıcaklığı düşürölür ve sistem için gerekli olan 500 K sıcaklığında buhar miktarı elde edilir. Denklem 6.28 ile ısı değiştirici-2 enerji denkliği hesaplanır (Abuadala, 2010)

$$\dot{m}_{28}(h_{20} - h_{28}) = \dot{m}_{19}(h_{19} - h_5) \quad (6.28)$$

Sistemde kullanılan kompresörün enerji denkliği Denklem 6.29-6.640 ile hesaplanır (Abuadala, 2010), $P_5=96$ kPa, $P_6=185$ kPa alınmıştır.

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (6.29)$$

$$\dot{m}_5 = \sum_{i=1}^5 \dot{m}_i \quad (6.30)$$

$$\dot{m}_6 = \sum_{e=1}^6 \dot{m}_e \quad (6.31)$$

$$\dot{m}_5 = \sum_{i=1}^5 \dot{N}_i MW_i \quad (6.32)$$

$$W_{5-6} = \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_6 h_6 \quad (6.33)$$

$$\dot{m}_5 h_5 = \sum_{i=1}^5 \dot{N}_i \bar{h}_i \quad (6.34)$$

$$\dot{m}_6 h_6 = \sum_{e=1}^6 \dot{N}_e \bar{h}_e \quad (6.35)$$

$$T_6 = T_5 \left[1 - \eta_t \left(1 - \left(\frac{P_5}{P_6} \right)^{\frac{\gamma_{fgaz}}{\gamma_{fgaz} - 1}} \right) \right] \quad (6.36)$$

$$\frac{T_6}{T_5} = \left(\frac{P_5}{P_6}\right)^{\frac{\gamma_{fgaz}-1}{\gamma_{fgaz}}} \quad (6.37)$$

$$\gamma_{fgaz} = \frac{\overline{Cp}_{fgaz}}{\overline{Cv}_{fgaz}} \quad (6.38)$$

$$\overline{Cp}_{fgaz} = \sum_{i=1}^4 x_i \overline{Cp}_i \quad (6.39)$$

$$\overline{Cv}_{fgaz} = \sum_{i=1}^4 x_i \overline{Cv}_i \quad (6.40)$$

Son aşamada kompresör ünitesi ile basıncı artırılan gaz, filtre ile CO₂ ve H₂ olarak ayrımı sağlanır (Abuadala, 2010).

$LHV_{Biomass}$ Biyokütlenin alt ısıl kapasitesidir, Denklem 6.41 ile hesaplanır

$$LHV_{Biomass} = 0,0041868(1 + 0,15[O])(7837,667[C] + 33888,889[H] - \frac{[O]}{8}) \quad (6.41)$$

Biyokütleden elde edilecek olan enerji miktarını hesabı Denklem 6.42 ile bulunur. $\dot{m}_{Biomass}$ gazlaştırma sistemindeki kullanılan zamana bağlı biyokütle miktarıdır. Biyokütlenin ve üretilen hidrojenin toplam enerjisi Denklem 6.43 ile hesaplanır. LHV_{H_2} hidrojenin alt ısıl değeri ve \dot{m}_{H_2} üretilen hidrojen kütle miktarıdır. En_{Steam} sistemde kullanılan toplam buharın enerji miktarıdır. Gazlaştırma sistem verimi denklem 6.44 ve 6.45 ile hesaplanır (Abuadala, 2010)

$$En_{Biomass} = \dot{m}_{Biomass} LHV_{Biomass} \quad (6.42)$$

$$En_{H_2} = \dot{m}_{H_2} LHV_{H_2} \quad (6.43)$$

$$\eta_{en1} = \frac{En_{H_2}}{En_{Biomass}} \quad (6.44)$$

$$\eta_{en2} = \frac{En_{H_2}}{En_{Biomass} + En_{Steam}} \quad (6.45)$$

7. BULGULAR

7.1 YATIRIM VE MALİYET ANALİZİ

Gazlaştırma sisteminin enerji ihtiyacı bir önceki aşamada EES programı kullanılarak hesaplanmıştır. Tesisin 406 kWh elektrik enerjisine ihtiyaç duyduğu belirlendi. Bu enerji ihtiyacının Biyogaz enerji santrali, güneş enerji santrali, rüzgar türbini santrali ve şehir elektrik şebekesi ile karşılandığı senaryo için fizibilite sonuçları hesaplanmıştır. Biyogaz üretim sistemi ve rüzgar türbini sisteminin yatırım ve işletme maliyetleri detaylı olarak incelenmiştir.

7.1.1 Biyogaz Kojenerasyon Sistemi

Hayvan atıklarından elde edilen biyogazın kojenerasyon sisteminde kullanılmasıyla elektrik ihtiyacı karşılanması amacıyla fizibilite çalışması yapılmıştır. Yatırımın mevcut maliyeti, biyogaz kojenerasyon sistemi fizibilite referans değerlerine göre hesaplanmıştır (Aktaş, 2019). Gazlaştırma sistemi için elektrik ihtiyacı 406 kWh' tır. Elektrik ihtiyacının biyogaz kojenerasyon sistemi ile karşılanması durumunda kurulu güç 500 kW olarak alınmıştır.

Kojenerasyon sistem verimi % 37 olarak alınmıştır. Üretilen biyogazın alt ısıl değeri 4.700 kcal/m³ Denklem 7.1 'de kullanılarak kojenerasyon sistemi için gerekli olan biyogaz miktarı hesaplanmıştır

$$\text{Biyogaz miktarı} = \frac{\text{Kojen kurulu gücü}}{\text{Kojen verimi}} * 860 \frac{\text{kcal}}{\text{kW}} / 4700 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \quad (7.1)$$

1 ton gübreden üretilen biyogaz oranı 33 m³/ton' dur. Sistem için gerekli olan gübre miktarı Denklem 7.2' de hesaplanır.

$$\text{Gübre miktarı} = \text{Biyogaz miktarı} / (\text{biyogaz/gübre}) \quad (7.2)$$

Sistem yılda 7.500 saat çalışacaktır ve üretilen elektrik miktarı Denklem 7.3' de hesaplanır. Üretilen enerjinin %10 biyogaz sisteminin iç tüketiminde kullanılacaktır geri kalanı ise gazlaştırma sisteminde kullanılacaktır (Aktaş, 2019).

$$\text{Üretilen elektrik} = \text{Kojen kurulu güç} * \text{Çalışma süresi} \quad (7.3)$$

Toplam elektrik üretimi ve hesaplamalarda kullanılan parametreler Tablo 7.1' de verilmiştir. Yılda 3.375.000 kWh kullanılabilir elektrik enerjisi elde edilecektir.

Tablo 7-1. Biyogaz kojenerasyon sistem bilgileri (Aktaş M.,2019).

Parametre	Birim	Değer
Biyogaz/Gübre	m ³ /ton	33
Biyogaz LHV	Kcal/m ³	4.700
Elektrik	Kcal/kW	860
Gübre	ton/gün	179,83
	ton/yıl	56.197
Gübre	kW	500
Elektrik Gücü	kWh/ gün	12000
Kojenerasyon Verimliliği	%	0,37
Kojenerasyon Sistemi İçin Gerekli Biyogaz	kWh/gün	32.432
	m ³ / gün	5.934
Gübre	ton/yıl	56.197
Elektrik Gücü	kWh/yıl	3.750.000
Sistem Elektrik Tüketim Oranı	%	10
Sistem Elektrik Tüketimi	kWh/yıl	375.000
Toplam Üretilen Elektrik	kWh/yıl	3.375.000
Organik Gübre	ton/yıl	13.113

Güncel fiyatın tahmini için Denklem 7.4 uygulanmaktadır. C_{actual} güncel fiyat, C_{old} ekipmanın geçmiş yıldaki fiyatı, $I_{PPP old}$ ekipmanın eski fiyatının alındığı yıldaki ÜFE oranı, $I_{PPI actual}$ güncel yılın ÜFE oranıdır. 2019 yılı referans değerleri baz alınarak 2024 yılı güncel birim fiyatlarına ulaşılmıştır (Eurostat,2024). Fizibilite çalışmasında Tablo7.2' deki birim fiyatlar kullanılmıştır. ÜFE oranları 2019 yılı birim fiyatlarının 2024 yılı ÜFE oranına göre değişimi Tablo 7.2' de verilmiştir.

$$C_{actual} = C_{old} \frac{I_{PPI actual}}{I_{PPP old}} \quad (7.4)$$

Tablo 7-2. 2019-2024 Unit Costs(Aktaş M.,2019).

Maliyet Türü	2019 Birim Maliyet	2024 Birim Maliyet
Yatırım	4000 €/kW	5.569 €/kW
Kojenerasyon Kullanım Ve Bakım Gideri	0,95 €/h	1,32 €/h
Sigorta Ve Vergi	0,05 %	0,07 %
Maaş	500 €/ay	696 €/ay
Hammadde Gideri	1,5 €/ton	2,09 €/ton
Organik Gübre	30 €/ton	41,76 €/ton

Denklem 7.5’ de yatırım maliyeti hesaplanmaktadır. Yatırım maliyetinin %40 kojenerasyon, % 60 ise biyogaz sistemini oluşturmaktadır ve Denklem 7.6 ve 7.7 ile hesaplanır (Aktaş, 2019).

$$\text{Toplam yatırım maliyeti} = \text{Yatırım birim maliyeti} * \text{Sistem kurulu gücü} \quad (7.5)$$

$$\text{Kojenerasyon sistem maliyeti} = \text{Toplam yatırım maliyeti} * 0,4 \quad (7.6)$$

$$\text{Biogaz sistem maliyeti} = \text{Toplam yatırım maliyeti} * 0,6 \quad (7.7)$$

Kullanılan fermentör ve bakım giderleri Denklem 7.8 ile hesaplanır. Denklem 7.9 ve 7.10’ da kojenerasyon sistemi kullanım ve bakım giderleri ve sigorta ve giderler hesaplanmıştır. Biyogaz tesisinde personel sayısı 9 kişidir. Denklem 7.11 yıllık personel giderleri hesaplanmıştır (Aktaş, 2019).

$$\text{Fermenter kullanım ve bakım gideri} = \text{Kojenerasyon sistem maliyet,* 0,03} \quad (7.8)$$

$$\text{Kojenerasyon işletme ve bakım gideri} = \text{Çalışma süresi} * 1,32€/h \quad (7.9)$$

$$\text{Sigorta ve vergi} = \text{Toplam yatırım maliyeti} * 0,07 \quad (7.10)$$

$$\text{İşçilik gideri} = \text{Personel miktarı} * \text{maaş} * 12 \quad (7.11)$$

Denklemler 7.12’ de yıllık tüketilen gübre maliyeti hesaplanır. Toplam gübrenin % 23 organik gübre olarak satılmaktadır. Organik gübre miktarı ve maliyeti Denklem 7.13 ve 7.14’ de hesaplanmıştır (Aktaş, 2019).

$$\text{Hammadde gideri} = \text{Gübre miktarı} * 2,09 \text{ €/ton} \quad (7.12)$$

$$\text{Organik gübreleyici miktarı} = \text{Gübre miktarı} * 0,23 \quad (7.13)$$

$$\text{Organik gübreleyici geliri} = \text{Organik gübreleyici miktarı} * \text{birim maliyet} \quad (7.14)$$

Hesaplanan tüm yatırım ve işletme maliyetleri Tablo 7.3’ de verilmiştir. Biyogaz kojenerasyon enerji üretim sisteminin toplam maliyeti € 2.784.314 ve yıllık işletme giderleri €352.802’ dur. Organik gübre satışından elde edilecek olan yıllık gelir €547.649’ dur, Toplam yıllık maliyetlerinden gider maliyetleri çıkarıldığında yılda toplam €194.847 kazanç elde edilecektir.

Tablo 7-3. 500 kW Biyogaz kojenerasyon sistemi yatırım ve işletme maliyeti

Maliyet Türü	Maliyet
Biyogaz Tesisi	€ 2.227.451
Kojenerasyon Ünitesi	€ 556.863
Toplam Yatırım Maliyeti	€ 2.784.314
Fermentör Kullanım ve Bakım Giderleri	€ 66.824
Tesis İçin İşçilik Giderleri	€ 75.176
Hammadde Taşıma Giderleri	€ 117.353
Kojenerasyon Ünitesi Kullanım ve Bakım Giderleri	€ 9.919
Beklenen Farklılıklar	€ 83.529,41
Toplam İşletme Maliyeti	€ 352.802
Organik Gübre Geliri	€547.649
Toplam Gelir	€194.847

7.1.2 Rüzgar Türbini

Elektrik üretiminde yararlanılacak alternatif diğer enerji kaynağı rüzgar türbinidir. Elektrik ihtiyacının rüzgar türbininden temin edilmesi durumundaki fizibilite hesabı bu bölümde yapılmıştır. İlk olarak rüzgar türbininin kurulu gücü Denklem 7.15 ile hesaplanır. Bandırma için rüzgar enerji kapasitesi 0,35, yıllık elektrik ihtiyacı 3.046.875 kWh ve çalışma süresi 8760 h/yıl referans alınmıştır.

$$\text{Rüzgar türbin kapasitesi} = \text{Yıllık elektrik tüketimi} / \text{Rüzgar enerji kapasite faktörü} * \text{çalışma süresi} \quad (7.15)$$

Denklem 7.15 uygulandığında rüzgar enerji santrali kurulu gücünün 1000 kW olarak belirlenmiştir. Rüzgar santrali için gerekli yatırım ve işletme maliyeti güncel fiyat teklifi firmadan alınarak Tablo 7.4' te sunulmuştur.

Tablo 7-4. 1000 kW rüzgar türbini sistemi yatırım ve işletme maliyeti

Parametre	Değerler
Bandırma Rüzgar Enerjisi Kapasite Faktörü	0,35
Rüzgar Türbini Kapasitesi	1000
Yıllık Elektrik Üretimi	3.066.000 kWh/yıl
İnşaat Maliyeti	€ 290.000
Türbin Maliyeti	€ 1.170.000
Elektrik Konfigürasyon Maliyeti	€ 114.000
Toplam Yatırım Maliyeti	€ 1.574.000
Sistem Kullanım Gideri	€ 4.782
Sistem İşletim Gideri	€ 162
Sigorta	€ 1.157
Personel Giderleri	€ 5.398
Bakım	€ 7.711
Genel Harcamalar	€ 3.084
Beklenen Farklılıklar	€ 3.084
Toplam İşletme Maliyeti	€ 25.378

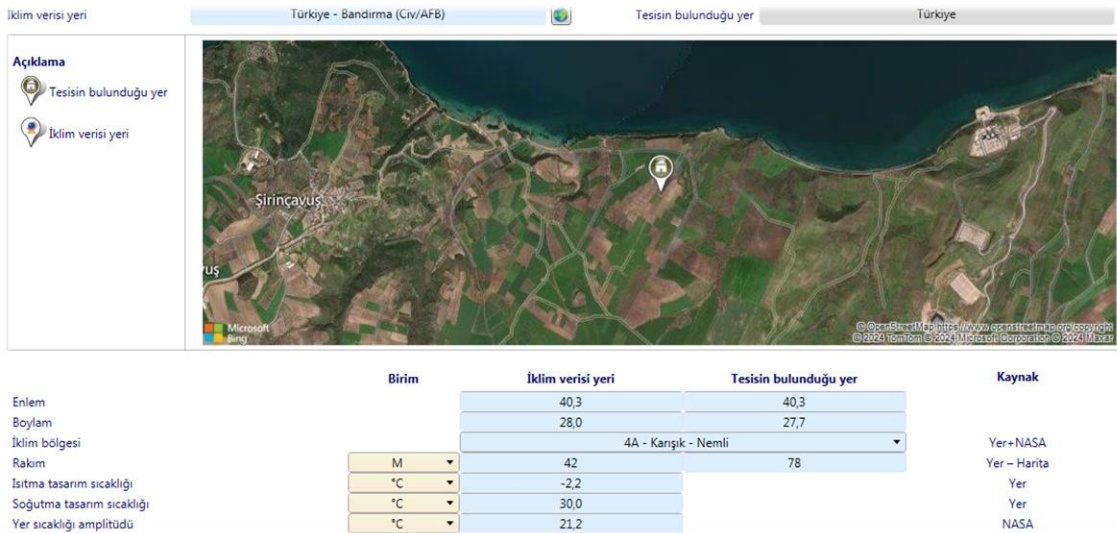
1000 kW kapasiteli rüzgar türbininin yatırım maliyeti € 1.574.000, yıllık işletme maliyeti € 25.378 'dur.

Bandırma ilçesinde rüzgar enerjisi kapasite faktörü her yerde eşit değerde değildir. Rüzgar türbini devlet tarafından izin verilen en verimli bölgelerde kurulumu gerçekleşeceği öngörülmüştür. Bu nedenle rüzgar türbinin kurulacağı alan, gazlaştırma tesisinin yakınlarında olmadığı varsayılmaktadır ve rüzgar türbininden üretilen elektrik doğrudan şebekeye verilesi planlanmaktadır. Gazlaştırma sisteminde kullanılan elektrik ise şebekeden alınacaktır ve üretilen elektrik ve tüketilen elektrik farkı alınarak devlet tarafından mahsuplaşma yapılması planlanmıştır. Bu şekilde enerji iletim hatlarınının kurulması ve akülerden oluşabilecek maliyetler fizibilite çalışmasında dikkate alınmamıştır. Rüzgar türbini santralinde dolaylı olarak yenilebilir enerji kaynağı kullanımı söz konusudur.

7.1.3 Güneş Enerjisi Sistemi

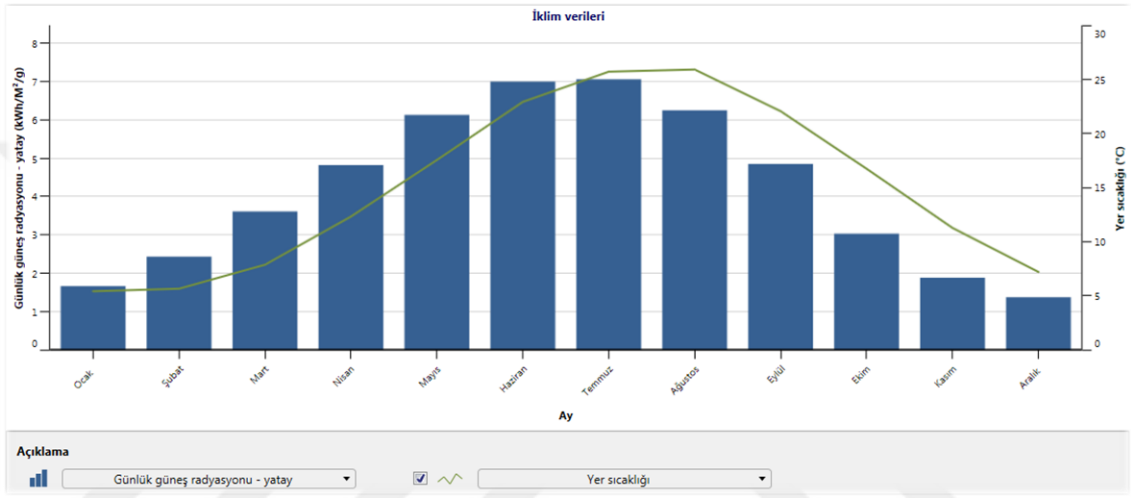
Bu bölümde Bandırma ilçesi için Güneş Enerji Sistemi uygulaması fizibilitesi yapılmıştır. Sistemde 540 W gücünde fotovoltaik panel kullanılacaktır. İlk olarak 540 W fotovoltaik panelin yılda üretebileceği enerji miktarı RetScreen program yardımıyla hesaplanmıştır.

Bandırma ilçesinde PV sistemi kurulumu için gerekli olan 10.000 m² lik bir alan öngörülmektedir. Alan bilgileri Şekil 7.1' de verilmiştir.



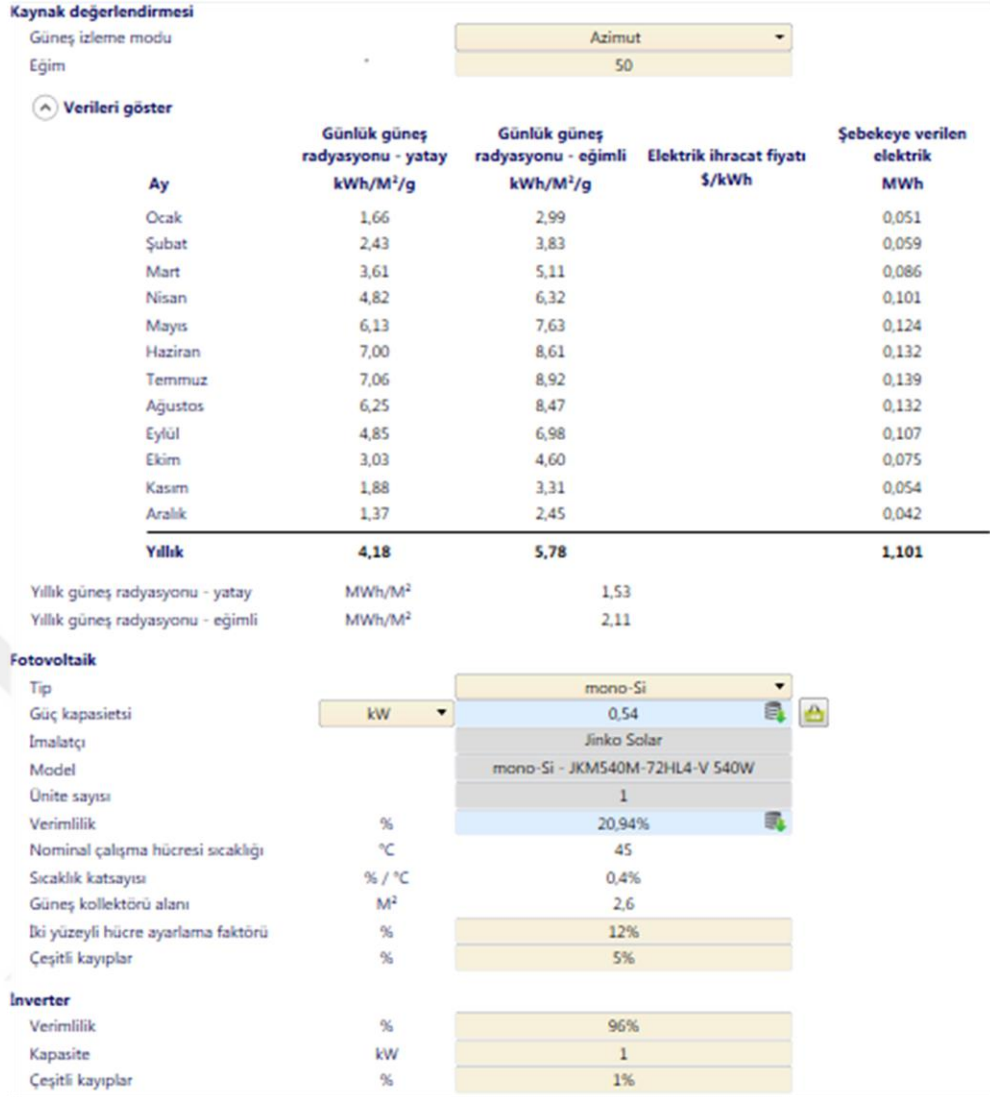
Şekil 7-1. GES uygulaması için öngörülen alan bilgileri

Ay	Hava sıcaklığı	Bağıl nem	Yağış	Günlük güneş radyasyonu - yatay		Atmosferik basınç	Rüzgar hızı	Yer sıcaklığı	Isıtma derece-gün 18 °C	Soğutma derece-gün 10 °C
	°C	%		mm	kWh/M ² /g					
Ocak	5,2	78,8%	67,27	1,66	99,9	99,9	5,2	5,4	397	0
Şubat	5,2	76,8%	67,48	2,43	99,8	99,8	5,2	5,6	358	0
Mart	7,4	74,5%	61,07	3,61	99,7	99,7	5,3	7,9	329	0
Nisan	11,8	72,2%	49,50	4,82	99,4	99,4	4,4	12,3	186	54
Mayıs	16,3	70,1%	32,55	6,13	99,5	99,5	4,6	17,5	53	195
Haziran	21,1	64,9%	24,00	7,00	99,4	99,4	4,4	22,9	0	333
Temmuz	23,7	64,7%	11,78	7,06	99,3	99,3	5,6	25,7	0	425
Ağustos	23,9	66,8%	9,92	6,25	99,3	99,3	5,9	25,9	0	431
Eylül	20,2	67,6%	28,80	4,85	99,6	99,6	5,1	22,1	0	306
Ekim	15,6	73,0%	62,31	3,03	99,9	99,9	5,1	16,7	74	174
Kasım	10,2	76,9%	72,60	1,88	99,9	99,9	4,4	11,3	234	6
Aralık	6,9	79,0%	90,52	1,37	99,9	99,9	5,2	7,2	344	0
Yıllık	14,0	72,1%	577,80	4,18	99,6	99,6	5,0	15,1	1.975	1.924
Kaynak	Yer	Yer	NASA	NASA	NASA	NASA	Yer	NASA	Yer	Yer
Ölçüm yeri:							M	10	0	



Şekil 7-2. Günlük güneşlenme radyasyonu ve yer sıcaklığı

Günlük güneşlenme radyasyonu ve yer sıcaklığı bilgileri RetScreen program ile hesaplanmıştır ve Şekil 7.2' de gösterilmektedir. Güneşlenme radyasyonunu en fazla temmuz ayında, en az aralık ayında aldığı tespit edilmiştir.



Şekil 7-3. 540 W PV panel yıllık elektrik üretim kapasitesi

RetScreen programı hesabına göre 540 W'lık panel ile yılda 1,1 MWh enerji üretimi gerçekleştirilmektedir ve Şekil 7.3' te gösterilmiştir.

Sistem için gerekli olan enerji miktarı 3.100.000 kWh alınmıştır. Bu bilgilere göre yaklaşık olarak PV panel adeti Denklem 7.16 ile hesaplanır

$$Yıllık\ enerji\ ihtiyacı / Panel\ üretebileceği\ enerji\ miktarı \quad (7.16)$$

PV panel sistem maliyetleri Tablo 7. 5' te yer almaktadır (Korkmaz, Hacısalıhoğlu, 2024).

Jinko Solar/Mono-Si - JKM540M-72HL4-V marka PV panel seçilmiştir. Panel adeti 2818'dir. Sistemin toplam kurulu gücü 1521 kW' tır. 100 kW' lık 11 adet inverter seçilmiştir. Toplam inverter kapasitesi 1100 kW' tır.

Tablo 7-5. PV sistem ekipman bilgileri

Sistem Bilgileri	Değerler
Pv Panel Marka Model	Jinko Solar/Mono-Si - JKM540M-72HL4-V
PV Panel Kapasite	540W
PV Panel Adeti	2818
GES Kurulu Gücü	1521 kW
İnverter Kapasitesi	100 kW
İnverter Adeti	11
Toplam İnverter Kapasitesi	1100 kW
T.C. Merkez Bankası Dolar Kuru (17.06.2024)	32,5164 TL/\$
T. C. Merkez Bankası Euro Kuru (17.06.2024)	34,7944 TL/€

Kaynak değerlendirilmesi

Güneş izleme modu: Azimut
Eğim: 50

Verileri göster

Ay	Günlük güneş radyasyonu - yatay kWh/M ² /g	Günlük güneş radyasyonu - eğimli kWh/M ² /g	Elektrik ihracat fiyatı \$/kWh	Şebekeye verilen elektrik kWh
Ocak	1,66	2,99		144.080,859
Şubat	2,43	3,83		166.233,536
Mart	3,61	5,11		242.190,666
Nisan	4,82	6,32		284.726,701
Mayıs	6,13	7,63		348.430,408
Haziran	7,00	8,61		372.255,914
Temmuz	7,06	8,92		392.591,727
Ağustos	6,25	8,47		371.021,071
Eylül	4,85	6,98		300.678,194
Ekim	3,03	4,60		210.529,955
Kasım	1,88	3,31		150.993,435
Aralık	1,37	2,45		118.086,577
Yıllık	4,18	5,78		3.101.819,044

Yıllık güneş radyasyonu - yatay: MWh/M² 1,53
Yıllık güneş radyasyonu - eğimli: MWh/M² 2,11

Fotovoltaik

Tip: mono-Si
Güç kapasitesi: kW 1.521,72
İmalatçı: Jinko Solar
Model: mono-Si - JKMS40M-72HL4-V 540W
Ünite sayısı: 2.818
Verimlilik: % 20,94%
Nominal çalışma hücre sıcaklığı: °C 45
Sıcaklık katsayısı: % / °C 0,4%
Güneş kollektörü alanı: M² 7.267
İki yüzeyli hücre ayarlaması faktörü: % 12%
Çeşitli kayıplar: % 5%

Inverter

Verimlilik: % 96%
Kapasite: kW 1.100
Çeşitli kayıplar: % 1%

Şekil 7-4. PV panel yıllık enerji üretim kapasite bilgileri

Şekil 7-4 te PV panel enerji üretim bilgileri yer almaktadır. Yılda 3.101.819 kWh elektrik üreteceği öngörülmektedir. Güneş İzleme modu Azimut olarak alınmıştır. Eğim açısı 50° dir. En fazla elektrik üretimi 392.591 kWh olarak temmuz ayında, en düşük elektrik üretimi 144.080 kWh ocak ayında gerçekleşeceği görülmektedir. Toplam fotovoltaik panel alanı 7.267 m² olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7-6. Güneş enerjisi santrali kurulum ve işletme maliyeti

Parametreler	Miktar	Birim Maliyet \$	\$ Maliyet	Birim Maliyet €	€ Maliyet
Fizibilite Etüdü	1522 kW	\$ 2,78	\$ 4.231	€ 2,60	€ 3.954
Geliştirme	1522 kW	\$ 2,78”	\$ 4.231	€ 2,60	€ 3.954
Mühendislik	1522 kW	\$ 33,30	\$ 50.683	€ 31,12	€ 47.364
Konstrüksiyon	1522 kW	\$ 50,06	\$ 76.191	€ 46,78	€ 71.203
İnverter	11 adet	\$ 2.250	\$ 24.750	€ 2.102,69	€ 23.130
İşçilik	1522 kW	\$ 33,37	\$ 50.789	€ 31,19	€ 47.464
Dc Kablo	1200 m	\$1,22	\$ 1.464	€ 1,14	€ 1.368
Ac Kablo	2400 m	\$ 20,01	\$ 48.024	€ 18,70	€ 44.880
Fotovoltaik Panel	1522 kW	\$ 500,00	\$ 761.000	€ 467,26	€ 711.177
Öngörülemeyen Giderler	%10		\$ 102.136	%10	€ 95.449
Toplam			\$1.123.500		€ 1.049.944
İşletme Maliyeti	1522 kW	\$ 26	\$ 39.572	€ 24,30	€ 36.981

Tablo 7.6’ da Güneş enerjisi santrali kurulum işletme maliyeti yer almaktadır. İlk olarak birim maliyetler referanslardan dolar olarak alınmıştır (RetScreen- Korkmaz, Hacısalihoğlu 2024). Daha sonra Euro birimine güncel kur ile değiştirilmiştir. Fizibilite ve geliştirme maliyetini 2,60 €/kW olarak alınmıştır maliyeti 7.908€ dır. Mühendislik ve işçilik maliyet birim maliyetleri 31,12 €/kW, konstrüksiyon birim maliyeti 46,78 €/kW alınmıştır. Sistemde 11 adet inverter öngörülmüştür ve inverter birim maliyeti € 2103’ dır. DC kablo birim maliyeti 1,14€/m’ dir ve 1200 m kablo kullanılacağı öngörülmektedir. AC kablo birim maliyeti 18,70 €/m ve 2400 m kablo kullanılmıştır. Öngörülmeleyen %10 maliyet artışı olabileceği varsayılmıştır. Toplam yatırım maliyeti \$ 1.049.943’ dır. Yıllık işletme birim maliyeti 24,3 €/kW alınmıştır ve toplam maliyeti 36.981€/yıl olarak hesaplanmıştır. Bandırma ilçesinde GES santrali yeri ortalama bir yer olarak belirlenmiştir. Amacımız GES’ ten üretilecek olan ortalama enerji miktarını belirlemektir. GES santrali, gazlaştırma sisteminin yakınlarında olmayacağı varsayılmıştır. Bu nedenle GES sisteminde üretilen elektrik şebekeye verilecektir. Gazlaştırma sisteminde kullanılan elektrik ise şebekeden alınacaktır ve üretilen elektrik ve tüketilen elektrik farkı alınarak devlet tarafından mahsuplaşma yapılması planlanmıştır. Bu şekilde enerji iletim hatlarının kurulması ve akülerden oluşabilecek maliyetler fizibilite çalışmasında dikkate alınmamıştır. GES santralinde dolaylı olarak yenilebilir enerji kaynağı kullanımı söz konusudur.

7.1.4 Gazlaştırma Sistemi Yatırım ve İşletme Maliyeti

Bu bölümde 1500 kg/gün hidrojen üretim kapasitesine sahip gazlaştırma sisteminin yatırım ve işletme maliyeleri hesaplanmıştır. İlk olarak referans alınan ekipman maliyetlerinin güncel maliyeti Denklem 7.4 kullanılarak bulunmuştur. Referans alınan ekipmanın maliyetinin belirlenen kapasiteye göre değişimi Denklem 7.17' de hesaplanmıştır. $C_{ref i}$ referans alınan ekipmanın güncel maliyeti, $S_{ref i}$ referans alınan ekipmanın kapasitesi, $S_{equip i}$ tasarlanan ekipmanın kapasitesi, n ise kapasite göre fiyat artış faktörüdür.

$$C_{equip i} = C_{ref i} * \left(\frac{S_{equip i}}{S_{ref i}} \right)^n \quad (7.17)$$

Toplam yatırım maliyeti ($CapEx$), ekipman maliyeti (C_{equip}) ve ekipman kurulum ($C_{activities}$) maliyetlerinden oluşmaktadır. Ekipman kurulum maliyeti Tablo 7.7' deki değer referans alınarak hesaplanmıştır. %10 oranında güncel fiyat artışının olabileceği öngörülerek toplam yatırım maliyeti Denklem 7.18 ile hesaplanmıştır ve elde edilen değerler Tablo 7.8 ve 7.9 de sunulmuştur.

$$CapEx = (C_{equip} + C_{activities}) * 1,1 \quad (7.18)$$

Tablo 7-7. Sermaye maliyeti faaliyetleri - toplam ekipman maliyetinin artış yüzdeleri (Alves, 2021).

Uygulamalar	%
Ekipman Montajı	25
Enstrümantasyon ve Kontrol	15
Yardımcı Programların Kurulumu	8
Elektrik Tesisatı	25
İnşaat İnşaatı	18
Arazi	6
Proje	9,2
Ek Hizmetler	1,2
Toplam	107,4

Tablo 7-8. Ekipman maliyetleri, güncelleme maliyet faktörleri ve ekonomik analiz için ölçek faktörleri.

Ekipman	Temel Kapasite	Taban maliyet	Kapasite Birimi	Baz yıl	Referans	Mevcut Kapasite
Gaz Kompresörü	23.020 kW	€ 21.770.000	0,72	2007	(Spallina, 2019).	28 kW
Isı Eşanjörü	470 MWh	€ 38.170.000	0,67	2017	(Alves, 2021).	0,341 MWh
Isı Eşanjörü	470 MWh	€38.170.000	0,67	2017	(Alves, 2021).	0,341 MWh
Buhar Reformu	118 kg/s	€17.500.000	0,82	2011	(Spallina, 2019).	0,213 kg/s
Su-Gaz Dönüşüm Reaksiyonu	118 kg/s	€17.500.000	0,82	2007	(Spallina, 2019).	0,213 kg/s
Filtre	0,0013 kg H2/s	€82.650	0,7	2007	(Alves, 2021).	0,00379 kg H2/s
Gazlaştırıcı + Seperatör	1000 kW	€180.974	0,972	2015	(Alves, 2021).	2800 kW

Tablo 7-9. Gazlaştırma sistem maliyeti

Ekipman	Referans Maliyeti	Maliyet Faktörü $\frac{I_{PPP\ actual}}{I_{PPP\ old}}$ (Eurostat,2024).	Ekipman Maliyeti	Activite Cost	Capex
Gaz Kompresörü	€ 173.419	1,64	€ 284.871	€ 304.812	€ 648.650
Isı Eşanjörü	€ 300.858	1,46	€ 439.425	€ 470.185	€ 1.000.571
Isı Eşanjörü	€ 300.858	1,46	€ 439.425	€ 470.185	€ 1.000.571
Buhar Reformu	€ 98.484	1,49	€ 146.352	€ 156.597	€ 333.243
Su-Gaz Dönüşüm Reaksiyonu	€ 98.484	1,64	€ 161.777	€ 173.102	€ 368.367
Filtre	€ 174.795	1,64	€ 287.132	€ 307.231	€ 653.799
Gazlaştırıcı + Seperatör	€ 492.327	1,48	€ 726.552	€ 777.411	€ 1.654.359
Toplam	€ 1.639.226		€ 2.485.534	€ 2.659.521	€ 5.659.560

Gazlaştırma sistemi fizibilitesinde hesaplanması gereken diğer bir maliyet ise işletme giderleridir. İşletme giderleri, hammadde, su, elektrik (şebekeden alınma durumunda), bakım ve onarım giderlerinden oluşmaktadır. Bölüm 6.2’ de gazlaştırma sisteminde biyokütle, su tüketim oranları kimyasal reaksiyon denklemleri oluşturularak belirlendi. Bu oranları ile 1500 kg/gün hidrojen üretim kapasitesine göre yıllık biyokütle su tüketim miktarları hesaplandı. Literatür araştırmalarında biyokütleden 1 kg hidrojen birim elektrik tüketim miktarı 5,5-7 kWh/kgH₂

değerinde olduğu tespit edilmiştir. Sistem içi gerekli olan elektrik tüketim birim miktarı 6,5 kWh/kgH₂ alınmıştır (Spath, Aden, Eggeman, Ringer, Wallace, Jechura, 2005). Yıllık tüketim verileri Tablo 7.10' da yer almaktadır. Sistem verimi 75,24 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7-10. Yıllık tüketimler

Parametre	Birim	Maliyet
Su	1 m ³ /h	7500 m ³ /yıl
Biyokütle	524,5 kg/h	3.933.750 kg/yıl
Elektrik (6,5 kWh/kgH ₂)	406,25	3.046.875 kWh/yıl

İşletmede toplam personel sayısı 30 olarak öngörülmüştür. İşletme ve bakım maliyeti, toplam yatırım maliyetinin %10' u olarak şekilde referans alınmıştır (Alves, 2021). Biyokütle maliyeti 0,02 €/kg alınmıştır. Su tüketim maliyeti, Bandırma Belediyesinin endüstriyel işletmeler için uyguladığı su tüketim birim maliyeti referans alınmıştır (Belsu, 2024). Şebekeden alınan elektrik birim maliyeti ise EPDK' nın endüstriyel işletme birim maliyetleri referans alınmıştır (TEİAŞ,2024). Tablo 7.11' de yıllık maliyetler verilmiştir.

Tablo 7-11. Gazlaştırma sistemi operasyon maliyeti

Maliyet Türü	Birim Maliyet	Şebekeden	
		Satın Alınan	Satın Alınan
		Elektriğin Fiyatı Dahil	Elektriğin Fiyatı Hariç
İşçi (30 Çalışan)	1000€/ay	€ 360.000	€ 360.000
Bakım ve Onarım	10%	€ 489.210	€ 489.210
Biyokütle Birim Maliyeti	0,02€/kg	€ 78.675	€ 78.675
Su Maliyeti	1 €/m ³	€ 7.500	€ 7.500
Elektrik Maliyeti	0,114 €/kWh	€ 448.448	
Toplam		€ 1.383.833	€ 935.385

Toplam yatırım maliyeti ve işletme maliyetleri gazlaştırma sisteminin enerji ihtiyacının biyogaz kojenerasyon sistemi, GES santrali, rüzgar türbini ve şebeken karşılanması durumundaki toplam yatırım ve işletme maliyetleri hesaplanarak Tablo 7.12' te sunulmuştur.

Tablo 7-12. Enerji kaynaklarına göre toplam yatırım ve işletme maliyeti

Maliyet Türü	Gazlaştırma Sistemi + Biyogaz Kojenerasyon Sistemi			Gazlaştırma Sistemi + Elektrik Şebekesi
	Gazlaştırma Sistemi + Biyogaz Kojenerasyon Sistemi	Gazlaştırma Sistemi + GES	Gazlaştırma Sistemi + RES	Gazlaştırma Sistemi + Elektrik Şebekesi
Toplam Yatırım Maliyeti	€ 8.443.874,01	€ 6.709.504,29	€ 7.233.560	€ 5.659.560
Toplam İşletme Maliyeti	€ 817.284	€ 1.049.112,03	€ 1.037.509	€ 1.460.579

Tüm fizibilite hesaplarında işletme ömrü 25 yıl olarak belirlenmiştir. Her yıl işletme maliyetlerinde %8 fiyat artışı olacağı ve hidrojen üretiminde %1 oranında azalma olacağı öngörülmüştür. Sistemin 25 yıl boyunca üreteceği hidrojen miktarı 10.415 ton' dur. İşletme toplam maliyet ve hidrojen birim maliyet sonuçları Tablo 7.13' da verilmiştir. Elektrik ihtiyacının biyogaz kojenerasyon sistemi ile temin edilmesinin durumunda hidrojen birim maliyeti 6,55€/kg, GES sistemi ile temin edilmesi durumunda 8,01 €/kg, rüzgar türbini ile temin edilmesi durumunda 7,98 €/kg, şebeke elektriğinden temin edilmesi durumunda 10,80 €/kg olacağı tahmin edilmiştir. Ülkemizde biyokütle gazlaştırma sisteminde elektrik ihtiyacının biyogaz kojenerasyon sisteminden temin edilmesinin daha uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 7-13. Fizibilite sonucu

Parametreler	Gazlaştırma Sistemi + Biyogaz Kojenerasyon Sistemi			Gazlaştırma Sistemi + Elektrik Şebekesi
	Gazlaştırma Sistemi + Biyogaz Kojenerasyon Sistemi	Gazlaştırma Sistemi + GES	Gazlaştırma Sistemi + RES	Gazlaştırma Sistemi + Elektrik Şebekesi
25 Yılda Toplam Maliyet	€ 68.192.175	€ 83.405.825	€ 83.081.633	€ 112.436.527
25 Yılda Hidrojen Üretimi	10.414.624 kg	10.414.624 kg	10.414.624 kg	10.414.624 kg
Birim Maliyet	6,55 €/kg	8,01 €/kg	7,98 €/kg	10,80 €/kg

Bandırma ilçesinde toplam biyokütle atık miktarı yılda 127.345 ton' dur. Biyokütle atıklarının değerlendirilmesi durumunda Yapılan fizibilite hesap sonuçları dikkate alınarak elde edilen sonuçlar Tablo 7.14' de sunulmuştur.

Tablo 7-14. Bandırma 25 yıllık hidrojen üretim kapasitesi

Parametre	Değer
Bandırma Orman Atık Miktarı	3.183.625 ton
1 Kg Orman Atığı Hidrojen Üretim Miktarı	0,105 kgH ₂ / kgBiomass
Üretilen Hidrojen Miktarı	347.156 ton
Elektrik Enerji Tüketimi	20.693.563 MWh
Su Tüketimi	6.069.992 ton

Tablo 7.14 deki verilere göre gerekli olan elektrik ihtiyacının biyogaz kojenerasyon sistemi, GES ve rüzgar türbini ile sağlanması durumunda gerekli olan kapasite miktarı Tablo 7.15' de verilmiştir.

Tablo 7-15. Bandırma ilçesindeki toplam biyokütlenin kullanımı durumundaki enerji üretim sistem verileri

Parametre	Değer
Biyogaz Sistem Kurulu Gücü	16.187 kW
Biyogaz Üretiminde Kullanılan Gübre Miktarı	1.819.295 ton/yıl
GES Kurulu Gücü	49.272 kW
Rüzgar Türbini Kurulu Gücü	32.373 kW

Bandırma ilçesi gazlaştırma sistemindeki elektrik ihtiyacını karşılayacak gübre miktarına sahiptir ve 16 MW kurulu güce sahip biyogaz tesis kurulumu yeterli olacaktır. Kapasite arttıkça biyogaz kojenerasyon sistemi kurulum maliyetleri düşecektir. Elektrik ihtiyacının PV panel ile karşılanması durumunda 49,3 MW kurulu güce sahip olması gerekmektedir. Elektrik ihtiyacı rüzgar türbini ile karşılanması durumunda 32,4 MW kurulu güce sahip olması gerekmektedir. Toplam kapasitenin artması durumunda sistem kurulum maliyetlerinin düşeceği öngörülmektedir.

Son yıllarda yapılan biyokütle gazlaştırma sistemi ile hidrojen üretimi fizibilite çalışmaları incelenmiştir ve Tablo 7.16' da sunulmuştur. Üretilen hidrojen ve kullanılan biyokütle miktarına göre, hidrojen birim maliyetlerine bağlı olarak değişmektedir. Yapılan tez çalışmasında literatür çalışmalarına yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

Tablo 7-16. Biyokütle gazlaştırma sistemi ile üretilen hidrojen birim fiyatları

Birim Fiyat (€/Kg)	Üretilen Hidrojen (kg/h)	Biyokütle (kg/h)	Biyokütle Türü	Kullanılan Sistem	Reaktan	Referans
2,70	1.506,02	15.842	Odun talaşı	Çift akışkan yataklı gazlaştırma	Buhar	(Bioenergy, I.E.A,2018)
5,49	30,12	657	Odun talaşı	Geliştirilmiş çift akışkan yataklı gazlaştırma	Buhar	(Bioenergy, I.E.A,2018)
7,00	5,80	100	Orman atıkları	Akışkan yataklı gazlaştırma	Buhar	(Martins, 2022)
10,00	5,31	100	Orman atıkları	Plazma gazlaştırma	Buhar	(Martins, 2022)
13,00	5,91	100	Orman atıkları	Süperkritik su gazlaştırma	Buhar-hava	(Martins, 2022)
1,93	4.518	58.660	Talaş	Termal Gazlaştırma sistemi	Buhar-hava	(Cormos, 2022)
2,35	4.518	58.660	Talaş	Termal Gazlaştırma sistemi (Kimyasal absorpsiyonlu karbon yakalama sistemi)	Buhar-hava	(Cormos, 2022)
2,13	4.518	58.660	Talaş	Termal Gazlaştırma sistemi (Membran karbon yakalama sistemi)	Buhar-hava	(Cormos, 2022)
2,39	4.518	58.660	Talaş	Termal Gazlaştırma sistemi (Hibrit solvent membranlı karbon yakalama sistemi)	Buhar-hava	(Cormos, 2022)

8. TARTIŞMA VE SONUÇ

Biyokütle gazlaştırma yoluyla hidrojen üretimi açısından ülkemiz yüksek bir potansiyele sahiptir. Biyokütle gazlaştırma yoluyla hidrojen üretimi ülkemizde orman atıklarının yoğun olduğu her alanda üretilebilir. Hidrojen, depolanması ve iletilmesi ayrı bir maliyet oluşturduğu dikkate alındığında hidrojen üretim tesisi, hidrojen ihtiyacı olan sanayi bölgelerinin yakınlarında kurulumu önem arz ettiği görülmektedir. Bu nedenle hidrojen üretim tesislerinin konumu stratejik açıdan çok önemlidir. Bandırma ilçesi ve çevre illerinde, sanayi, enerji üretim, tarım ve hayvancılık sektöründe gelişmiştir. Ayrıca büyük bir limana sahip olması Bandırma ilçesinde hidrojen ticaretinin oluşmasında olanak sağlayabilir.

Bölgesel olarak gazlaştırma yoluyla hidrojen üretim tesisleri kurulabilir. Hidrojen sektörü iş gücü potansiyelini de artırabilir. Enerjideki dışa bağımlılığı azaltabilir.

Daha büyük kapasitede biyokütle hidrojen üretim tesislerinin kurulması ve en uygun alternatif enerji kaynağı kullanılması, hidrojen üretim maliyetlerinin düşmesinde etkili olacağı görülmüştür.

9. KAYNAKLAR

- Abuadala, A. G. (2010). Investigation of sustainable hydrogen production from steam biomass gasification (Doctoral dissertation).
- Aktaş, M. (2019). Biyogaz üretiminde enerji maliyetinin saptanması (Master's thesis, Namık Kemal Üniversitesi).
- Alves, O., Calado, L., Panizio, R. M., Gonçaves, M., Monteiro, E., & Brito, P. (2021). Techno-economic study for a gasification plant processing residues of sewage sludge and solid recovered fuels. *Waste Management*, 131, 148-162.
- Aslantaş, A. (2018). Dünyada ve Türkiyede biyokütle enerjisinin kullanımı ve potansiyeli (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Ayan A. (2022)Biyokütle Enerjisinin Türkiye'deki Kullanım Olanaklarının Değerlendirilmesi Maltepe Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Teknolojileri ve Yönetimi Anabilim Dalı Enerji Etkin Yapılar Yüksek Lisans Programı
- Baş, K. (2018). Türkiye'de Sürdürülebilir Enerji Ve Kooperatiflerin Rolü Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
- Bioenergy, I. E. A., Binder, M., Kraussler, M., Kuba, M., & Luisser, M. (2018). Hydrogen from biomass gasification. *IEA Bioenergy*.
- Çağal, F. E. (2009). Biyokütle enerjisi potansiyelinin Türkiye açısından değerlendirilmesi (Master's thesis, Enerji Enstitüsü).
- Cormos, C. C., Dragan, M., Dinca, C., Cormos, A. M., Dragan, S., & Galusnyak, S. C. (2022). Economic Assessment of Green Hydrogen Production from Biomass Gasification with Chemical Absorption and Membrane-based CO₂ Capture. *Chemical Engineering Transactions*, 94, 277-282.
- Çevik, M. (2017). Güneş ve hidrojen enerjisi esaslı alternatif hibrit bir enerji sisteminin geliştirilmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Dalcalı, A., Çelik, E., (2022). Rüzgar Türbinleri için Mıknatıs Şekli ve Stator Oluk Eğriliği Dikkate Alınarak SMSG' nin Karakteristik Analizi Al Farabi 4th International Congress On Applied Sciences
- Deloitte, 2014. Biyokütlenin Altın Çağı
- Demirel, E. (2018). Biyokütlenin süperkritik su ortamında gazlaştırılmasıyla hidrojen üretimi ve termodinamik modellenmesi (Doctoral dissertation, Anadolu University (Turkey)).
- Dincer, I., Eroğlu, İ., & Öztürk, M. (2021). Türkiye için hidrojen teknolojileri yol haritası. *Hidrojen Teknolojileri Derneği*, 978.

- Dincer, I., Javani, N., & Karayel, G. K. (2021). Türkiye için Hidrojen Çiftliği Konsepti Raporu.
- Dursun, N. (2018). Anaerobik biyoreaktörlerde atık çörek otundan (*Nigella sativa*) biyohidrojen eldesi verimliliğinin araştırılması.
- Enerji Atlası, Erişim:<https://www.enerjiatlası.com/ruzgar/>
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, “Elektrik Piyasası Tarifeler Listesi,” Erişim: <https://www.epdk.gov.tr/detay/icerik/3-0-1/tarifeler>, 14.03.2024.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası,” Erişim: <https://enerji.gov.tr/duyuru-detay?id=20316>, 01.05.2024.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, “Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası,” Erişim: <https://bepa.enerji.gov.tr/>, 2024.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, “Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası,” Erişim: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Raporları,” Erişim: <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>, 2024.
- Enerji, T. C., & Bakanlığı, T. K. (2023). Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası. Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/short-term-business-statistics/database>, Access: 21.04.2024.
- Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/short-term-business-statistics/database>, Access: 21.04.2024.
- Ewang, D. S. (2020). Feasibility study for a 300kW pilot scale hydrogen production process from wood biomass: The case of Sandviksverket, Växjö.
- Fang, Y., Ma, L., Yao, Z., Li, W., & You, S. (2022). Process optimization of biomass gasification with a Monte Carlo approach and random forest algorithm. *Energy Conversion and Management*, 264, 115734.
- Guo, J. X., Tan, X., Zhu, K., & Gu, B. (2022). Integrated management of mixed biomass for hydrogen production from gasification. *Chemical Engineering Research and Design*, 179, 41-55.
- Habash R 2018 Güneş Tabanlı Hidrojen Enerjisi Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- <https://about.bnef.com/blog/green-hydrogen-to-undercut-gray-sibling-by-end-of-decade/>(2024)
- <https://bepa.enerji.gov.tr/> BEPA (2024)
- http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/3_35.html(20024)

- <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Donemsel-Gayrisafi-Yurt-Ici-Hasila-IV.-Ceyrek:-Ekim-Aralik-ve-Yillik,-2023-53756>
- <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari> (EİGM,2024)
- <https://utahcleancities.org/>. 2021
- <https://www.balsu.gov.tr/index.php?sid=168>, Access: 04.06.2024.
- https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (TEİAŞ 2024)
- Ibrahim, A., Veremieiev, S., & Gaskell, P. H. (2022). An advanced, comprehensive thermochemical equilibrium model of a downdraft biomass gasifier. *Renewable Energy*, 194, 912-925.
- IEA, P. (2022). *World energy outlook 2022*. Paris, France: International Energy Agency (IEA).
- IRENA (2024), *Renewable capacity statistics 2024*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- Karaismailoğlu, M. (2019). *Hidrojen Üretimi Amacıyla Metal Katalizörlerin Geliştirilmesi*(Master's thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi (Turkey)).
- Karakuş Y. (2013) *Süperkritik Su Ortamında 2-Propanolün Ni/Al₂O₃ Ve Ru/Al₂O₃ Katalizörü Kullanılarak Gazlaştırılması* Yüksek lisans Tezi Yıldız teknik Üniversitesi Kümya Mühendisliği
- Karan, S., & Fakültesi, M. Ankara İli Beypazarı İlçesinin Biyogaz Üretim Potansiyelinin Araştırılması.
- Kılınç, N. (2008). *Hidrojen enerjisinin ve hidrojen teknolojilerinin ekonomideki yeri pazar gelişimi ve pazar payı üzerine bir araştırma* (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- Konyali, İ. (2019). *Türkiye için mevcut enerji üretimine alternatif yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının seçimi* (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Korkmaz, B., & Hacısalihoğlu, S. (2024). *Fotovoltaik ve biyogaz enerji sistemlerinin enerji ve çevresel potansiyellerinin incelenmesi: süt sığırcı çiftliği örneği*.
- Kumar, P., Subbarao, P. M. V., Kala, L. D., & Vijay, V. K. (2023). Experimental assessment of producer gas generation using agricultural and forestry residues in a fixed bed downdraft gasifier. *Chemical Engineering Journal Advances*, 13, 100431.
- Kükrer, B. (2007). *Hidrojen enerjisinin gelişme potansiyeli ve Türkiye ekonomisi açısından değerlendirilmesi* (Master's thesis, Anadolu University (Turkey)).
- Küsek, G., Güngör, C., ÖZTÜRK, H. H., & Akdemir, Ş. (2015). *Tarımsal artıklardan biyopelet üretimi*. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2).

- Martins A.H. (2022) Biomass gasification as a way of producing green hydrogen: modelling and simulation in Aspen Plus (Master's thesis, U.Porto).
- Meramo-Hurtado, S. I., Puello, P., & Cabarcas, A. (2020). Process analysis of hydrogen production via biomass gasification under computer-aided safety and environmental assessments. *ACS omega*, 5(31), 19667-19681.
- Mert, M. S., Yüksel, F., & Burulday, M. E. (2019). Biyokütle Kaynaklı Sentez Gazından Hidrojen Üretimine Entegre Bir Güç Sisteminin Modellenmesi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 12(2), 607-619.
- O.Alves, L. Calado, R.M. Panizio, M. Gonçaves, E. Monteiro, P. Brito, “Techno-economic study for a gasification plant processing residues of sewage sludge and solid recovered fuels,” *Waste Management*, vol. 131, pp. 148-162, 2021.
- Özdemir, M. “Gaziantep ili biyogaz potansiyelinin araştırılması ve çiftlik tipi 50 m3 kapasiteli biyogaz tesis tasarımı,” Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, 2023.
- Özdemir, Z. Ö., & Mutlubaş, H. Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri.
- Özersalan, S. (2021) Çay Fabrikası Atıklarının Hidrojen Üretimi Ve Enerji Depolanmasında Çok Yönlü Kullanımının Araştırılması (Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Özkara, G. (2018) Biyokütleden hidrojen üretiminin simülasyonu ve katalitik filtrenin ürün gazı üzerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Spath, P., Aden, A., Eggeman, T., Ringer, M., Wallace, B., Jechura, J., “Biomass to Hydrogen and Economics Utilizing the Battelle Columbus Laboratory Indirectly Heated Gasifier,” *National Renewable Energy Laboratory, Colorado*, 2005.
- Rabea, K., Michailos, S., Akram, M., Hughes, K. J., Ingham, D., & Pourkashanian, M. (2022). An improved kinetic modelling of woody biomass gasification in a downdraft reactor based on the pyrolysis gas evolution. *Energy Conversion and Management*, 258, 115495.
- Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R. G., & Prest, B. C. (2024). *Global Energy Outlook 2024: Peaks or Plateaus*.
- Resmi Gazete, “Enerji Verimliliği Kanunu,” Erişim: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/05/20070502-2.htm>, 01.03.2024.
- Resmi Gazete, “Ulaşımında Enerji Verimliliğinin Artırılmasına İlişkin Usul Ve Esaslar Hakkında Yönetmelik,” Erişim: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/05/20190502-5.htm>, 01.03.2024.

- S.I. Meramo-Hurtado, P. Puello, A. Cabarcas, "Process Analysis of Hydrogen Production via Biomass Gasification under Computer-Aided Safety and Environmental Assessments," ACS Omega, 5 (31), pp. 19667-19681, 2020.
- S.K. Sansaniwal, K. Pal, M.A. Rosen, S.K. Tyagi, "Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 72, pp. 363-384, May 2017.
- Salam, M. A., Ahmed, K., Akter, N., Hossain, T., & Abdullah, B. (2018). A review of hydrogen production via biomass gasification and its prospect in Bangladesh. International journal of hydrogen energy, 43(32), 14944-14973.
- Santasnachok, M., & Nakyai, T. (2022). Exergetic and environmental assessments of hydrogen production via waste tire gasification with co-feeding of CO2 recycled. Energy Reports, 8, 859-867.
- Seçer, A.(2019). Kömür ve Kömür-Biyokütle Karışımlarından Hidrojen Eldesi: Çukurova Üniversitesi Kimya Anabilimdalı Doktora Tezi
- Sorgulu. F. (2023) Experimental And Modeling Studies On Green Hydrogen Production And Blending With Natural Gas Through Integrated Systems (Doctor of Philosophy Thesis Yıldız Technical University Graduate School Of Science And Engineering)
- Spallina, V., Motamedi, G., Gallucci, F., & van Sint Annaland, M. (2019). Techno-economic assessment of an integrated high pressure chemical-looping process with packed-bed reactors in large scale hydrogen and methanol production. International Journal of Greenhouse Gas Control, 88, 71-84.
- Şen, O, 2021 Jeotermal Güneş Enerjisinin Elektrik Ve Hidrojen Üretiminde Isıtma Ve Soğutma İçin Kullanılmasının Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi, Termodinamik Analizi Ve Optimizasyonu Afyon Koatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Şenaktaş, B. (2005). Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- TSKB (2021)Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu | Mayıs 2021
- Tuan, P. D., Nhi, V. T., Huong, H. M., & Feng, D. (2022). Enrichment of hydrogen in product gas from a pilot-scale rice husk updraft gasification system. Carbon Resources Conversion, 5(3), 231-239.
- Türkiye İstatistik Kurumu, "Sera Gazı Emisyon İstatistikleri," Erişim: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672>, 2024.

- Türkiye İstatistik Kurumu, “Yıllık Gayrisafi Yurt İçi Hasıla,” Erişim: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Yillik-Gayrisafi-Yurt-Ici-Hasila-2022-49742>, 2024.
- Utah Clean Cities and Communities, Erişim: <https://utahcleancities.org/>, 03.03.2024.
- V. Spallina, G. Motamedi, F. Gallucci, M.S.V. Annaland, “Techno-economic assessment of an integrated high pressure chemical-looping process with packed-bed reactors in large scale hydrogen and methanol production,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 88, pp. 71-84, 2019.
- Yük Tevzi Bilgi Sistemi, “Türkiye Elektrik İstatistikleri,” Erişim: https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf, 2024.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Hakkı ÖNER
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Yalova Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Enerji Sistemleri Bölümü
Mezuniyet Yılı	2015

Yüksek Lisans	
Üniversite	Bandırma Onyediy Eylül
Enstitü Adı	Gönen Jeotermal Enstitüsü
Anabilim Dalı	Alternatif Enerji Kaynakları
Programı	Yüksek Lisans

Makale ve Bildiriler	
Öner, H., Çoban, K., Dalcalı, A., “Feasibility Analysis of Biomass Gasification for Green Hydrogen Production in Turkey: A Case Study of Bandırma” (IGSCONG’24)	