



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GÜNEŞ ENERJİSİ (PV) DESTEKLİ
HİDROJEN ÜRETİMİ VE HİDROJEN YAKIT
PİLİNDE KULLANILMASI ÜZERİNE BİR
ARAŞTIRMA**

Sajed ZENDEHDEL SHEKARDASHT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2016
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

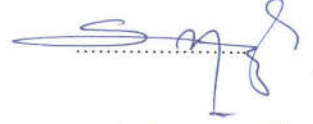
TEZ KABUL VE ONAYI

Sajed ZENDEHDEL SHEKARDASHT tarafından hazırlanan "GÜNEŞ ENERJİSİ (PV) DESTEKLİ HİDROJEN ÜRETİMİ VE HİDROJEN YAKIT PİLİNDE KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA" adlı tez çalışması 27/05/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan
Prof. Dr. Şefik BİLİR



Danışman
Yrd. Doç. Dr. Ali ATEŞ



Üye
Yrd. Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN



Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.



Prof. Dr. Aşrı GENÇ
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Sajed ZENDEHDEL SHEKARDASHT
Tarih: 27/05/2016

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ ENERJİSİ (PV) DESTEKLİ HİDROJEN ÜRETİMİ VE HİDROJEN YAKIT PİLİNDE KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Sajed ZENDEHDEL SHEKARDASHT

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ali ATEŞ

2016, 94 Sayfa

Jüri

Yrd. Doç. Dr. Ali ATEŞ

Prof. Dr. Şefik BİLİR

Yrd. Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN

Hidrojen, temiz, çevre dostu, depolanabilir ve taşınabilir özellikleri ile fosil yakıtlara iyi bir alternatif olabilir. Hidrojen tabiiatta bol miktarlarda olmasına rağmen büyük çoğunlukla bileşikler halinde bulunur. Bu haliyle de yakıt olarak kullanılamaz. Tabiiatta bol miktarda bulunan sudan elektroliz yoluyla hidrojen üretilebilir. Sudan hidrojen üretmek yönünde elektroliz yönteminin kullanması küçük ölçeklerden yüksek kapasitelere kadar etkili bir yöntemdir.

Bu çalışmada, fotovoltaiiklerden elde edilen elektrik enerjisi kullanılarak sudan elktroliz yöntemi ile elde edilen hidrojenin bir yakıt pilinde kullanılması ile tekrar enerjiye dönüştürülmesine yönelik sistemin matematik modellemesi ve sayısal analizi yapılmıştır. PV panelleri aracılığı ile elde edilen elektrik enerjisi suyun elektrolizi işleminde kullanılmaktadır. Elektrolizörden çıkan hidrojen depolanmakta ve ihtiyaç halinde bir hidrojen yakıt pilinde kullanılarak tekrar enerjiye dönüştürülmektedir. Hesaplamalarda Konyanın geçmiş yıllara ait meteorolojik verilerinin aylık ortalaması esas alınmıştır. Oluşturulan matematik model doğrultusunda MATLAB programlama dili ve onun yardımcı yazılımı olan SIMULINK paket programı aracılığı ile problemin iki aşamada çözümü gerçekleştirilmiştir. PV güneş panellerinden elde edilen enerji ile suyun elektrolizi birinci aşamadır. İkinci aşamada ise elde edilen hidrojenin PEM yakıt pilinde enerjiye dönüştürülmesi modellenerek sayısal olarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, benzer konularda daha önce yapılmış olan bazı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hem elektroliz yöntemi ile hidrojen eldesi için hem de yakıt pili için bulunan sonuçlar benzer çalışmalardan elde edilen sonuçlarla gayet iyi bir uyum içerisindedir. Yakıt hücresinden elde edilen enerji yoğunluğu; giren hidrojen miktarı, hücre mebranının kalitesi ve hücre basıncı ile yakından ilişkilidir. Elektrolizörden elde edilen hidrojen miktarında ise sıcaklığın önemli bir parametre olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen üretimi, Suyun elektrolizi, PEM yakıt pili, PV güneş panelleri, Solar hücreler.

ABSTRACT

MS THESIS

AN INVESTIGATION ON GENERATION OF SOLAR POWERED (PV) AND APPLICATIONS IN HYDROGEN FULE CELLS.

Sajed ZENDEHDEL SHEKARDASHT

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Asst.Prof.Dr. Ali ATEŞ

2016, 94 Pages

Jury

Asst.Prof.Dr. Ali ATEŞ

Prof. Dr. Şefik BİLİR

Asst.Prof.Dr. Dilek Nur Özen

Clean, environmental friendly, storable and transferrable hydrogen can be a good alternative to fossil fuels due to its mentioned properties. Hydrogen is mostly existed in compounds though it is abundant in nature. It can't be utilized as fuel in this form. Hydrogen can be generated through electrolysis of water which is abundant in nature too. Utilization of electrolysis in hydrogen generation from water is an effective method for a wide range of capacities from small scales to large scales.

In this work, mathematical modeling and numerical analysis of a system dealing with re-conversion of the hydrogen generated via water electrolysis using electrical energy obtained from photovoltaics to energy by means of a fuel cell. The electrical energy obtained via PV panels is used in electrolysis of water. The hydrogen generated by the electrolyzer is stored and re-converted in to electrical energy through a hydrogen fuel cell in case of a necessity. Monthly averages of the past years meteorological data of Konya was grounded on in the calculations. Problem was solved in two phases according to the formed mathematical model by the help of MATLAB coding language and its auxiliary software SIMULINK. Electrolysis of water with the energy coming from PV solar panels is the first phase. At the second phase in the other hand, converting obtained hydrogen into energy in PEM fuel cell was modeled and computationally solved. Attained results were compared to the results of some previous experimental studies. Acquired results of the present study are in accordance with the results obtained in similar work in respect of both hydrogen generation via the electrolysis method and fuel cell. The energy intensity attained from the fuel cell is closely related to the hydrogen input amount, quality of cell membrane and cell pressure. Temperature was seen as an important parameter for generated hydrogen amount by means of the electrolyzer.

Keywords: Hydrogen production, PEM fuel cell, PV solar panels, Solar cells, Water electrolysis.

ÖNSÖZ

Günümüzde mühendislik çözümleri için tek kaygımız sistem gücü ve kapasitesi değildir. Bunlara ilaveten kullanılan enerji kaynaklarının sonlu olması, kullandığımız sistemlerin atıklarının yaşamımız için gerekli olan şartları tehdit etmeye başlamaları ve yaşam biçimimizin sürdürülemez biçimde dünyaya zarar vermesi konuları karşımıza çıkmaktadır. İnsanlığın büyük bölümü bu gerçeklere kulak tıkamakta ve günlük telaşeler içerisinde bahsedilen konular için bir çözüm üretmeden yaşamaktadır. Farkındalık yaratmak için yapılan yayınlar artık bir efsaneyi veya masalı andırmakta ve işe yaramamaktadır. Bu noktada geriye tek kalan çözüm yasal zorunluluklardır. Ülkeler düzenli olarak toplantılar düzenlemekte, yasal zorunluluklar için prensip kararları almakta ve yasal düzenlemeleri teşvik etmektedir. Ülke içerisinde de yasal düzenlemelerdeki sınırlar yıldan yıla arttırılmakta, sınırların arttırılmadığı durumlarda ekonomik teşvikler uygulanmaktadır. Bu noktada bilim insanları hem tespit, hem planlama hem de çözüm üretme konularında önem arz etmektedir. Bir çok bilimsel gelişme ilk zamanlarında ekonomik fayda sağlamadığı için denenme ve değerlendirilmeleri bilim insanları tarafından yapılmaktadır.

Bu çalışmada da yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi, enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, elektrik üretim sistemi olarak Fotovoltaik paneller ve yakıt hücresi konuları teorik olarak ele alınmıştır. Deneysel inceleme öncesi önemli değerlendirmeler sunulmuştur ve bu haliyle bilim dünyasına ve insanlığa faydalı olması beklenmektedir.

Çalışmalarım süresince bana yol gösteren, her konuda ilgisini ve desteğini esirgemeyip yardımcı olan çok değerli danışmanım Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Ali ATEŞ, yaptığı yorumlar ve bilimsel açıklamalarla benim bu alanda bilgilenmemi sağlamıştır. Bu bağlamda değerli hocama sonsuz teşekkür ediyorum, bundan sonraki çalışmalarda da beraber ve birlikte olmayı temenni ediyorum.

Sajed ZENDEHDEL SHEKARDASHT
KONYA-2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Hidrojen Nedir?	2
1.1.1. Hidrojenin Kısaca Tarihiçesi	3
1.1.2. Hidrojenin Özellikleri	3
1.2. Alternatiflerine göre hidrojenin değerlendirilmesi	6
1.3. Hidrojenin Üretimi	8
1.4. Enerji taşıyıcı olarak hidrojenin muhafaza edilmesi ve yönetilmesi	9
1.4.1. Hidrojenin basınçlı gaz olarak depolanması:	10
1.5. Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanılması	11
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	13
3. TEORİK ÇALIŞMA	16
3.1 Suyun Elektrolizi.....	16
3.1.1. Suyun Elektrolizi İçin Gerekli Bileşenler	21
3.1.1.1 Elektroliz için sıvı iletkenlik katkıları	21
3.1.1.2 Anot ve Katot Uçlar	22
3.1.1.3 Ayırıcılar	22
3.2 Güneş Enerjisi	23
3.2.1 Türkiye ve Güneş Enerjisi.....	23
3.2.2 Güneş Enerjisi Uygulamaları	24
3.2.2.1 Fotovoltaik (PV) Sistemler	25
3.2.2.2 Fotovoltaik Yapımında Kullanılan Malzemeler	26
3.2.2.3 Fotovoltaik sisteminin avantajları	27
3.2.3 Türkiye’de (PV) Sistemler	27
3.2.4 PV Sistemi Ana Bileşenleri	27
3.2.5.1 Fotovoltaik Panel Ve Çeşitleri	27
3.2.5.2 Solar Kontrol Cihazı, Şarj düzenleyici:	28
3.2.5.3 Depolama Grubu (Batarya Bank ya da Akümülatör)	28
3.2.6 Güneş Enerjisinden Hidrojen Üretimi	29
3.3 Hidrojenin Fotovoltaik Sistemlerden Ve Elektroliz Yöntemi İle Üretimi	29
3.4 Hidrojen Yakıt Pilleri.....	30
3.4.1 Hidrojen Yakıt Pillerin Çeşitleri	31
3.4.1.1 Proton Değişken Zarlı Yakıt Piller (PEM)	31
3.5 PV Paneller Aracılığı ile Elde Edilen Akımdan Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi	33

3.6 MATLAB – SIMULINK	34
3.6.1 Simulink Uygulamanın Temel Kavramları.....	35
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	37
4.1. Matematik Model Oluşturma Çalışmaları	38
4.1.1. Fotovoltaik sistemin enerji dönüşümü.....	38
4.1.2. Elektrolizöre Giren Enerji:.....	39
4.1.3. Güç Regülatörü	40
4.1.4. Şarj Denetleyicisi	41
4.1.6. Üretilen Hidrojen Miktarı:	41
4.1.7. Yakıt Pili Modeli İçin Gerekli Bağlıntılar	42
4.1.7. Elektrik Kontrol Ünitesi (ECU).....	48
4.2. Sistemin Simülasyonu.....	49
4.2.1. Güneş Kollektörü	50
4.2.2 Güç Regülatörü	51
4.2.3 Elektrolizör Bölümü	52
4.2.4 Şarj Denetleyicisi	53
4.2.5 Hidrojen Üretimi.....	54
4.2.6. Akümülatör	55
4.2.7. PEM Yakıt Pili.....	56
4.2.8. Elektrik Kontrol Ünitesi (ECU) Bölümü	57
4.2.8.1 ECU Bölümündeki Elektrik Dağılımı.....	58
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	60
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
6.1 Sonuçlar	75
6.2. Öneriler	77
KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Hidrojenin üretim ve tüketiminin basamakları	9
Şekil 3.1. Kabın içindeki elektroliz tepkimesi	18
Şekil 3.2. pH potansiyel değişimi (Petrucci, 2002)	19
Şekil 3.3. Suyun elektrolizi için ideal çalışma koşulları (McAuliffe, 1980).....	20
Şekil 3.4. Yıllık Güneş Işıma Değerleri (kWh/m ²)	24
Şekil 3.5. Fotovoltaik panelelerinin sınıflandırılması (Aktacir, 2009)	28
Şekil 3.6. Fotovoltaik hidrojen üretim sistemi	30
Şekil 3.7. Bir PEM Yakıt pilinin demontaj hali.	32
Şekil 3.8. Bu proje kapsamında kurulması planlanan simulasyon sisteme ait şematik görünüş	34
Şekil 4.1. Bu çalışma kapsamında kurulması planlanan simulasyon sisteme ait şematik görünüş	37
Şekil 4.2. Hidrojen üretimi sisteminin blok diyagramı	50
Şekil 4.3. Güneş kollektörü sisteminin blok diyagramı.....	51
Şekil 4.4. Güç regülatörün blok diyagramı	52
Şekil 4.5. Elektrolizörün blok diyagramı.....	53
Şekil 4.6. Şarj denetleyicisi blok diyagramı.....	54
Şekil 4.7. Hidrojen üretimi blok diyagramı.....	55
Şekil 4.8. Akümülatör blok diyagramı.....	55
Şekil 4.9. PEM yakıt pili sisteminin genel blok diyagramı.....	56
Şekil 4.10. PEM yakıt pili sisteminin voltaj hesaplamalarının blok diyagramı.....	57
Şekil 4.11. ECU ünitesinin blok diyagramı	58
Şekil 4.12. ECU ünitesinin blok diyagramı	59
Şekil 5.1 Farklı verimlere göre PV'den elde edilen elektrik enerjisi	60
Şekil 5.2 Aylık ortalama 353 K sıcaklıkta elektrolizöre giden elektrik enerjisi	61
Şekil 5.3 Aylık ortalama 373 K sıcaklıkta elektrolizöre giden elektrik enerjisi.....	61

Şekil 5.4 Aylık ortalama 393 K sıcaklıkta elektrolizöre giden elektrik enerjisi.....	62
Şekil 5.5 Aylık ortalama 473 K sıcaklıkta elektrolizöre giden elektrik enerjisi.....	63
Şekil 5.6 Aylık ortalama 100 kPa basınçta elektrolizöre giden elektrik enerjisi	64
Şekil 5.7 Aylık ortalama 200 kPa basınçta elektrolizöre giden elektrik enerjisi	64
Şekil 5.8 Aylık ortalama 400 kPa basınçta elektrolizöre giden elektrik enerjisi.....	65
Şekil 5.9 Aylar ortalaması 100kPa basınçta üretilen H ₂ miktarı	66
Şekil 5.10 Aylar ortalaması 200kPa basınçta üretilen H ₂ miktarı	67
Şekil 5.11 Aylar ortalaması 400kPa basınçta üretilen H ₂ miktarı	67
Şekil 5.12 Aylar ortalaması 353 K sıcaklıkta üretilen H ₂ miktarı.....	68
Şekil 5.13 Aylar ortalaması 373 K sıcaklıkta üretilen H ₂ miktarı.....	69
Şekil 5.14 Aylar ortalaması 393 K sıcaklıkta üretilen H ₂ miktarı.....	70
Şekil 5.15 Aylar ortalaması 473 K sıcaklıkta üretilen H ₂ miktarı.....	70
Şekil 5.16. 5.5 SLPM H ₂ için PEM yakıt pili güç eğrisi	72
Şekil 5.17. 5.5 SLPM H ₂ ' için hücre çıkış gerilimi	72
Şekil 5.18. 8 SLPM H ₂ için PEM yakıt pili güç eğrisi.....	73
Şekil 5.19. 8 SLPM H ₂ için hücre çıkış gerilimi	73
Şekil 5.20. 11.2 SLPM H ₂ için PEM yakıt pili güç eğrisi.....	74
Şekil 5.21. 11.2 SLPM H ₂ için hücre çıkış gerilimi eğrisi.....	74

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Hidrojenin özellikleri.....	4
Tablo 1.2. Hidrojenin diğer yakıtlarla karşılaştırılması	8
Tablo 4.1. Yakıt pili model parametreleri	46
Tablo4.2. Reaktant akışı model parametreleri	48



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Güneş kollektörü toplam alanı
C_{dl}	Çift katman kapasitansı
CF_{H_2}	H_2 akış oranı değişim faktörü (SLMP'den mol.s-1'ye)
CF_{O_2}	O_2 akış oranı değişim faktörü (SLMP'den mol.s-1'ye)
C_{O_2}	Oksijen konsantrasyonu
D_{H^+}	Difüzyon katsayısı
E_0	Referans gerilimi
E_A	Suyun anodik elektroliz potansiyeli
E_{elec}	Üretilen elektrik enerjisi
E_K	Suyun katodik elektroliz potansiyeli
E_{Nernst}	Yüksüz gerilim
E_t	Üretilen ısı
E_{tr}	Suyun termo nötral elektroliz potansiyeli
F	Faraday sabiti
I	Akım, Akım yoğunluğu
P_{Elec}	Elektrolizörün basıncı
P	Yığın içindeki toplam basınç
P_{amb}	Çevre basıncı
P_g	Gaz (oksijen, hidrojen, buhar) basıncı
PC_{H_2}	Saf H_2 oranı
PC_{H_2O}	Katot buhar hacim oranı
PC_{O_2}	Saf O_2 oranı
R	Üniversal gaz sabiti
R_1	Çözeltinin ve elektrotların elektriksel direnci
$R_{Düz}$	Düzeltilme faktörü
R_{Elec}	Elektrolizör direnci
R_{act}	Aktivasyon direnci
R_{mem}	Membran direnci
T	Hücre sıcaklığı
T_{Elec}	Elektrolizörün sıcaklığı

U	Suyun birim kütlesinin ayrıştırılması için gereken potansiyel farkı
V	Anot veya katot hacmi
V_a	Anot hacmi
V_{act}	Aktivasyon gerilimi
V_c	Katot hacmi
V_{cell}	Hücre gerilimi
V_{conc}	Aşırı gerilim
V_{ohm}	Omik gerilim
b	Tafel eğimi
j	Akım yoğunluğu
k_a	Anot akıs sabiti
k_c	Katot akıs sabiti
m_{in}	Reaktant giriş debisi
m_{out}	Reaktant çıkış debisi
n	Reaksiyonda kullanılan her bir molekülü kapsayan elektron sayısı
P_{H_2}	Hidrojen kısmi basıncı
P_{H_2O}	Su buharı kısmi basıncı
P_{O_2}	Oksijen kısmi basıncı
q_1	Birim alan başına etkili olan güneş enerjisi ısı akısı
t	Zaman
t_m	Membran kalınlığını
α_{H^+}	İlgili parametre
ΔG	Gibbs serbest enerjisi
ΔQ	Isıl enerjideki değişme
η_A	Anodik aşırı gerilim katsayısı
η_e	Güneş kollektör sisteminin elektrik verimi
η_{in}	Şarj denetleyicisi verimi
η_K	Katodik aşırı gerilim katsayısı
η_{pil}	Akümülatör verimi
η_t	Güneş kollektörünün ısı verimi
σ	Membran iletkenliği
τ_{H^+}	Zaman sabiti

1. GİRİŞ

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmı hala fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Ancak herkesçe bilinen dezavantajlarından dolayı fosil yakıtları geleceğin yakıtı olarak görmek yanlış olur. Hali hazırda yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilememesindeki ana neden ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği ve yaygın olarak kullanılmasının önünde duran yanlış enerji politikalarıdır. İleri ama uygun bir teknoloji kullanarak, doğru yöntemler seçerek, uygun metodik ve politik planlamalar ile çevre dostu, yenilenebilir enerji kaynaklarının insanlığa kazandırılması yolunda önümüzü kesen bazı önemli engeller kaldırılabilir.

Güneş, temiz ve tükenmez bir enerji kaynağıdır. Gerçi şimdilik güneş enerjisinden faydalanma masrafları yüksektir ve güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin verimleri nispeten düşüktür. Ancak yakın bir gelecekte bu problemler aşılabılır. Çünkü çevreye uyumlu ve nispeten basit teknolojilerle elde edilebilen güneş enerjisi geleceğin önemli enerji kaynakları arasındaki yerini almıştır. Ne var ki güneş enerjisinin en büyük dezavantajı onun uzun süre depolanamaması ve taşınabilir olmayışıdır.

Hidrojen çok temiz ve çevre dostu bir yakıttır. Bazı istisnalar göz ardı edilirse hidrojenin yanma ürünü su buharıdır. Hidrojen depolanabilir ve taşınabilir. Bununla birlikte hidrojenin hem depolanması hem de taşınmasında önümüzde duran bazı problemler henüz halledilebilmiş değildir. Hidrojen tabiattaki en hafif elementtir. Bu nedenle depolanması için geniş hacimlere ihtiyaç vardır. Sıkıştırılarak depolansa bile çok yüksek basınçlara çıkmak gerekir. Hidrojen, oksijenle belli oranlarda karıştığında patlayarak yanar. Bu nedenle çevreye karşı iyi izole edilmezse ciddi riskler taşır. Başka depolama yöntemlerinin de dezavantajları mevcuttur. Hidrojenin yüksek diffüzivite özelliği de depolanması yönünden ayrıca bir dezavantajdır. Bütün bu dezavantajlara rağmen son yıllarda kompozit malzemeler konusundaki ciddi teknolojik ilerlemeler hem hafif, hem yüksek basınçlara dayanıklı, hem de diffüzivite özelliği oldukça düşük hidrojen tüpleri imal edebilme şansımızı arttırmıştır.

Hidrojen organik elementlerin en temel taşlarından biri olması sebebiyle tabiatta oldukça çok bulunur. Ne var ki hidrojen tabiatta serbest molekül şeklinde çok az bulunur. Bunun için hidrojeni bileşiklerinden ayırarak elde etmemiz gerekmektedir. Suyun elektrolizi yoluyla hidrojen elde etmek, kullanılan en yaygın yöntemlerden

biridir. Çünkü nispeten basit bir teknolojik temele dayanır. En önemlisi de bu elektrolizde ham madde olan suyun tabiatta oldukça fazla bulunmasıdır.

Güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisini suyun elektrolizi için kullanmak hidrojen elde etmek için iyi bir yöntem olabilir. Çünkü hem güneşe hem de suya dünyanın pek çok yerinden ulaşabilmek kolaydır. Elde edilen hidrojen basınçlı kaplarda depolanarak istenilen yere sevk edilip istenen yerde temiz bir yakıt olarak kullanılabilir.

1.1. Hidrojen Nedir?

Hidrojen periyodik tabloda gösterilen, bugüne kadar keşfedilmiş olan atomlardan biridir. Onu diğer atomlardan ayıran bazı özellikleri bulunmaktadır. Öncelikle hidrojen en küçük ve en hafif atomdur. Aslında bildiğimiz kadarıyla atom çekirdeği yerine sadece bir proton bulunmaktadır ve bu proton çevresinde bir elektrona sahiptir. Oksijenle kimyasal tepkimeye çok kolay girebilmekte, yanma reaksiyonu çok hızlı gerçekleşmekte ve önemli miktarda enerji açığa çıkarmaktadır. Dolayısıyla hidrojen yakıtı önemli ısı enerjisi kaynağıdır. Fakat hidrojen doğada serbest olarak bulunmaz veya başka bir deyişle çok çok az bulunur. Oksijenle kolayca tepkimeye girebilmesi ve diğer atomlar ile kolayca bileşik oluşturması başlıca nedenler olarak sıralanabilir. Dolayısıyla petrol veya doğal gaz rezervlerine benzer şekilde bir saf hidrojen yatağı bulunamayacağına göre hidrojen enerji kaynağı olarak nitelendirilmemektedir. Diğer taraftan su, doğal gaz veya petrol gibi birçok organik bileşik içerisinde bol miktarda hidrojen bulunmaktadır. Yine evrenin çok büyük bir bölümünün hidrojenden oluştuğu tahmin edilmektedir. Dolayısıyla çok bulunması ve kolay tepkimeye girmesi hidrojeni önemli bir enerji taşıyıcısı adayı yapmaktadır. Enerji taşıyıcılığı için en büyük handikapı ise yine kendisidir. Çok küçük ve hafif olan Hidrojen hemen hemen her şeyin içerisinde sızmakta, hem depolanması hem de taşınması büyük problem arz etmektedir. Bu konu da bilim insanlarının üzerinde çalıştığı bir konudur. Hidrojenin karbon ile birlikte kullanılarak sıvı veya katı yakıtların sentezlenmesi günümüzde giderek daha popüler olmaya başlamıştır. Hidrojen normalde zehirsizdir. Sadece ortamda çok büyük bir yüzde ile bulunursa oksijen yüzdesinin azalmasından dolayı boğulmaya yok açabilir ki bu her gaz için geçerlidir. Belirli ve algılanabilen bir kokusu bulunmamaktadır ve sıvılaştırıldığında bile renksizdir. En

önemli riski, çok düşük sıcaklık ve enerjilerde reaksiyona girebilmesi ve reaksiyon hızının çok hızlı olmasıdır. Bir hidrojen kaçağında saniyeden daha az bir sürede ortamdaki bütün hidrojen yanabilir, ortaya çıkan ısı canlılara zarar verip öldürebilir veya ortamda oksijen bittiği için canlılar boğulabilir.

1.1.1. Hidrojenin Kısaca Tarihçesi

Hidrojeni 1520’de ilk defa Paracelsus kullandı. 1671 yılında İrlandalı bilim adamı Robert Boyle demir ile bir ince asit tepkimesinin hidrojen gazının oluşmasına sebep olduğunu ortaya çıkardı. Daha sonra İngiliz Henry Cavendish ilk olarak hidrojen gazını başka bir madde olarak tanımladı. 1783 yılında Antoine-Laurent de Lavoisier, Cavendish’in bulduğunu denerken gördüler ki bu gazın yanmasından su meydana gelmektedir. Lavoisier’nin önerisi ile bu maddeye Hidrojen ismi verildi. Hidrojen ismi “su oluşturan” anlamında Yunanca bir kelimedenden alınmıştır.

1.1.2. Hidrojenin Özellikleri

İki hidrojen atomu bir hidrojen molekülünü oluşturur. Ancak 20.3 K sıcaklıkta döteryum olarak da adlandırılan sıvı hidrojen elde edilebilir ve benzer şekilde soğutulmaya devam edilirse 11 K kadar düşük sıcaklıklarda tridyum olarak da anılan katı hidrojen elde edilebilir. Tablo 1.1’de çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikler sunulmuştur.

Tablo 1.1. Hidrojenin özellikleri

ÖZELLİK	BİRİM	DEĞER
Yoğunluk	kg/m ³	0.0838
Moleküler Ağırlık	amu	2
Üst Isıl Değeri	MJ/kg	141.9
Alt Isıl Değeri	MJ/kg	119.9
Kaynama Sıcaklığı	K	20.3
Sıvı Olarak Yoğunluk	kg/m ³	70.8
Kritik Sıcaklık Noktası	K	32.94
Kritik Yoğunluk Noktası	kg/m ³	31.4
Kritik Basınç Noktası	Bar	12.84
Kendinden Tutuşma Sıcaklığı	K	858
Havada Ateşleme Sınırı	%Hacim	4.0 – 75.0
Havadaki Alev sıcaklığı	K	2318
Havadaki Stokiyometrik Karışım	%Hacim	29.53
Sait Basınçta Özgül Isısı	kJ/kg.K	14.89
Hava İçindeki Yayılma Katsayısı	cm ² /sn	0.61
Patlama Enerjisi	g.TNT.kJ	0.17
Alev Yayılması	%	17 - 25

Havadan 14 kat daha hafif olan hidrojen doğal gazdan da 9 kat hafiftir. Sayıca 4 kat fazla hidrojen atomu bulunduran doğalgazda karbon atomunun 12 kat büyük ağırlığı bu yoğunluk farkına neden olmaktadır. Sıvılaştırılsa bile yoğunluk olarak hem sudan hem de benzin gibi petrol türevi yakıtlardan çok çok düşüktür. Sıvı hidrojen sudan yaklaşık 12,5 kat daha az yoğundur. Normal şartlarda bir metreküp hidrojenden 12×10^6 Joule ısı elde edilebilir. Sıvılaştığında 700 kat yoğunlaşan hidrojenin yaklaşık ısı değeri de $12 \times 10^6 \times 700 = 8.4 \times 10^9$ Joule bulunabilir. Genellikle yakıtlar için ısı değeri yanma olayı sonunda birim kütle yakıt başına elde edilen üst ısı değeri veya alt ısı değeri ile verilir. Benzer bir yaklaşım hidrojen için uygulandığında hidrojenin birim kütle için en yüksek ısı değeri sahip yakıt olduğu görülmektedir. Birim kütle (kg) başına hidrojen 140900 kJ üst ısı değeri ve 120700 kJ alt ısı değeri sahiptir. Bildiğimiz fosil yakıtlarda enerji kaynağı olarak karbon ve hidrojen bulunmaktadır. Yakıt içerisinde hidrojen ne kadar çok ise yakıtın ısı değeri hidrojenin ısı değerine yaklaşmaktadır. Benzer şekilde karbon ne kadar fazla ise yakıtın ısı değeri o kadar düşmektedir. Diğer

bir konu da yakıt içerisinde ki hidrojen sayısının yakıtın normal şartlardaki fiziksel halini belirliyor oluşudur. Örneğin hidrojeni çok bulunduran doğal gaz gaz fazında iken, hidrojeni daha az bulunduran benzin sıvı fazındadır ve hidrojeni çok az bulunduran kömür katı haldedir.

Hidrojen üretimi, alışageldiğimiz petrol kökenli yakıtlar gibi kolay ve karlı değildir. Ancak hidrojeni başka yakıtlardan üstün kılan en önemli özelliklerinden biri güneş veya diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi ile ve ısı enerjisi ile elektroliz ve hidroliz gibi tekniklerle doğadaki bileşiklerinden üretilmesidir. Diğer bir avantajı ise yakıldığında veya çeşitli kimyasal tepkimelere sokulduğunda ısı enerjisi, elektrik enerjisi gibi enerjiler ortaya çıkmakta ve hidrojen yine eski bileşik haline dönmektedir. Dolayısıyla bir çeşit kimyasal çevrim akışkanıdır. Teorik olarak hidrojen bütün bileşiklerinden elde edilebilir ama dünyamızdaki bulunabilirlik ve kullanılabilirlik açısından en zengin hidrojen kaynağımız sudur.

Su normal şartlarda (oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında) atomlerine ayrılmaz. Suyun moleküllerinin parçalanarak hidrojen ve oksijene ayrışması için minimum 1.23 V'luk bir elektriksel enerjiye ihtiyaç vardır.

Sudan hidrojen elde edilmesi konusunda bugüne kadar çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan araştırmalardan anlaşıldığına göre, mevcut şartlarda hidrojen eldesi diğer yakıtlardan yaklaşık üç kat daha pahalı olmaktadır. Doğada serbest halde bulunmayan ve yukarıda kimyasal çevrim akışkanına benzetilen hidrojen enerji taşıyıcılığına (enerji vektörü) adaydır. Bu hali ile aslında enerjinin doğrudan kullanıldığı veya üretildiği yerlerden çok enerjiye uzak yerlere enerji taşınmasında ve/veya elektrik enerjisi gibi enerjinin harekete geçmiş ve depolanması mümkün olmayan veya büyük kayıplara neden olan veya büyük maliyetlere neden olan durumlarda enerji depolanmasında kullanılması muhtemeldir. İlk bahsedilen konu ile ilgili olarak kuzey Afrika'da tarımsal anlamda verimsiz olan büyük düzlüklerde fotovoltaik panellerle üretilen elektrik enerjisinin taşınma konusu verilebilir. Uzun elektrik kablolarıyla taşıma yapılabilirse bile çok büyük maliyetler ve kayıplar ortaya çıkmaktadır. Bunun yerine hidrojen elde edilip karbon ile birlikte kullanılarak doğal gaz veya metanol sentezlenebilir ve bu yakıtlar gemilerle veya benzeri araçlarla taşınabilir. Sonraki konu ile ilgili olarak ise, yani elektriğin ve benzeri enerjinin depolanması ile ilgili olarak, anlık üretilen enerjinin talep oluşmaması durumunda boşa gitmemesi için kullanılması verilebilir. Benzer çözümler arasında yüksek bir konuma su pompalamak gibi çözümler

de bulunmaktadır fakat kullanım esnekliği bakımından hidrojen üretimi potansiyel arz etmektedir.

1.2. Alternatiflerine göre hidrojenin değerlendirilmesi

İnsanoğlunun iş yapmak için mekanizmalar yerine makine kullanmaya başlaması, yakıtları kullanarak ısı enerjisi mekanik enerjiye çevirmesiyle çakışmaktadır. Dolayısıyla insanlık tarihi için ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi çok önemlidir. Daha öncesinde hidrolik enerjiden faydalanılarak makineler yapılmış olsa da ilk mobil ve hemen hemen her yerde çalışabilecek makineler bu prensibe göre tasarlanmıştır. Dolayısıyla ısı enerjisinin elde edilmesi önemli bir konudur. Isı enerjisi kaynağı olarak çoğunlukla yakıtları kullanmaktayız. Bu yakıtlar dıştan veya içten yanmalı motorlarda enerjilerini vermekte ve daha sonra bu enerji hareket enerjisine dönüşmektedir. Yakıt kaynağı olarak da fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar ile karşılaştırılabilecek büyüklükteki tek yenilenebilir yakıt biyokütle olarak karşımıza çıkmaktadır. Aslında güneşten gelen enerjinin tabiat vasıtasıyla sentezlendiği biyokütle kaynaklı yakıtlar, gerçekten de önemli bir alternatifi oluşturmaktadır. Yine de biyokütle arzının yeterli olmaması, tarım etiği konusu, fosil yakıtlar gibi kullanılabilmeleri için gerekli olan ek süreçler bu alternatifi fosil yakıtların önüne geçirememiştir. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında da arz sorunu devam etmektedir. Ayrıca diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında depolanma sorunu da bulunmaktadır. Bu noktada devreye giren hidrojen, normalde serbest halde bulunmamasına rağmen depolanamayan ve dolayısıyla boşa gitmesi beklenen enerjinin kullanılmasıyla yakıt olarak üretilebilir. Burada kritik olan nokta, günümüzde hidrojenin üretim maliyetinin hidrojen yakıldığında elde edilen kazanımdan fazla olmasıdır. Dolayısıyla hidrojenin ancak boşa gidecek, depolanamayan enerji vasıtasıyla üretilip enerji taşıyıcısı olarak kullanılması sürdürülebilir olmaktadır.

Bir kez üretildikten sonra hidrojenin kullanımı için çok geniş bir uygulama alanı ve çok geniş bir yöntem aralığı bulunmaktadır. Ham madde olarak kullanılması yapılan inceleme kapsamı dışında olduğu için burada değinilmeyecektir. Bunun yerine enerji taşıyıcısı olarak kullanımı ele alınmaktadır. Hidrojen içten ve dıştan yanmalı motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanılabilir. Burada önemli bir konu hidrojenin motorların yanma odasında cidarları sertleştirmesi ve uzun çalışma süreleri sonunda erken yaşlanmaya neden olmasıdır. Hidrojen üretildiği elektroliz yönteminin tersten

çalıştırılması ile doğrudan elektrik üretiminde de kullanılabilir. Bu konu günümüzde yakıt hücresi olarak bilinen donanımlar ile gerçekleştirilmektedir. Aslında elektrolizin ters çalışması olan yakıt hücrelerinde önemli verimlerle hidrojenin taşıdığı enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Yine bu noktada yakıt hücreleri kullanılırken önemli sıcaklıklara ulaşmaktadır ve bu sıcaklıkların kontrol altında tutulması gerekmektedir. Aksi halde donanım arızaları ile karşılaşılabilir. Son olarak hidrojen fosil yakıt benzerlerinin sentezlenmesinde (alkol, metan, benzin v.b.) kullanılabilir. Bu son madde aslında hidrojenin depolanması ve sıkıştırılması konusu nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Çünkü yoğunluğu çok düşük olan ve çok küçük atomlara sahip olan hidrojen hemen hemen her maddenin içinden sızmaktadır. Döteryum halinteyken bile her türlü kabın içerisinden sızmaktadır. Kimyasal olarak bağlanmadığı sürece durum böyledir. Diğer taraftan düşük yoğunluk yüksek özgül hacim anlamına gelmektedir ki bu durum birim kütle başına yüksek pompalama gücü anlamına gelir. Yani zaten üretiminde yüksek enerji maliyeti olan hidrojenin depolanması ve taşınması da yüksek maliyete sahiptir. Bu nedenle üretilen hidrojen genellikle oksijenle karşılaştığında kırılacak bağıl olarak daha zayıf kimyasal bağlarla bağlanmaktadır.

Hidrojen ister motorlarda yakılarak kullanılsın isterse yakıt hücrelerinde elektrik üretiminde kullanılsın, süreç sonrası atık su olduğu için temiz bir enerji taşıyıcısıdır. Her yakıt gibi kullanımında dikkat edilecek hususlar bulunmaktadır ama genel olarak zehirli olmayan, koku bırakmayan, gözle görülemeyen bir yakıttır. Tablo 1.2'de hidrojenin alternatifleri ile karşılaştırılması sunulmuştur.

Tablo 1.2. Alternatiflerine göre hidrojenin değerlendirilmesi (Solmaz, 2009)

	HİDROJEN	METAN	METANOL	ETANOL	BENZİN
KİMYASAL DENKLEMİ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₅ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₈
C/H ORANI	0	0.25	0.25	0.333	0.556
MOLEKÜL AĞIRLIĞI	2.02	16.04	32.04	46.07	91.4
ÖZGÜL AĞIRLIĞI (fer/cm ³)	0.07	0.424	0.79	0.79	0.73
SIVI GAZI	0.084*10 ⁻³	0.78X ³			
ISIL DEĞERİ (MJ/kg)	119.9(alt)	50.08	20.01	26.9	43.4
(MJ/lt)	141.9(Üst)	20.08	15.9	21.3	31.8
	8.41				
STOKİYOMETRİK KARIŞIM	34.32	17.2	6.44	8.96	14.7
Hava/yakıt(kütlesel)	2.38	9.53	7.14	14.3	45.79
Hava/yakıt(hacimcell)	3.20	3.4	3.53	3.61	3.78
kJ/lt mol ürün/molreaktant	0.85	1.0	1.06	1.06	1.04
BUHARLAŞMA ISISI(MJ/kg)	0.447	0.509	1.102	0.856	0.272
TUTUŞMA SINIRLARI %	41 – 74	5 – 15.4	6 – 37	3.5 – 19	1.3 – 7.6
Hacim A, hava fazlalık katsayısı	0.15 – 4.35	0.59 - 2	0.24 – 2.22	0.29 - 192	0.26 – 1.87
LAMİNER ALEV (m/s)	2.91	0.37	0.52	-	0.37
ABYABATİK ALEV SIC (K)	2383	2227	2151	2197	2226
DİFÜZYÖN KATSAYISI (nf ² sn)	0.61	0.16	-	-	0.37
KAYNAMA NOKTASI (K)	20.63	11.7	338.1	351.7	305 – 494
DONMA NOKTASI (K)	14	-	175.4	155.9	217
KENDİNDEN TUTUŞMA SIC (K)	847 – 864	905	743	665	530

1.3. Hidrojenin Üretimi

Yaşadığımız dünyada doğal halde hidrojen gazı oldukça az miktarlardadır. Diğer atomlar ile kimyasal olarak bağlanmış hidrojen gezegenimizdeki varlığını neredeyse tamamen bu şekilde sürdürmektedir. Örneğin hidrojen ve oksijenden oluşan su büyük hidrojen depoları olarak okyanuslar halinde tüm dünyayı kaplamıştır.

Hidrojen, çok çeşitli kaynaklardan çok değişik teknolojilerle üretilir. Bahsedilen teknolojiler veya metodolojiler için elde edilmek istenilen saflık derecesi, üretilmek istenen miktar, ürün fiziksel hali gibi parametreler önemlidir ve üretim yöntemi bahsedilen parametrelere göre seçilir. Hidrojenin temiz enerji kaynakları kullanarak sudan elde edilmesi doğru bir seçimdir. Ancak bu konuda henüz halledilmesi gereken pek çok problem vardır.



Şekil 1.1. Hidrojenin üretim ve tüketiminin basamakları

Hidrojen üretiminde kullanılan yöntemlerden bazıları aşağıda gösterilmiştir:

- Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi
- Termokimyasal Yöntem
- Suyun Elektrolizi
- Güneş-Hidrojen Sistemi
- Foto-Kimyasal Yöntem
- Foto-Biyolojik Yöntem

1.4. Enerji taşıyıcı olarak hidrojenin muhafaza edilmesi ve yönetilmesi

Üretilen hidrojenin depolanması için 4 ana yoldan bahsedilebilir. Bunlar doğal depolarda (mağaralar, yer altı boşlukları gibi) depolama, basınçlı kaplarda depolama, metal hidritler şeklinde depolama ve fosil yakıt benzeri yakıt sentezi ile depolamadır. Hidrojenin doğal gaz depolanabilen doğal depolarda depolanması geçici bir çözüm olarak kabul görmektedir. Burada geçici çözüm ifadesi olumsuz olarak kullanılmamıştır. Aksine hidrojenin kısa bir süre için depolanması gerektiği durumlarda, üretimin arzdan fazla olup sönümlenmesi gerektiği durumlarda bu çözüm çok faydalıdır çünkü sıkıştırma işinden olabildiğince az faydalanılmaktadır. Üstelik hidrojenin yer katmanlarına sızması yavaş olmakta ve bilinen pratik bir zararı bulunmamaktadır. Hidrojenin basınçlı kaplarda kullanılması ise bağıl olarak daha küçük sistemlerde karşımıza çıkmaktadır. İçten yanmalı motorlara sahip taşıtlarda, küçük elektroliz sistemlerinde ve benzeri uygulamalarda hidrojen en basit şekilde ve en az ilk yatırım maliyeti ile bu şekilde depolanabilir. Bu noktada basınçlı depolamanın pompalama maliyeti, zamanla hidrojenin depodan sızması ve düşük depolama kapasiteleri büyük

uygulamalar için sınırlandırıcı olmaktadır. Daha güvenli bir depolama çözümü ise metal hidrit tüplerdir. Bu tüplerde metal kafes yapısı içerisine tutunan hidrojen atom ve molekülleri daha stabil bir şekilde depolanmaktadır. Bahsedilen metal hidritler için kullanılan madenlerden önemli bir tanesi bor madenidir ve Türkiye’de önemli bir rezerv bulunmaktadır. Bahsedilen bu depolama çözümünde ise en önemli handikap ilk yatırım maliyetidir. Son depolama çözümü ise fosil yakıt benzeri yakıtların sentezlenmesidir. Özellikle alkol gibi sıvı haldeki yakıtların sentezlenmesi neredeyse mükemmel bir depolama çözümüdür. Bu çözümle ilgili olarak ileri sürülebilecek olumsuz yanlar ise üretim için ilk yatırım maliyeti ve sentezlenen yakıtlar içerisindeki hidrojenden farklı atomların yanmasıyla ortaya çıkan atmosfere ve çevreye zararlı egzoz salınımları sayılabilir. Yine de fosil yakıtlara göre daha masum egzoz salınımları çıkmaktadır. Son olarak yakıt sentezi ile depolama yapılması durumunda hidrojenin yakıt pillerinde kullanılması doğrudan yapılamamakta, sentezlenen yakıtlar önce yeniden şekillendirme sürecine tabi tutulup daha sonra hidrojen yakıt hücresine sokulmaktadır. Son yıllarda doğrudan metanol kullanan yakıt pilleriyle ilgili raporlar bulunmaktadır ama esasında bu sistemler de metanolün hidrojenini ayırmakta ve hidrojeni o şekilde kullanmaktadır.

Bu bölümde döteryum halinde hidrojen depolanmasından bahsedilmemiştir çünkü yakıt olarak hidrojeni kullanan uygulamalarda pratik olarak uygun şartlar bulunmamaktadır. Özel araştırmalar için döteryum kullanımı mümkün olsa da bu durum inceleme aralığımız dışındadır.

1.4.1. Hidrojenin basınçlı gaz olarak depolanması:

Yaygın olan bir hidrojen depolama sistemidir. Ancak bu metotta mutad olan boyut ve ağırlılıktaki tüplerde depolanan hidrojen, miktar olarak yetersizdir. Piyasadaki hidrojen tüpleri 150 barlıktır. Bu kadar yüksek basınca rağmen yoğunluk değişimi sadece 1/10 nisbetindedir ki bu da sıvı hidrojenin yoğunluk değişimine denktir (Ateş, 1985).

Genel olarak gaz halindeki hidrojenin şu avantajları vardır:

- Depolama ve taşıma çevre sıcaklığında yapılabilir. Bu nedenle tecride lüzum yoktur.
- Basıncılı kap içerisinde bir miktar hidrojen sıvılaşabilir. Bu miktar kendiliğinden buharlaşacağı için herhangi bir sorun oluşturmamaktadır. (Ateş, 1985).

Gaz hidrojenin dezavantajları ise şunlardır:

- Hidrojen basıncılı kap içerisinde depolandığında kullanım sırasında pratik aralıklarda hemen tükenmektedir çünkü depolanan miktar basınca rağmen kütleli olarak çok azdır. Pratik uygulama aralıkları için yeter miktar hidrojen ancak çok büyük kaplar gerektirmektedir ve genelde uygulanamaz boyutlar ortaya çıkmaktadır.
- Yüksek basıncılı tüpler sağlamlık açısından metal malzemeden üretilmektedir. Kompozit malzemeler doğal gaz için önemli bir çözüm oluştursa da hidrojen için gözeneklilikleri çok büyüktür.

Netice itibariyle hidrojeni basıncılı gaz olarak depolamanın taşıtlar için pratik olmadığı söylenebilir.

1.5. Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanılması

İçten yanmalı motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanılabilen hidrojen konusunda karşımızda üç temel problem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi hidrojenin yanmasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan azot oksitlerdir. Bu durum için önerilen çözüm, hidrojenin çok fakir karışımlarda bile iyi yanmasını dikkate alarak önerilen aşırı doldurmadır. Aşırı doldurma sayesinde stokiometrik orandan çok daha fazla hava yanma odasına doldurularak yanma sonu sıcaklığı düşürülebilir. Diğer bir konu ise hidrojenin yanma hızıdır. Normal içten yanmalı motorların yanma odası tasarımları daha düşük hızda bir yanma için tasarlanmıştır dolayısıyla hidrojen kullanımı için yeni tasarımlara veya varolan motor üzerinde değişikliklere gerek duyulmaktadır. Alternatif bir kullanım ise hidrojenin az miktarda farklı devirlerde yanma verimi düzenleyicisi olarak kullanılmasıdır. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda

kullanılmasına yönelik ortaya çıkan diğer bir sorun ise hidrojen atom ve moleküllerinin yanma odası ve silindir malzemesini etkileyerek yüzeyleri sertleştirmesidir. Yüksek yanma sıcaklığının da etkisiyle sertleşen yüzeyler çalışma ömrünü kısaltabilmektedir. Bor gibi katı yağlayıcı özelliğine sahip madenlerin çözüm için araştırmalarda kullanılması gündemdedir. Son olarak hidrojen içten yanmalı motorlara sahip araçlarda yakıt olarak kullanıldığında kısa mesafelerde yakıt ikmali gereksinimi bulunmaktadır. Depo büyüklüğü arttırıldığında ise hacim problemleri ve ek taşıma maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Doğal olarak araç üzerinde hidrojen depolanması, regülasyonu ve izlemesine yönelik ek donanımların yerleştirilmesi ve araç üzerinde yapılacak değişiklikler söz konusu olmaktadır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Güneş enerjisinden hidrojen elde etmeye yönelik yapılan farklı çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur:

(Shabani ve Andrews, 2011), Yerleşim alanlarından uzak olan evlerin enerji ihtiyaçları için güneş-hidrojen sistemini daha ekonomik hale getirmek için bir çalışma yapmışlardır. Hem deneysel hem de bilgisayar simülasyonunun yapıldığı çalışmada PEM yakıt pili kullanılmıştır. Sonuç olarak giriş havasının stokiometrisinin ve yakıt pilinin çalışma sıcaklığının BirleşikIsı-Güç Sistemi (CHP) performansını önemli ölçüde etkilediğini bulmuşlardır.

(Ziougou ve ark., 2011), gPROMS modelleme ortamı kullanarak ayrıntılı dinamik yakıt pili modelinin geliştirilmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan model tahminleri ile deneysel verilerin oldukça tatmin edici bir uyum sağladıkları anlaşılmıştır.

(Yilanci ve ark., 2008), bir güneş-hidrojen üretim sisteminde 1.2 kWp NEXA PEM yakıt pili ünitesinin, enerji ve ekserji analizi için hazırladıkları deney düzeneğinde değişik çalışma koşulları için sistemin performansını incelemişlerdir. Çok değişkenli parametrik koşulların uygun birleşim seçenekleriyle mevcut yakıt pili sistemlerinin performanslarının iyileştirilebileceği sonucuna varmışlardır.

(Niknam ve Zare, 2012), PEM yakıt pili santral ve kazanları (FCPPs) dağıtım şebekelerinin bir Stokastik Çok Amaçlı Optimal Operasyon Yönetimi (SMOOM) çerçevesini sunmuşlardır. Objektif fonksiyonlar ve operasyon kısıtlamalarını minimize etmek için Çok Amaçlı Değiştirilmiş Firefly Algoritması (MFA) kullanmışlar ve 68-bus dağıtım ağının performans analizini yapmışlardır.

(Shahsavari ve ark., 2012), geleneksel su ile soğutulan yakıt hücrelerine göre malzeme ve sistem karmaşıklığını önemli ölçüde azaltan hava soğutmalı proton değişim membranlı yakıt hücresini (PEMFC) test etmişlerdir. Kullandıkları levhaların, hava hızı ve düzlemsel ısı iletkenliği sayesinde ısıl performans üzerinde önemli rol oynadığını tespit etmişlerdir.

(**Najafi ve ark., 2015**), mevcut bir PEM yakıt hücre bazlı mikro kojenerasyon sistemi için yeni bir konfigürasyon teklif etmişlerdir. Bu çalışmada geleneksel düşük sıcaklık PEM yakıt pili, yüksek sıcaklık yakıt pili ile değiştirilerek sistemin davranışlarını çeşitli yönleriyle incelemişlerdir.

(**Shirudi, 2007**), çalışmalarında 10kW'lık fotovoltaiik hücrelere enerji temin etmek için 5KW'lık bir su elektroliz makinasının hidrojen üretmek için kullanıldığı bir birleşik sistem tasarlamışlardır. Bu çalışmada ayrıca HOMER adı verilen bir bilgisayar yazılımı ile deneysel sonuçlar değerlendirilmiştir.

(**Amores ve ark., 2014**), çevre dostu olarak hidrojen üretimini arttırmak amacıyla, yeni geliştirilen alkalın elektrolitik yenilenebilir enerji kombinasyonunu optimize eden bir sistem tasarlamışlardır. Bu sistemde sıcaklık, elektrot, membran mesafesi ve elektrolit konsantrasyonu gibi parametrelerin etkilerini ölçerek duyarlılık analizi yapmışlardır.

(**Đukić ve Firak, 2011**), çalışmalarında alkali su elektroliz ünitesinde bir 30W fotovoltaiik (PV) modülü elektrik enerjisi kaynağı olarak seçip hidrojen üretimde kullanmışlardır. Bu sistemde enerji verimliliği % 55'in üzerinde bulunmuştur.

(**Ural, 2007**), bir polimer elektrolit membran yakıt pili sistemini modellenip, benzetimini yapmışlardır. Matlab-simulink yazılımı, sistemin matematiksel modelinin oluşturulmasında ve çözümünde kullanılmıştır. Matematiksel model içerisinde PEM yakıt hücresi için ayrı bir fonksiyon tanımlanmıştır.

(**Becerikli, 2011**), Bir yüksek basınçlı PEM elektrolizör geliştirilmesi ve çalışma parametrelerinin performansa etkisi üzerinde yüksek lisans tezi olarak çalışmıştır ve çalışma parametrelerinin (su debisi, sıcaklık, basınç) performansa etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sıcaklık artışının performansı artırdığı, artan basıncın ise performansı düşürdüğü deneysel olarak ortaya konmuştur.

(**Kahraman, 2014**) yakıt hücresinde çalışma sırasında sistem basıncının sistem performansına etkisini araştırmıştır. Sıcaklıkla beraber önemli bir parametre olan sistem basıncı konusunda yaptığı deneysel çalışma ile küçük ölçekli sistemler için önemli bir referansı oluşturmaktadır. Elektroliz için yüksek sıcaklık ve düşük basınç iyi sonuç verirken yakıt hücrelerinde bunun tersi beklenebilir fakat belirli bir sıcaklık ve basınç aralığı sistemin verimli çalışması için esastır.

(**Boudries, 2013**) Cezayir’de solar hidrojen sisteminin üzerinde çalışmış. Sonuçlar, elektrolizör-konsantre fotovoltaik sistemi hidrojen büyük ölçekli üretimi için daha uygun olduğunu gösterir.

(**Bahçeci, 2012**) PSCAD ile modelledikleri dinamik hidrojenli yakıt hücresi modelinde, sistem parametrelerine ve zamana göre değişen sistem performansını araştırmıştır. Çalışma sistem parametrelerine göre değişen performans nedeniyle gerçek uygulamalara daha gerçekçi bir yaklaşım fırsatı sunmaktadır. Ayrıca modelleme çalışmaları için de önemli bir referansı teşkil etmektedir. Bu çalışma için bir PEM modellenmiştir ve yakıt hücresinin sabit bir DC akım oluşturması için benzetimler yapılmıştır.

(**Ngoh ve ark., 2014**) Hidrojen üretmek için bir yüksek sıcaklıklı solar hibrid sistemini simüle ve tasarlamışlar. Exerji verimliliği, sistem bileşeni toprak kullanılan ve su tüketimi de yapıldı.

(**Ni ve ark., 2007**) katı oxid buhar elektroliz santralinde hidrojen üretmek için enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmada enerji ve ekserji daha iyi anlaşılması sose hidrojen üretimi akar ve belirlenmesi ve ekserji yıkımı ölçülmesi için ekserji analizinin önemini göstermesini sağlamaktadır.

(**Solmaz, 2009**) Hidrojen gaz elde etmesi ve metanol elektrooksidasyonu için katlatik elektrot geliştirilmesi üzerinde doktra tezi olarak çalışmıştır. Zamanın elektrotlar üzerine kararlılık anlamında etkileri, seçilen yüksek etkinlikli elektrotlar kullanılarak araştırılmıştır. Korozyon sorunu bulunan elektrotlar için kaplama çözümleri incelenmiştir. Ayrıca metanol üretimi için oksidasyon elektrodu olarak incelenen elektrotlar denenmiştir.

(**Đukić ve Firak, 2011**) hidrojen üretiminde Alkaline elektrolizör ve PV modülünü kullanmışlardır. Dolaşımın her iki tip için (hidrojen yüksek ısıtma değerine dayalı) Hesaplanan Enerji verimliliği% 55 üzerindedir. Daha fazla sistem bileşenlerinin geliştirilmesi ve dolayısıyla elektroliz ve sistem etkinliği için çok kanıt vardır.

(**Dinçer, 2014**) sıklıkla kullanılan bir yakıt hücresi için bilinen pratik problemlere karşı anot elektrodu kaplamıştır ve bunun sistem performansına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Kaplama yöntemi olarak henüz ticari anlamda çok yaygın olmayan elektrospin kullanılmıştır. Bilinen sorunlar nedeniyle yakıt hücresinin sınırlı ömrü üzerinde kaplama sonrası artış olduğu bildirilmiştir.

3. TEORİK ÇALIŞMA

Bu çalışmada iki aşamalı bir sistem için sayısal model oluşturulmuştur. İlk aşamada, güneş enerjisinden PV paneller vasıtasıyla elde edilen elektrik enerjinin suyun elektrolizinde kullanılması modeli geliştirilmiştir. İkinci aşamada, suyun elektrolizinden elde edilmiş olan hidrojenin PEM yakıt hücreleri aracılığı ile enerji dönüşümünde kullanılması modellenmiştir.

3.1 Suyun Elektrolizi

Yeryüzünün %70'den fazlası suyla kaplıdır ve suyun %11.2 si hidrojendir. Dolayısıyla su çok bol bulunan bir hidrojen üretim kaynağıdır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının en büyük avantajı havadaki oksijenle birleşerek yandığında su meydana gelmesidir. Yani hidrojen tam anlamıyla “yenilenebilir” bir enerji kaynağıdır (Yang ve ark., 2015).

Hidrojene olan talep sürekli artmaktadır ve bu büyük orandaki artış hidrojenin maliyetine dikkat çekmiştir. Elektroliz ile hidrojen üretildiğinde oluşan maliyet diğer alternatiflerine göre daha yüksektir. Bu yüzden bu yöntem çoğu zaman yüksek hidrojen saflığı gerektiren işlerde kullanılır. Son zamanlarda düşük maliyetli ve yüksek verimli hücreler üzerine yapılan çalışmalar, elektrolitik hidrojen üretiminin maliyetini önemli oranda düşürebilir.

Dünya hidrojen üretiminin %20 si elektroliz yöntemiyle sağlanmaktadır. Elektroliz yöntemiyle en saf hidrojen elde edilir. Elektriğin hali hazırdaki maliyeti ve mevcut koşullar nedeniyle elektrik kullanılarak yapılacak üretim tercih edilebilir değildir. Kömür ve doğalgazdan hidrojen üretiminde ise emisyon faktörleri ön plana çıkmaktadır. Bu etkilerin minimizasyonu için fotovoltaik paneller yardımıyla doğrudan güneş enerjisinden elde edilen enerjinin elektroliz sistemlerinde kullanılması uygun bir üretim yöntemi olabilir.

Suyun elektrolizi basit bir teknolojidir. Aşağıdaki şekilden de (Şekil 1.3) anlaşılacağı gibi elektroliz cihazının negatif kutbu katod'a (negatif elektrot) ve pozitif kutbu anod'a (pozitif elektrot) takılmaktadır. Arıtılmış suyun düşük elektriksel iletkenliğini arttırmak için özel elektrolit sıvı karışımlar hazırlanır. Dolayısıyla alkali su olarak isimlendirilebilecek hidrojenin elektrolizi için uygun hale getirilmiş suya

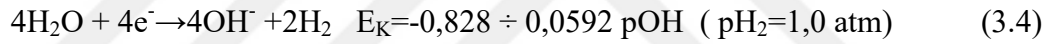
çözeltiler eklenmektedir. Diğer bir deyişle bahsedilen çözeltiler suyu alkali hale getirmektedir. Kalsiyum hidroksit ve sodyum hidroksit bazı örneklerdir.

Su molekülleri katod elektrot etrafında OH^- ve H^+ iyonlarına ayrılmakta ve böylece su moleküllerinin miktarı katod etrafında azalmakta OH^- yoğunluğu ise artmaktadır. Bundan dolayı katod'un dış yüzeyinin OH^- iyonları ile kaplanması beklenirken öyle olmaz. Çünkü OH^- iyonları anoda doğru göç ederler. H^+ iyonu bir elektron alarak H atomuna dönüşür. Bu atom başka H atomuyla çarpışarak hidrojen gazı molekülünü oluşturur. Bu H_2 gazı molekülleri kabarcık olarak suyun yüzeyine çıkarlar.

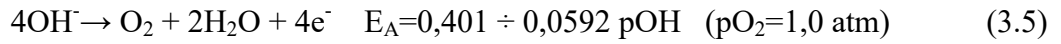


Anot tarafına geçen hidroksit iyonları birleşerek su molekülü ve O_2 gazı oluştururlar. Serbest kalan oksijen molekülleri kabarcık olarak suyun yüzeyine çıkarlar.

Katod tarafındaki reaksiyon:

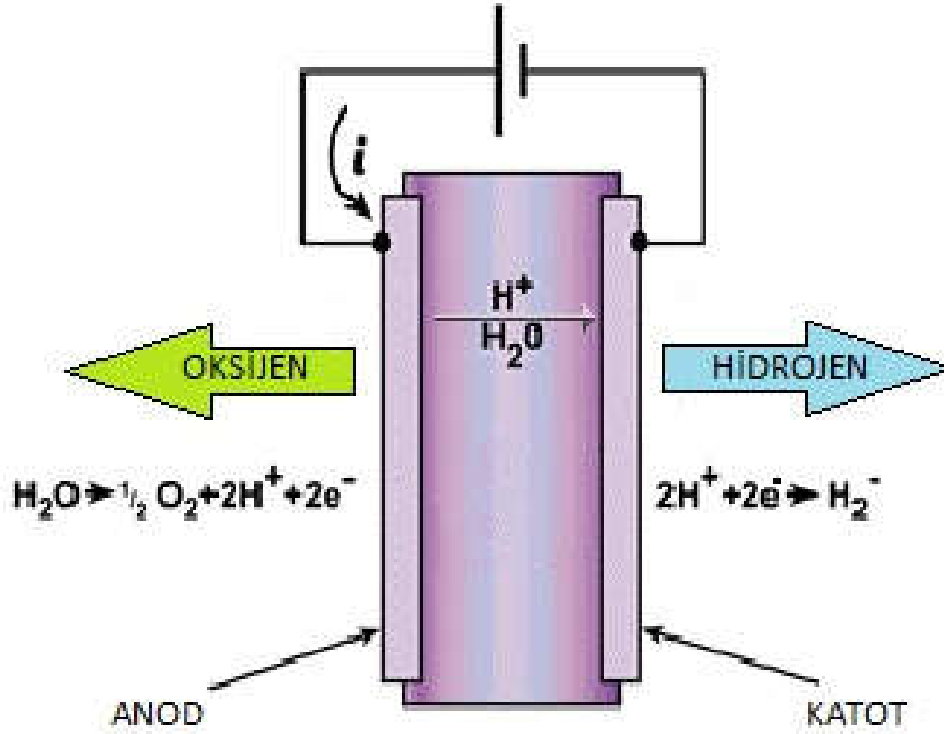


Anot tarafındaki reaksiyon:



Toplam tepkime;

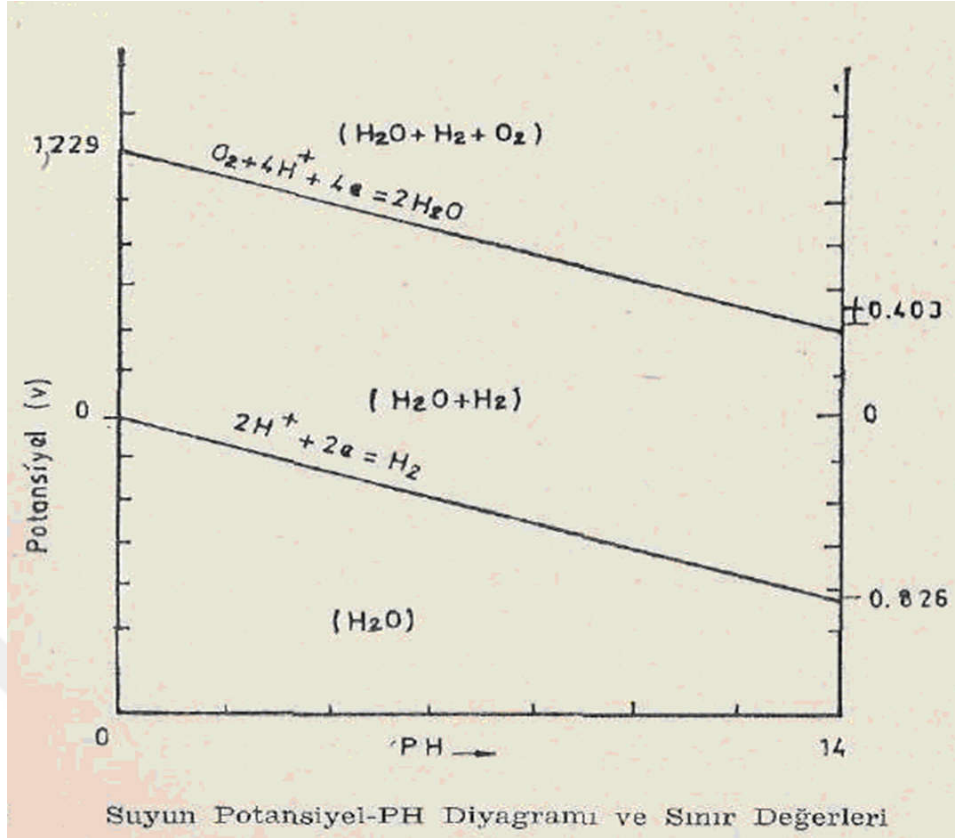




Şekil 3.1. Kabın içindeki elektroliz tepkimesi

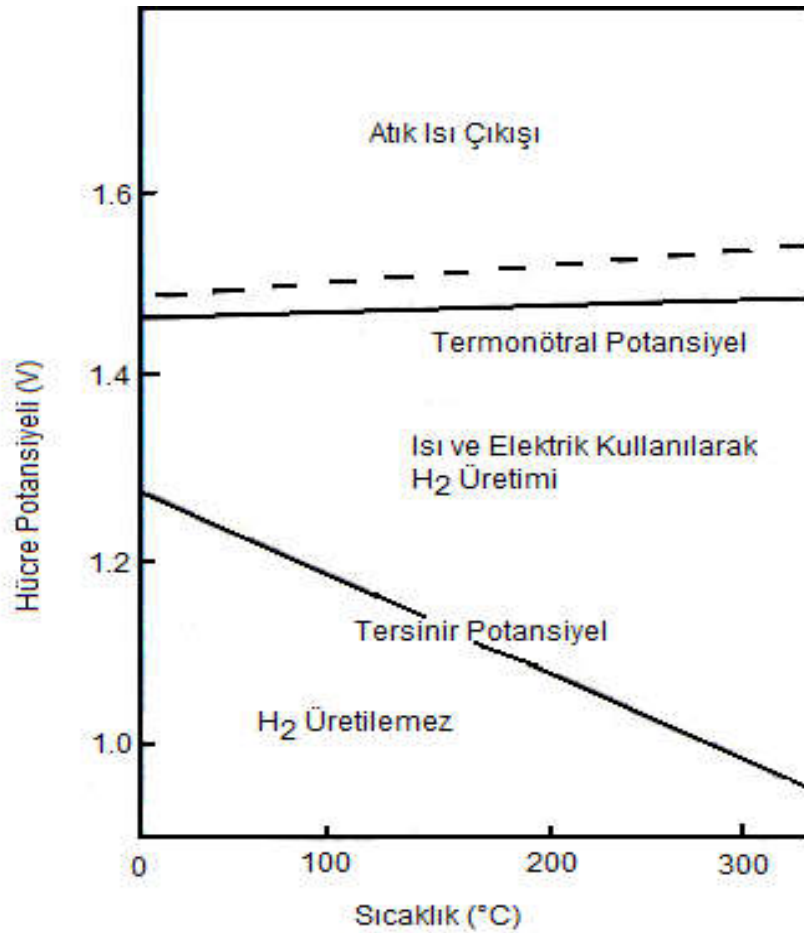
Denklemlerde, suyun ayrışması için gerekli olan E_A ve E_K 'nın en düşük değerinin, 25 °C'da ve suyun pH değeri dikkate alınmaksızın teorik olarak minimum 1,229 V olması gerektiği söylenebilir. Gerçekte ise hidrojen elde edilmesi için kullanılan elektrolizde termodinamik hesaplamalar neticesinde akım gerilimi yaklaşık 1.5 Voltdur. Suyu elektroliz etmek için ortamın izotermal olması gerekir.

Şekil 3.2. de E_A ve E_K 'nın pH'a bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. pH potansiyel değişimi (Petrucci, 2002)

Şekil 3.3 de ise suyun elektrolizinden H_2 üretimi için gerekli olan elektriksel potansiyelin sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi artan sıcaklık Gibbs enerjisi gerekliliğini düşürdüğü için gerekli elektriksel potansiyel ihtiyacı da azalmaktadır. Şekil 3.2.'de gösterilen alanlar teorik alanlardır. Elektroliz sırasındaki tersinmezlikler, ticari uygulamalardaki üretim hızı ihtiyacı nedeniyle daha büyük gerilimler kullanılmaktadır. Tabiki bu yüksek elektriksel gerilimler tersinmezlikler nedeniyle ısı üretimine de yol açmaktadır. Yine de bu ısı üretimi tamamiyle kayıp sayılmamalıdır çünkü sistemin sıcaklığını arttıran bu ısı Gibbs serbest enerjisini düşürerek sisteme katkı sağlamaktadır. Yine de sistem bileşenlerini korumak adına sistem sıcaklığı regüle edilmelidir.



Şekil 3.3. Suyun elektrolizi için ideal çalışma koşulları (McAuliffe, 1980)

Bahsedilen sistemler için elektriksel gerilim (3.7) ile verilebilir. (McAuliffe, 1980).

$$E = E_{tr} + \eta_A + \eta_K + IR \quad (3.7)$$

η_A ve η_K anod ve katot bileşenlerine ait gerilimlerdir. Akım I ile, toplam direnç ise R ile gösterilmiştir. Suyun elektroliz ihtiyacı E_{tr} ile gösterilmiştir. Dolayısıyla formüldeki gerilimler ve direnç değerleri uygulanması gereken elektriksel gerilimi arttırmaktadır. Bu gerilimler aşırı gerilimler olarak da nitelenmektedir ve düşürülmeleri gerekmektedir. Yüksek performanslı elektrotlar kullanarak bu sorun aşılabilir. Bunun için ya yüksek akım yoğunluğu ile karakterize edilen elektrot materyalleri ya da gerçek yüzey alanı ile karakterize edilen elektrot materyalleri kullanılmalıdır.

3.1.1. Suyun Elektrolizi İçin Gerekli Bileşenler

3.1.1.1 Elektroliz için sıvı iletkenlik katkıları

Suyun elektrolizi için kalsiyum hidroksit veya sodyum hidroksit çözeltiler suyu alkali hale getirmek için kullanılır. Alkali su elektrik iletkenliği için önemlidir. Kalsiyum hidroksit ile daha yüksek iletkenliğe sahip bir alkali su elde edilebilirken sodyum hidroksit daha kolay bulunabilen bir çözelti malzemesidir.

Suyu alkali hale getiren katkıları aynı zamanda karbondioksit de çözülmesine neden olmaktadır. Elektroliz sırasında anot ve katot uçları karbon tarafından kirletilebilmektedir. Dolayısıyla çalışma süresince elektrotlar bu kirlilik nedeniyle çalışamaz hale gelir ve bir süre sonra değiştirilmelidirler. Bu konuyla ilgili elektrotların kaplanmalarına ve kullanım sürelerinin arttırılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Aslında elektrot kirlendiği süre içerisinde bir yandan da çalışmaktadır ama kirlilik oranı ve sistem verimine yönelik optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle sistem parametrelerine göre optimum çalışma zamanları ilgili literatürde dikkat çekecektir. Örneğin bir elektrot 10 yıla kadar kullanılabilir ama uygulamada yılda bir değiştirilmektedir (Bilgen, 2001). Bu konuyla ilgili diğer bir husus ise elektrotların yeniden kullanımına yönelik geri dönüşüm fırsatlarının araştırılmasıdır.

Gerekli iletkenlik için suya katılacak alkalilik sağlayan malzemeler için %28 kalsiyum hidroksit ve %20 sodyum hidroksit yeterlidir. Uygulamada da yaklaşık olarak bu yüzdeler kullanılmaktadır. Bahsedilen malzemelerin sistem çalışma maliyetine etkileri göz önünde bulundurulmalı, çevresel etkiler genel sistem değerlendirilmesinde vurgulanmalıdır. Kullanılan çözelti malzemelerinin saflığı da önemlidir. Elektrotlarda ve sistem bileşenlerinde kirlilik ve korozyon oluşmaması için kullanılan çözelti maddeleri yüksek saflıkta seçilir. Bu durum ek maliyet oluşturmaktadır. Anot elektrotta özellikle korozyona neden olan çözeltiler, yüksek saflıkta bu korozyon etkisini nispeten yitirir. Sıcaklık da çözeltinin iletkenliğini arttırmaktadır (Solmaz, 2009).

Elektrolit oluşturulurken yüksek saflıkta, iyi arındırılmış, kirlenmeden kurtarılmış su kullanılmalıdır. Alkali hale getiren katkıları için yaklaşık 50-80 °C arasında bir sıcaklık yeterli olmaktadır. En iyi sıcaklık uygulamaya ve sisteme göre ayarlanabilir.

3.1.1.2 Anot ve Katot Uçlar

Elektroliz sürecinin en önemli bileşenlerinden olan elektrotlar için şekil faktörü üzerinde çalışılmaktadır. Elektroliz yüzey alanı için tel sargılar, çıkıntılar kullanılabilir ve bu unsurların tasarımı süreci engellemeyecek şekilde ve istenen elektroliz verimini sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Günümüzde nikel kaplanmış çelik elektrotlar tercih edilmektedir. Bu tercihin sebebi elektrik iletkenliği ile maliyet ve üretilebilirlik arasında bir denge oluşturmaktır. Elektrolitle ilgili bölüm içerisinde de anlatıldığı üzere elektrotların kaplanmaları üzerine çalışmalar devam etmektedir (Öztürk ve ark.).

3.1.1.3 Ayırıcılar

Elektroliz sırasında üretilen gazlar difüzyon ile karışabilmektedir. Bu nedenle korozif elektrolite dayanabilecek, iyonların hareketine imkan sağlayan, ve oluşan difüzyonu azaltan/yavaşlatan ayırıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayırıcılar anot ve katot arasına yerleştirilmektedir. Difüzyon gaz kabarcıklarının hareketi ile de olmaktadır ve dolayısıyla gözenekli ayırıcı yapısı bu gaz kabarcıklarının karakteristiklerin göre seçilmelidir. Sistem çalışma aralığı ve oluşan kabarcıkların boyutları dikkate alınarak ayırıcı tasarımı ve seçimi gerçekleştirilebilir. Eğer ayırıcı iyon hareketlerini de engellerse çözeltinin direncinde artış ölçülecektir. Bazı ayırıcılara örnek olarak elyaf dokumalar, madeni ağlar ve korozyona dayanıklı dokumalar verilebilir.

Dokumalar bir iskelete sahip olmadığı için mukavemet sağlamak amacıyla tel ve pamuk takviyesi ile güçlendirme yapılabilir. Torba şeklindeki amyant ayırıcı buna bir örnektir. Ayırıcıların kullanım süreleri diğer sistem bileşenlerine göre çok daha uzundur ve bağıl olarak daha ucuz malzemelerdir. 20 yıla yakın sürelerle kullanılabilirler. Elde edilen hidrojenin saflığında önemli rol oynarlar. Üretilen hidrojen içerisinde %0.2 ye kadar düşük oranda kirletici bulunmasını sağlayabilirler (Bilgen, 2001).

3.2 Güneş Enerjisi

Büyük ölçekte bakıldığında güneş bir pil gibi çevresine enerji dağıtmakta ve çevresindeki olaylara enerji kaynağı olmaktadır. Güneşte bulunan hidrojen atomları füzyon ile birleşerek helyum atomlarına dönüşmektedir ve bu süreçte çok büyük oranda radyoaktif enerji açığa çıkmaktadır. Bu şekli ile güneş nükleer bir santrale benzetilebilir. 564×10^6 ton hidrojen her saniye 560×10^6 ton helyuma dönüşmektedir. Aradaki fark 386×10^6 eksa Joule enerji açığa çıkmaktadır. Bu radyoaktif enerji ışınım yolu ile uzaya saçılmakta ve ulaştığı yüzeylerde ısı enerjisine dönüşmektedir. Yarı iletkenler gibi bazı malzemelerde moleküler kinetik enerji artışı elektron salınımına yani elektrik üretimine neden olmaktadır. Güneşten dünyaya saate gelen enerji miktarı 1.10^{14} KW'tır. Bu enerji dünyadaki hayatın kaynağıdır. Aslında bütün enerji kaynaklarının temelinde bu enerji yatmaktadır. Jeotermal enerji dışında diğer bütün enerji kaynaklarının güneş enerjisinden kaynaklandığı ifade edilebilir.

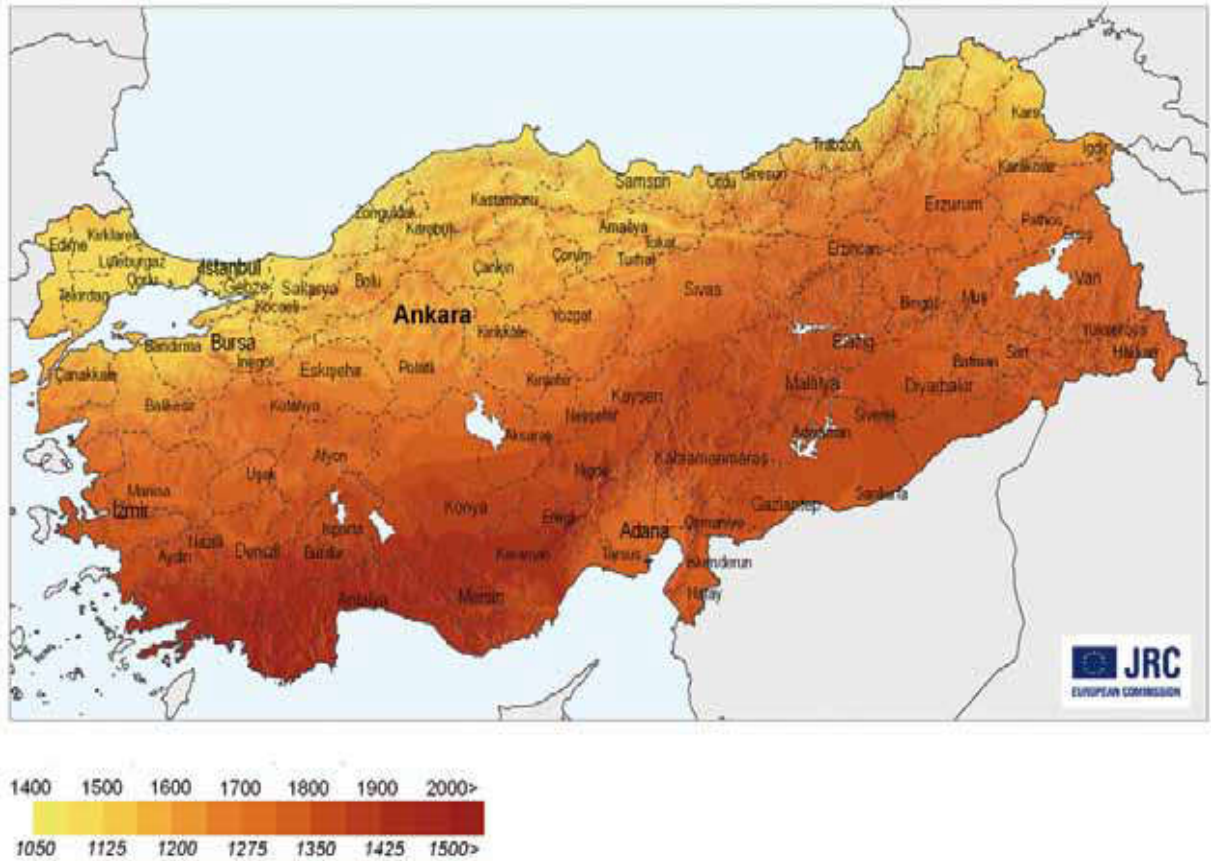
Güneşten gelen güç 11 TW (Tera Watt) olarak hesaplanmıştır ve bu haliyle dünya toplam enerji ihtiyacının 16000 katından daha fazladır. Yani güneş dünya için sonsuz bir enerji kaynağıdır.

Diğer enerji kaynaklarıyla güneş enerjisi karşılaştırıldığında şu avantajlar ön plana çıkmaktadır: Güneş, tükenmeyen bedava bir enerji kaynağıdır. Özellikle fosil yakıtlara göre son derece temiz ve çevre dostudur. Çünkü kül, duman, kükürt, karbon monoksit, karbondioksit v.s. gibi kirletici bileşenleri yoktur. Güneş enerjisi sistemlerinin bakımları kolaydır, işletme maliyeti düşüktür ve çok fazla karmaşık bir teknoloji gerektirmezler.

3.2.1 Türkiye ve Güneş Enerjisi

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli pekçok ülkeye nazaran daha iyi durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre 1966-1982 yılları arasında Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat ve günlük ortalama güneşlenme süresi toplamı ise 7,2 saatir. Ortalama toplam ışınım şiddeti ise $1311 \text{ kWh/m}^2\text{-yıl}$ ve günlük ortalama ışınım şiddeti toplamı $3,6 \text{ kWh/m}^2$ dir. Gerekli yatırımların yapılması halinde Türkiye yılda birim metre kare başına ortalama olarak 1100 kWh 'lik güneş enerjisi üretebilir. (Tsoutsos ve ark., 2005; Şen, 2004)

Türkiye'nin özellikle güney bölgeleri güneş enerjisinden elektrik üretimi için çok elverişlidir. Avrupa'da bu potansiyele denk düşebilecek pek az sayıda bölge bulunmaktadır. Türkiye'nin bu bölgelere göre avantajı, güneş enerjisi sistemi kurulabilecek alanın geniş olmasıdır. Örneğin Türkiye Almanya'ya göre güneşlenme açısından çok üstün konumdadır. Buna rağmen güneş enerjisi sektöründe Almanya lider konumundadır.



Şekil 3.4. Yıllık Güneş Işıma Değerleri (kWh/m²)

3.2.2 Güneş Enerjisi Uygulamaları

Yer yüzeyine gelen güneş ışığından ısı ve elektrik enerjisi üreten teknolojiler; tasarım ve uygulama açısından çok çeşitlilik gösterirler. Bununla birlikte güneş enerjisi sistemleri uygulamaları, termal ve fotovoltaik sistemler olmak üzere iki temel guruba ayrılabilir.

Termal uygulamalarda genel olarak; sıcak su eldesi, güneş enerjisi destekli ısıtma-soğutma sistemleri ve buhar üretimi ön plandadır.

Fotovoltaik (PV) uygulamalarında ise esas olan elektrik enerjisi üretimidir.

3.2.2.1 Fotovoltaik (PV) Sistemler

Fotovoltaik; “photo”, ışık ve “voltaic”, elektrik kelimelerinin birleşiminden türetilmiştir. PV (fotovoltaik) modülleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerden oluşan sistemlerdir. Yani PV modüllerin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, panel yüzeyine gelen güneş enerjisidir. PV modüllerin verimleri günümüzde %15-%20 arasında değişmektedir. Yani PV’ler, yüzeylerine gelen toplam güneş ışınımı enerjisinin ancak bu kadarını elektrik enerjisine çevirebilirler. Güçü arttırmak için çok sayıda PV modülü seri ya da paralel olarak birbirine bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilirler.

Fotovoltaikler bağımsız (stand-alone) çalışan sistemler olarak elektrik şebekesini olmadığı yerlerde elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılabilirler. Örneğin kırsal bölgelerde, yüksek yerlere kurulan haberleşme aktarıcı istasyonlarında, sinyalizasyon ve bağımsız aydınlatma uygulamalarında, deniz fenerlerinde, petrol boru hatalarında, ilaç ve aşuların soğutulmasında, hidrojen üretiminde etkili bir biçimde uygulanabilirler. Ayrıca son yıllarda ülke elektrik şebekesine bağlı olarak çalışan sistemlerin kullanımını da hızla yaygınlaştırmaktadır.

Bir PV hücre, yarı iletken n-tipi ve p-tipi bölgeler oluşturularak gerçekleştirilebilir. Oluşturulan bu n-tipi ve p-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki p-n eklemi kesiminde, doğal olarak bir elektrik alanı kurulur. Yarıiletken malzemenin PV hücre olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik olayın sağlanması gerekir. Fotovoltaik olay iki aşamada sağlanır:

İlk adımda eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur.

İkinci adımda elektron-hol çiftleri bölgedeki elektrik alan yardımı ile birbirlerinden ayrılır. Böylelikle, birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, PV hücrenin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar.

Fotovoltaik olay tamamen bir fiziksel olgudur. Güneş ışığı güneş enerjisinin fotonları veya parçacıklarından oluşur. Bu fotonlar güneş spektrumunda farklı dalga boylarına karışıklık gelir. Fotonlar PV hücreye çarptığında ışığın bir kısmı yansır, bir kısmı emilir, bir kısmı da boylu boyunca geçip giderler. Sadece emilen fotonlar elektrik üretirler. Fotonun enerjisi hücre atomundaki bir elektrona transfer edilir. Oluşan enerji ve elektron normal pozisyondan ayrılarak bir elektrik devresinde akım halini alır.

PV modüllerinden elde edilen elektrik enerjisi doğru akımdır (DC). Eğer bu akım şebeke elektriği gibi kullanılacaksa bir inverter (çevirici) yardımıyla alternatif akıma (AC) dönüştürülmelidir (Ayvaz, 1997).

PV modüllerinde güneş ışığını absorbe eden çeşitli malzemeler bulunmaktadır. Uygulamalarda en çok ince film fotovoltaik teknolojisi ve özel olarak üretilmiş amorf silisyum kullanılmaktadır. Bunun önemli bir sebebi; hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) materyalinin güneş ışınımını diğer kristal silisyum malzemelerden daha iyi absorbe edebilmesidir. Bu yüzden amorf silisyumdan yapılmış güneş pilleri için, kristal silisyumdan yapılmış fotovoltaiklerden daha az malzeme gerekir.

3.2.2.2 Fotovoltaik Yapımında Kullanılan Malzemeler

Güneş pilleri için önemli olan fotoiletkenliktir. Güneş pillerinin veriminde 1978'den beri büyük artışlar oldu. 1978'de pil verimi %4, 1982'de %10 iken günümüzde %13'e kadar yükselmiştir (Erdoğan ve ark.).

a-Si:H ; a-Si'e göre farklı bir çok özelliklere sahiptir. a-Si filmlerde fotoiletkenlik ihmal edilebilir. Buna karşılık a-Si:H filmlerde büyük bir fotoiletkenlik olayı gözlenmektedir.

Tarihsel olarak Metal-Yalıtkan-Yarı iletken (MIS), Schottky engeli, p-i-n ve n-i-p homojonksiyon, heterojonksiyon ve üst üste (stacked) jonksiyon gibi birçok amorf silisyum devre eleman yapıları incelendi. Konvansiyonel olarak p-i-n ve n-i-p hücreleri arasındaki fark, yazılan ilk tabakaya güneş ışığının düştüğünün gösterilmesinden ibarettir. Homojonksiyon tek bir materyalin kullanıldığını gösterir. Heterojonksiyonda ise pencere tabakası farklı materyalden yapılmıştır.

300 K sıcaklıkta pil veriminin 27.3%, 21.4%, 10.3% gibi kullanım sürelerine bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca her 10 K artışta 1%'lik bir verim azalması tespit edilmiştir (Omar, 2005).

3.2.2.3 Fotovoltaik sisteminin avantajları

Fotovoltaik sistemin avantajları şu şekilde sıralanabilir: Temel enerji kaynağı olan güneş enerjisi sonsuzdur ve bedavadır. Statiktir yani sistemi yıpratabilecek herhangi bir hareketli bir parçası yoktur ve bu yüzden aşınmaz. Bakım-onarım masrafı ya yoktur ya da çok azdır. Kirletici gaz salınımı yoktur ve zararlı emisyonlar içmez. Modülerdir, her yere kolayca montajı yapılabilir.

Sistemlin dezavantajları ise; nispeten ileri teknoloji gerektirir. Pahalı bir sistemdir, yatırım maliyetleri yüksektir.

3.2.3 Türkiye'de (PV) Sistemler

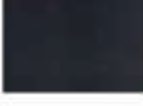
Türkiye gerek dünyada, gerekse Avrupa Birliği ülkeleri arasında, PV sistemlerde en az gelişme sağlayan ülkeler arasındadır. AB üye ülkeleri arasında, 2010 yılında toplam enerjinin %12'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması, toplam elektrik tüketiminin % 22'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarına dayandırılması hedeflenmiştir. Bunun yanısıra AB'ye tam üyelik sürecinde olan Türkiye, enerji konusunda Avrupa Birliği'ne uyum sağlamayı amaçlamaktadır (Aktacir, 2009).

3.2.4 PV Sistemi Ana Bileşenleri

PV güneş panelleri çeşitli uygulamalara bağlı olarak akümülatörler, invertörler, solar kontrol cihazı ve elektronik destek devreleri ile birlikte bütünleşik bir PV sistemini oluştururlar.

3.2.5.1 Fotovoltaik Panel Ve Çeşitleri

Fotovoltaik panel çeşitleri ve onların özellikleriyle ilgili bir sınıflandırma şekil 2.7. de verilmiştir.

CİNS	BOYUT	VERİM	WPEAK/M ²	WPEAK/ HÜCRE
	POLİKRIŞTALİNE 156x156 125x125	16%	120	1.46 - 3.85
	MONOKRIŞTALİNE 156x156 125x125	18%	130	2.60 - 4.02
	MONOKRIŞTALİNE- YÜKSEK VERİM 125x125	22%	155	2.90 - 3.11
	MONOKRIŞTALİNE- YARI SAYDAM 125x125	17%	105	1.90 - 3.11
	ASİ (amorf silikon) İNCE FİLİM 576x976	5%	50	32
	ASİ İNCE FİLİM 10% YA 20% OPAKLİK 576x976	4%	40-45	27

Şekil 3.5. Fotovoltaik panelelerinin sınıflandırılması (Aktacir, 2009)

3.2.5.2 Solar Kontrol Cihazı, Şarj düzenleyici:

Akımı kontrol ederek aküyü şarj eder, akü tam dolduğunda gelen akımı keser ve akünün kapasitesi belirli bir limitin altına düşünce aküden olan tüketimi keser.

3.2.5.3 Depolama Grubu (Batarya Bank ya da Akümülatör)

Güneş enerjisinin olmadığı ve ya yetersiz kaldığı durumlarda batarya grupları kullanılır. Güneş ve rüzgar enerjisi sistemlerinde kuru veya jel tipi bakım gerektirmeyen aküler kullanılmalıdır .

3.2.6 Güneş Enerjisinden Hidrojen Üretimi

Güneş enerjisi kullanarak hidrojen elde etmek için kullanılan yöntemler dört ana grupta toplanabilir;

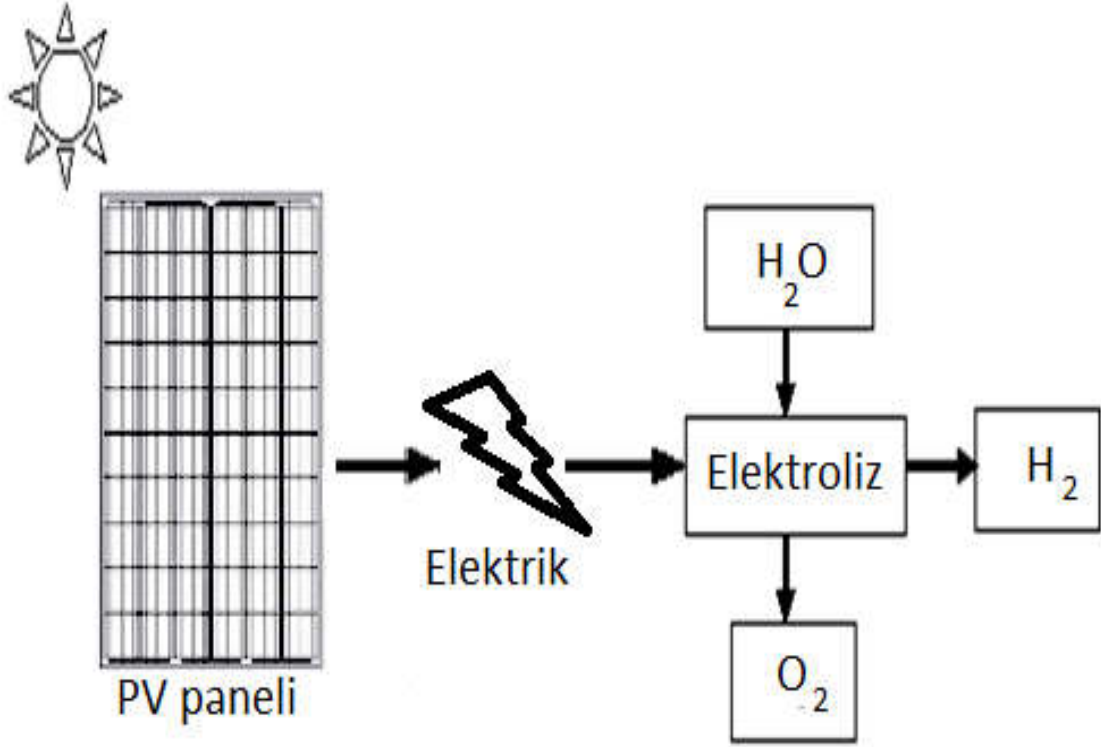
- 1) Fotovoltaik sistemler (PV)
- 2) Fotoelektrokimyasal sistemler
- 3) Fotobiyolojiksel sistemler
- 4) Güneş termal enerjisi.

3.3 Hidrojenin Fotovoltaik Sistemlerden Ve Elektroliz Yöntemi İle Üretimi

Hidrojen üretimi için en basit yöntem elektroliz yöntemidir. Bu yöntemde doğru akım kullanılarak su molekülü hidrojen ve oksijene atomlarına ayrılır. Şekil 2’de fotovoltaik teknolojiyi kullanarak hidrojen üretiminin şematik resmi verilmiştir.

Elektroliz için gerekli olan elektrik enerjisi genellikle güneş enerjisinden doğrudan elektrik üreten fotovoltaik gözelerden sağlanmaktadır. Elektroliz hücresi için gerekli elektriğin sağlanmasında fotovoltaik paneller yerine, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile suyun buharlaştırılması ve bir buhar türbininde kullanılarak üretilen elektriğin tekrar elektroliz hücrelerinde kullanılması şeklinde yöntemlere de başvurulabilir. Burada esas olan yüksek çevrim verimi ve düşük maliyettir.

Fotovoltaik-elektrolizör sistemlerde güneş enerjisi ile hidrojen üretimi iki aşamada gerçekleştirilir. İlk aşamada, güneş pili vasıtasıyla doğru akım elde edilir ve daha sonra bu akım bir elektroliz hücresinin elektrotlarına verilerek suyun oksijen ve hidrojene ayrıştırılması sağlanır. Güneş hücrecikleri güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı-iletken sistemlerdir. Paneller birçok fotovoltaik (PV) hücreden meydana gelir ve bu sistemler bazen tek başlarına bazen de diğer konvansiyonel kaynaklarla beraber kullanılabilirler. Güneş hücrecikleri verimi ortalama olarak % 18, elektroliz hücresi verimleri ise % 75-80 arasında alınabilir. Elektroliz verimi, verilen bir akım değeri için ayrışma voltajını düşürmekle artırılabilir. Voltaj düşürme işlemi ise elektrot yüzeyi elektroliz işlemini hızlandıracak şekilde ayarlanmalıdır.



Şekil 3.6. Fotovoltaik hidrojen üretim sistemi

3.4 Hidrojen Yakıt Pilleri

Yakıt hücreleri; çevreye zarar vermeyen enerji dönüşüm teknolojileridir. Yakıt hücreleri, yakıtın kimyasal enerjisini elektrolit sistemde devamlı olarak elektrik enerjisine çevirirler. Hidrojen yakıt hücrelerinde hidrojen ve oksijen arasında elektrokimyasal bir reaksiyon ile elektrik enerjisi elde edilir. Atık olarak su ve ısı elde edilir. Bu özelliği yakıt hücrelerini avantajlı kılar (Lee ve ark., 1998).

Bir yakıt hücresinin ana bileşenleri anot, katot ve bunların içinde bulunduğu elektrolitten oluşur. Elektrotlar, yüksek gaz geçirgenliğine sahip gözenekli yapıdadır. Tipik bir yakıt hücresinde, yakıt anoddan (negatif elektrot), oksitleyici (oksijen/hava) ise katoddan (pozitif elektrot) verilir. Yakıt ile oksijen arasında kimyasal bir reaksiyon olurken elektrik akımı ve ısı oluşur. Hava katot yüzeyi üzerinden geçerken, hidrojen veya hidrojen zengin gaz da anot yüzeyinden geçer. Elektronlar katoda doğru bir dış devre yoluyla taşınırlarken, hidrojen iyonları da elektrolit yoluyla oksijen elektroduna göç ederler. Katotta oksijen ve hidrojen iyonları ile elektronların reaksiyona girmesiyle su elde edilir. Elektronların dış devre yoluyla akışı ise elektrik üretir. Sonuçta ortaya

çıkan yan ürün sadece su ve ısıdır. Yakıt hücresi sistemi doğrudan bir yanma reaksiyonu değildir. Bu yüzden daha fazla elektrik üretilir. Tüm hidrojen yakıt hücrelerinde su, yakıt hücresi çalışma sıcaklığına göre sıvı veya buhar şeklinde açığa çıkar. Bir yakıt hücresinde oksitleyici olarak oksijen kullanılıyorsa su, hava kullanılıyorsa azot ve su açığa çıkar. Yakıt bileşiminde karbon bulunuyorsa sonuçta karbon dioksit oluşur.

3.4.1 Hidrojen Yakıt Pillerin Çeşitleri

Geliştirilmekte olan birçok hidrojen yakıt hücresi çeşidi vardır. Bunlar kullandığı yakıt ve oksitleyici türüne göre, yakıtın yakıt hücresinin dışında (external reforming) veya içinde (internal reforming) reaksiyona girmesine göre, elektrolit tipine göre vb. çok değişik şekillerde sınıflandırılabilir. Yakıt hücrelerinin en yaygın sınıflandırması hücrenin içinde kullanılan elektrolitin tipine göre yapılan sınıflandırmadır (Dinçer, 2014).

Yakıt hücreleri, farklı elektrolit tipine göre, örneğin sıvı çözelti, katı membran, seramik v.s. gibi sınıflandırıldığında altı çeşit yakıt hücresinden bahsedilebilir (Outeiro ve Carvalho, 2011).

Bunlar:

- Proton değişim zarlı yakıt pili
- Doğrudan metanol kullanan yakıt pili
- Alkalın yakıt pili
- Fosforik asit yakıt pili
- Erimiş karbonat yakıt pili
- Katı oksit yakıt pili

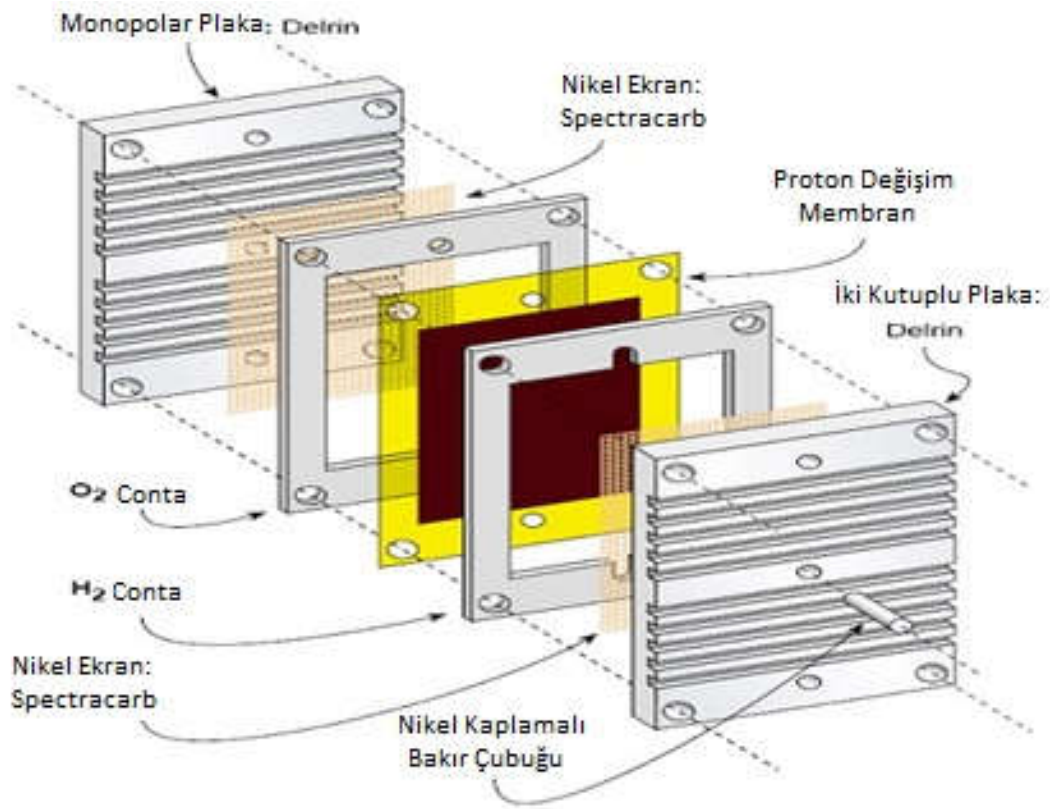
3.4.1.1 Proton Değişken Zarlı Yakıt Piller (PEM)

Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili PEMFC'ler 1960'ların başında General Electric tarafından icat edilmiştir. Katı polimer elektrolitli yakıt hücresi olarak ta adlandırılır. Bu tip yakıt hücrelerinde proton (hidrojen iyonu) geçirebilen membranlar kullanılmaktadır (Dadvar ve ark., 2015).

PEMFC yakıt pilinde elektrotlar platin ile kaplanmıştır. İki elektrotun arasına preslenmiş perflorlu sülfonik asit polimerler türünden proton ileten bir katı elektrolit

yerleştirilir. Buradaki katı elektrolit anot ile katot arasında bir gaz sütunu oluşturarak anottan katoda doğru hidrojen iyonlarının taşınmasını sağlar. Polimer elektrolitler gaz difüzyon kanalcıklarından oluşur. Bu kanallar elektrik akımını toplama görevini yerine getirirler. PEM'lerin çalışma sıcaklığı 80-90 °C civarındadır. Bir PEM yakıt pili için bu düşük bir sıcaklıktır. Çalışma basınçları ise 1-8 atm arasındadır. Bu tip yakıt hücreleri belli bir nem oranında hidrojen ve oksijen ile çalışabilmektedir (Abd El Monem ve ark., 2014).

Yüksek güç yoğunluğu, hızlı başlatılabilir ve değişken güç çıkışına uygun olması PEM'lerin ulaşım alanında kullanılabilmesini uygun kılmaktadır.



Şekil 3.7. Bir PEM Yakıt pilinin demontaj hali.

PEM yakıt hücresi çalışma mekanizması suyun elektrolizinin tam tersidir. Yakıt hücresi için reaksiyon formülü aşağıdaki gibidir (Asnaghi, 2007).

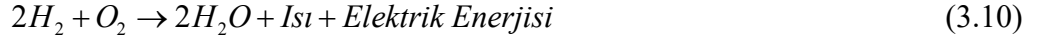
Anod tarafında,



Katod tarafında,



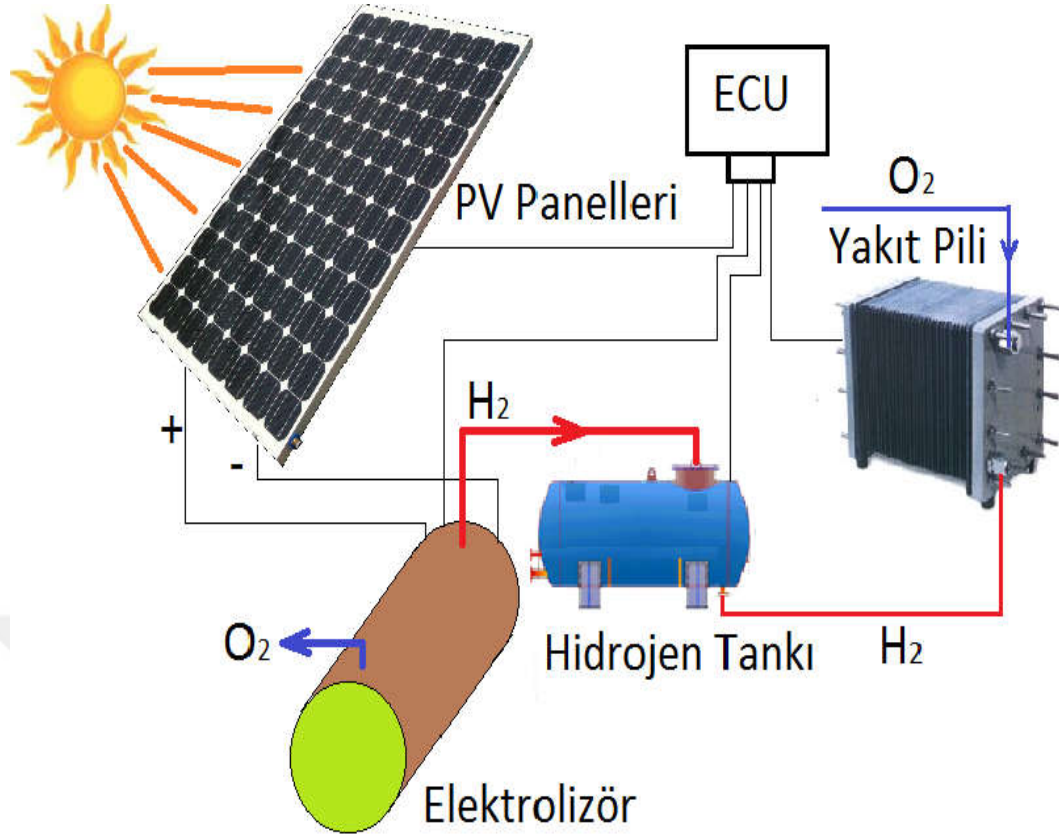
Toplam reaksiyon,(Salemme ve ark., 2009)



Bu reaksiyon sonucunda elektrik, su ve bir miktar ısı açığa çıkar. Açığa çıkan bu ısı miktarı evsel veya herhangi bir uygulama için kullanılarak yakıt hücresinden elde edilen toplam verim artırılabilir.

3.5 PV Paneller Aracılığı ile Elde Edilen Akımdan Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi

Saf hidrojen elde etmenin en iyi bilinen etkili yöntemi suyun elektroliz edilmesidir. Bunun için gerekli olan elektrik enerjisi PV paneller aracılığı ile güneş enerjisinden üretilebilir. Elektroliz için suyun belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması gerekir. Çünkü bu şekilde su molekülünü oluşturan atomlar arası bağ daha çabuk koparılır. Suyun ısıtılması işlemi de yine bir güneş kollektörü aracılığı ile yapılabilir.



Şekil 3.8. Bu proje kapsamında kurulması planlanan simulasyon sisteme ait şematik görünüş

3.6 MATLAB – SIMULINK

Simulink uygulaması karmaşık olan sistemlerin tasarlanmasına ve simülasyonuna imkan sağlamaktadır. Günümüzde Mühendislik sistemlerinin simülasyonun önemli derecede artmaktadır. Sistemlerin tasarım konusunda büyük ölçüde bilgisayar simülasyonlarından faydalanmakta, gerektiğinde tasarımın test aşamaları da bilgisayarlar yardımıyla yapılmaktadır. Bu ise prototiplere olan ihtiyacı azaltarak maliyetlerin büyük bir ölçüde düşmesini sağlamaktadır.

Günümüzde mühendislik alanında en yaygın kullanılan uygulamalardan MATLAB önde gelmektedir. Simulink, MATLAB programı ile birlikte bütünleşik bir şekilde çalışan bir benzetim ortamıdır. Sürekli ve ayırık zamanlı sistemleri, veya ikisini de içeren hibrit sistemleri desteklemektedir. İçerisinde birçok alt sistemi blok olarak barındırdığından “sürükle ve bırak” yöntemiyle birçok sistemi kısa bir zamanda kurarak simüle edebilir, ayrıca değişik durumlardaki sonuçları da test edilebilir. Bu nedenle Simulink bizlere zengin bir blok kütüphanesi sağlamaktadır.

3.6.1 Simulink Uygulamanın Temel Kavramları

Simulink Kütüphanesi:

Simulink çalıştırıldığı vakit karşımıza Simulink kütüphanesi gelir. Simulasyon yapılırken kullanılacak bloklar kategorilere ayrılmış bir şekilde burada bulunmaktadır.

Blok Diyagramlar:

Her blok sürekli ya da ayrık zamanda çıkış veren temel bir dinamik sistemi ifade etmektedir. Bloklar arasındaki hatlar giriş ve çıkışlardaki bağlantıları göstermektedir. Blok diyagramdaki blokların her biri belirli bir tip bloğun örneğini içerir. Bloğun tipi, bloğun giriş ve çıkışları, durumları ve zaman arasındaki bağıntıyı belirler.

Bloklar:

Bloklar Simulink'in ne şekilde simule edileceğini bildiği temel dinamik sistemleri ifade eder. Blokları programlama dillerinde kullanılan fonksiyonlara benzetmek mümkündür. Her bir dinamik sistem için yazılmış bir çeşit hazır fonksiyonlardır. Bize düşen yalnız bu tip hazır fonksiyonları kullanarak sistemimizi oluşturmaktır. Her hangi bir blok aşağıdaki bileşenlerin bir veya birkaçından oluşmaktadır:

- Giriş kümesi
- Durum kümesi
- Çıkış kümesi

Durumlar:

Bloklar bir çeşit değişken olan durumlara sahip olabilir. Durum, blokların çıkışını belirleyen ve şimdiki değeri, bloğun geçmiş durumları ve/veya girişlerinin fonksiyonu olan bir değişkendir. Duruma sahip olan bir bloğun şimdiki durumunu belirlemek için önceki değerlerini kayd edilmesi gereklidir. Duruma sahip olan bloğa, hafızalı blok denilmektedir. Çünkü bu bloklar şimdiki değerlerini belirlemek için önceki değerlerini kaydetmek gereklidir.

Simulink integrator bloğu duruma sahip bloklara bir örnek verilebilir. İntegral alıcı bloğu benzetimin başlangıcından o anki zamana kadar giriş sinyalinin integralini çıkış olarak verilmektedir. O anki zaman aşamasındaki integral değeri, integral alıcı bloğunun önceki giriş değerlerine bağlıdır. Bu nedenle integral, integral alıcı bloğunun durumudur.

Durumlu bloklara başka bir örnek de Simulink Hafıza (memory) bloğu da verilebilir. Memory bloğu girişlerindeki aldığı değerleri o anda kaydetmekte ve ilerleyen bir zamanda çıkışına veririr. Memory bloğunun durumları geçmiş giriş değerleridir.

Durumsuz bloklara bir örnek olarak Simulink Kazanç bloğu (Gain) verilebilir. Gain bloğu girişindeki alan değeri kazanç diye adlandırılan bir sabit değer ile çarpmasıyla çıkışına verir. Gain bloğunun çıkışı ise bütünüyle o anki giriş değeri ve sabit olan kazançla belirlenir. Bu nedenle Gain bloğunun durumu yoktur.

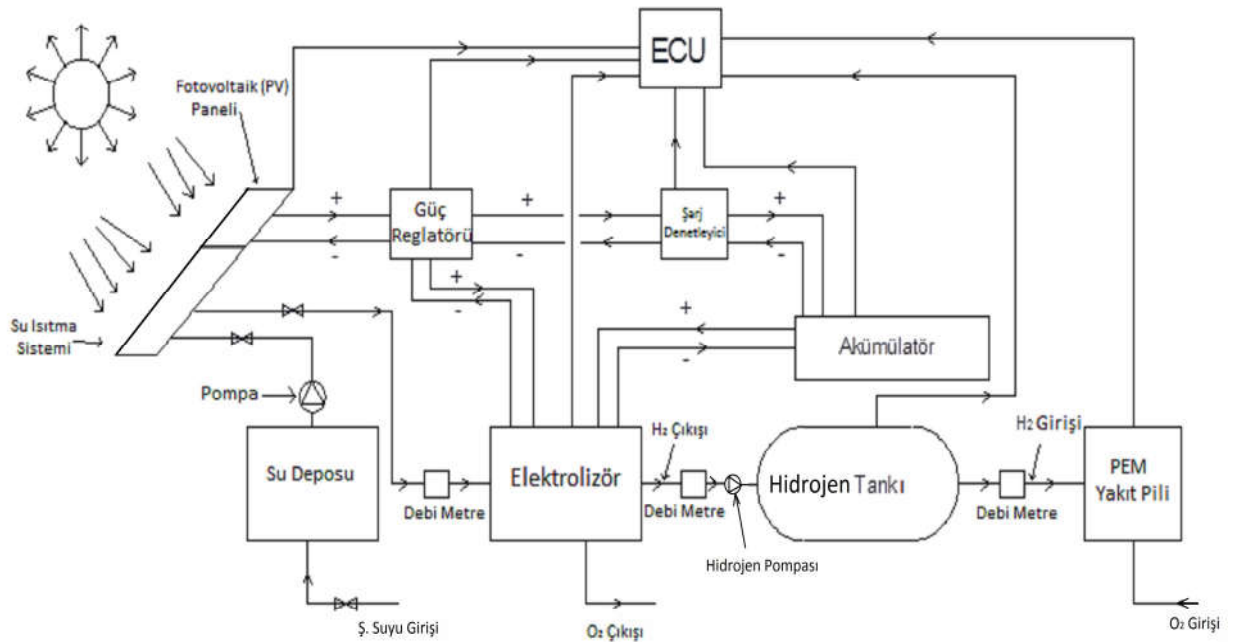
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma teorik olarak planlanmıştır. Çalışmada MATLAB – SIMULINK™ ile modelleme yapılmış ve bu model ayrıca ilave MATLAB yazılımlarıyla desteklenmiştir.

Proje ile oluşturulacak olan deney simülasyonu ile ilgili matematik ve teorik model, takip edilecek sayısal çözüm yöntemleri ve metodoloji ile ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda sunulmuştur.

Çalışmanın önemli ve asıl bölümü matematik ve teorik modelledir. Ortam ve çevre ile ilgili tüm veriler Konya ili için dikkate alınıp değerlendirilecektir. Asıl enerji kaynağı güneş olduğu için meteorolojik veriler oldukça önemlidir. Konya için yaz ve kış aylarına ait yıllık güneş ışınımı ortalama değerleri, bölgeye düşen ortalama radyasyon değerleri v.s. gibi önemli meteorolojik veriler Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılacak simülasyon sistemin şematik görünüşü Şekil 4.1 ile verilmiştir.



Şekil 4.1. Bu çalışma kapsamında kurulması planlanan simülasyon sisteme ait şematik görünüş

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi sistemin elektrik enerjisi PV panellerden elde edilmektedir. PV panel sisteminin paralelinde elektrolizörün giriş suyunu ısıtmak üzere bir güneş kollektörü kullanılmıştır. Kollektörden çıkan sıcak su doğrudan elektrolizöre gönderilmektedir. PV den elde edilen elektrik enerjisi bir güç regülatöründen geçtikten sonra bir kısmı elektrolizör birimine ve kalan kısmını da depolanmak için şarj denetleyicisi birimine, oradan da akümülatöre gönderilmektedir. Elektroliz yoluyla elde edilen H₂ bir depoda toplanmaktadır. Elektrolizden sonra ortaya çıkan O₂ molekülü çevreye bırakılmaktadır. Bu hidrojen tankı basınçlı bir tank olabilir. Bu durumda hidrojeni depoya basmak için küçük bir kompresör gerekebilir. Hidrojen yakıt pilinin enerji üretmek için ihtiyaç duyduğu hidrojen bu depodan çekilecektir. Yakıt pilinin ihtiyacı olan O₂ ise havadan sağlanır. Sistemin ikinci kısmında tekrar elektrik enerjisi üretmek üzere bir PEM yakıt pili kullanılmıştır. Bütün birimleri denetlemek için bir Elektrik Kontrol Ünitesi (ECU) kullanılmış ve her birim bu kontrol ünitesi ile irtibatlandırılmıştır.

4.1. Matematik Model Oluşturma Çalışmaları

Sudan hidrojen ve oksijen ayırma işleminde sisteme giren enerji, entalpi değişimine eşittir. (Padin ve ark., 2000)

$$\Delta H = \Delta G + \Delta Q = 79 \text{ W/mol} \quad (4.1)$$

Burada ΔG , Gibbs serbest enerjisi ve ΔQ , ısı enerjideki değişimdir.

4.1.1. Fotovoltaik sistemin enerji dönüşümü

PV sisteminde güneş enerjisi elektrik enerjisine dönüşmektedir. Üretilen elektrik enerjisi aşağıdaki gibi yazılabilir (Padin ve ark., 2000):

$$E_{\text{elec}} = \eta_e A q_1 R_{\text{Düz}} \quad (4.2)$$

Burada;

E_{elec} : Üretilen elektrik enerjisi, W

η_e : Güneş kollektör sisteminin elektrik verimi

A : Güneş kollektör sisteminin alanı, m^2

q_1 : Birim alan başına etkili olan güneş enerjisi ısı akısıdır, W/m^2

$R_{Düz}$: Düzeltme faktörüdür.

Üretilen ısı enerjisi;

$$E_t = \eta_t A q_1 R_{Düz} \quad (4.3)$$

Şeklindedir (Padin ve ark., 2000).

Burada:

E_t : Üretilen ısı, W

η_t : Güneş kollektör sisteminin ısı verimi

Kollektörün toplam enerjisi ise;

$$E_{etk} : E_{ele} + E_t \quad (4.4)$$

bağıntısından hesaplanır.

4.1.2. Elektrolizöre Giren Enerji:

Elektrolizör makinasına elektrik enerjisi iki şekilde girmektedir. PV'den üretilen elektrik enerjisinin tamamı güç regülatörüne gelmektedir. Güç regülatöründen çıkan enerjinin bir kısmı elektrolizöre gönderilirken geriye kalan kısmı güneş enerjisinin yetersiz olduğu durumlarda, elektrolizörde ihtiyaç duyulan enerjiyi temin edecek bir akümülatörde depolanmaktadır. Elektrolizörün çektiği enerji aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Rzayeva ve ark., 2001).

$$E_{elektroliz} : U/R_{Elec} (6.5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{Elec} \cdot \ln(P_{Elec})) \quad (4.5)$$

Burada:

U : Suyun birim kütlesinin ayrıştırılması için gereken potansiyel farkı olup, $U=1.233 - 1.48$ V aralığındadır.

R_{Elec} : Elektrolizör direnci; Ω

T_{Elec} : Elektrolizörün sıcaklığı, K

P_{Elec} : Elektrolizörün basıncı, MPa ya da kPa

Güneş kollektörü aracılığı ile elektrolizöre giren ısı enerjisi;

$$E_{th,elek} = T \cdot \Delta S / t \quad (4.6)$$

şeklinde verilir (Padin ve ark., 2000).

Burada;

ΔS : Suyun birim kütlesinin ayrışması için entropi değişimi olup $\Delta S = 116$ J/K dir.

T : Elektrolizör sıcaklığı, K,

t : Zamandır, s

Elektrolizörün çektiği toplam enerji:

$$E_{elek.to} = E_{elektroliz} + E_{th,elek} \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilir.

4.1.3. Güç Regülatörü

Kollektörden üretilen elektrik enerji direkt olarak güç regülatörüne girmektedir. Güç regülatöründe enerjinin bir kısmı elektrolizörün ihtiyacına binaen elektrolizör makinasına girmekte ve geriye kalan ekstra enerji şarj denetleyicisi üzerinden akümülatörde depolanmaktadır. Üretilen ekstra enerjisi aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Omar, 2005).

$$E_{ex} = E_{ele} - E_{elek.to} \quad (4.8)$$

4.1.4. Şarj Denetleyicisi

Güç regülatöründen çıkan ekstra enerji depolanmak üzere şarj denetleyicisi üzerinden akümülatöre gönderilir. Şarj denetleyicisi için aşağıdaki bağlantı kullanılabilir ;

$$E_{in} = \eta_{in} (E_{ele} - E_{elektroliz}) \quad (4.9)$$

Burada:

η_{in} : Şarj denetleyicisi verimidir

4.1.5. Akümülatör Sistemi:

Akümlatör sistemi elektrolizörün elektrik enerjisi ihtiyacını güneş olmadığı ya da az olduğu zaman sağlamaktadır. Akümülatör için denklem :

$$E_{pil} = E_{in} * \eta_{pil} \quad (4.10)$$

olarak yazılabilir.

Burada:

η_{pil} : Akümülatörün verimidir ve yaklaşık 0.9 olarak alınabilir.

4.1.6. Üretilen Hidrojen Miktarı:

Elektrolizörde üretilen hidrojen miktarı aşağıdaki ifade ile verilebilir (Padin ve ark., 2000):

$$m_{H_2} = E_{elek.to} / (9 * E_{elektroliz}) \quad (4.11)$$

4.1.7. Yakıt Pili Modeli İçin Gerekli Bağntılar

Hücrenin gerilimi (V_{cell}); bütün durumlarda aşağıdaki denklemi kullanılarak bulunabilir (Ziogou ve ark., 2011).

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (4.12)$$

Burada:

E_{Nernst} : Yüksüz gerilim, V

V_{act} : Aktivasyon gerilim düşümü, V

V_{ohm} : Omik gerilim, V

V_{conc} : Aşırı gerilim, V

Sistemin ürettiği elektrik enerjisi (Ziogou ve ark., 2011);

$$P = I \cdot V_{cell} \quad (4.13)$$

olarak verilmektedir.

Burada:

I : Akım, A

V_{cell} : Hücre gerilimi, V

Nernst denklemi aşağıdaki denklem ile verilir (Larminie ve ark., 2003).

$$E = E_0 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O} \cdot P^{0.5}} \right) \quad (4.14)$$

Bu eşitlikte:

E_0 : Referans gerilimi, V

R : Üniversal gaz sabiti, J/mol.k

T : Hücre sıcaklığı, K

F : Faraday sabitidir, °C/mol

P_{H_2} : Hidrojen kısmi basınç, atm

P_{O_2} : Oksijen kısmi basınç, atm

P_{H_2O} : Su buharı kısmi basınç, atm

P : Yığın içindeki toplam basınç, atm

olarak verilmiştir.

Aktivasyon gerilim düşümü Tafel bağlantı tarafından analiz edilebilir (Amphlett ve ark., 1995).

$$E_{act} = -0,9514 + 0,00312T - 0,000187.T.[\ln(I)] + 7,4.10^{-5}.T.[\ln(C_{O_2})] \quad (4.15)$$

Burada:

I : Akım yoğunluğu, A

C_{O_2} : Oksijen konsantrasyonu, mol.cm⁻³

C_{O_2} hücre dizisi sıcaklığının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir (Amphlett ve ark., 1995).

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08.10^6 \exp(-498/T)} \quad (4.16)$$

Aktivasyon aşırı gerilimi bağlantı 4.12'de bir gerilim düşümü olarak görünmekte ve E_{act} Denklem 4.15'de bütün dizinin her tarafında negatiftir. Alttaki Denklem bu terimin negatifliğinden sakılmak için kullanılmaktadır (Amphlett ve ark., 1995).

$$V_{act} = - E_{act} \quad (4.17)$$

Elektrot-elektrolit ara yüzeyinde yüklenen çift katman kapasitansının etkisi aşağıdaki bağlantı ile ifade edilmiştir (Larminie ve ark., 2003):

$$\frac{dV_{act}}{dt} = \frac{I}{C_{dl}} - \frac{V_{act}}{R_{act} \cdot C_{dl}} \quad (4.18)$$

Burada:

C_{dl} : Çift katman kapasitansı, F

R_{act} : Aktivasyon direnci, $k\Omega \cdot cm^2$

R_{act} , aşağıdaki denklemden bulunabilir (Khan ve Iqbal, 2005).

$$R_{act} = \frac{V_{act}}{I} \quad (4.19)$$

R_{act} hücreye akım verildiği zaman efektif direnç olarak kullanılır ve aktivasyon aşırı gerilimine (V_{act}) katkıda bulunur. Başka taraftan bağlantı 4.18, zamanın her hangi örneğinde V_{act} 'ı belirlemesi için kullanılabilir. Bu nedenle bu bağlantılar ayrı olarak kullanılması gereklidir ve değiştirilmesi mümkün değildir.

Ortalama akım yoğunluğunda gerilim düşümü hemen hemen doğrusaldır ve doğal durumda omiktir (Ceraolo ve ark., 2003).

$$V_{ohm} = I \cdot R_{mem} \quad (4.20)$$

Burada:

R_{mem} : Membran direncidir, $k\Omega \cdot cm^2$

Membran direnci ise:

$$R_{mem} = \frac{t_m}{\sigma} \quad (4.21)$$

şeklinde verilir (Ural ve ark.).

Burada:

t_m : Membran kalınlığını, cm

σ : Membran iletkenliğidir.

Membran su kapasitesi farklı faktörlere bağlıdır. Bunlar ise; elektron hareketi nedeniyle anot tarafından katoda doğru su akışı, reaktantların dış su hacimleri ve katot tarafından anoda doğru geri su difüzyonu gibi olaylardır (Khan ve Iqbal, 2005). Su akışının etkisi önemli bir faktör olmasından membran proton konsantrasyonu yalnız hücre akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğu varsayılabilir (Ceraolo ve ark., 2003).

Ampirik bir diferansiyel denklem proton konsantrasyonunu (C_{H^+}) tanımlamak için çözülebilir ve alttaki bağlantılar membran iletkenliğini (σ) hesaplanmak için kullanılmaktadır (Marr ve Li, 1997).

$$\frac{dC_{H^+}}{dt} + \frac{C_{H^+}}{\tau_{H^+}} = \frac{1 + \alpha_H + I^3}{\tau_{H^+}}$$

$$\sigma = \frac{F^3}{RT} D_{H^+} \cdot C_{H^+} \quad (4.22) \text{ ve } (4.23)$$

Çok yüksek akım yoğunluklarda, hücre potansiyeli kütle-geçiş sınırlamalar nedeniyle hız ile azalmaktadır. Bu dğrusal olmayan konsantrasyon aşırı gerilimi olarak adlandırılmaktadır (Kim ve ark., 1995).

$$V_{\text{conc}} = a \cdot e^{(bI)} \quad (4.24)$$

Burada:

$$a = 1,1 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot (T-273), \text{ V}$$

$$b = 8 \cdot 10^{-3}, \text{ cm}^2 \cdot \text{mA}^{-1}$$

olarak **a** ve **b** katsayıları sıcaklıkla değişir (Kim ve ark., 1995).

Tablo 4.1. Yakıt pili model parametreleri

Sembol	Parametere	Değer	Birim
E_0	Referans gerilim	1.229	V
R	Üniversal gaz sabiti	8.314	$J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
F	Faraday sabiti	96485	$C \text{ mol}^{-1}$
T	Yığın sıcaklığı	353.15	K
P	Hücre basıncı (Gemmen, 2001b; Gemmen, 2002)	1.2	atm
t_m	Membran kalınlığı (Wohr ve ark., 1998)	$175 \cdot 10^{-4}$	cm
C_{dl}	Çift katman kapasitansı (Ceraolo ve ark., 2003)	$0.035 \cdot 232$	F
τ_{H^+}	Zaman sabiti (Ceraolo ve ark., 2003)	12.78	s
α_{H^+}	İlgili parametre (Ceraolo ve ark., 2003)	5.78	$\text{cm}^6 \text{ A}^{-3}$
D_{H^+}	Difüzyon katsayısı (Wohr ve ark., 1998)	$0.85 \cdot 10^{-6}$	cm s^{-1}

(4.12) - (4.24) nolu bağlantılar ile hücre gerilimi (V_{cell}) akım yoğunluğu, reaktant basıncı, hücre sıcaklığı ve membran hidratlamanın bir fonksiyonu olarak çözülebilir. Eğer bütün hücreleri seri olarak bağlanılmışlarsa yığın gerilimi hücre sayısı ile hücre geriliminin çarpımına eşittir(Khan ve Iqbal, 2005).

$$V_{\text{stack}} = V_{\text{cell}} * N \quad (4.25)$$

Hücre gerilimi hidrojen, oksijen ve buhar kısmi basınçlarına bağlıdır. Bu durum bağlantı 4.14 ile ifade edilir. Bu kısmi basınçlar, anot veya katot tarafındaki reaktant akış oranları ve nemlilikleri tarafından oldukça etkilenir (Khan ve Iqbal, 2005).

Tüm gazların ideal olduğu varsayılarak ideal gaz kanunu dinamik analizler için genişletilebilir ve kütle korunum yasası, genel denklemler ile reaktant akış modeli kullanılabilir (Gemmen, 2001a).

$$\frac{V}{R.T} \frac{dP_g}{dt} = m_{in} - m_{out} \pm \frac{I}{n.F} \quad (4.26)$$

Burada:

V : Anot veya katot hacmi (m^3)

P_g : Gaz (oksijen, hidrojen, buhar) basıncı (atm)

m_{in} : Reaktant giriş akış oranı ($mol.s^{-1}$),

m_{out} : Reaktant çıkış akış oranı ($mol.s^{-1}$),

n : Reaksiyonda kullanılan her bir molekülü kapsayan elektron sayısı

ile gösterilmiştir.

Hücrenin içinde ani durumları belirlenmek için gaz reaktantların korunumları aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilmektedir:

Anot akışı model eşitlikleri (Gemmen, 2002);

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2}}{dt} = m_{H_2-in} - m_{H_2-out} - \frac{I}{2.F}$$

$$m_{H_2-out} = k_a(P_{H_2} - P_{amb})$$

$$m_{H_2-in} = FR_{H_2} . PC_{H_2} . CF_{H_2} \quad (4.27)$$

Katot akışı model eşitlikleri (Gemmen, 2002);

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dP_{O_2}}{dt} = m_{O_2-in} - m_{O_2-out} - \frac{I}{4.F}$$

$$m_{O_2-out} = kc(P_{O_2} - P_{amb})$$

$$m_{O_2-in} = FR_{O_2} . PC_{O_2} . CF_{O_2} \quad (4.28)$$

Katot su akışı model eşitlikleri (Gemmen, 2002);

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dP_{H_2O-C}}{dt} = m_{H_2O-in-C} - m_{H_2O-out-C} - \frac{I}{2.F}$$

$$m_{H_2O-out-C} = k_C (P_{H_2O-C} - P_{amb}) \quad (4.29)$$

denklemleriyle gösterilmiştir.

Tablo4.2. Reaktant akışı model parametreleri

Sembol	Parametre	Değer	Birim
P_{amb}	Çevreleyen basınç	1	atm
V_a	Anot hacmi	0.00159	m^3
k_a	Anot akıs sabiti	0.004	$mol\ s^{-1}atm^{-1}$
V_c	Katot hacmi	0.01	m^3
k_c	Katot akıs sabiti	0.0025	$mol\ s^{-1}atm^{-1}$
PC_{H_2}	H_2 (saf) yüzdesi(saf)	99%	-
CF_{H_2}	H_2 akıs oranı değisim faktörü (SLMP'den $mol.s^{-1},ye$)	$6.85 \cdot 10^{-4}$	-
PC_{O_2}	O_2 (saf)yüzdesi	21%	-
CF_{O_2}	O_2 akıs oranı değisim faktörü (SLMP'den $mol.s^{-1},ye$)	$6.084 \cdot 10^{-4}$	-
PC_{H_2O}	Katot buhar hacmi	1%	-

(Gemmen, 2001b; 2001a; Gemmen, 2002)

4.1.7. Elektrik Kontrol Ünitesi (ECU)

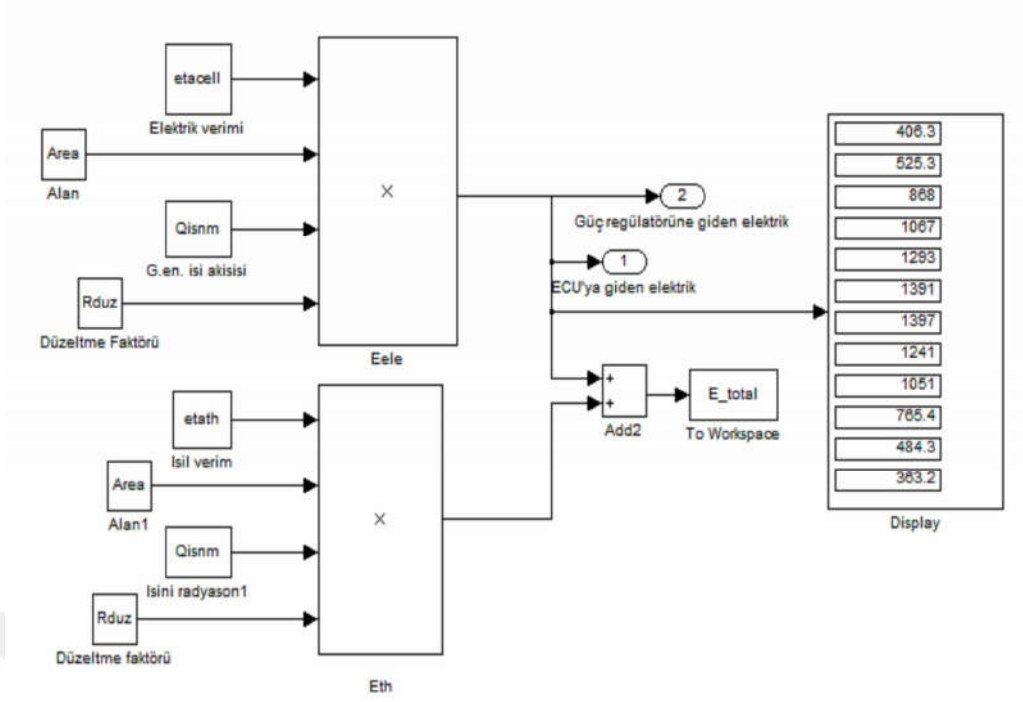
ECU'nun sistemin içinde yaptığı görevler aşağıda sıralanmıştır.

- 1) Üretilen toplam elektrik enerjisi (DC olarak) ECU'ya gider.
- 2) Güç regülatörden geçtikten sonra elektrolizöre giden doğru akım enerjisi sabittir. Kaç Wat olduğu ayarlanacak ve ECU'ya bildirilecektir.
- 3) Şarj denetleyicisi akümülatörü doldurmak için gönderilen ilave elektrik enerjisini denetler güç regülatöründen, PV'den gelen toplam enerjinin bir sabit kısmı elektrolize gönderilir, geriye kalan kısım şarj denetleyicisi aracılığıyla akümülatörü şarj etmek için kullanılır.

- 4) Şarj denetleyicisinden ECU'ya akümülatöre ne kadar enerji gönderildiği bilgisi gider. Akümülatörden ECU'ya akümülatörün yüzde kaçının dolu olduğu bilgisi gider. Elektrolizörden ise ECU'ya H₂ çıkışının miktarı bilgisi gider.
- 5) Hidrojen tankından ECU'ya tank içerisindeki H₂ gazının miktarı bilgisi gider.
- 6) PEM yakıt pilinden ECU'ya ne kadar H₂ girdiği bilgisi ve PEM yakıt pilinden buna karşılık ne kadar elektrik enerjisi elde edildiği bilgisi gider.
- 7) Elektrolizör çıkışında H₂ miktarı debimetre ile ölçülüp sonuç ECU'ya gönderilmelidir.
- 8) Ayrıca elektrolizöre giren suyun sıcaklığı ve miktarı da giriş bilgisi olarak verilmelidir.
- 9) PV'den enerji gelmediğinde elektroliz için gerekli olan enerji akümülatörden alınacaktır. Bunun da uygun bir şekilde gösterilmesi gerekir.

4.2. Sistemin Simülasyonu

Sistemin benzetimi için MATLAB-SIMULINK™ yazılımı kullanılmıştır. Programda yer alan ana sistem şekil 4.1' de görüldüğü gibi bazı alt sistemlerden (Sub systems) oluşmaktadır. Bu alt sistemlerin her birisi sistemi oluşturan çeşitli bileşenlerin çözümlerini ifade ederler. Bu sistemi oluşturan alt sistemler sırayla şöyledir: Güneş panellerinin ürettiği elektrik ve ısı enerjilerinin hesaplamaları ve simülasyonu, güç reglatöründeki elektrik enerjisini tüketicilere dağıtımını hesaplamaları ve simülasyonu, elektrolizörün elektrik ihtiyacı ve üretilen H₂ miktarının hesaplamaları ve simülasyonu, şarj denetleyicisinin hesaplamaları ve simülasyonu, akümülatörü şarj etmek üzere gönderilen elektrik enerjisinin hesaplamaları ve simülasyonu, yakıt pili hesaplamaları ve simülasyonu, son olarak da bu birimleri kontrol amacıyla sistemde yer alan ECU'nun yaptığı işlemlerin simülasyonudur.

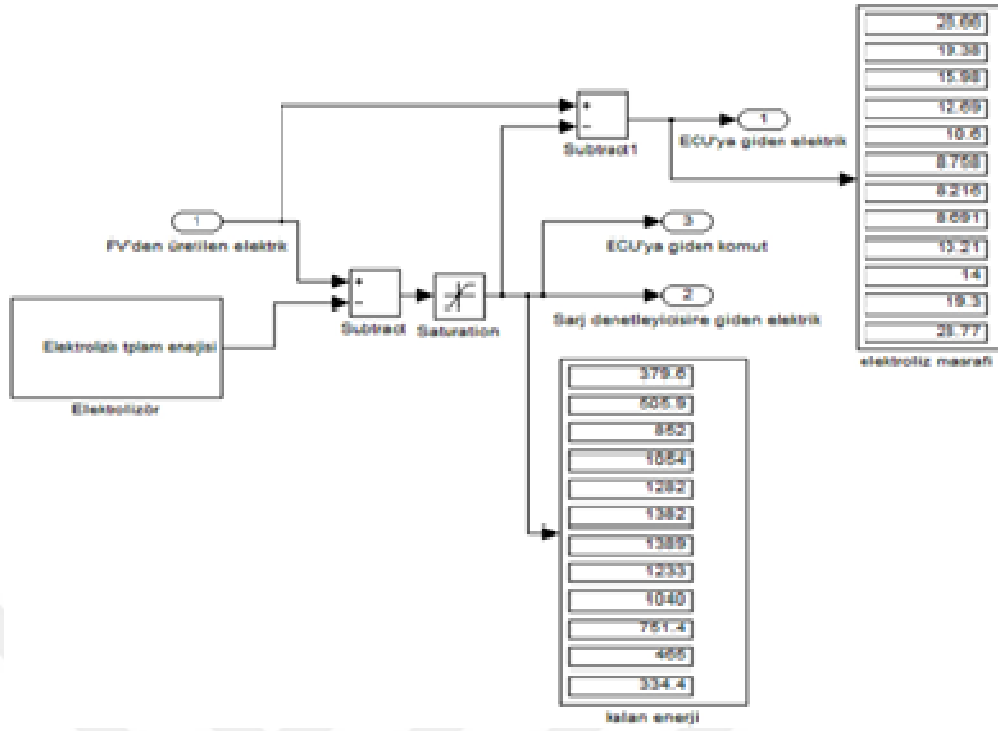


Şekil 4.3. Güneş kollektörü sisteminin blok diyagramı

Şekilden de anlaşılacağı gibi güneş kollektörü hesaplamaları için kullanılan denklemler, matematiksel modelden simolasyon modeline dönüştürülmüştür. Veri girişi olarak KONYA ili için meteoroloji bölge müdürlüğünden alınan aylık ortalama güneşleme süresi ve güneş ışıını kullanılmıştır. Bu değerler sistemin geometri değerleri ile birlikte sistemin girişinde yazılıp ve sistemin çıkışında sonuçlar gösterilmekte ve aynı anda kaydedilmektedir.

4.2.2 Güç Regülatörü

Güneş kollektöründen üretilen elektrik enerjisi tüketicilere dağıtılmak üzere güç ragülatörü birimine gider ve orada tüketicilerin ihtiyacına göre ayrılır.



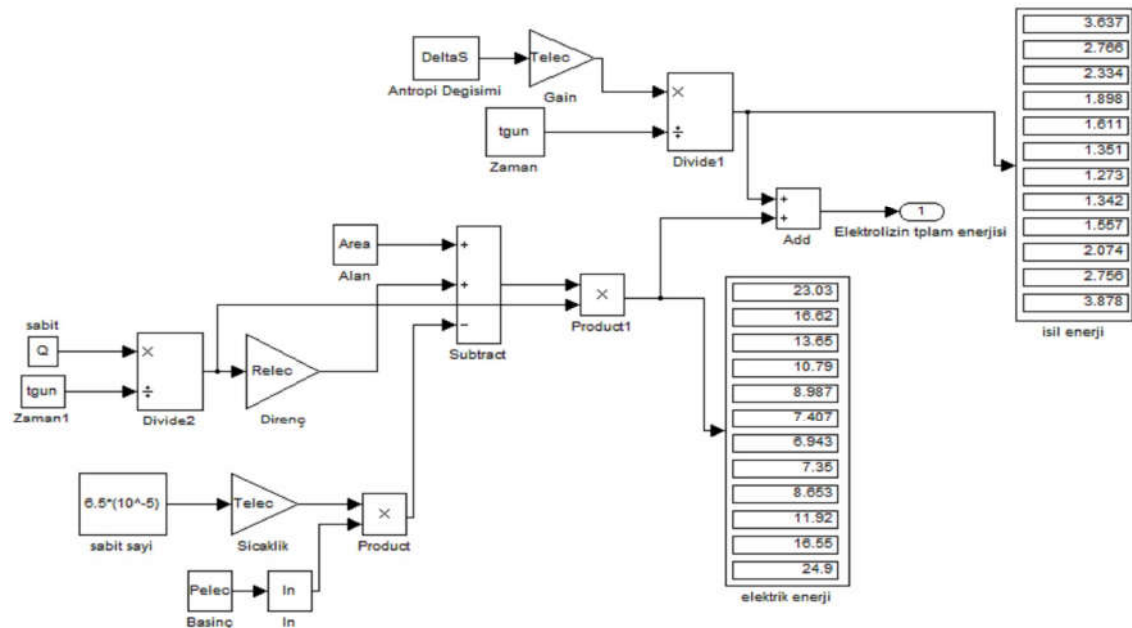
Şekil 4.4. Güç regülatörün blok diyagramı

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi PV’den gelen elektrik enerjisi güç regülatöründe regüle olduktan sonra elektrolizör için ihtiyaç olan miktar alınmakta, kalan kısım depolanmak üzere akümülatöre gönderilmektedir. Programda, toplam elektrik enerjisinin elektrolizörün kullanacağı elektrik enerjisinden daha az olabileceği öngörülmüştür. Güneş olmadığı ya da yetersiz olduğu zamanlarda, örneğin geceleyin, PV’de elektrik enerjisi üretilmediği için elektrolizörün ihtiyacı olan enerji akümülatörden karşılanmalıdır. Bunun için simülasyonda “Saturation” bloğu kullanılmıştır. Bu blok elektrik enerjisi negatif ya eksik olduğu zaman elektrik miktarını sıfır yaparak hata oluşmasını engeller. Güç regülatöründen çıkış verileri ECU’ya gönderilir. Şarj denetleyicisine giden elektrik enerjisi de hesaplanıp denetlenmekte ve veriler kaydedilmek üzere ECU’ya gönderilmektedir.

4.2.3 Elektrolizör Bölümü

Elektrolizör ünitesi elektrik enerjisi vasıtasıyla suyun moleküllerini parçalayarak hidrojen ve oksijen gazlarını elde etmektedir. Elektrolizör kendi elektrik ihtiyacını PV’den temin eder. Elektrolizörün elektrik enerjisi miktarı makinenin farklı kriterlere

bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu kriterler cihazın basıncı, çalışma sıcaklığı, çalışma saati olarak söylenilmektedir.

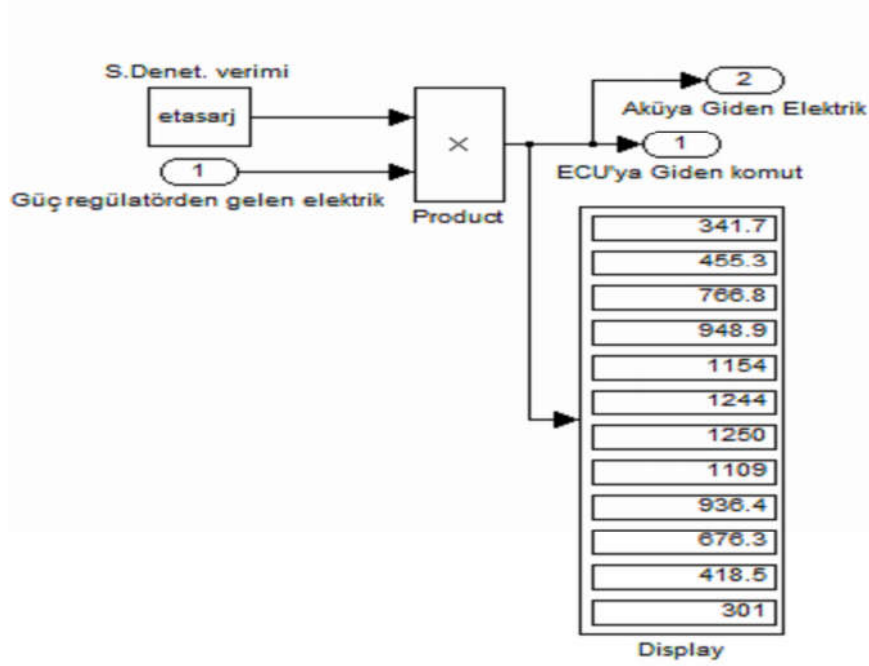


Şekil 4.5. Elektrolizörün blok diyagramı

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi elektroliz cihazı iki bölüm den oluşmaktadır. Birinci bölümü elektriksalsal enerji hesaplama bölümüdür. İkinci bölüm ise cihazın ısısal enerji bölümüdür. Bu iki bölümün toplamı watt cinsinden olarak cihazın enerji ihtiyacının miktarını belirlerler. Sonuçlar bir Display blokta gösterilmektedir. Bu bilgiler ECU'da kaydedilmektedir.

4.2.4 Şarj Denetleyicisi

Bu sistemde şarj denetleyicisi olarak adlandırılan cihazın görevi akünün şarj durumunu denetlemektir. PV'den ve güç regülatöründen geçen akımın bir kısmı elektrolizörde kullanılırken artı kalan kısım aküde depolanacaktır. Şarj denetleyicisinin hesaplamaları cihazın verimine bağlı olarak yapılır. Bu cihazın benzetim modeli şekil 4.d'te gösterilmektedir.

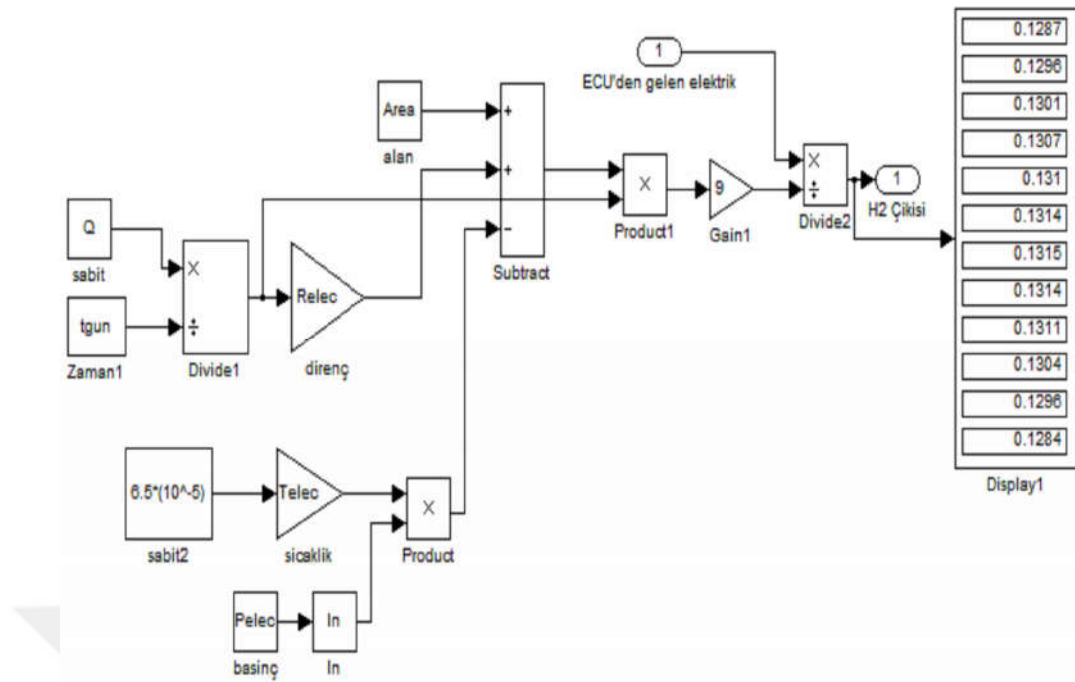


Şekil 4.6. Şarj denetleyicisi blok diyagramı

Bu şekilde güç regülatöründen gelen elektrik enerjisi cihazın verimi ile çarpılarak cihazın denetleme bölümüne oradan da aküye gitmektedir. Bilgi için Display bloğu kullanılmıştır. Ayrıca veriler kaydolmak üzere ECU'ya gitmektedir.

4.2.5 Hidrojen Üretimi

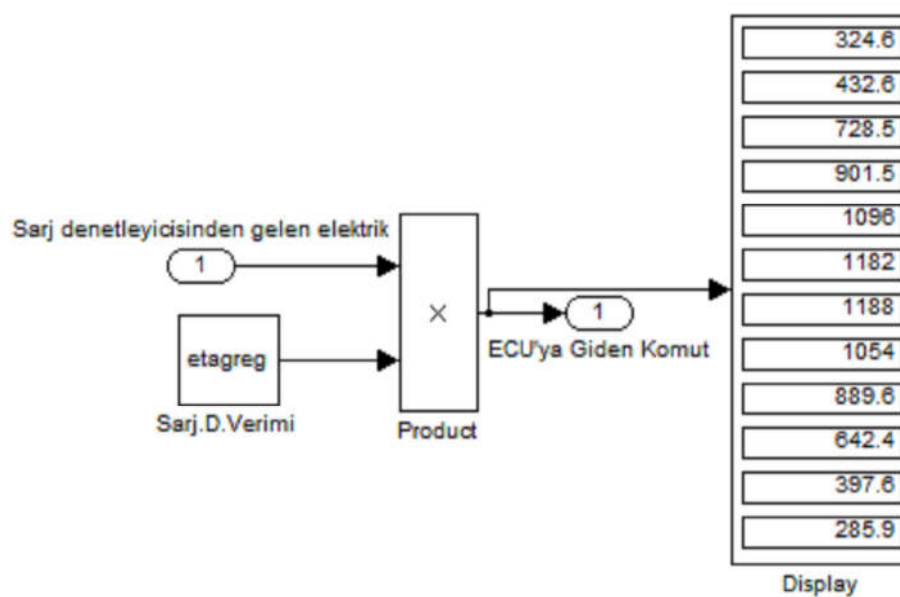
Elektrolizör içinde su molekülü parçalandıktan sonra açığa çıkan gazlar oksijen ve hidrojenidir. Bu çalışmada şekil 4.6'de gösterildiği gibi üretilen hidrojen gazı depolanarak sonradan pem yakıt pilinde kullanılacaktır. Oksijen gazı ise çevreye bırakılmaktadır. Hidrojen gazının ne kadar üretildiğini Display bloğunda gösterilmektedir. Bu hidrojen gazı bir basınçlı tankta depolanmaktadır. Hidrojen tankın basıncı sürekli 10 bar'da tutulmaktadır.



Şekil 4.7. Hidrojen üretimi blok diyagramı

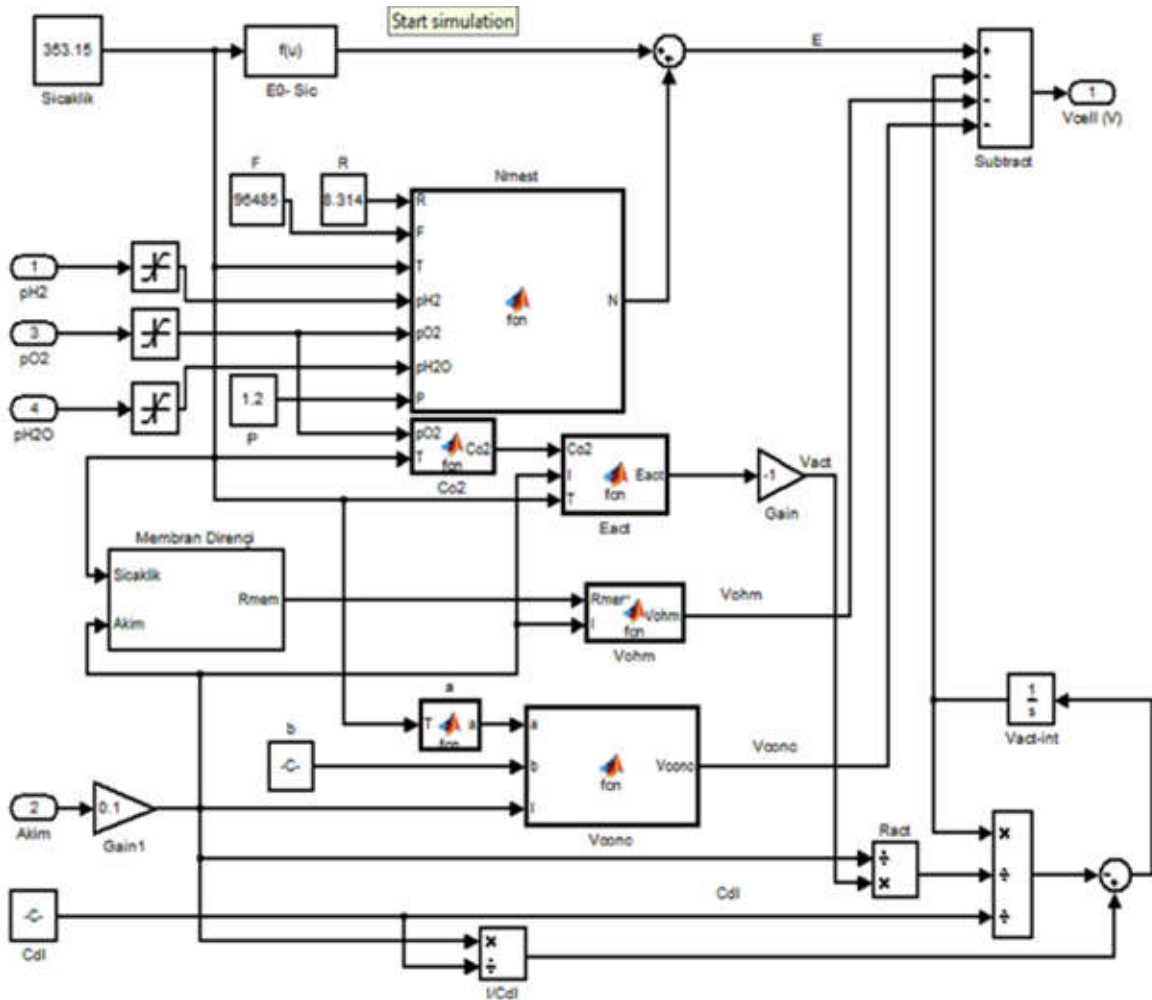
4.2.6. Akümülatör

Sistemden elde edilen elektrik enerjisinin bir kısmı aküde depolanmaktadır. PV’de üretilen elektrik enerjisi güç regülatöründen ve şarj denetleyicisinden geçtikten sonra akümülatöre gider. Şekil 4.7’de bu olay gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Akümülatör blok diyagramı

yoğunluğu yakıt pilinin giriş verileridir. Hidrojen, oksijen ve buhar basınçları 3.27, 3.28 ve 3.29 numaralı denklemlerden bulunabilir. Bu terimler açık devre hücre potansiyelini belirlemek için Denklem 3.12’de kullanılabilir. Hücre potansiyeli yığındaki hücre sayısı ile çarpılır. Böylece bu çarpımdan yığın gerilimi elde edilir.

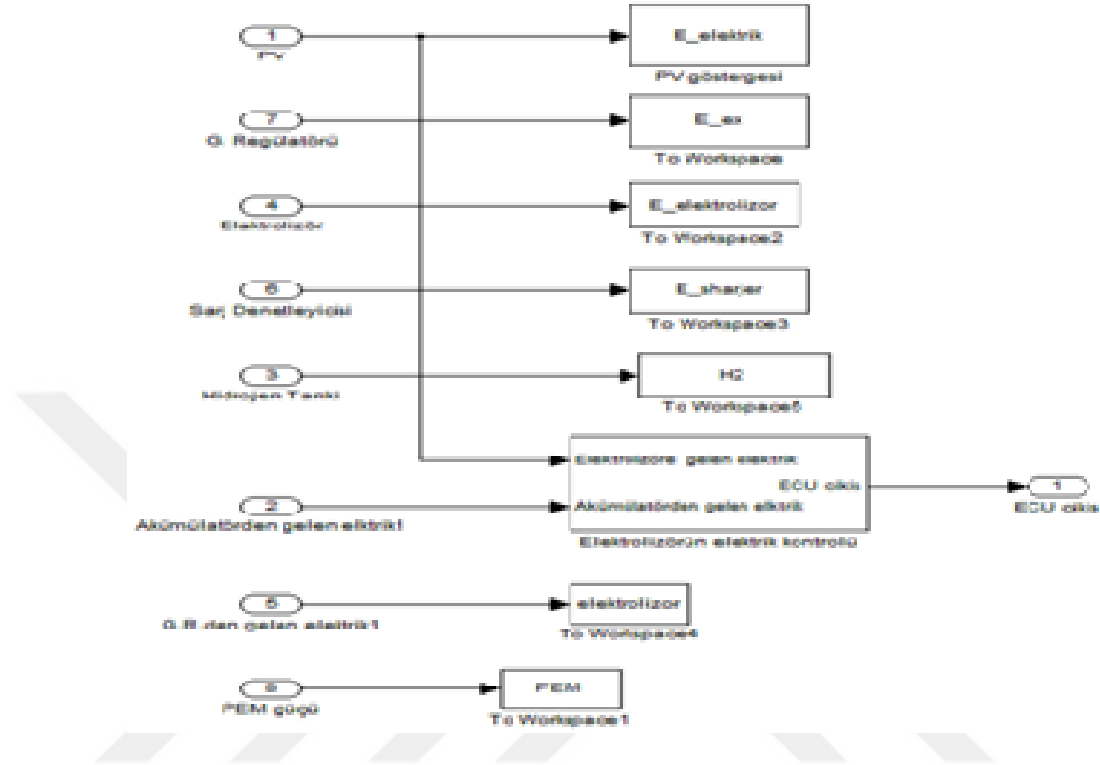


Şekil 4.10. PEM yakıt pili sisteminin voltaj hesaplamalarının blok diyagramı

4.2.8. Elektrik Kontrol Ünitesi (ECU) Bölümü

Kontrol elektrik ünitesi (ECU) sistemin yönetim için ve bir tarzda bütün verileri kaydetmek üzere kullanılmaktadır. Bu ünite sistemin bütün birimlerinden verileri almakta ve To Workspace bloкта MATLAB sayfasına aktarmak üzere kaydetmektedir.

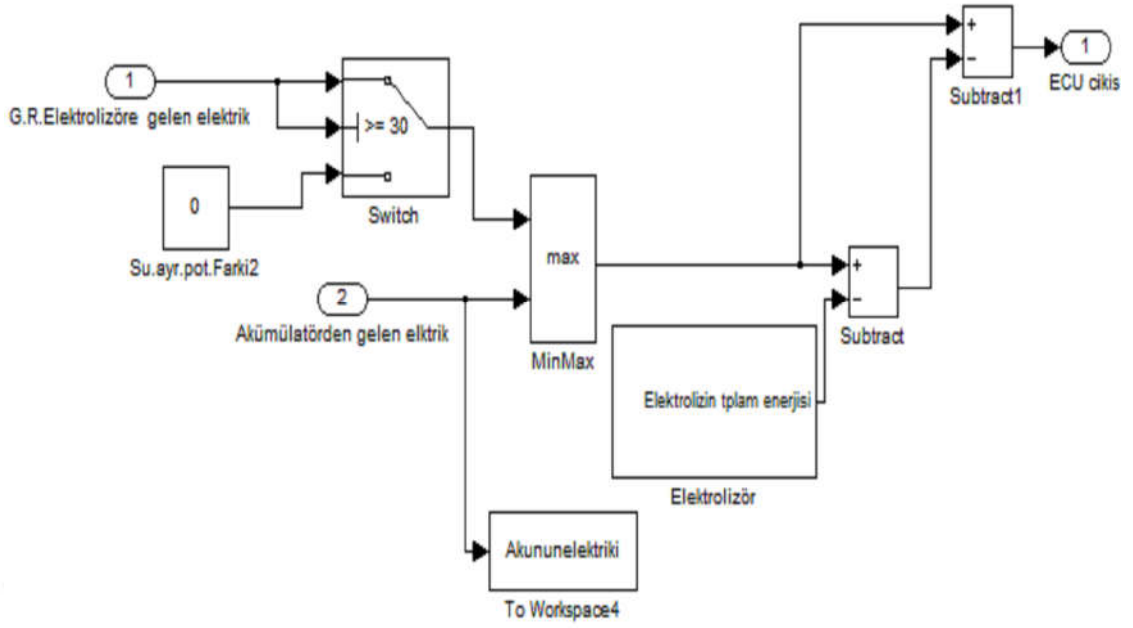
Bu ünite detaylı olarak önceki bölümde yazılmıştır. ECU'nun benzetim yapılmış olan sistemi şekil 4.10'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. ECU ünitesinin blok diyagramı

4.2.8.1 ECU Bölümündeki Elektrik Dağılımı

ECU'nun en esas görevi elektrolizöre giden elektrik enerjisini kontrol etmektir. Bu da bir alt sistem olarak bu bölümde yer almıştır. Güneş olmadığı ya da yetersiz olduğu zaman PV'den elektrik enerjisi üretilmediği takdirde ECU tüketicilerin ihtiyacını akümülatörden gidermek üzere denetleme yapar. Bu kontrol birimi şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12. ECU ünitesinin blok diyagramı

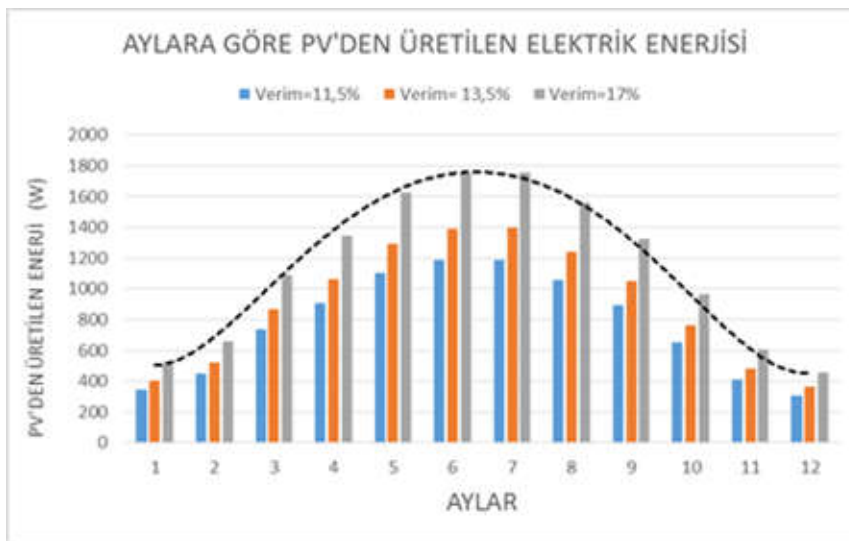
Burada bir Switch bloğu aracılığıyla ve blok içinde alt sınırı belirlemek ile PV'den yetersiz elektrik enerjisi geldiği zaman sıfır sayısı devreye geçer ve akümülatörden gelen elektrik enerjisi bir MinMax bloğu vasıtası ile ve akümülatördeki enerji PV'den daha yüksek olunca akümülatörü devreye sokar.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada sistemin benzetimi için MATLAB-SİMULİNK™ yazılımı kullanılmıştır. Cebri döngüler ve asırı derecede sayısal değerlerden doğacak problemleri önlemek için çeşitli anahtar döngüler yerleştirilmiştir. Bu çalışma iki kademedен oluşmaktadır. Birinci kademe güneş kollektör destekli hidrojen üretimi ve üretilen hidrojeni bir tankta depolama sistemidir. İkinci kademe ise üretilen ve depolanmış olan hidrojeni bir yakıt pilinde kullanmaktır.

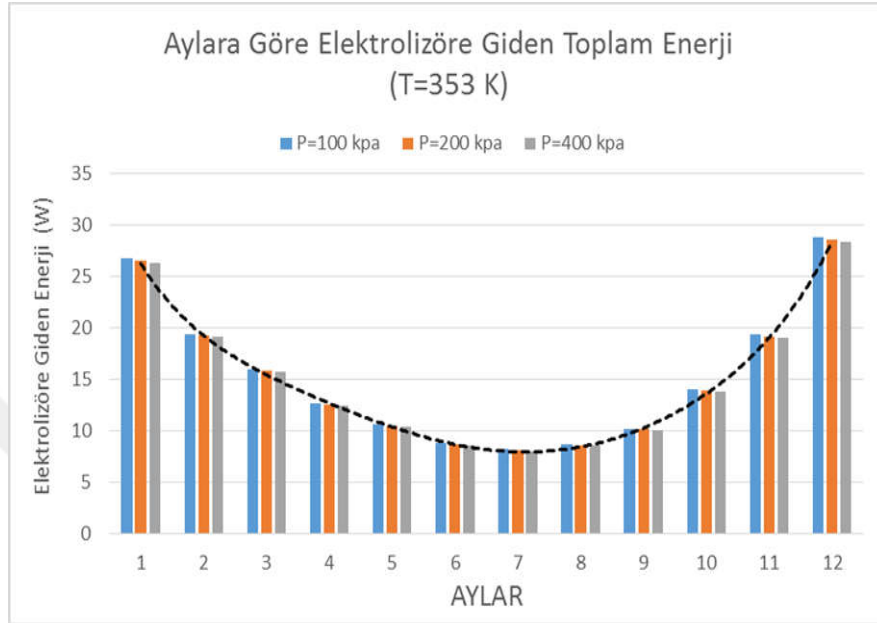
İlk kademedeki Konya ili için aylık ortalama güneş ışınım miktarı ve güneşleme süresi meteoroloji genel müdürlüğünden alınmıştır. Burada PV sistemi için üç farklı panel verimi; %11.5, %13.5 ve %17, 4 farklı çalışma sıcaklığı; 353 K, 373 K, 393 K ve 473 K, 3 farklı çalışma basıncı; 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa ana giriş değerleri için simülasyon yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar sabit sıcaklıkta, farklı basınçlarda ve sabit basınçta, farklı sıcaklıklarda olmak üzere grafik haline getirilmiştir. Sonuçlar hidrojen üretimi miktarının sıcaklık artışına daha çok bağlı olduğunu, basınca çok az bağlı olduğunu göstermektedir.

İkinci kademedeki PEM yakıt pili için 3 farklı hidrojen akış oranı; 5.5, 8, 11.2 SLPM (standard liter per minute) ve buna karşılık hava akış oranı; 81, 120, 166 SLPM için simülasyon yapılmıştır. Benzetim süresi 1,5 sn olarak seçilmiştir. Sonuçlar zamana göre hücre gerilimi ve yığın gücü olarak grafik haline getirilmiştir.



Şekil 5.1 Farklı verimlere göre PV'den elde edilen elektrik enerjisi

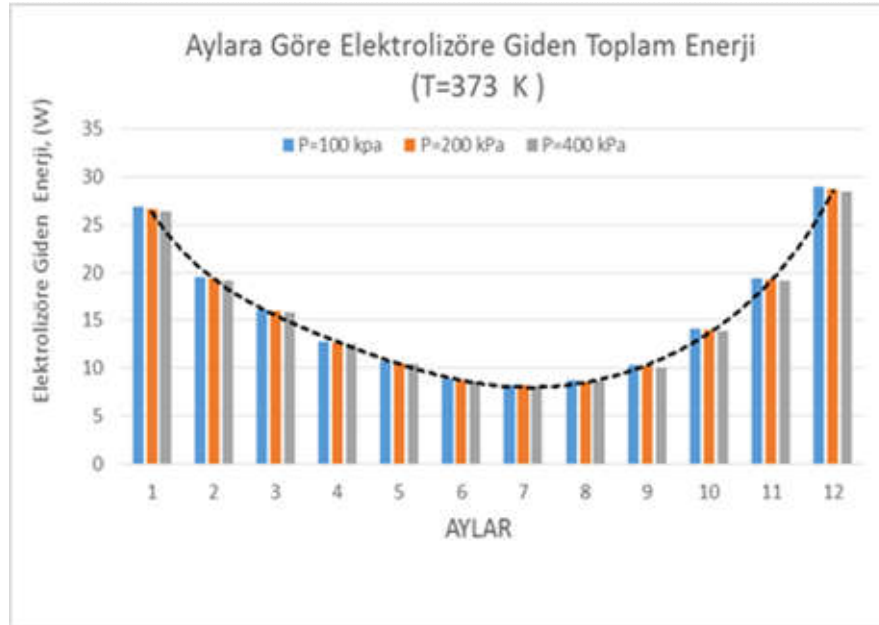
Şekil 5.1. de farklı PV verimlerinden elde edilen elektrik enerjisi gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi üretilen elektrik enerjisi PV'nin verimi ile yakından ilgilidir. Yüksek verim ve kaliteli malzemeden elde edilen elektrik enerjisindeki artış şekil üzerinden net bir şekilde anlaşılmaktadır.



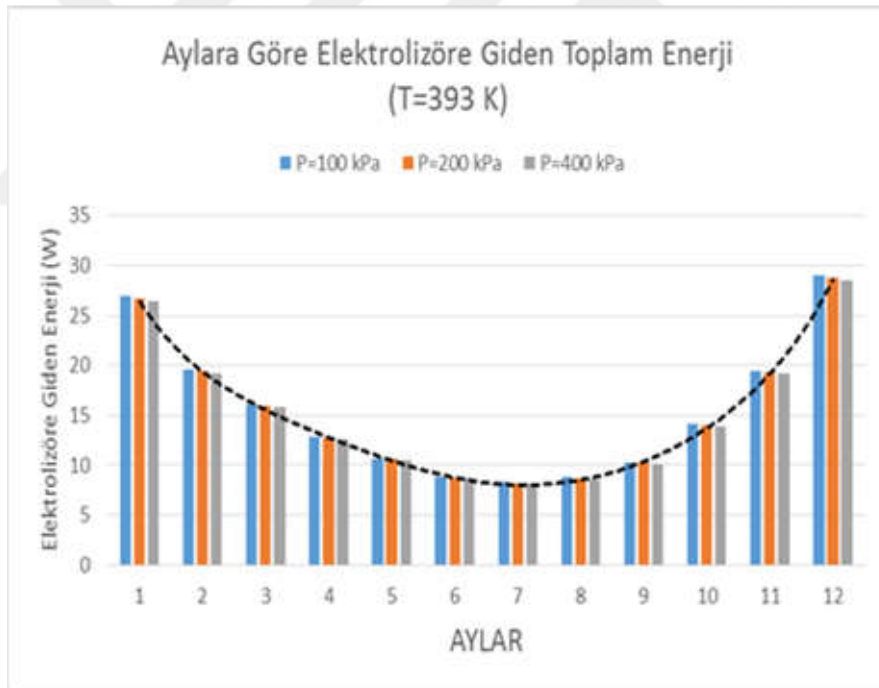
Şekil 5.2 Aylık ortalama 353 K sıcaklıkta elektrolizöre giden elektrik enerjisi

Şekil 5.2. de ise 353 K sıcaklığa göre elektrolizöre giden enerji miktarı aylık ortalamalara göre verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı gibi yaz aylarında elektrolizöre giden enerji en az seviyede olmaktadır. Çünkü PV'nin yaz aylarında ürettiği enerji maksimum seviyede iken elektrolizörün harcadığı enerji sabit kabul edilirse PV'de üretilen enerjiye göre oran düşmektedir. Basınçlara bağlı olarak çok az değişim gözlenirken yine de düşük basınçlarda elektrolizöre giden enerji biraz daha fazla iken yüksek basınçlarda biraz daha düşüktür.

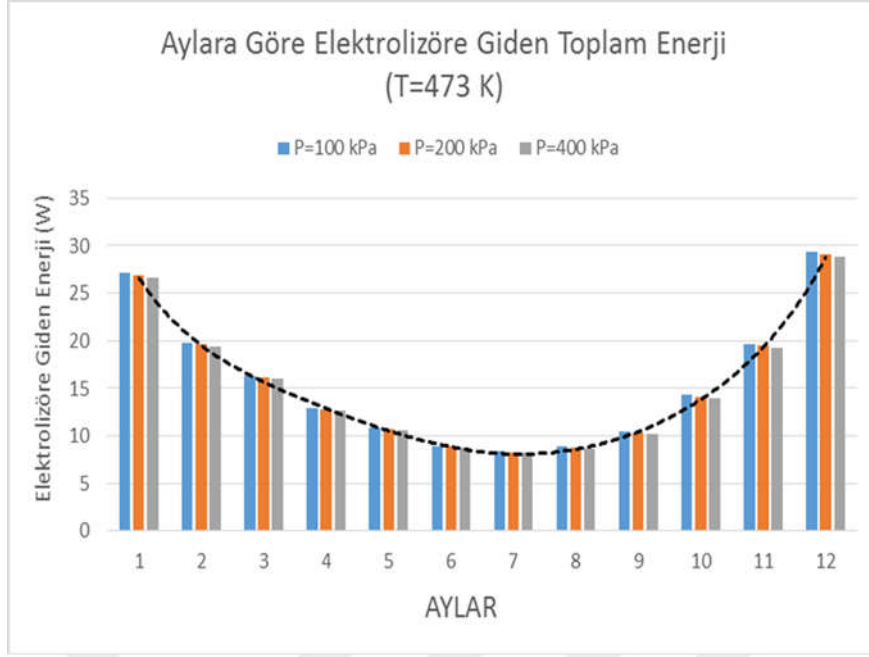
Şekil 5.3. de 373 K sıcaklığa göre elektrolizöre giden enerji miktarı aylık ortalamalara göre verilmiştir. Bu şeklin de şekil 5.2. ye benzer yönlerinden dolayı şekil 5.2. için yapılan yorumların aynısı bu şekil için de geçerlidir. Aynı şekilde 393 K için verilmiş olan şekil 5.4. ve 473 K için verilmiş olan şekil 5.5. için de aynı yorumlar yapılabilir. Dolayısıyla elektrolizörün harcadığı enerji basınç ve sıcaklıkla çok az değişmekte ya da aynı kalmaktadır.



Şekil 5.3 Aylık ortalama 373 K sıcaklıkta elektrolizöre giden elektrik enerjisi

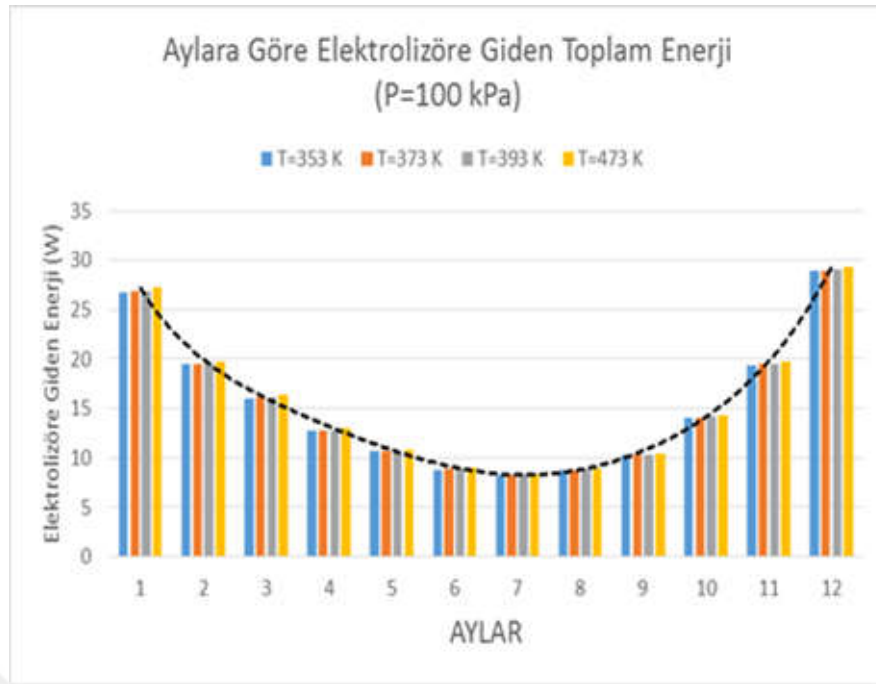


Şekil 5.4 Aylık ortalama 393 K sıcaklıkta elektrolizöre giden elektrik enerjisi

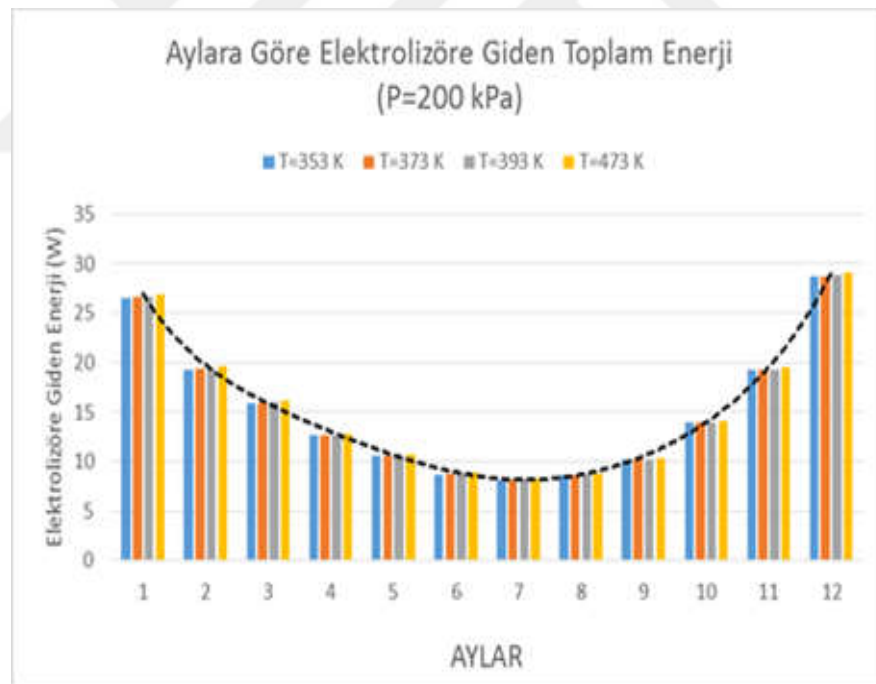


Şekil 5.5 Aylık ortalama 473 K sıcaklıkta elektrolizöre giden elektrik enerjisi

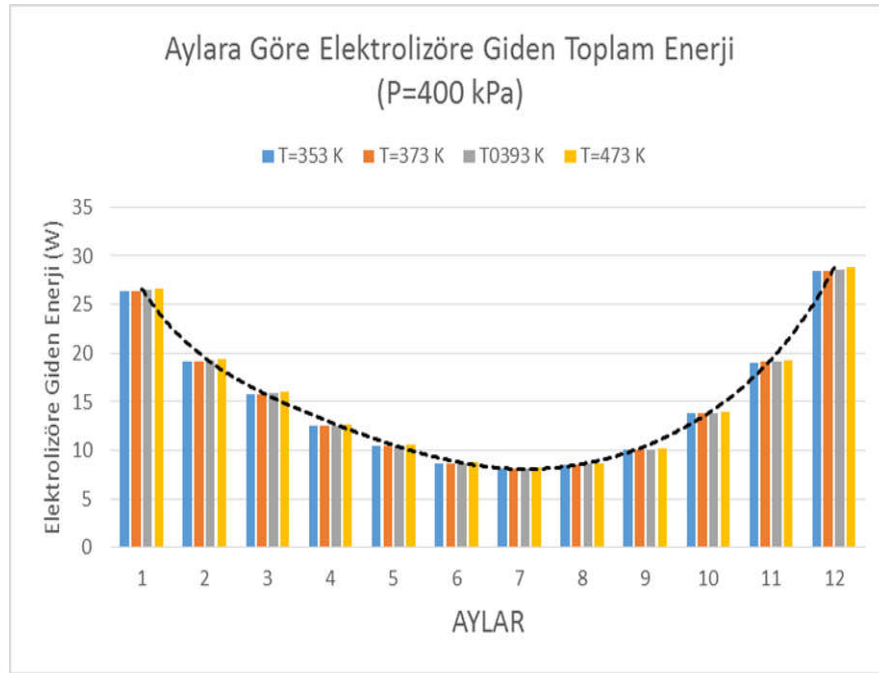
Şekil 5.6., şekil 5.7. ve şekil 5.8’de basıncın 100, 200, 400 kPa değerleri için elektrolizöre giden enerjinin aylık ortalama değerleri gösterilmiştir. Bu şekiller için de sıcaklık değerleri için elde edilen şekillere benzer yorumlar yapılabilir. Yani her üç şekilden de anlaşılacağı gibi elektrolizöre giden enerji sıcaklıkla çok az artmaktadır. Her üç şeklin aylık ortalamalarında ise ciddi bir değişiklik yoktur. Dolayısıyla elektrolizöre gönderilen enerjideki değişim sıcaklık ve basınçla birinci derceden ilişkili değildir.



Şekil 5.6 Aylık ortalama 100 kPa basınçta elektrolizöre giden elektrik enerjisi



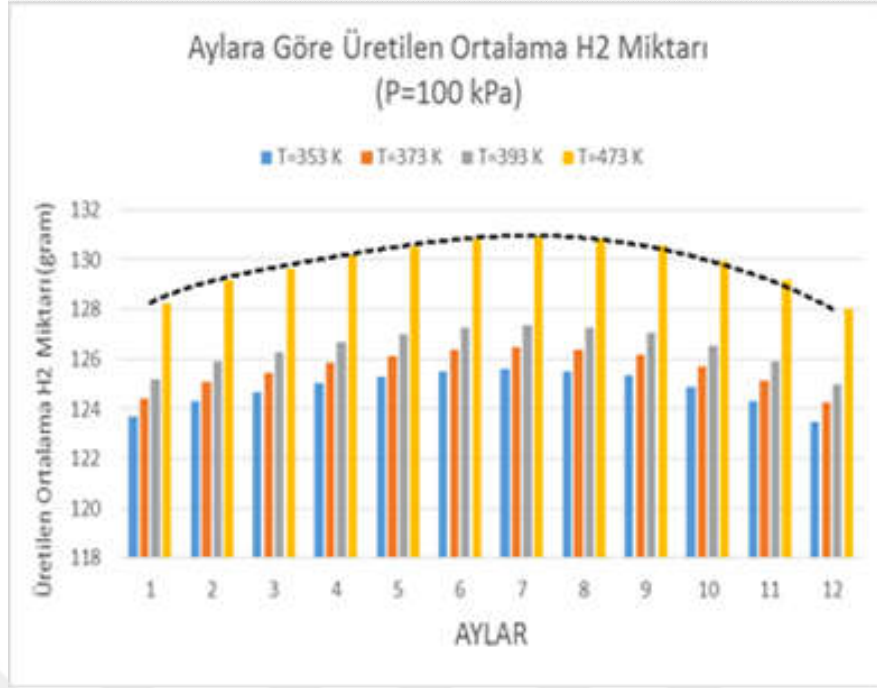
Şekil 5.7 Aylık ortalama 200 kPa basınçta elektrolizöre giden elektrik enerjisi



Şekil 5.8 Aylık ortalama 400 kPa basınçta elektrolizöre giden elektrik enerjisi

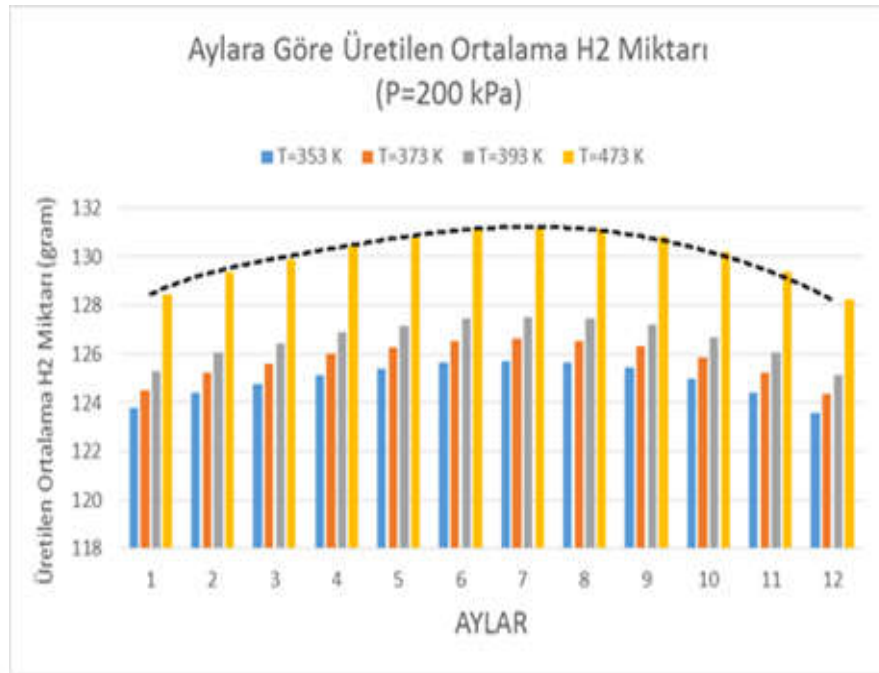
Sekil 5.2. – 5.8. arası şekiller dikkatle incelendiğinde aslında 100 kPa basınçta ve 473 K sıcaklıkta elektrolizörün tükettiği elektrik enerjisinin en yüksek değerde olduğu anlaşılmaktadır. Yine de bu fark ciddi bir fark olmayıp elektrolizin tükettiği enerjinin sıcaklık ve basınca birinci derceden bağlı olmadığı rahatça söylenebilir.

Ancak üretilen hidrojen miktarı dikkate alındığında durum farklıdır. Nitekim 100 kPa için aylık ortalama hidrojen üretim miktarını veren şekil 5.9. dikkatle incelendiğinde üretilen hidrojen miktarının sıcaklıkla arttığı bariz bir biçimde görülmektedir. Şekle göre hidrojen üretim miktarı yaz aylarında artmaktadır. Bunun sebebi, yaz aylarında güneş ışınım süresinin daha uzun olmasıdır.

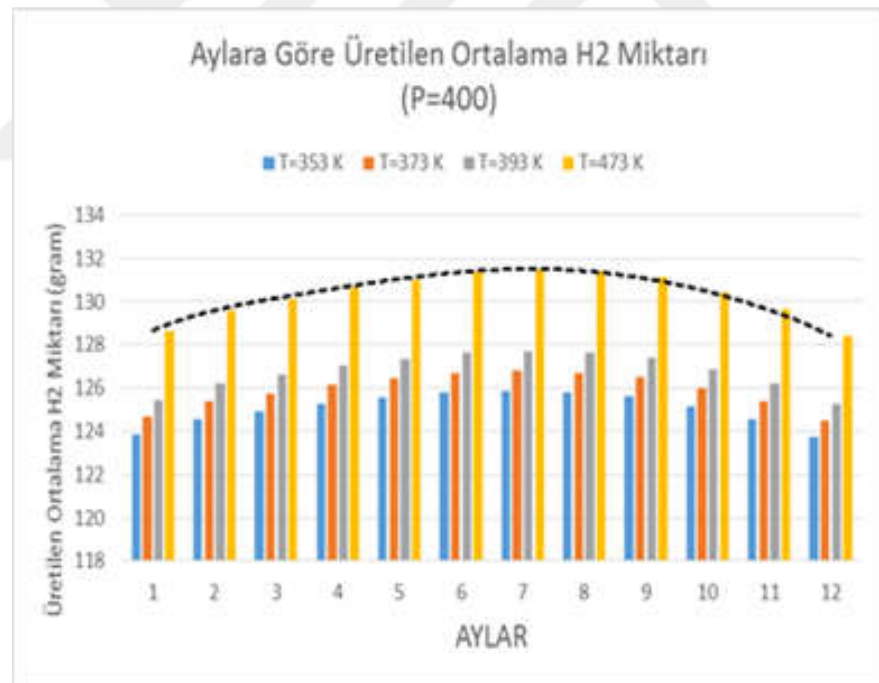


Şekil 5.9 Aylar ortalaması 100kPa basınçta üretilen H₂ miktarı

200 kPa basınç için verilen şekil 5.10. ile 400 kPa basınç için verilen şekil 5.11. için de aynı yorumlar yapılabilir. Ancak şekillerin birbirine çok yakın olmalarından da anlaşılacağı üzere basınç artışının etkisi azdır. Yine de yüksek basınçlarda hidrojen üretim miktarının çok az arttığı söylenebilir.



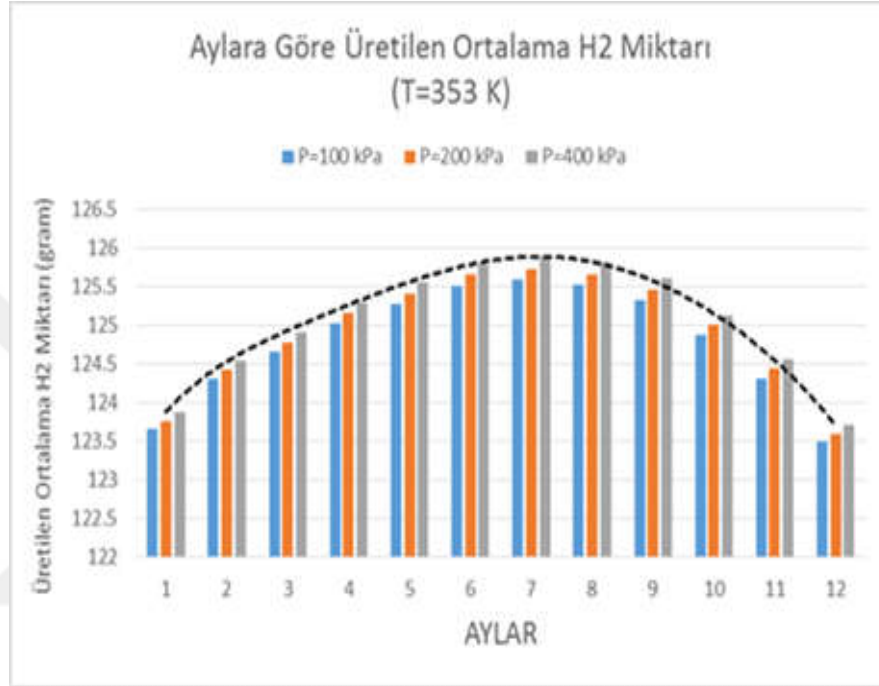
Şekil 5.10 Aylar ortalaması 200kPa basınçta üretilen H₂ miktarı



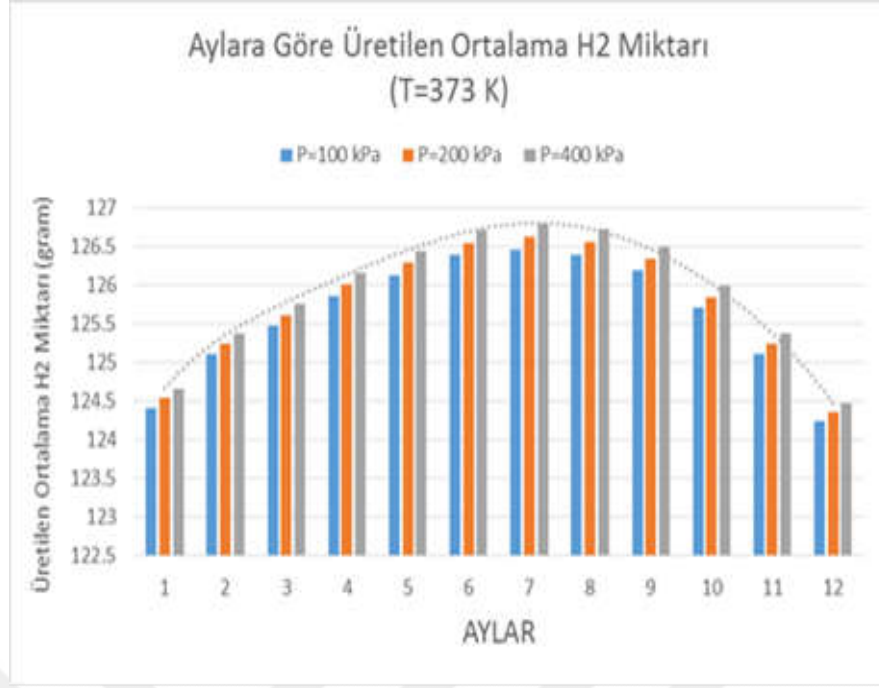
Şekil 5.11 Aylar ortalaması 400kPa basınçta üretilen H₂ miktarı

Şekil 5.12. – 5.15. arası şekillerde ise sıcaklığın 353, 373, 393, 473 K değerleri için aylık ortalama hidrojen üretimi grafikleri verilmiştir.

353 K için verilen şekil 5.12. ye bakıldığında artan basınca bağlı olarak üretilen hidrojen miktarının da arttığı görülmektedir. Ancak aralarındaki fark çok fazla değildir. Ayrıca grafikten, yaz aylarında üretilen hidrojen miktarının kış aylarına oranla fazla olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Örneğin yaz ayları ortalaması 125.5 gramın biraz üzerinde ve 126 gramın biraz altında iken kış aylarında ortalama 123.5 gram ile 123.85 gram arasındadır. Bu da yaz ayları güneşlenme süresinin uzun olması ile ilgilidir.

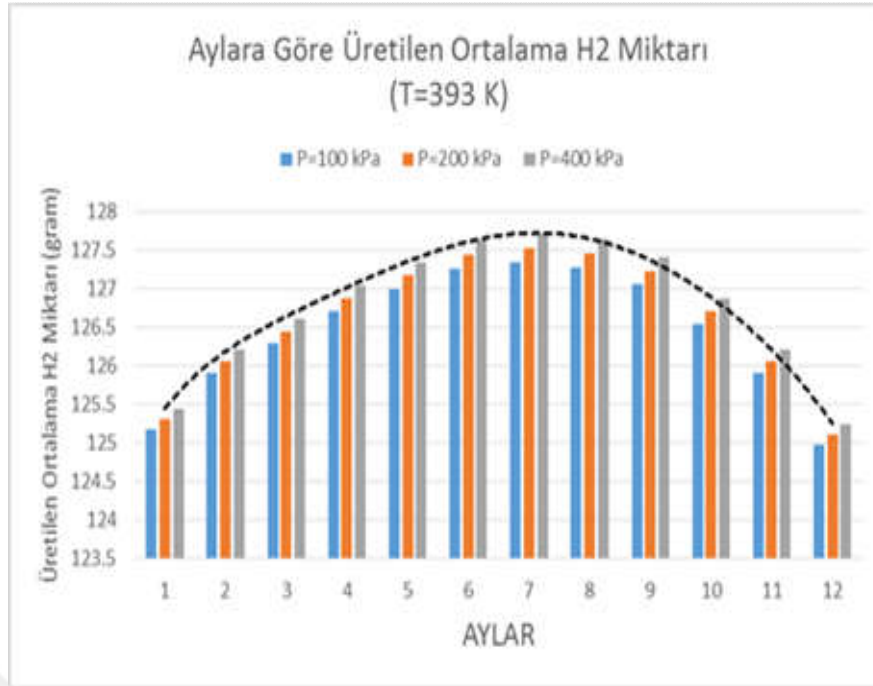


Şekil 5.12 Aylar ortalaması 353 K sıcaklıkta üretilen H₂ miktarı

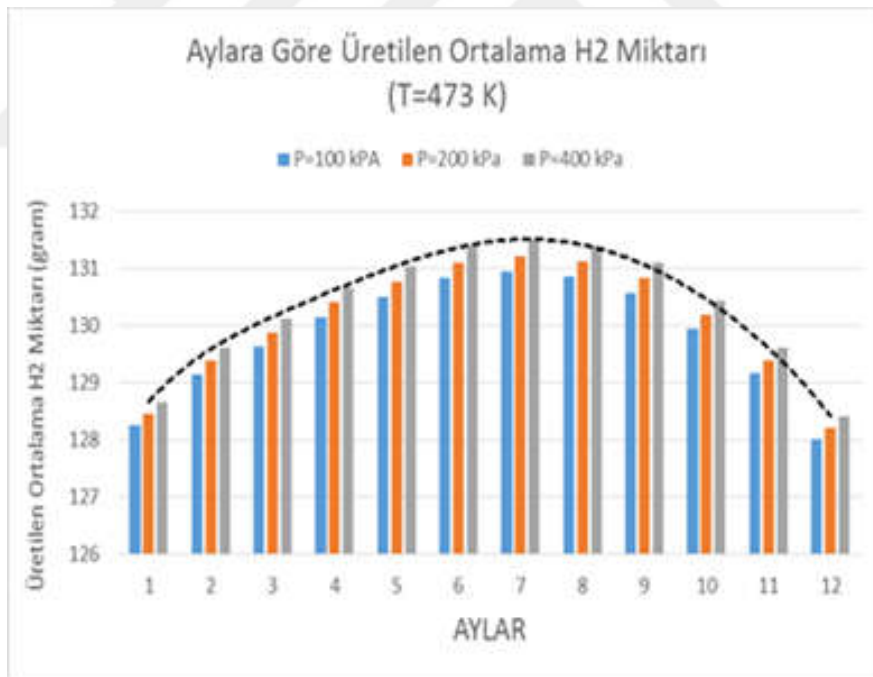


Şekil 5.13 Aylar ortalaması 373 K sıcaklıkta üretilen H₂ miktarı

Şekil 5.13’de 373 K için aylık ortalama hidrojen üretimi grafiği görülmektedir. Şekle göre yaz ayları ortalaması 126.5 gramın biraz üzerine çıkmıştır. Kış ayları hidrojen üretimi ortalaması ise 124.5 gram civarındadır. Yani 353 K sıcaklığa göre 373 K sıcaklıkta hidrojen üretiminde artış gözlenmiştir. Basınlara göre üretim miktarı ise benzer şekilde düşük basınçtan yüksek basınca doğru biraz artış göstermektedir.



Şekil 5.14 Aylar ortalaması 393 K sıcaklıkta üretilen H₂ miktarı



Şekil 5.15 Aylar ortalaması 473 K sıcaklıkta üretilen H₂ miktarı

Şekil 5.14'de 393 K için verilen aylık ortalama üretim grafiği görülmektedir. Şekle göre yaz ayları üretim ortalaması 127.5 gram civarındadır. Kış ayları ortalaması

ise 125 gram civarındadır. Görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça hidrojen üretim oranı da artmaktadır.

Şekil 5.15. de ise 473 K için elde edilen grafik görülmektedir. Bu şekilde ise yaz ayları üretim ortalaması 131 ila 131.5 gram arasındadır. Kış ayları üretim ortalaması ise 128.5 gram civarındadır.

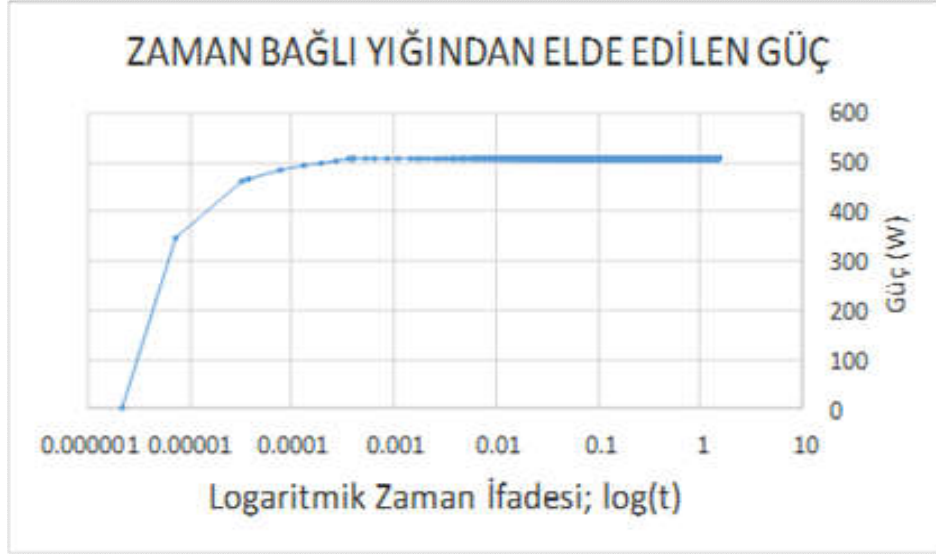
Bu verilerden de açıkça anlaşılacağı gibi sıcaklık artışı ile hidrojen üretimi miktarı artmaktadır. Bunun sebebi, su molekülleri arasındaki atomik bağın sıcaklık artışı ile zayıflaması ve bağı koparmak için harcanan enerjinin daha düşük olduğu şeklinde yorumlanabilir.

İkinci aşamada ya da ikinci kademe çalışmada üretilen hidrojen gazı bir PEM yakıt pilinde kullanılarak elektrik enerjisi üretilmiştir. Bu çalışmadaki PEM yakıt pili kataloglardan seçilmiştir.

Modellenmiş olan PEM yakıt pili nominal gücü 500 W dır. Yakıt pili bu güçte çalışırken DC gerilimi 23V ve akım 22 A dir. PEM yakıt pilinin maksimum gücü 1100 W olsa da iç dirençlerden dolayı bu güç ortalama 1000 W civarında olmaktadır. Bu durumda DC gerilimi yine 23 V kabul edilebilir. Elde edilen akım ise 45 A civarındadır. 500 W güce karşılık hidrojen girişi 5.5 SLPM'dir. 1000 W güce karşılık gelen hidrojen girişi ise 11.2 SLPM'dir. Bir ara değer olarak 8 SLPM hidrojen girişinde elde edilen güç 760 W civarındadır. Bu durumda potansiyel 23 V iken akım 33 A olmaktadır.

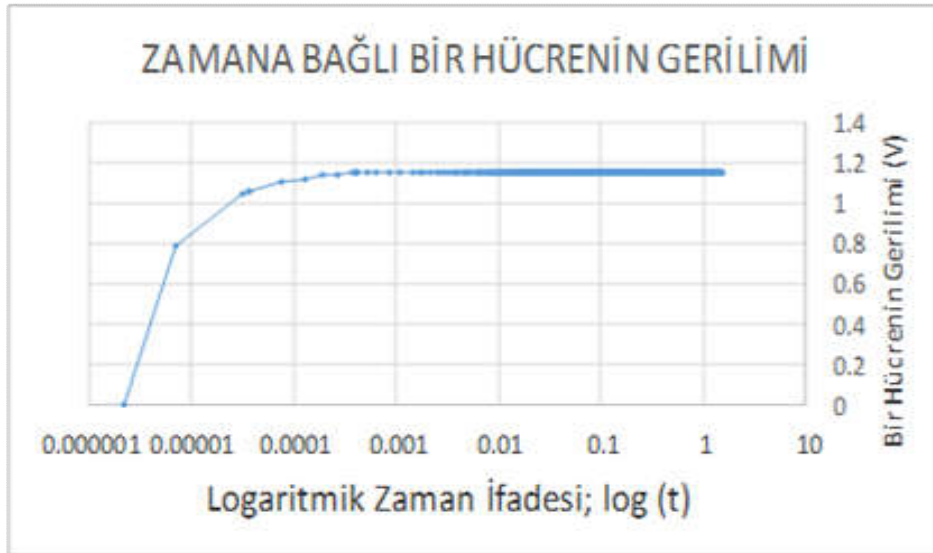
Verilen giriş parametrelerine göre elde edilen simülasyon sonuçları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Bu çalışmalarda benzetim süresi 1,5 sn olarak seçilmiştir. Grafikler güç-zaman ve voltaj-zaman olarak çizilmiştir. Zamanın ilk başlangıç değerlerine göre elde edilen sonuçların daha iyi görülebilmesi için grafiklerde zaman eksenini logaritmik zaman ifadesi olarak gösterilmiştir.

Şekil 5.16. 5.5 SLMP H₂ girişi için PEM yakıt pilinin güç grafiğini göstermektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi 0.0001 saniye geçtikten hemen sonra PEM yakıt pilinin gücü 500 W'a ulaşmaktadır.



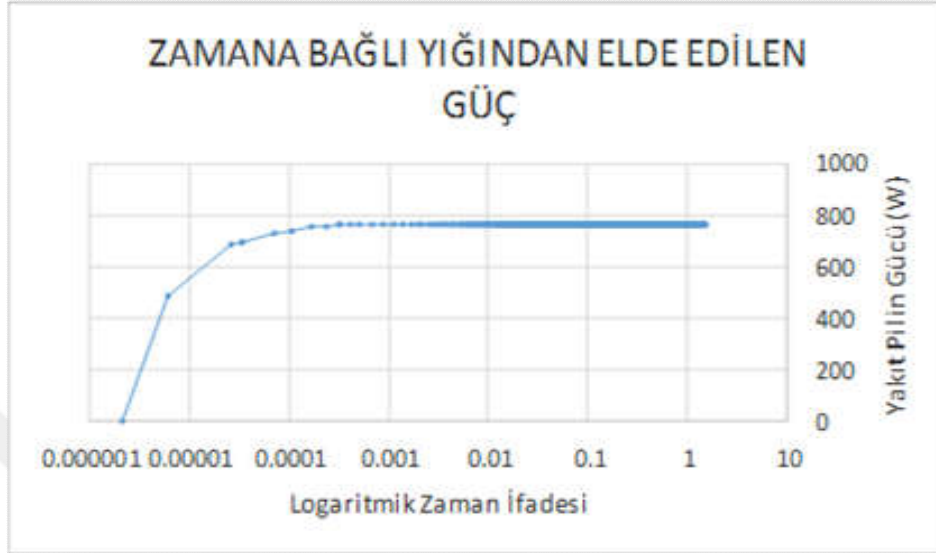
Şekil 5.16. 5.5 SLPM H₂ için PEM yakıt pili güç eğrisi

Şekil 5.17 de ise PEM yakıt pilinin her bir hücresinde oluşan gerilim zamana bağlı olarak verilmiştir. Bu şekle göre de zaman 0.0001 saniyeyi geçtikten hemen sonra hücre gerilimi 1.159 V'a yükselmekte ve bu seviyede sabit kalmaktadır.

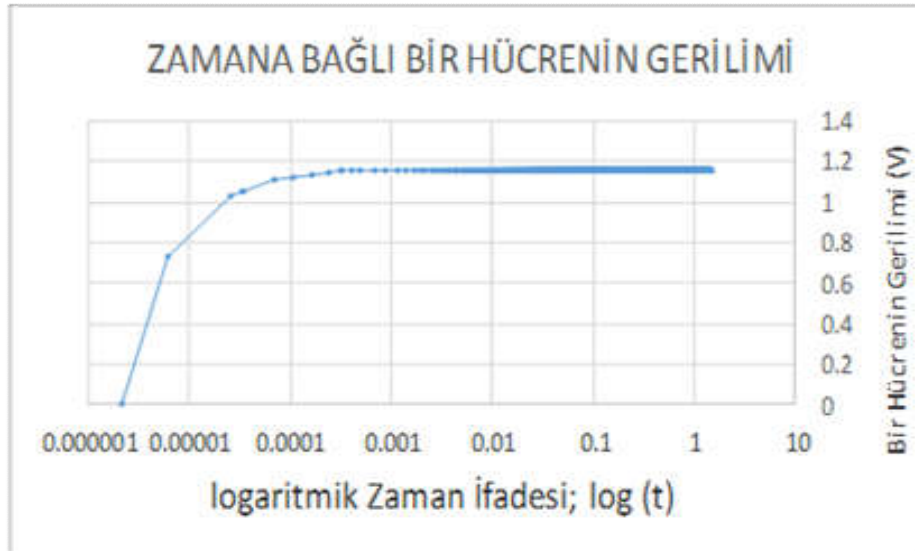


Şekil 5.17. 5.5 SLPM H₂' için hücre çıkış gerilimi

Şekil 5.18. de 8 SLMP H₂ girişi için PEM hidrojen yakıt pilinin güç eğrisi görülmektedir. Önceki grafiklere benzer şekilde 0.0001 saniye geçtikten hemen sonra PEM yakıt pilinin gücü 760 W seviyelerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.18. 8 SLPM H₂ için PEM yakıt pili güç eğrisi

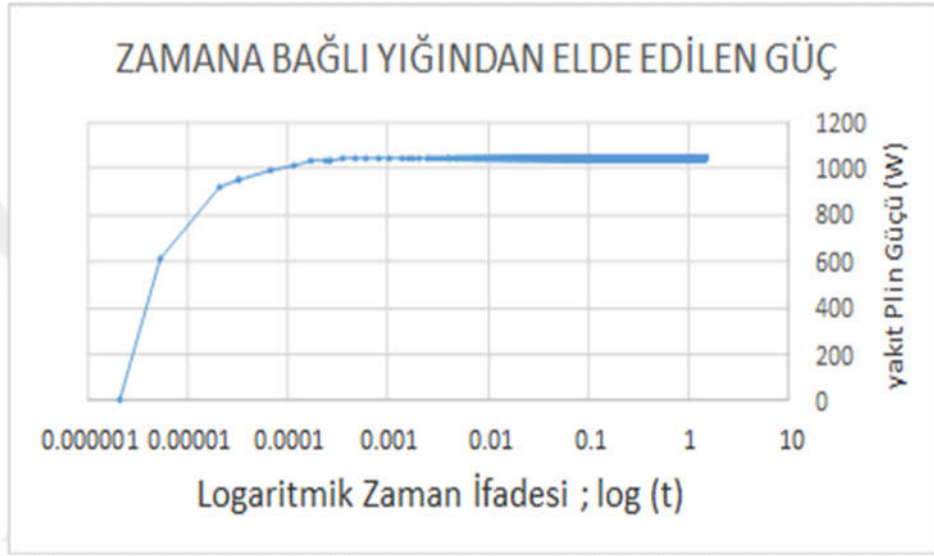


Şekil 5.19. 8 SLPM H₂ için hücre çıkış gerilimi

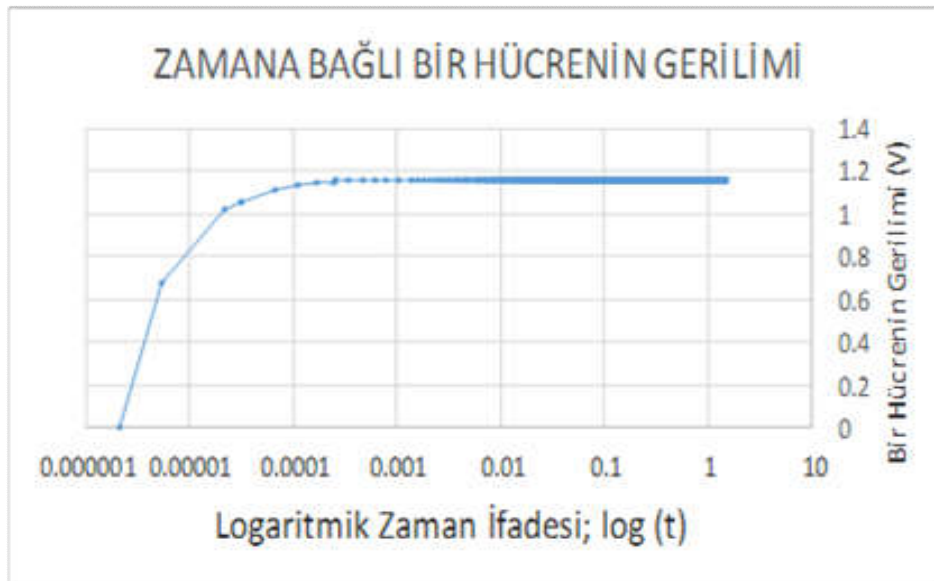
Şekil 5.19 da PEM yakıt pilinin hücre çıkış gerilimi zamana bağlı olarak verilmiştir. Diğer grafiklerde olduğu gibi bu grafikte de zaman 0.0001 saniyeyi

geçtikten hemen sonra hücre gerilimi 1.159 V'a ulaşmakta bu seviyede sabit kalmaktadır.

Son olarak şekil 5.20. ve şekil 5.21. de 11.2 SLMP H₂ girişi için PEM hidrojen yakıt pilinin güç eğrisi ve hücre çıkış gerilimi eğrisi verilmiştir. Yukarıdaki şekillere benzer olarak bu garfiklerde de 0.0001 saniye geçtikten hemen sonra PEM yakıt pilinin gücü yaklaşık olarak 1000 W seviyelerine çıkmakta, hücre gerilimi değeri ise yine 1.159 V değerine ulaşmakta ve bu seviyede sabit kalmaktadır.



Şekil 5.20. 11.2 SLPM H₂ için PEM yakıt pili güç eğrisi



Şekil 5.21. 11.2 SLPM H₂ için hücre çıkış gerilimi eğrisi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Güneş enerjisi sistemleri düşük verimlidirler ancak bu enerji sürekli ve kolay elde edilebilir bir enerji türü olduğundan elektrik enerjisi elde etmek için kullanılabilirler. Güneşten elde edilen bu enerjinin bir kısmı suyun elektrolizi için kullanılırsa başka temiz ve yenilenebilir bir enerji türü olan hidrojen yakıtı ucuz ve kolay yoldan elde edilmiş olur. Enerji dönüşümleri esnasındaki verimlilik şimdilik düşük olsa bile geliştirilen yeni teknolojilerle bu artırılabilir. Gerek güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü, gerekse bu enerjiyi kullanarak hidrojen elde edilmesi ve bu hidrojenin yakıt pillerinde kullanılması son derece temiz, çevreci ve yenilenebilir enerji türleri olarak dikkat çekmektedirler.

Bu çalışmada, Konya ilinde kurulması düşünülen deneysel bir enerji üretim düzeneği simüle edilmiştir. Bu simülasyon için, gerek PV güneş panellerinden elektrik enerjisi üretilmesi, gerek suyun elektrolizi yoluyla hidrojen elde edilmesi, gerekse hidrojenin PEM yakıt pilinde kullanılması gibi ana başlıklar için gerekli formülasyon MATLAB programlama dilinde geliştirilen bir yazılım ile ve MATLAB-SIMULINK™ paket yazılımı aracılığı ile kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlardan gerekli grafikler üretilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde PV güneş panellerinden elde edilen enerjinin yaz aylarında en yüksek seviyelere çıktığı anlaşılmaktadır. Bu toplam enerjinin bir kısmı elektroliz cihazında harcanmaktadır. Elektroliz için harcanan enerjinin yaklaşık olarak sabit olduğu düşünülürse, PV güneş panelinden elde edilen elektrik enerjisinin elektrolizöre gönderilen kısmı yaz aylarında minimum seviyede kalmaktadır.

Elektroliz cihazındaki basıncın artmasıyla hidrojen üretimi miktarı biraz artmaktadır. Ancak bu artış çok fazla değildir. Örneğin Temmuz ayında ve elektrolizör sıcaklığının 473 K olduğu durumda; $p=100$ kPa elektrolizör basıncı için üretilen hidrojen miktarı 130.94 g/h iken, $p=200$ kPa için 131.21 g/h ve $p=400$ kPa için 131.48 g/h dir.

Sıcaklığın artması ile hidrojen üretimi miktarı basınca oranla çok daha fazla olmaktadır. Örneğin Temmuz ayında elektrolizör basıncının 400 kPa olduğu durumda; $T=353$ K elektrolizör sıcaklığı için üretilen hidrojen miktarı 125.87 g/h iken, $T=373$ K

için 126.78 g/h, T=393 K için 127.71 g/h ve T=473 K için 131.49 g/h dir. Buradan da rahatça anlaşılacağı gibi sıcaklık arttıkça hidrojen üretim miktarı artmaktadır. Çünkü sıcaklık artışı ile atomlar arası bağ zayıflamaktadır. Bu yüzden molekülleri atomlarına ayırmak daha kolay olmaktadır.

Diğer yandan elektrolizörün çektiği enerji sıcaklık ya da basınçla çok fazla değişmemektedir.

PEM yakıt piline hidrojen basıçlı olarak verilmelidir. Bu çalışmada yakıt pili basıncı 2 bar olarak alınmıştır. Ayrıca yakıt pili iç direnci güç üretiminde önemli bir faktördür. Yakıt pili iç direncini oluşturan en önemli bileşen ise membrandır. Bu çalışmada iç direnç 100 mOhm alınarak işlemler yapılmıştır. Benzetim süresi ise 1.5 s alınmıştır. Çünkü bundan sonra gerek elde edilen güçte gerekse hücresel gerilimde herhangi bir değişme olmamaktadır.

PEM yakıt pilinde elde edilen gücün yakıt piline giren hidrojen miktarı ile doğrudan ilişkili olduğu grafiklerde açıkça görülmektedir. Örneğin 5.5 SLPM hidrojen girişi için 500 W'lık nominal güç elde edilmektedir. Bu durumda toplam gerilim 23 V ve akım 22 A'dir. Hidrojen girişi 8 SLPM olduğunda elde edilen güç 755 W civarındadır. Bu durumda toplam gerilim 23 V ve akım 33 A'dir. 11.2 SLPM hidrojen girişi için ise yaklaşık olarak 1000 W güç elde edilmektedir. Bu durumda toplam gerilim 33 V olurken akım 45 A olmaktadır.

Hernekadar hidrojen giriş miktarı arttıkça elde edilen güç artıyor gözükse de bunun belli bir değerle sınırlandırılması gerekir. Çünkü hem kullanılan yakıt pilinin belli bir kapasitesi vardır. Hem de fazla hidrojen fazla ısı demektir. Cihazın çok fazla ısınması arzu edilmez.

6.2. Öneriler

Enerjisini güneşten alarak elektrik üreten ve bu elektriği gerektiğinde diğer ihtiyaçlar için harcayıp fazla olanını elektroliz yoluyla hidrojene dönüştüren bir sistem özellikle elektriğin ulaştırılmadığı kırsal kesimlerde ideal bir enerji üretim sistemi olabilir. Depolanan hidrojen doğrudan yakıt olarak kullanılabilceği gibi PEM hidrojen yakıt pilinde kullanılarak tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu konuda deneysel bir proje çalışması yapılabilir.

Bu çalışmada elektrolizör cihazı basınçlı bir kap değildir. Dolayısıyla üretilen hidrojenin basınçlı bir hidrojen tankına pompalanması gerekir. Elektrolizör cihazı basınçlı bir kap olarak tasarlanabilirse elde edilen hidrojeni pompalamak için ilave bir enerjiye ihtiyaç kalmadan PEM yakıt pilinde doğrudan kullanılabilir.

Destek sağlanabildiği takdirde bu çalışma deneysel olarak yapıp sonuçların benzer olup olmadığı karşılaştırılabilir ve her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar tartışılabilir.

KAYNAKLAR

- Abd El Monem, A., Azmy, A. M. ve Mahmoud, S., 2014, Dynamic Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Electric Vehicle Applications, *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 2014.
- Aktacir, A., 2009, Güneş Enerjisi İle Elektrik Üretimi. Mardin Üniversitesi: 25-50.
- Amores, E., Rodríguez, J. ve Carreras, C., 2014, Influence of operation parameters in the modeling of alkaline water electrolyzers for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (25), 13063-13078.
- Amphlett, J. C., Baumert, R. M., Mann, R. F., Peppley, B. A., Roberge, P. R. ve Harris, T. J., 1995, Performance Modeling of the Ballard-Mark-Iv Solid Polymer Electrolyte Fuel-Cell .1. Mechanistic Model Development, *Journal of the Electrochemical Society*, 142 (1), 1-8.
- Asnaghi, A., Sarikhani, N., A. Sadughi, H and Kermani, M. J, 2007, 2W'lık bir hidrojen yakıt pilinin 3 bouytlı simule etmesi ve yapılması. ISME2007-2419. Tahrán-İran.
- Ateş, A., 1985, İçten yanmalı motorlarda hidrojenin yakıt olarak kullanması ve depolama problemleri, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Ayvaz, z., 1997, Güneş ışığıyla deniz suyundan hidrojen üretilmesi. İzmir. Sayı 24.
- Bahçeci, S., Fedakar, S ve Yalçınöz, T, 2012, PSCAD Yazılımı Kullanarak PEM Yakıt Hücresinin Modelinin Ve Benzetiminin Gerçekleştirilmesi. ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu. Bursa.
- Becerikli, F., 2011, Yüksek Basıncılı PEM (Proton Geçirgen Membran) Elektrolizör Geliştirilmesi ve Çalışma Parametrelerinin Performansa Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 60s.*
- Bilgen, E., 2001, Solar hydrogen from photovoltaic-electrolyzer systems, *Energy conversion and management*, 42 (9), 1047-1057.
- Boudries, R., 2013, Analysis of solar hydrogen production in Algeria: Case of an electrolyzer-concentrating photovoltaic system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (26), 11507-11518.
- Ceraolo, M., Miulli, C. ve Pozio, A., 2003, Modelling static and dynamic behaviour of proton exchange membrane fuel cells on the basis of electro-chemical description, *Journal of Power Sources*, 113 (1), 131-144.
- Dadvar, M., Afshari, E. ve Khademolhosseini, A., 2015, Studying the amount and how to increase the efficiency of the PEM fuel cell system as a result of employing ejector in fuel supply circuit, *Modares Mechanical Engineering*, 14 (13).
- Dinçer, K., Şahin, O., Yayla, S ve Avcı, A, 2014, Anot tarafı elektrospin metodu ile YSZ+SDC+NaCaNiBO ile kaplanmış PEM Yakıt hücresinin performansının deneysel olarak incelenmesi, *Journal of Technical-Online*, 13, 1.
- Đukić, A. ve Firak, M., 2011, Hydrogen production using alkaline electrolyzer and photovoltaic (PV) module, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (13), 7799-7806.
- Erdoğan, Y., Dinçler, T., Kuncan, M. ve Ertunç, H. M., Güneş Panelleri için Yüksek Verimli Maksimum Güç Noktası İzleyicisi (MPPT) Tasarımı.
- Gemmen, R. S., 2001a. ASME international Mechanical Engineering Congress and Expositions. NY.
- Gemmen, R. S., 2001b, Future Energy Challenge. Morgantown, WV, National Energy Technolgy Laboratory.

- Gemmen, R. S., and Farmouri, P, 2002, Power Electronics for Fuel Cells Workshop. University of California, Irvine, National Fuel Cell Research Center.
- Kahraman, H., Çevik, I and Coşman, S, 2014, Sıkıştırma Basıncının PEM Yakıt Pili Performansına Etkisi. ISITES. Karabuk – TURKEY.
- Khan, M. ve Iqbal, M., 2005, Dynamic modelling and simulation of a fuel cell generator, *Fuel Cells*, 5 (1), 97-104.
- Kim, J., Lee, S. M., Srinivasan, S. ve Chamberlin, C. E., 1995, Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation, *Journal of the Electrochemical Society*, 142 (8), 2670-2674.
- Larminie, J., Dicks, A. ve McDonald, M. S., 2003, Fuel cell systems explained, Wiley New York, p.
- Lee, J., Lalk, T. ve Appleby, A., 1998, Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks, *Journal of Power Sources*, 70 (2), 258-268.
- Marr, C. ve Li, X., 1997, An engineering model of proton exchange membrane fuel cell performance, *ARI-An International Journal for Physical and Engineering Sciences*, 50 (4), 190-200.
- McAuliffe, C. A., 1980, Hydrogen and energy, Gulf Publishing Company, p.
- Najafi, B., Mamaghani, A. H., Baricci, A., Rinaldi, F. ve Casalegno, A., 2015, Mathematical modelling and parametric study on a 30 kW el high temperature PEM fuel cell based residential micro cogeneration plant, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (3), 1569-1583.
- Ngo, S. K., Ohandja, L. A., Kemajou, A. ve Monkam, L., 2014, Design and simulation of hybrid solar high-temperature hydrogen production system using both solar photovoltaic and thermal energy, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 279-293.
- Ni, M., Leung, M. K. ve Leung, D. Y., 2007, Energy and exergy analysis of hydrogen production by solid oxide steam electrolyzer plant, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (18), 4648-4660.
- Niknam, T. ve Zare, M., 2012, Probabilistic hydrogen, thermal and electrical management of PEM-fuel cell power plants in distribution networks, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (23), 18243-18260.
- Omar, M., 2005, Hibrid güneş kollektör ile hidrojen üretim sistemi simülasyonu, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Outeiro, M. ve Carvalho, A., 2011, MatLab/Simulink as design tool of PEM Fuel Cells as electrical generation systems, *European Fuel Cell Forum*.
- Öztürk, M., Elbir, A., Özek, N. ve Yakut, A., Güneş Hidrojen Üretim Metotlarının İncelenmesi.
- Padin, J., Veziroglu, T. ve Shahin, A., 2000, Hybrid solar high-temperature hydrogen production system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 25 (4), 295-317.
- Rzayeva, M., Salamov, O. ve Kerimov, M., 2001, Modeling to get hydrogen and oxygen by solar water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26 (3), 195-201.
- Salemme, L., Menna, L. ve Simeone, M., 2009, Analysis of the energy efficiency of innovative ATR-based PEM fuel cell system with hydrogen membrane separation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (15), 6384-6392.
- Şen, Z., 2004, Mimar ve Mühendis Dergisi, Türkiye'nin Temiz Enerji İmkânları 6-12.
- Shabani, B. ve Andrews, J., 2011, An experimental investigation of a PEM fuel cell to supply both heat and power in a solar-hydrogen RAPS system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (9), 5442-5452.

- Shahsavari, S., Desouza, A., Bahrami, M. ve Kjeang, E., 2012, Thermal analysis of air-cooled PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (23), 18261-18271.
- Shirudi, A., Jafari, N., Monshipour, S. Ve Rahimzadeh, M, 2007, HOMER bilgisayar porogramının kullanılarak İran'ın ilk solar hidrojen sisteminin incelenmesi. 6th National Energy congress. İran.
- Solmaz, R., 2009, Hidrojen gazı elde edilmesi ve metanol elektrokoksasyonu için katalitik electron geliştirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N. ve Gekas, V., 2005, Environmental impacts from the solar energy technologies, *Energy Policy*, 33 (3), 289-296.
- Ural, Z., 2007, Yakıt Pilleri ve Bir PEM Yakıt Pili Sisteminin Dinamik Benzetimi, *Y. Lisans Tezi, Dicle Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran*.
- Wohr, M., Bolwin, K., Schnurnberger, W., Fischer, M., Neubrand, W. ve Eigenberger, G., 1998, Dynamic modelling and simulation of a polymer membrane fuel cell including mass transport limitation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23 (3), 213-218.
- Yang, Z., Zhang, G. ve Lin, B., 2015, Performance evaluation and optimum analysis of a photovoltaic-driven electrolyzer system for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (8), 3170-3179.
- Yilanci, A., Dincer, I. ve Ozturk, H., 2008, Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (24), 7538-7552.
- YILMAZ, Z., Bilgisayar, F. B. E. ve OCAK, Ş., BULANIK MANTIK İLE ANEMİNİN BELİRLENMESİ.
- Ziogou, C., Voutetakis, S., Papadopoulou, S. ve Georgiadis, M. C., 2011, Modeling, simulation and experimental validation of a PEM fuel cell system, *Computers & Chemical Engineering*, 35 (9), 1886-1900.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sajed Zendehtdel Shekardasht
Uyruğu : İran
Doğum Yeri ve Tarihi : Talesh- 19/07/1988
Telefon : +905535445549
Faks :
e-mail : Sajed.zendehtdel@yahoo.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Shahid Modarres, Hashtpar, Talesh	2006
Üniversite	: İslamic Azad university, Tabriz, Tabriz	2011
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi	2016
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2009	Özel tesisat sektörü	Doğal gaz sistemin tasarımcısı
2012	Kuzu Grup	Tesisat kontrolcusu

UZMANLIK ALANI

Konut Tesisat sistemin tasarımı

YABANCI DİLLER

Türkçe, Azerîce, Arapça, İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Ateş, A., and Zendehtdel shekardasht, S, 2016, NUMERICAL MODELLING OF SOLAR ENERGY SUPPORTED HYDROJEN PRODUCTION, *3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16)*, Konya, Turkey (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).