



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

EV TİPİ ATIK SU HİDROJEN DÖNÜŞÜM CİHAZI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan DEMİR

Danışman: Doç. Dr. Levent GÖKREM

TOKAT- 2025

ETİK SÖZLEŞME



JÜRİ KABUL VE ONAY



ÖZET

EV TİPİ ATIK SU HİDROJEN DÖNÜŞÜM CİHAZI

DEMİR Hakan

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Levent GÖKREM

Ocak 2025, xi + 91 sayfa

Modern toplumların kalkınması ve sürdürülebilirliğin sağlanması açısından değerlendirildiğinde enerji, önemli bir yere sahiptir. Fosil yakıtların kullanımının yol açtığı çevresel zararlar, sınırlı doğası ve sera gazı emisyonları, uzun vadede enerji güvenliğini tehdit eden unsurlar olarak ifade edilmektedir. Araştırmalar, kullanılacak enerji kaynaklarının hem yenilenebilir hem de çevre dostu olmasının, sürdürülebilir bir gelecek için önemli olduğunu göstermiştir.

Hidrojen gazı yüksek enerji yoğunluğu, temiz yanma özellikleri ve çok yönlü kullanım alanlarına sahip olması nedeniyle potansiyel enerji taşıyıcısı olarak nitelendirilebilir. Bilimsel çalışmalarda hidrojenin üretimi, depolanması ve kullanımına dair farklı yöntemler araştırılmakta, atık su gibi düşük maliyetli kaynaklardan hidrojen elde etmek için yenilikçi çözümler geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, atık suların hidrojen üretimini sağlamak ve elektrolize olmuş suyun yeniden değerlendirilmesi gibi konular üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle sanayi bölgelerinde ortaya çıkan atık suların kimyasal madde kullanmadan ayrıştırılması ve elektroliz sürecinde hidrojen üretilmesi çevresel sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Endüstriyel atık suların yanı sıra, evlerden çıkan atık suların da potansiyel enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi mümkündür. Bu tezde evlerde oluşan atık suların, tasarlanan hidrojen cihazına yönlendirilerek ayrıştırılması ve bu işlemde elde edilen hidrojenin yakıt, ısıtma ve elektrik enerjisi üretiminde kullanımı üzerine durulacaktır.

Ayrıca bu cihazın tasarım aşamaları, kullanılan malzemeler, cihazın çalışma prensipleri, kontrol programı, elektrolize olan suyun analizi, üretilen hidrojenin kullanılabilirliği ve tüketilen elektrik enerjisi konuları ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır. Çalışmanın sonucunda, hidrojenin çevresel etkileri azaltma potansiyeli ile birlikte enerji güvenliği ve verimliliğine katkıda bulunacak bir çözüm sunulması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, Enerji, Sürdürülebilirlik, Verimlilik, Atık su, Yenilenebilir enerji, Hidrojen Cihazı, Hidrojen Üretimi

ABSTRACT

DOMESTIC TYPE WASTE WATER HYDROGEN TRANSFORMATION DEVICE

DEMİR Hakan

Master's Thesis, Electrical-Electronic Engineering

Advisor: Asc. Prof. Dr. Levent GOKREM

January 2025, xi + 91 pages

Energy has an important place in the development and sustainability of modern societies. The environmental damage caused by the use of fossil fuels, their finite nature and greenhouse gas emissions are considered as threats to energy security in the long term. Research has shown that it is important for a sustainable future that the energy sources to be used are both renewable and environmentally friendly.

Hydrogen gas can be characterized as a potential energy carrier due to its high energy density, clean combustion properties and versatile uses. Scientific studies are investigating different methods for the production, storage and utilization of hydrogen, and innovative solutions are being developed to obtain hydrogen from low-cost sources such as wastewater.

In this study, it has been focused on issues such as hydrogen production from wastewater and reuse of electrolyzed water. Especially the separation of wastewater generated in industrial zones without the use of chemicals and the production of hydrogen in the electrolysis process is important for environmental sustainability. In addition to industrial wastewater, wastewater from households can also be utilized as a potential energy source. This thesis will focus on the separation of wastewater from households by directing it to the designed prototype hydrogen device and the use of the hydrogen obtained from this process in fuel, heating and electrical energy production.

In addition, the design stages of this device, the materials used, the working principles of the prototype, the control program, the analysis of the electrolyzed water, the analysis of the hydrogen produced and the electrical energy consumed will be explained in detail. At the end of the study, it is aimed to present a solution that will contribute to energy security and efficiency along with the potential of hydrogen to reduce environmental impacts.

Keywords: Hydrogen, Energy, Sustainability, Efficiency, Wastewater, Renewable energy, Hydrogen Device, Hydrogen Production

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından sonuna kadar özveri ile çalıştığım her aşamada bilgi, deneyim ve emekleri ile yanımda olan kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Levent GÖKREM'e, tüm bölüm hocalarıma, atık su analizinde desteklerini esirgemeyen Analitik Kimya Anabilim Dalı hocalarım Prof. Dr. Demirhan ÇITAK'a, Prof. Dr. Ömer IŞILDAK'a ve Doç. Dr. Alper BİÇER'e çok teşekkür ederim. Ayrıca şimdiye kadar beni hep destekleyen sevgili aileme ve arkadaşlarıma da teşekkürlerimi borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

ETİK SÖZLEŞME	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
ÖZET	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	5
3.1. Hidrojen.....	5
3.1.1. Hidrojenin Tarihçesi	7
3.1.2. Dünyada ve Türkiye’de Hidrojen Enerjisi	8
3.1.3. Hidrojen Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları.....	13
3.1.4. Hidrojen Enerjisinin Kullanım Alanları	15
3.2. Hidrojen Üretim Yöntemleri	17
3.2.1. Fotobiyolojik Hidrojen Üretimi	18
3.2.2. Fotoelektrokimyasal Hidrojen Üretimi	20
3.2.3. Hidrojenin Termokimyasal Yöntemle Üretilmesi	22
3.2.4. Buhar Yapılandırması ile Hidrojen Üretimi	23
3.2.5. Kömürün Gaz Haline Dönüştürülmesi Yöntemiyle Hidrojen Üretimi ...	24
3.2.6. Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi	25
3.3. Hidrojen Depolama Yöntemleri	29
3.2.1. Sıkıştırılmış Gaz Olarak Depolama	29
3.2.2. Hidrokarbonlar ile Depolama	31
3.2.3. Hidrürler ile Depolama	31
3.2.4. Karbon ve Nano tüpler ile Depolama	32
3.2.5. Sentetik Karbon ile Depolama	33
3.2.6. Cam Küreler ile Depolama	34
4. MATERYAL VE YÖNTEM	35
4.1. TIA Portal (Totally Integrated Automation)	35
4.1.1. PLC (Programmable Logic Controller) ve Bağlantıları	35
4.1.2. Siemens KP300 Basic Mono PN HMI Panel ve Bağlantıları.....	38
4.1.3. Programın Mantığı ve Yapısı	41
4.1.4. Etiket ve Adres Kullanımı	42
4.1.5. Güvenlik Prosedürleri ve Acil Durdurma Fonksiyonu.....	45
4.1.6. Program Kodları ve Kontak Planı	46

4.2.	Cihazın Mekanik Yapısı	48
4.2.1.	Cihazın Mekanik Tasarımı.....	48
4.2.2.	Cihazın Mekanik Bileşenleri	51
4.3.	Cihazın Elektriksel Bileşenleri	59
4.3.1.	Güç Kaynağı ve Dağıtım Sistemi	59
4.3.2.	Kontrol Paneli ve Kontrol Devreleri.....	59
4.3.3.	Sensör Bağlantıları.....	60
4.3.4.	Elektronik Selenoid Valf ve Sirkülasyon Pompalarının Bağlantıları	62
4.3.5.	Hidrojen Reaktörü Elektriksel Bağlantıları	64
4.3.6.	Acil Durdurma Butonu ve Güvenlik Devreleri.....	65
4.3.7.	Topraklama ve Koruma Bağlantıları	68
4.3.8.	Kablolama ve Kablo Düzenleme Yapısı.....	69
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	71
6.	SONUÇ.....	84
7.	KAYNAKÇA	85
8.	ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

CO_2

H_2

H_2O

O_2

CH_4

CO

H

$NaBH_4$

$LiBH_4$

H^+

e^-

TiO_2

F_2O_3

$BiVO_4$

Si

$GaAs$

CdS

ZnO

H_2S

kWh

KOH

V

A

W

S

P_1

V_1

I_1

P_2

V_2

I_2

$P_{Elektroliz}$

$V_{Elektroliz}$

$I_{Elektroliz}$

$P_{Bileşen}$

P_{PLC}

P_{HMI}

P_{Valf}

$P_{Sıvı Seviye}$

$P_{Basınç}$

P_{Pompa}

J

$A_{Toplam Plaka Yüzey Alanı}$

Z

Açıklamalar

Karbondiyoksit

Hidrojen Molekülü

Su Molekülü

Oksijen Molekülü

Metan

Karbonmonoksit

Hidrojenin Sembolü

Sodyum Borhidrür

Lityum Borohidrit

Hidrojen İyonu

Elektron

Titanyum dioksit

Demir Oksit

Bizmut Vanadat

Silisyum

Galyum Arsenit

Kadmiyum Sülfür

Çinko Oksit

Hidrojen Sülfür

Kilowatt Saat

Potasyum Hidroksit

Volt

Amper

Watt

Siemens

Elektroliz Ünitesi Güç Kaynağı Gücü

Elektroliz Ünitesi Güç Kaynağı Gerilimi

Elektroliz Ünitesi Güç Kaynağı Akımı

Elektronik Bileşen Güç Kaynağı Gücü

Elektronik Bileşen Güç Kaynağı Gerilimi

Elektronik Bileşen Güç Kaynağı Akımı

Elektroliz Esnasında Harcanan Güç

Elektroliz Gerilimi

Elektroliz Akımı

Elektronik Bileşenlerin Harcadığı Toplam Güç

PLC Harcanan Güç

HMI Harcanan Güç

Valfler Harcanan Güç

Sıvı Seviye Rölelerinin Harcadığı Güç

Basınç Sensörünün Harcadığı Güç

Pompaların Harcadığı Güç

Akım Yoğunluğu

Anot ve Katot Plaklarının Toplam Yüzey Alanı

Hidrojen İçin Elektron Sayısı

n_{H_2}	Teorik Olarak Üretilen Hidrojenin Mol Sayısı
F	Faraday Sabiti
t	Zaman (sn)
Q	Elektrik Yüğü (Coulomb)
$V_{H_{Teorik}}$	Hidrojenin Teorik Litre Değeri
T	Sıcaklık (K)
P	Atmosfer Basıncı
RE_{ohmik}	Elektrolit Ohmik Direnci
RP_{ohmik}	Elektrot Ohmik Direnci
d	Elektrotlar Arası Mesafe
E_{σ}	Elektrolit Sıvının İletkenliği
P_{σ}	Elektrot Plakanın İletkenliği
PE_{ohmik}	Elektrolit Ohmik Güç
PP_{ohmik}	Elektrot Ohmik Güç
$\eta_{aktivasyon}$	Aktivasyon Kayıp Voltajı
J_0	Değişim Akım Yoğunluğu
$P_{aktivasyon}$	Aktivasyon Gücü
$\eta_{konsantrasyon}$	Konsantrasyon Kayıp Voltajı
$P_{konsantrasyon}$	Konsantrasyon Gücü
$P_{kutuplanma}$	Kutuplanma Gücü
η	Elektroliz Verimi
$\eta_{Hidrojen}$	Üretilen Hidrojen Verimi
$PK_{Elektroliz}$	Kayıplar Sonrası Elektroliz Gücü
$V_{Hölçülen}$	Hidrojenin Ölçülen Litre Değeri
$P_{Harcanan}$	Harcanan Toplam Güç

Kısaltmalar

CCUS
 PEM
 NASA
 ZEROe
 PEC
 PSA
 HTE
 SOEC
 MEC
 TIA
 PLC
 PH
 HMI
 SCADA
 IP
 LPG
 PFC
 NC
 KAKR

Açıklamalar

Karbon Yakalama ve Depolama Teknolojisi
 Polimer Elektrolit Membran
 Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
 Sıfır Emisyon
 Fotoelektrokimyasal
 Basıncı Salınımlı Adsorpsiyon
 Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz
 Katı oksit Elektroliz Hücresi
 Mikrobiyal Elektroliz Hücresi
 Tam Entegre Otomasyon
 Programlanabilir Mantık Kontrolleri
 Potansiyel Hidrojen
 İnsan-Makine Arayüzü
 Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
 İnternet Protokolü
 Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
 Güç Düzeltme Faktörü
 Normalde Kapalı
 Kaçak Akım Koruma Rölesi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3. 1. Hidrojen molekülünün özellikleri (www.kiwa.com, 2023).....	6
Şekil 3. 2. Hidrojen molekülünün farklı sıcaklıklarda faz değişimi ve özgül ağırlığı (www.kiwa.com, 2023).	6
Şekil 3. 3. Hidrojenin kronolojik gelişimi	8
Şekil 3. 4. Hidrojen üretiminin sınıflandırılması	9
Şekil 3. 5. Düşük salınımlı hidrojen üretim hedefleri (International Energy Agency., 2023).	11
Şekil 3. 6. Hidrojenin kullanım alanları.....	15
Şekil 3. 7. Hidrojen üretim yöntemleri (Yıldırım ve ark., 2023).	18
Şekil 3. 8. Direkt fotobiyolojik üretim (Şentürk ve Büyükgüngör, 2010).	18
Şekil 3. 9. Klorofil taşıyan bitkiler tarafından fotosentez ve bir fotokatalizör varlığında suyun fotokatalitik ayrışması reaksiyonu (yapay fotosentez) (Kudo ve Miseki, 2009). 21	
Şekil 3. 10. Buhar-metan reformasyonu ile hidrojen üretim tesisinin blok akış diyagramı (Spath ve Mann, 2000).	24
Şekil 3. 11. Suyun elektrolizi (Türk ve Engin, 2024).	26
Şekil 4. 1. Ev tipi hidrojen atık su dönüşüm cihazının PLC giriş ve çıkış bağlantıları ..	37
Şekil 4. 2. HMI operatör panel bağlantısı	39
Şekil 4. 3. HMI panel buton atama	40
Şekil 4. 4. Harici gaz alarm dedektörünün yapısı	46
Şekil 4. 5. Cihazın HMI panel üzerinden çalıştırılması	47
Şekil 4. 6. Cihazın iskelet yapısı.....	49
Şekil 4. 7. Hidrojen jeneratörü.....	51
Şekil 4. 8. 316L kullanılarak tasarlanan elektrotlar	52
Şekil 4. 9. Atık su depolama ve filtreleme.....	53
Şekil 4. 10. Gaz ayırma ve arıtma mekanizması.....	54
Şekil 4. 11. Cihazın boru hatları ve bağlantı elemanları.....	55
Şekil 4. 12. Hidrojen depolama tüpleri	56
Şekil 4. 13. Hidrojen gazı set üstü ocağı.....	58
Şekil 4. 14. Hidrojen gazı set üstü ocağı tasarımı.....	58
Şekil 4. 15. Kontrol panelinin cihaza entegrasyonu ve bağlantı noktaları	60
Şekil 4. 16. Sensörlerin yerleşimi ve bağlantı noktaları	62
Şekil 4. 17. Elektronik selenoid valf ve sirkülasyon pompalarının bağlantıları	63
Şekil 4. 18. Reaktör hücresine elektrik akımının iletimi ve bağlantı noktaları	64
Şekil 4. 19. Acil durdurma butonu elektrik bağlantıları	65
Şekil 4. 20. Gaz alarm dedektörü elektrik bağlantıları	67
Şekil 4. 21. Kablo kanallarının düzenlenmesi ve yerleşimi.....	70
Şekil 5. 1. Cihazın toplam güç diyagramı.....	71
Şekil 5. 2. Hidrojen reaktörünün elektroliz esnasındaki ölçüm değerleri.....	72
Şekil 5. 3. PEM yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi (Blanco-Cocom L ve ark., 2022) 73	
Şekil 5. 4. Alkali elektrolizde değişim akımı yoğunluğunun belirlenmesi (Bard ve Faulkner, 1983).	78

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3. 1. Hidrojenin ve diğer yakıtların temel özelliklerinin karşılaştırılması (Felseghi ve ark., 2019).	17
Çizelge 4. 1. PLC etiket adı ve adreslemeleri	43
Çizelge 5. 1. Değişik türdeki atık suların karakterizasyonu	74
Çizelge 5. 2. Literatürdeki çamaşır makinası atık sularının karakterizasyonu	75
Çizelge 5. 3. Metal ve alaşımlardan bazılarının iletkenlik ölçümleri	77
Çizelge 5. 4. Alkali elektroliz elektrokimyasal denklemleri	77
Çizelge 5. 5. Kutuplanma kayıplarını oluşturan güç değerleri	80
Çizelge 5. 6. Elektronik bileşenlerin güç değerleri.....	82

1. GİRİŞ

Enerji evrende oldukça önemli bir yere sahiptir. Enerjiye olan talebin artması ve kullanılan kaynakların sınırlı oluşu, sektörü yeni alternatiflere yöneltmiştir. Günümüzde yoğun olarak kullanılan fosil yakıtlar, enerji ihtiyacını karşılamak için temel kaynaklar arasında gösterilse de bu kaynakların olumsuz etkileri oldukça fazladır. Karbon emisyonlarının yoğunluğu gelecekte dünya üzerinde çözülmesi mümkün olmayan problemlere yol açabilir. Ayrıca bu yakıtların sınırlı rezerve sahip olması, enerji güvenliğini tehlikeye düşürmektedir. Bu durum, yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına olan yönelimi arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen enerji, son derece doğa dostu olsa da bu kaynakların tam kapasite çalışarak üretim yapmaları sınırlıdır. Güneş enerjisi ile üretim yalnızca güneş ışığının olduğu zamanlarda sağlanırken; rüzgâr enerjisi ile üretim yalnızca uygun rüzgâr koşullarında sağlanmaktadır. Doğanın dengesi ile alakalı olan bu durum sistemde kesintilere neden olmaktadır. Bu bağlamda oluşan kesintili enerji sorunu için enerji depolama çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanım potansiyeli, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanarak ve ihtiyaç halinde tekrar kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi kesintili kaynaklardan elde edilen enerjinin hidrojen formunda depolanarak ihtiyaç halinde tekrar kullanılması mümkün olabilir (Balat ve Kırtay, 2010). Enerjinin taşınması özelliği ile dikkat çeken hidrojenin, bu konuda oldukça değerli olduğu düşünülmektedir.

Fosil yakıtların olumsuz etkileri düşünüldüğünde, hidrojenin yakılması sonucunda ortaya çıkan su moleküllerinin çevre açısından oldukça avantajlı olduğu düşünülebilir. Ayrıca hidrojenin yenilenebilir enerji kaynakları entegrasyonu ile üretilmesi, enerjinin ekonomikliği açısından kritik öneme sahiptir. Elektroliz yönteminin yenilenebilir enerji kaynakları ile gerçekleştirilmesi sıfır karbon hedeflerine ulaşabilme noktasında dönüm noktası olabilir.

Atık suların hidrojen üretimi için değerlendirilmesi hem enerji dönüşümü hem de su kıtlığının yaşandığı küresel problemler göz önüne alındığında; su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir. Özellikle sanayi bölgelerinde kullanılan atık suların kimyasal yöntemler kullanılmadan ayrıştırılması ve süreç esnasında hidrojenin üretilmesi yenilikçi bir yaklaşımın öncüsü olabilir (Genç, 2009).

Hidrojen üretiminde atık suların kullanılması bireysel enerji bağımsızlığı ve sıfır emisyonu dayalı enerji sistemi oluşturmanın önemli bir adımı olarak değerlendirilebilir. Bu bağlamda yapılacak Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı, atık suların mikro düzeyde ayrışmasını sağlayarak karbon emisyonlarının olmadığı tamamen çevre dostu bir hidrojen üretimine olanak tanıyacaktır. Elde edilen hidrojenin ısıtma sistemlerinde kullanılması veya elektrik enerjisine dönüştürülerek farklı enerji alanlarına yönlendirilmesi gibi farklı kullanım senaryoları ile cihazın etkisi artırılabilir.

Yapılan araştırmalarda karbon nanotüplerin, hidrojen depolama kapasitesinin artırılmasında etkili bir yöntem olarak değerlendirilebileceği ifade edilmiştir (Cheng ve ark., 1999). Bu bağlamda bu tür yenilikçi ve teknolojik ürünlerin yapılacak cihazın performansını artırma noktasında etkili olabileceği öngörülmektedir.

Yapılan diğer bir çalışmada, kullanılan metal hidrit yapının hidrojen depolamada etkili olabileceği belirtilmiştir. Bu tür teknolojilerin, hidrojen üretim ve depolama süreçlerini daha güvenli ve ekonomik hale getirebileceği öngörülmektedir (Modisha ve ark., 2019). Cihazın tasarım prensibi ve üretim aşamasında kullanılan malzemeleri, hidrojen üretim sürecini verimli hale getirebilme açısından oldukça önemlidir. Cihazın tükettiği enerji miktarının düşük olması ve yüksek verimliliğe sahip olması ancak kullanılacak elektrolizörlerin yapısına bağlıdır. Bunun yanı sıra atık suyun öncesi ve sonrasında filtreleme işlemine tabi tutulması, cihazın çevresel sürdürülebilirliğe olan katkısını artıracaktır.

Bu tez çalışmasında, özel olarak oluşturulmuş bir hidrojen reaktörünün makineleştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Hidrojen reaktörünün içerisine aktarılan atık suyun belirli zaman aralıklarında hidrojen üretmesi sağlanarak üretilen hidrojenin değerlendirilebilmesi için düzenekler tasarlanmıştır. Cihazın içerisine yerleştirilen depolara kompresör mantığı ile kesintisiz hidrojen gazının aktarılması işlemleri gerçekleştirilecektir. Hidrojen gazına uygun olarak tasarlanan pişirici ocak sayesinde üretilen yakıtın ısı enerjisine dönüşümü yapılacaktır. Üretilen hidrojenin kapalı sisteme ulaşması patlamalara neden olabileceğinden, alınan güvenlik önlemleri sayesinde hidrojenin yanma esnasında geri tepmesi engellenecektir. Ayrıca elektrolize olmuş suyun depo seviyesi yükselene kadar dinlendirilmesi sağlanacaktır. Tortu ve yabancı maddelerin dibine çökertilmesi ile su tekrar filtrasyon sürecine tabi tutulacaktır. Böylelikle elektrolize olmuş suyun analizi yapılarak kullanılabilirliği değerlendirilecektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Diğer enerji kaynaklarına dönüştürülmesi mümkün olan (enerji taşıyıcısı) hidrojen, sürdürülebilirlik anlamında da evrende önemli bir yere sahiptir. Hidrojenin yanması sonucu ortaya çıkan oksijenin yanı sıra su buharının çevreye zararının olmaması büyük bir avantajdır. Hidrojenin endüstride kullanılma potansiyeli oldukça yüksek olduğu için üretimi uzun yıllardır akademik çalışmalara konu olmaktadır. Temiz ve sürdürülebilir bir enerji, evren açısından oldukça önemlidir. Bu alanda yapılan çalışmalar, üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanabilirliğinin artırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde hidrojenin üretimi, depolanması ve enerji taşıyıcısı olarak kullanılması ile ilgili son yıllarda yapılmış araştırmalara yer verilmiştir.

(Altan, 1996) tarafından yapılan çalışmada, hidrojenin zeolit yapıda depolanması üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Zeolit özelliğinin yüksek gözenekli olması ve yüzey alanlarının geniş olması özellikleri nedeniyle hidrojen depolama yöntemindeki kolaylıkları ele alınmıştır. Düşük sıcaklıklarda zeolit yapı özelliğinde bulunan hidrojenin bu özelliği sayesinde taşıma ve depolama maliyetlerinin düşürülebileceği vurgulanmaktadır.

(Cheng ve ark., 1999) tarafından yapılan çalışmalarda, hidrojen depolamak için karbon nanotüpler kullanılmış ve hidrojenin depolama kapasitesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan karbon nanotüplerin hafif ve yüksek hacimli enerji yoğunluğuna sahip olmasının, hidrojen depolama alanında alternatif bir yöntem olacağı öngörülmektedir.

(Ata, 2005) tarafından yapılan çalışmada, hidrojen enerjisi üretimindeki altyapı sorunları ve teknolojik problemlere vurgu yapılmıştır. Araştırma konusunda hidrojen enerjisinin, günümüzde kullanılan fosil yakıtlara bağımlılığı minimuma indirmesi ve buna bağlı olarak çevre sorunlarının başında gelen karbon emisyonlarının da azaltılması anlamında kritik bir nokta olacağı öngörülmektedir.

(Şenaktaş, 2005) çalışmasında, hidrojen enerjisinin kullanımının fosil yakıtlar açısından değerlendirildiğinde temiz ve verimli bir yakıt türü olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca yaptığı analizler neticesinde hidrojen enerjisinin çevresel ve ekonomik avantajlarına dikkat çekmiştir.

(Genç, 2009) çalışmasında, su ve organik atıkların mikroorganizmalarla biyolojik olarak etkileşime girmesi sonucunda ortaya çıkan hidrojen üzerinde yoğunlaşmıştır. Ortaya çıkan hidrojenin üretiminin çevresel açıdan zararsız olan doğal hammaddeye sahip

olmasının gelecekte yaşanacak çevresel sorunları en aza indireceği öngörüsünde bulunmuştur.

(Balat ve Kırtay, 2010) çalışmalarında, yaşayan ve fosil halini almamış biyokütle kaynaklarının gaz haline getirilerek hidrojen üretimi için kullanılmasını araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmanın çevresel sorunları ortadan kaldırabileceğini öngörmüşlerdir.

(Saur ve Ramsden, 2011) çalışmalarında, hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi ile elde edilebilmesinin maliyetlerini araştırmışlardır. Hidrojen üretimi için gerekli olan enerjinin, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonu ile sağlandığında maliyetin en aza indirebileceğini öngörmüşlerdir.

(Modisha ve ark., 2019) yapmış oldukları çalışmalarında, hidrojen depolama işlemlerinin metal hidrit ile sağlanabileceğini ifade etmişlerdir. Depolamada kullanılacak tankların yapısının yüksek basınçta dayanıklı olmasının önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Böylelikle ortaya çıkabilecek güvenlik endişelerinin minimuma indirilebileceğini öngörmüşlerdir.

(Taşkolu ve Acır, 2019) yapmış oldukları çalışmalarında, nükleer tabanlı lazer sürücülü füzyon reaktörlerinde yüksek sıcaklıklarda elektroliz uygulanarak hidrojen üretimi çalışmaları üzerine yoğunlaşmışlardır. Araştırılan bu yöntem sayesinde hidrojenin yoğun üretim sürecine girebileceğini ve yüksek verimliliğe sahip olacağını öngörmüşlerdir.

(Vidas ve Castro, 2021) yapmış oldukları çalışmalarında, hidrojenin yeşil üretim basamağında bulunan elektroliz yöntemleri üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Ayrıca güneş panelleri ile desteklenen hidrojen üretiminin çevresel açıdan oldukça avantajlı olabileceğini ifade etmişlerdir.

(Demir, 2022) çalışmasında üretilen hidrojen enerjisinin depolanarak elektrikli araçlarda hibrit formunda kullanılması üzerine araştırmalar yapmıştır. Hidrojenin taşınarak elektrikli araçlar için kullanılabilir hale getirilmesinin çevresel ve ekonomik açıdan avantajlı olabileceği öngörüsünde bulunmuştur.

(Levikhin ve Boryaev, 2024) çalışmalarında, hidrojenin genel anlamda tüm özellikleri ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Araştırma neticesinde hidrojenin hafif bir gaz olmasının yanı sıra renginin, tadının ve kokusunun da olmadığı ifade edilmiştir. Ayrıca araştırmalarında hidrojenin enerji yoğunluğunun oldukça fazla olmasının diğer enerji kaynaklarına dönüştürülmesine olanak sağlayacağını ifade etmişlerdir.

(She ve ark., 2024) atık su içinde bulunan ağır metallerin kontrollü bir şekilde arıtılabilmesi için uygun elektrot malzemeli cihaz üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Hidrojen

Hidrojen, periyodik tablonun en hafif ve basit özelliklere sahip elementidir. Bu açıklama doğrultusunda hidrojenin normal sıcaklık ve basınç altında belirgin bazı özellikleri bulunmaktadır. Fiziksel ve kimyasal olarak ayırabileceğimiz bu özelliklerde aşağıda belirtilen durumlar ön plana çıkmaktadır.

Fiziksel Özellikler

- Herhangi bir rengi yoktur.
- Koku anlamında hissedebileceğimiz bir kokusu yoktur.
- Tadını alabileceğimiz bir element değildir.
- Metalik özelliklere sahip değildir.
- Oldukça yanıcı ve patlayıcıdır.
- Havadan 14,4 kat daha hafif olması nedeniyle uçucu bir gazdır.

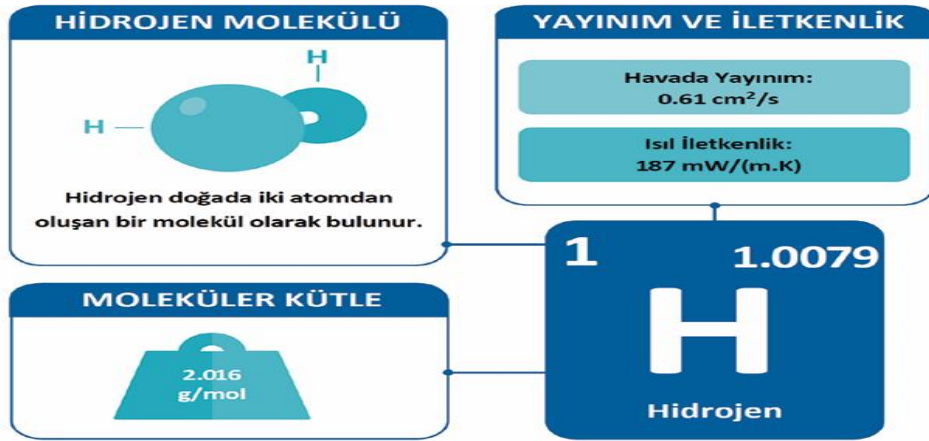
Kimyasal Özellikler

- İnsan hayatı açısından değerlendirildiğinde zehirsiz bir gazdır.
- Periyodik tablodaki sembolü H 'dir.
- Periyodik tablodaki atom numarası 1'dir.
- Periyodik tabloda atomik kütlesi 1,0079 g/mol olan en hafif elementtir.
- Hidrojen, doğada bileşik halinde bulunur.

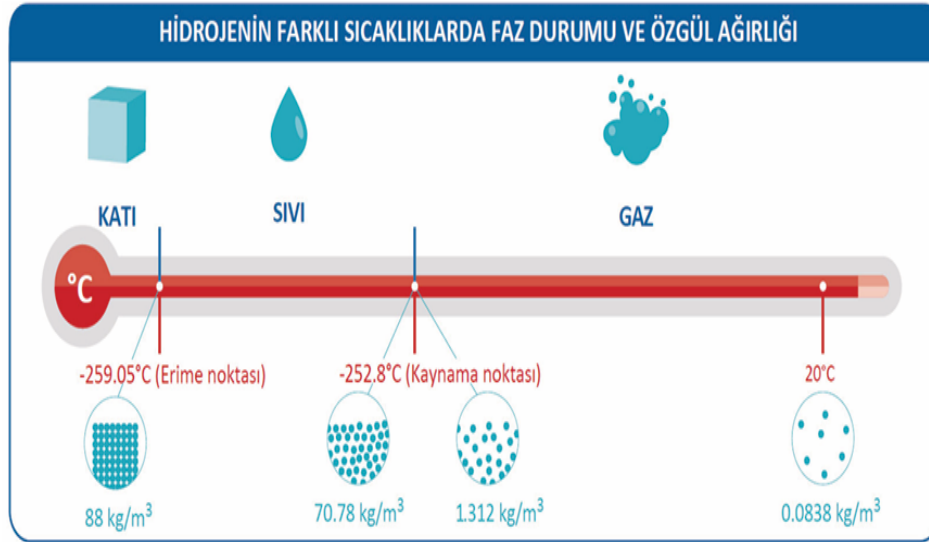
Şekil 3.1'de hidrojen molekülünün özellikleri, Şekil 3.2'de ise hidrojen molekülünün farklı sıcaklıklarda faz değişimi ve özgül ağırlığı verilmiştir.

Şekiller incelendiğinde hidrojenin çevresel sürdürülebilirlik açısından neden önemli bir element olduğu ortaya çıkmaktadır. Hidrojenin yanması sonucunda ortaya çıkan su buharı ve oksijen çevresel açıdan değerlendirildiğinde oldukça faydalıdır. Fosil yakıtların çevreye olan zararını minimuma indirme açısından, hidrojen enerjisinin kullanılabilir ve sürdürülebilir hale getirilmesi oldukça önemlidir. Bu yapıcı özellikleri göz önüne alındığında hidrojenin; kısıtlı ve çevresel açıdan oldukça zararlı olan fosil yakıtlara göre daha etkili olacağı değerlendirilmektedir.

Artan nüfus ve teknolojik gelişmeler düşünüldüğünde fosil yakıtların kullanılması doğaya ciddi zararlar verebilir. Ayrıca fosil yakıtların kısıtlı olması durumu da göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla hidrojen gibi doğa ve gelecek açısından son derece avantajlı bir elementin kullanılması, gelecekte oluşabilecek çevresel kirliliklerin önüne geçebilir.



Şekil 3. 1. Hidrojen molekülünün özellikleri (www.kiwa.com, 2023).



Şekil 3. 2. Hidrojen molekülünün farklı sıcaklıklarda faz değişimi ve özgül ağırlığı (www.kiwa.com, 2023).

Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiğinde geleceği şekillendirme anlamında oldukça önemli olabileceği görülmektedir. Hidrojen gazının zehirsiz bir gaz olması ve enerji yoğunluğunun yüksek olması kullanılabilirlik açısından ihtiyaç duyulan bir kaynak olabilmesine imkân tanımaktadır.

3.1.1. Hidrojenin Tarihçesi

Hidrojenin keşfinin tarihi 1500'lü yıllara dayanmaktadır. Hidrojenle ilgili keşiflerin 16. yüzyılda İsviçre simyasının öncülerinden olan Paracelsus tarafından; metallerin asitlerle reaksiyona girmesi sonucu çıkan gazlar sırasında yapıldığı düşünülmektedir.

İngiliz kimyager Henry Cavendish 1766 yılında metaller ile asitleri kimyasal reaksiyona sokarak elde ettiği gazın yandığını belirtmiştir. Ayrıca çalışmalarında hidrojenin yanma sonucunda su oluşturduğunu ifade etmiştir (Polat ve ark., 2012). Hidrojen ile yakından ilgilenen Henry Cavendish yanıcı özelliğe sahip olan bu gazın havada da bulunduğunu belirtmiştir.

Yunan bilimci Antoine Lavoisier 1783 yılında yapmış olduğu çalışmada “Su Oluşturan” anlamına gelen hidrojeni keşfederek modern kimyaya öncülük yapmıştır.

Tarihin ilerleyen süreçlerinde, hidrojenin yanması sonucunda ortaya çıkan su üzerine yapılan akademik çalışmalar 18. yüzyılın sonuna doğru Fransız kimyager Antoine Lavoisier'e ilham vermiştir. Fransız kimyager Antoine Lavoisier 1783 yılında Henry Cavendish'i destekleyerek suyun bir element olmadığını, içerisinde oksijen ve yanıcı özelliklere sahip olan bir gazın olduğunu keşfetmiştir. Antoine Lavoisier'in yapmış olduğu çalışmalar neticesinde hidrojenin yanması sonucunda su ortaya çıktığı kesinleşmiştir. Antoine Lavoisier bu elementi “Hidrojen” olarak isimlendirmiştir (Tutar ve Eren, 2023).

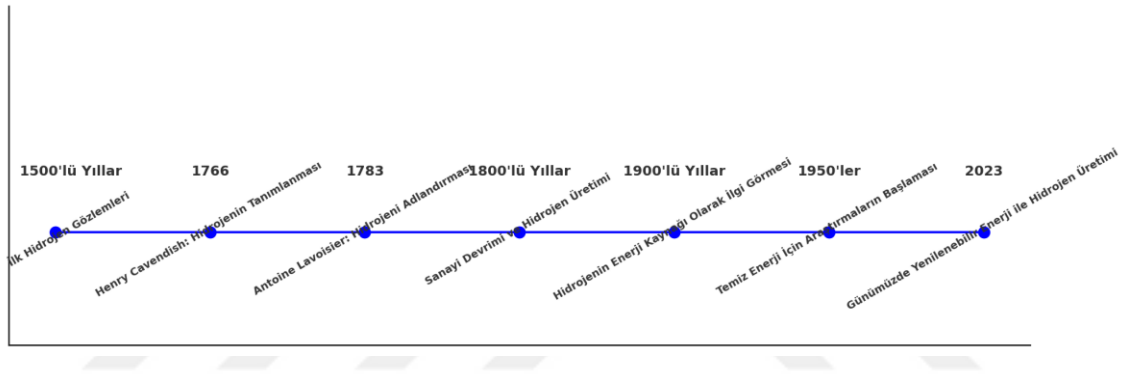
Sanayi Devriminin gerçekleştirilmesi ile 19. Yüzyılda kömürün gazlaştırılması yöntemi ile hidrojen üretim süreci başlamıştır. Bu yüzyılda hidrojen sadece kimyasal reaksiyonlarda kullanılmıştır. Hidrojen enerjisinin tam olarak kullanımı 20. Yüzyılın ortalarında başlamıştır (Ulusoy, 2005; Koca, 1998). 20. Yüzyılda fosil yakıtların çevreye verdiği zararlı etkilerin artması toplumları yeni enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Hidrojenin temiz ve çevre dostu özelliği alternatif yakıt olarak kullanılabileceğini ön plana çıkarmıştır (Mutlubaş ve Özdemir, 2023).

Günümüzde ise hidrojen sanayinin çeşitli alanlarında, kimya ve özellikle sürdürülebilir enerji alanlarında kullanılmaktadır. Hidrojen enerjisi, elektrik üretimi, pil teknolojileri ve elektrikli araçlara kadar geniş bir alanda değerlendirilmektedir (Yılmaz, 2011; Ata, 2005). Hidrojen üretimi genellikle doğal gaz reformasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Fosil yakıtların devreden çıkarılarak elektroliz yöntemi kullanılarak yeşil hidrojenin üretilmesi çevresel açıdan oldukça önemlidir. Hidrojenin elektroliz yolu ile üretilmesinin avantaj ve dezavantajlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Günümüzde

hidrojenin üretim ve depolama maliyetleri önemli sorunlar teşkil etmektedir (Soltani, 2023; Kademli, 2017). Fakat hidrojenin temiz ve çevresel açıdan sürdürülebilir özelliklere sahip olması gelecekte enerji sistemlerinde önemli bir pozisyonda olabileceğini öngörmektedir (Mutlubaş ve Özdemir, 2019).

Hidrojenin tarihsel süreci basit bir elementin teknolojik, sanayi ve çevresel açıdan kilit noktada olacağını göstermektedir. Evrende çokça bulunan ve diğer enerji türlerine dönüşebilirliği mümkün olan bu element sayesinde dünya yeniden şekillenebilir. Özellikle fosil yakıtların zararları etkilerinden kurtulma noktasında önemli adımlar atılabilir.

Hidrojenin tarihçesini gösteren kronolojik gelişim Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 3. Hidrojenin kronolojik gelişimi

3.1.2. Dünyada ve Türkiye’de Hidrojen Enerjisi

Hidrojen enerjisi, iklim değişikliğini en aza indirme ve enerji anlamında çeşitliliğin artırılması açısından kritik bir noktadadır. Enerji alanında azalan kaynaklar ve karbon emisyonlarının ortadan kaldırılmasının düşüncesi birçok ülkenin hidrojen enerjisine yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Hidrojen Üretim Yöntemleri

- Elektroliz yöntemi kullanılarak yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenerek üretilen hidrojene yeşil hidrojen denir. Yeşil hidrojen karbon emisyonlarını ortadan kaldırma açısından çevre için çok önemlidir. Birçok ülke yeşil hidrojen üretimi konusunda kendini geliştirmek istemektedir.

- Atmosferdeki karbondioksiti azaltma teknolojisi ile doğalgazdan üretilen hidrojene mavi hidrojen denir. Bu üretimin amacı karbon emisyonlarını azaltmaktır.
- Fosil yakıtlar kullanılarak elde edilen ve doğaya karbondioksit salınarak elde edilen hidrojene gri hidrojen denir. Karbon emisyonu oluşması nedeniyle çevre açısından avantajlı değildir.
- Güneş panelleri kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin elektroliz işlemiyle kullanılması ile üretilen hidrojen türüne sarı hidrojen denir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilmesine olanak tanıyan ve yeşil özelliği ile dikkat çeken hidrojen çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan da oldukça önemlidir.
- Nükleer enerji bazlı verimli elektroliz sürecinden geçirilerek üretilen hidrojen türüne pembe hidrojen denir. Bu hidrojen gazı üretim yöntemi, fosil yakıt kaynaklı buhar metan reformasyonla üretilen hidrojen gazı üretiminde de kullanılmaktadır.
- Son zamanlarda keşfedilen ve büyük hacimli üretimi henüz gerçekleştirilemeyen; hidrojen gazının yanı sıra katı karbon üretiminin de gerçekleştirildiği hidrojen türüne turkuaz hidrojen denir. Üretilen karbonun kalıcı olarak depolanması sayesinde gelecekte çevresel açıdan önemli bir yere sahip olacağı değerlendirilmektedir.

Hidrojen enerjisi üretimi renkler ile sınıflandırılmıştır. Bu renklere ait açıklamalar Şekil 3.4' de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 4. Hidrojen üretiminin sınıflandırılması

Kullanım Alanları

- Karbon emisyonlarını ortadan kaldırmak üzere tasarlanan yakıt hücreleri sayesinde otomobil, otobüs, kamyon ve trenler gibi araçların enerji gereksinimleri sağlanmaktadır.
- Kimyasal gübre, amonyak ve metanol üretimi ve sanayinin çeşitli alanlarında kullanılmaktadır.
- Diğer enerji türlerine dönüşebilme özelliği sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin hidrojene dönüştürülüp depolanması mümkündür. Dolayısıyla enerji tasarrufu ve verimlilik anlamında oldukça önemli bir yere sahiptir.

Küresel Hedefler ve Stratejiler

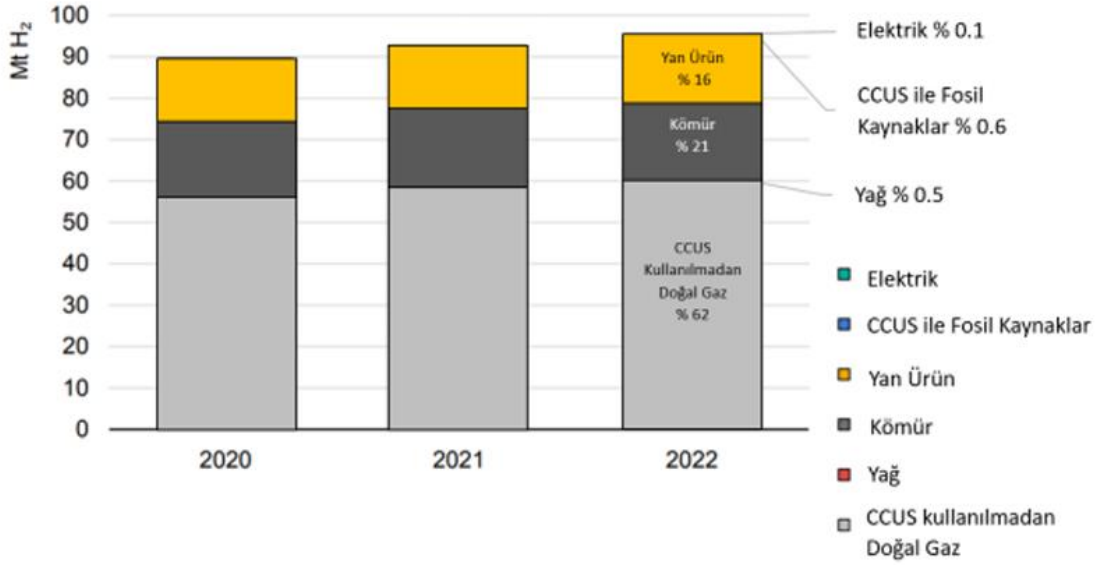
Avrupa Birliği Ülkeleri, ABD, Japonya ve Çin gibi enerji bağımsızlığını ön planda tutan birçok ülke, 2030 ve 2050 hedefleri doğrultusunda yeşil hidrojen üretimi ve alt yapının geliştirilmesi konusunda ciddi yatırımlar yapmaktadır.

Artan nüfus ve enerjiye olan ihtiyacın artması yüzünden fosil yakıtların kullanımı artmıştır. Bu artışla doğru orantılı olarak doğaya salınan CO_2 miktarı da ciddi anlamda yükselişe geçmiştir. Bu salımların neticesinde küresel iklim değişiklikleri meydana gelmiştir. Meydana gelen bu değişikliklerin önüne geçebilmek amacıyla, uluslararası toplumlar gelecek için üç ana hedef belirlemiştir.

- Karbon salınımlarının ortaya çıkardığı çevresel tehlikelerin minimum düzeye indirilmesi.
- Hedef olarak belirlenen iklim düzeyine ulaşmak için adımların hızlandırılması.
- Sonuca ulaşılan kabul görmüş çözümlerin hızlı bir şekilde yayılması.

Atmosfere salınan oksijenin ortadan kaldırılan karbonmonoksit miktarı ile eşit seviyeye getirilmesi doğrultusunda yapılacak olan çalışmalar için karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojisi (CCUS) gibi temiz enerji metotlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Şekil 3.5’ de 2020-2022 yılları arasındaki düşük salınlı hidrojen üretim hedefleri incelendiğinde CCUS teknolojisi kullanılmadan doğalgazdan hidrojen üretim oranı %62’dir. Düşük karbon salınlı hidrojen üretimi toplam üretimin %1’inden azdır. CCUS teknolojilerini içeren elektrolizörlerle 2030 yılına kadar 20 metrik ton düşük karbon salınlı hidrojen üretimine ulaşılacağı öngörülmektedir (Yıldırım ve ark., 2024).



Şekil 3. 5. Düşük salınlı hidrojen üretim hedefleri (International Energy Agency., 2023).

Düşük karbon salınlı hidrojen üretimi oranının az olmasına rağmen açıklanan projelerle ortaya çıkan bu sorunun önüne geçilebileceği belirtilmektedir.

Düşük karbon salınlı hidrojen üretiminin artırılması ile birlikte yeni dünya düzeninin yenilenebilir kaynaklara olan talebinin artacağı öngörülmektedir. Ayrıca hidrojen enerjisinin üretilmesi ve enerjiye dönüştürülmesi anlamında önemli adımların atılabileceği düşünülmektedir (Yıldırım ve ark., 2023).

Türkiye’yi de içine alan toplumların en önemli hedefleri fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmak, sınırlı rezervlere alternatif olarak kullanılabilecek sürdürülebilirliği sağlamak anlamında kullanılabilecek temiz bir enerji kaynağına sahip olmaktır. Türkiye'nin dünyadaki coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen üretimini gerçekleştirmesi ekonomiklik ve uygulanabilirlik açısından son derece önemlidir. Bu bağlamda, hidrojen enerjisi tüm dünya ülkeleri gibi Türkiye’de de büyük öneme sahiptir.

Fosil yakıtların hızla tükenmesi ile birlikte tüm dünya düzeninin 2050 yılı itibarıyla enerji üretimini yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendireceği öngörülmektedir (Ulusoy, 2005; Özekicioğlu, 2008).

Hidrojen üretiminin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarla birlikte birçok ülke hidrojenin çevresel avantajları ve enerji taşıyıcısı özelliklerinden faydalanmaya başlamıştır.

Türkiye’de yapılan hidrojen üretimi çalışmalarında hidrojenin ekonomik olarak üretilmesi ve depolanmasına ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Yalova’da kurulan rüzgâr-hidrojen hibrit sisteminde elektroliz yoluyla üretilen hidrojen enerjisi depolanarak ihtiyaç duyulduğunda yakıt hücreleri aracılığıyla tekrar enerjiye dönüştürülmesi üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu durum hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanılmasının mümkün olabileceğini desteklemektedir (Çuhadaroğlu, 2005; Şenaktaş, 2005).

Son zamanlarda ortaya çıkan yakıt hücreleri teknolojisi, hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanılmasında oldukça önemlidir. Fosil yakıtlarla kıyaslandığında hidrojen hem çevresel hem de ekonomik açıdan oldukça avantajlı konumdadır. PEM (Polimer Elektrolit Membran) özellikli yakıt hücrelerinin düşük sıcaklık ve yüksek verimliliklerde çalışabilmesi, üretilen hidrojen enerjisinin fosil yakıtlara göre daha avantajlı konumda olabileceğinin göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Kütük, 2011; Ankaralı, 2024).

Türkiye’nin güneş ve jeotermal enerji potansiyeli açısından dünya üzerinde önemli bir konumda olması, hidrojen üretiminin oldukça avantajlı hale gelmesine olanak sağlayabilir (Özekicioğlu, 2008).

Türkiye’nin son zamanlarda hidrojen enerjisi üzerine yoğunlaşması, enerji bağımsızlığını sağlamak adına oldukça önemlidir. Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynakları açısından uygun koşullara sahip olduğu belirtilmektedir. Fosil yakıtların olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak ve enerji güvenliğini en üst düzeye getirmek amacıyla yapılan hidrojen üretim çalışmaları, yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenebilir. Bu durum, Türkiye’nin gelecekte hidrojen ekonomisi ve pil teknolojilerinde merkezi bir konumda olabileceğini desteklemektedir (Tutar ve Eren, 2023).

Hibrit enerji sistemlerinde hidrojen üretimi ve üretilen hidrojen enerjisinin depolanabilir hale getirilmesi oldukça önemlidir. Üretilen hidrojen enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan entegrasyonla ortaya çıkarılabilir. Ayrıca hibrit enerji sistemlerinde kullanılan hidrojen enerjisine yönelme düşüncesi yenilenebilir enerji kaynaklarından kaynaklanan kısıtlamaları ortadan kaldırabilecek etkili bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Hidrojenin enerji taşıyıcısı özelliği sayesinde üretilen fazla enerji tekrar kullanılmak üzere elektroliz yoluyla hidrojene dönüştürülüp depolanabilir. (Doubbia, 2014).

Yenilenebilir enerji türleri kullanılarak üretilen hidrojen enerjisi, depolama teknolojilerinin yanı sıra sanayi sektöründe de oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu bağlamda hidrojen üretimi için kullanılan teknolojilerin çeşitliliği, üretimi daha verimli ve ekonomik hale getirebilir (Norouzi, 2021).

3.1.3. Hidrojen Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları

- Elektroliz yoluyla üretilen hidrojen enerjisi sonucunda ürün olarak su ortaya çıkar. Bu bağlamda, fosil yakıtlarla üretim yöntemlerinde meydana gelen karbondioksit ve diğer zararlı gazların etkileri azaltılarak hava kirliliğinin önüne geçilebilecektir (Osman ve ark., 2022).
- Enerji yoğunluğunun yüksek olması, benzine göre daha fazla enerji sağlayabilme potansiyeli sebebiyle taşımacılık alanında verimli olarak kullanılabilir.
- Fosil yakıtların yanı sıra yenilenebilir kaynaklardan da üretim potansiyeli en önemli avantajlarından sayılabilir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından elektroliz yoluyla üretilen hidrojen enerjisinin sıfır karbon emisyonu özelliğine sahip olduğu belirtilmektedir (Qazi, 2022).
- Sessiz çalışma özelliğine sahip yakıt hücrelerinde hidrojen üretimi yapılabilir. Ayrıca yakıt hücrelerinde meydana gelen enerji kaybı azdır. Bu bağlamda, verimlilik anlamında kaliteli bir enerji dönüşüm süreci sağlanabilir (AlZohbi, 2024).
- Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının süreklilik sağlamaması büyük bir dezavantajdır. Hidrojen, bu noktada önemli bir rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında üretilen fazla enerji hidrojen olarak depolanıp gerektiğinde kullanılabilir. Bu dönüşüm sayesinde hidrojen enerjisi yakıt hücreleri veya diğer enerji türlerine aktarılabilir (Vidas ve Castro, 2021).
- Coğrafi koşullar göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojen enerjisi dışa bağımlılığı azaltarak enerji bağımsızlığı oluşturma anlamında oldukça önemlidir. Ayrıca hidrojen üretiminin farklı coğrafyalarda üretilebilmesi enerji ticaretinin hacminin büyümesini sağlayabilir (Al-Qahtani, 2021).

İklim değişikliği ve bu değişikliğin oluşturduğu küresel sorunlar göz önüne alındığında karbon emisyonlarının zararlı etkilerinin azaltılarak çevre dostu, sürdürülebilir ve enerji güvenliğinin sağlandığı üretimi gerçekleştirebilecek destekleyici tedbirlerin alınması gerekmektedir.

Bu bağlamda, belirtilen avantajlar göz önünde bulundurulduğunda hidrojen enerjisinin gelecekte hem doğa dostu hem de sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebileceği öngörülmektedir.

Hidrojen enerjisinin özellikle otomotiv ve endüstri sektörlerinde kullanılabilir hale gelmesi oldukça önemlidir.

Dezavantajları

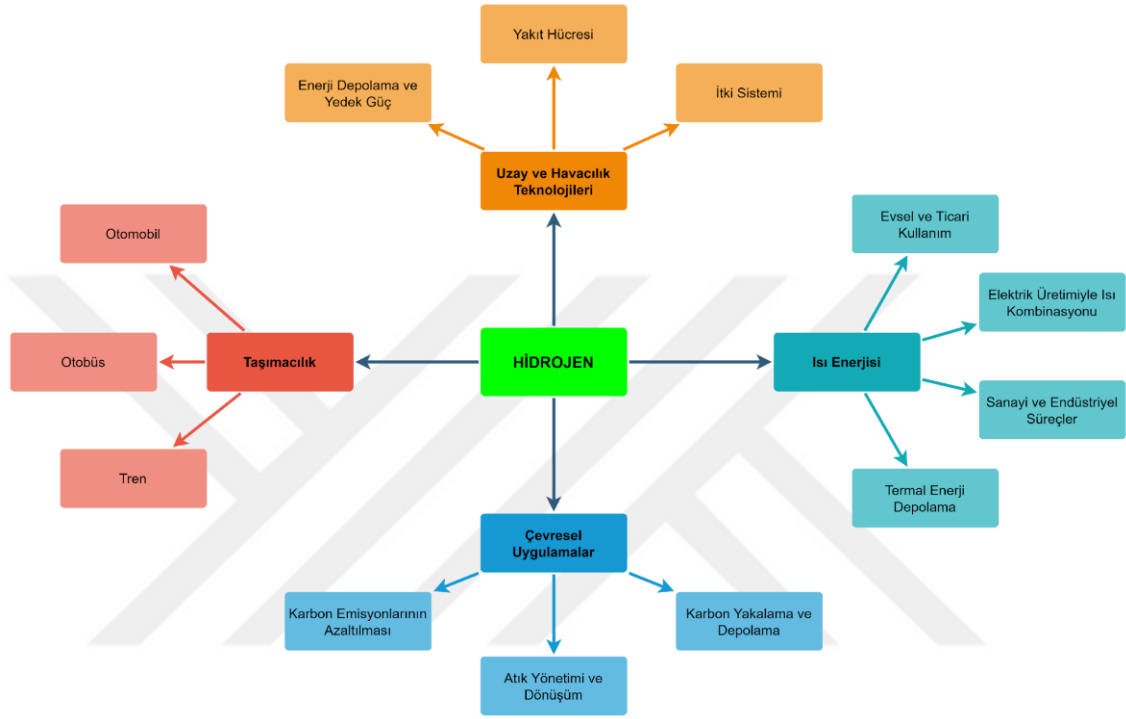
- Maliyet açısından değerlendirildiğinde hidrojenin üretilmesi, taşınması, yakıt hücreleri ve depolama miktarları iyi analiz edilerek gerçekleştirilmelidir. Günümüzde artan benzin fiyatları hidrojenin yakıt olarak kullanılmasına olanak sağlayabilir.
- Üretimi, depolanması ve kullanılması esnasında ekstra güvenlik önlemlerinin alınması şarttır. Ayrıca, hidrojenin tatsız ve kokusuz özelliklere sahip olması sızıntıları belirlememizi zorlaştırabilir.
- Hidrojenin hacim başına enerji yoğunluğunun az olması sebebiyle depolama anlamında zorluklar yaşanabilir. Hidrojenin yüksek basınçta depolanması güvenlik sorunlarına yol açabilir (Xie ve ark., 2024). Depolama ve taşıma sırasında meydana gelen enerji kayıpları düşük verimliliğe neden olabilir (Dhahir ve Taher, 2020).
- Fosil yakıtlarla üretilen hidrojen enerjisi yanında karbon salınımı da olduğu için tamamen çevre dostu olmayabilir.
- Geniş çaplı taşıma, depolama ve istasyonlar bulunmadığından yaygınlaştırma anlamında tam olarak yeterli değildir. Teknolojik gelişmeler ve maliyet düşürme çalışmaları sonrasında engeller ortadan kalkabilir (Dawood ve ark., 2020).
- Fosil yakıtların kullanımının ortaya çıkardığı olumsuzluklar yeşil enerji formuna geçişi hızlandırabilir (Kademli, 2017).
- Yeşil hidrojen alt yapısı geliştirilerek maliyet olarak mevcut altyapıya uygun hale getirilmelidir (Koşar, 2021). Mevcut alt yapıdan yeşil alt yapıya geçiş süreci maliyetli olabilir (Kademli, 2017).
- Yeşil enerji sürecinde oluşabilecek düşük enerji verimliliğinin ve enerji kayıplarının önüne geçilebilir (Gielen ve ark., 2019).

Belirtilen dezavantajlar göz önüne alındığında mevcut alt yapının düzenlenmesi ve depolama maliyetlerinin azaltılarak meydana gelebilecek problemlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Hidrojenin diğer fosil yakıtlar gibi uygun alt yapıya, taşıma ve depolama özelliklerine sahip olması ile uygun maliyet şartlarını taşıması alternatif enerji kaynağı arayışı açısından son derece önemlidir.

Gelecekte fazlasıyla ihtiyaç duyulacak olan hidrojenin enerji üretim şekillerinin olumlu ve olumsuz yönlerinin göz önünde bulundurulması ile yapılacak teknolojik girişimlerle maliyetlerin daha uygun hale getirilmesinin mümkün olabileceği, çevresel sorunların önüne geçilebileceği öngörülmektedir.

3.1.4. Hidrojen Enerjisinin Kullanım Alanları

Hidrojenin çok yönlü kullanım potansiyeli sanayi, ulaşım, enerji ve çevre gibi alanlarda etkinliğini arttırmıştır. Şekil 3.6'da hidrojenin bazı kullanım alanlarına dair bilgiler verilmektedir.



Şekil 3. 6. Hidrojenin kullanım alanları

- Hidrojenin yeşil enerji özelliği karbon emisyonlarının zararlı etkilerini ortadan kaldırma anlamında oldukça önemlidir. Bu bağlamda hidrojen tüm taşımacılık alanlarında kullanılabilir (Mutlubaş ve Özdemir, 2023). Gelişen teknoloji ile birlikte hidrojenin taşımacılık alanına yayılarak etkin olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Norveç ve Japonya kısa mesafeli gemileri hidrojen yakıt hücresi olarak üretmeye yönelik projeler yürütmektedir.
- Hidrojen, uzay ve hava teknolojilerinde yakıt ve itici güç sistemleri önemli bir yere sahiptir. NASA'nın Saturn V roketinde ve Space Shuttle Ana Motorlarında sıvı hidrojen kullanılmıştır. Hidrojenin roket yakıtlarının aksine temiz bir enerjiye sahip olması ve yanma sonucunda su üretmesi çevresel sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir. Ayrıca yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması itici güç anlamında avantaj

sağlayabilir. Airbus firması ZEROe Projesi ile hava taşımacılığında hidrojenin yakıt olarak kullanılması için ticari prototip uçaklar üzerinde çalışmaktadır. Uzay ve havacılık sektöründe yapılan tüm bu çalışmalar, hidrojen enerjisinin gelecekte önemli bir yere sahip olacağını göstermektedir. Özellikle temiz ve sürdürülebilir bir çevre açısından değerlendirildiğinde oldukça avantajlı olarak görülmektedir.

- Yüksek sıcaklık gerektiren sanayi süreçlerinde hidrojen etkin olarak kullanılabilir. Özellikle çelik, cam ve seramik endüstrisinde fosil yakıtların olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için hidrojen enerjisine geçiş oldukça önemlidir.
- Ayrıca hidrojen enerjisi binalarda ısınma, pişirme gibi ısı sistemlerinde kullanılabilir. Hidrojenin termal enerji sistemlerinde yakıt olarak depolanması ve istenildiğinde tekrar enerjiye dönüştürülmesi enerji taşıyıcılığı açısından oldukça önemlidir. Hidrojen, rafinerilerde ham petrol ürünlerinin işlenmesi sırasında oluşan zararlı etkileri minimuma indirmek, hidrokarbonları daha hafif rafine hale formuna sokmak ve daha çevre dostu hale getirmek için kullanılmaktadır (Yıldırım ve ark., 2023). Hidrojenin zeolit yapıda kapsüllenerek depolanmasının endüstriyel kullanıma uygun olduğu düşünülmektedir (Altan, 1996).
- Karbon yakalama teknolojisi ve karbon emisyonlarını minimuma indirebilme bakımından hidrojenin gelecekte kullanımı çevresel açıdan çok değerlidir. Hidrojenin yeşil enerji özelliği sayesinde çevresel olumsuzluklar ortadan kaldırılarak daha temiz bir dünya düzenine geçiş sağlanabilir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının ürettiği enerjiyi talep olmadığında hidrojen olarak depolamak ve talep arttığında tekrar kullanmak enerjinin sürekliliği anlamında oldukça önemlidir. Yalova Armutlu ilçesinde, rüzgâr enerjisi ile üretilen enerjinin hidrojenle birleştirilerek hibrit modeli üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada, rüzgâr enerjisi ile üretilen enerji elektroliz yolu ile hidrojene dönüştürülerek depolanmaktadır. Böylelikle depolanan enerji istenildiğinde kullanılarak enerji arz güvenliği sağlanabilir (Karakus, 2015). Elektroliz esnasında enerji kayıplarını azaltmak ve verimliliği artırmak amacı ile kuantum fiziği kullanılabilir. Elektroliz reaktörlerinin tasarımı bu açıdan oldukça önemlidir (Avcı, 2018).
- Türkiye'nin ilk hidrojen vadisinin hayata geçirileceği “Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Vadi Projesi” kapsamında Enerjisa Üretim Bandırma Enerji Üssü'nde yenilenebilir kaynaklarla elde edilen yeşil hidrojenin pilot üretimine başlanmıştır.

Hidrojen, enerji içeriği fazla olan yüksek etkiye sahip bir elementtir. Bu özelliği açısından değerlendirildiğinde hidrojen, ortaya çıkardığı enerji açısından çok değerlidir. Çizelge 3.1’de hidrojen ve diğer yakıtların temel özellikleri karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 3. 1. Hidrojenin ve diğer yakıtların temel özelliklerinin karşılaştırılması (Felseghi ve ark., 2019).

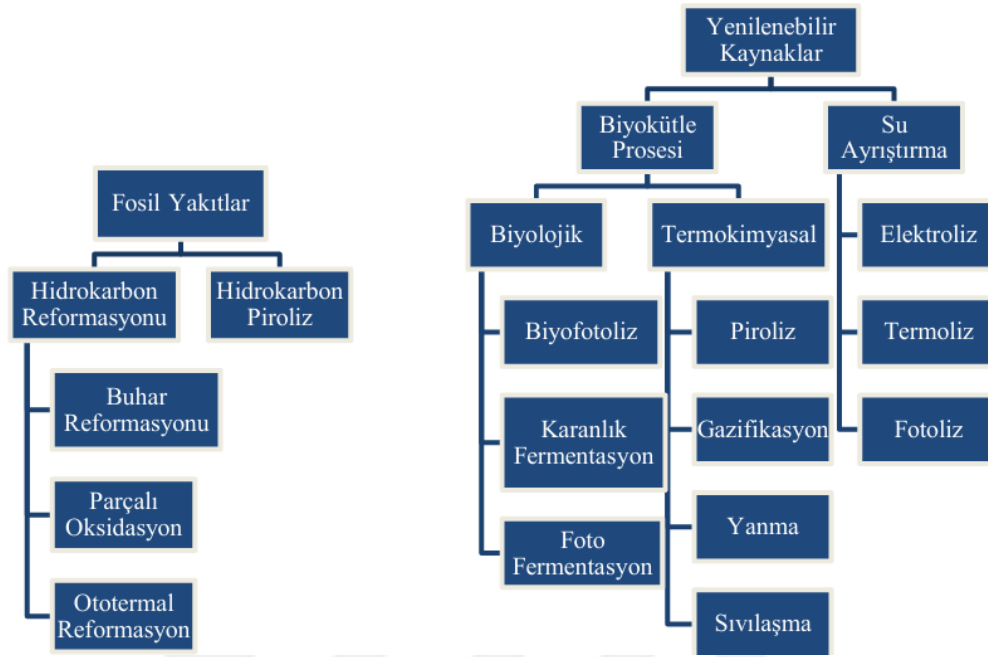
Yakıt Türü	Enerji/Kütle (J/kg)	Enerji/Hacim (J/m ³)
Sıvı hidrojen	141.9	10.1
Gaz hidrojen	141.9	0.013
Akaryakıt	45.5	38.65
Gazolin	47.4	34.85
Jet yakıtı	46.5	35.3
LPG	48.8	24.4
LNG	50.0	23.0
Metanol	22.3	18.1
Ethanol	29.9	23.6
Biyodizel	37.0	33.0
Doğal gaz	50.0	0.04
Kömür	30.0	-

Hidrojenin enerji yoğunluğunun, diğer yakıt türlerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Ancak hacim bazında özellikle gaz hidrojen için oldukça düşüktür. Bu da depolama, taşıma ve uygulama süreçlerinde zorluklar yaratabilir. Ayrıca gaz formunda sıkıştırma işleminde ciddi miktarda enerji harcanmaktadır. Fakat hidrojen enerjisinin temiz ve sürdürülebilir özelliklere sahip olması, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma anlamında oldukça önemlidir.

3.2. Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen üretimi fosil yakıtlar ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanabilir. Şekil 3.7’de gösterilen sınıflandırma, hidrojenin geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimini göstermektedir. Hidrojen enerjisinin geleneksel yöntemlerle üretilmesi mevcut altyapı tarafından desteklenmektedir. Bu üretim kısa vadede ekonomik açıdan uygun olabilir. Ancak uzun vadede çevresel etkileri göz önünde bulundurulduğunda son derece sağlıksız olduğu ifade edilmektedir. Öte yandan yenilenebilir kaynaklarla hidrojen üretimi karbon emisyonlarını azaltma ve sürdürülebilir enerji açısından oldukça

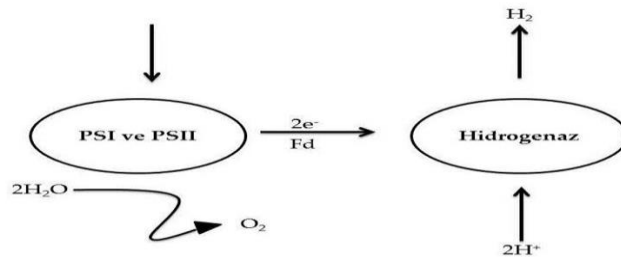
önemlidir. Hidrojen enerjisinin üretimi birçok yöntemle yapılabilir. Yapılacak üretimin, nötr karbon hedeflerine ulaşılabilmesine uygun olması gerekmektedir.



Şekil 3. 7. Hidrojen üretim yöntemleri (Yıldırım ve ark., 2023).

3.2.1. Fotobiyojik Hidrojen Üretimi

Algler ve siyanobakteri gibi fotosentetik mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen; ışık enerjisi kullanılarak su moleküllerinin hidrojen ve oksijene ayrıştırıldığı üretim sürecidir. Bitkisel atıkların sürece dahil olmasıyla yapılan üretimin yenilenebilir olmasının hedeflendiği belirtilmektedir. Bu mikroorganizmalar hidrojenaz veya nitrojenaz enzimleri yardımıyla suyu ayrıştırarak hidrojeni üretir. Direkt fotobiyojik hidrojen üretimi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 8. Direkt fotobiyojik üretim (Şentürk ve Büyükgüngör, 2010).

Fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması noktasında oldukça önemli olan bu yöntemin teknolojiye uygun hale getirilebilmesi için çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Ortaya çıkan ürünün oksijen ve hidrojenden oluşması oldukça önemlidir. Ayrıca gerekli olan sıcaklık ve basınç değerlerinin oldukça düşük seviyede olması sayesinde enerji maliyetlerinin düşürülebileceği öngörülmektedir (Genç, 2009).

Günümüzde laboratuvar ölçekli deneyleri oldukça başarılı olan bu üretim yönteminde henüz endüstriyel boyuta geçilememiştir. Üretilen hidrojenin verimliliğini arttırma yönünde çalışmalar devam etmektedir.

Fotosentetik alg ve siyanobakteri gibi mikroorganizmalar, ışık enerjisini kullanarak su molekülünü oksijen, proton ve elektronlarına ayırmaktadır. Temel reaksiyona ait Denklem 3.4'de gösterilmektedir.



Denklem incelendiğinde su molekülleri Fotosistem II tarafından emilen ışık enerjisi sayesinde parçalanmaktadır. Bu yöntemde güneş enerjisi doğrudan kullanılmaktadır. Üretilen hidrojen, çevresel ve sürdürülebilirlik açısından oldukça değerlidir. Ancak oksijen varlığı hidrojen üretimini yavaşlatabilir. Bu da sistemin verimliliğinin düşmesine neden olabilir.

Ayrıca organik maddelerin Fotosentetik alg ve siyanobakteri gibi mikroorganizmalar tarafından parçalanmasıyla da hidrojen üretilir (Dursun ve Gülşen, 2019). Direk foto biyoliz yönteminin aksine karanlık fermantasyonla desteklenen bu yöntem ile gece de hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir. Bu sayede üretim potansiyelini arttırmak anlamında avantaj elde edilebilir.

Avantajları

- Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve çevresel sürdürülebilirliği sağlama anlamında oldukça etkili olabilir.
- Bitkilerin üretim sırasında karbondioksit emmeleri sağlanır. Böylece çevre dostu biyoyakıt alternatifi elde edilmiş olur.
- Sürecin düşük basınç ve sıcaklıkta çalışabilmesi ekonomik açıdan oldukça verimli olabilir (Fakhimi, 2020; Javed, 2023).

Zorlukları

- Hidrojen verimliliği genellikle düşüktür.
- Sürecin endüstriyel boyutlarda uygulanabilmesi için daha çok mühendislik çalışması gerekmektedir (Genç, 2009; Dursun ve Gülşen, 2019).
- Yapılan çalışmalarda süreçteki oksijen varlığının hidrojen üretimini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Fotosentetik alg ve siyanobakteri gibi mikroorganizmalar için oksijensiz ortamlar oluşturularak hidrojen üretimi teşvik edilebilir (Dębowski ve ark., 2021).

3.2.2. Fotoelektrokimyasal Hidrojen Üretimi

Fotoelektrokimyasal hidrojen üretiminde ışığa duyarlı bir fotoelektrot kullanılarak ışık enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülür. Yapılan araştırmalarda, fotoelektrotların güneş ışığını emmesi ile elektron-pozitif delik çiftleri oluşmaktadır. Bu elektron ve pozitif delikler sayesinde suyun ayrışması için gerekli enerji sağlanmaktadır. Fotoelektrokimyasal yöntemde kullanılan iki türde fotoelektrot vardır.

- Suyun pozitif delikler tarafından oksitlenerek oksijen ve hidrojen üretimine olanak sağlayan türü fotoanotlardır. Yapısında geniş bant aralığına sahip yarı iletkenler kullanılmaktadır (Arya, 2012). Kullanılan malzemelerin geniş bant aralığına sahip olması üretilen hidrojenin daha etkin olabilmesine olanak sağlayabilir. Bu yarı iletkenler arasında TiO_2 , Fe_2O_3 ve $BiVO_4$ yaygın olarak kullanılmaktadır (Tezcan ve Kâhya Düdükçü, 2023).
- Diğer türü olan fotokatotlar ise protonları indirgeyerek hidrojen üretimine olanak sağlamaktadır. Yapılarında Si , $GaAs$ ve CdS yaygın olarak kullanılmaktadır.

Su molekülleri pozitif delikler tarafından oksitlenerek, fotoanot üzerinde oksijen ve protonlarına ayrılmaktadır. Denklem 3.5'te fotoanot üzerindeki reaksiyon gösterilmektedir.

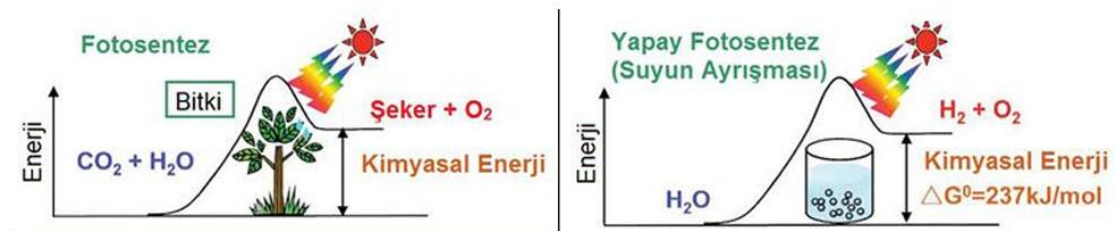


Fotokatot üzerindeki protonların, elektronlarla birleşerek hidrojen gazı oluşturduğu Denklem 3.6'da gösterilmiştir.



Yarı iletken fotoanotlar ve fotokatalizörlerin, su moleküllerini oksijen ve hidrojen bileşenlerine ayırma noktasında önemli olduğu belirtilmektedir (Ros ve Morante, 2020). Fotokatot, güneş ışığını emerek elektron-delik çifti oluşturmaktadır. Uyarılan elektronlar fotokatot yüzeyine taşınarak protonlarla reaksiyona girerler. Sonuç olarak proton ve elektronların birleşimi ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir.

Sistem verimliliği fotoelektrot malzemelerinin performansı, ışık absorpsiyon verimliliği, elektron-delik ayrılması, elektrokimyasal reaksiyon kinetiği, elektrolit özellikleri, sistem tasarımı, çevresel koşullar gibi birçok etkene bağlıdır. Ayrıca kullanılan yarı iletken malzemelerin zor bulunması ve pahalı olması sistemin verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Sistemin verimlilik sorunlarını azaltmaya yönelik çalışmalar sürdürülmektedir.



Şekil 3. 9. Klorofil taşıyan bitkiler tarafından fotosentez ve bir fotokatalizör varlığında suyun fotokatalitik ayrışması reaksiyonu (yapay fotosentez) (Kudo ve Miseki, 2009).

Fotoelektrokimyasal hidrojen üretiminde klorofil taşıyan bitkiler tarafından fotosentez ve bir fotokatalizör varlığında suyun fotokatalitik ayrışması reaksiyonu (yapay fotosentez) Şekil 3.9'da verilmiştir. Doğal fotosentezde güneş ışığı kullanılarak klorofil taşıyan bitkilerin karbondioksit, su, glikoz ve oksijene dönüşümü gerçekleşmektedir. Yapay fotosentezde ise fotokatalizör kullanılarak su, ışık enerjisi ile birleştirilir. Böylelikle oksijen ve hidrojene kolaylıkla erişilebilir.

Avantajlar ve Zorluklar

- Sıfır emisyon ve fosil yakıtlardan uzaklaşma anlamında PEC hidrojen üretimi oldukça avantajlıdır.
- Düşük sıcaklıkta çalışması ve istenilen sonuç üzerinde yoğunlaştırılması sistemin önemli avantajları arasındadır (Arya, 2012).

- Kullanılan malzemelerin verimliliğinin sınırlı olması, yüksek maliyetler ve fotoelektrotların kararlılığı gibi problemler sistemin endüstriyel kullanımını zorlaştırabilir. Ayrıca kullanılan ışığın sadece belirli dalga boylarında alınabilmesi de sistemin tam olarak çalışmasına engel sayılabilir.

Fotoelektrokimyasal hidrojen üretimi, güneş enerjisini doğrudan yakalayarak yenilenebilir enerji anlamında temiz hidrojen üretme potansiyeline sahip bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

3.2.3. Hidrojenin Termokimyasal Yöntemle Üretilmesi

Termokimyasal yöntemle hidrojen üretimi yüksek sıcaklık ve ısı enerjisinin kullanıldığı kimyasal reaksiyonları içeren, su moleküllerinin oksijen ve hidrojene ayrıştırılmasını sağlayan bir teknolojidir. Oluşan kimyasal reaksiyonlar katalizörler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Sera gazı salınımı olmadan hidrojen üretmeyi amaçlayan bu yöntem, yenilikçiliği benimseyen bir süreç olarak değerlendirilebilir.

Termokimyasal yöntemle hidrojen üretimi bazı döngülerle gerçekleştirilmektedir.

- 800-1000°C arası sıcaklıklarda suyun, kükürt dioksit ve iyotla reaksiyona girmesiyle hidrojen ve oksijen oluşumu sağlanabilir. Nükleer reaktörlerin sıcaklık kaynaklarının sisteme entegre edilmesi ile desteklenebilir. Sistemin yüksek sıcaklıklarda çalışması hidrojen verimliliğinin artırılması yönünde oldukça etkilidir. Ancak sistem karmaşıklığı ve yüksek sıcaklıkların elde edilme ihtiyacı, kullanılan bu yöntemin ticari uygulamalar için geliştirilmesi anlamına gelebilir (Asal ve Acır, 2021).
- Yaklaşık 500°C civarında su molekülleri bakır ve klor bileşikleri kullanılarak parçalanabilir. Yapılan araştırmalarda, sistemdeki kayıpların yoğun olduğu ve enerji verimliliğinin yaklaşık %55,4 olduğu ifade edilmiştir (Çorumlu ve Öztürk, 2020). Düşük karbon emisyonlarına sahip olması sayesinde en çok tercih edilen çevrim olarak değerlendirilebilir.
- 2000°C sıcaklıkta su moleküllerinin demir oksit ile reaksiyona sokulmasıyla ve demir oksit bileşiğinin indirgenmesiyle hidrojen oluşturulmaktadır.

Termokimyasal hidrojen üretiminin gerçekleştirilebilmesi için çok yüksek sıcaklıklar gereklidir. Bu sıcaklıkların sağlanabilmesi için, genellikle fosil yakıtlar veya nükleer enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, termokimyasal hidrojen üretim yöntemlerinden olan yüksek sıcaklıklarda elektroliz ile de su buharı formunda

ayrıştırılarak hidrojen üretimi sağlanabilir. Fakat kullanılan malzemelerin dayanıklılık gereksinimleri nedeniyle sınırlandırılmışlardır (Asal ve Acır, 2021).

Termokimyasal hidrojen üretiminde gerçekleştirilen reaksiyonlar kimyasal döngüler halinde yapılmaktadır.

3.2.4. Buhar Yapılandırması ile Hidrojen Üretimi

Doğalgaz gibi hidrokarbonlar kullanılarak hidrojen üretimi yapılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde doğalgaz yakıtı su buharı ile yüksek sıcaklıklarda reaksiyona sokularak hidrojen, karbon monoksit ve bir miktar karbondioksit elde edilir. Yüksek verimlilik potansiyeline sahip olan bu yöntem, genellikle büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Buhar yapılandırması ile hidrojen üretimi süreci üç aşamada gerçekleşmektedir.

- İlk seviyede, hidrokarbonlar genellikle 700-100°C sıcaklıklarda su buharı ile reaksiyona sokularak karbon monoksit ve hidrojen üretimi sağlanmaktadır. Bu üretime ait reaksiyon Denklem 3.7’de gösterilmiştir.

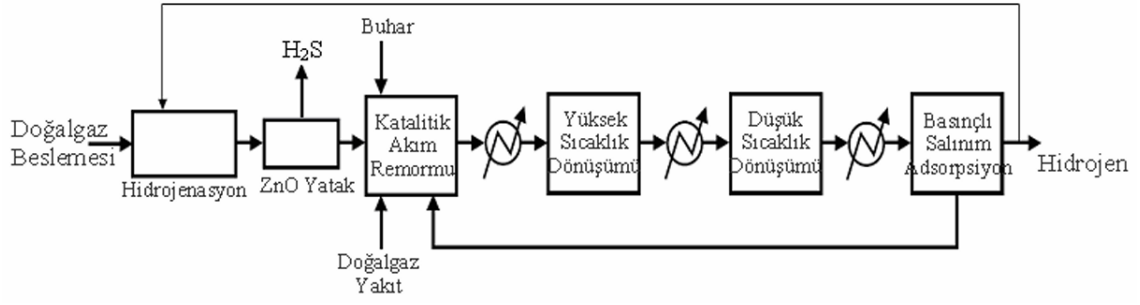


- İkinci seviyede, ilk seviyede ortaya çıkan karbonmonoksit su buharıyla reaksiyona sokularak ek hidrojen ve karbondioksit üretilir. Gerçekleşen kimyasal reaksiyonları hızlandırmak için genellikle nikel katalizörler kullanılır. Kullanılan nikel katalizörlerin, yüksek sıcaklıklarda hidrokarbonları parçalayıp hidrojene dönüştürme noktasında oldukça etkili olduğu düşünülmektedir. Kullanılan katalizörlerin yüksek sıcaklığa dayanıklı ve ekonomik olmaları oldukça önemlidir (Mokheimer ve ark., 2015). Bu üretime ait reaksiyon Denklem 3.8’de gösterilmiştir.



- Son olarak, açığa çıkan karbondioksit hidrojenden ayrıştırılarak bertaraf edilir.

Şekil 3.10’da Buhar-metan reformasyonu ile hidrojen üretim tesisinin blok akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3. 10. Buhar-metan reformasyonu ile hidrojen üretim tesisinin blok akış diyagramı (Spath ve Mann, 2000).

Üretilen hidrojen, basınç salınlımlı adsorpsiyon (PSA) gibi yöntemlerle çeşitli saflaştırma işlemlerine tabi tutulmaktadır. Endüstriyel kullanımlar için oldukça önemli olan bu çalışma ile dünyadaki hidrojen üretiminin yaklaşık olarak %95'inin bu yöntemle sağlandığı ifade edilmiştir (Boyano ve ark., 2012).

Buhar yapılandırması ile hidrojen üretiminin çevresel etkisi, sürecin karbon ayak izine bağlı olarak değişebilir. Karbon yakalama teknolojilerinin sisteme entegrasyonu ile karbon salınımının önemli ölçüde azaltılabileceği öngörülmektedir.

Ayrıca buhar yapılandırılması ile hidrojen üretiminin sorbent destekli buhar reformasyonuna dönüştürülmesi mümkündür. Yapılan çalışmalarda, karbondioksitin üretim süreci boyunca emilimi sağlanarak daha saf hidrojen üretiminin gerçekleştirilebileceği ifade edilmiştir (Cherbanski ve Molga, 2018).

3.2.5. Kömürün Gaz Haline Dönüştürülmesi Yöntemiyle Hidrojen Üretimi

Bu yöntemde kömür, yüksek sıcaklık ve basınç altında kısmi oksidasyon ile yakılarak gaz hale dönüştürülmektedir. Gazlaştırma sürecinde kömür, genellikle 800-1600°C sıcaklık ve yüksek basınç altında buhar ve oksijenle reaksiyona girmektedir. Reaksiyon sonucunda, karbonmonoksit ve hidrojen karışımı elde edilmektedir. Bu reaksiyona ait Denklem 3.9'da verilmiştir



Kömür ve oksijen arasındaki kısmi oksidasyon reaksiyonuna ait Denklem 3.10'da verilmiştir.



Kömürün gazlaştırma işlemi sonucunda açığa çıkan karbon monoksit, su-gaz kaynaştırma reaksiyonuna tabi tutulmaktadır. Bu reaksiyon ait Denklem 3.11’da verilmiştir.



Bu reaksiyonla, ortaya çıkan karbonmonoksit oranı düşürülerek hidrojen zenginleştirilir.

Avantajlar

- Rezervleri hala yeterli düzeyde olan kömürün kullanılması ile enerji arz güvenliği artırılabilir ve ülkeler için stratejik bir avantaj sağlanabilir (Aktan, 2022).
- Gazlaştırma sürecinin yüksek oranda hidrojen içeren sentez gazına dönüştürülmesi, hidrojen üretimi açısından oldukça etkilidir (Güngör ve ark., 2022).

Zorluklar ve Çevresel Etkiler

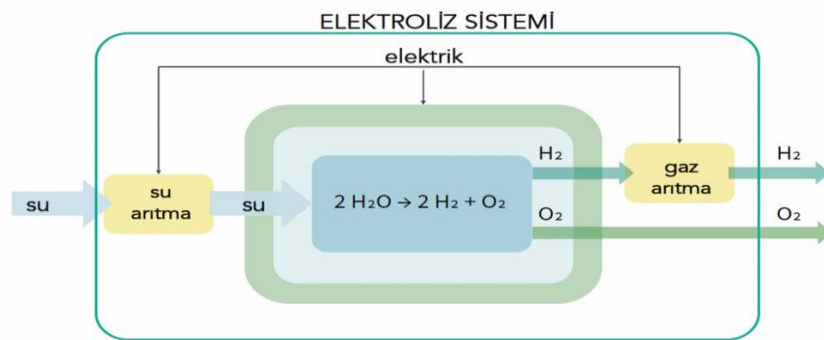
- Kömür gazlaştırma işlemleri sırasında ortaya çıkan yoğun karbondioksit, çevresel açıdan oldukça olumsuz etkilere sahiptir. CCS teknolojileri kullanılarak süreçten kaynaklanan emisyonların azaltılmasına yönelik çalışmalar sürdürülmektedir (İlbaş ve Karyeyen, 2017).
- Gazlaştırma tesislerinin ilk kurulum ve operasyon maliyetleri oldukça yüksektir.

Kömür gazlaştırma, enerji santralleri ve diğer endüstriyel uygulamalar için kullanılabilecek geliştirilmesi gereken bir teknolojidir (Aktan, 2022).

3.2.6. Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi

Yenilenebilir enerji kaynakları entegrasyonlu elektroliz yöntemi ile hidrojen üretimi, yeşil ve sürdürülebilir anlamda hidrojen elde etmenin en önemli yollarından biri olarak kabul edilebilir. Karbon emisyonlarını sıfıra indirme esasına dayalı bu üretim yönteminde, su molekülleri elektroliz işlemine tabi tutularak ayrıştırılmaktadır. Elektroliz yoluyla hidrojen üretiminin temel prensibi sayılan bu işlem sonucunda anotta oksijen gazı, katotta ise hidrojen gazı üretilmektedir.

Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretiminde, suyun elektrolizi ve ortaya çıkan ürünlere ait kimyasal reaksiyon aşamaları Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 11. Suyun elektrolizi (Türk ve Engin, 2024).

Elektroliz yoluyla hidrojen üretiminde, su moleküllerinin parçalanmasıyla sadece oksijen ve hidrojenin üretilmesi çevresel açıdan oldukça önemlidir. Bu sürecin özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesiyle, karbon emisyonundan arınmış temiz hidrojeni üretmek mümkün hale gelmektedir.

Elektrolizör adı verilen cihazlar ile gerçekleştirilen elektroliz işlemi süreci anot ve katot elektrotları ile yürütülmektedir. Genellikle su içine daldırılmış elektrotlara akım uygulanarak gerçekleştirilen bu işlem sonucunda su molekülleri, kimyasal reaksiyona uğrayarak hidrojen ve oksijene ayrılmaktadır.

Hidrojen iyonları (H^+) katot elektrodunda, elektronları alarak hidrojen gazına (H_2) dönüşür. Buna reaksiyona ait Denklem 3.12’de verilmiştir.



Anot elektrodunda ise su molekülleri, oksijen gazı ve protonlara ayrılmaktadır. Buna reaksiyona ait Denklem ise 3.13’de verilmiştir.



Elektroliz yöntemi ile hidrojen üretiminde, birçok elektrolizör alternatifi geliştirilmiştir.

Alkali Elektroliz

Düşük maliyetli ve yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Elektrolit sıvı olarak *KOH* çözeltisinin kullanıldığı bu yöntemde enerji verimliliği diğer yöntemlere göre daha düşük olabilmektedir (Gördelsel ve ark., 2022).

Nikel veya platin gibi ikili elektrotlar kullanılarak tasarlanan bu sistemde, elektrotlara elektrik akımı uygulanarak su moleküllerinin oksijen ve hidrojen elementlerine ayrıştırılması sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada elektrotlara farklı potansiyeller uygulandığında, üretilen hidrojen miktarının arttığı gözlemlenmiştir (Özgür ve Mert, 2023).

Alkali elektroliz yöntemi, diğer elektroliz yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha düşük maliyetlidir. Fakat enerji verimliliği yeterli olmayabilir. Yapılan çalışmalarda, hidrojen üretimi için $4.5-5.0 \text{ kWh/m}^3$ enerji tüketimi gerektiği ifade edilmektedir (Rashid ve ark., 2015). Ayrıca elektrotlarının zamanla korozyona uğraması nedeniyle dinamik performansının yeterli olmadığı düşünülmektedir (Li ve ark., 2023).

Alkali elektroliz yönteminde elektrolit sıvının iletkenlik seviyesinin düşük olması nedeniyle verimlilik yeterli seviyede olmayabilir (Xue ve ark., 2021). Fakat yapılan optimizasyonlarla bu problem çözülebilir.

PEM Elektroliz

PEM (Proton Elektrolit Membranlı) elektrolizörleri ile hidrojen üretim yöntemi günümüzde üzerine yoğunlaşılacak teknolojilerden biridir. Üretilen hidrojenin oldukça saf olması ve verimliliğinin yüksek olmasının yanı sıra elektrolizörlerde kullanılan malzemelerin maliyeti oldukça yüksektir (Taşkolu ve Acır, 2019).

PEM hücreleri ile su moleküllerinin ayrıştırılması sırasında proton geçirgenliği sağlayan membranlar kullanılmaktadır. Ayrıca PEM hücreleri yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenebilir. Yapılan bir akademik çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilmiş PEM elektrolizi kullanılarak çevre dostu hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir (Karanasios ve ark., 2011). PEM elektrolizörlerinin yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenmesi oldukça önemlidir ve bu sayede karbon emisyonları azaltılabilir (Guo ve ark., 2019). Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu sürdürülebilir hidrojen üretimine olanak sağlayabilir (Xue ve ark., 2021).

PEM elektrolizörler oldukça az yer kaplarlar ve oldukça hızlı tepki verirler. Fakat titanyum gibi değerli katalizörlerin kullanımı maliyeti fazlasıyla arttırabilir (Sun ve ark., 2021).

Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz (HTE)

Yüksek sıcaklıkta elektroliz yönteminde oldukça yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır. Bu bağlamda nükleer enerji veya güneş enerjisi kullanılarak hidrojen üretimi sağlanmaktadır. Bu elektroliz yönteminde yüksek sıcaklıklarda su moleküllerini ayrıştırmak oldukça kolaydır. Ancak yüksek sıcaklığı elde etme maliyeti yüksek olabilir (Gördelsel ve ark., 2022).

Yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemi, endüstride kullanılan atık ısının hidrojene dönüştürülmesine olanak sağlamıştır (Coşkun Avcı, 2014).

Yüksek sıcaklıklarda su moleküllerinin parçalanması nedeniyle daha az enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Elektroliz esnasında yüksek sıcaklıklara ulaşılması verimlilik ve yoğun hidrojen üretimi açısından oldukça önemlidir (Harvego ve ark., 2009). Yüksek sıcaklıkta elektroliz yöntemine benzeyen SOEC teknolojisi de yüksek sıcaklıklarda çalışarak hem hidrojen hem de sentez gazı üretimine olanak tanımaktadır. Bu teknoloji yüksek verimliliği ile dikkat çekmektedir (Kazempoor ve Braun, 2015).

Yüksek sıcaklıklarda verimliliğin yüksek olmasının yanı sıra, sistemin mekaniğinin ortaya çıkaracağı problemlere de dikkat edilmelidir (Li ve ark., 2023).

Rüzgâr ve Güneş Enerjisi ile Desteklenen Elektroliz

Yapılan çalışmalarda, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonu ile hidrojen üretim maliyeti düşürülmeye çalışılmıştır. Rüzgâr enerjisi ile birleştirilmiş elektroliz sisteminde, hidrojen üretim maliyetleri 3 \$/kg gibi düşük seviyelere indirgenebilir (Saur ve Ramsden, 2011). Ayrıca, küçük rüzgâr türbinleri ve fotovoltaik sistemlerle çalıştırılan elektroliz reaktörleri ile daha küçük ölçekli hidrojen üretim sistemlerinin devreye alınması sağlanabilir (Huang ve Kuo, 2016).

Yapılan simülasyon çalışmalarında, fotovoltaik-elektroliz sistemlerinin verimli bir şekilde hidrojen üretimi yapabileceği öngörülmektedir (Zhou ve ark., 2023).

Karbon ayak izlerinin azaltılması anlamında elektroliz süreci yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenebilir (Guo ve ark., 2019).

MEC Hücreleri

MEC (Mikrobiyal Elektroliz Hücresi) hücrelerinde organik maddelerin elektrokimyasal reaksiyonlarla parçalanması ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Atık suyun arıtılması sürecinde kullanılabilen bu yöntem, tamamen çevre dostu özelliği ile dikkat çekmektedir (Logan ve ark., 2008).

İyon Değişim Membranları ile Elektroliz

Hidrojen üretimin iyon değişim membranları kullanılarak yapıldığı bir süreçtir. Bu elektrolizörde katyon ve anyon değişim membranları kullanılarak, elektrotlar arasındaki direnç kayıpları azaltılmaktadır. Kullanılan malzemenin asidik çözeltilere dayanıklı olması nedeniyle verimliliğin oldukça yüksek olduğu ifade edilmektedir (Yuzer ve ark., 2019).

Genel anlamda elektroliz yöntemleri değerlendirildiğinde, yüksek enerji tüketimi maliyetleri atırabilir (Taşkolu ve Acır, 2019).

Günümüzde elektrot malzemelerinin geliştirilmesi, düşük maliyetli alternatiflerin bulunması ve verimliliğin artırılması gibi alanlarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Kullanılan elektroliz yöntemlerinin enerji ihtiyaçlarının yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanması hem çevre hem de enerjinin sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir. Bu yaklaşım biçimleri hem doğanın korunması hem de enerji arz güvenliği açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Malzeme teknolojilerinin gelişmesi ve yenilenebilir kaynakların üretime dahil edilmesi ile yüksek saflıkta ve yoğun hidrojen üretimleri gerçekleştirilebilecektir.

3.3. Hidrojen Depolama Yöntemleri

Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri depolama teknikleri açısından oldukça önemlidir.

Depolama işleminde kullanılan tankların patlamaya dayanıklı olması ve kaçak durumunda hidrojenin hızla havaya yayılmasını sağlayan tasarımlar gerektirir (Koşar, C., 2021).

Hidrojenin depolanması, yenilebilir enerji kaynaklarının süreksizliğini ortadan kaldırma noktasında önemli bir yere sahiptir (Yılmaz, M. ve ark., 2023).

3.2.1. Sıkıştırılmış Gaz Olarak Depolama

Sıkıştırılmış gaz formundaki hidrojenin 350-700 bar arasında depolanabileceği yöntemdir. Hidrojen gazının hacminin küçültülerek taşınabilir hale getirilmesi oldukça avantajlıdır. Sıkıştırma sürecinde meydana gelen yüksek basınç hidrojenin yoğunluğunu artırmaktadır. Fakat bu işlem sırasında tüketilen enerji içeriği oldukça yüksektir. Bu

bağlamda ortaya çıkan enerji kayıpları verimliliği olumsuz yönde etkileyebilir (Koşar, 2021).

Depolama yönteminde kullanılan tanklar yüksek basınca dayanıklı olacak şekilde çelik, alüminyum ve karbon fiber gibi dayanıklı malzemelerden üretilmek zorundadır. Ayrıca ortaya çıkabilecek sızıntıların önüne geçebilmek amacıyla tankların, özel katmanlarla kaplanması oldukça kritik bir öneme sahiptir (Güvendiren ve Öztürk, 2020).

Geleneksel olarak kullanılan çelik tankların ağır olması karbon fiber gibi daha hafif ve sağlam malzemelere yönelimi artırmıştır. Hidrojenin yanıcı, parlayıcı ve patlayıcı olması nedeniyle depolama ve taşıma işlemlerinde ilave güvenlik önlemleri alınmalıdır.

Depolama sırasında hidrojen gazının yüksek basınç altında patlama riskinin olması sebebiyle tanklar, gazın metal yüzeyine değmeyeceği çok katmanlı bir teknoloji ile üretilmektedir.

Hidrojenin küçük moleküler yapısı, tank yüzeyindeki metallere geçebilmesine neden olabilir. Depolamanın, ortaya çıkabilecek tehlikeli durumlar göz önünde bulundurularak karbon fiber gibi malzemelerle yapılmasının daha güvenli olacağı düşünülmektedir.

Hidrojenin depolanarak taşınması gibi işlemler özel ekipman ve altyapı gerektiren bir teknolojiye sahip olmalıdır. Ancak, hidrojen dolum istasyonları fosil yakıtlardaki gibi yaygın değildir. Hidrojen taşımacılığı için gerekli altyapı halen gelişim aşamasındadır (Modisha ve ark., 2019).

Depolama işlemlerinde yenilikçi malzeme çözümleri ve kimyasal bağların daha sağlam hale getirilmesi işlemleri, güvenlik önlemleri için kritik bir öneme sahiptir (Frost ve ark., 2006). Yapılan araştırmalarda hidrojenin sıkıştırılması sürecinde, enerji içeriğinin yaklaşık %12-15'inin kayba uğradığı ifade edilmektedir. Bu sebepten dolayı depolama konusunda alternatif depolama çözümleri araştırılmaktadır (Koşar, 2021).

Enerji sektöründe fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmaya yönelik konularda yapılan araştırmalar oldukça önemlidir (Güvendiren ve Öztürk, 2020). Bu yöntem avantajlı olsa da depolama altyapısının geliştirilememesi, enerji maliyetleri ve güvenlik önlemleri gibi konularda ortaya çıkan problemler çözüme kavuşturulamamıştır.

Gelişen teknoloji ile hidrojenin sıkıştırılmış gaz olarak depolanmasının önündeki engelleri ortadan kaldırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalar sayesinde enerjinin etkin ve verimli kullanılmasının önü açılabilir.

Ortaya çıkan yeni gelişmeler enerjinin sadece teknolojik değil, aynı zamanda ekonomik açıdan sürdürülebilirliğini de desteklemektedir.

3.2.2. Hidrokarbonlar ile Depolama

Bu yöntemde metan, propan ve bütan gibi hidrokarbonlar kullanılarak gazifikasyon ve piroliz gibi işlemler yapılmaktadır. Yapılan bu termokimyasal dönüşüm sürecinde hidrojen serbest bırakılarak depolama işlemi gerçekleştirilmektedir. Biyokütle tabanlı kaynaklar kullanılarak yapılan hidrojen üretimi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlamaktadır (Koşar, 2021; Prasertcharoensuk ve ark., 2019).

Ayrıca reaksiyon sonucu ortaya çıkan gazifikasyon sürecinde hidrokarbon bileşikleri su buharı ve oksijenle yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girerek hidrojen, oksijen ve karbondioksit gibi ürünler oluşturmaktadır (Balat ve Kırtay, 2010). Ortaya çıkan hidrojenin, saflaştırılması işlemlerinden sonra sürdürülebilir bir yakıt kaynağına dönüşümü sağlanabilir (Öztürk ve Kürkçü, 2018; Dong ve ark., 2017). Bu süreçler ayrıca hidrojen üretim maliyetini düşürme potansiyeline sahiptir. Hidrojenin depolanmasının doğrudan hidrokarbon bileşikleri veya biyokütle tabanlı kaynaklarla yapılması, yenilenebilir enerji hedeflerinde sürdürülebilir bir alternatif sunabilir (Seçer ve ark., 2018; Setiabudi ve ark., 2020).

3.2.3. Hidrürler ile Depolama

Bu depolama yöntemi, hidrojen gazının belirli koşullar altında metal veya alaşım yüzeyine temas ettirilmesi ile başlayan kimyasal reaksiyon sürecidir. Bu süreç sonrasında hidrojen güvenli ve yüksek yoğunluklu bir şekilde depolanmaktadır.

Hidrojen depolamada kullanılan hidrürler metal, kimyasal ve kompleks hidrürler olarak farklı kategorilere ayrılmaktadır. Her bir hidrür kategorisi farklı bileşikler ile birleşerek farklı bileşik çeşitlerine dönüştürülmektedir. Kompleks hidrürler, yüksek enerji yoğunluğuna sahip bileşikler oluşturabilir. Ancak depolama maliyetlerinin oldukça yüksek olduğu belirtilmektedir (Öztürk ve Kürkçü, 2018; Kayfeci ve ark., 2014).

Metal hidrürler, dayanıklı bileşiklere dönüştüğünden özellikle yüksek enerji kapasitesine sahip uygulamalara uygun olduğu ifade edilmektedir.

Yapılan çalışmalarda, kimyasal hidrürlerin lityum gibi bileşiklerle birleşmesi sonucu taşıma kapasitelerinin artırılabilceği ortaya konulmuştur. Bu sebeple taşınabilir enerji uygulamalarında oldukça kullanışlı olacağı öngörülmektedir.

Kompleks hidrürlerin ise endüstriyel enerji depolama alanında tercih edilebileceği ifade edilmektedir.

Metal hidrürler ile hidrojen depolama işleminde hidrojen gazı metal hidrürler tarafından tutulmaktadır. Bu tutma işlemi, atom boşluklarına sıkıştırma şeklinde gerçekleştirilmektedir. Hidrojen gazı metal hidrür bileşiğinin yüzeyine emilerek atomik hidrojen olarak depolanmaktadır. Metal hidrürün ısıtılması ile de hidrojen, istenildiğinde serbest bırakılabilir. Hızlı emilim ve serbest bırakma özellikleri yüksek olan bazı alaşımlar sayesinde hidrojenin, taşınabilir cihazlarda veya yakıt hücrelerinde kullanılabileceği öngörülmektedir (Durandurdu, 2014; Kukkapalli ve ark., 2023).

Metal hidrürler ile yapılan depolama işleminde basınç seviyesi güvenli aralıkta olduğundan, endüstriyel olarak kullanılması mümkün olabilir (Öztürk ve Kürkcü, 2018; Kayfeci ve ark., 2014).

Kimyasal hidrürlerle yapılan depolama işlemlerinde, hidrojenin depolanması için kimyasal reaksiyonlar gerekmektedir. Lityum alüminyum hidrür bileşikler, su veya bir katalizör ile reaksiyona girerek hidrojenin ortaya çıkarılmasına olanak tanırırlar. Yapılan bu işlemin maliyeti yüksek olduğundan tek kullanımlık veya taşınabilir uygulamalarda tercih edilmektedir (Kayfeci ve ark., 2014; Küçükdeveci, 2018).

Kompleks hidrürlerle yapılan depolama işlemleri için yüksek sıcaklık ve basınç gerekmektedir. Yapılan araştırmalar kompleks hidrürlerin enerji sektöründe alternatif bir hidrojen depolama çözümü olarak kullanılabileceğini öngörmektedir (Nacar ve Öncü, 2022).

Hidrojenin serbest bırakılması işleminde enerji tüketimi olduğundan, termal yönetim sistemleri ile enerji kayıplarını en aza indirmek ve depolama verimliliğini artırmak mümkün olabilir (Küçükdeveci, 2018).

Yapılan araştırmalarda hidrojenin kimyasal olarak bağlanmasının, yanıcı gazların depolanmasına kıyasla daha güvenli bir yöntem olabileceği belirtilmektedir (Öztürk ve Kürkcü, 2018; Kayfeci ve ark., 2014).

Nanoteknoloji uygulamalarının yoğunlaşması, hidrürlerin yüzey alanını artırabileceğimiz yeni teknolojilere olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, hidrojen emilimini hızlandırarak depolama kapasitesini arttırmak mümkün olabilir (Kayfeci ve ark., 2014; Küçükdeveci, 2018).

3.2.4. Karbon ve Nano tüpler ile Depolama

Karbon nanotüplerle hidrojen depolama, hidrojenin fiziksel veya kimyasal olarak karbon nanotüp yapılarında tutulduğu bir yöntem olarak ifade edilebilir. Bu işlem sırasında

hidrojen, karbon nanotüplerin iç ve dış yapısına salınarak kimyasal bağlar ile bağlanmaktadır. Ancak, hidrojenin serbest bırakılması sırasında bazı yan ürünler oluşabilir. Bu yan ürünler fazladan enerji gereksinimine sebep olabilir (Dönmez ve Ayas, 2021).

Karbon nanotüpleri yüksek elektriksel iletkenlik, termal dayanıklılık ve yüksek yüzey alanı gibi özellikleri sayesinde enerji depolama sistemlerinde ön plana çıkmaktadır (Uzun, 2018; Wang ve ark., 2024). Karbon nanotüplerin yüzey alanlarının büyük olması, daha fazla depolamaya olanak sunabilir (Cheng ve ark., 1999; Uzun, 2018).

Karbon nanotüp destekli katalizörler, kimyasal reaksiyon hızını artırarak daha sürdürülebilir bir hidrojen üretim sürecine olanak sağlayabilir (Dönmez ve Ayas, 2021).

Karbon nanotüpler tek duvarlı ve çok duvarlı olmak üzere iki yapıda üretilmektedirler. Tek duvarlı olanları hassas elektronik ve batarya uygulamalarında tercih edilirken, çok duvarlı olanları daha çok süper kapasitörlerde ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir (Cheng ve ark., 1999; Uzun, 2018). Özellikle hızlı enerji boşaltma uygulamaları için ideal olabilirler (Erucar ve Gülçay, 2020; Wang ve ark., 2024).

Metal oksitlerin karbon nanotüplere bağlanması enerji depolama kapasitesini artırmaktadır. Bu bağlamda, karbon nanotüpler çeşitli cihazlarının enerji depolama performansını iyileştirerek enerji ihtiyaçlarına yanıt verebilir (Uzun, 2018; Erucar ve Gülçay, 2020).

Karbon nanotüpler, yüksek enerji yoğunluğu ve termal stabilitesi sayesinde alternatif hidrojen depolama yöntemleri arasında ön plana çıkmaktadır (Uzun, 2018; Wang ve ark., 2024).

Karbon nanotüplerin büyük ölçekli üretiminde maliyetlerin yüksek olması ve çevresel etkilerle ilgili bazı endişeler bulunmaktadır (Uzun, 2018; Wang ve ark., 2024).

Yenilenebilir enerji depolama sistemlerine karbon nanotüplerin entegrasyonu ile güneş ve rüzgâr gibi kaynaklardan elde edilen enerji daha verimli bir şekilde depolanabilir. Bu tür alanlarda yapılacak araştırmalar, karbon nanotüplerin enerji depolamada daha etkin kullanılmasına olanak sağlayabilir (Uzun, 2018; Erucar ve Gülçay, 2020).

3.2.5. Sentetik Karbon ile Depolama

Sentetik karbon, enerji depolama teknolojilerinde yenilikçi ve sürdürülebilir bir etkiye sahiptir. Laboratuvar ortamında belirli özelliklerde üretilen bu malzeme, enerji yoğunluğu ve depolama kapasitesi açısından oldukça değerlidir. Bataryalar,

süperkapasitörler, yakıt hücreleri ve hidrojen depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sentetik karbon, gelişen üretim teknikleriyle daha erişilebilir ve kullanılabilir hale gelebilir (Demir, 2022; Dawood ve ark., 2020).

Hafif ve gözenekli yapısı sayesinde elektrikli araçlarda kullanımı oldukça avantajlıdır (Kosar, 2021; Yılmaz ve ark., 2023). Bu gözenekli yapılar, iyonların hareketini optimize ederek hızlı şarj ve deşarj süreçlerine katkıda bulunabilir (Yılmaz ve ark., 2023; Dawood ve ark., 2020). Ayrıca sentetik karbonların hafif yapısı taşınabilir cihaz ve batarya tasarımına olanak sağlayabilir (Demir, 2022).

Sentetik karbon destekli süperkapasitör malzemeler ile yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde depolanması sağlanabilir (Dawood ve ark., 2020). Ayrıca elektrikli araçlarda ivmenin artırılması noktasında oldukça etkili olan süper kapasitörlerin yapısında da sentetik karbon yapılar bulunmaktadır (Dawood ve ark., 2020; Hirscher ve ark., 2020).

Düşük sıcaklıkta hidrojeni yüzeyinde tutabilen sentetik karbon yapılar, uzun vadeli hidrojen depolama işlemlerinde kullanılabilir. (Hirscher ve ark., 2020).

Yakıt hücrelerinin sentetik karbon bazlı yapılması yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintisiz kullanılmasına katkıda bulunarak, enerjinin etkili ve verimli bir şekilde depolanmasına imkân tanıyabilir (Kosar, 2021; Yılmaz ve ark., 2023).

Gelecekte yeni üretim teknikleri ile depolama ve karbon ayak izini azaltma konusunda kritik noktada olacağı öngörülmektedir (Kosar, 2021; Akdağ ve Güllü, 2024).

3.2.6. Cam Küreler ile Depolama

Cam kürelerle hidrojen depolama yönteminde hidrojen, mikro veya nano boyutlu cam küreciklerin 300 – 500°C sıcaklıklara kadar ısıtılması ile depolanmaktadır. Yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklılıkları sayesinde depolama işlemi güvenli bir hal almaktadır. Cam küreler, içi boş yapıları sayesinde düşük yoğunluk ve geniş yüzey alanı özellikleriyle depolama açısından oldukça önemlidir. Cam küreler hidrojen depolama ve birçok alanda kullanılmaktadır (Yılmaz ve ark., 2023; Righini, 2018). Yapılarındaki boşluklar sayesinde enerji taşıma işlemi oldukça rahattır (Okamoto ve ark., 2014).

Ayrıca enerjiyi hızlı boşaltabilme kapasitesi, depolama ve deşarj işlemlerinde çevrim ömrünü arttırmaktadır (Demir, 2022).

Bu bağlamda depolama işlemlerinde oluşabilecek güvenlik sorunları ortadan kalkabilir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. TIA Portal (Totally Integrated Automation)

Bu çalışmada, Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nın otomatik kontrolünü sağlamak amacıyla TIA Portal arayüzü ve Ladder programlama dili tercih edilmiştir. Ladder dili endüstriyel otomasyon sistemlerinde geniş çapta kullanılması ve elektrik devre şemalarına benzeyen görsel yapısı nedeniyle tercih edilmiştir. Bu bağlamda cihaz üzerinde çalışırken daha hızlı ve etkin bir şekilde hata ayıklanabilir, sorunlar tespit edilebilir ve bakım işlemleri ivedilikle gerçekleştirilebilir. Ayrıca, Ladder dili kullanılarak bu projedeki hidrojen üretim sürecinin her aşaması detaylı bir şekilde izlenerek kontrol altına alınabilir.

Otomatik kontrol sisteminin yazılımı, TIA Portal V.15 sürümünde geliştirilmiş ve proje kapsamında Siemens S71200 serisine ait 1214C DC/DC/DC modeli bir PLC kullanılmıştır. Bu PLC, proje için gerekli olan giriş ve çıkış işlemlerini hassas bir şekilde yönetmiş, hidrojen üretimi ve atık su dönüşüm süreçlerini sorunsuz bir şekilde kontrol etmiştir. Ayrıca, operatörlerin sistemle kolayca etkileşim kurabilmeleri için Siemens KP300 Basic mono PN modeli bir HMI (Human-Machine Interface) paneli kullanılmıştır. Bu panel sayesinde, kullanıcılar sistemin durumunu anlık olarak izleyerek sistemin çalışmasını gerçek zamanlı olarak takip edebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan kontrol sistemi, hidrojen üretimi ve atık su dönüşüm süreçlerinde otomasyonu sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Bu bağlamda, ev tipi uygulamalarda bu tür bir sistemin kullanılması hem pratiklik hem de enerji maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir.

4.1.1. PLC (Programmable Logic Controller) ve Bağlantıları

Siemens S7-1200 1214C DC/DC/DC modeli giriş ve çıkış birimlerine sahip yapıdadır. Ev Tipi Hidrojen Atık Su Dönüşüm Cihazı'nda kullanılan PLC'nin temel özellikleri aşağıdaki gibidir.

Güç Bağlantısı

- PLC'nin çalışması için gereken güç, 24V DC besleme ile sağlanır. Bu besleme, güç kaynağı bağlantı terminali üzerinden yapılır.

- Güç bağlantısı terminal blokları üzerinde "+24V" ve "0V" işaretleri bulunmaktadır. Bu terminale bir doğru akım güç kaynağı bağlanır.

Dijital Girişler

- Bu girişler on dört tanedir ve sensörlerden gelen dijital sinyalleri alır.
- Dijital girişler 24V DC seviyesinde çalışır ve her giriş, genellikle bir anahtarlama cihazı ile bağlanır.
- Dijital girişlerin her biri I0.0, I0.1, I0.2 gibi numaralarla ifade edilerek cihazla etkileşimli hale getirilmiştir.
- Ortak bağlantı terminalleri üzerinden giriş sinyalleri topraklanır. Bu topraklama işlemi, giriş sinyallerinin doğru bir şekilde işlenmesini ve sistemde herhangi bir elektriksel gürültü ya da sinyal bozulmasının önüne geçilmesini sağlar.
- Bu terminaller, sensörlerin negatif ucuna bağlanmalıdır.

Dijital Çıkışlar

- Dijital çıkışlar on tanedir ve 24V DC aktüatörlere, rölelere, motor sürücülerine veya diğer cihazlara sinyal gönderir.
- Bu çıkışlar, PLC'nin kontrol ettiği cihazlara komut göndermek için kullanılır.
- Dijital çıkışların her biri Q0.0, Q0.1, Q0.2 gibi numaralarla ifade edilerek cihazla etkileşimli hale getirilmiştir.
- Dijital çıkışların ortak uçları (L+) pozitif besleme voltajına bağlanır. Çıkışların bu şekilde bağlanması, PLC'nin kontrol ettiği cihazların doğru sinyalleri almasını ve çalışmasını sağlar.

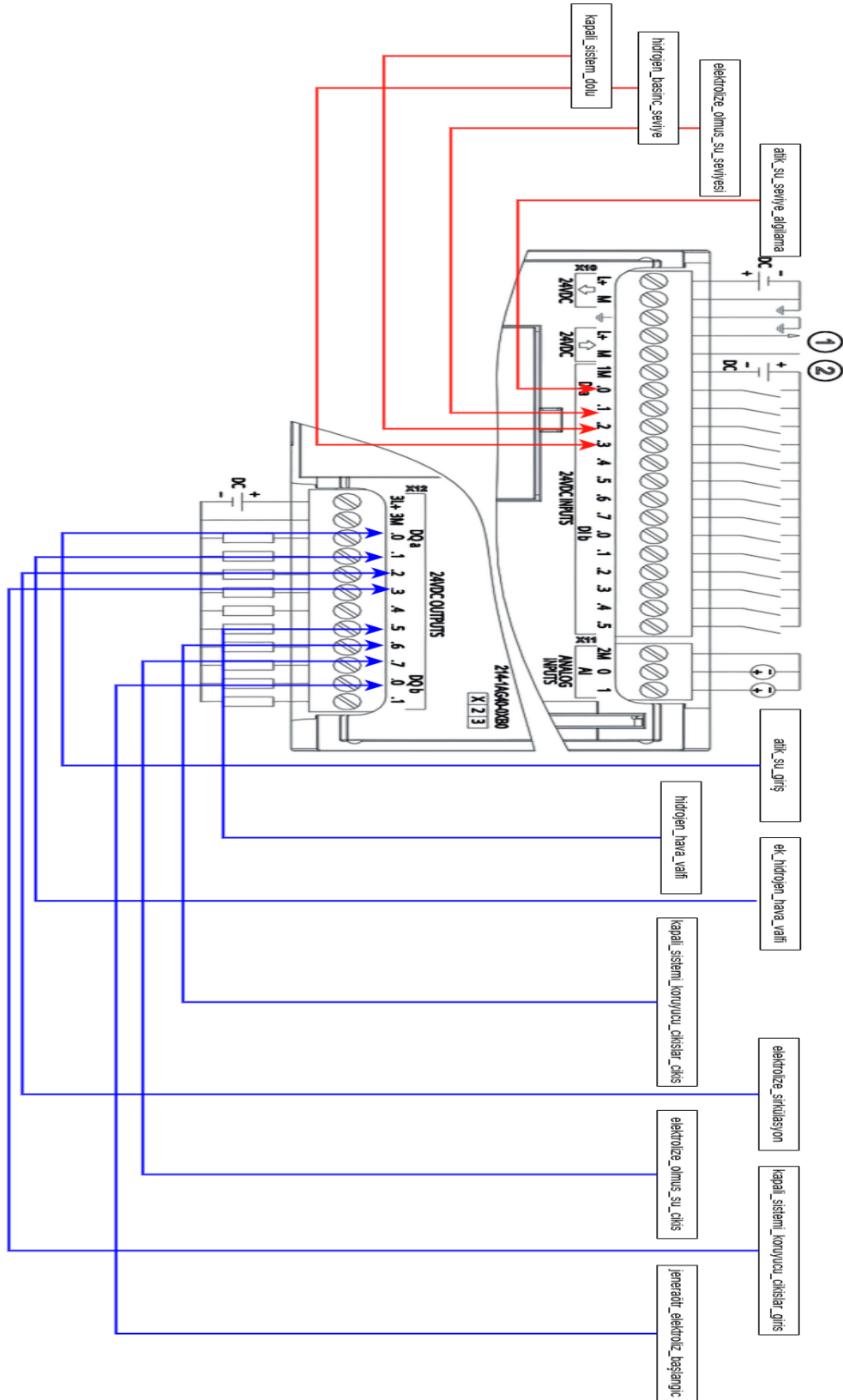
Profinet Bağlantısı (Ethernet)

- Siemens S7-1200 serisi PLC'nin entegre bir Ethernet portu bulunmaktadır. Bu port, Profinet adı verilen endüstriyel Ethernet ağı üzerinden haberleşmeyi sağlar.
- PLC, bu port aracılığıyla diğer PLC'lerle, HMI panelleriyle veya SCADA sistemleriyle veri alışverişinde bulunabilir.

Genişletme Modülleri için Bağlantılar

- S7-1200 serisinde, genişletme modülleri için yan tarafta bulunan genişletme yuvaları vardır. Bu yuvalar, giriş/çıkış modülleri, haberleşme modülleri veya diğer işlevsel modüller için kullanılabilir.

- Genişletme modülleri, doğrudan PLC'nin yan tarafına monte edilerek sabitlenir. Veri ve g   bağlantıları bu yolla sağlanır.



şekil 4. 1. Ev tipi hidrojen atık su dönüşüm cihazının PLC giriş ve çıkış bağlantıları

Analog Giriş/Çıkış Modülleri (Opsiyonel)

- S7-1200 PLC'nin dijital giriş/çıkışları haricinde, analog sinyalleri işlemek için de genişleme modülleri eklenebilir.
- Bu modüller, PLC'ye sıcaklık sensörleri, basınç sensörleri veya diğer analog veriler sağlayan cihazları bağlamak için kullanılır.

RS485/RS232 Bağlantı Modülleri (Opsiyonel)

- İletişim gereksinimlerine göre, S7-1200'e RS485 veya RS232 haberleşme modülleri eklenebilir. Bu modüller, diğer cihazlarla seri haberleşme yapılmasına olanak tanır.
- Bu modüllerin bağlantıları, ek modül yuvalarına yapılır. Bu modüllerin terminal bağlantıları üzerinden gerekli seri haberleşme yapılabilir.

Topraklama ve Koruma

- PLC'nin metal gövdesinin topraklanması, cihazın güvenli çalışması ve elektriksel gürültüye karşı korunması için önemlidir.
- Topraklama, uygun bir topraklama terminali ile gerçekleştirilir. Bu, genellikle güç bağlantıları ile aynı terminal bloğu üzerinde bulunur.

Bu bağlantılar, Siemens S7-1200 1214C DC/DC/DC modelinin bir otomasyon sistemi içinde giriş ve çıkış bağlantılarının nasıl yapıldığını göstermektedir. PLC'nin uygun bağlantılarla kurulumu, sistemin güvenilir ve verimli çalışması için kritik öneme sahiptir. Şekil 4.1'de Ev Tipi Hidrojen Atık Su Dönüşüm Cihazı'nın PLC giriş ve çıkış bağlantıları gösterilmiştir.

4.1.2. Siemens KP300 Basic Mono PN HMI Panel ve Bağlantıları

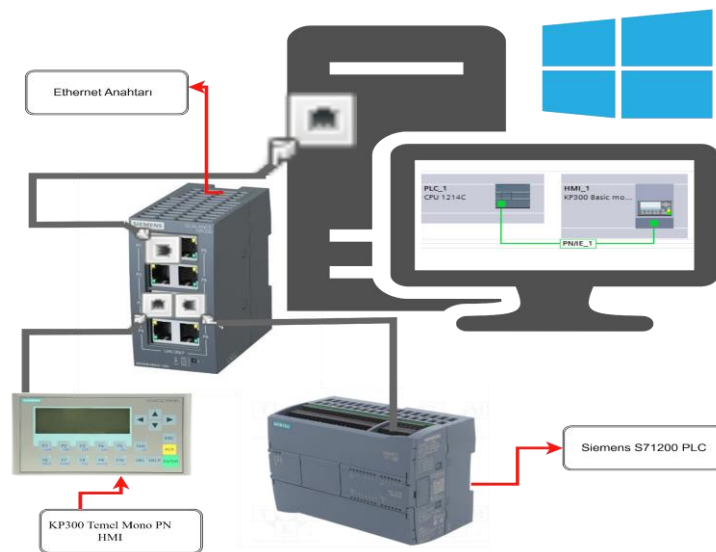
Siemens KP300 Basic Mono PN HMI paneli, endüstriyel otomasyon sistemlerinde kullanılan operatör arayüzlerinden biridir. Bu arayüz sistemin görsel olarak izlenmesi, kontrol edilmesi ve parametrelerin ayarlanması için kullanılmaktadır. KP300 Basic Mono PN, profinet üzerinden iletişim sağlayarak Siemens'in PLC sistemiyle iletişime geçebilmektedir. HMI panelinin bağlantılarının doğru yapılması PLC ile iletişime geçebilmesi açısından oldukça önemlidir. Ev Tipi Atık Su Hidrojen Cihazı'nda kullanılan Siemens KP300 Basic Mono PN HMI panelinin temel bağlantıları oldukça basittir. Panele enerji verildikten sonra PLC ile aynı anda haberleşme sağlanmaktadır.

Profinet (Ethernet) Bağlantısı

- Siemens KP300 Basic Mono PN, Profinet protokolünü kullanarak Siemens S7-1200, S7-1500 ve diğer Profinet destekli cihazlarla haberleşir. Profinet, endüstriyel otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan, yüksek hızlı veri iletimi sağlayan bir Ethernet tabanlı haberleşme protokolüdür.
- HMI panelinde bulunan RJ45 portu, Profinet ağına bağlantı için kullanılır. Bu port üzerinden, HMI paneli PLC'ler, SCADA sistemleri ve diğer endüstriyel cihazlarla veri alışverişi yapar. Ayrıca, uzaktan izleme ve kontrol gibi işlemler bu bağlantı üzerinden gerçekleştirilir.
- Profinet bağlantısının doğru çalışması için her bir HMI paneline bir IP adresi atanması gerekir. Bu IP adresi, TIA Portal yazılımı aracılığıyla panel programlanırken yapılandırılır.

Güç Bağlantısı

- Siemens KP300 Basic Mono PN HMI paneli, 24V DC güç kaynağı ile çalışır.
- Güç kaynağı bağlantısı sırasında "+" ve "-" uçlarına dikkat edilerek doğru voltajın sağlanması önemlidir. Genellikle "+" pozitif uca ve "-" negatif uca bağlanarak panelin güvenli bir şekilde çalışması sağlanır.
- Güç bağlantısının yanında, topraklama da yapılmalıdır. PLC'de olduğu gibi panelin de elektriksel gürültülerden korunması son derece önemlidir.

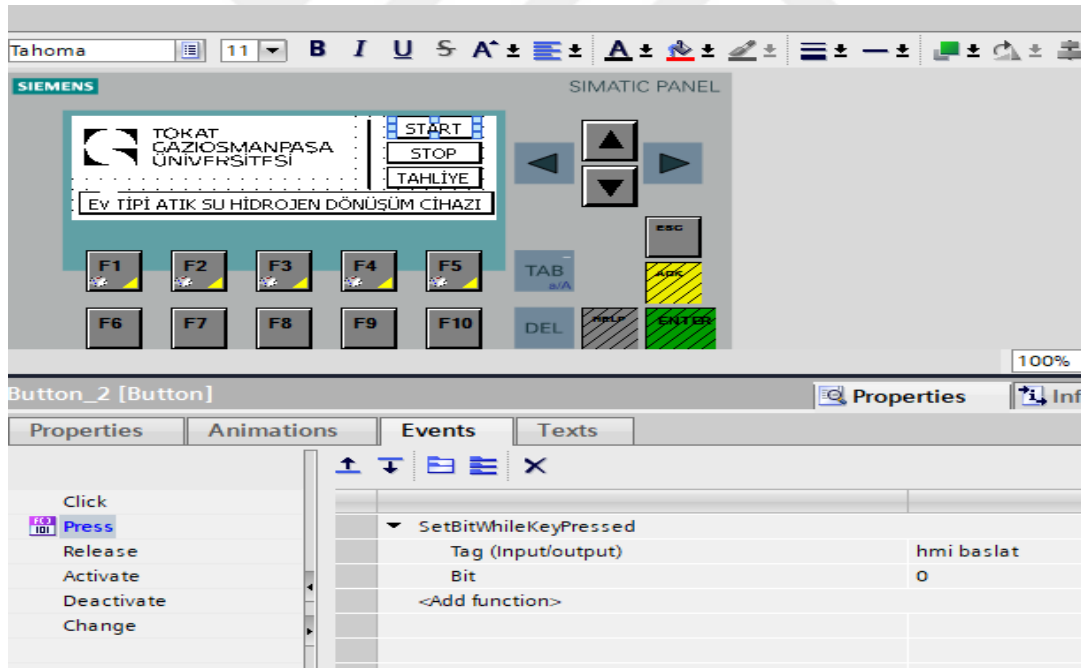


Şekil 4. 2. HMI operatör panel bağlantısı

Programlama Bağlantısı

- Siemens KP300 Basic Mono PN paneli, Siemens'in TIA Portal yazılımı ile programlanabilir. TIA Portal, HMI paneller, PLC'ler ve diğer otomasyon cihazlarını tek bir platform üzerinden programlamayı sağlayabilecek özelliklerle donatılmıştır. Programlama sırasında panelin Profinet bağlantısı kullanılarak sisteme bağlanması ve yapılandırılması mümkündür.
- Programlama esnasında panelin PLC ile iletişimi kurulur, operatör arayüzleri tasarlanır ve tüm kontrol süreçleri panel üzerinden izlenebilir hale getirilebilir.

Şekil 4.2'de HMI operatör panelin ethernet anahtar üzerinden PLC ve bilgisayar bağlantıları gösterilmektedir. Fiziksel bağlantılar yapıldıktan sonra TIA Portal üzerinden PLC ve HMI panel bir bilgisayar yardımıyla eşleştirilmiştir. Bu adımlardan sonra HMI ekranları tasarlanmıştır. Butonlar, göstergeler, veri giriş alanları eklenmiş; bu elemanlar PLC'deki değişkenlerle eşleştirilmiştir.



Şekil 4. 3. HMI panel buton atama

Şekil 4.3'de HMI panel üzerinden kontrol edilen ve Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nın başlamasını sağlayan Start butonu "hmi_baslat" etiketi ile eşleştirilmiştir. Böylelikle Start butonuna basıldığında cihaz çalışmaya başlayacaktır.

4.1.3. Programın Mantığı ve Yapısı

Ev Tipi Hidrojen Atık Su Dönüşüm Cihazı'nın programlamasında kullanılan Ladder yapısı makinenin sensörlerden aldığı girdilere göre valfler, pompalar ve röleler gibi bileşenlerin çalışmasını sağlamaktadır.

Giriş ve Çıkışlar

Sistemde kullanılan start ve stop butonları HMI panelden kontrol edilmektedir. Acil stop ve hidrojen gaz kaçağı kontrol rölesi harici olarak sistemin enerjisini kesmek için bağlanmıştır. Sensörler, valfler, kontaktör ve rölelere bağlı sirkülasyon pompaları, çıkış belirleme ledleri ladder içerisinde çeşitli girişler ve çıkışlar olarak tanımlanmıştır.

Çalışma Döngüsü

Çalışma döngüsünde, Ev Tipi Hidrojen Atık Su Dönüşüm Cihazı'nda belirlenen sıvı seviye ve basınç aralıklarına ulaşıldığında, belirli valflerin açılıp kapanmasını sağlamak için kontaklar tanımlanmıştır. Cihazın üretim döngüsündeki işleyiş Çizelge 4.1'e göre sıralanmıştır.

- Atık su giriş deposundaki su miktarını algılayan harici dijital “atik_su_seviye_algilama” sensörü ve harici dijital “hidrojen_basinc_seviye” sensörü seviyesi üretim aralığında ise “atik_su_giriş” çıkışı tetiklenir ve makinenin üretim döngüsü başlar. Su seviyesi yeterli değilse bu “atik_su_seviye_algilama” sensörü tarafından algılanır ve sistem elektrolize olmak üzere “atik_su_giriş” çıkışı tarafından sisteme su basılır.
- Kapalı sisteme su basılmaya başladığında sistemin hava yapmasını engellemek ve sistemi hatasız döngüye sokmak amacıyla “hidrojen_hava_valfi” ve “ek_hidrojen_hava_valfi” devreye girerek güvenlik sağlanır. Bu işlem yapılırken hidrojen tüplerindeki üretilmiş mevcut hidrojenin tekrar kapalı isteme basılmasını ve uçup gitmesini engellemek amacıyla mekanik geri tepmeyi engelleyici çek valfler kullanılmıştır.
- Normalde kapalı olan “kapali_sistemi_koruyucu_cikislar” sisteme su dolarken açılır. Sisteme su dolduktan sonra kapanarak kapalı sistem oluşumu tamamlanır.
- Atık su Hidrojen üretim jeneratörü ve tüm kapalı sisteme dolmaya başladığında, dolum “kapali_sistem_dolu” sensörü tarafından algılanır.

- Kapalı sisteme yeteri kadar su dolduktan sonra “hidrojen_hava_valfi”, “ek_hidrojen_hava_valfi”, “kapali_sistemi_koruyucu_cikislar_giris” devreden çıkar. Sistem tamamen kapalı bir sistem haline gelir.
- Bu işlemlerden bir dakika sonra elektroliz için kullanılan “jeneratör_elektroliz_baslangic” çıkışı devreye girerek hidrojen üretimi başlar.
- Elektroliz işlemi 1 dakika boyunca devam eder ve dolum tüplerinin girişindeki manuel çek valflerden geçerek tüplere dolar. Tüpe dolan hidrojen ise yine tüplerin çıkışındaki manuel çek valflerden geçerek yanma için oluşturan hidrojen set üstü pişirici ocağa ulaşır.
- Elektroliz işlemi gerçekleşirken “elektrolize_sirkulasyon” çıkışı devreye girerek, elektroliz esnasında meydana gelebilecek tortular ve aşırı ısınmalar engellenmiş olur.
- Elektroliz işleminin durmasından 1 dakika sonra “elektrolize_olmus_su_cikis” çıkışı ve “kapali_sistemi_koruyucu_cikislar_cikis” açılarak elektrolize olmuş su ikinci depoya aktarılır.
- Depoya aktarılan su yine “elektrolize_olmus_su_seviyesi” sensörü tarafından algılanır. Bu da bize atık suyun ne kadarının elektrolize olduğunu göstermektedir. Bu sayede giren ve çıkan su arasında oranlama yapabiliriz. Ayrıca depodaki su “elektrolize_olmus_su_seviyesi” sensörü tarafından sürekli kontrol altındadır. Herhangi bir taşma durumunu engellemek için “elektrolize_olmus_su_cikis” çıkışı tarafından belirli seviyeye ulaştığında gidere gönderilmek üzere boşaltılır.
- Atık su giriş deposundaki su miktarını algılayan harici dijital “atik_su_seviye_algilama” sensörü ve harici dijital “hidrojen_basinc_seviye” sensörü durumlarına göre Ev Tipi Hidrojen Atık Su Dönüşüm Cihazı’nın çalışma döngüsü Stop yapılana kadar devam etmektedir.
- Sistemi başlatmak için dahili hafıza alanına bağlı “Hmi_baslat” kullanılır. Sistemin durdurulması için HMI panel üzerine oluşturulmuş bloktaki “Hmi_durdur” hafıza alanları kullanılır. Acil bir durumda sistemin tahliyesi için dahili hafıza alanına bağlı “tahliye” butonu HMI panel üzerine yerleştirilmiştir.

4.1.4. Etiket ve Adres Kullanımı

Çizelge 4.1’de adreslemeler ve ilgili etiketlemeler ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Bu etiketleme ve adresler, cihazın otomatik çalışma prensibini oluşturmaktadır.

Çizelge 4. 1. PLC etiket adı ve adreslemeleri

Gerçek Ad	PLC Etiket Adı	Adres	Data Tipi
Atık Su Seviye Algılama Sensörü	atik_su_seviye_algilama	%I0.0	Bool
Elektrolize Su Seviye Algılama Sensörü	elektrolize_olmus_su_seviyesi	%I0.1	Bool
Kapalı Sistemin Dolum Algılama Sensörü	kapali_sistem_dolu	%I0.2	Bool
Hidrojen Basınç Seviye Sensörü	hidrojen_basinc_seviye	%I0.3	Bool
Atık su Giriş	atik_su_giris	%Q0.0	Bool
Ek Hidrojen Hava Valfi	ek_hidrojen_hava_valfi	%Q0.1	Bool
Elektrolize Sirkülasyon	elektrolize_sirkulasyon	%Q0.2	Bool
Giriş Motoru Su Engelleyici Çek valf	kapali_sistemi_koruyucu_cikislar_giris	%Q0.3	Bool
Hidrojen Hava Valfi	hidrojen_hava_valfi	%Q0.5	Bool
Çıkış Motoru Su Engelleyici Çek valf	kapali_sistemi_koruyucu_cikislar_cikis	%Q0.6	Bool
Elektrolize Olmuş Su Çıkış	elektrolize_olmus_su_cikis	%Q0.7	Bool
Jeneratör Elektroliz Başlangıç	jeneratör_elektroliz_baslangic	%Q1.0	Bool
HMI Başlat(Start)	hmi_baslat	%M1.0	Bool
HMI Durdur(Stop)	hmi_durdur	%M3.0	Bool
Acil durum Tahliye	tahliye	%M3.2	Bool

Ladder programlamada kullanılan semboller, sistemi daha anlaşılır hale getirmiştir. Giriş ve çıkışların sembollerle belirtilmesi, sistemin işleyişini takip etmeyi kolaylaştırmaktadır.

- atik_su_seviye_algilama: PLC girişi I0.0 adresine bağlı bu sensör, Ev Tipi Hidrojen Atık Su Dönüşüm Cihazı'na atık suyun basılması için kullanılan algılama girişidir.
- elektrolize_olmus_su_seviyesi: Elektroliz işleminden geçen atık su deposunu sürekli kontrol eden sensördür. Sensör açık pozisyonda sistemin çalışmasına müsaade ederken; kapalı pozisyona geçtiğinde sistemi durdurup deponun boşalması için çıkış valfini kapatmaktadır.
- kapali_sistem_dolu: Cihaza yerleştirilen bu sensör, atık suyun kapalı sisteme dolum miktarını belirlemektir. Su seviyesi istenilen seviyeye kadar yükseldiğinde, sensör dijital olarak çıkış vererek sistemi kontrol etmektedir.
- hidrojen_basinc_seviye: PLC giriş elemanlarından biri olan, harici bağlanan dijital çıkışlı bu basınç sensörü ile hidrojen basıncı dijital olarak kontrol edilmektedir.
- atik_su_giris : Atık suyun cihaz içerisine aktarımını sağlayan sirkülasyon pompasının bağlı olduğu çıkış ucudur.
- hidrojen_hava_valfi: Hidrojenin gaz olarak depolanması sırasında kullanılan tüpün giriş kısmında bulunan elektronik valfi kontrol eden çıkış ucudur.
- ek_hidrojen_hava_valfi: Hidrojenin gaz olarak depolanması esnasında kullanılan ikinci tüpün giriş kısmında bulunan elektronik valfi kontrol eden çıkış ucudur.
- elektrolize_sirkulasyon: Elektroliz esnasında suyun sürekli sirkülasyonu sağlayan sirkülasyon motorunu kontrol eden çıkıştır.
- kapali_sistemi_koruyucu_cikislar_giris: Elektroliz esnasında kapalı sistem oluşturabilmek için atık su giriş deposunun giriş kısmını kapatan elektronik valf çıkışıdır.
- kapali_sistemi_koruyucu_cikislar_cikis: Elektroliz esnasında kapalı sistem oluşturabilmek için elektrolize olmuş çıkış deposunun çıkış kısmını kapatan elektronik valf çıkışıdır.
- elektrolize_olmus_su_cikis: Elektrolize olmuş suyun üretimi ve depodan taşmaması için cihazın kontrolü bu çıkış sayesinde sağlanmaktadır.
- jeneratör_elektroliz_baslangic: Hidrojen üretimi için tasarlanan jeneratörün kontrolü bu çıkış ile sağlanmaktadır.

4.1.5. Güvenlik Prosedürleri ve Acil Durdurma Fonksiyonu

Sistemin güvenliği, hidrojen üretimi sürecinde kritik önem taşımaktadır. Bu nedenle, Ladder programlamada HMI durdur (Stop) ve atık suyun acil durumlarda tahliyesini sağlamak amacıyla fonksiyonlar eklenmiştir. Ayrıca sistemin enerjisini tamamen kesebilmek için harici Acil Stop butonu; gaz kaçaqlarının algılanarak sistemin acil olarak durdurulması ve enerjisinin kesilmesi amacıyla da gaz alarm dedektörü mekanik olarak cihaza entegre edilmiştir.

HMI Durdur (Stop)

Sistemin basınç veya sıcaklık değerlerinin çok yüksek seviyelere ulaşması durumunda acil durdurma fonksiyonu devreye girer. Bu fonksiyon, Ladder programında “Hmi_durdur” etiketi ile tanımlanmış ve mantık blokları ile devreye entegre edilmiştir.

Acil Durum Tahliye

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı’nın çalışması esnasında, HMI Durdur (Stop) butonuna basıldığında kapalı sistem içerisindeki suyun tahliyesi için HMI Panel üzerinden kontrol edilen güvenlik butonudur. Bu buton sayesinde kapalı sisteme içerisinde bulunan atık suyun, elektrolize olmuş su deposuna aktarımı sağlanmaktadır. Böylece sistem ilk haline dönecek ve çalışmanın sürekliliği sağlanacaktır. Ladder programında “tahliye” etiketi ile tanımlanmış ve mantık blokları ile devreye entegre edilmiştir.

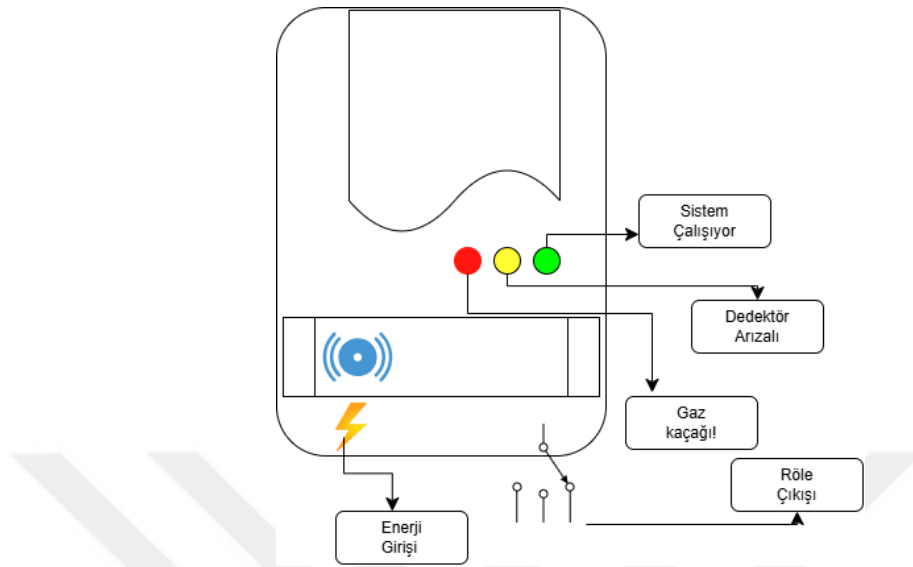
Acil Stop (Emergency Stop)

Acil durumlarda hem cihaza hem de çevreye verilecek olan zararı minimum düzeye indirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu buton hayati bir güvenlik önlemi olarak bulunur ve kullanıcıların, cihazda veya sistemde tehlikeli bir durum oluştuğunda hızla müdahale etmesine olanak tanır. Ayrıca güvenliği sağlamak ve ekipmanın zarar görmesini önlemek amacıyla kullanılmıştır.

Gaz Alarm Dedektörü

Şekil 4.4’de görülen Harici gaz alarm dedektörü Acil stop butonu gibi bağlanarak, röle çıkışları sayesinde herhangi bir gaz kaçağı durumunda sistemin enerjisini hemen kesmektedir. Bu yapının içerisinde MQ-8 Hidrojen Gaz Sensör Modülü bulunmaktadır.

Ayrıca röle çıkışı, fazı kontrol edecek şekilde bağlanmış ve yüksek akımlara karşı kontaktörle güçlendirilmiştir.



Şekil 4. 4. Harici gaz alarm dedektörünün yapısı

Sensör Hataları ve Anormallik Algılama

Sensörlerden gelen anormal veriler, Ladder programda sürekli olarak izlenmektedir. Basınç sensörünün değerinde ani bir değişiklik gözlemlenirse, bu durum bloklara işlenir ve sistem durdurulur. Bu sayede olası tehlikeli durumların önüne geçilmiştir.

4.1.6. Program Kodları ve Kontak Planı

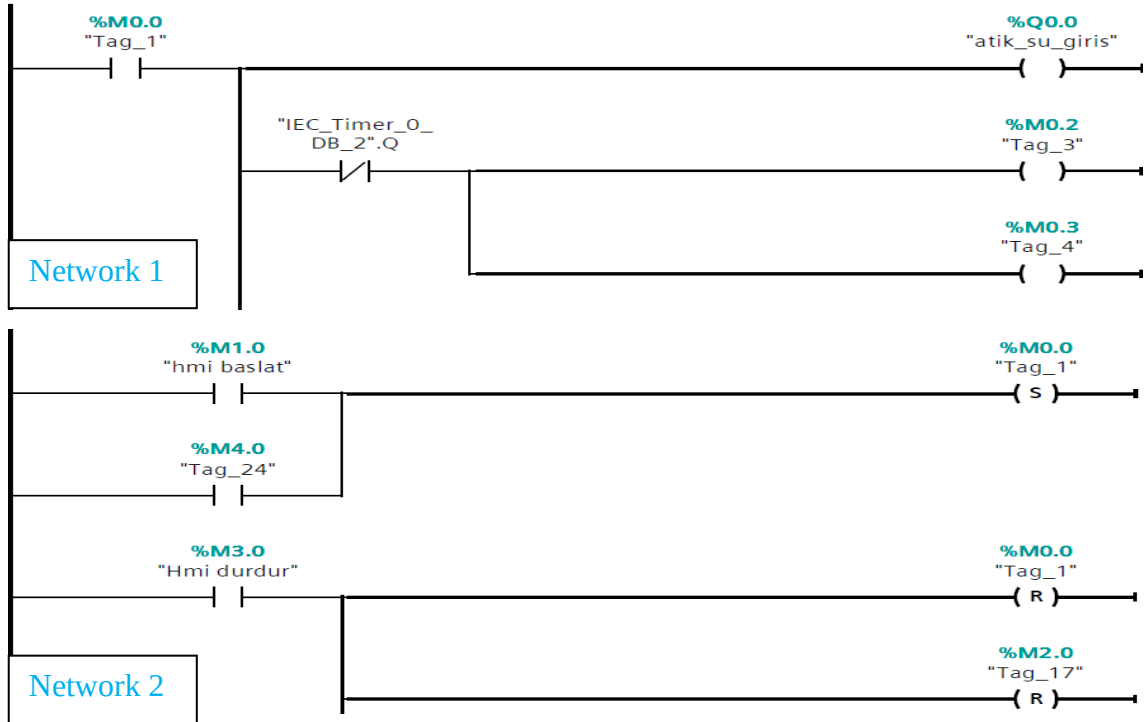
Test ve Doğrulama Süreci

Programın yazılım ve donanım testleri, Ladder dilinde geliştirilmiş olan kontrol yapısı ile yapılmıştır. Test sürecinde, sistemin tüm sensörleri ve çıkış elemanları ayrı ayrı test edilmiştir.

- TIA Portal'da sistem simülasyonu yapılmış ve farklı çalışma senaryoları gözlemlenmiştir. Özellikle acil durdurma fonksiyonunun devreye girmesi gereken durumlar detaylı olarak test edilmiştir.
- Gerçek çalışma koşulları altında, sistem yüksek basınç ve sıcaklık gibi durumlarla test edilmiştir. Bu testlerde Ladder programının doğru çalışıp çalışmadığı ve güvenlik protokollerinin işleyişi gözlemlenmiştir.

- Sistemin çeşitli çalışma döngülerinde performansı analiz edilmiştir. Bu analizler doğrultusunda, Ladder programda performansı artırmak için gerekli iyileştirmeler yapılmıştır.

Şekil 4.3’de HMI panel üzerinden start butonuna basıldığında cihaz çalışmaya başlayacaktır. Cihazın çalışmasına ait Ladder planı Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Network 2 alanında bulunan “%M1.0” adresi ile eşleştirilmiş dijital “hmi_baslat” etiketi başlangıçta açık pozisyonundadır. Start’a basıldığında “hmi_baslat” etiketine bağlı “%M1.0” adresi açık pozisyonundan kapalı pozisyona geçecektir. Bu işlemten sonra “dahili_hafiza_1” etiketine bağlı “%M0.0” adresi set olacaktır. Set işleminden sonra kontak kalıcı olarak kapalı olacaktır. Network 1 alanındaki set olmuş bu adres “%Q0.0” ile eşleştirilmiştir. Bu adresin set olması ile “atik_su_giris” etiketi aktif olduktan sonra, cihaz atık su deposundan sirkülasyon pompası yardımı ile su çekmeye başlayacaktır. Bu işlem cihazın ilk çalışma adımıdır. Bundan sonraki adımlarda cihazın çalışması için HMI panel üzerinde oluşturulan Start butonuna tekrar basmaya gerek kalmayacaktır. Program döngüsü Network alanları ile oluşturulmuş ve aynı işlemlerin HMI panel üzerindeki Stop butonuna basıncaya kadar tekrarlaması Network 2 alanındaki “%M4.0” adresine bağlı “dahili_hafiza_21” etiketinin mühürlenmesi ile sağlanmıştır.



Şekil 4. 5. Cihazın HMI panel üzerinden çalıştırılması

4.2. Cihazın Mekanik Yapısı

4.2.1. Cihazın Mekanik Tasarımı

Mekanik Sistemin Amacı

Ev tipi atık su hidrojen dönüşüm cihazının amacı, evsel atık suyu yeniden değerlendirerek hidrojen gazı üretmek ve çevreye duyarlı, sürdürülebilir bir enerji kaynağı sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda cihaz, atık suyun içindeki organik bileşenleri elektroliz ve diğer kimyasal işlemlerle ayrıştırarak hidrojen üretir. Cihazın temel hedefleri arasında:

- **Enerji Verimliliği:** Atık suyu kullanarak ek bir enerji kaynağı yaratmak, evde kullanılabilecek veya depolanabilecek hidrojen gazı üretmek.
- **Çevre Dostu Enerji Üretimi:** Atık suyun geri dönüştürülmesiyle doğaya salınan kirliliği azaltmak ve karbon ayak izini düşürmek.
- **Su ve Kaynakların Etkin Kullanımı:** Evlerde atık suyun tekrar kullanılmasını sağlamak ve su israfını azaltmak.
- **Maliyet Tasarrufu:** Yenilenebilir enerji üretimi sayesinde fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve uzun vadede enerji maliyetlerini düşürmek.
- **Sürdürülebilirlik ve Dönüşüm:** Bu tür bir cihazla evlerde sürdürülebilir bir çevre bilinci geliştirmek ve kaynak dönüşümünü sağlamak.

Bu amaçlar doğrultusunda, cihaz sayesinde evsel atıkların hidrojen gazına dönüştürülmesi hem doğaya hem de bireysel ekonomiye katkıda bulunması hedeflenmektedir.

Mekanik Yapının Önemi

Modüler ve ergonomik bir mekanik tasarım, kullanıcıların cihazı kolayca kullanmasını ve gerektiğinde bakım işlemlerini rahatça yapmasını sağlar. Ayrıca cihazdaki mekanik bileşenler, hidrojenin yüksek yanıcılık özelliği nedeniyle son derece güvenli bir yapıya sahip olmalıdır. Sızdırmazlık elemanları, basınç dengeleyici valfler ve sağlam bağlantı noktaları gibi mekanik unsurlar, güvenli bir hidrojen üretimi sağlamak için gereklidir.

Mekanik yapı, cihazın zorlu koşullara karşı dayanıklı olmasını ve uzun süre işlevini korumasını sağlar. Özellikle korozyona dayanıklı malzemeler, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına uygun bileşenler, cihazın bakım gereksinimlerini azaltarak ömrünü uzatmaktadır.

Cihazın kolaylıkla montajının yapılabilmesi ve kolaylıkla sökülebilmesi de son derece önemlidir.

Kullanılan Malzemeler ve Seçim Kriterleri

Cihazın mekanik tasarımında kullanılan malzemeler, atık suyun güvenli ve verimli bir şekilde hidrojen gazına dönüştürülmesi için büyük bir özenle seçilmiştir. Reaktör bölgesinde, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına dayanıklılığı ile bilinen paslanmaz çelik ve sızdırmaz contalar tercih edilmiştir. Paslanmaz çelik, reaktörün aşındırıcı etkilerden korunmasını sağlarken, aynı zamanda cihazın uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur.

Buna ek olarak, reaktör içindeki bağlantı elemanlarının ve contaların sızdırmazlık sağlaması amacıyla yüksek kaliteli ve korozyona dayanıklı contalar kullanılmıştır. Bu sayede, hidrojen üretim sürecinde gaz kaçağı riski minimuma indirilmiş ve cihazın güvenli çalışması garanti altına alınmıştır.



Şekil 4. 6. Cihazın iskelet yapısı

Cihazın iskelet yapısı ve ölçülendirme sistemi, Şekil 4.6'da detaylı olarak gösterilmiştir. Cihazın ana çerçevesi, sağlamlığı ve dayanıklılığı ile bilinen 45x45 mm ölçülerindeki 10 kanal sigma profille oluşturulmuştur. Sigma profiller, bağlantı noktalarında kullanılan özel bağlantı parçaları ve alyan vidalama tekniği ile birleştirilmiştir. Bu yapı, cihazın stabilitesini artırmakta ve titreşim gibi dış etkenlere karşı daha dayanıklı hale getirmektedir. Ayrıca iskelet yapı altına yerleştirilen kilitlenebilir tekerlekler sayesinde

cihazı taşımak ve hareket ettirmek daha kolay hale gelmiştir. Böylelikle ev ortamında istenilen noktaya kolaylıkla taşınabilecektir.

İskelet yapısının bölmeli ve modüler bir tasarıma sahip olması, cihazın iç yapısını daha işlevsel ve düzenli bir hale getirmiştir. Bölmeli tasarım, cihaz içerisinde yer alan tüm bileşenlere kolay erişim sağlanarak düzenlenmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle bakım veya değiştirme gerektiren parçalara hızlı bir şekilde müdahale edilebilmesi, cihazın uzun vadede kullanıcı dostu bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Böylelikle cihaz içerisine yerleştirilen tüm malzemeler, gerektiğinde kolayca erişilebilir olup operasyonel verimliliği artırmaktadır.

Genel Tasarım İlkeleri ve Amaçlar

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nın tasarımında, güvenlik, dayanıklılık, verimlilik ve kullanıcı dostu özellikler gibi temel prensipler göz önünde bulundurulmuştur. Cihazın genel tasarımı, ev ortamında güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde çalışacak, aynı zamanda minimum bakım gereksinimi ile uzun ömürlü bir kullanım sunacak şekilde oluşturulmuştur. Bu tasarım yaklaşımı, hidrojenin yanıcı özelliklerinden doğabilecek riskleri en aza indirmek için güvenlik odaklıdır. Bu nedenle sızdırmaz bağlantı elemanları ve yüksek basınca dayanıklı bileşenler kullanılarak tüm süreçte maksimum güvenlik sağlanmıştır.

Dayanıklılık süreci cihazın önemli hedeflerinden biridir. Kimyasal ve fiziksel aşındırmalara karşı direnç gösteren malzemeler, cihazın uzun süre boyunca verimli çalışmasını mümkün kılmaktadır. Tasarımda ayrıca, enerji verimliliği göz önünde bulundurulmuş ve elektroliz gibi enerji yoğun işlemlerde bile minimum enerji tüketimi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, enerji verimliliğini artırırken kullanım maliyetlerini de düşürmektedir.

Tasarımda kullanıcı dostu bir yapı benimsenmiştir. Ergonomik ve modüler bir yapı sayesinde cihaz, ev tipi kullanıma uygun hale getirilmiş, bakım ve parça değişimi gibi işlemler kolaylaştırılmıştır. Böylece, cihazın bileşenlerine gerektiğinde hızlıca ulaşılabilir ve kullanım kolaylığı sağlanmış olur. Çevre dostu bir tasarım anlayışıyla, cihazın karbon ayak izini en aza indirmesi hedeflenmiştir. Cihazın atık suyu enerjiye dönüştürmesi, olumsuz çevresel etkileri azaltma anlamında oldukça önemlidir.

Genel olarak bu tasarım ev tipi ve endüstriyel kullanımlara uygun, güvenli ve verimli bir hidrojen üretim süreci sağlayabilir.

4.2.2. Cihazın Mekanik Bileşenleri

Reaktör Bölümü

Hidrojen reaktörü, hidrojen üretimi için gerekli kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bir cihaz veya kapalı sistemdir. Şekil 4.7’de gösterilen bu reaktör, suyun hidrojen ve oksijen bileşenlerine ayrılması yöntemiyle hidrojen gazının elde edilmesini sağlar. Hidrojen reaktörleri, özellikle endüstriyel hidrojen üretimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yeşil hidrojen üretimi gibi alanlarda sıkça kullanılır.

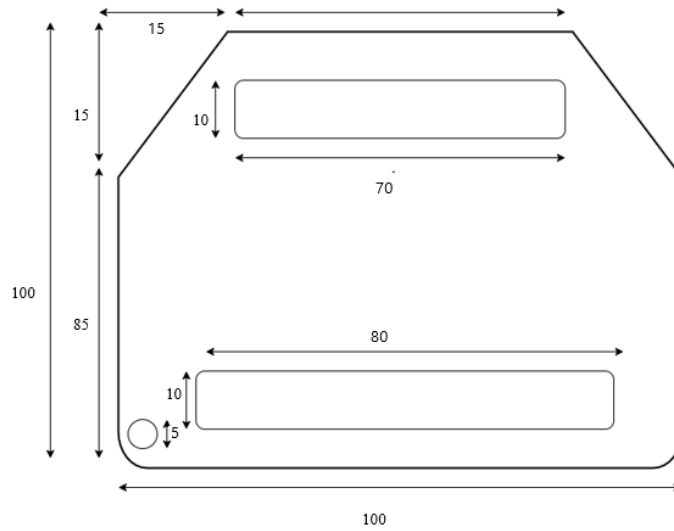


Şekil 4. 7. Hidrojen jeneratörü

Reaktör Yapısı ve Çalışma Prensibi

Hidrojen reaktörü hidrojenin güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde üretimini sağlamak üzere alkali elektroliz yapacak şekilde tasarlanmıştır. Reaktör, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklılık gösteren dayanıklı malzemelerden inşa edilmiştir. Paslanmaz olan 316L çeliği kullanılarak tasarlanan reaktör, kimyasal süreçlerin yarattığı zorlu koşullara karşı dayanıklı hale getirilmiştir. Ayrıca, reaktörün içindeki bulunan conta ve hortum bileşenleri, işlem sırasında gaz sızdırmazlık özelliklerini koruyacak şekilde seçilmiştir. Titanyum gibi bulunması zor ve maliyet açısından oldukça yüksek metallerin yerini 316L paslanmaz çeliği almaktadır. Özellikle alkali elektroliz yöntemine dayalı reaktör tasarımlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. 316L veya 304L gibi paslanmaz çeliklerin kullanılması kısa süreli korozyon ve bozulmaların önüne geçmede oldukça etkilidir.

Şekil 4.8’de 316L elektrot tasarımına ait ölçülendirmeler verilmiştir.



Şekil 4. 8. 316L kullanılarak tasarlanan elektrotlar

Hidrojen reaktörlerinde kullanılan yaygın yöntemlerden biri elektroliz olup, elektrik enerjisi kullanılarak suyun hidrojen ve oksijene ayrılması sağlanır. Elektroliz reaktörlerinde, suyun içinden elektrik akımı geçirilir ve pozitif yüklü elektrot (anot) ile negatif yüklü elektrot (katot) arasındaki reaksiyon sonucunda hidrojen gazı açığa çıkar. Bu süreçte, jeneratör içerisinde bulunan suya elektrik akımı verilerek moleküllerin bileşenlerine ayrılması sağlanır. Temel olarak, jeneratör tasarımları iki elektrot (anot ve katot) ve bir güç kaynağı şeklinde oluşturulmaktadır.

- Elektrik Akımı Uygulama: Hidrojen jeneratörünün içindeki su, iki elektrot (pozitif yüklü anot ve negatif yüklü katot) arasında yer alır. Jeneratöre elektrik akımı uygulandığında, akım suyun içerisinden geçerek moleküllerin ayrışmasına neden olur. Bu işlem sırasında su molekülleri iyonlarına ayrılır.
- Elektroliz Reaksiyonu: Elektrik akımı etkisiyle su molekülleri, hidrojen ve oksijen iyonlarına ayrılır. Pozitif yüklü oksijen iyonları anoda doğru çekilirken, negatif yüklü hidrojen iyonları ise katoda yönelir. Bu elektrokimyasal reaksiyon sonucunda, hidrojen gazı katotta, oksijen gazı ise anotta birikir.
- Katot Reaksiyonu (Negatif Elektrot): Katot üzerinde negatif yüklenen elektrot, su moleküllerini hidrojen gazı ve hidroksil iyonlarına ayrıştırır. Katotta biriken hidrojen iyonları, elektronlarla birleşerek hidrojen gazı oluşturur ve bu gaz, cihazın çıkışına yönlendirilir.

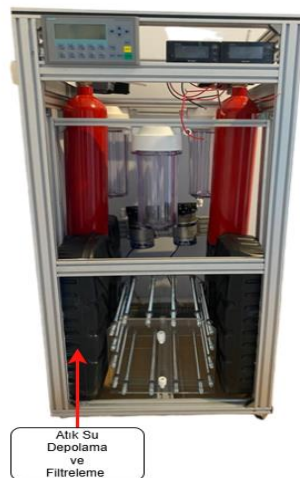
- Anot Reaksiyonu (Pozitif Elektrot): Anotta ise oksijen gazı açığa çıkar. Bu sırada oksijen iyonları, elektron kaybederek oksijen molekülü olarak serbest kalır.

Atık Su Filtrasyonu

Atık su filtrasyonu, hidrojen üretiminde kullanılan suyun saflığını sağlama aşamasını içerir. Bu işlem, suyun içerisindeki yabancı maddeleri, tortuları ve kirleticileri temizleyerek elektroliz sürecine uygun hale getirir. Bu sayede, cihazın performansı artırılır ve uzun süreli kullanım sağlanır.

Cihazın hidrojen reaktörü içerisine girecek büyük partiküllerden arındırılması gerekmektedir. Bu ön işlem, elektroliz işleminde istenmeyen tıkanmalara veya tortu oluşumuna yol açabilecek kaba maddelerin uzaklaştırılmasını sağlar. Şekil 4.9’ da kapalı sistem atık suyun cihaz içerisinde depolandığı ve filtre edildiği bölüm görülmektedir. Bu depo içerisindeki atık su hidrojen reaktörüne iletilmeden önce filtre edilmektedir. Filtreleme işlemi için su arıtma cihazlarında kullanılan yıkanabilir plastik sediment tortu filtreleri tercih edilmiştir. Kullanılan filtrelerin tıkanması durumunda atık su deposunda bulunan “Atık Su Seviye Algılama Sensörü” sistemde su yokmuş gibi algılayacak ve PLC içerisindeki Ladder konumuna göre cihaz arızaya geçecektir. Filtre değişiminden sonra cihaz tekrar aktif olacaktır. Su arıtma cihazlarında kullanılan filtrelerin kolaylıkla değiştirilebilir olması cihazı daha işlevsel hale getirmiştir.

Atık suyun sisteme verilmeden filtrelenmesi ve elektroliz esnasındaki sirkülasyon işlemi sayesinde hidrojen reaktörü hücrelerindeki tıkanmalar minimuma indirilmiştir. Ayrıca kullanılan filtrelerin yıkanabilir olması yeniden kullanılabilmesi imkanını sunar.

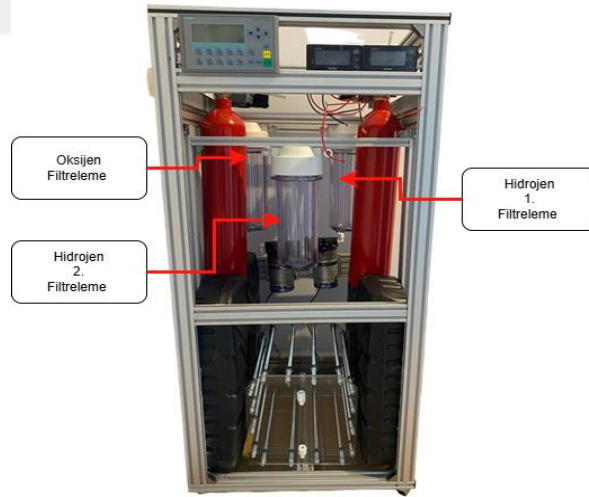


Şekil 4. 9. Atık su depolama ve filtreleme

Gaz Ayırma ve Arıtma Mekanizması

Gaz ayırma ve arıtma mekanizması, hidrojen üretim sürecinde üretilen gazların verimli ve güvenli bir şekilde ayrılmasını ve saflıklarının artırılmasını sağlar. Elektroliz işlemi sırasında reaktörde oluşan hidrojen ve oksijen gazlarının karışmasını önlemek, hidrojenin saf bir formda elde edilmesi için önemlidir. Gaz ayırma mekanizması, hidrojen ve oksijenin ayrı bölümlerde toplanması ve saflıklarının artırılması için birkaç temel işlemi içerir.

Öncelikle, elektroliz işlemi sırasında ortaya çıkan hidrojen ve oksijen gazları farklı gaz çıkış noktalarına yönlendirilir. Oksijen çıkışı oksijen filtreleme bölümüne yönlendirilirken, hidrojen çıkışı 1. ve 2. Filtreleme bölmelerinden geçirilmektedir. Hidrojen, Şekil 4.10'da gösterilen hidrojen 1. filtreleme toplama bölümünde oksijenden bağımsız olarak biriktirilir. Biriktirilen gaz hidrojen 2. filtreleme bölümünden geçirilerek daha saf ve temiz hale getirilir. Gazların birbirine karışmasını önlemek için kullanılan gaz çıkış kanalları ve valfler, gazların güvenli bir şekilde ayrılmasını sağlar. Bu düzenleme, hidrojenin saf bir şekilde toplanmasını sağlarken yanıcı gazların karışmasını önleyerek güvenliği artırır.



Şekil 4. 10. Gaz ayırma ve arıtma mekanizması

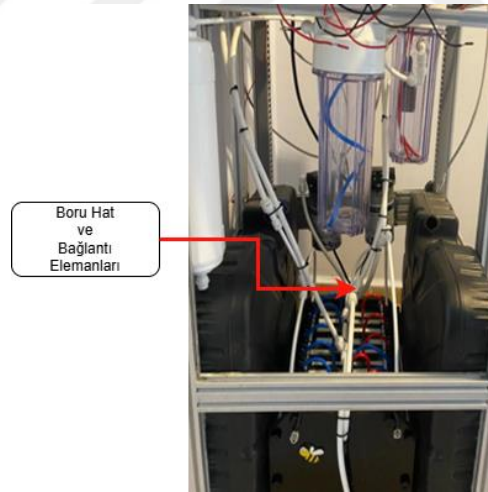
Boru Hatları ve Bağlantı Elemanları

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nda, pnömatik sistem hortumları ve ekipmanları ile su arıtma cihazlarına yönelik hortum ve bağlantı elemanları tercih edilmiştir. Bu tür hortumlar, cihazın çalışma koşullarına uygun olarak yeterli basınca

dayanıklılık sunarken, yüksek dayanıklılık ve güvenilirlik sağlamaktadır. Ayrıca, esnek yapıları sayesinde suyun ve gazların taşınmasında pratiklik kazandırır. Hortumların korozyona dayanıklı malzemelerden üretilmiş olması, özellikle hidrojen üretim sürecinde güvenli ve uzun ömürlü kullanım sağlar.

Bu bağlantı elemanlarının esnek ve modüler yapısı, cihazın farklı bölümleri arasında güvenli ve kesintisiz bir akış sağlar. Özellikle düşük basınçlı sistemler için tasarlanan bu ekipmanlar, montaj kolaylığı ile dikkat çekerken, gerektiğinde hızlı ve kolay bakım olanağı sunar. Bu özellikleri sayesinde, cihazın montaj süreci sadeleşmiş ve kullanım ömrü boyunca minimum bakım gereksinimiyle çalışması sağlanmıştır.

Pnömatik ve su arıtma sistemleri için geliştirilen bu hortumlar ve bağlantı elemanları, hidrojen üretim cihazında işlevsel bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Gaz ve su akışlarının yönlendirilmesi ve ayrılması sürecinde cihazın sistem bütünlüğünü destekleyerek yüksek güvenlik sağlar. Ayrıca, cihazın işletim verimliliğini artırarak, günlük kullanımda güvenli ve sürdürülebilir bir hidrojen üretim süreci sağlar. Bu şekilde seçilen ekipmanlar, cihazın uzun süreli, etkin ve güvenli bir performans göstermesine katkıda bulunmaktadır. Şekil 4.11’de cihazın bağlantı kesiti görülmektedir.



Şekil 4. 11. Cihazın boru hatları ve bağlantı elemanları

Kapalı sistem oluşturmak için yapılan bu montaj, su ve gazın cihaz içerisinde hareketini sağlayarak cihazın daha ergonomik olmasına olanak sağlamıştır. Hortumlar ve bağlantı parçaları, modüler bir yapıda olduğu için gerektiğinde kolaylıkla çıkarılabilir veya

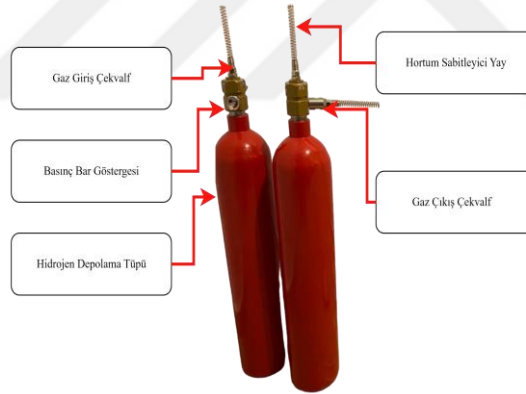
değiştirilebilir. Bu özellik, cihazın bakım süreçlerini hızlandırırken, herhangi bir sorun durumunda parçaların hızlı bir şekilde değiştirilmesini sağlar.

Hidrojen Depolama Tüpleri

Hidrojen depolama için yangın söndürücü tüpler kullanılmıştır. Bu tüpler, dayanıklı yapıları ve yüksek basınçla karşı dirençleri sayesinde kısa vadede hidrojenin güvenli bir şekilde depolanmasını sağlar. Yangın söndürücü tüpler, genellikle metalden yapılmış, yüksek basınç altında güvenli gaz saklama kapasitesine sahip oldukları için alternatif bir hidrojen depolama çözümü sunar.

Yangın söndürücü tüpler, hidrojenin yanıcı özellikleri göz önüne alındığında ekonomik bir çözüm sunarken güvenlik açısından da yeterli dayanıklılık sağlar.

Tüplerin hidrojen depolamak için uygun şekilde modifiye edilmesi ve bağlantı noktalarının sıkı bir şekilde sızdırmazlık sağlayacak şekilde bağlanması, olası gaz kaçaqlarını önler ve güvenliği artırır.



Şekil 4. 12. Hidrojen depolama tüpleri

Şekil 4.12’de Hidrojen Gazının depolanmasında kullanılan tüpler gösterilmektedir. Tüplerin giriş ve çıkışına mekanik çek valfler yerleştirilmiştir. Bu çek valflerin görevi tüpe giren ve çıkan gazı kontrol altına almaktır. Kapalı sistemde üretilen hidrojen, depolama tüplerine aktarılır. Tüp içerisine giren gaz tekrar kapalı sisteme dönüş yapamaz. Böylece kapalı sistem elektronik ve mekanik olarak koruma altına alınmış olur.

Yangın söndürücü tüplerin çalışma basıncı genellikle 10-25 bar arasında değişir. Bu değerler, hidrojen gibi yüksek basınçlı gazlar için yetersiz olabilir, ancak küçük çaplı uygulamalarda bu basınç seviyeleri yeterli olabilir. Dolayısıyla yapılan cihazda, basınç değeri 25 barı geçmediğinden geçici depolama olarak yangın söndürücü tüpler kullanılmıştır.

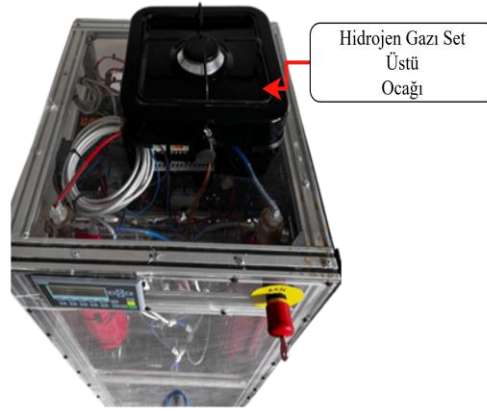
Hidrojen Gazı Set Üstü Pişirici Ocağı

Hidrojen gazı set üstü ocağı, hidrojenin temiz ve verimli bir yakıt kaynağı olarak kullanıldığı bir pişirme cihazıdır. Geleneksel doğalgaz veya LPG yerine hidrojen gazı kullanarak çalışan bu tür ocaklar, çevre dostu bir alternatif sunar. Hidrojenin yanması sonucunda karbon emisyonu oluşmadığından, bu ocaklar yalnızca su buharı açığa çıkarır, bu da onları sürdürülebilir ve çevre dostu bir pişirme seçeneği haline getirir.

Hidrojen gazı set üstü ocağı, doğalgazla çalışan ocaklara benzer şekilde çalışır. Hidrojen gazı, belirli bir basınç altında ocak başlığına iletilir ve burada gaz yakılarak alev elde edilir. Ancak hidrojenin yüksek yanıcılığı ve patlayıcılığı nedeniyle, bu tür ocaklarda bazı özel güvenlik önlemleri alınır. Hidrojen gazı, ocak başlığındaki kontrollü bir valf sistemi aracılığıyla yakılmak üzere serbest bırakılır. Gaz, ocağın başlığında hava ile karışarak yanma tepkimesine girer ve yüksek sıcaklıkta mavi bir alev oluşturur. Bu alevin enerjisi, tencere veya tava gibi pişirme kaplarını doğrudan ısıtarak verimli bir pişirme sağlar.

Hidrojen depolama tüpünden çıkan basınç altındaki gaz, tüpler dolu olduğu sürece sürekli olarak. Bu gaz mekanik çek valf sayesinde hidrojen depolama tüpüne dönüş yapamaz. Hidrojen gazının verimli ve sabit bir şekilde yanabilmesi için genellikle 1.5 ila 3 bar arasında bir basınç ihtiyacı vardır. Bu basınç aralığı, hidrojenin yanma sürecinde sabit bir akış sağlayarak düzgün bir alev oluşturmaya yardımcı olur. Ev tipi hidrojen set üstü ocaklarında bu basınç seviyesi, güvenli ve kontrollü bir yanma sağlamak için ideal kabul edilir.

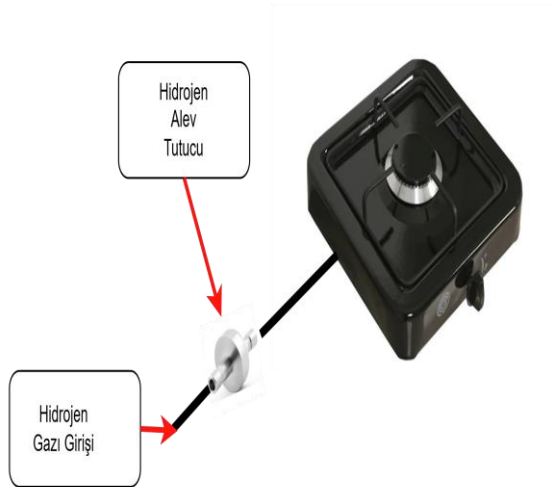
Evlerde kullanılan doğalgaz sistemi gibi Şekil 4.13'te gösterilen Hidrojen Gazı Set Üstü Ocağında sürekli hidrojen gazı vardır. Böylelikle yanma için gerekli olan 1.5 ila 3 bar arası basıncın sürekliliği sağlanmış olur.



Şekil 4. 13. Hidrojen gazı set üstü ocağı

Bu sistemde, hidrojen depolama tüpünden çıkan hidrojen gazı, set üstü ocağın gaz giriş kısmına güvenli bir şekilde aktarılmaktadır. Hidrojen gazı, aktarım sürecinde öncelikle hidrojen alev tutucu emniyet mekanizmasından geçirilerek olası geri tepme riskine karşı korunmaktadır.

Hidrojen gazının yanma mesafesi oldukça kısa olduğundan, güvenlik önlemleri kritik bir öneme sahiptir. Bu sebeple, hidrojen depolama tüpünün çıkışında bir çek valf kullanılarak gaz akışının sadece istenen yönde gerçekleşmesi sağlanmakta ve geri dönüş riskine karşı ekstra bir emniyet sağlanmaktadır. Bu iki aşamalı güvenlik sistemi, hidrojen gazının güvenli ve kontrollü bir şekilde ocağa ulaşmasını garanti altına alır.



Şekil 4. 14. Hidrojen gazı set üstü ocağı tasarımı

4.3. Cihazın Elektriksel Bileşenleri

4.3.1. Güç Kaynağı ve Dağıtım Sistemi

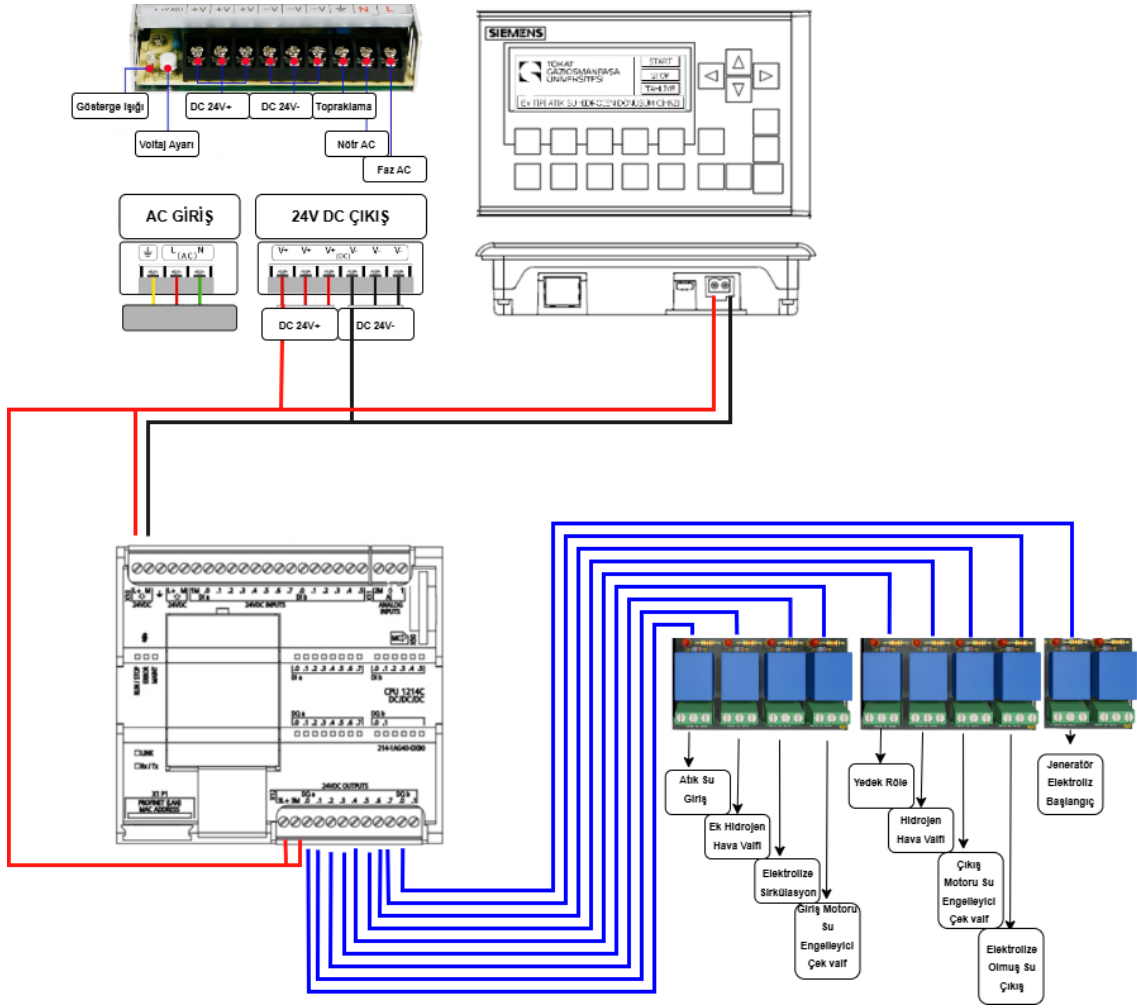
Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nda, sistemin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla iki farklı güç kaynağı kullanılmıştır. Bu güç kaynaklarından biri, hidrojen reaktörünün işlevsel gereksinimlerini karşılamak için ayrılmıştır. Hidrojen reaktörü, suyun elektroliz yoluyla hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılması sürecinde enerjiye ihtiyaç duyar. Bu nedenle, reaktörün yüksek akım ve stabil voltaj gereksinimlerini karşılayabilecek bir güç kaynağı ile donatılması kritik öneme sahiptir. Bu reaktör için 24VDC 80A Programlanabilir Güç Kaynağı kullanılmıştır.

Diğer güç kaynağı ise cihazın elektronik bileşenlerinin beslenmesi için kullanılır. Bu güç kaynağı, kontrol paneli, sensörler, valfler, pompa motorları ve diğer yardımcı elektronik bileşenler için gereken düşük akım ve voltajı sağlar. Sistem bileşenlerinin ayrı güç kaynaklarıyla çalıştırılması, reaktörün yüksek enerji taleplerinin elektronik bileşenlere olası etkilerini en aza indirerek cihazın daha stabil ve güvenilir bir şekilde çalışmasına olanak tanır. Ayrıca bu yapı, her iki güç kaynağının bağımsız olarak kontrol edilmesine imkân tanıyarak enerji yönetimini optimize eder. Diğer sistemler için 24V 20A Metal Kasa Güç Kaynağı tercih edilmiştir.

4.3.2. Kontrol Paneli ve Kontrol Devreleri

Ev tipi atık su hidrojen dönüşüm cihazında kontrol paneli olarak Siemens KP300 Basic HMI (Human Machine Interface), PLC olarak Siemens S71200 1214C DC/DC/DC kullanılmıştır. Bu panel ve PLC, cihazın kullanıcı arayüzünü sağlayarak hidrojen üretim sürecinin izlenmesi ve kontrol edilmesi işlevini üstlenir.

KP300 ve S71200 PLC arasındaki entegrasyon, cihazın tüm bileşenlerinin birbiriyle uyum içinde çalışmasını sağlamaktadır. Bu entegrasyon, özellikle sensörlerden alınan verilerin analiz edilerek kullanıcıya aktarılması ve cihazın performans verilerinin izlenmesi açısından önemlidir. Ayrıca, panel ve PLC'nin sunduğu çeşitli bağlantı noktaları ve arayüzler sayesinde, cihazın diğer sistemlerle entegrasyonu ve uzaktan izleme yetenekleri de mümkün hale gelebilir.



Şekil 4. 15. Kontrol panelinin cihaza entegrasyonu ve bağlantı noktaları

Şekil 4.15’de HMI panel ve PLC’nin Elektriksel bağlantısı ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. PLC ve HMI panel elektriksel bağlantıları 24V 20A Metal Kasa Güç Kaynağı üzerinden yapılmıştır. Cihazın içerisindeki sensör, elektronik Selenoid valf, sirkülasyon pompaları, DC ampermetre ve DC voltmetrenin çalışma gerilimleri bu güç kaynağı üzerinden sağlanmaktadır.

4.3.3. Sensör Bağlantıları

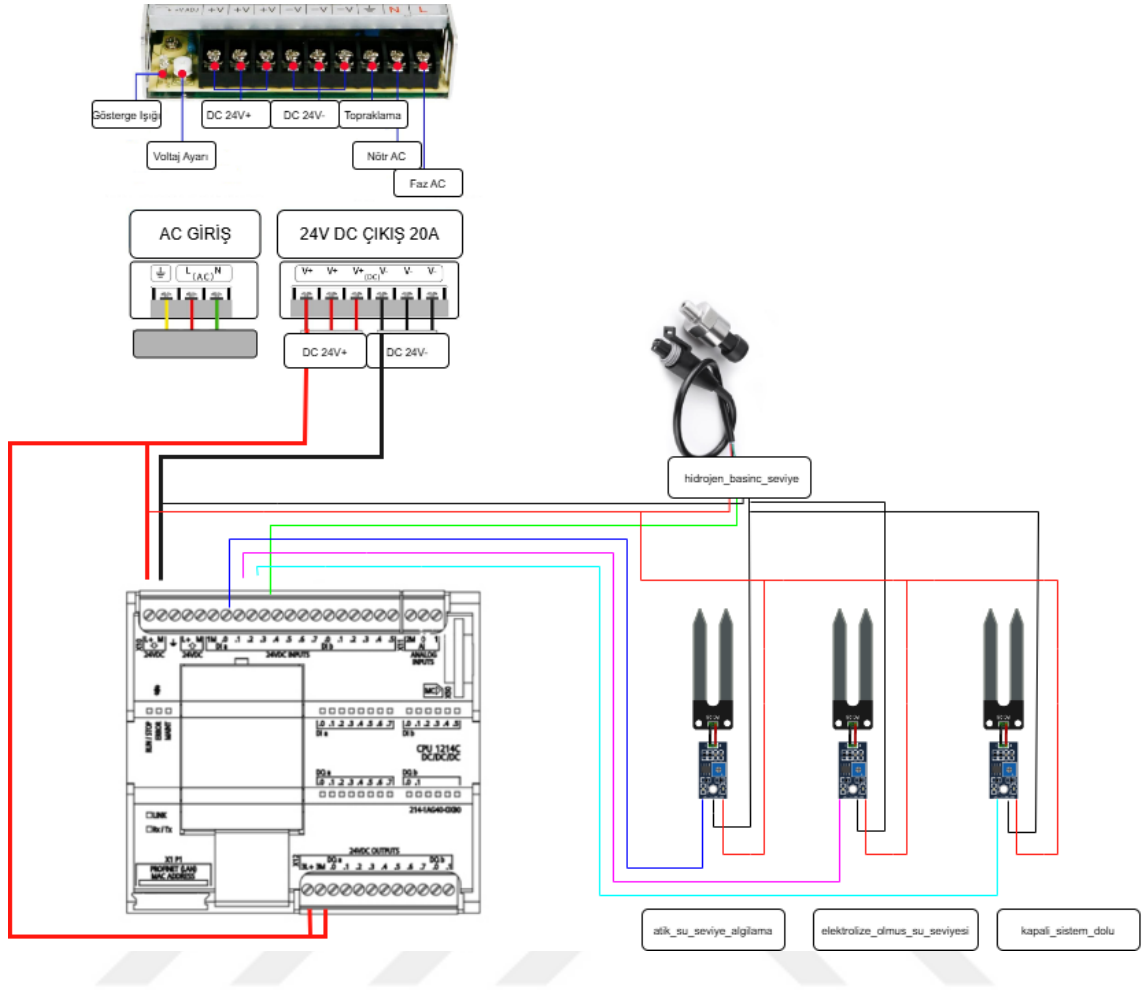
Sensörlerin Yerleşimi ve Bağlantı Noktaları

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı’nda, sistemin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak amacıyla stratejik noktalara sensörler yerleştirilmiştir. Bu sensörler, cihazın çeşitli parametrelerini izleyerek verileri PLC’ye iletir ve kullanıcıya KP300 HMI aracılığıyla bilgi sağlar. Kullanıcı, bu veriler sayesinde cihazın çalışma durumunu takip

edebilir ve gerektiğinde müdahale edebilir. Şekil 4.16’da bu sensörler ve bağlantıları detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

- Basınç Sensörü: Hidrojen depolama tüplerine monte edilen basınç sensörü, depolama alanındaki basınç seviyesini düzenli olarak izler. Sensör, basınç seviyesinin normalin üzerine çıkması durumunda PLC’ye dijital sinyaller gönderir ve güvenlik alarmını tetikler. Bu alarm, KP300 HMI ekranında kullanıcıya basınç seviyesinin yüksek olduğunu bildirir. Basınç seviyesi normal aralığa dönene kadar PLC’nin I0.3 girişine bağlı olan bu sensör aktif kalır ve cihazın pasif konuma geçmesini sağlar. Bu özellik, aşırı basınç durumunda cihazın güvenli bir şekilde çalışmasını durdurur.
- Atık Su Seviye Algılama Sensörü: Cihazın aktif hale geçmesi için atık su seviyesinin belirli bir düzeyde olması gerekmektedir. “atık_su_seviye_algilama” etiketi ile tanımlanan bu sensör, atık su seviyesini algılayarak cihazın çalışmasını kontrol eder. PLC’nin I0.0 girişine bağlı olan sensör, yeterli su seviyesine ulaşıldığında cihazın aktif hale geçmesine izin verir. Bu, cihazın yalnızca yeterli su olduğunda çalışmasını sağlayarak hem güvenliği hem de verimliliği artırır.
- Elektrolize Su Seviye Algılama Sensörü: Elektroliz işlemi sırasında oluşan elektrolize olmuş su miktarını izlemek için kullanılan bu sensör, “elektrolize_olmus_su_seviyesi” etiketiyle PLC’ye tanımlanmıştır ve I0.1 girişine bağlıdır. Bu sensör, elektroliz işlemi sonucunda biriken suyun miktarını algılayarak süreç boyunca cihazın su dengesini kontrol altında tutar. Bu özellik, elektroliz sürecinin verimli ve dengeli bir şekilde devam etmesine katkı sağlar.
- Kapalı Sistemin Dolum Algılama Sensörü: Kapalı sisteme atık suyun yeterli düzeyde dolup dolmadığını kontrol eden bu sensör, “kapali_sistem_dolu” etiketiyle tanımlanmıştır ve PLC’nin I0.2 girişine bağlıdır. Sensör, kapalı sisteme yeterli miktarda su dolduğunda bunu algılayarak dolum işleminin tamamlandığını bildirir ve elektroliz işleminin başlamasına izin verir. Bu sensör sayesinde, yalnızca gerekli miktarda su ile işlem yapılması sağlanarak gereksiz enerji tüketiminin önüne geçilir ve işlem güvenliği artırılır.

Bu sensörler, cihazın çalışma verimliliğini ve güvenliğini artıran önemli bileşenlerdir. Her biri belirli bir görevi yerine getirerek, cihazın güvenli ve kontrollü bir şekilde çalışmasını sağlar. Ayrıca, sensörlerden gelen veriler sayesinde kullanıcı cihazın tüm çalışma süreçlerini KP300 HMI üzerinden takip edebilir ve gerektiğinde müdahale edebilir.



Şekil 4. 16. Sensörlerin yerleşimi ve bağlantı noktaları

4.3.4. Elektronik Selenoid Valf ve Sirkülasyon Pompalarının Bağlantıları

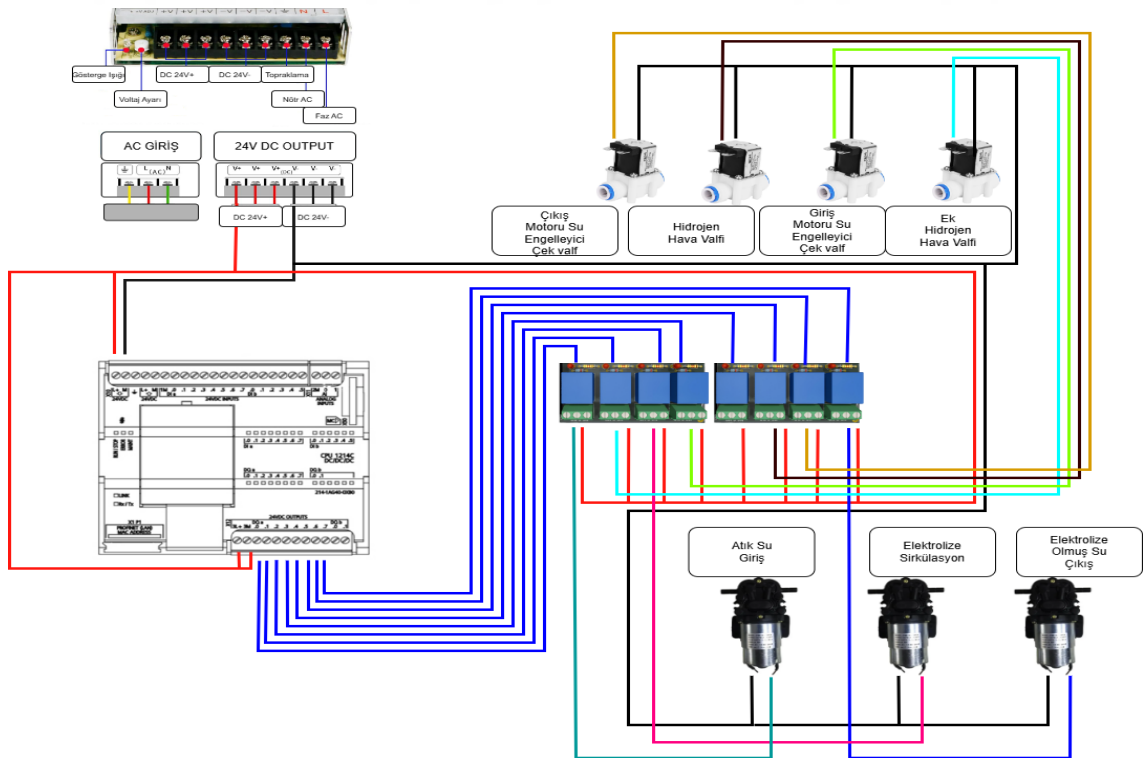
Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nda, Selenoid çek valf ve sirkülasyon pompaları, cihazın güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak amacıyla önemli bir rol oynar. Bu bileşenlerin doğru ve güvenli bağlantıları, sıvı ve gaz akışının kontrol edilmesini sağlar ve sistemin genel performansını artırır.

Elektronik Selenoid valf, cihazın içinde sıvı veya gazın yalnızca belirli bir yönde hareket etmesini sağlar. Hidrojen gibi yanıcı bir gazın geri akışını engellemek için bu valf, yalnızca ileri yönde akışa izin verir. Valf, doğrudan 24V DC güç kaynağı ile beslenir. Bu düşük voltajlı bağlantı, valfın güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. Güç kaynağı, diğer bileşenlerle karışmaması için izole bir kablo kanalı üzerinden bağlanmıştır. Ayrıca, Selenoid valf cihazın merkezi kontrol ünitesi olan PLC'ye bağlıdır ve kontrol sinyallerini PLC'den alır. Bu sinyallerle, valf yalnızca gerektiğinde açılıp kapanır. Bu özellik sayesinde sistem güvenliği sağlanabilmektedir.

Sirkülasyon pompaları, atık suyun ve elektroliz işlemi sırasında oluşan sıvıların cihaz içinde hareketini sağlar. Bu pompalar, atık suyun belirli bir yönde dolaşımını sağlayarak cihazın verimli çalışmasına katkıda bulunur. Pompalar, 24V DC güç kaynağı ile beslenmektedir. Kullanılan güç kaynağı, cihazın gereksinimlerine göre seçilmiştir. Güç bağlantısı, olası kısa devre veya aşırı akım durumlarına karşı koruyucu sigortalarla güvence altına alınmıştır. Bu koruma mekanizması, pompanın güvenli çalışmasını sağlarken, arıza durumlarında cihazın zarar görmesini önler.

Sirkülasyon pompaları da kontrol sinyallerini PLC'den alır. PLC, sistem gereksinimlerine göre pompaları belirli zaman aralıklarında devreye sokarak cihazın su ve gaz akışını optimize eder. Bu düzenleme, cihazın enerji tasarrufu sağlamasına ve verimli çalışmasına yardımcı olur.

Bu bileşenlerin bağlantıları, sızdırmazlık elemanları ve yalıtım malzemeleri ile güçlendirilmiştir. Pompaların ve valflerin bağlantı noktaları, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı malzemelerle kaplanmıştır. Böylece, uzun süre sorunsuz çalışmaları sağlanmış olur. Şekil 4.17'de Elektronik Selenoid Valf ve Sirkülasyon Pompalarının Bağlantıları ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Her bir selenoid valf ve sirkülasyon pompası PLC çıkışıyla eşleştirilmiştir.

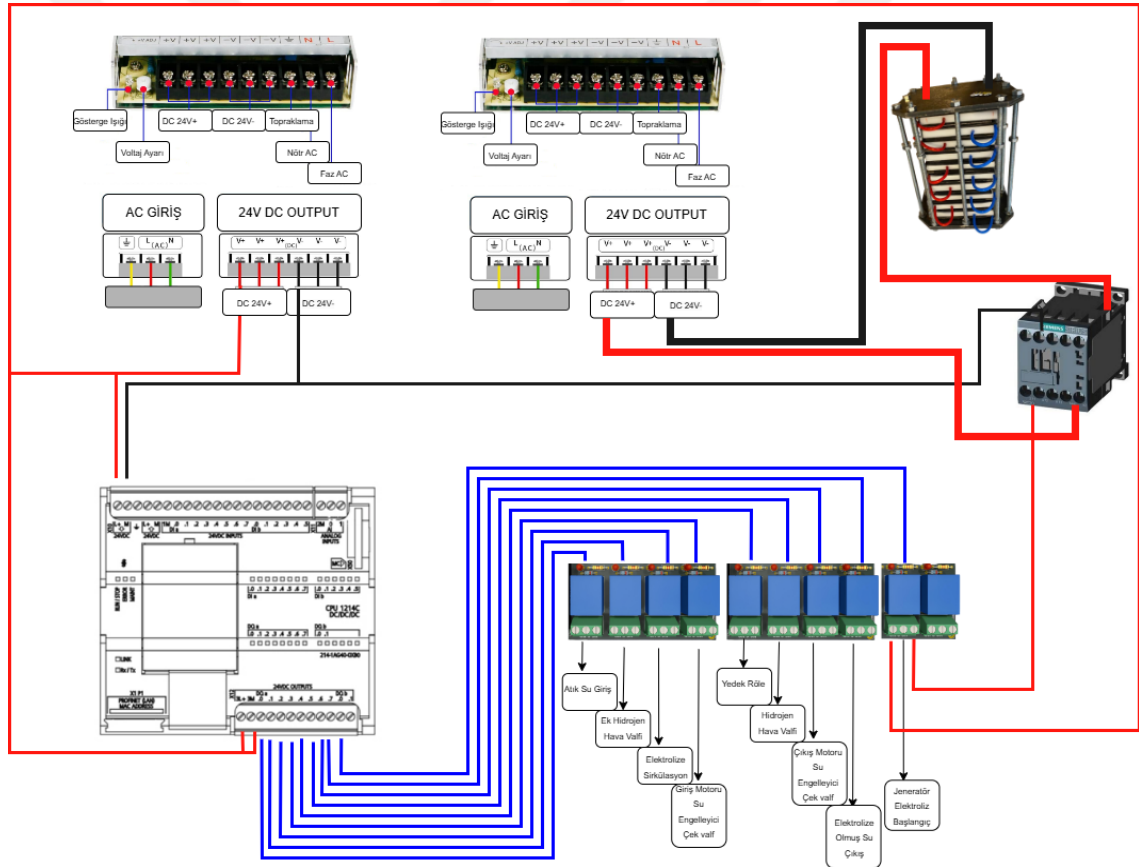


Şekil 4. 17. Elektronik selenoid valf ve sirkülasyon pompalarının bağlantıları

Elektronik Selenoid valf ve sirkülasyon pompalarının bağlantıları, sistemin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak için özenle tasarlanmış bir yapıya sahiptir. Bu düzenlemeler, cihazın genel performansını artırırken, kullanıcı güvenliğini de en üst düzeyde tutar.

4.3.5. Hidrojen Reaktörü Elektriksel Bağlantıları

Reaktör hücresine elektrik akımının iletilmesi, yüksek performans ve güvenlik sağlamak amacıyla 24VDC 80A PFC özelliğe sahip güç kaynağı ile gerçekleştirilmektedir. Bu güç kaynağı, sistemin genel güç kaynağından bağımsız olarak çalışmakta olup, sadece reaktör hücresine gerekli akımı sağlayacak şekilde ayrılmıştır.



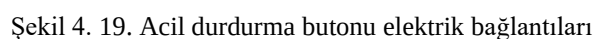
Şekil 4. 18. Reaktör hücresine elektrik akımının iletimi ve bağlantı noktaları

Böylece, elektroliz süreci sırasında reaktör hücresine ihtiyaç duyulan sabit ve güvenilir DC gücün sağlanması mümkün hale getirilmiştir.

Programlanabilir güç kaynağı, reaktör hücresindeki elektroliz sürecini başlatmak için gerekli elektrik akımını sağlar ve bu işlem PLC yazılımı ile entegre bir şekilde yönetilir.

Bu yapılandırma, hem cihazın güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar hem de reaktör hücresindeki elektroliz işleminin yalnızca gerektiği zaman başlamasını garanti eder. PLC, “jeneraötr_elektroliz_baslangic” çıkışını aktif hale getirdiğinde DC kontaktör otomatik olarak devreye girer ve reaktör hücresinde elektroliz süreci başlar. Programlanabilir güç kaynağının kullanımı, işlem sırasında çıkış akımının ve voltajın hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanıyarak elektroliz sürecinde reaktör hücresinin aşırı yüklenmesini önler.

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nda, acil durdurma butonu, tehlike anında cihazı hızlıca durdurmak için kritik bir güvenlik bileşeni olarak yer alır. Bu butonun elektriksel bağlantıları ve devre koruma mekanizmaları, cihazın güvenli çalışmasını sağlamak için Şekil 4.19'da görüldüğü gibi tasarlanmıştır.



Acil durdurma butonu, sistemin ana güç kaynağına doğrudan bağlanarak tüm cihazın elektrik akışını kesebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Cihazın kontrol panelinde konumlandırılan bu buton, gerektiğinde sistemin tamamını devre dışı bırakır. Buton ayrıca, cihazın merkezi kontrol birimi olan PLC'ye bağlıdır. PLC, acil durdurma butonunun tetiklenmesi ile cihazın güvenliğini sağlayacak protokolleri başlatır. NC kontaklarla çalışarak, butona basıldığında devredeki elektrik akımını anında keser.

Acil durdurma butonu tetiklendiğinde, PLC üzerinden belirli bir işlem sırası devreye girer. Öncelikle, reaktör hücresine giden elektrik akımı kesilerek elektroliz işlemi durdurulur. Ardından hidrojen üretim ünitesi devre dışı bırakılır ve güvenlik valfleri aktif hale gelir. Basınç ve sıcaklık kontrol sistemleri kapanarak, tüm güvenlik önlemleri tamamlanana kadar cihaz tamamen pasif konumda kalır. Ayrıca, acil durdurma işlemi başlatıldığında, KP300 HMI ekranında bir uyarı mesajı görünür. Bu mesaj, kullanıcıya sistemin acil durdurma moduna geçtiğini bildirir ve yeniden başlatma işlemi için izlenecek adımları açıklar.

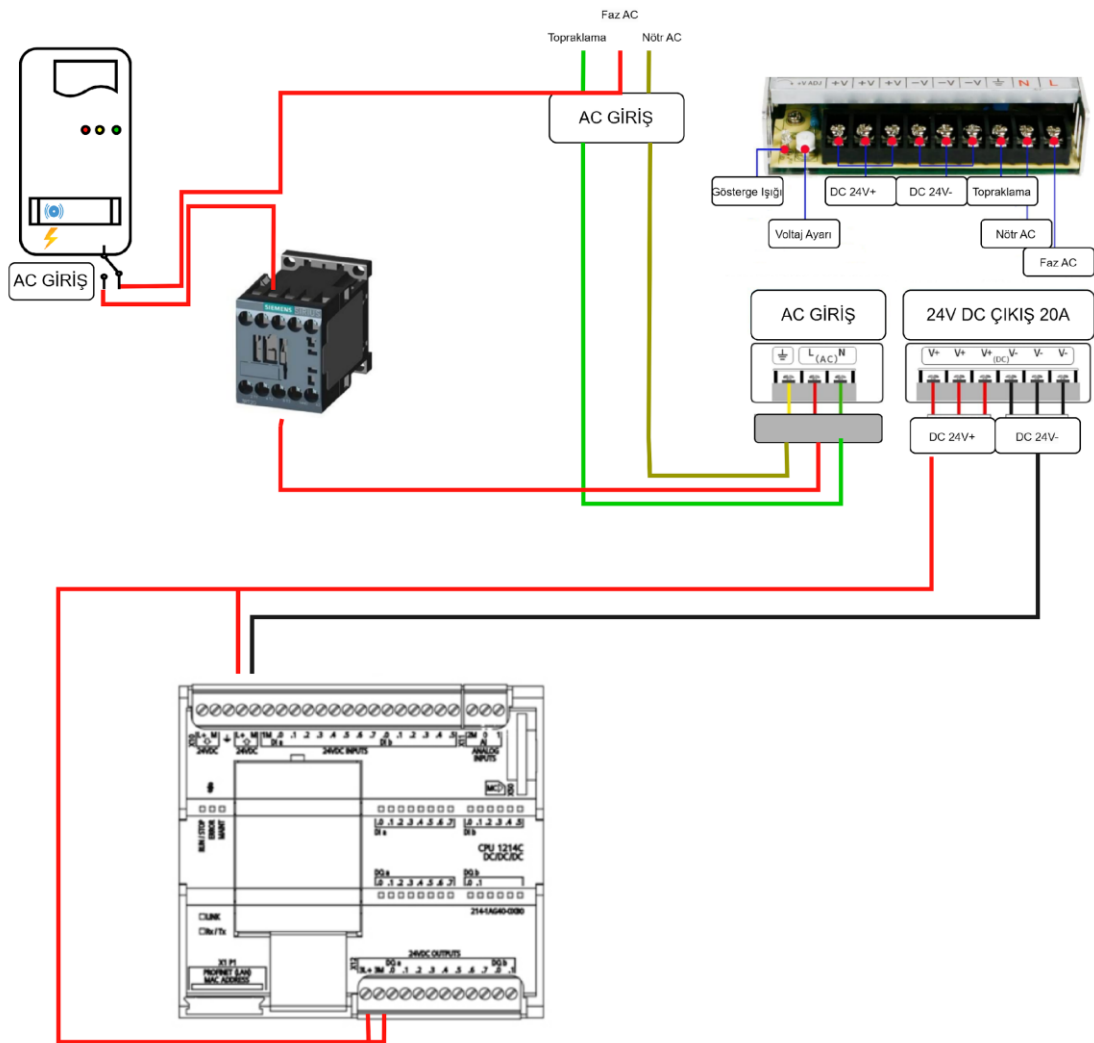
Bu yapılandırma, cihazın güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda kullanıcıya acil durumlarda hızlı ve etkili bir müdahale sunar. Cihazın uzun ömürlü kullanımı ve güvenliği için bu gibi güvenlik mekanizmaları, hayati öneme sahiptir.

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nda kullanılan gaz alarm dedektörü, hidrojen kaçağı durumunda hızlı bir güvenlik önlemi almak üzere tasarlanmıştır. Bu dedektör, doğrudan sistemin enerji beslemesine bağlıdır ve PLC üzerinden herhangi bir alarm sinyali göndermez. Dedektör, 220V AC güç kaynağı ile çalışır ve gaz kaçağı algılandığında, doğrudan sisteme müdahale ederek enerjiyi keser. Bu yapı, herhangi bir gecikme olmadan enerji akışını durdurur, böylece hidrojen kaçağı devam ettiği sürece sistem tamamen kapalı kalır.

Gaz kaçağı algılandığında, dedektör, sistemin güvenliğini sağlamak için kritik bir rol oynar. Bu dedektör, otomatik olarak tüm cihazın elektrik akışını keserek potansiyel tehlikeleri önceden engeller ve sistemin kaçağın giderilmesine kadar devre dışı kalmasını sağlar. Kaçak tespit edildiğinde devreye giren bu mekanizma, yalnızca elektrik akışını kesmekle kalmaz, aynı zamanda operatörlere veya kullanıcıya durumla ilgili uyarılar vererek gerekli müdahalelerin yapılmasını kolaylaştırır. Bu uyarılar, sesli veya görsel bir alarm sistemi ile desteklenebilir ve bu sayede kullanıcı, tehlikenin farkına vararak hızla harekete geçebilir. Bu, sistemin hem insan hem de çevre güvenliğini sağlama kapasitesini önemli ölçüde artırır.

Kaçak giderildikten sonra dedektör, sistemi eski durumuna döndürmek için yeniden enerji sağlar. Bu süreç, kullanıcıya manuel kontrol ve doğrulama imkânı sunarak, sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. Kullanıcı, sistemi tekrar çalıştırmadan önce gerekli kontrolleri yapabilir ve herhangi bir sorun olmadığından emin olabilir. Böylelikle, dedektörün hem önleyici hem de iyileştirici bir güvenlik katmanı olarak işlev gördüğü görülmektedir. Bu mekanizma, yalnızca cihazın korunmasına değil, aynı zamanda çevredeki insanların ve alanların güvenliğine de katkıda bulunur.

Şekil 4.20’de Gaz Alarm Dedektörü Elektrik Bağlantıları ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. 20. Gaz alarm dedektörü elektrik bağlantıları

Hidrojen gibi yüksek yanıcılığa sahip gazlarla çalışan sistemler için bu tür bir mekanizma, kritik bir güvenlik unsurudur. Hidrojen, düşük ateşleme enerjisi ve geniş yanıcılık aralığı

nedeniyle diğer birçok gazdan daha tehlikeli bir yapıdadır. Bu nedenle, gaz kaçağı algılandığında hızlı bir şekilde müdahale edilmesi, potansiyel patlama ve yangın riskini minimize etmek için hayati önem taşır. Ayrıca, bu tür bir sistemin kullanılması, yalnızca operasyonel güvenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda hidrojen sistemlerinin daha geniş çapta benimsenmesi için güvenlik endişelerini azaltır.

Bu doğrudan enerji kesme sistemi sayesinde, dedektör hızlı bir güvenlik çözümü sağlar. Bu özellik, kullanıcının gaz kaçağı durumunda güvenliğini artırırken, sistemin hızlı ve bağımsız bir şekilde tehlike anında devre dışı bırakılmasını mümkün kılar.

4.3.7. Topraklama ve Koruma Bağlantıları

Elektrik Kaçaklarına Karşı Topraklama Bağlantıları

Cihazın elektrik kaçaklarına karşı güvenliğini sağlamak için topraklama bağlantıları kritik bir rol oynar. Topraklama sistemi, cihazın kullanıcı güvenliğini artırırken cihaz bileşenlerinin de korunmasını sağlar. Yanıcı gazlarla çalışan bu tür cihazlarda, güvenilir bir topraklama sistemi zorunludur.

Cihazda kullanılan topraklama sistemi, elektrik kaçaklarını güvenli bir şekilde toprağa aktaracak şekilde yapılandırılmıştır. Herhangi bir kaçak akım oluştuğunda, bu fazla akım doğrudan topraklama hattına yönlendirilmiştir. Bu sayede, cihazın metal gövdesi veya diğer elektrikli parçalar üzerinde oluşabilecek tehlikeli akımların kullanıcıya zarar vermesi önlenir. Aynı zamanda, topraklama sistemi sayesinde cihazın bileşenleri korunarak uzun süre dayanıklı kalmaları sağlanmıştır.

Cihazın çeşitli bölümlerinde topraklama bağlantı noktaları yer alır. Elektrik kaçaklarına karşı koruma sağlamak amacıyla reaktör hücresi, güç kaynağı, kontrol panosu ve gaz alarm dedektörü gibi kritik bileşenlere topraklama bağlantısı yapılmıştır. Bu bağlantılar, yüksek iletkenliğe sahip topraklama kabloları ile gerçekleştirilmiş ve kaçak akımların güvenli bir şekilde toprağa aktarılması sağlanmıştır.

Elektriksel Güvenliği Artıran Koruma Önlemleri ve Sigortalar

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nda, elektriksel güvenliğini artırmak ve kullanıcıyı potansiyel risklerden korumak amacıyla çeşitli koruma önlemleri ve sigortalar kullanılmıştır. Bu önlemler, cihazın güvenli çalışmasını sağlarken olası elektriksel sorunlara karşı etkili bir savunma katmanı oluşturur. Elektriksel güvenliğini sağlamak için

alınan koruma önlemleri, cihazın tüm elektrik bileşenlerini ve kullanıcıyı olası tehlikelerden koruma amacı taşır.

Elektrik devresinde oluşabilecek ani voltaj değişimleri veya aşırı akımlar, cihazın iç bileşenlerine zarar verebilir. Bu tür durumlarda, devreye yerleştirilen sigortalar, elektrik akımını keserek devreyi korur. Sigortalar, cihazda aşırı akım veya kısa devre gibi durumlar meydana geldiğinde devreyi otomatik olarak keserek, iç bileşenlerin yanmasını veya hasar görmesini önler. Böylece, cihazın ömrü uzatılırken aynı zamanda kullanıcı güvenliği sağlanır.

Cihazda kullanılan sigortalar, 300mA KAKR ile desteklenir. KAKR, elektrik devresinde normalin üzerinde bir akım tespit ettiğinde devreyi anında keserek olası yangın veya patlama risklerini azaltır. KAKR, gerektiğinde manuel olarak da devreye alınabilir, böylece kullanıcı acil durumlarda hızla müdahale edebilir. Aşırı akım röleleri ise, belirli bir akım seviyesinin üzerine çıktığında devreyi otomatik olarak keserek, elektriksel yüklenmeyi engeller ve cihazın güvenliğini sağlar.

4.3.8. Kablolama ve Kablo Düzenleme Yapısı

Ev tipi atık su hidrojen dönüşüm cihazında, elektriksel sistemin güvenli ve düzenli çalışmasını sağlamak amacıyla elektrik kablolarının düzenlenmesi ve kablo kanallarının yerleşimi büyük bir özenle yapılmıştır. Kabloların düzenli bir şekilde konumlandırılması hem cihazın güvenliğini artırır hem de bakım ve onarım süreçlerini kolaylaştırır. Bu düzenleme, cihazın içindeki elektriksel karmaşayı azaltarak sistemin genel verimliliğini artırır.

Elektrik kabloları, farklı güç ve sinyal kablolarının birbirine karışmasını önleyecek şekilde ayrılmıştır. Güç kabloları ve sinyal kabloları, cihazın içindeki elektromanyetik girişimi en aza indirmek amacıyla ayrı kablo kanallarında düzenlenmiştir. Bu, özellikle hassas sinyal taşıyan sensör ve kontrol kabloları için önemlidir; çünkü elektromanyetik parazit, yanlış veri iletimine neden olabilir. Güç ve sinyal kablolarının ayrı kanallarda taşınması, elektriksel güvenliği artırır ve olası sinyal kayıplarını önler.

Kablo kanalları, cihazın iç yüzeylerine uygun aralıklarla sabitlenmiştir. Kablolar, bu kanallar aracılığıyla güvenli bir şekilde yönlendirilerek cihazın iç yapısında düzenli bir görünüm sağlanmıştır. Kanalların düzenli aralıklarla yerleştirilmesi, kabloların bükülme veya hasar görmesini önler, böylece kablo ömrü uzatılır ve cihazın güvenli çalışması

sağlanır. Şekil 4.21’de kablo kanallarının düzenlenmesi ve montajı aşaması görülmektedir.



Şekil 4. 21. Kablo kanallarının düzenlenmesi ve yerleşimi

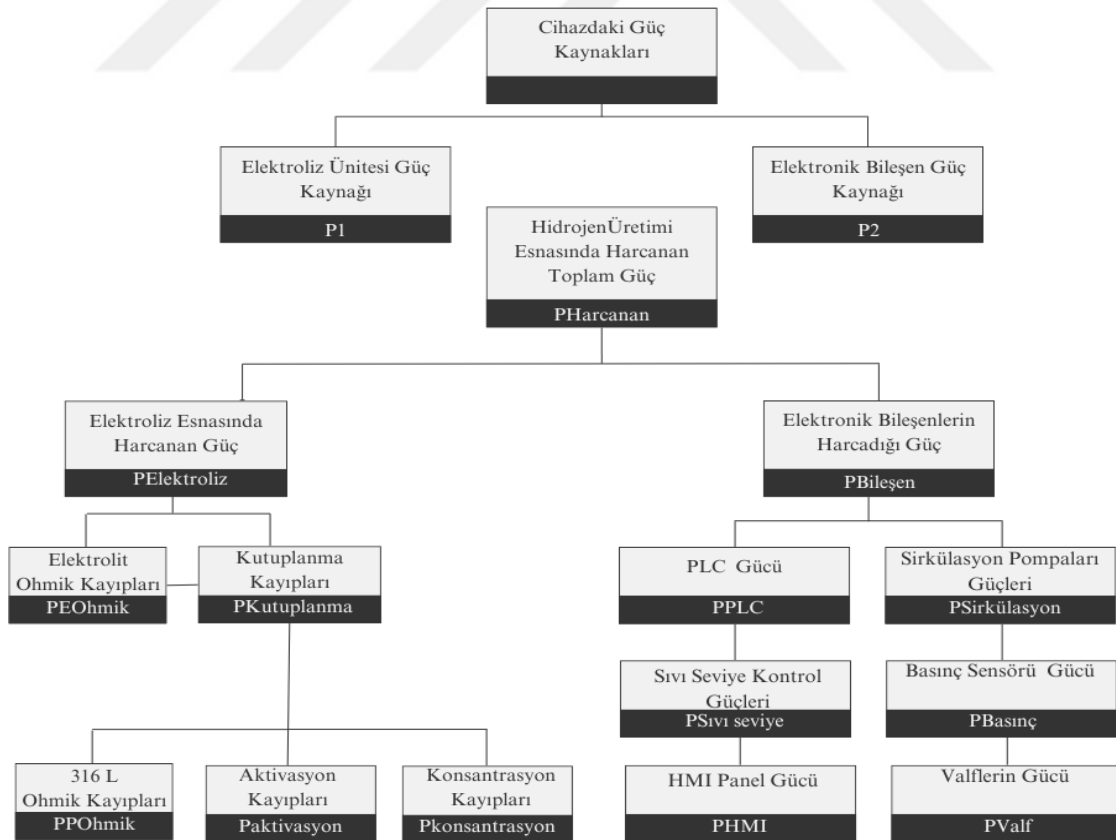
Kablo kanallarında, kabloların kolayca erişilebilir olması da önemli bir kriterdir. Bu sayede, herhangi bir bakım veya onarım gerektiğinde kablolarla hızlı bir şekilde ulaşmak mümkün olur. Ayrıca, kablo kanallarının belirli noktalarında etiketleme yapılmıştır. Bu etiketleme, hangi kablonun hangi bileşene bağlı olduğunu gösterir ve gerektiğinde hızlı müdahale yapılmasını sağlar. Özellikle arıza durumlarında, etiketli kabloların takip edilmesi, sorun giderme sürecini hızlandırır ve hata riskini azaltır.

Elektrik kablolarının düzenlenmesi ve kablo kanallarının yerleşimi, cihazın verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için yapılan en önemli tasarım unsurlarından biridir.

Kabloların düzenli ve izole bir şekilde yerleştirilmesi, olası elektriksel tehlikeleri önleyerek kullanıcı güvenliğini en üst düzeye çıkarmaktadır. Ayrıca, kablo kanallarının stratejik yerleşimi, cihazın uzun ömürlü olmasına katkıda bulunarak kullanıcı dostu bir bakım ve onarım süreci sunmaktadır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nın sisteminde elektriksel enerji tüketimi kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve sistemin enerji ihtiyaçları detaylı olarak incelenmiştir. Bu inceleme cihazın farklı bileşenlerinin güç tüketim profillerini ve akım yoğunluğunun sistem performansına olan etkilerini kapsamaktadır. Elektriksel tüketim analizi cihazın enerji verimliliğini artırmak ve sistemin çalışma koşullarını optimize etmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle elektroliz işlemi sırasında kullanılan enerji miktarı hidrojen üretiminin verimliliği ve sürdürülebilirliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Sistemin hidrojen reaktörü için kullanılan güç kaynağı, elektroliz işlemi için gerekli olan enerjiyi sağlamaktadır. Elektroliz ünitesi güç kaynağı, 24 V gerilim ve 80 A akım sağlayarak elektrolizörün ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılamaktadır. Bu yüksek akım ve gerilim değerleri, elektroliz işleminin sürdürülebilir bir şekilde çalışmasını mümkün kılarken, aynı zamanda yeterli miktarda hidrojen üretimi için gereken enerji girişini de sağlamaktadır. Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı için gereken toplam güç hesabı Şekil 5.1'deki kayıplar ve diğer bileşenler dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 5. 1. Cihazın toplam güç diyagramı

Cihazın elektroliz yapabilmesi için kullanılan elektroliz ünitesi güç kaynağının gücü Denklem 5.1'e göre hesaplanmıştır.

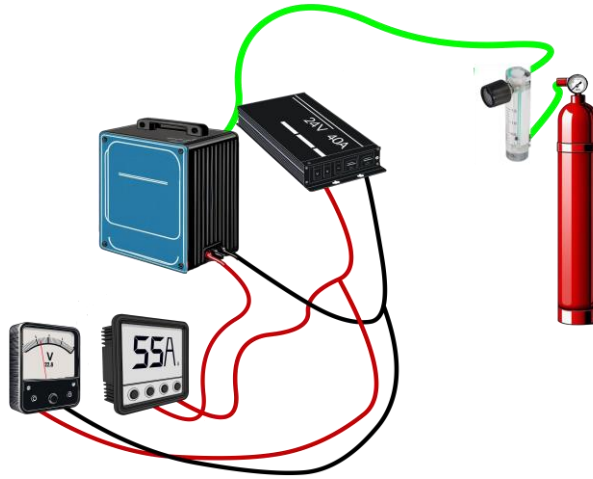
$$P_1 = V_1 * I_1 \quad (5.1)$$

Bu denkleme göre elektroliz ünitesi güç kaynağı (P_1) 1920 W'lık bir güce sahiptir. Cihazın elektronik bileşenleri için kullanılan elektronik bileşen güç kaynağının gücü ise Denklem 5.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$P_2 = V_2 * I_2 \quad (5.2)$$

Elektronik bileşen güç kaynağı (P_2) Denklem 5.2'ye göre hesaplandığında 480W'lık bir güce sahiptir.

Şekil 5.1 incelendiğinde cihazın hidrojen üretimi esnasında harcanan toplam gücü ($P_{Harcanan}$) elektroliz esnasından harcanan güç ($P_{Elektoliz}$) ve elektronik bileşenlerin harcadığı güç ($P_{Bileşen}$) bölümlerinden oluşmaktadır.



Şekil 5. 2. Hidrojen reaktörünün elektroliz esnasındaki ölçüm değerleri

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi hidrojen reaktörünün elektroliz esnasında elektroliz ünitesi güç kaynağındaki ölçülen gerilim değeri ($V_{Elektroliz}$) 22,8V akım değeri ($I_{Elektroliz}$) ise 55 A'dır.

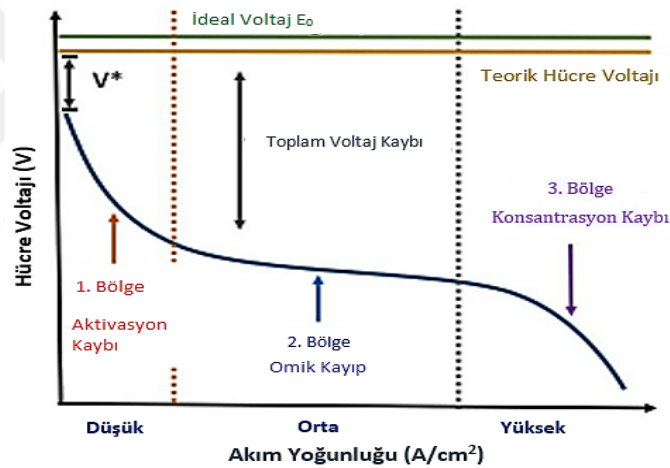
Buna bağlı olarak elektroliz esnasında harcanan güç Denklemi 5.3'de verilmiştir.

$$P_{Elektoliz} = V_{Elektoliz} * I_{Elektoliz} \quad (5.3)$$

Bu denkleme göre elektroliz esnasında harcanan güç ($P_{Elektoliz}$) 1254 W olarak hesaplanmıştır.

Cihazın ölçülen güç değeri, içerisinde kayıpları barındırmaktadır. Elektroliz sisteminde meydana gelen enerji kayıpları sistemin genel verimliliğini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Bu kayıplar sistemin teorik olarak ihtiyaç duyduğu enerji ile pratikte harcanan enerji arasındaki farkları ortaya çıkarır. Elektroliz sürecinde elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesi sırasında çeşitli enerji kayıpları oluşur. Bu durum elektrokimyasal reaksiyonların verimliliğini sınırlandırır.

Bu kayıplar arasında elektrolit sıvıdan kaynaklanan ohmik kayıplar, elektrotlardan kaynaklanan kutuplanma (elektrot ohmik, aktivasyon, konsantrasyon) kayıpları yer almaktadır.



Şekil 5. 3. PEM yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi (Blanco-Cocom L ve ark., 2022)

Şekil 5.3’de PEM (Proton Elektrolit Membranlı) elektroliz yakıt hücresindeki akım yoğunluğu ve hücre ile bu süreçte oluşan enerji kayıpları gösterilmektedir. İlk bölge düşük akım yoğunluklarında ortaya çıkan aktivasyon kayıplarını temsil etmektedir. İkinci bölgede artan akım yoğunluğu voltaj düşüşlerine neden olmuş ve ohmik kayıplar ortaya çıkmıştır. Elektrotlar arası mesafe kısaltılarak ohmik kayıpların minimum düzeye indirilmesi sağlanabilir. Son bölgede ise yüksek akım yoğunluğu nedeniyle voltaj düşüşleri belirgin hale gelmiş ve konsantrasyon kayıpları meydana gelmiştir. Bu kayıplar elektrolit sıvının konsantrasyonunun azalması sonucunda ortaya çıkmaktadır.

Konsantrasyon kayıplarını azaltmak için yüzey alanı daha geniş elektrot tasarımları kullanılabilir.

Sistemin alkali elektroliz yöntemi ile tasarlanan hidrojen reaktörü verimini hesaplayabilmek için üretim esnasında meydana gelen elektrolit ohmik ve kutuplanma kayıplarının da hesaba katılması gerekmektedir.

Elektrolit ohmik kayıpları elektrotlar ve elektrolit arasındaki dirençten kaynaklanmaktadır. Bu kayıpların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için öncelikle sistemin elektrolitten kaynaklanan ohmik direnç değerin belirlenmesi gerekmektedir.

Cihazın hidrojen reaktörüne gönderilmek üzere oluşturulan farklı elektrolit sıvıların oluşturduğu atık sular atık su depo alanına yönlendirilmiştir. Ayrıca cihaza giren ve çıkan su analizleri Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölüm Laboratuvarlarındaki cihazlar kullanılarak yapılmıştır. Elektrolit suyun girdi ve çıktı yoğunluk (g/mL) değerleri, ISO 3507 standartlarına uygun ISOLAB marka kalibreli 50 ml Piknometre ile belirlenmiştir. İletkenlik ve pH değerleri ise Seven Easy pH 8603 ve WTW Inolab Multi 9310 cihazları ile ölçülmüştür. Ölçümlerin gerçekleştirilmesi esnasında elektrolit sıvının homojen dağılımına dikkat edilmiştir. Cihazın referans hesaplamalarında çamaşır makinası suyu atığı kullanılmıştır.

Çizelge 5. 1. Değişik türdeki atık suların karakterizasyonu

Elektrolit Sıvılar	pH Değeri	İletkenlik Seviyesi (S/m)	Yoğunluk (g/ml)
Bulaşık Makinası Atığı Girdi	9.97	1.5341	1.016
Bulaşık Makinası Atığı Çıktı	11.68	1.3965	1.015
Çamaşır Makinası Atığı Girdi	9.87	1.9082	1.002
Çamaşır Makinası Atığı Çıktı	12.27	1.5558	1.005
Saf Su ve Potasyum Hidroksit Girdi	13.38	2.2977	1.033
Saf Su ve Potasyum Hidroksit Çıktı	12.71	2.2747	1.006

Cihazın hidrojen reaktöründe elektrolize maruz kalan çamaşır makinası atığına ait iletkenlik seviyesi Çizelge 5.1’de gösterilmektedir. Yapılan çalışmalarda çamaşır makinası evsel ve endüstriyel atık sularının karakterizasyonu çıkarılarak kimyasal olarak incelenmiştir.

Çizelge 5. 2. Literatürdeki çamaşır makinası atık sularının karakterizasyonu

Parametre	Birim	(Lade ve Gbagba, 2018)		(Hakeem ve ark., 2019)	(Choobar ve ark., 2019)	(Turkay ve ark., 2017)
		Evsel	Endüstriyel	Evsel	Evsel	Evsel
pH	-	9.3-10	9-11	12.4	8.9	7.7
İletkenlik	mS/m	190-1400	640-3000	682	-	270
TKM	mg/L	400-6000	420	767	5190	84
AKM	mg/L	200-987	45-68	-	360	-
Bulanıklık	NTU	14-400	40-150	133	360	145
KOİ	mg/L	375-4155	80-212000	832	2538	1356
BOİ5	mg/L	48-1200	218-910	210	1190	484
Florür	mg/L	-	-	21.3	-	0.78
Klorür	mg/L	-	-	135.33	-	0.73
Nitrat	mg/L	-	-	36.0	-	0.73
Fosfat	mg/L	4-27.6	3.43	17.5	535	0.70
Sülfat	mg/L	-	-	40.2	-	63.25
Sürfaktan	mg/L	-	-	-	95	-

Çizelge 5.2 incelendiğinde çamaşır makinasından çıkan atık su girdi değerleri ölçülen sonuçlarımızla benzerlik göstermektedir.

Plakalar arasındaki mesafe, kullanılan elektrolitin iletkenlik değeri ve elektrot yüzey alanı gibi parametrelere bağlı olarak değişen elektrolit ohmik direnç Denklemi 5.4'deki gibidir.

$$RE_{ohmik} = d / (E_{\sigma} * A_{Toplam Plaka Yüzey Alanı}) \quad (5.4)$$

Elektrotlar arası mesafe (d) 0,003m, elektrolit sıvının iletkenliği (E_{σ}) ise Çizelge 5.2'ye göre 1,9082 S/m olarak hesaba katılmıştır.

Hidrojen Reaktörü elektroliz alanı iki hücreden oluşmaktadır. Her hücrede bir adet anot, iki adet katot ve 16 adet nötr plaka bulunmaktadır. Dolayısıyla, sistemde toplam iki anot, üç katot ve 32 nötr plaka bulunmaktadır. Ayrıca her 10cm*10cm olan 316L plakasının yüzey alanı 100 cm² olarak hesaplanmıştır. Anot ve katot plakalarının toplam sayısının 5 olması toplam plaka yüzey alanını ($A_{Toplam Plaka Yüzey Alanı}$) 500 cm²'ye çıkarmaktadır. Bu denkleme göre elektrolit çözeltisinin ohmik direnç (RE_{ohmik}) değeri 0.031Ω olarak hesaplanmıştır.

Ohm yasasına göre, elektriksel bir devrede direnç üzerinden geçen akım nedeniyle oluşan güç kaybı, akım ve direnç değerlerine bağlı olarak Denklem 5.5'a göre hesaplanmaktadır.

$$PE_{ohmik} = (I_{Elektroliz})^2 * RE_{ohmik} \quad (5.5)$$

Bu denkleme göre elektrolit sıvının oluşturduğu ohmik güç kaybı (PE_{ohmik}) değeri 93.775 W olarak hesaplanmıştır.

Elektrolit çözeltisinin ohmik kayıpların minimum düzeyde olması, sistemdeki verimliliğin değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu durumda oluşan elektrolit sıvı ohmik kayıp oranı Denklem 5.6'ya göre belirlenmiştir.

$$Elektrolit Sıvı Ohmik Kayıp Oranı = (PE_{ohmik}/P_{Elektroliz}) * 100 \quad (5.6)$$

Bu denkleme göre elektrolit sıvının oluşturduğu ohmik kayıp oranı %7,47 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, toplam gücün %7,4'ünün elektrolitten kaynaklanan ohmik nedenlerle kaybedildiğini göstermektedir.

Kutuplanma kayıpları temel olarak üç ana kaynaktan gelmektedir. İlk olarak, aktivasyon polarizasyonu veya aşırı gerilimi adı verilen kayıplar, elektrot yüzeyinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların başlaması için gereken enerji nedeniyle oluşmaktadır. İkinci kaynak ise ohmik polarizasyon olarak adlandırılır. Bu kayıplar elektrot plakanın oluşturduğu elektriksel dirençten kaynaklanır. Bu direnç, akım taşınmasını zorlaştırarak enerji kaybına yol açar. Son olarak, konsantrasyon polarizasyonu, reaksiyon sırasında elektrot yüzeyinde oluşan veya tüketilen türlerin konsantrasyonlarındaki değişimlerden kaynaklanır.

Elektrot ohmik kayıpları 316L paslanmaz çelik elektrotun oluşturduğu dirençten kaynaklanmaktadır.

Plakalar arasındaki mesafe, kullanılan elektrotun iletkenlik değeri ve elektrot yüzey alanı gibi parametrelere bağlı olarak değişen elektrot ohmik direnci Denklem 5.7'ye göre hesaplanmaktadır.

$$RP_{ohmik} = d / (P_{\sigma} * A_{Toplam Plaka Yüzey Alanı}) \quad (5.7)$$

Elektrotlar arası mesafe (d) 0,003m, elektrolit sıvının iletkenliği (P_{σ}) ise Çizelge 5.3'e göre $1,32*10^6$ S/m olarak hesaba katılmıştır.

Bu denkleme göre 316L elektrotunun ohmik direnci (RP_{ohmik}) değeri $4,54*10^{-8}\Omega$ olarak hesaplanmıştır. Ohm yasasına göre, elektriksel bir devrede direnç üzerinden geçen akım nedeniyle oluşan elektrot güç kaybı, akım ve direnç değerlerine bağlı olarak Denklem 5.8'e göre hesaplanmaktadır.

$$PP_{ohmik} = (I_{Elektroliz})^2 * RP_{ohmik} \quad (5.8)$$

Bu denkleme göre 316L elektrotunun oluşturduğu (PP_{ohmik}) değeri 0,0001375 W olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5. 3. Metal ve alaşımlardan bazılarının iletkenlik ölçümleri

Metal	Elektriksel İletkenlik (10^6 S/m)	Elektriksel Direnç ($10^{-8} \Omega/m$)	Termal iletkenlik W/m/k
Gümüş	62.1	1.6	420
Bakır	58.2	1.7	386
Altın	44.2	2.3	317
Alüminyum	36.9	2.7	237
Molibden	18.7	5.34	138
Çinko	16.6	6	116
Pirinç	15.9	6.3	150
Nikel	14.3	7	91
Çelik	10.1	9.9	80
Bronz 67Cu33Sn	7.4	13.5	85
Karbon Çeliği	5.9	16.9	54
Paslanmaz Çelik 316L EN1.4404	1.32	76	15

Kutuplanma kayıplarının bileşenlerinden olan aktivasyon ve konsantrasyon kayıplarına ait hesaplama denklemleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.

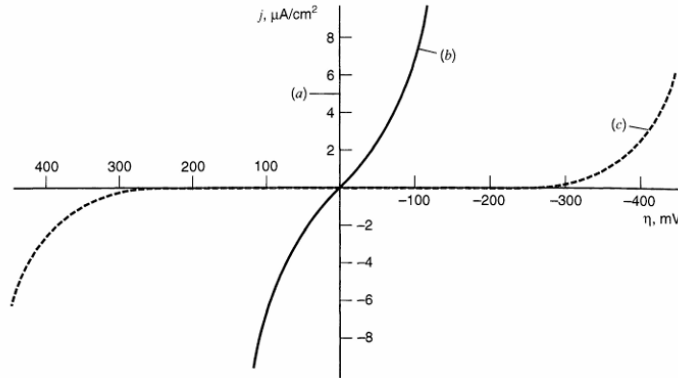
Çizelge 5. 4. Alkali elektroliz elektrokimyasal denklemleri

Potansiyel	Denklem Eşitliği	Referanslar
Aktivasyon Aşırı Gerilimi	$\eta_{aktivasyon} = \left(\frac{R^*T}{z^*F}\right) \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_0}\right)$	(Razmi ve ark., 2024; AlZahrani, 2017).
Konsantrasyon Aşırı Gerilimi	$\eta_{konsantrasyon} = \left(\frac{R^*T}{z^*F}\right) \ln \left(\frac{J}{J_0}\right)$	(Hernández-Pacheco ve ark., 2004).

Bu kayıpların hesaplanabilmesi için değişim akım yoğunluğu (J_0) değerinin bilinmesi gerekir. Yapılan araştırmalarda değişim akım yoğunluğunun, aktivasyon ve konsantrasyon aşırı potansiyeli üzerindeki değişimleri ele alınmıştır.

Şekil 5.4'e göre alkali elektroliz yönteminde değişim akım yoğunluğu en ideal seviyesi, (b) $J_0 = 10^{-6} A/cm^2$ olarak alınmalıdır (Bard ve Faulkner, 1983). Bu durumda aktivasyon kayıpları, Tafel denkleminin bir türevinden hesaplanabilir.

Çizelge 5.4'de alkali elektroliz elektrokimyasal denklemleri verilmiştir. Evrensel Gaz Sabiti (R) 8,3143 J/mol.K, sıcaklık (T) 298K, hidrojenin elektron sayısı (z) 2 ve Faraday Sabiti (F) 96485 C/ mol olarak alınmıştır.



Şekil 5. 4. Alkali elektrolizde değişim akımı yoğunluğunun belirlenmesi (Bard ve Faulkner, 1983).

Akım yoğunluğu (J), birim alan başına uygulanan elektrik akımı miktarını ifade eden bir büyüklüktür. Akım yoğunluğu, bir elektrot yüzeyinden geçen toplam elektrik akımının, bu yüzeyin alanına bölünmesiyle hesaplanır. Bu hesaplama ayt Denklem 5.9'da verilmiştir.

$$J = I_{Elektroliz} / A_{Toplam Plaka Yüzey Alanı} \quad (5.9)$$

Anot ve katot üzerindeki akım yoğunluğu, sistem performansını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Bu parametre, hidrojen üretiminin hızını, enerji verimliliğini ve sistemin uzun vadeli dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir.

Elektroliz sırasında, elektrotlar üzerinden geçen elektrik akımı suyun ayrışmasını sağlar ve hidrojen gazı katotta, oksijen gazı ise anotta üretilir. Elektrotlara uygulanan akım yoğunluğu, bu ayrışma hızını belirler. Daha yüksek akım yoğunluğu, hidrojen üretim hızını artırır ve daha fazla gaz üretimi sağlar. Ancak, akım yoğunluğunun çok yüksek olması durumunda, enerji kayıpları ve yan reaksiyonlar artar. Bu durum, enerji verimliliğini olumsuz etkileyebilir ve aynı zamanda sistemde ısı oluşumuna neden olarak elektrot malzemelerinde aşınma ve bozulmaya yol açabilir.

Düşük akım yoğunluğu ise enerji verimliliği açısından daha avantajlıdır. Bu nedenle ohmik kayıplar ve gaz baloncuklarının elektrot yüzeyinde birikme etkisi daha azdır. Ancak, düşük akım yoğunluğu kullanıldığında hidrojen üretim hızı yavaşlar ve sistemin endüstriyel kullanımı için yeterli üretim kapasitesine ulaşmayabilir.

Hidrojen reaktöründen geçen toplam akım 55 A olarak ölçülmüştür. Denklem 5.9'a göre yapılan hesaplamalarda anot ve katot plakaları üzerindeki toplam akım yoğunluğu (J) 0,11 A/cm² olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.4'e göre yapılan işlemler ile aktivasyon polarizasyonu ($\eta_{aktivasyon}$) yaklaşık olarak 0,149 V olarak hesaplanmıştır.

Aktivasyon güç kaybı ölçülen akım değeri ile aktivasyon kayıp voltajının çarpılması ile bulunur. Bu işleme ait Denklem 5.10'da verilmiştir.

$$P_{aktivasyon} = \eta_{aktivasyon} * I_{Elektroliz} \quad (5.10)$$

Bu denkleme göre aktivasyon güç ($P_{aktivasyon}$) kaybı değeri 8,195W olarak hesaplanmıştır.

Konsantrasyon kaybı, elektrot yüzeyindeki iyon yoğunluğunun azalmasından kaynaklanır ve Denklem 5.11'de verilen formülle hesaplanır.

$$\eta_{konsantrasyon} = \left(\frac{R*T}{z*F}\right) \ln \left(\frac{J}{J_0}\right) \quad (5.11)$$

Değerler yerine yerleştirildiğinde konsantrasyon kayıpları voltajı ($\eta_{konsantrasyon}$) yaklaşık olarak 0.0149V olarak hesaplanmıştır.

Konsantrasyon güç kaybı ise ölçülen akım değeri ile konsantrasyon kayıp voltajının çarpılması ile bulunur. Bu işleme ait Denklem 5.12'de verilmiştir.

$$P_{konsantrasyon} = \eta_{konsantrasyon} * I_{Elektroliz} \quad (5.12)$$

Bu durumda konsantrasyon güç ($P_{konsantrasyon}$) kaybı yaklaşık olarak 0,819W olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.5'de kutuplanma kayıplarını oluşturan elektrot ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon kayıplarına ait hesaplanan güç değerleri verilmiştir.

Çizelge 5. 5. Kutuplanma kayıplarını oluşturan güç değerleri

Potansiyel	Denklem Eşitliği	Sonuç
Aktivasyon Kaybı	$\eta_{aktivasyon} = (\frac{R^*T}{z^*F}) \sinh^{-1} (\frac{J}{2J_0})$	8,195 W
Konsantrasyon Kaybı	$\eta_{konsantrasyon} = (\frac{R^*T}{z^*F}) \ln (\frac{J}{J_0})$	0,819 W
Elektrot Ohmik Kaybı	$PP_{ohmik} = (I_{Elektroliz})^2 * RP_{ohmik}$	0,0001375 W

Toplam kutuplanma güç ($P_{kutuplanma}$) kaybı, hesaplanan diğer kayıpların toplamına eşittir. Buna ait Denklem 5.15’de verilmiştir.

$$P_{kutuplanma} = P_{konsantrasyon} + PP_{ohmik} + P_{aktivasyon} \quad (5.15)$$

Bu denkleme göre kutuplanma güç kaybı değeri 9,0141 W olarak hesaplanmıştır. Bu durumda kutuplanma kayıp oranı Denklem 5.16’da verilmiştir.

$$Kutuplanma Kayıp Oranı = (P_{kutuplanma}/P_{Elektroliz}) * 100 \quad (5.16)$$

Bu denkleme göre kutuplanma kayıp oranı %0,71 olarak hesaplanmıştır.

Kayıplar sonrasında elektroliz ünitesi sisteminin çalışma esnasında harcadığı toplam güç Denklem 5.17’ye göre hesaplanmıştır.

$$PK_{Elektroliz} = P_{Elektroliz} - (PE_{ohmik} + P_{kutuplanma}) \quad (5.17)$$

Bu denkleme göre harcanan toplam güç ($PK_{Elektroliz}$) 1151,21 W olarak hesaplanmıştır. Cihazın alkali elektroliz yöntemi ile tasarlanan hidrojen reaktörü verimini hesaplayabilmek için üretim esnasında meydana gelen ohmik ve kutuplanma kayıplarının da bilinmesi gerekmektedir.

Cihazın elektroliz verimi Denklem 5.18’de verilmiştir.

$$\eta = (PK_{Elektroliz}/P_{Elektroliz}) * 100 \quad (5.18)$$

Bu denkleme göre cihazın elektroliz verimi (η) %91,8 olarak hesaplanmıştır.

Hidrojen gazının gerçek zamanlı litre miktarı ($V_{Hölçülen}$) kapalı sistem çıkışına bağlanan LZB-6M 0-1.5 LPM marka akış ölçer ile 0,38 L/min olarak ölçülmüştür.

Hidrojenin teorik hacmi Faraday yasası ve İdeal gaz denklemi kullanılarak hesaplanabilir. Teorik olarak üretilen hidrojenin madde miktarı yani mol sayısı (n_{H_2}) Denklem 5.19' a göre hesaplanmıştır.

$$n_{H_2} = (Q)/z * F = (I_{Elektroliz} * t)/z * F \quad (5.19)$$

Burada Faraday sabiti (F), 96485 C/mol'dür. Ayrıca aktarılan elektron sayısı (z) hidrojen üretimi için 2, zaman (t) ise saniye cinsinden 60 olarak hesaba katılmıştır. Elektrik yükü(Q) birimi Coulomb'dur.

Hesaplamalar sonucunda hidrojenin madde miktarı 0,0171 mol olarak hesaplanmıştır.

Hidrojenin teorik hacmi ($V_{H_{Teorik}}$), hesaplanan mol sayısının Denklem 5.20'deki ideal gaz denklemi ile ilişkilendirilmesiyle hesaplanabilir. Evrensel Gaz Sabiti (R) 0,0821(L.atm/mol.K), sıcaklık (T) 25°C (298K) ve basınç (P) 1 atm olarak hesaba katılmıştır.

$$V_{H_{Teorik}} = n_{H_2} * R * T / P \quad (5.20)$$

Bu denkleme göre üretilen hidrojenin teorik hacmi ($V_{H_{Teorik}}$)yaklaşık olarak 0.418 L olarak hesaplanmıştır.

Üretilen hidrojenin verimi Denklem 5.21'e göre hesaplanabilir.

$$\eta_{Hidrojen} = (V_{Hölçülen} / V_{H_{Teorik}}) * 100 \quad (5.21)$$

Denklem doğrultusunda yapılan hesaplamalar üretilen hidrojenin yaklaşık %90 verimliliğe sahip olduğunu göstermektedir. Yapılan araştırmalarda alkali elektroliz yönteminde verimliliğinin %70-80 arasında olduğu ifade edilmiştir (Sankir ve Sankir, 2017; Grigoriev ve ark., 2020).

Bu hesaplamalar, elektroliz hücresinin verimliliğini değerlendirmenin yanı sıra, enerji kullanımını optimize etmek ve sistemin performansını artırmak için de önemli bilgiler sağlar. Faraday yasası bu bağlamda, elektrokimyasal süreçlerde enerji ve madde ilişkisinin kavranmasına olanak tanıyarak elektroliz süreçlerini bilimsel bir temele oturmaktadır.

Elektronik bileşen ünitesi için kullanılan güç kaynağı cihazın kontrol mekanizmalarını, sensörlerini ve diğer elektronik bileşenlerini desteklemek üzere diğer güç kaynağından ayrılmıştır. Güç kaynağının gerilimi (V_2) 24 V ve akımı (I_2) 20 A değerindedir. Elektronik bileşen ünitesi için kullanılan güç kaynağının bağımsız bir şekilde yapılandırılması, cihazın farklı bileşenlerinin enerji ihtiyaçlarını optimize etmeye yardımcı olarak sistem genelinde enerji dağıtımını daha etkin hale getirmektedir.

Elektroliz esnasında hidrojen reaktörünün güç kaynağından çektiği akım, sağlanan gerilim değerleri ve üretilen hidrojen miktarı gibi kritik veriler, sistemin performans değerlendirmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Cihazın elektronik bileşenlerine ait bilgiler Çizelge 5.6’da verilmiştir. Bu çizelgeye göre elektronik bileşenlerin harcadığı güç Denklem 5.22’de verilmiştir.

Çizelge 5. 6. Elektronik bileşenlerin güç değerleri

Elektronik Bileşenler	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç (W)	Adet
1214C DC/DC/DC PLC	24	0.58	14	1
KP300 BASIC HMI	24	0.125	3	1
Selenoid Valf	24	0.15	3.6	4
Sıvı Seviye Algılama Sensörü	24	0.15	3.6	3
Basınç Sensörü	24	0.15	3.6	1
Sirkülasyon Pompası	24	2	48	3

$$P_{Bileşen} = P_{PLC} + P_{HMI} + P_{Valf} + P_{Sıvı Seviye} + P_{Basınç} + P_{Pompa} \quad (5.22)$$

Bu denkleme göre elektronik bileşenlerin harcadığı güç ($P_{Bileşen}$) 189,8 W olarak hesaplanmıştır.

Cihazın Saatlik Tüketiminin Benzin Eşdeğerinin Hesaplanması

Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı için gereken toplam güç hesabı Şekil 5.1’deki kayıplar ve diğer bileşenler dikkate alınarak yapılmıştır. Cihazın çalışma esnasında harcadığı gücün ortaya çıkarılması, enerji maliyeti hesabı açısından oldukça önemlidir. Cihazın verimli şekilde çalışabilmesi için harcanan gücün hesabına bağlı olarak gerekli iyileştirmeler yapılabilir.

Cihazın çalışma esnasında harcadığı toplam gücü ($P_{Harcanan}$) Denklem 5.23’de verilmiştir.

$$P_{Harcanan} = P_{Elektroliz} + P_{Bileşen} \quad (5.23)$$

Sistemin toplam elektrik maliyeti, sistemin toplam güç tüketimi ve elektrik birim fiyatı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama harcanan güç miktarının (1443,8W), birim fiyat ile çarpılmasıyla yapılmaktadır. Böylece cihazın harcadığı saatlik elektrik maliyeti belirlenebilmektedir. Bu ilişkiye ait Denklem 5.24’de verilmiştir.

$$\text{Elektrik Maliyeti} = P_{\text{Harcanan}} * \text{Elektrik Birim Fiyatı} * \text{Saat} \quad (5.24)$$

Elektriğin güncel 1KWh fiyatı 3,11 TL, 1litre benzin fiyatı ise yaklaşık olarak 40 TL’dir. Bu denkleme göre cihazın saatlik elektrik tüketimi 4,49 TL olarak hesaplanmıştır.

1 litre benzinin enerji yoğunluğu yaklaşık 44 MJ/L olarak kabul edilir. 1 MJ ise 0,2778 kWh’dır. Dolayısıyla 1 litre benzinin enerji içeriği 12,2232 kWh / L’dir. Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı 1,4438 kW enerji için gereken benzin miktarı, Denklem 5.25’de verilmiştir.

$$\text{Benzin miktarı} = P_{\text{Harcanan}} / \text{Benzin enerji içeriği} \quad (5.25)$$

Bu denkleme göre benzin miktarı $\cong$ 0,118 L olarak hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalar doğrultusunda Ev Tipi Atık Su Hidrojen Dönüşüm Cihazı’nın saatlik 1,4438 kW enerji tüketimi, 0,118 litre benzine eşdeğerdir.

Bu enerji için elektrik maliyeti 4,49 TL iken, aynı miktarda enerji sağlamak için gereken benzin maliyeti yaklaşık 4,72 TL’dir.

Hesaplamalarda görüldüğü gibi elektroliz sürecinde ortaya çıkan kayıplar cihazın tüketim değerlerini doğrudan etkilemektedir. Cihazın hidrojen reaktörünün iyileştirilmesi, elektrotların kayıpları minimuma indirecek bileşenlerle kaplanması ve elektrolit sıvısının elektriksel iletkenliğinin doğa dostu kimyasal uygulamalarla maksimum seviyelere taşınması verimi daha yüksek seviyelere çekilebilir. Ayrıca elektroliz hücresini oluşturan hidrojen reaktörünün PEM hücre ile değiştirilmesi cihazın performansını olumlu yönde etkileyebilir. Son dönemlerde fosil yakıtların birim maliyetlerinin artması hidrojenin yüksek maliyetli kurulum, depolama ve üretim dezavantajını ortadan kaldırabilir.

6. SONUÇ

Alkali elektroliz yöntemi ile üretilen hidrojenin, tasarlanan hidrojen reaktörü ve diğer bileşenlerle otomatik hale dönüşümü sağlanmıştır. PLC ve diğer elektronik ekipmanlarla cihazın otomatik hale getirilmesi, üretilen hidrojenin daha verimli ve sürekli hale gelmesine olanak sağlamıştır. Yapılan kimyasal analizlerle farklı özellikteki elektrolit sıvıların elektriksel iletkenlikleri, PH seviyeleri ve yoğunlukları belirlenmiştir. Atık suların girdi ve çıktı değerleri arasında belirgin farklar bulunmaktadır. Referans alınan çamaşır makinası atık suyunun pH seviyesi 9,87 iken elektroliz sonrasında 12,27'ye yükselmiştir. İletkenlik seviyesi ise 1,9082 S/m 'den 1,5558 S/m seviyesine inmiştir. Diğer elektrolit sıvılar için de benzer durumlar söz konusudur.

Ev Tipi Hidrojen Dönüşüm Cihazı'nın tüm bileşenleri ile birlikte 1,4438 kWh güç tükettiği belirlenmiştir. Tüketilen güç içerisinde kayıplar da hesaba katılmıştır. Elektroliz esnasında meydana gelen ohmik kayıplar %7,47 ve kutuplanma kayıpları %0,71 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca hidrojen reaktörü sirkülasyon mekanizmasına bağlanarak ortaya çıkabilecek ısı kayıplarının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Elektrolit sıvının elektroliz esnasında hareket ettirilmesi sağlanarak doğal soğutma sistemi oluşturulmuştur.

Cihazın elektrik tüketimi benzin eşdeğeriyle kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamada saatlik hidrojen üretimi için cihazın 4,49 TL harcadığı belirlenmiştir. Eşdeğer benzin kullanımı için bu tutar 4,72 TL'ye denk gelmektedir.

Fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması ve sürekli artan fiyatları göz önüne alındığında Ev Tipi Hidrojen Dönüşüm Cihazı ve tasarlanacak cihazların geçmişe göre oldukça avantajlı olabileceği öngörülebilir.

Ayrıca elektroliz sonunda ortaya çıkan atık suların pH, iletkenlik ve yoğunluk seviyeleri incelenerek geri dönüşümü sağlanabilir. Bu bağlamda atık suların tarım ve kullanılabilir diğer alanlarda değerlendirilmesiyle su kaynaklarının verimli kullanılması anlamında çalışmalar yapılabilir.

Daha sonraki çalışma döneminde hidrojen reaktörünün geliştirilmesi, farklı jeneratör tiplerinin makinaya entegrasyonu ve reaktörün endüstriyel anlamda dayanıklılığının yüksek düzeylere çıkarılması anlamında araştırmalar yapılabilir. Elektroliz sürecinin yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenmesi birim maliyeti oldukça makul seviyelere çekebilir. Özellikle üretim fazlası enerjinin, hidrojen formunda tekrar enerjiye dönüştürülmesi cihazının enerji sistemini destekleyecek seviyelere ulaşmasına olanak sağlayabilir.

7. KAYNAKÇA

- Akdağ, A., & Güllü, G. (2024). Net zero carbon emissions and the role of synthetic carbon in sustainable energy solutions. *İzmir Journal of Economics*.
- Aktan, M. (2022). Kömür Gazlaştırmanın Türkiye Açısından Stratejik Önemi. *DergiPark*.
- Al-Qahtani, M. e. (2021). Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. *Appl Energy*, 236:114040.
- Altan, M. (1996). Hidrojenin zeolitlerde depolanması. Eskişehir: Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- AlZahrani, A. A. (2017). Thermodynamic and electrochemical analyses of a solid oxide electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 21404-21413.
- AlZohbi, G. (2024). An Overview of Hydrogen Energy Generation. *ChemEngineering*, 8(1), 17.
- Ankaralı, A. (2024). Hidrojen enerjisi ve hidrojen pilleri. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- Arya, R. K. (2012). Photoelectrochemical Hydrogen Production Using Visible Light. *International Journal Of Renewable Energy Research*, 2(2), 289-294.
- Asal, Ş., & Acır, A. (2021). Kükürt-İyot Döngüsü ile Termokimyasal Yöntemle Hidrojen Üretimi. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 609-617. <https://doi.org/10.23399/politeknik.822206> adresinden alındı
- Ata, A. (2005). 21. Yüzyılın Enerjisi Hidrojen Enerji Sistemi. 24. Enerji Verimliliği Konferansı.
- Avcı, A. C. (2018). Alkali elektrolizde hidrojen üretiminin kütle transfer teorisi ile incelenmesi. Düzce: Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi.
- Balat, M., & Kırtay, E. (2010). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Olarak Biyokütle. *International Journal of Energy Research*, 34(9), 1068-1080.
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (1983). *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. Surf.Technol, (Cilt 20).
- Blanco-Cocom, L., Botello-Rionda, S., Ordoñez, L. C., & Valdez, S. I. (2022). A self-validating method via the unification of multiple models for consistent parameter identification in PEM fuel cells. *Energies*. 15(3), 885.
- Boyano, A., Blanco-Marigorta, A. M., Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2012). Steam Methane Reforming System for Hydrogen Production: Advanced Exergetic Analysis. *International Journal of Thermodynamics*, 5(1), 1-19.
- Cheng, H. M., Fan, Y. Y., Liu, C., Cong, H. T., & Dresselhaus, M. S. (1999). Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes at room temperature. *Science*, 286(5442), 1127-1129.
- Cherbanski, R., & Molga, E. (2018). Sorption-enhanced steam methane reforming (SE-SMR): A review. *Chemical Process Engineering*, 39(4), 427-448.
- Choobar, B. G., Shahmirzadi, M. A., Kargari, A., & Manouchehri, M. (2019). Fouling mechanism identification and analysis in microfiltration of laundry wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 103030.
- Coşkun Avcı, A. (2014). Endüstriyel Atık Isılardan Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretiminin Araştırılması. Düzce: Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Çorumlu, V., & Öztürk, M. (2020). Hidrojen Üretimi için Üç Adımlı Cu-Cl Termokimyasal Sistemin Enerji ve Ekserji Analizi. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 7(1), 79-92. <https://doi.org/10.31202/ecjse.585881> adresinden alındı

- Çuhadaroglu, H. (2005). Hidrojen enerjisi ve yakıt hücreleri teknolojisi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: an overview. *Int J Hydrog Energy*, 45:3847–3869.
- Dębowski, M. D., Zieliński, M., Nowicka, A., & Kazimierowicz, J. (2021). Microalgal Hydrogen Production in Relation to Other Biomass-Based Technologies. *Energies*.
- Demir, H. (2022). Electric vehicles and energy storage analysis. *DergiPark*.
- DhahirTaher, J. S. (2020). Effect of silver nanoparticles on some physical and biological properties of fluid denture base material. (*Cilt 4(1):27–40*). *Al-Kitab J Pure Sci*.
- Dong, C., Setiabudi, H. D., Prasertcharoensuk, T., & Zhao, Y. (2017). Sürdürülebilir Biyokütle Üretim Yöntemleri. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 5(1), 16-34.
- Doumbia, M. L. (2014). New fuzzy logic based management strategy to improve hydrogen production from hybrid wind power systems. *International Journal Of Renewable Energy Research*, 4(3), 731-742.
- Dönmez, F., & Ayas, N. (2021). Sodyum Borhidrürün Hidrolizinde Karbon Nanotüp Destekli Katalizörlerin Kullanımı. 14. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi Bildirileri.
- Durandurdu, M. (2014). New High-Pressure Phase of MgH_2 : An Ab Initio Constant-Pressure Study. *EPL (Europhysics Letters)*, 105, 46001.
- Dursun, N., & Gülşen, H. (2019). Biyohidrojen Üretim Yöntemleri ve Biyohidrojen Üretiminde Biyoreaktörlerin Kullanımı. *Journal of the Institute of Science and Technology*.
- Erucar, İ., & Gülçay, E. (2020). Computational Screening of Covalent Organic Frameworks for Hydrogen Storage. *Journal of the Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry*, 7(1), 65-76.
- Fakhimi, N. e. (2020). Algae-Bacteria Consortia as a Strategy to Enhance H_2 Production. *Cells*.
- Felseghi, R. A., Carcadea, E., Raboaca, M. S., Trufin, C. N., & Filote, C. (2019). Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications. *Energies*, 12(3), 4593.
- Frost, H., Düren, T., & Snurr, R. Q. (2006). Effects of Surface Area, Free Volume, and Heat of Adsorption on Hydrogen Uptake in Metal–Organic Frameworks. *Journal of Physical Chemistry B*, 110(19), 9565–9570. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp060433+> adresinden alındı
- Genç, N. (2009). Biyolojik hidrojen üretim prosesleri. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- Gielen, D., Taibi, E., & Miranda, R. (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Gördelsel, M., Zıraman, D., Doğan, Ö. M., & Uysal, B. (2022). Çan Linyitinden Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretiminde Çeşitli Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 10(3), 234-246.
- Grigoriev, S. A., Fateev, V. N., Bessarabov, D. G., & Millet, P. (2020). Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26036-26058.
- Guo, Y., Li, G., Zhou, J., & Liu, Y. (2019). Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 371, 042022.

- Güngör, A., Aksoy, E., Yaka, I. F., & Koçer, A. (2022). Energy and Exergy Analysis of Hydrogen Production on Co-Gasification of Municipal Solid Waste and Coal. *European Journal of Technique*, 12(2), 156-160.
- Güvendiren, M., & Öztürk, T. (2020). Enerji kaynağı olarak hidrojen ve hidrojen depolama. *DergiPark*.
- Hakeem, O. O., Yakubu, S., & Yahaya, Y. (2019). Treatment of Domestic Laundry Waste-Water With Analar Grade Activated Charcoal and Adsorption Models With Two (Langmuir & Freundlich) and Three (Elovich) Parameters Isotherms. *International Journal Of All Research Writings*, 2(6), 31-38.
- Harvego, E. A., McKellar, M. G., O'Brien, J. E., & Herring, J. S. (2009). Parametric evaluation of large-scale high-temperature electrolysis hydrogen production using different advanced nuclear reactor heat sources. *Nuclear Engineering and Design*, 239(7), 1571-1580.
- Hernández-Pacheco, E., Singh, D., Hutton, P. N., Patel, N., & Mann, M. D. (2004). A macro-level model for determining the performance characteristics of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 138(1-2), 174-186.
- Hirscher, M., Yartys, V. A., Baricco, M., von Colbe, J. B., Blanchard, D., Bowman Jr, R. C., & Zlotea, C. (2020). aterials for hydrogen-based energy storage–past, recent progress and future outlook. *Journal of Alloys and Compounds*, 827, 153548.
- Huang, P. H., & Kuo, J. K. (2016). Applying small wind turbines and a photovoltaic system to facilitate electrolysis hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(1), 51-63.
- İlbaş, M., & Karyeyen, S. (2017). Hydrogen-rich syngas production from coal gasification and its environmental impacts. *Energy Policy Turkey*.
- International Energy Agency. (2023). Global hydrogen review 2023. Paris: IEA. Retrieved from. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023> adresinden alındı
- Javed, M. e. (2023). BioH2 Production Using Microalgae: Highlights on Recent Advancements. *Water*.
- Kademli, M. (2017). Hidrojen Teknolojisi, Potansiyeli ve Geleceği. *Mesleki Bilimler Dergisi*.
- Karakus, N. (2015). alova ili Armutlu ilçesinde şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen hibrit enerji sisteminin teknik ve ekonomik modellenmesi. *Yalova: Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi*.
- Karanasios, K. A., Michailides, M. K., Vasiliadou, I. A., Pavlou, S., & Vayenas, D. V. (2011). Potable water hydrogenotrophic denitrification in packed-bed bioreactors coupled with a solar-electrolysis hydrogen production system. *Desalination and Water Treatment*, 33(1), 86-96.
- Kayfeci, M., Bedir, F., & Kurt, H. (2014). Metal Hıdrür Esaslı Hidrojen Depolama Parametrelerine Reaktör Dizaynı ve Hidrojen Şarj Basıncı Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 34(2), 83-90.
- Kazempoor, P., & Braun, R. J. (2015). Hydrogen and synthetic fuel production using high temperature solid oxide electrolysis cells (SOECs). *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(10), 3599-3612.
- Koca, A. (1998). Hidrojenin üretimi ve yakıt olarak kullanımı.
- Koşar, C. (2021). Hidrojen Depolama Yöntemleri. *Open Journal of Nano.*, 6(1), 1-10.
- Kudo, A., & Miseki, Y. (2009). Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 253-278.

- Kukkapalli, V. K., Kim, S., & Thomas, S. A. (2023). Thermal Management Techniques in Metal Hydrides for Hydrogen Storage Applications: A Review. *Energies*, 16(8), 3444.
- Küçükdeveci, N. (2018). arj Edilebilir Nikel-Metal Hidrür (Ni-MH) Pillerinde Kullanılan Hidrojen Depolama Alaşımlarındaki Son Gelişmeler. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 454-472.
- Kütük, E. (2011). Yakıt pillerinde kullanılan bipolar plakaların hesaplamalı akışkan analizi. *Koceli: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*.
- Lade, O., & Gbagba, Z. (2018). Sustainable water supply: Potential of recycling laundry wastewater for domestic use. *Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences*. 4(2), 52-60.
- Levikhin, A. A., & Boryaev, A. A. (2024). Physical properties and thermodynamic characteristics of hydrogen. *Heliyon*, 10, 36414.
- Li, H., Guo, J., Li, Z., & Wang, J. (2023). Research Progress of Hydrogen Production Technology and Related Catalysts by Electrolysis of Water. *Molecules*, 28(5010).
- Logan, B. E., Call, D., Cheng, S. A., Hamelers, H. V., Sleutels, T. H., Jeremiasse, A. W., & Rozendal, R. A. (2008). Microbial Electrolysis Cells for High Yield Hydrogen Gas Production from Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, 42(23), 8630-8636.
- Modisha, M., Pan, L., & Von Colbe, J. M. (2019). Hidrojen depolama üzerine. *Dergipark*.
- Mokheimer, E., Hussain, M. I., Ahmed, S., Habib, M. A., & Al-Qutub, A. (2015). On the modeling of steam methane reforming. *Journal of Energy Resources Technology*, 137(1), 012001.
- Mutlubaş, H., & Özdemir, Z. Ö. (2019). Hydrogen as an Energy Carrier and Hydrogen Production Methods. *Bartın Üniversitesi Uluslararası Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 16-34.
- Mutlubaş, H., & Özdemir, Z. Ö. (2023). Hidrojenin Kullanım Alanları ve Hidrojen Ekonomisi. *Yekarum*, 8(1), 20-31.
- Nacar, S., & Öncü, S. (2022). nduction Heated Metal Hydride Tube for Hydrogen Storage System. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(5), 676-680.
- Norouzi, N. (2021). An Overview on the renewable hydrogen market. *International Journal of Energy Studies*, 6(1), 67-94.
- Okamoto, S., Inaba, K., Iida, T., Ishihara, H., Ichikawa, S., & Ashida, M. (2014). Hollow Glass Microspheres for Hydrogen Storage. *Scientific Reports*, 4, 5186.
- Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. A., & Rooney, D. W. (2022). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-36.
- Özekicioğlu, H. (2008). Hidrojen enerjisi ve yakıt hücreleri teknolojisi. *İstanbul: İstanbul Üniversitesi*.
- Özgür, C., & Mert, M. E. (2023). Yanıt Yüzey Metodu Analizi: Alkali Elektroliz ile Hidrojen Gazı Üretimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(2), 451-462.
- Öztürk, H., & Kürkçü, C. (2018). MgH₂'nin Yapısal ve Elektronik Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(4), 457-462.
- Polat, T., Yalçın, A., & Şahin, H. (2012). Hidrojenin Nükleer Enerji ile Üretim Yollarının İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 49-69.
- Prasertcharoensuk, T., Setiabudi, H. D., & Zhao, Y. (2019). Hidrojen Üretiminde Termokimyasal Yöntemler. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 134-145.

- Qazi, U. Y. (2022). Future of hydrogen as an alternative fuel for next-generation industrial applications; challenges and expected opportunities. *Energies*, 15(3), 4741.
- Rashid, M. M., Al Mesfer, M. K., Naseem, H., & Danish, M. (2015). Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 4(3), 80-89.
- Razmi, A. R., Sharifi, S., Vafaeenezhad, S., Hanifi, A. R., & Shahbakhti, M. (2024). Modeling and microstructural study of anode-supported solid oxide fuel cells: Experimental and thermodynamic analyses. *International journal of hydrogen energy*, 54, 613-634.
- Righini, G. C. (2018). Glassy microspheres for energy applications. *Micromachines*, 9(8), 379.
- Ros, C. A., & Morante, J. R. (2020). Photoelectrochemical water splitting: A road from stable metal oxides to protected thin film solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*.
- Sankir, M., & Sankir, N. D. (2017). *Hydrogen production technologies*. John Wiley & Sons.
- Saur, G., & Ramsden, T. (2011). Wind Electrolysis: Hydrogen Cost Optimization. NREL Technical No. NREL/TP-5600-50408,. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA. <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/50408.pdf> adresinden alındı
- Seçer, M., Güven, H., & Yılmaz, E. (2018). Hidrojen Üretimi için Biyokütle Gazlaştırma Yöntemleri. *International Journal of Energy Research*, 22(4), 301-315.
- Setiabudi, H. D., Zhao, Y., & Prasertcharoensuk, T. (2020). Termokimyasal Yöntemlerle Hidrojen Üretimi: Biyokütle Kaynaklarının Sürdürülebilir Kullanımı. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 542-550.
- She, L., Zhang, W., Gao, B., Zhang, H., Cheng, J., Zhou, B., & Jia, F. (2024). One-step treatment of Cr (III) complexes wastewater using a P-doped Ti₄O₇ anode in a compact flow electrolysis device. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155683.
- Soltani, M. (2023). Techno-economic optimization of a biomass gasification energy system for hydrogen fuel and electricity production. *Fuel*.
- Spath, P. L., & Mann, M. K. (2000). Life cycle assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming (No. NREL/TP-570-27637). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Sun, H., Ren, J., Li, F., Cheng, M., & Wang, Z. (2021). Research on the full-load joint regulation strategy of coal-fired generating units and electrolyzed hydrogen production. *Journal of Physics: Conference Series*, 2087(012023). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2087/1/012023> adresinden alındı
- Şenaktaş, B. (2005). *Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları*. Denizli: Pamukkale Üniversitesi.
- Şentürk, G., & Büyükgüngör, H. (2010). Biyohidrojen üretim yöntemleri ve kullanılan farklı atık materyallerin incelenmesi. *J. Eng. Nat. Sci.*, 28(362), 369–395.
- Taşkolu, H., & Acır, A. (2019). LIFE Füzyon Reaktöründe Yüksek Sıcaklıkta Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(3), 451-460.
- Tezcan, F., & Kahya Düdükçü, M. (2023). otoelektrokimyasal Yolla Hidrojen Gazı Üretiminde Kullanılan BiVO₄/Cr₂O₃ Fotoelektrodunun RuO₂ ile Katalitik Etkinliğinin Artırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(3), 2183-2200. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1171180> adresinden alındı

- Turkay, O., Barışçı, S., & Sillanpää, M. (2017). E-peroxone process for the treatment of laundry wastewater: A case study. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(5), 4282-4290.
- Tutar, F., & Eren, M. (2011). Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi ve Türkiye. *International Journal of Economics and Administrative Studies*, 298-305.
- Tutar, F., & Eren, M. (2023). Hydrogen-Based Energy and Turkey. *International Journal of Afro-Eurasian Research*, 8(15), 29-47.
- Türk, S., & Engin, Y. (2024). Hidrojenin kullanım potansiyeli.
- Ulusoy, I. (2005). Hidrojen enerjisi teknolojilerinin bugünü. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Uzun, E. (2018). Calculation of Cutting Lines of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 117-127.
- Vidas, L., & Castro, R. (2021). Recent developments on hydrogen production technologies: State-of-the-art review with a focus on green-electrolysis. *Applied Sciences*, 11(23), 11363.
- Wang, M., Yang, S., Tang, Z., & Ju, L. (2024). Sc-Modified C3N4 Nanotubes for High-Capacity Hydrogen Storage: A Theoretical Prediction. *Molecules*, 29(9), 1966.
- www.kiwa.com. (2023). <https://www.kiwa.com/nl/en/themes/renewable-energy-transition/hydrogen/news/> adresinden alındı
- Xie, Z., Jin, Q., Su, G., & Lu, W. (2024). A Review of Hydrogen Storage and Transportation: Progresses and Challenges. *Energies*, 17(16), 4070.
- Xue, F., Su, J., Li, P., & Zhang, Y. (2021). Application of Proton Exchange Membrane Electrolysis of Water Hydrogen Production Technology in Power Plant. *OP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 631(012079). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/631/1/012079> adresinden alındı
- Yıldırım, A. E., Kaplan, E. B., & Khanayev, A. (2023). HYDROGEN-BASED ENERGY AND TURKEY. *Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi*, 8(15), 29-47.
- Yıldırım, B., Figen, A. K., & Karakılçık, M. (2024). Hidrojen Üretim Yöntemleri. *Mühendis ve Makina Güncel*, 3(87), 19-30.
- Yılmaz, A., Demir, B., & Kaya, F. (2023). Geothermal energy based hydrogen energy storage and charging station system. *DergiPark*.
- Yılmaz, C. (2011). Jeotermal enerjinin hidrojen üretimi ve sıvılaştırılmasında kullanımı.
- Yılmaz, M. S., Rida T, M., & Ozhan, D. (2023). Meeting the Charging Station Energy Needs Using Hybrid Energy Systems at Batman University West Raman Campus:.
- Yuzer, B., Selcuk, H., Chehade, G., Demir, M. E., & Dincer, I. (2019). Evaluation of Hydrogen Production via Electrolysis with Ion Exchange Membranes. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116420> adresinden alındı
- Zhou, H., Li, S., Wang, H., Xu, C., Tang, X., & Zhou, J. (2023). Modelling and Simulation of Photovoltaic Coupling Water Electrolysis Hydrogen Production System. *Southern Energy Construction*, 10(3). <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011> adresinden alındı

8. ÖZGEÇMİŞ

