



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİR EVİN ELEKTRİK ENERJİSİ İHTİYACININ ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ
OLARAK KARŞILANMASI: GÜNEŞ PİLİ, PEM ELEKTROLİZÖR VE PEM
YAKIT PİLİ BÜTÜNLEŞİK SİSTEM MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

TEVFİK YİĞİT

Temmuz 2017

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİR EVİN ELEKTRİK ENERJİSİ İHTİYACININ ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ
OLARAK KARŞILANMASI: GÜNEŞ PİLİ, PEM ELEKTROLİZÖR VE PEM
YAKIT PİLİ BÜTÜNLEŞİK SİSTEM MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

TEVFİK YİĞİT

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. İlyas KACAR

Temmuz 2017

Tevfik YİĞİT tarafından **İlyas KACAR** danışmanlığında hazırlanan “**BİR EVİN ELEKTRİK ENERJİSİ İHTİYACININ ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ OLARAK KARŞILANMASI: GÜNEŞ PİLİ, PEM ELEKTROLİZÖR VE PEM YAKIT PİLİ BÜTÜNLEŞİK SİSTEM MODELİ GELİŞTİRİLMESİ**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Durmuş Ali Bircan, Çukurova Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kürşat Yalçın, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. İlyas Kacar, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atf yapıldığını bildiririm.



Tevfik YİĞİT

ÖZET

BİR EVİN ELEKTRİK ENERJİSİ İHTİYACININ ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ OLARAK KARŞILANMASI: GÜNEŞ PİLİ, PEM ELEKTROLİZÖR VE PEM YAKIT PİLİ BÜTÜNLEŞİK SİSTEM MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

YİĞİT, Tevfik

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. İlyas KACAR

Temmuz 2017, 83 sayfa

Bu tez çalışmasında ülkemizin ve dünyanın büyük bölümünün öncelikli ihtiyacı olan enerji konusunda çeşitlilik ve alternatiflerin artırılması amacı ile bu ihtiyaca katkı sağlayabilecek bir sistemin matematiksel modellemesi ve analizi yapılmıştır. Günümüzde bu yönde ortaya atılmış birçok bakış açısı ve farklı fikirler mevcut olsa da bunların birçoğu matematiksel analizler açısından yetersiz olup sadece fikir aşamasındadır. Bu fikirlerin netleştirilebilmesi, daha karşılaştırılabilir olmaları ve hatta uygun görüldüğünde fiziksel hale getirilebilmeleri için matematiksel dinamik modellemelerinin yapılması gerekmektedir. Bu amaç ile birçok yönden avantajlı gördüğümüz PEM (Polimer Elektrolit Membranlı) elektrolizör, PEM yakıt pili ve güneş pillerinden oluşan ve şebekeden bağımsız olarak enerji sağlayacak olan sistem, matematiksel olarak ifade edilerek Matlab / Simulink ortamında dinamik bir model haline getirilmiş ve gerekli çıkarımlar yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: PEM, PEM Elektrolizör, PEM Yakıt Pili, Şebekeden Bağımsız Enerji Sistemleri

SUMMARY

PROVIDING ELECTRIC ENERGY FOR A HOME AS INDEPENDENT FROM THE NETWORK: DEVELOPING OF INTEGRATED SYSTEM MODEL OF PHOTOVOLTAIC CELL, PEM ELECTROLYZER AND PEM FUEL CELL

YIGIT, Tevfik

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. İlyas KACAR

July 2017, 83 pages

In this thesis, mathematical modeling and analysis of a system has been done for the contribution to diversity and alternatives for the energy which one of the priority needs of our country and most of the world. Although today there are many different perspectives and different ideas in this field, many of them are inadequate in terms of mathematical analysis and remain just in the idea stage. Mathematical dynamic models should be set to clarify these ideas, to obtain more comparable models, and if appropriate, to put into practice even. For this purpose, a system that provides energy as standalone and that is composed of PEM (Polymer Electrolyte Membrane) electrolyzer, PEM fuel cell and solar battery which we have seen advantageous in many aspects is mathematically expressed as a dynamic model in Matlab / Simulink environment and the necessary deductions are made.

Key Words: PEM, PEM Electrolyzer, PEM Fuel Cell, Standalone Energy Systems

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması boyunca bilgi ve tecrübesi ile yönlendirerek gerek teknik bilgi gerekse de ilgili kaynaklara ulaşma konusunda destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. İlyas KACAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan annem Belgin YİĞİT, babam Mehmet YİĞİT ile kardeşlerim Aslıhan ve Türker'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiv
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAĞI	9
2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	9
2.2 Ülkemizde ve Niğde Yerelinde Güneş Enerjisi Potansiyeli	10
2.3 Güneş Hücrelerinin Matematiksel Modeli	13
BÖLÜM III HİDROJEN GAZININ ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİMİ	19
3.1 Hidrojen Gazının Özellikleri ve Kullanım Alanları	19
3.2 Hidrojen Üretim Yöntemleri	20
3.2.1 Fosil yakıtlardan hidrojen eldesi	21
3.2.2 Suyun elektrolizi yöntemi ile hidrojen eldesi	22
3.2.3 Termokimyasal yöntem ile hidrojen eldesi	22
3.2.4 Fotoliz ile hidrojen eldesi	23
3.2.5 Mikrobiyolojik yöntemler ile hidrojen eldesi	23
3.3 PEM (Polimer Elektrolit Membranlı) Elektrolizörler	23
3.3.1 PEM elektrolizörlerin çalışma mekanizmaları	25

3.4 PEM Elektrolizörün Matematiksel Modeli ve Matlab / Simulink Benzetimi	27
3.4.1 PEM elektrolizör anot kısmı matematiksel modeli.....	28
3.4.2 PEM elektrolizör katot kısmı matematiksel modeli	30
3.4.3 PEM elektrolizör membran kısmı matematiksel modeli	32
3.4.4 PEM elektrolizör voltaj hesaplamaları kısmı matematiksel modeli	35
3.4.5 PEM elektrolizör modelinden elde edilen sonuçlar.....	38
BÖLÜM IV ENERJİNİN DEPOLANMASI.....	49
4.1 Yenilenebilir Elektrik Enerjisinin Bataryalarda Depolanması	49
4.2 Hidrojen Gazının Depolanması	51
4.2.1 Hidrojen gazının yüksek basınçta depolanması.....	52
4.2.2 Yüksek basınçta depolama matematiksel modeli	54
BÖLÜM V HİDROJEN GAZINDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ	55
5.1 Yakıt Pillerinin Özellikleri ve Çalışma Prensipleri	55
5.2 Yakıt Pili Çeşitleri	56
5.2.1 Alkali yakıt pilleri.....	56
5.2.2 Polimer elektrot membranlı (PEM) yakıt pilleri.....	56
5.2.3 Katı oksit yakıt pilleri	57
5.2.4 Doğrudan metanollü yakıt pilleri.....	57
5.2.5 Erimiş karbonat yakıt pilleri	57
5.2.6 Fosforik asit yakıt pilleri.....	58
5.3 PEM Yakıt Pilleri.....	58
5.4 PEM Yakıt Pili Dinamik Modeli	59
5.4.1 PEM yakıt pili anot kısmı matematiksel modeli.....	59
5.4.2 PEM yakıt pili katot kısmı matematiksel modeli.....	60
5.4.3 PEM Yakıt Pili Membran Kısmı Matematiksel Modeli	61
5.4.4 PEM yakıt pili voltaj hesaplamaları kısmı matematiksel modeli	61
BÖLÜM VI BÜTÜNLEŞİK SİSTEM MODELİ.....	64

6.1 Sistemin Tanımlanması ve Elemanları	64
6.2 Güneş Enerjisi Profili.....	65
6.3 Konutun Yük Profili	66
6.4 Bütünleşik Sistemin Matlab / Simulink Modeli	67
BÖLÜM VII SONUÇLAR.....	74
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	82
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	83



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Ülkemizin aylara göre yıl boyunca güneşlenme verileri	12
Çizelge 2.2. Niğde ili aylara göre yıl boyunca güneşlenme verileri.....	13
Çizelge 3.1. Çeşitli maddelerin enerji yoğunluk değerleri	20
Çizelge 6.1. Konut için enerji kullanımı profili.....	67



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Mikro şebekelerin basit gösterimi	3
Şekil 1.2. Sistemin örnek bir konuta yerleşiminin şema üzerinde basit gösterimi	5
Şekil 1.3. Önerilen sistemin çalışma şeması ve elemanları	6
Şekil 2.1. Dünyada yıllara göre enerji tüketimi	9
Şekil 2.2. Ülkemizin yıllık güneşlenme verileri haritası	11
Şekil 2.3. Niğde ilinin yıllık güneşlenme verileri haritası	12
Şekil 2.4. Güneş hücresi eşdeğer devresi.....	14
Şekil 2.5. Güneş hücresi dizisi eşdeğer devresi	15
Şekil 2.6. Güneş hücresinin Matlab / Simulink modeli	16
Şekil 2.7. 125x125 mm silisyum tip güneş hücresinin akım-gerilim grafiği.....	16
Şekil 2.8. 125x125 mm silisyum tip güneş hücresinin güç-gerilim grafiği.....	17
Şekil 2.9. Ticari bir güneş hücresi parametrelerine göre akım-gerilim grafiği.....	18
Şekil 2.10. Ticari bir güneş hücresi parametrelerine göre güç-gerilim grafiği.....	18
Şekil 3.1. PEM elektrolizörlerin bileşenleri.....	25
Şekil 3.2. PEM elektrolizörün genel görünümü	26
Şekil 3.3. PEM elektrolizörün çalışma mekanizmaları.....	27
Şekil 3.4. Anot kısmı Simulink modeli.....	30
Şekil 3.5. Katot kısmı Simulink modeli.....	32
Şekil 3.6. Membran kısmı Simulink modeli	35
Şekil 3.7. Voltaj hesaplamaları kısmı Simulink modeli	38
Şekil 3.8. Akım ve gerilim değişimine karşılık üretilen hidrojen debisi	38
Şekil 3.9. Voltaja etki eden bileşenlerin akım yoğunluğuna göre değişimi	39
Şekil 3.10. Sıcaklığın hücre voltajına etkisi	40
Şekil 3.11. Sıcaklığın hücre verimine etkisi	40
Şekil 3.12. Farklı basınç değerlerinde çalışan hücreler için sıcaklığın etkisi	41
Şekil 3.13. Farklı sıcaklık değerlerinde çalışan hücreler için basıncın etkisi	41
Şekil 3.14. Sabit sıcaklık ve basınçta çalışan hücreye akım yoğunluğunun etkisi	42
Şekil 3.15. Değişken sıcaklık ve basınçta hücre voltajının değişimi.....	42
Şekil 3.16. Sistem bileşenlerinin performans etkisi	43

Şekil 3.17. Aynı parametreler için deneysel hücre ve model karşılaştırması.....	44
Şekil 3.18. Santarelli ve arkadaşlarının (2009) akım-gerilim grafiği	45
Şekil 3.19. Han ve arkadaşlarının (2015) akım-gerilim grafikleri.....	45
Şekil 3.20. Dale ve arkadaşlarının (2008) akım-gerilim grafikleri.....	46
Şekil 3.21. Görgün'ün (2006) çalışmasına ait akım-molar hidrojen grafiği.....	46
Şekil 3.22. Garcia-Valverde ve arkadaşlarının (2011) akım-gerilim grafikleri.....	47
Şekil 3.23. Awasthi ve arkadaşlarının (2011) akım-gerilim grafikleri	48
Şekil 4.1. Gelişmiş kompozit hidrojen depolama tanklarının kesit görünümü.....	53
Şekil 4.2. Hidrojen depolama tankının Simulink modeli.....	54
Şekil 5.1. Yakıt piline ait akım-gerilim ve akım-güç grafikleri.....	63
Şekil 6.1. Güneş enerjisi miktarının saatlik değişiminin aylara göre grafiği.....	66
Şekil 6.2. Bütünleşik sisteme ait Matlab / Simulink modeli.....	68
Şekil 6.3. Sisteme girilen yük ve güneş hücrelerinden elde edilen güç.....	69
Şekil 6.4. Üretilen - harcanan hidrojen gazı miktarı ve depolama basıncı değişimi	69
Şekil 6.5. PEM yakıt pilinin ürettiği akım ve gerilim değerleri	70
Şekil 6.6. PEM yakıt pilinin tükettiği hidrojen ve oksijen miktarları.....	70
Şekil 6.7. Yakıt pilinden karşılaması beklenen güç ve yakıt pilinin ürettiği güç	71
Şekil 6.8. Birinci senaryoya göre sistemin ürettiği ve tükettiği enerji miktarları.....	71
Şekil 6.9. İkinci senaryoya göre sistemin ürettiği ve tükettiği enerji miktarları.....	72
Şekil 6.10. Üçüncü senaryoya göre sistemin ürettiği ve tükettiği enerji miktarları.....	73

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Deneylerde kullanılan polimer elektrot membrana ait bir görüntü.....	24
Fotoğraf 3.2. 10 hücreli PEM elektrolizör test düzeneğine ait bir görüntü	44



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
M_{toe}	Milyon ton petrol eşdeğeri
A	Hücrenin aktif alanı
I	Akım
i	Akım yoğunluğu
a	Anot
c	Katot
N	Anlık molar miktar
n	Elektrolizör toplam hücre sayısı
T_{el}	Elektrolizör sıcaklığı
R	Evrensel gaz sabiti
V_a	Anot hacmi
V_c	Katot hacmi
y	Molar oran
M	Moleküler ağırlık
F	Faraday sabiti
α	Şarj transfer sabiti
t_m	Membran kalınlığı
D	Difüzyon katsayısı
σ_m	Membranın iletkenliği
EW_m	Membranın eşdeğer ağırlığı
ρ_m	Membranın yoğunluğu
P	Basınç
eod	Elektro-osmotik sürüklenme
n_d	Elektro-osmotik sürüklenme sabiti
act	Aktivasyon
H_2O	Su molekül formülasyonu
H_2	Hidrojen molekül formülasyonu

Simgeler**Açıklama**

O_2	Oksijen molekül formülasyonu
λ	Membranın su içeriği
V_{act}	Aktivasyon potansiyeli
V_{ohm}	Omik potansiyel
η	Verim



BÖLÜM I

GİRİŞ

Dünyada üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık üçte ikisi konutlarda kullanılmakta ve bunun çok büyük kısmı ise fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu da enerji üretimi nedeni ile meydana gelen çevre kirliliğinin de üçte ikisinin sorumlusunun konutlar olduğunu göstermektedir (Jiang ve Rahimi-Eichi, 2009). Enerji ihtiyacının da giderek arttığı düşünüldüğünde günümüzde alternatif enerji yöntemlerinin ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Sorun kabaca incelendiğinde bile yenilenebilir enerjiye geçişte en önemli adımın konutlarda yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması konusunda atılması gerektiği görülmektedir.

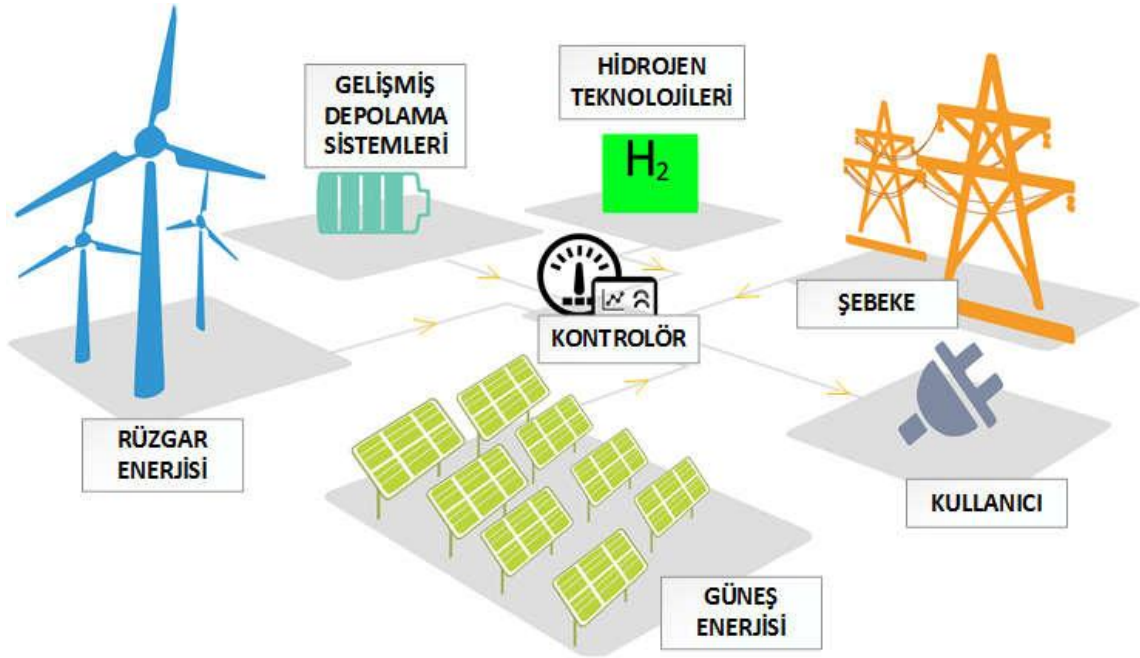
Yenilenebilir teknolojiler son yıllarda önemli ilerleme kaydetmiş, çalışmalar giderek hız kazanmıştır. Gelişmekte olan bu sistemlerin daha fazla araştırılmaya, eksikliklerinin giderilmesine ve maliyetlerinin azaltılmasına ihtiyaç vardır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr ve güneş enerjileri kaynaklı teknolojiler diğer yöntemlere göre daha bilinir ve gelişmekte olan sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Konut uygulamalarında bu iki sistem arasından ise güneş enerjisi daha sürekli ve şiddetinin rüzgâra oranla daha tahmin edilebilir olması, sessiz olması ve güvenlik açısından hareketli parçaların bulunmuyor olması ile öne çıkmaktadır. Ancak hangi koşulda olursa olsun süreksizlikleri nedeni ile iki yöntemin de tek başına yardımcı elemanlar olmaksızın devamlı kullanımları mümkün değildir, eksik yönleri bulunmasına karşın yenilenebilir enerji kaynakları arasından sadece güneş enerjisi kullanılarak bile günümüzde dünyanın enerji ihtiyacının fazlasıyla karşılanabileceği düşünülmektedir. Bu durum da aslında bu büyük potansiyellerine kıyasla bu tür enerjilerden yeterince faydalanamadığımız anlamına gelmektedir, bu da neden ivedilikle araştırmaları ve geliştirilmeleri gerektiğinin göstergesidir.

Günümüzde enerji üretimi daha çok yüksek kapasiteli geleneksel merkezi sistemler vasıtası ile yapılırsa da yenilenebilir enerji kullanım oranlarını arttırmak hedefi doğrultusunda bu tarz santrallerin yerini küçük güçlü, merkezi kontrollü, dağıtılmış, akıllı mikro santrallerin alacağı öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin

sürekliliği sağlamak adına çeşitlendirilerek kullanılması ve her bir sistemin de genellikle tek başına geleneksel sistemlerin gücüne erişememesi nedeniyle birden fazla küçük güçlü sistem merkezi kontrollü halde birlikte çalışmalıdır. Kontrollü ve dağıtılmış düşük güçlü sistemlerden oluşan bu sistemler literatürde mikro şebekeler olarak adlandırılmaktadır ve üretim kapasiteleri birkaç kW seviyelerinden birkaç MW seviyesine kadardır.

Merkezi olarak kontrol edilebilir daha düşük voltaj seviyelerindeki küçük sistemler ya da şebekeden tamamen izole tekil sistemler ile enerji temini birçok açıdan avantajlı görülmektedir. Dağıtım ve iletim hatlarında oluşan kayıplar, kaçak kullanımlar ve dinamik büyük yüklerin kontrol zorluğunun yanı sıra hatlarda ve santrallerde meydana gelebilecek sorunlardan dolayı yaşanacak kesintilerin de mikro şebekeler sayesinde en aza ineceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra şebekeden bağımsız sistemler enerjinin ulaştırılmadığı kırsal alanlarda dahi kullanılabilme olanağını da sunmaktadır. Üstünlüklerinden bir diğeri ise yakın gelecekte enerjinin kısa mesafelerde üretilecek olması nedeni ile enerji alternatif akım yerine doğrudan doğru akım formunda taşıyıp konutlarda da elektronik aletlerin evrensel bir doğru akım güç girişine sahip olmaları ile dönüştürücülerin ortadan kalkarak verimin artacak olmasıdır. Ayrıca özellikle ülkemiz gibi enerji konusunda dışa bağımlı ülkelerde değişen enerji politikaları ve değişken döviz kurlarına daha dirençli olabilmek adına bu tarz sistemleri yaygınlaştırarak enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi de diğer bir önemli konudur.

Mikro şebekeler konusunda çalışılan bazı özelleşmiş konuların yanı sıra özellikle küçük ölçekli, bir veya birkaç konut ölçekli enerji sistemleri de çalışılan gözde konulardandır. Bu çalışmalar arasında hem şebekeden bağımsız sistemler hem de şebeke destekli çalışan tasarruf ve süreklilik amaçlı sistemler yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalar çeşitli yöntem farklılıkları ile birbirinden ayrılmaktadır, bu çalışmalar arasında önerilen sistemlerin önemli bir bölümü hidrojen gazının enerji taşıyıcı ve depolayıcı özelliklerinden faydalanmayı önermektedir (Santarelli, 2004; Little vd., 2007; Paul, 2008; Jiang ve Rahimi-Eichi, 2009; Jalilzadeh vd., 2009; Stewart vd., 2009; Maclay vd., 2011).



Şekil 1.1. Mikro şebekelerin basit gösterimi

Ülkemizde Pamukkale Üniversitesinde yapılan bir çalışmada konutlar için güneş pili ve rüzgâr türbinine destek sistem olarak yakıt pili kullanılmış gelecekte yaygınlaşacağı ön görülen mikro ölçekli doğru akım dağıtım sistemi ele alınmıştır. İnverter kullanımının hem kayıp hem de enerjilendirme sırasında hatta çeşitli harmoniklere sebep olduğu tespit edilmiştir, ayrıca sistemin ilk kurulum maliyetini arttırdığından dezavantaj olarak görülmektedir. Hibrit sistemin ocak ayındaki toplam verimi ise %8,72 olarak hesaplanmıştır (Cetin vd., 2009).

Bazı sistemler, elektrolizör ve yakıt pillerinin çalışma sürelerince yaydıkları ısı enerjisini de kullanarak kayıp olarak görülen bu enerjinin önemli bir bölümünü evin sıcak kullanım suyu ve ısınma ihtiyacının karşılanması amacıyla kombine güç-enerji sistemleri olarak tasarlamışlardır. Küçük ölçekli bir yerleşim alanı için Colson ve Nehrir (2011). tarafından planlanmış olan çalışmada ise KOYP (Katı Oksit Yakıt Pili) ve bataryalar kullanılmış yerleşim yerinin hem elektrik enerjisi hem de sıcak su ihtiyacı karşılanmak amacıyla 1 MW güce sahip bir kombine güç-ısı sistemi Matlab/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Simülasyondan elde edilen verilerle yapılan verim hesabında göre geleneksel güç santrallerinden daha verimli olduğunu göstermişlerdir. Hamada (2011) ve arkadaşlarının deneysel çalışmasında ise güneş pili, yakıt pili ve güneş kollektörü kullanan ve şebekeden de ayrıca destek alan hibrit bir sistem kurulmuştur. Optimum kapasite değerleri için yakıt

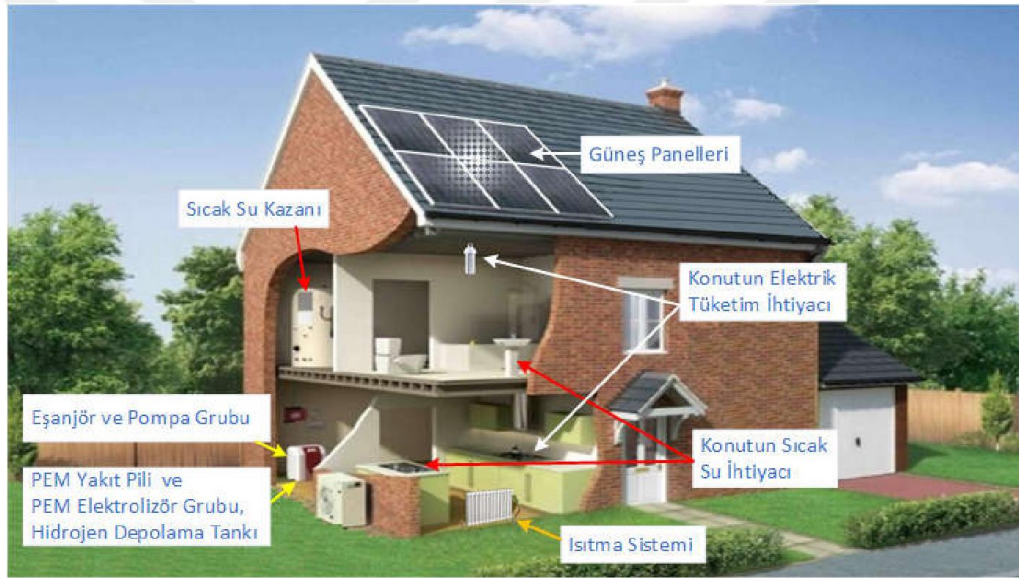
pilleri ile solar kollektör hibrit sistemi kullanılması durumunda enerji verimlerinde yıllık %26-28, yakıt pilleri ile güneş pilleri hibrit sistemi kullanılması durumunda ise %46-66 'ya varan artış değerleri elde edilmiştir.

Santarelli ve arkadaşları (2004) ise güneş, rüzgâr ve mikro-hidro enerji kullanan ve şebekeden bağımsız, yıllık 3 MW enerji üretebilecek bir sistem tasarlamışlardır. Yakıt pili ve güneş pili hibrit sistemine ek olarak dizel jeneratör kullanılan bir diğer çalışma ise Shahnia ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir (Shahnia vd., 2010). Sistemin ekonomik boyutu ise Jalizadeh ve arkadaşları tarafından çalışılmış, şebekeden mahrum bölgeler için PEM yakıt pili ve güneş pilinden oluşan sistemin simülasyonu üzerinden maliyet optimizasyonu yapmışlardır (Jalilzadeh vd., 2009). Şebekeden kullanılan enerjiyi azaltıp tasarruf etmeye yönelik bir çalışma ise Stewart ve arkadaşları (2009) tarafından yapılmıştır. Güneş pili ve yakıt pili hibrit sistemi tasarlanmış ve kontrol tarafı için ise bulanık mantık ve adaptif kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Yine Stewart ve arkadaşlarının çalışmasına benzer bir çalışmada ise güneş ışığı tahmini için yapay sinir ağı modeli kullanılmış ve bu bilgiler ışığında elektroliz ile hidrojenin üretilip yakıt pilinde kullanılarak elektrik enerjisi elde edildiği bir simülasyon hazırlanmıştır, simülasyonda fazla enerji şebekeye verilip yetersiz kaldığında ise şebekeden destek alınmıştır (Zervas vd., 2008).

Literatür incelendiğinde hidrojen teknolojilerinin farklı kullanım gerekçeleri ile alternatif sistemler olarak deneysel ve sayısal olarak çalışıldığı görülmüştür ve anlaşılacağı üzere son yıllarda şebekeden tamamen bağımsız ya da kısmen bağımlı çalışan sistemlere ilgi artmaktadır. Yenilenebilir enerjinin farklı coğrafyalar ve bazı yerel durumlarda kullanımı hem hibrit sistemler hem de depolama yöntemi olarak akılcı çözümler bulunmasına rağmen birkaç yöntem dışında her çözüm her duruma uygulanabilir değildir. Öncelikle bulunacak olan çözümlerin büyük oranda her coğrafyada uygulanabilir ve olabildiğince çok yönlü olması gereklidir. Bu açıdan gündüz saatlerinde fazla enerjinin hidrojen formunda depolanarak gece saatlerinde de kullanılması her konutta uygulanabilecek bir çözüm olduğu gibi kullanıma ihtiyaç duyulmaması durumunda da uzun süreler kayıp olmadan saklanması büyük bir üstünlüktür. Ayrıca bu sistemin atık ısı potansiyelinin de ani sıcak su ihtiyacı ve kış aylarında ısınma ihtiyacı için kullanılması sistem verimini yüksek değerlere çıkarmakla beraber ısı-enerji kombine sistemi olarak tüm enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılabilir. Ayrıca şebeke enerjisinin

ulaştırılmadığı noktalarda da güneş enerjisine ek olarak rüzgâr ve mikro-hidro enerji ile desteklenerek şebekeden bağımsız sistemler elde edilmesi mümkündür.

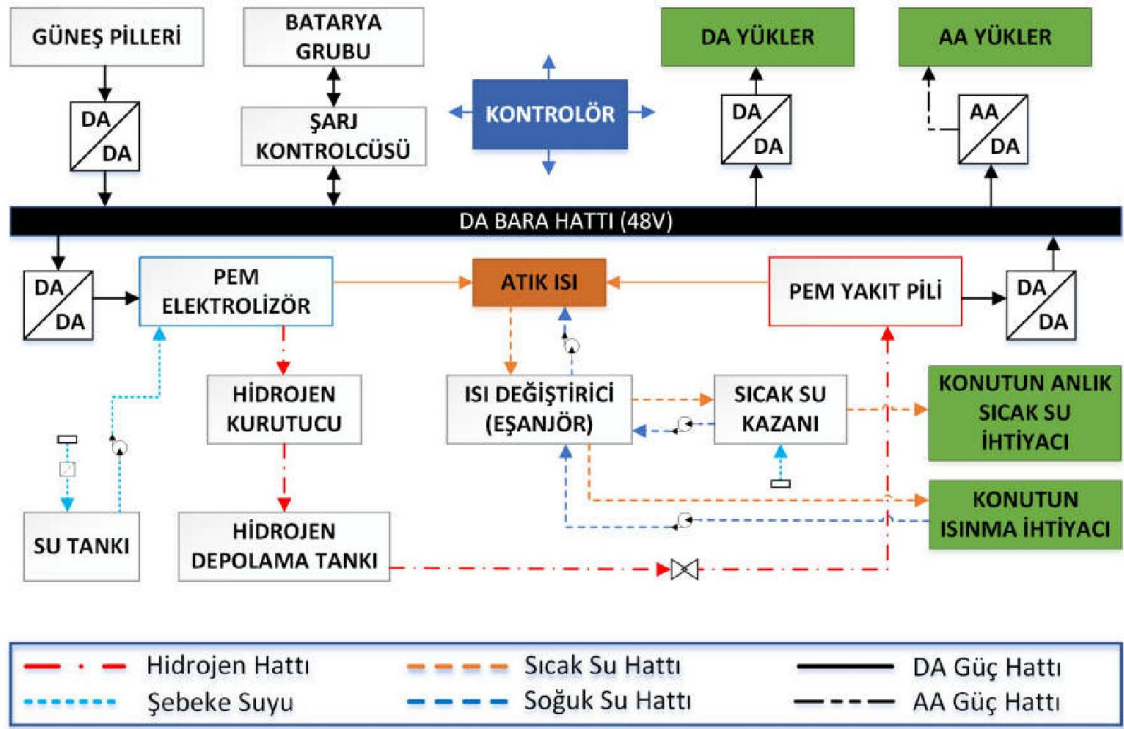
Bu tez çalışmasında ana parçaları güneş pilleri, PEM elektrolizör ve PEM yakıt pili olan fazla enerjinin ise hidrojen formunda depolandığı, konuta ise kesintisiz elektrik enerjisi, ısıtma ve sıcak kullanım suyu sunabilen bir sistem önerilmiş ve modellenmiştir. Ülkemizdeki ortalama bir evin saatlik ortalama enerji ihtiyaçları literatürden de faydalanılarak tespit edilmiş böylece modelde idame ettirmemiz gereken dinamik bir yük elde edilmiştir. Bu yükü sağlayacak en küçük ve yeterli sistem boyutları tespit edilerek modellenmiştir. Sistemin örnek bir konut üzerindeki yerleşimi şema halinde Şekil 1.2 üzerinde görülebilir.



Şekil 1.2. Sistemin örnek bir konuta yerleşiminin şema üzerinde basit gösterimi

Bahsi geçen süreksizlik ve değişkenlik gibi olumsuz yönlerinin aşılması adına enerjinin günün diğer saatlerinde de kullanılması için olabildiğince verimli olarak depolanması gerekmektedir. Depolama yöntemleri oldukça çeşitli olmakla beraber aşılması gereken problemlerin başında geldiği için son yıllarda yenilenebilir enerji alanında en çok araştırılan konuların da başındadır. Doğrudan elektrik enerjisinin depolanması fikrinin yanı sıra son yıllarda çeşitli yan teknolojiler kullanılarak veya birden fazla yenilenebilir kaynak bir arada kullanılarak son kullanıcıya doğrudan enerji sağlayabilecek çeşitli birleşik sistem fikirleri ortaya atılmıştır. Bu tez çalışmasında da şebekeden bağımsız birleşik bir enerji sisteminin matematiksel analizi için modelleme çalışmaları yapılarak

dinamik modeli Matlab / Simulink benzetim ortamında hazırlanmıştır. Literatürde az sayıda da olsa benzer sistemler önerilmiş ancak daha çok ekonomik analizler kısmına yoğunlaşmış olup matematiksel model ve benzetim verileri konusunda eksik kalmış, sınırlı sayıda çalışma bu yöne eğilmiştir. Tez çalışmasında önerilen sistemin çalışma şeması Şekil 1.3 üzerinde görülebilir.



Şekil 1.3. Önerilen sistemin çalışma şeması ve elemanları

Tez çalışmasının daha önce yapılan çalışmalardan en büyük farkı bahsi geçen sistemin tamamı ile benzetim ortamına aktarılacak olmasıdır. Sistem modelinin en karmaşık ve üzerinde durulacak parçası ise PEM elektrolizör ve PEM yakıt pili sistemi modelleridir. Literatür incelendiğinde PEM yakıt pili modeli üzerinde oldukça fazla çalışma bulunmasına rağmen PEM elektrolizörlerin matematiksel modellerinin ve benzetimlerinin çok fazla çalışılmamış olduğu görülebilir. Sistem halinde tüm parçaları kapsayacak çalışma ise bu tez çalışmasından önce yapılmamıştır (Yigit ve Selamet 2016). Elektrolizör hücresi veya yığınının modellenmesi PEM elektrolizörün çalışma davranışının anlaşılması için büyük öneme sahiptir (Rahim vd., 2016). Kendi özgün kodlarını kullanarak (Grigoriev vd., 2010), istatistiksel verileri kullanarak (Marangio vd., 2009) veya paket program kullanarak (Nie vd., 2007, 2008) hücre veya hücre bölümlerini karakterize eden, tanımlayan birkaç matematiksel model ve hesaplamalar literatürde

mevcuttur, ancak sistem olarak model haline getirilmemiştir. Üç hücreli bir PEM elektrolizör yığını atmosferik basınç sabit sıcaklık ve sabit su debisi koşullarında Matlab/Simulink ortamında Görgün (2006) tarafından modellenmiştir. Awasthi ve arkadaşları (2011) sıcaklık ve basınç değişimlerinin hücre performansına etkilerini incelemişlerdir. Lee ve arkadaşları (2013) sıcaklık, su debisi ve akış alanının etkilerini gözlemlemek için bir PEM elektrolizör modeli geliştirmişlerdir ve sonuçları deneysel verileri ile karşılaştırmışlardır. Han ve arkadaşları (2015) ise difüzyon mekanizmasından kaynaklanan potansiyel farkı da hesaplayabilen elektrokimyasal bir model geliştirmişlerdir. Abidin ve arkadaşları (2015) bir PEM elektrolizör modeli geliştirmiş ve elektrolizör üzerindeki elektriksel direnç mekanizmalarını temsil eden bir elektrik devresi analogisi de hazırlamışlardır. Ayrıca sıcaklık ve basıncın performansa etkisini inceleyerek kendi sonuçlarını diğer basılı kaynakların deneysel sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Çoğu modelleme çalışmaları PEM elektrolizörlerin fizik hesaplarına veya davranış karakteristiğine yoğunlaşmıştır. PEM elektrolizörün davranış karakteristiği tasarım sürecinde araştırılması ve çalışılması gereken parametrelere bağlıdır, bu nedenle tasarım sürecinde çalışma parametrelerinin benzetim aracılığı ile belirlenmesi ve eniyilemesi deneysel çalışmalar ve üretim sürecini kısaltması hatta ileriye taşınması açısından oldukça önemlidir. Bazen hücre ya da yığının çalışma parametreleri diğer sistem elemanlarına ve bu elemanların özelliklerine göre de değişmektedir. Güç kaynağı, su pompaları, su tankı, soğutma sistemi, kontrol ünitesi, sensörler ve borulama ve gaz depolama sistemleri gibi elemanlar da çalışma parametrelerinin değerine etki etmekte ve istenilen aralıkta tutulmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle tam bir sistem modeli ile tüm elemanların parametreleri de doğru bir şekilde belirlenebilecek ve bu elemanların elektrolizör üzerindeki etkileri de tahmin edilebilir olup daha verimli bir tasarım gerçekleştirmek mümkün olacaktır. Böyle bir model sürekli olarak çevre koşulları ile çalışma koşullarını denetleyerek yeni çalışma koşullarına karar vermelidir.

Literatürde yakıt pilleri ile ilgili birçok sistem modeli çalışması görülebilir (Arsov, 2008; del Real vd., 2007; Haraldsson ve Wipke, 2004; Olesen vd., 2016; Pathapati vd., 2005; Spiegel, 2008; Wang vd., 2005). Ancak PEM elektrolizörlerin sistem modeli ile ilgili çalışmalar literatürde henüz yer almamaktadır. Dale ve arkadaşları (2008) ticari bir elektrolizör modeli gerçekleştirmiş ancak bu modele sistem elemanlarını dâhil etmemişlerdir. Her ne kadar tam bir sistem modeli olmasalar da literatürde iyi ifade

edilmiş PEM elektrolizör modelleri az sayıda olsa da mevcuttur (Abdin vd., 2015; Aouali vd., 2014; Awasthi vd., 2011; Gorgun, 2006; Han vd., 2015; Shen vd., 2011). Bu tez çalışması, bahsi geçen sistemin Matlab/Simulink ortamında modellenerek sistemin fiziksel hale getirilebilirliğinin araştırılması önündeki engellerin ya da yapılması gereken geliştirmelerin ön görülmesi açısından önemli görülmektedir.

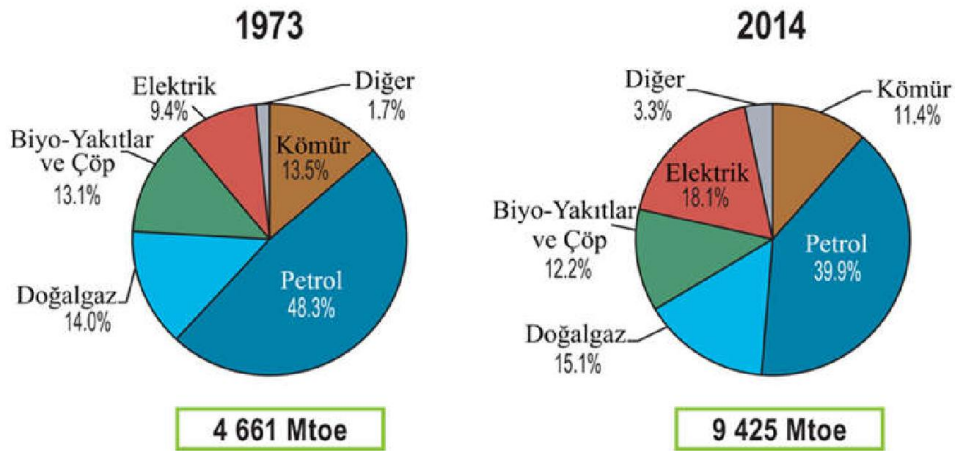


BÖLÜM II

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAĞI

2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre 2014 yılı itibari ile dünya üzerinde tüm kaynaklar dâhil olmak üzere saatlik 9425 Mtoe enerji tüketimi gerçekleşmektedir (International Energy Agency, 2016). Bu da yaklaşık olarak yılda 100 bin TeraWh enerji tüketimi anlamına gelmektedir. Elimizdeki verilere göre 1973 yılından 2014 yılına gelindiğinde tüketilen toplam yıllık enerji miktarı iki katından daha fazla hale gelmiş ve geçen 41 yıla rağmen enerji alternatiflerimiz ne yazık ki değişmemiştir. Şekil 2.1’de de görüleceği üzere bahsi geçen bu tüketim değerinin yaklaşık olarak %40’ı petrol, %18’i elektrik %15’i ise doğalgaz olarak gerçekleşirken sadece %3.3’lük çok küçük bir kısmı rüzgâr, solar ve jeotermal gibi temiz kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu durumda tüketilen doğal kaynakların ve bu tüketim sırasında meydana gelen çevre kirliliğinin boyutları da inanılmaz ölçülerle tasvir edilmekte ve gelecek adına büyük endişeler uyandırmaktadır. Avrupa Birliği Komisyonu 2020 yılında yenilenebilir enerji kullanımını toplam enerji kullanımının %20 sini karşılayacak hale getirmek ve mevcut emisyon değerlerini 1990 yılına oranla %20 hatta mümkünse %30 azaltmak hedeflerini de bu doğrultuda oluşturmuştur. Bu hedef 20-20-20 hedefi olarak da bilinmektedir.



Şekil 2.1. Dünyada yıllara göre enerji tüketimi (International Energy Agency, 2016)

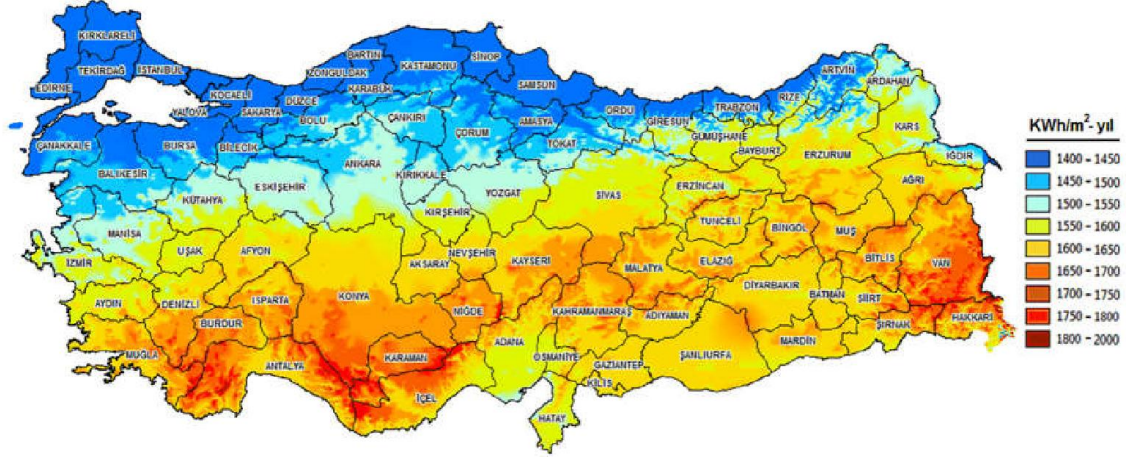
Bu durumun çözümü sadece yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması ve zaman içerisinde fosil yakıtların ve doğaya zararlı diğer enerji üretim yöntemlerinin yerinin alması ile mümkün olabilir. Bu bakımdan yenilenebilir enerji türlerinin belirlenmesi, karşılaştırılması ve potansiyellerinin tespiti adına yapılan çalışmalar oldukça önemlidir. Üstünlük ve eksikliklerine göre sınıflandırılan yenilenebilir enerji türleri arasında özellikle rüzgâr, güneş ve dalga enerjileri öne çıkmaktadır. Dalga enerjisi kullanımı için coğrafi konumun uygun olması gerektiğinden her probleme uygulanabilir değildir ancak uygun şartlarda oldukça verimli bir alternatif olabilir. Rüzgâr ve güneş enerjileri ise dünyanın genel nüfus yoğunluğunun yaşadığı hemen hemen her coğrafyada erişilebilir olarak tanımlanmaktadır. Bunlar arasından ise rüzgâr enerjisi bireysel kullanımlar için başta maliyet olmak üzere gürültülü çalışma, hareketli parçalar nedeni ile canlılar için yaralanma tehlikesi gibi olumsuz yönlere sahiptirler ve daha çok yüksek kurulu güce sahip büyük projelerde ve şehir dışındaki rüzgâr potansiyeli fazla olan yüksek rakımlı bölgelerde kullanılmaya uygundur. Ayrıca sığ ve kayalık sahiller ile tarıma elverişsiz engebeli arazilerde de kullanılabilir olması bu tarz uygulamalarda rüzgâr enerjisinin seçilmesi için avantaj sağlayabilir. Ev için ise güneş pilleri küçük uygulamalarda nispeten daha uygun ilk kurulum maliyetleri ile öne çıkmaktadır. Özellikle şehir dışındaki şebekeden bağımsız müstakil ev kullanımları için günümüzde sıkça kullanımına başvurulmaktadır.

Günümüzde güneş enerjisine geçişin hızlanması için başlangıçta atılması gereken ilk adım ilk kurulum maliyetlerinin düşürülmesi olacaktır (Karaveli vd., 2015). İlk kurulum maliyetinin ise büyük kısmını arazi / kullanım alanı maliyeti oluşturmaktadır. Bu sorunun çözümü için toplu ve büyük güneş tarlaları yerine küçük çapta ve konut ölçekli sistemler önerilebilir. Bu sayede zaten kullanım dışı olan evlerin çatıları ve güneş gören dış cepheler gibi alanlar güneş panelleri için kullanılabilir ve ilk kurulum maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilir bunun da sistemin pazarlanabilirliğini arttıracığı düşünülmektedir.

2.2 Ülkemizde ve Niğde Yerelinde Güneş Enerjisi Potansiyeli

Ülkemizde güneş enerjisi destekli hibrit sistemlerin kullanılabilirliğinin tespit edilebilmesi için öncelikle güneş enerjisi potansiyellerinin araştırılması gereklidir. Bu konuda gerekli bilgiler Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) veri tabanı üzerinden elde edilebilir (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2017).

Bu verilere göre Türkiye'nin birçok ilinde güneşlenme kalitesi üst seviyede olup yeterli güneşlenme süreleri ve enerji değerleri elde edilebilmektedir. Şekil 2.2'de ülkemize ait güneşlenme değerlerini gösteren harita görülebilir.



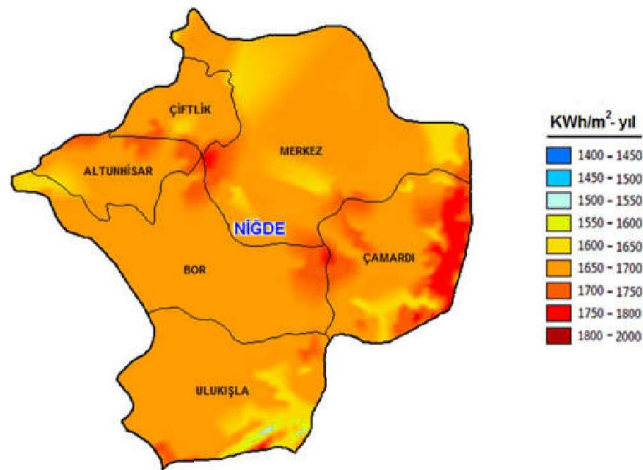
Şekil 2.2. Ülkemizin yıllık güneşlenme verileri haritası (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2017)

Bu haritaya göre ülkemizin güneyine gidildikçe genel olarak güneş radyasyonu artmakta ve coğrafi konumun yanı sıra bazı jeomorfolojik özelliklerin de etkisi ile bazı bölgelerde özellikle yoğunlaşmaktadır. Bu veriler yıllık ortalama değerler olup daha doğru modellemeler için mevsimsel etkenlere bağlı, aylara göre değişen güneşlenme verileri kullanılmalıdır. Aylara göre hazırlanmış veriler ise Çizelge 2.1'de görülebilir.

Bu değerler ülkemiz için temel alınabilecek ortalama değerler olup gerçekte bu değerler günün her saatinde bile değişiklik gösterebilecek değerlerdir, ancak daha kesin benzetim sonuçları için bu değerlerin daha yerel olan yöreye göre özelleştirilmiş halleri kullanılabilir. Bu nedenle ilgili sistem için Niğde ili güneşlenme verileri de kullanılmıştır. Farklı uygulamalar ve hesaplamalar için ise benzetim veri tabanına başka bölgelerin yerel değerlerinin girilmesi veya birçok yörenin sisteme eklenerek benzetim sırasında sadece yöre seçimi yapmak oldukça mümkündür. Niğde ili için de güneşlenme verileri yine Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü veri tabanından alınabilir, bu veriler Şekil 2.3'de de görülebilir. Matematiksel veriler ise Çizelge 2.1 üzerinden incelenebilir.

Çizelge 2.1. Ülkemizin aylara göre yıl boyunca güneşlenme verileri (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2017)

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ
	Kcal/cm ² .ay	KWh/m ² .ay	Saat/ay
OCAK	4,6	53,7	123,3
ŞUBAT	6,5	75	156,6
MART	10,2	119,1	188,1
NİSAN	12,7	147,9	232,8
MAYIS	15,8	184,2	273
HAZİRAN	17	197,1	324,3
TEMMUZ	16,8	195	339,3
AĞUSTOS	15	174,3	321
EYLÜL	12,4	144,3	276,9
EKİM	8,9	103,8	206,1
KASIM	5,5	64,2	154,5
ARALIK	4,1	47,7	112,5
TOPLAM	129,5	1506,3	2708,4
ORTALAMA	10,79	125,53	225,7



Şekil 2.3. Niğde ilinin yıllık güneşlenme verileri haritası (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2017)

Çizelge 2.2. Niğde ili aylara göre yıl boyunca güneşlenme verileri (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2017)

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ
	Kcal/cm ² .ay	KWh/m ² .ay	Saat/ay
OCAK	5,2	60,9	132,3
ŞUBAT	6,8	79,5	164,4
MART	10,9	126,9	202,2
NİSAN	13,2	153,3	235,5
MAYIS	16,4	191,1	285,3
HAZİRAN	17,7	205,2	341,7
TEMMUZ	17,9	207,6	364,8
AĞUSTOS	15,6	181,8	347,1
EYLÜL	13,2	153	301,8
EKİM	9,7	112,8	228,3
KASIM	6,2	71,7	169,5
ARALIK	4,7	54,3	117
TOPLAM	137,5	1598,1	2889,9
ORTALAMA	11,46	133,18	240,83

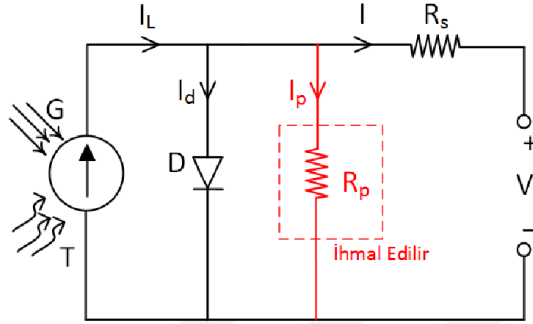
Görüldüğü üzere Niğde yerelinde düşen güneş radyasyonu Türkiye geneline göre yıl ortalaması bakımından %6.1 daha fazladır. Bu da Türkiye geneline göre birim güneş pili alanından %6.1 daha fazla enerji alınabileceği anlamına gelmektedir.

2.3 Güneş Hücrelerinin Matematiksel Modeli

Güneş pilleri üretim teknolojisine bağlı olarak üretimin hassasiyetine göre kullanılan malzeme, iç direnç, kontak dirençleri gibi parametreler ile verimi değişen elemanlardır. Kendi iç parametreleri dışında ise ortam sıcaklığı (T) ve ışık şiddeti (G) gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Literatürde ilk olarak 1994 yılında Lorenzo tarafından güneş pillerinin eşdeğer devre modeli hazırlanmıştır (Lorenzo, 1994). Bu model; bir akım kaynağı, akım kaynağına

paralel bir diyot ve güneş pilinin iç kayıplarını ifade eden seri bir direnç ile kaçak akımlarla meydana gelen kayıpları ifade eden paralel bir dirençten oluşmaktadır. Bu paralel direnç ise çok küçük olması nedeni ile genellikle ihmal edilir. Eşdeğer devre modeli Şekil 2.4'de görülebilir.



Şekil 2.4. Güneş hücresi eşdeğer devresi

$$P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt} \quad (2.1)$$

$$\eta = \frac{P_{çikan}}{P_{giren}} , \quad \eta_{max} = \frac{P_{max}}{G \cdot A} \quad (2.2)$$

Güneş pilinin en yüksek verim ile çalışması için en uygun gerilim ve akım değerlerinde çalışması gerekmektedir, bu da gücün en yüksek olduğu noktadır. Burada η verimi ifade etmektedir, G ışık şiddeti, A ise birim hücre için aktif alandır. Bu eşdeğer devreden yola çıkarak akım ve gerilim denklemleri 2.3 ve 2.4 deki gibi elde edilebilir.

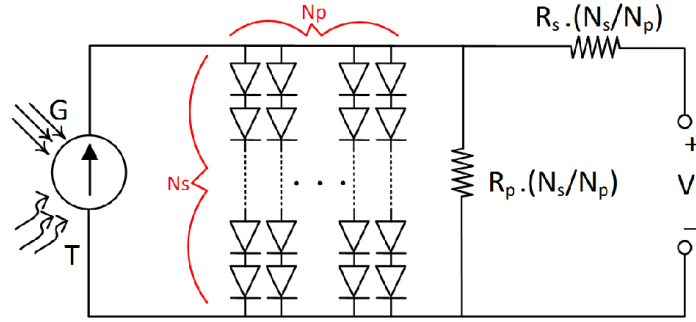
$$I = I_L - I_0 \left(e^{(V+R_s I)/(k \cdot T/q)} - 1 \right) \frac{V+R_s \cdot I}{R_p} \quad (2.3)$$

Burada paralel direnç (R_p) ihmal edilebileceğinden gerilim denklemi gerekli işlemlerin ardından denklem 2.4 deki hali alır.

$$V = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_L + I_0 - I}{I_0} \right) + R_s \cdot I \quad (2.4)$$

Burada k Boltzmann sabiti ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K), T Kelvin cinsinden sıcaklık ve q ise elektron yüküdür. Bu denklemler tek bir güneş hücresi için olup güneş paneli ya da güneş

pili dizisi denilen yapı için ise istenen sayılarda seri ve paralel bağlı hücreler gerekmektedir. İstenen akım değerlerine erişmek için istenen sayıda güneş hücresi paralel olarak bağlanmalıdır, gerilim değerini arttırmak için ise paralel diziler bir birine seri olarak bağlanır. Bu durumda eşdeğer devre Şekil 2.5'deki hali alırken akım ve gerilim denklemleri ise denklem 2.5 ve 2.6'daki gibi yazılabilir.



Şekil 2.5. Güneş hücresi dizisi eşdeğer devresi

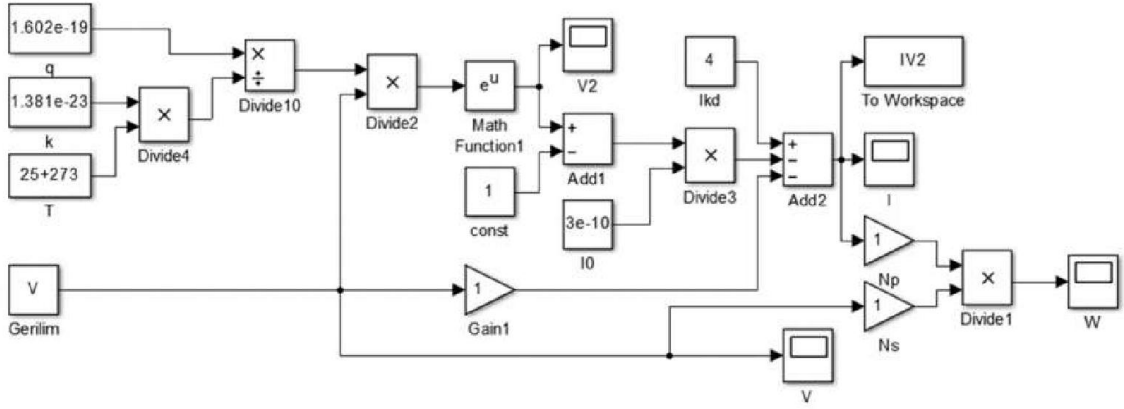
$$I = N_p \cdot I_L - N_p \cdot I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{V + R_s I}{N_s + N_p} \right) / (k \cdot T / q)} - 1 \right) \quad (2.5)$$

$$V = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_L + I_0 - I + N_p}{I_0 \cdot N_p} \right) - \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s \cdot I \quad (2.6)$$

Burada N_p paralel bağlı güneş hücresi sayısı N_s ise seri bağlı güneş hücresi sayısıdır. Güneş hücrelerinin dizi halinde kullanımı için elde edilen denklemlerde asıl parametreler olan ışık şiddeti ve sıcaklık değişkenleri ile tanımlanan I_L değeri yerine konulduğunda model tamamlanmış olacaktır. I_L değeri denklem 2.7'deki gibi tanımlanmaktadır.

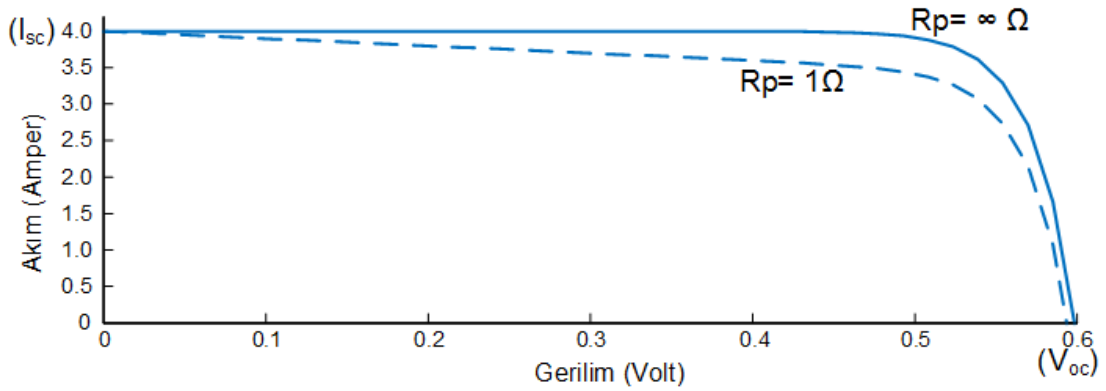
$$I_L = \left(I_{sc} + K \cdot (T_{gp} - T_{ref}) \right) \cdot \frac{G}{G_n} \quad (2.7)$$

Burada G_n nominal ışık şiddeti, I_{sc} kısa devre akımı olup literatürdeki değeri 125x125 mm alana sahip silisyum tip hücreler için 4A civarındadır, K ise sıcaklığa bağlı kısa devre akımı katsayısıdır, her bir derecelik sıcaklık değişimi için doğru orantılı olarak 3mA civarında bir akım değeri değişimini temsil eder. T_{gp} güneş pilinin anlık sıcaklık değeridir, T_{ref} ise referans sıcaklık değeri olup Kelvin cinsinden 298⁰ K (25⁰ C) alınabilir.



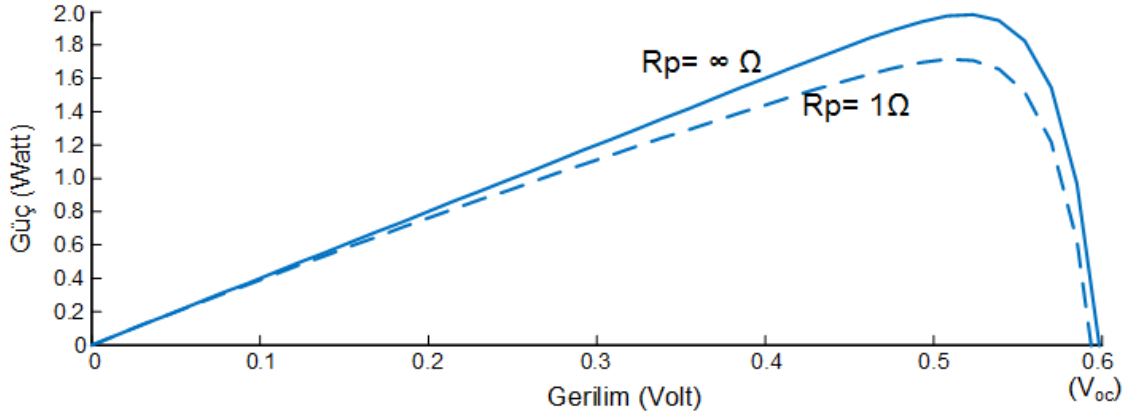
Şekil 2.6. Güneş hücresinin Matlab / Simulink modeli

Temel modeli kurulan güneş hücresi için karakteristiğini belirlemek üzere akım-gerilim grafikleri elde etmek mümkündür. Elde edilen grafikler yardımı ile sistem için gereken olan güneş hücresi toplam alanı ve ihtiyaç duyulan toplam güneş hücresi sayısı tespit edilebilir. Temel modelden elde edilen akım-gerilim grafiği Şekil 2.7 üzerinde incelenebilir.



Şekil 2.7. 125x125 mm silisyum tip güneş hücresinin akım-gerilim grafiği

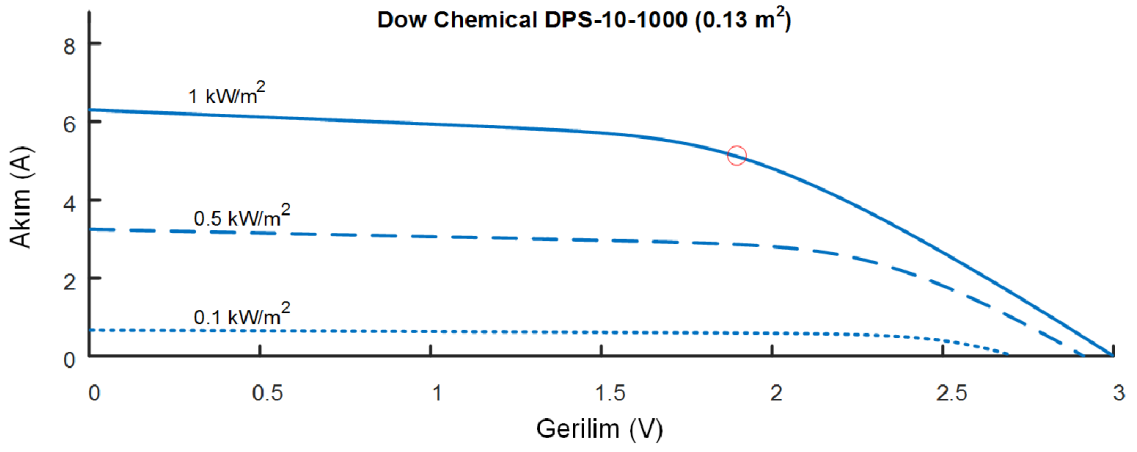
Yine bu model üzerinden gerilim değişimine karşılık güneş hücresinin güç değerleri de elde edilebilir. Güç-gerilim grafiği Şekil 2.8'de görülebilir.



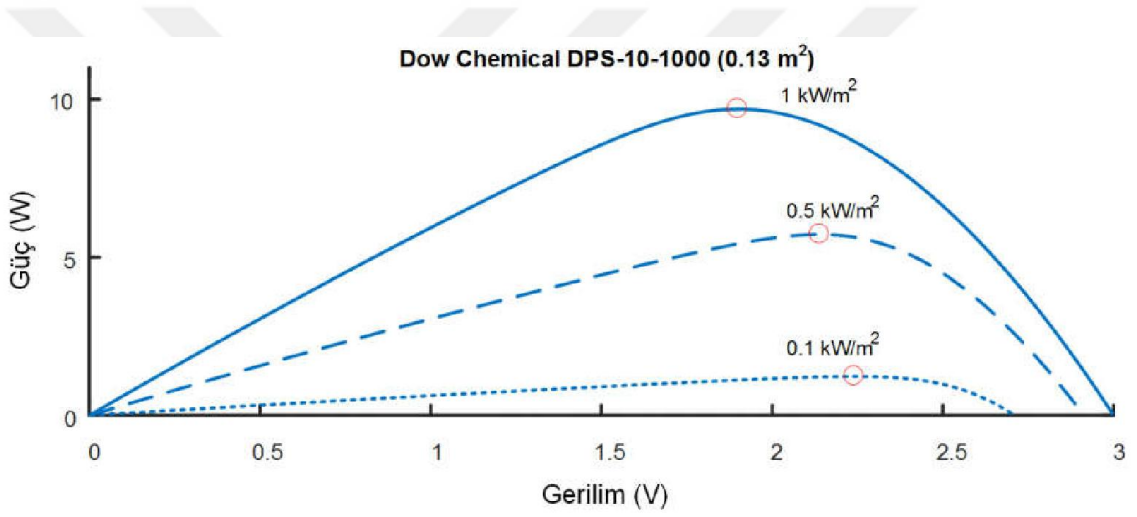
Şekil 2.8. 125x125 mm silisyum tip güneş hücresinin güç-gerilim grafiği

Modelde ihtiyaç duyulan güneş ışığı şiddeti için Türkiye'nin yıl boyu güneşlenme verileri kullanılabilir, bu sayede sistem modeli mevsimsel değişimlere de cevap verebilir hale gelecektir. Modele hangi ay içinde bulunduğu bilgisi verildiğinde model o ay a ait verileri kullanarak daha doğru ve gerçek durumlarla karşılaştırılabilir bilgiler üretmektedir.

Piyasada ticari olarak satılan ticari bir güneş hücresine parametreler modele girildiğinde bu güneş hücresinin karakteristiği elde edilebilir. Böylece varsayılan yaklaşık değerler yerine gerçek ölçümlere dayanan bir model elde edilerek gerçek hayata da olabildiğince yakın benzetim sonuçları alınabilir. Bunun için kaynak teknik veriler kitapçığından edinilen parametreler doğrultusunda 0.13 m² alan genişliğine sahip güneş pilinin karakteristik değerleri farklı güneş radyasyon şiddetleri altında Şekil 2.9 ve Şekil 2.10 üzerinde görülebilir.



Şekil 2.9. Ticari bir güneş hücresi parametrelerine göre akım-gerilim grafiği



Şekil 2.10. Ticari bir güneş hücresi parametrelerine göre güç-gerilim grafiği

BÖLÜM III

HİDROJEN GAZININ ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİMİ

3.1 Hidrojen Gazının Özellikleri ve Kullanım Alanları

Hidrojen gazı evrendeki en çok bulunan element olup rengi ve kokusu bulunmaz, solunması durumunda zehirlenmeye yol açmaz ancak kapalı ortamlarda aşırı miktarda maruz kalındığında boğulmaya sebep olabilir. Ancak iyi havalandırılan ortamlar için tehlikesi söz konusu değildir, herhangi bir sızıntı halinde havadan yaklaşık 14 kat daha hafif olması nedeniyle atmosferin en üst tabakalarına yükselerek ortamı hızla terk eder. $-252,77\text{ }^{\circ}\text{C}$ de ise sıvı hale getirilebilir.

Geleceğin enerji taşıyıcısı olarak adlandırılan hidrojen, günümüzde gerek farklı büyüklüklerdeki pilot tesisler ile gerek konut uygulamaları gerekse taşıt uygulamaları ile hayatın bir parçası durumuna gelmiştir. Hidrojenden enerji üreten elektrokimyasal sistemler olan yakıt pilleri hakkında birçok çalışma yapılmış ve birçok probleme çözüm bulunmuştur. Ancak hala temiz, çevre dostu, verimli çalışan hidrojen üretim metotları üzerine çalışmalar artan bir ilgi ile devam etmektedir.

Yakıt olarak kullanılması durumunda nükleer reaksiyonlar hariç kilogram başına 39,44 kWh ile enerji yoğunluğu bilinen en yüksek yakıttır. Bazı maddelerin enerji yoğunluk miktarları Çizelge 3.1’de görülebilir.

Yanma tepkimesi ardından atık olarak sadece su veya su buharı açığa çıkardığından oldukça çevrecidir. Hidrojen, enerji sektöründeki muhtemel yakıtlar arasında enerjinin depolanması ve taşınması yönünden de üstünlüklerinden dolayı diğer alternatif enerji türlerine göre ön plana çıkmaktadır. Bütün bu üstünlüklerine rağmen doğada saf olarak bulunmamaktadır, bu nedenle çeşitli yöntemler kullanılarak olabildiğince verimli bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 3.1. Çeşitli maddelerin enerji yoğunluk değerleri (Wikipedia, 2017)

Madde	Enerji Tipi	Enerji Yoğunluğu (MJ/kg)	Enerji Yoğunluğu (kWh/kg)	Enerji Yoğunluğu (kWh/L)
Hidrojen	Kimyasal	142,00	39,44	1,55
Metan ya da Doğalgaz	Kimyasal	55,50	15,42	10,00
Sıvı Doğal Gaz (LNG)	Kimyasal	53,60	14,89	6,16
Dizel	Kimyasal	48,00	13,33	9,94
LPG (Propan / Bütan)	Kimyasal	46,40	12,89	7,22
Benzin	Kimyasal	46,40	12,89	9,5
Jet Yakıtı (Kerosen)	Kimyasal	46,00	12,78	10,38
Bütanol	Kimyasal	35,00	9,72	-
Etanol	Kimyasal	26,40	7,33	5,8
Kömür	Kimyasal	26 - 33	7,22 - 9,16	9,44 -11,94
Metanol	Kimyasal	19,70	5,47	4,333
Odun	Kimyasal	16,20	4,50	3,611
TNT	Kimyasal	4,60	1,28	-
Barut	Kimyasal	3,00	0,833	-
Lityum-ion batarya (Şarj edilemeyen)	Elektrokimyasal	1,80	0,500	1,2
Alkalın batarya	Elektrokimyasal	0,50	0,139	0,361
Lityum-ion batarya	Elektrokimyasal	0,36 - 0,87	0,1 – 0,243	0,25 – 0,73
Nikel-metal hidrit batarya	Elektrokimyasal	0.28	0,8	0,14-0,30
Kurşun-asit batarya	Elektrokimyasal	0,17	0,47	0,156

3.2 Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen ilk defa sentetik olarak Paracelsus (P. T. Bombastus von Hohenheim) tarafından 1500'li yılların başında güçlü asitlerin metaller ile tepkimesi sonucu elde edilmiştir. Günümüzde hidrojenin üretimi %95 gibi yüksek bir oranla fosil yakıtlardan buhar reformasyonu, kömür gazlaştırması veya metanın kısmi oksidasyonu ile elde edilirken çok küçük bir kısmı ise biyokütle gazlaştırması veya suyun elektrolizi gibi diğer çevreci yollarla ile üretilir (Ogden, 1999). Bu bilgiler için Ogden 'in 1999 da yaptığı eski

denilebilecek bir çalışma kaynak gösterildiği düşünülse de yıllar içerisinde günümüze kadar bu oranlarda elle tutulur değişimler olmamıştır. Bu durumu 2009 yılında yapılan başka bir çalışmadan da doğrulayabiliriz, bu çalışmaya göre hidrojen üretiminin %48'i doğalgaz, %30'u petrol, %18'i kömür ve %4'ü suyun elektrolizi ile gerçekleşmektedir (Press, 2009).

Çevreci yöntemlerle elde edilip kullanıldığında çevreci özellikleri ile oldukça ön plana çıkan hidrojenin hidrokarbonlardan (doğalgaz, metan, petrol, kömür gibi) üretilmesi karbon salımına neden olması nedeniyle çevreye oldukça zararlıdır, ancak günümüzde hidrokarbonlardan elde edilmesinin birim maliyetleri daha düşük görüldüğünden yoğunlukla bu yöntemler aracılığı ile üretim yapılmaktadır. Bu nedenle çevreci yöntemlerin daha fazla araştırılması ve verimlerinin yükseltilmesi ile beraber maliyetlerinin de düşürülmesi gerekmektedir.

3.2.1 Fosil yakıtlardan hidrojen eldesi

Hidrojenin genellikle sürekli ve seri üretim süreçleri kullanılarak elde edildiği ve dünya üzerindeki sentetik olarak hidrojen eldesinin en büyük dilimini oluşturan yöntemlerdir. Belli bir saflık derecesinin üzerinde hidrojen üretiminin bu yöntemle elde edilememesi ve çevreci olmaması zayıf yönü olarak gösterilebilir.

Fosil yakıt kullanan sistemler içerisinde olduğu gibi bütün üretim yöntemleri içerisinde de en çok üretim yapılan yöntem buhar reformasyonudur. Hidrokarbonlardan (genellikle doğal gaz) buhar reformasyonu ile hidrojen eldesi kimyasal bir yöntem olup su buharı ve metanın ortalama 850 °C gibi yüksek sıcaklıklarda ve 3-25 bar aralığındaki basınçlarda katalizör yardımı ile reaksiyona sokulması ile çoğunluğu karbon monoksit olmak üzere hidrojen ve az miktarda da karbondioksit elde edilmektedir. Sistem verimi %85 civarında olmasına rağmen yüksek emisyon değerleri bu sistemin en büyük zayıflığıdır. Buhar reformasyonunun genel kimyasal ifadesi denklem 3.1'de görülebilir.



Fosil yakıt kullanan diğer bir yöntem ise kömürün gazlaştırılması olup kömürün yüksek sıcaklık ve basınç altında su buharı ile reaksiyona zorlanarak karbon ve oksijenin bileşik oluşturması sağlanmakta ve sonuç olarak hidrojen gazı elde edilmektedir. Bu yöntemde

de yine yüksek emisyon değerleri açığa çıkmakta ve fosil kaynaklara bağlı kalınmaktadır. denklemler 3.2 ve 3.3 de kömürün gazlaştırılması işleminin kimyasal formülü görülebilir.



3.2.2 Suyun elektrolizi yöntemi ile hidrojen eldesi

Suyun elektrik enerjisi yardımı ile bileşenlerine ayrılması işlemidir, elektrik enerjisini kullanması zaten elektrik enerjisinin de başka kaynaklardan üretiliyor olması nedeniyle sistem verimini düşürmekte ve esas amaç olan yüksek verimle hidrojen üretme fikrine ters düşmektedir. Ancak elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi durumunda hem sistem verimi ve maliyeti makul seviyelere gelmekte ve yenilenebilir enerji türlerinin depolanması probleminde çözüm getirmektedir. Toplam verim ise sisteme göre değişmekle birlikte %65 ile %90 arasındadır.

Elektroliz türleri olarak genel olarak iki farklı elektroliz yöntemi üzerinde durulmaktadır. Bunlardan birincisi olan alkalın elektroliz yönteminde elektrotlara uygulanan doğru akım elektrik enerjisi ile elektrotlu devreyi tamamlayan saf su bileşiklerine ayrılır. Anot tarafından oksijen, katot tarafından ise hidrojen gazı çıkışı olarak gözlemlenir. Hidrojen üretiminde kullanılan en basit ve eski yöntemlerden biri olup 1789 yılında bir tıp doktoru olan Johan Rudolph tarafından keşfedilmiştir. Diğer yöntem ise polimer elektrolit membran (PEM) kullanan elektrolizörler olup bu tip elektrolizörler tez çalışmasının ilerleyen başlıklarında detaylı olarak ele alınacaktır.

3.2.3 Termokimyasal yöntem ile hidrojen eldesi

Diğer bir yöntem olan yüksek sıcaklık kullanılarak hidrojen üretilen yöntem termokimyasal yöntem denilmektedir. Bu yöntemde 3400 °K gibi çok yüksek sıcaklıklarda suyun moleküllerindeki bileşenlerin bağlanması için gerekli enerji eşiği aşılarak suyun kendiliğinden bileşiklerine ayrılması sağlanmaktadır (Salem, 2008). Toplam verim ise %50 civarındadır.

3.2.4 Fotoliz ile hidrojen eldesi

Güneş ışığının foton enerjisi kullanılarak özel yarıiletken teknolojilerinden de faydalanılarak suyun hidrojen ve oksijene ayrılması işlemidir. Bu işlemde kullanılan yarıiletken teknolojilerinin henüz gelişme aşamasında olması ve bunun yanı sıra sisteme uygun korozyon dayanımı yüksek malzemelerin araştırılması gerekliliği vardır. Henüz geliştirilme aşamasında olması nedeniyle yüksek maliyete sahip olup bu nedenlerle de henüz ticarileşmemiştir.

3.2.5 Mikrobiyolojik yöntemler ile hidrojen eldesi

Hidrojen üretimi için yeşil algler ve bazı fotosentetik bakteri türlerinin kullanıldığı yöntem olup kabaca fotosentez ve hidrojenez diye adlandırılan iki aşamada gerçekleşmektedir. Fotosentez yöntemi ile su iyonlarına ayrılarak hidrojen iyonları açığa çıkarılmakta ve elektronlar hidrojenez işlemi ile ise hidrojen iyonlarından hidrojen gazı elde edilmektedir.

3.3 PEM (Polimer Elektrolit Membranlı) Elektrolizörler

Adını kullandığı proton geçirgen membrandan alan PEM elektrolizörler alkali elektrolizörlerden daha sonra GEMINI adlı uzay gemisi projesi çerçevesinde uzay araştırmalarında kullanılmak amacı ile yeni bir teknoloji olarak 1966 yılında ticari bir firma olan General Electric tarafından geliştirilmiştir (Konopka ve Gregory, 1975). Alkali elektrolizörler ile kıyaslandığında sıvı elektrolit yerine elektron hopping mekanizması ile çalışan katı proton geçirgen zar elektrolit olarak kullanılmaktadır. Bahsedilen katı zar genellikle nafion malzemesi olup, sadece bazı önde gelen kimya şirketlerinin üretim haklarına sahip olduğu ismi ve formülasyonu patentli olan ticari bir üründür. Polimer elektrot membranlara ait bir MEA (membran elektrot grubu) görseli Fotoğraf 3.1'de görülebilir.



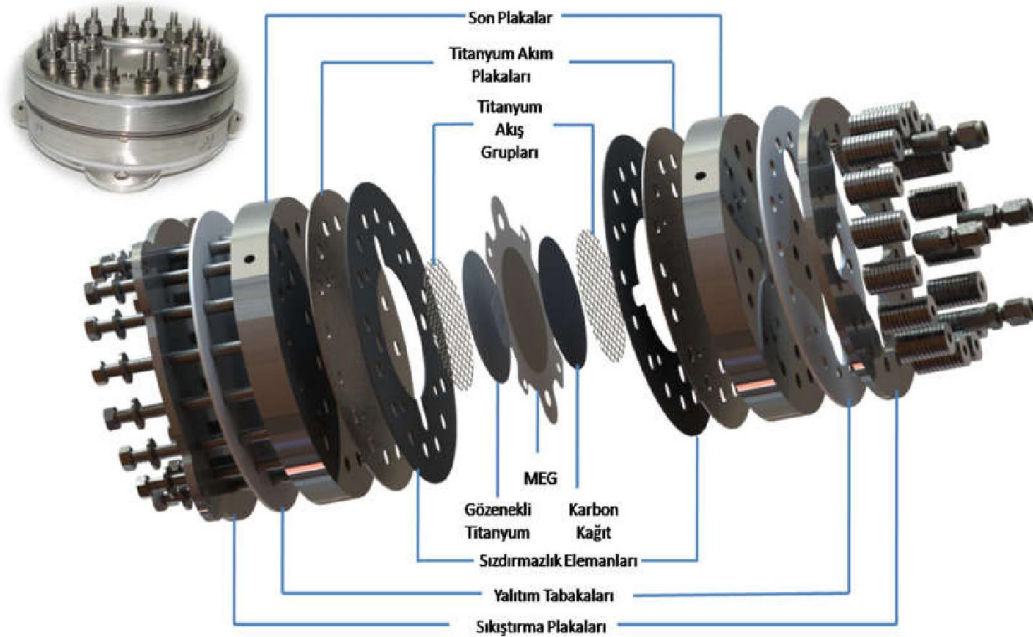
Fotoğraf 3.1. Deneyleerde kullanılan polimer elektrot membrana ait bir görüntü

İdeal bir elektrolizörden beklendiği gibi %99.999 ve daha üzerindeki saflıklarda hidrojen üretebilmeleri ve bu nedenle diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında saflaştırma ünitelerine ihtiyaç duymaması en büyük özelliklerinden birisidir. Bu saflıkta bir hidrojen üretebilen PEM elektrolizörün oldukça kaliteli olarak nitelendirebileceğimiz ürünlerinin geniş bir yelpazede kullanım alanı bulunmaktadır. Hidrojen gazı kimya alanında kullanılan ve yüksek hassasiyet gerektiren gaz kromatograf cihazlarında taşıyıcı gaz olarak kullanımı, hiçbir filtre ve saflaştırma olmaksızın direkt yakıt pillerine verilebilmesi, denizaltı araçları ve uzay araçlarında kullanılmaya daha uygun olmaları belli başlı üstünlüklerindedir. PEM elektrolizörlerin diğer bir ürünü olan oksijen ise yine hidrojen gibi çok yüksek saflıkta olup doğrudan medikal oksijen ihtiyacı için kullanılabilir.

Diğer bir özellikleri ise yüksek basınçlı hidrojen üretimi sağlayabilmeleridir, bu değer günümüzde 300 bar'ın üzerine çıkmıştır. Basınçlı hidrojen çıkışı elde edilebilmesi nedeniyle herhangi bir kompresöre ihtiyaç duyulmaksızın depolanması sağlanabilmektedir. Kompresör kullanılmadığı için ses ve titreşim konusunda sistem iyileşirken aynı zamanda toplam sistem verimi de artmaktadır. PEM elektrolizörlerin yüksek basınçlar altında çalışması durumunun performans etkisi tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde incelenecektir, ancak değinmek gerekirse alınan sonuçlara göre bu durumun performansı düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu performans düşümünün kompresörün toplam verime olan olumsuz etkisine kıyasla çok daha küçük düzeyde

olması PEM elektrolizörün yüksek basınç altında çalıştırılmasının tercih edilir olmasını sağlamaktadır.

Bahsedilen iki önemli özelliğinin yanı sıra yüksek akım yoğunluklarında çalıştırılabilmesi ve değişken akım yoğunluklarında da çalışabilir olmaları nedeniyle diğer elektrolizör teknolojilerine göre düzensiz enerji üreten yenilenebilir kaynaklar ile sorunsuz olarak birlikte kullanımı mümkündür. PEM elektrolizörlerin bileşenlerini açıklayan görsel Şekil 3.1’de incelenebilir.

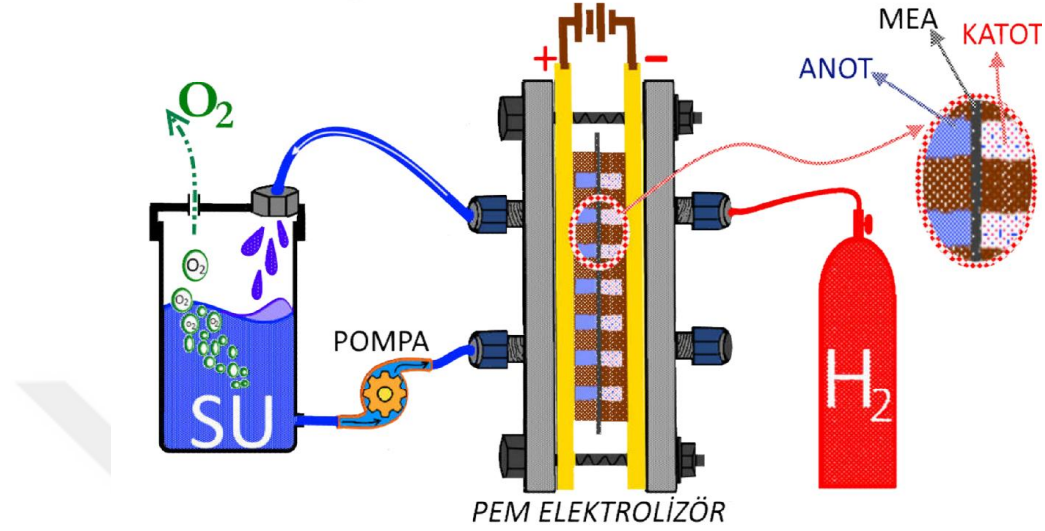


Şekil 3.1. PEM elektrolizörlerin bileşenleri

3.3.1 PEM elektrolizörlerin çalışma mekanizmaları

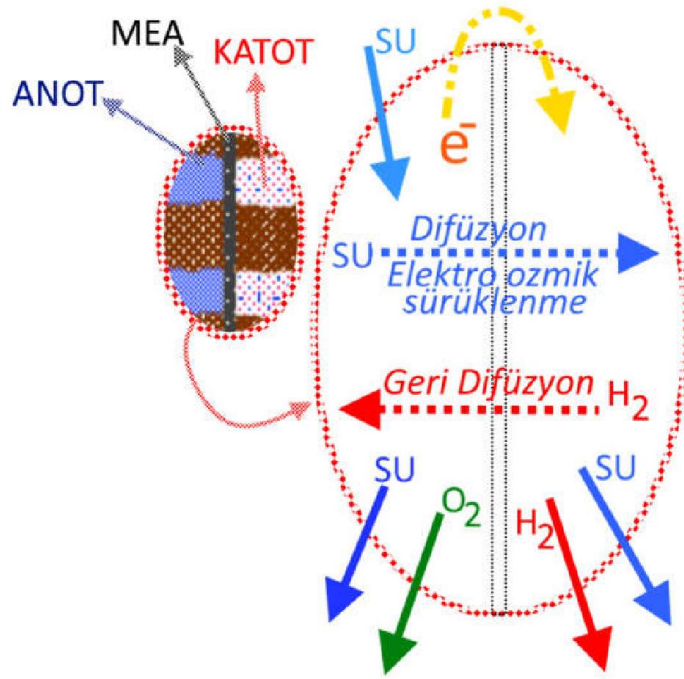
Sistem basit ifade ile sadece protonların geçmesine izin veren polimer bir malzeme olan membran ve membranın bir tarafında suyun giriş yaptığı, suyun elektrokimyasal olarak parçalanıp oksijenin açığa çıktığı anot kısmı ile membranın diğer tarafında ise hidrojenin membran üzerinden bir miktar da su ile geçerek açığa çıktığı katot kısmından oluşmaktadır. Bu ana parçaların dışında elektrik enerjisinin uygulandığı akım plakaları, oksijenin açığa çıktığı anot katalizör tabakası, hidrojenin açığa çıktığı katot katalizör tabakası ile gazların katalizör yüzeylerine iletilmesi ve yüzeyden uzaklaştırılması görevini gören difüzyon tabakalarından oluşmaktadır. Yapıları her ne kadar PEM yakıt

pillerine benzese de reaksiyonlar ters yönde olmaktadır. Elektrolizörde kullanılan elektrotlar yakıt pilinin tersine gazları daha iyi soğurmak yerine daha iyi uzaklaştırmak için çalışırlar. PEM elektrolizörlerin çalışmaları sırasında genel görünümü Şekil 3.2’de görülebilir.



Şekil 3.2. PEM elektrolizörün genel görünümü

PEM elektrolizörlerde su girişi anot tarafındaki bir giriş üzerinden alınmakta ve çoğunlukla suyun elektrolizöre sabit debide beslenmesi beklenmektedir. Literatürde su beslemesi için genelde peristaltik pompa kullanılmaktadır. Anot elektrodu üzerinde parçalanmış su hidrojen iyonlarına ve oksijen gazına ayrılmaktadır, açığa çıkan oksijen devridaim yapan suyun kullanılmayan fazla kısmı ile birlikte anot dışına çıkmaktadır. Bu sırada uygulanan elektrik enerjisinden dolayı oluşan elektriksel alan yardımı ile pozitif hidrojen iyonları membran üzerinden katoda geçmektedir. Hidrojen iyonlarının katoda geçişi sırasında elektronlarında hareket yönü katot elektroduna doğrudur, katot elektrodu üzerinde hidrojen iyonları ile elektronlar birleşerek hidrojen gazını oluştururlar. Bu sırada elektro-osmotik sürüklenme ve difüzyon mekanizmaları ile katoda geçen su da elde edilen hidrojen gazı ile beraber katottan çıkarak elektrolizörün dış ortamına alınır. Çalışma mekanizmalarını temsilen açıklayan görsel Şekil 3.3’de görülebilir.



Şekil 3.3. PEM elektrolizörün çalışma mekanizmaları

3.4 PEM Elektrolizörün Matematiksel Modeli ve Matlab / Simulink Benzetimi

Polimer elektrolit membranlı (PEM) elektrolizörlerin hidrojen üretiminde diğer tekniklere göre avantaj görülen özellikleri nedeniyle bilim ve sanayi çevrelerince son yıllarda oldukça rağbet görmektedir. Ancak yapılan bütün çalışmalara rağmen PEM elektrolizörlerin davranışları benzer elektrokimyasal sistemler olan yakıt pilleri ile karşılaştırıldığında oldukça az bilinmektedir. Bu durum hem deneysel çalışmaların hem de modelleme çalışmalarının nispeten daha az olmasının bir sonucu olmak görülmektedir.

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde PEM elektrolizörler üzerine yıllardır çalışılmasına rağmen, PEM elektrolizörlerin modellenmesi üzerine yapılan çalışmalar diğer çalışmaların yanında çok sınırlı miktarda kalmıştır. Ayrıca, PEM elektrolizör gibi çok parçalı sistemlerin davranışını anlamak ancak bütün çevre bileşenlerin de bir arada bütün halde çalışmasının analizi ile mümkün olacaktır. Bu nedenle matematiksel modelleme çalışmaları önem arz etmektedir.

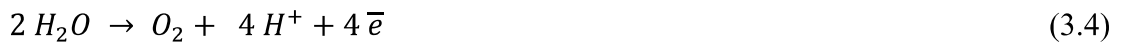
Literatürde de PEM elektrolizörlerin modellenmesi üzerine yapılmış çalışma sayısı oldukça azdır. Simulink veya benzer benzetim ortamlarında tanımlanabilecek modeller

çok kısa sürelerde çözüm imkânı sağlarken mevcut tasarımları geliştirme ve yeni tasarımları deneme konusunda süreci hızlandıracak bir araç olarak kullanılabilir. Ayrıca yüksek basınç altında çalışan PEM elektrolizör yığını ve sistem halinde PEM elektrolizörün modelleme çalışmalarının literatürde bulunmaması nedeniyle de bu konu, çalışılmasına ihtiyaç duyulan bir problem olarak görülmektedir.

PEM elektrolizör yığını tek başına düşünüldüğünde dinamik model açısından davranışsal olarak ana parçalar anot, katot ve membran olmak üzere üç farklı parçaya ayrılabilir. Modelin sistematik, düzenli ve daha rahat anlaşılır olması için parçalar halinde incelenip modellenmesi uygun görülmektedir. Bu üç parçaya ek olarak akım ve gerilim hesaplarının da yapıldığı dördüncü bir modele ihtiyaç duyulmaktadır, böylece bir PEM elektrolizör tam olarak modellenebilir. Tek hücreli bir PEM elektrolizörün çalışma düzeneğini ve çalışma mekanizmalarını gösteren Şekil 3.3'de de bahsi geçen mekanizmalar kendi kısımlarında ayrıntılı olarak incelenip modellenmiştir.

3.4.1 PEM elektrolizör anot kısmı matematiksel modeli

Suyun parçalanması ve oksijenin meydana çıkması olayları anot kısmında gerçekleşir. Elektrolizin anot yarı hücresinde gerçekleşen reaksiyonu denklem 3.4 deki gibi verilebilir.



Elektronlar güç kaynağı aracılığı ile elektroliz devresini tamamlarken anotta oksijen gaz olarak meydana çıkar ve hidrojenin ise iyon olarak katoda geçişi gerçekleşir. Anotta bulunan anlık oksijen miktarı dışardan alınan oksijen miktarı ile üretilen miktarın toplamından dışarı çıkan anlık miktarın farkı kadardır. Bazı özel deneysel uygulamalar haricinde anot kısmına dışardan oksijen beslemesi yapılmadığından oksijen girişinin sıfıra eşit olduğu kabul edilir. Su, anot bölmesine sürekli olarak beslenirken, hidrojen iyonlarıyla (elektro-osmotik sürüklenme) ve difüzyon yoluyla az miktarda da olsa katoda iletilir. Buna göre anottaki kimyasal türlerin molar debilerini anlık olarak ifade edecek olursak denklem 3.5 ve 3.6'daki gibi yazabiliriz.

$$N_{O_2} = N_{O_{2ai}} - N_{O_{2ao}} + N_{O_{2g}} \quad (3.5)$$

$$N_{H_2O_a} = N_{H_2O_{ai}} - N_{H_2O_{ao}} - N_{H_2O_{eod}} + N_{H_2O_d} \quad (3.6)$$

Burada N_{O_2} oksijenin anottaki anlık mol miktarı olup $N_{O_{2ai}}$ anoda giren, $N_{O_{2ao}}$ anottan çıkan, $N_{O_{2g}}$ ise üretilen oksijenin anlık mol miktarlarıdır. 3.6 numaralı denklem için ise $N_{H_2O_a}$ suyun anottaki anlık toplam mol miktarı olup, $N_{H_2O_{ai}}$ anoda giren, $N_{H_2O_{ao}}$ anottan çıkan, $N_{H_2O_{eod}}$ elektro-osmotik sürüklenme ile katoda geçen, $N_{H_2O_d}$ ise difüzyon ile katoda geçen su moleküllerinin anlık mol miktarıdır. Anotta aynı anda bulunması gereken su ve oksijenin anlık miktarları ve anot hacmi bilindiğine göre kısmi basınçlar ve toplam basınç denklem 3.7, 3.8 ve 3.9 ile hesaplanabilir.

$$P_{O_2} = \frac{(N_{O_2} \cdot R \cdot T_{el})}{V_a} \quad (3.7)$$

$$P_{H_2O_a} = \frac{(N_{H_2O_a} \cdot R \cdot T_{el})}{V_a} \quad (3.8)$$

$$P_a = P_{O_2} + P_{H_2O_a} \quad (3.9)$$

Burada P ile ifade edilmiş değerler ilgili alt indislere ait Pascal cinsinden basınçlardır, R evrensel gaz sabiti, T_{el} elektrolizörün ortalama sıcaklığı olup V_a ise anot yarı hücresinin metre küp cinsinden hacmidir. Toplam basınçlar bilindiğine göre türlerin molar oranları da aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

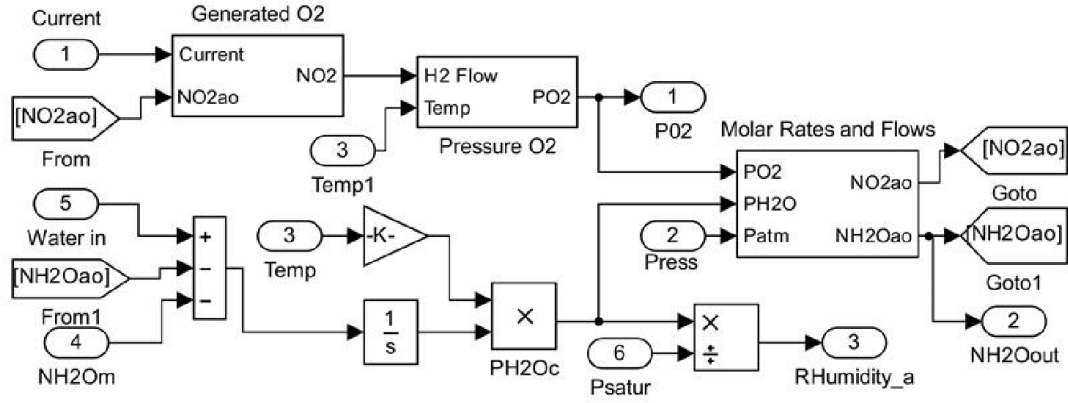
$$y_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_a} \quad (3.10)$$

Üretilen anlık oksijen miktarı ise akım miktarına ve hücre sayısına bağlı olarak Faraday denklemi ile ifade edilebilir.

$$N_{O_{2g}} = \frac{n \cdot i \cdot A}{2 \cdot F} = \frac{n \cdot I}{2 \cdot F} \quad (3.11)$$

Burada n elektrolizör yığımındaki toplam hücre sayısı, i akım yoğunluğu, I akım miktarı, A elektrolizör membran elektrot grubunun aktif alanı, F ise Faraday sabiti olup 96485

olarak alınmıştır. Elde edilen denklemlere göre oluşturulan Simulink modeli Şekil 3.4’de görülebilir.



Şekil 3.4. Anot kısmı Simulink modeli

3.4.2 PEM elektrolizör katot kısmı matematiksel modeli

Katot tarafı hidrojen gazının açığa çıktığı kısımdır. Elektrolizin katot yarı hücresinde gerçekleşen reaksiyonu denklem 3.12’deki gibi verilebilir.



Hidrojen iyonları birbirleri ile ve güç kaynağının sağladığı elektronlar ile birleşerek hidrojen gazını oluşturur. Oluşan hidrojen katotta birikmeye başlar ve basınçlanır basınç değeri atmosfer basıncının üzerine çıktığında ise elektrolizörün hidrojen çıkışından dışarı atılmaya başlar. Katotta aynı anda tür olarak sadece su ve hidrojen bulunur bunların anlık molar miktarları ise girenler ve çıkanlar eşitliği kurularak 3.13 ve 3.14 numaralı denklemlerle hesaplanabilir.

$$N_{H_2} = N_{H_2ci} \quad N_{H_2co} + N_{H_2g} \quad N_{H_2bd} \quad (3.13)$$

$$N_{H_2O_C} = N_{H_2Oci} \quad N_{H_2Oco} \quad N_{H_2Oeod} + N_{H_2Odif} \quad (3.14)$$

Burada N_{H_2} katotta bulunan hidrojenin anlık molar miktarı olup N_{H_2ci} katoda giren, N_{H_2co} katottan çıkan, N_{H_2g} katotta üretilen, N_{H_2bd} ise basınç farkı nedeniyle anot kısmına geri

dönen hidrojenin anlık molar miktarlarıdır. Bu benzetimde katoda hidrojen beslemesi yapılmadığı için N_{H_2ci} değeri sıfır olarak alınırsa katotta bulunan anlık hidrojen miktarı üretilen miktar ile katottan çıkan miktarın farkına eşittir.

3.14 numaralı denklem için ise $N_{H_2O_c}$ katotta bulunan su moleküllerinin anlık molar miktarı olup $N_{H_2O_{ci}}$ katoda giren, $N_{H_2O_{co}}$ katottan çıkan, $N_{H_2O_{eod}}$ elektro-osmotik sürüklenme ile katoda geçen, $N_{H_2O_{dif}}$ ise katoda difüzyon yolu ile giren su moleküllerinin molar miktarıdır. Katottaki su molekülleri için düşünüldüğünde normalde katoda su beslemesi yapılmamakta ancak membran üzerinden çeşitli mekanizmalar yolu ile su geçişi olmaktadır. Bu nedenle katoda membran üzerinden girenler dışında giren su miktarı olan $N_{H_2O_{ci}}$ sıfır alınıp elektro-osmotik sürüklenme ve difüzyon ile geçiş girenler olarak hesaba katılmaktadır. Katottan hidrojenle beraber atılan su ise çıkanlar olarak hesaba alındığında katotta bulunan anlık su miktarı hesaplanabilir. Anlık miktarlar hesaplandığına göre kısmi basınçlar ve toplam katot basıncı da denklem 3.15, 3.16 ve 3.17 deki gibi hesaplanabilir.

$$P_{H_2} = \frac{(N_{H_2} \cdot R \cdot T_{el})}{V_c} \quad (3.15)$$

$$P_{H_2O_c} = \frac{(N_{H_2O_c} \cdot R \cdot T_{el})}{V_c} \quad (3.16)$$

$$P_c = P_{H_2O_c} + P_{H_2} \quad (3.17)$$

Burada P ile ifade edilmiş değerler ilgili alt indislere ait Pascal cinsinden basınçlardır, R evrensel gaz sabiti, T_{el} elektrolizörün ortalama sıcaklığı olup burada V_c katot kısmının metre küp cinsinden hacmidir. Basınç değerleri bulunduğuna göre molar oranlarda istenen her bir tür için denklem 3.18'deki gibi bulunabilir.

$$y_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P_c} \quad (3.18)$$

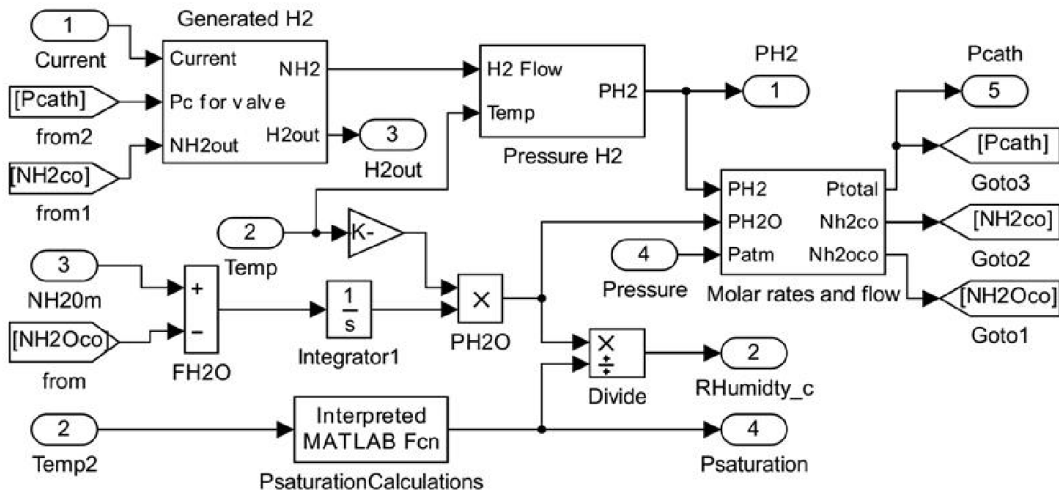
Üretilen hidrojen miktarı Faraday denklemi kullanılarak mol cinsinden anlık olarak denklem 3.19'deki gibi bulunabilir.

$$N_{H_2g} = \frac{n \cdot i \cdot A}{2 \cdot F} = \frac{n \cdot I}{2 \cdot F} \quad (3.19)$$

Anlık molar miktarlar ve basınçlar bilindiğine göre katot kısmının dinamik modeli elde edilebilir. Bahsi geçen oksijen su ve hidrojenin membran üzerinden geçişini etkileyen en büyük etkenlerden biri membranın nemliliğidir. Membran nemliliğine ve ortam sıcaklığına göre performansı değişen bir madde olduğundan düzgün bir modelleme için bu parametreler hesaplanarak etkisi benzetime dâhil edilmelidir. Membranın nemliliği suyu emmesi ve emdiği miktarın çokluğu ile alakalıdır. Membranın suyu emmesi (water uptake) ise anot ve katottaki satürasyon basıncına bağlı olup membran kısmında modellenecektir. Satürasyon basıncı ise santigrat cinsinden sıcaklığa bağlı bir değişken olup Pascal cinsinden denklem 3.20'deki gibi hesaplanabilir.

$$P_{sat}(Pa) = 2846.4 + 411.24 T(^{\circ}C) - 10.554 T(^{\circ}C)^2 + 0.16636 T(^{\circ}C)^3 \quad (3.20)$$

Bu bilgiler ışığında hazırlanan katot kısmının Simulink modeli Şekil 3.5'deki gibidir.



Şekil 3.5. Katot kısmı Simulink modeli

3.4.3 PEM elektrolizör membran kısmı matematiksel modeli

Membran PEM elektrolizöre ismini verdiği gibi en temel parçasıdır. Nafion malzemesi davranışı ve elektrolizör içindeki rolü açısından iyi anlaşılması ve benzetim açısından ise iyi modellenmesi gereken bir yapıdır. Membranın sıcaklık, nem ve basınç gibi değişkenlere bağlı olarak performansı değişirken üzerinden taşınan hidrojen ve suyun miktarı da bu performansa bağlı olarak değişir. Su elektro-osmotik sürüklenme ve

difüzyon yolu ile katot tabakasına geçerken, hidrojen iyonları da oluşan elektrik alan etkisi ile katoda, katot ile anot arasında oluşan basınç farkı nedeniyle de katoda geçiş yapar. LaConti ve Swette anottan katot tabakasına geçen her bir hidrojen iyonu için 3.5 - 4 adet su molekülünün de katoda geçtiğini tespit etmişlerdir (LaConti ve Swette, 2010). Modelde tüm bu mekanizmalar ayrı ayrı ve birbirleri ile ilişkili olarak düşünülüp matematiksel olarak ifade edilmelidir.

İncelenecek ilk mekanizma olan elektro-osmotik sürüklenme için Li ve arkadaşları su taşımamını açıklayan denklem 3.21'i önermişlerdir (Li vd., 2009).

$$N_{H_2O_{eod}} = \frac{(n_d \cdot i \cdot M_{H_2O} \cdot A)}{F} \quad (3.20)$$

Burada i akım yoğunluğu, M_{H_2O} suyun moleküler ağırlığı, A akım yoğunluğu ve n_d ise elektro-osmotik sürüklenme katsayısı olup denklem 3.21 ile hesaplanmaktadır.

$$n_d = 0.016 \cdot T(^{\circ}K) - 2.89556 \quad (3.21)$$

Diğer bir konu ise katot modelinde de bahsi geçen iyon hareketliliğinde hayati bir role sahip olan membranın su içeriği miktarı (water uptake) konusudur. Membran tarafından emilen su miktarı λ simgesi ile gösterilmekte olup anot ve katot kısımları için ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Li ve arkadaşlarının çalışmalarına göre aşağıdaki 3.22 ve 3.23 numaralı denklemler ile hesaplanmaktadır (Li vd., 2009).

$$\lambda = 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36a^3 \quad (3.22)$$

$$\lambda_m = (\lambda_c + \lambda_a)/2 \quad (3.23)$$

Anot ve katot kısımlarında gerçekleşen farklı basınç ve reaksiyon hızları nedeniyle iki taraf için de hesaplanan değer tek başına kullanılamayacağı için ayrı hesaplanan değerlerin ortalaması alınarak λ_m ortalama değeri elde edilir. Burada a suyun aktifliği olup 3.24 numaralı denklem ile hesaplanabilir.

$$a = \frac{P}{P_{sat}} \quad (3.24)$$

Gaz karışımının ideal bir gaz gibi davrandığı varsayıldığında suyun aktifliği kavramı bağıl nem ile de ifade edilebilir.

Membran kısmında gerçekleşen diğer bir önemli mekanizma ise suyun difüzyon yolu ile taşınımıdır. $N_{H_2O_d}$ suyun mol cinsinden anlık difüzyon miktarını ifade etmekte olup denklem 3.25 ile ifade edilmektedir.

$$N_{H_2O_d} = D_{H_2O} \left(\frac{C_{wc} - C_{wa}}{t_m} \right) \cdot M_{H_2O} \cdot A \quad (3.25)$$

Burada C_{wa} ve C_{wc} sırasıyla anot ve katotta bulunan suyun konsantrasyonudur. t_m ise membranın kalınlığı olup tez çalışmasında seçilen nafion türü N117 olduğundan kalınlığı da 0.215 mm dir. D_{H_2O} ise suyun difüzyon katsayısı olup aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$D_{H_2O} = D_\lambda \exp \left[2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T(^{\circ}K)} \right) \right] \quad (3.26)$$

Burada D_λ ise λ ya bağlı bir katsayı olup λ değerlerine bağlı olarak aşağıdaki denklem grubu ile ifade edilir;

$$\begin{aligned} D_\lambda &= 10^{-10}, & \lambda_m &< 2; \\ D_\lambda &= 10^{-10} [1 + 2(\lambda_m - 2)], & 2 &\leq \lambda_m \leq 3; \\ D_\lambda &= 10^{-10} [3 + 1.67(\lambda_m - 3)], & 3 &\leq \lambda_m \leq 4.5; \\ D_\lambda &= 1.25 \times 10^{-10}, & \lambda_m &\geq 4.5; \end{aligned} \quad (3.27)$$

Suyun konsantrasyonu ise Medina ve Santarelli tarafından denklem 3.28 deki gibi ifade edilmiştir (Medina ve Santarelli, 2010).

$$C_w = \frac{\rho_m}{EW_m} \cdot \lambda \quad (3.28)$$

Burada ρ_m membranın yoğunluğu, EW_m ise membranın eşdeğer ağırlığıdır.

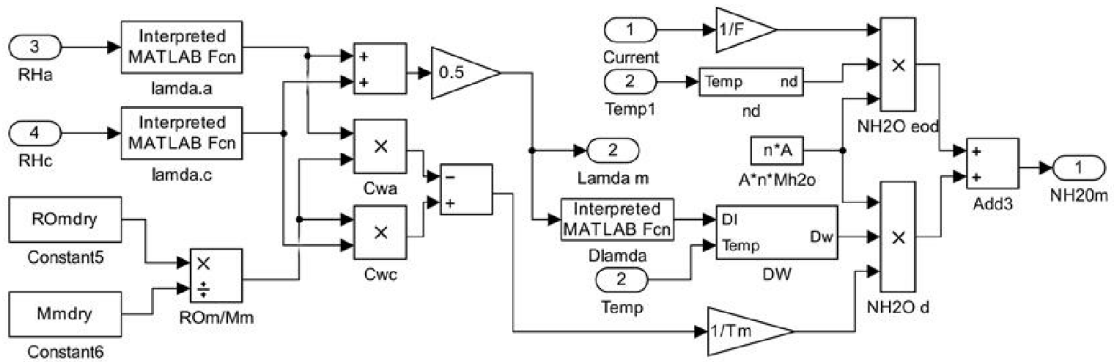
Membran üzerinden toplam su geçişi, diğer bir deyişle anottan katoda geçen toplam su miktarı elektro-osmotik sũrũklenme ve difũzyon ile geçen su miktarlarının toplamına eşittir.

$$N_{H_2O \text{ toplam}} = N_{H_2O_d} + N_{H_2O_{eod}} \quad (3.29)$$

Suyun membran ¼zerindeki taşınım mekanizmalarına ek olarak birde hidrojenin geri difũzyonu olayı mevcuttur, ¼zellikle artan anot-katot basınc farkı bu durumu daha g¼r¼l¼r hale getirmektedir. 1998 de yapılan deneysel çalışmalar sonrasında basınc farkı ile hidrojenin geri difũzyonu arasındaki ilişkinin neredeyse lineer olduğu ifade edilmiştir (Rohland vd., 1998). Bunun yanı sıra artan y¼nde sıcaklık değişiminin de geri difũzyonu arttırdığı belirlenmiştir. Bu mekanizmanın basınc farkı, membran kalınlığı ve aktif alan genişliğine bağlı form¼lasyonu ise aşağıdaki gibidir (Str¼bel vd., 2002).

$$N_{H_2bd} = D_{H_2} \cdot A \cdot \frac{P_c - P_a}{t_m} \quad (3.30)$$

Bu bilgiler ışığında Simulink ¼zerinde membran kısmının dinamik modeli hazırlanacak olursa Şekil 3.6'de de g¼r¼len model bloğu elde edilir.



Şekil 3.6. Membran kısmı Simulink modeli

3.4.4 PEM elektroliz¼r voltaj hesaplamaları kısmı matematiksel modeli

PEM elektroliz¼r h¼creti için işletme voltajı; termo-n¼tral voltaj, aktivasyon voltajı ve omik voltaj ile k¼tle transferi voltajları toplamına eşittir.

$$\begin{aligned}
V_{cell} &= E_{th} + V_{act,an} + V_{act,ca} + V_{ohm,e} + V_{ohm,i} + V_{mt,an} + V_{mt,ca} \\
V_{steady} &= E_{th} + V_{ohm,e} + V_{ohm,i} \\
V_{transient} &= V_{act,an} + V_{act,ca} + V_{mt,an} + V_{mt,ca} \\
V_{cell} &= V_{steady} + V_{transient}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Burada Nernst voltajı ve omik voltajlar sürekli duruma etki ederken, aktivasyon ve kütle transferi kaynaklı konsantrasyon voltajları geçici durumda etkilerini göstermektedir. Eğer akış alanı gaz fazındaki türleri dışarı atmak için uygunsuz düşük ve ortalama akım yoğunlukları için kütle transferinden kaynaklanan potansiyel farklar ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu nedenle 3 A/cm² akım yoğunluğu değerlerine kadar kütle transferi kaynaklı potansiyel farklar göz ardı edilebilir (Yigit ve Selamet, 2016). Termo-nötral voltaj E_{th} Nernst denklemi ile elde edilebilir (M. G. Santarelli vd., 2006).

$$E_{th} = E_0 + \frac{R.T_{el}}{2F} \cdot \left[\ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \right] \tag{3.31}$$

Burada E_0 standart potansiyel olup Gibbs serbest enerjisinden hesaplanır;

$$E_0 = \frac{G_f}{2F} \tag{3.32}$$

Anot ve katottaki aktivasyon voltajları aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Marangio vd., 2009; Schalenbach vd., 2013);

$$V_{act,an} = \frac{R.T_{an}}{\alpha_{an}F} \cdot \arcsin \left(\frac{i}{2i_{0,an}} \right) \tag{3.33}$$

$$V_{act,ca} = \frac{R.T_{ca}}{\alpha_{ca}F} \cdot \arcsin \left(\frac{i}{2i_{0,ca}} \right) \tag{3.34}$$

Burada α şarj transfer katsayısı olup anot için $\alpha_{an} = 0.5$ katot için $\alpha_{ca} = 2$ olarak, i akım yoğunluğu ve i_0 ise değişim akım yoğunluğu olup anot için $i_{0,an} = 2 \times 10^{-7}$ ve katot için $i_{0,ca} = 2 \times 10^{-3}$ alınmıştır, bu değerler literatürde var olan deneysel çalışmalar sonucu bulunmuş değerler olup literatürde Dale ve arkadaşlarının çalışmalarında da görülebilir (Dale vd., 2008).

Omik voltaj kavramı elektronik ve iyonik kaynaklı olarak iki parçaya ayrılabilir, iyonik dirençler ($R_{ohm,i}$) aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Dale vd., 2008);

$$V_{ohm,i} = i \cdot R_{ohm,i} \quad (3.35)$$

$$R_{ohm,i} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (3.36)$$

Burada t_m membranın kalınlığı, σ_m ise membranın iletkenliği olup iletkenlik aşağıdaki 3.37 denklemi ile hesaplanmaktadır (Springer vd., 1991).

$$\sigma_m = (0.00514 \cdot \lambda_m - 0.00326) \cdot \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{el}} \right) \right] \quad (3.37)$$

İyonik dirençler membranın su içeriğine, sıcaklığına ve çalışma akımına bağlıdır.

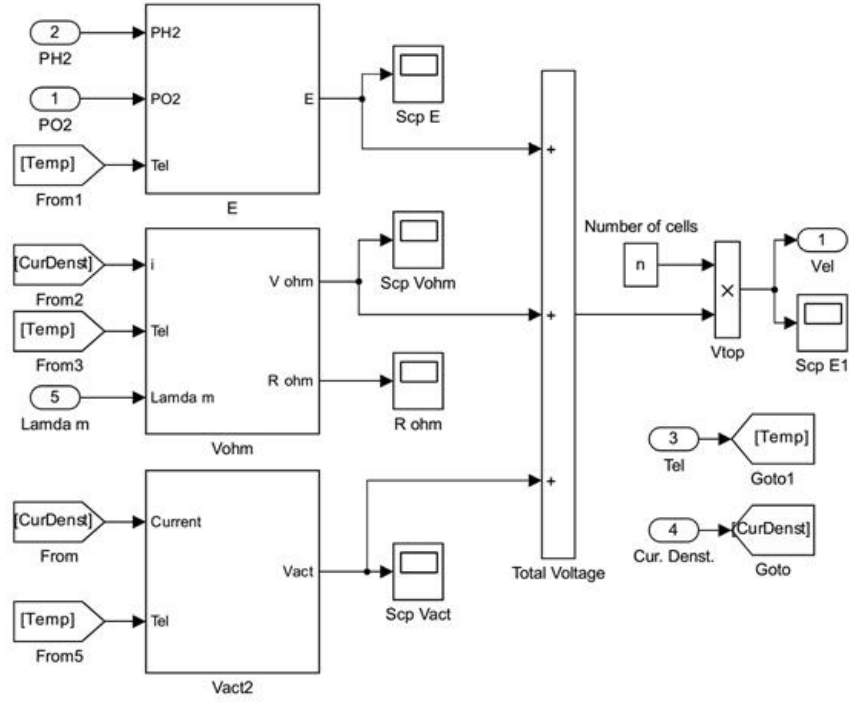
Diğer yandan elektronik dirençler ($R_{ohm,e}$) ise sistemde sıcaklık haricinde maddelerin direncini değiştirecek bir etken olmadığından ve çalışılan sıcaklık aralıklarının da dikkate değer bir direnç değişimine neden olmadığı görüldüğünden elektronik dirençlerin işletme koşullarına bağlı olarak değişmediği varsayılır. Bu nedenle literatürde de bahsi geçen ortalama bir kontak direnç değeri alınabilir. Daha önceki çalışmalar kontak dirençlerinin de toplam elektronik direnci etkilediğini ortaya koymuştur (Selamet ve Ergoktas, 2015). Sonuç olarak omik dirençlerden kaynaklanan kayıpları denklem 3.38'deki gibi ifade etmemiz mümkündür.

$$V_{ohm} = i \cdot (R_{ohm,i} + R_{ohm,e}) \quad (3.38)$$

Elektrolizör verimi ise denklem 3.39 ile ifade etmemiz mümkündür.

$$\eta_{elec} = \frac{1.48 \cdot 2}{V_{elec}} \quad (3.39)$$

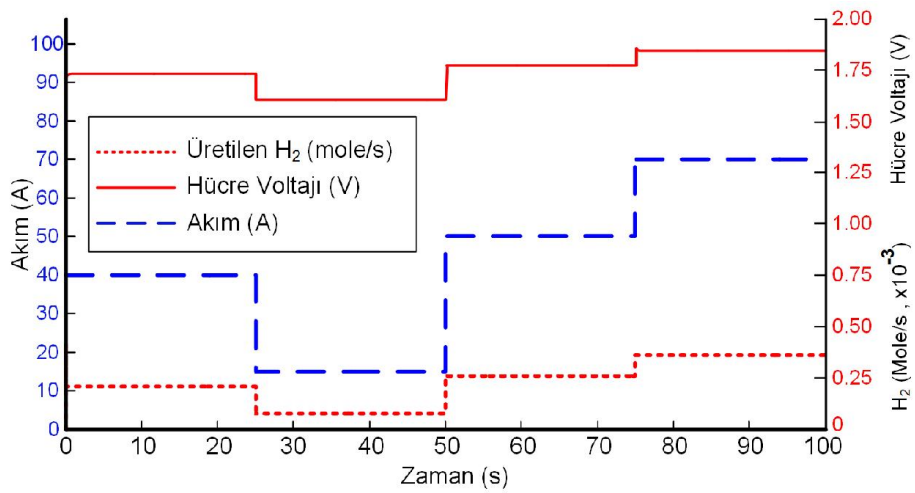
Bu bilgiler ışığında Simulink üzerinde voltaj hesaplamaları kısmının dinamik modeli hazırlanacak olursa Şekil 3.7'de de görülen model bloğu elde edilir.



Şekil 3.7. Voltaj hesaplamaları kısmı Simulink modeli

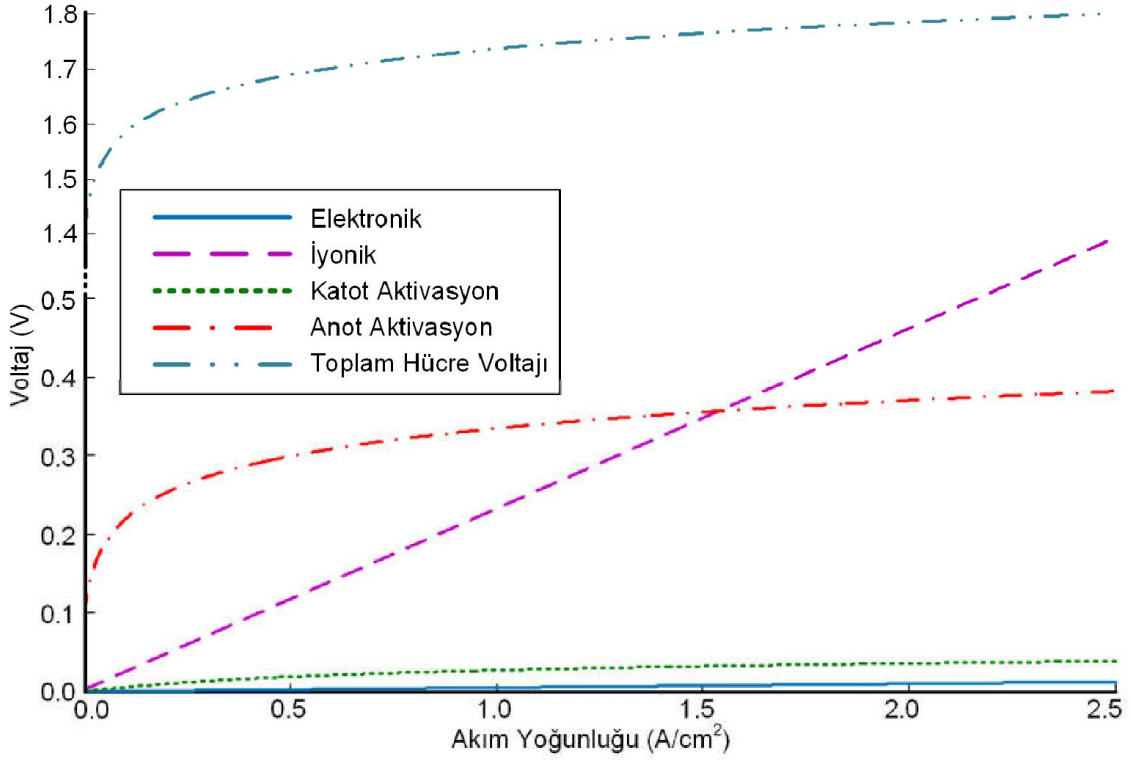
3.4.5 PEM elektrolizör modelinden elde edilen sonuçlar

Akım ve gerilim değişimine karşılık üretilen hidrojenin molar debisi aynı grafik üzerinde Şekil 3.8’de görülebilir.



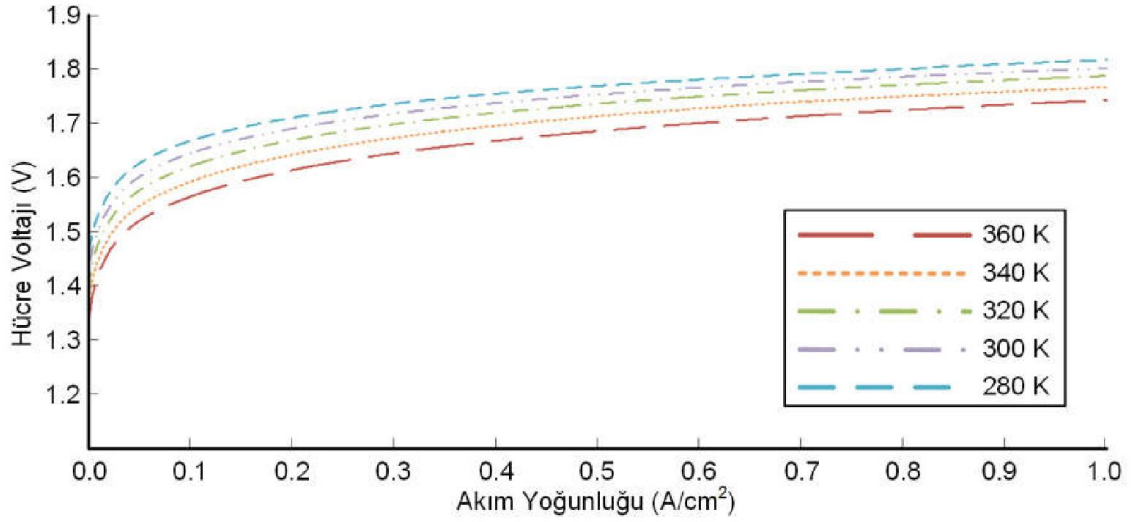
Şekil 3.8. Akım ve gerilim değişimine karşılık üretilen hidrojen debisi

Voltaj hesapları kısmında denklem 3.30 ile ifade edilen geçici ve sürekli hal karakterlerine etki eden fiziklerin ayrı ayrı durumları Şekil 3.9’da görülebilir. Buna göre anot ve katodun farkları ve geçici hale etki eden aktivasyon voltajlarının etkileri görülebilir.

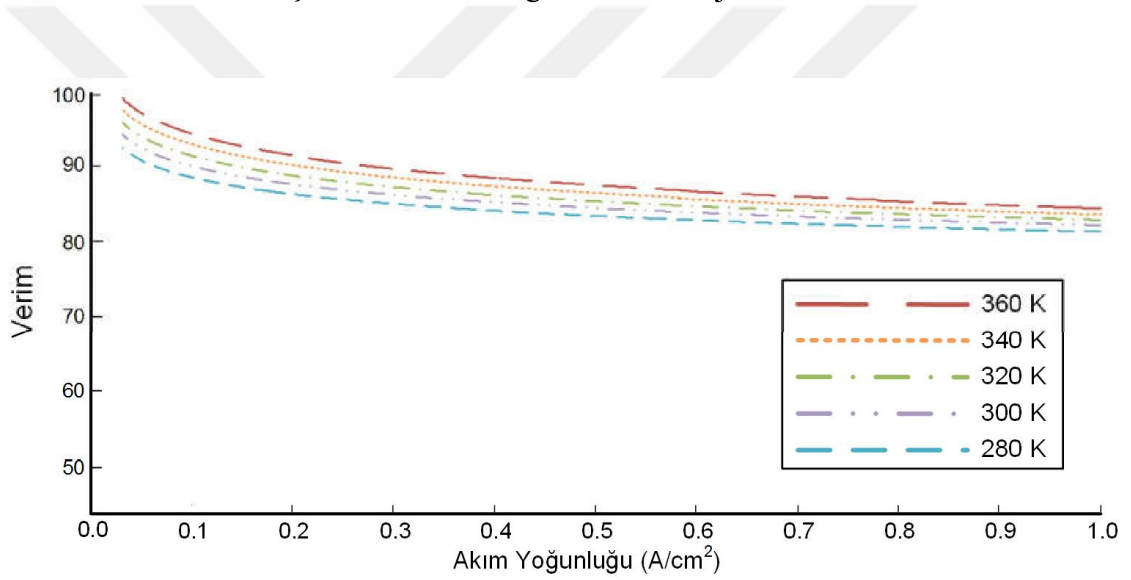


Şekil 3.9. Voltaja etki eden bileşenlerin akım yoğunluğuna göre değişimi

Sıcaklık bahsi geçen bu mekanizmalar üzerinde en büyük etkisi olan parametrelerden biridir. Sıcaklık voltaja dolayısı ile de verime doğrudan etkilidir, sıcaklığın etkisi Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de görülebilir.

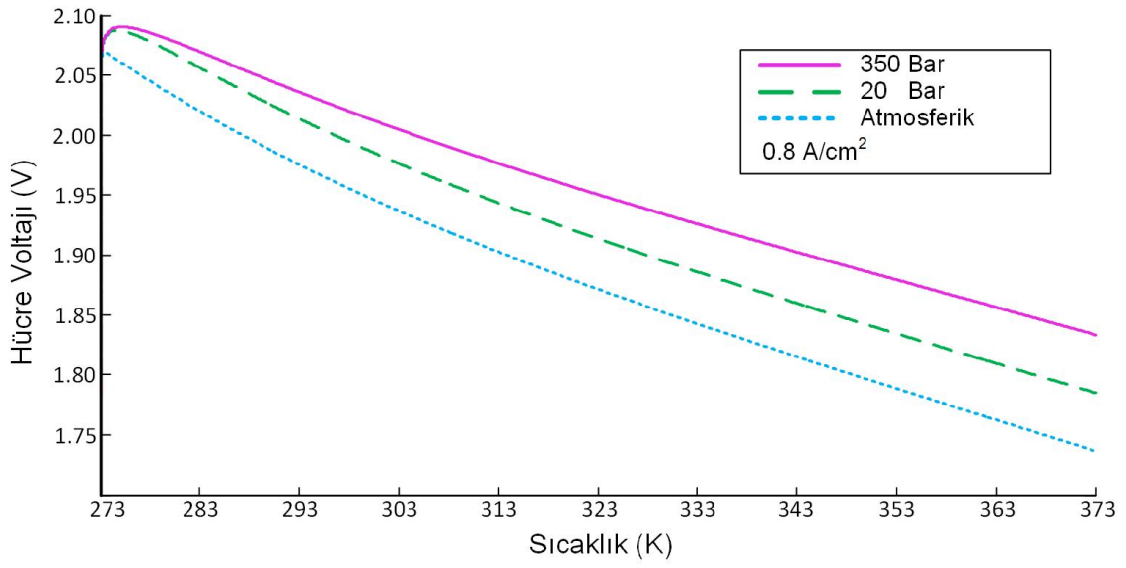


Şekil 3.10. Sıcaklığın hücre voltajına etkisi

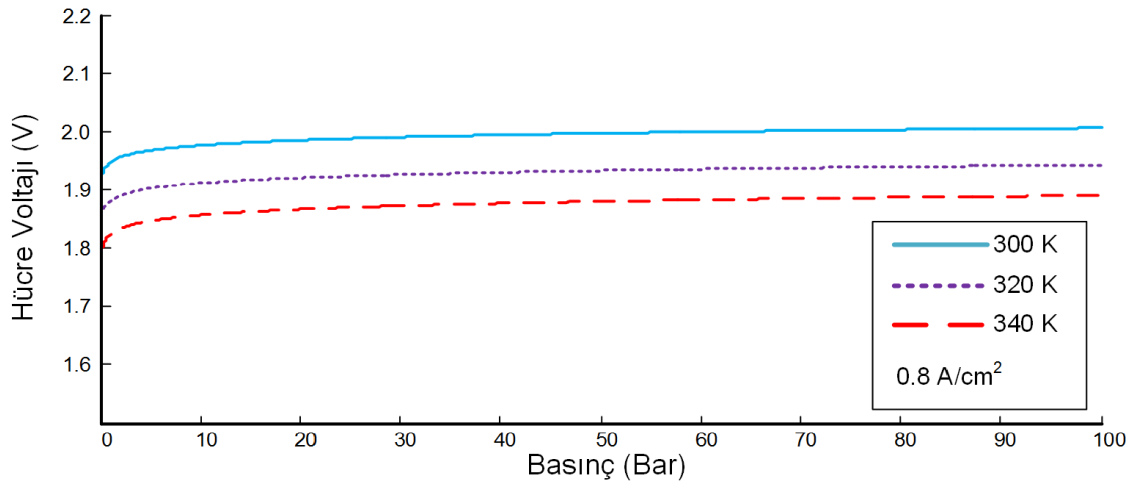


Şekil 3.11. Sıcaklığın hücre verimine etkisi

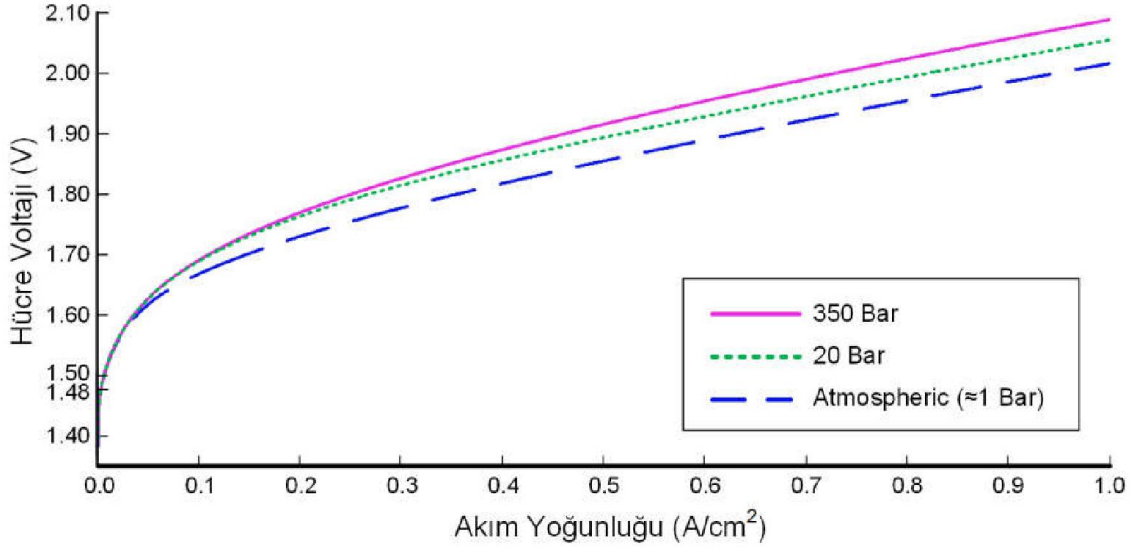
PEM elektrolizörün performansına etki eden diğer bir parametre ise basınçtır. Toplam sistem veriminin artırılması amacı ile basınçlı çalıştırılan elektrolizörün hücre performansına olan olumsuz etkisi aşağıdaki grafiklerde görülebilir. Farklı basınç değerlerinde çalışan hücreler için sıcaklığa bağlı durum Şekil 3.12’de, sabit sıcaklık değerlerinde çalışan hücreler için ise basınç değişiminin etkisi Şekil 3.13’de, sıcaklık ve basıncın sabit olduğu durumda ise akım yoğunluğu değişiminin etkisi Şekil 3.14’de görülebilir.



Şekil 3.12. Farklı basınç değerlerinde çalışan hücreler için sıcaklığın etkisi

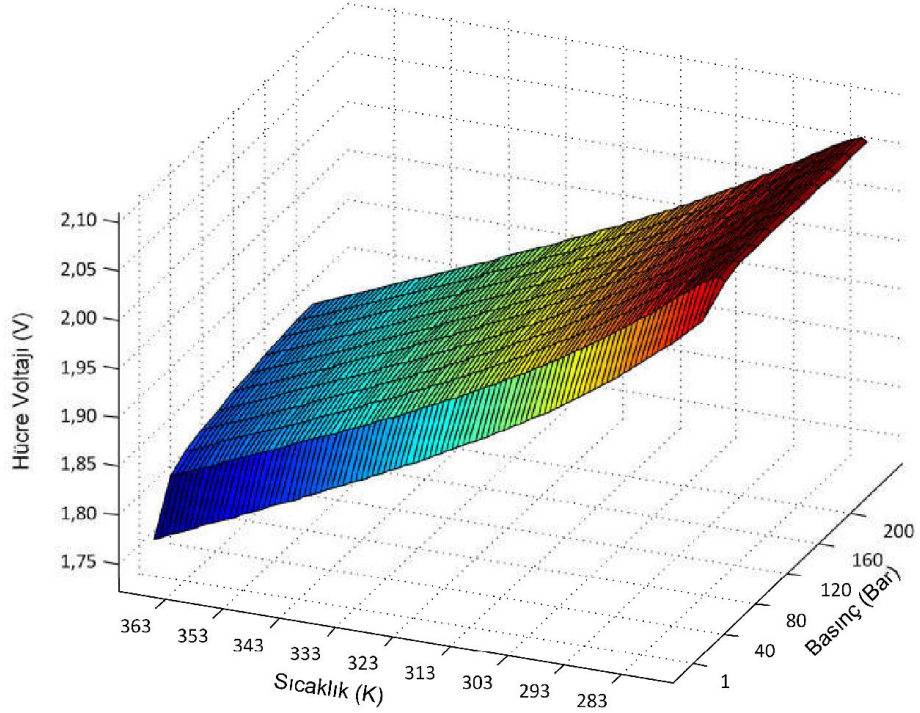


Şekil 3.13. Farklı sıcaklık değerlerinde çalışan hücreler için basıncın etkisi



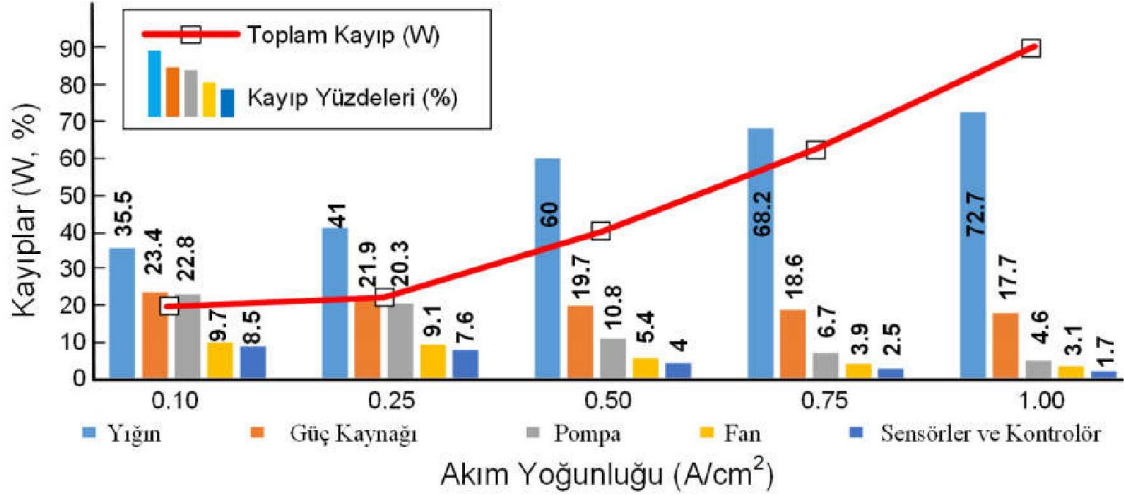
Şekil 3.14. Sabit sıcaklık ve basınçta çalışan hücreye akım yoğunluğunun etkisi

Sonuçlar incelendiğinde hücre voltajı üzerinde esas etkinin basınç ve sıcaklık nedeniyle meydana geldiği görülebilir. Akım yoğunluğunun ise sürekli haldeki etkisinin hücre voltajı üzerinde neredeyse lineer olduğu görülebilir. Bu nedenle basınç ve sıcaklığın aynı anda hücre voltajı üzerindeki etkisi üç boyutlu bir grafikte incelenmesi daha doğru olabilir. Değişken sıcaklık ve basınç değerlerine sahip grafik Şekil 3.15’de görülebilir.



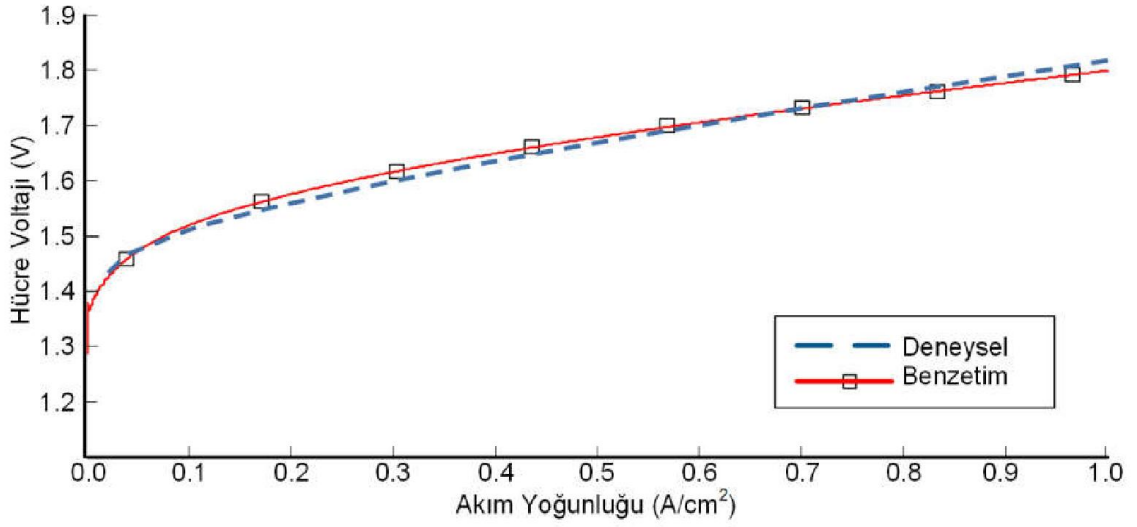
Şekil 3.15. Değişken sıcaklık ve basınçta hücre voltajının değişimi

Elektrolizör performansı sadece hücre ya da yığına indirgenemeyeceğinden performansın tam olarak anlaşılması için sistemin çevre bileşenleri de modele eklenerek sistem performansı incelenmiştir. İlgili grafik Şekil 3.16’de görülebilir.



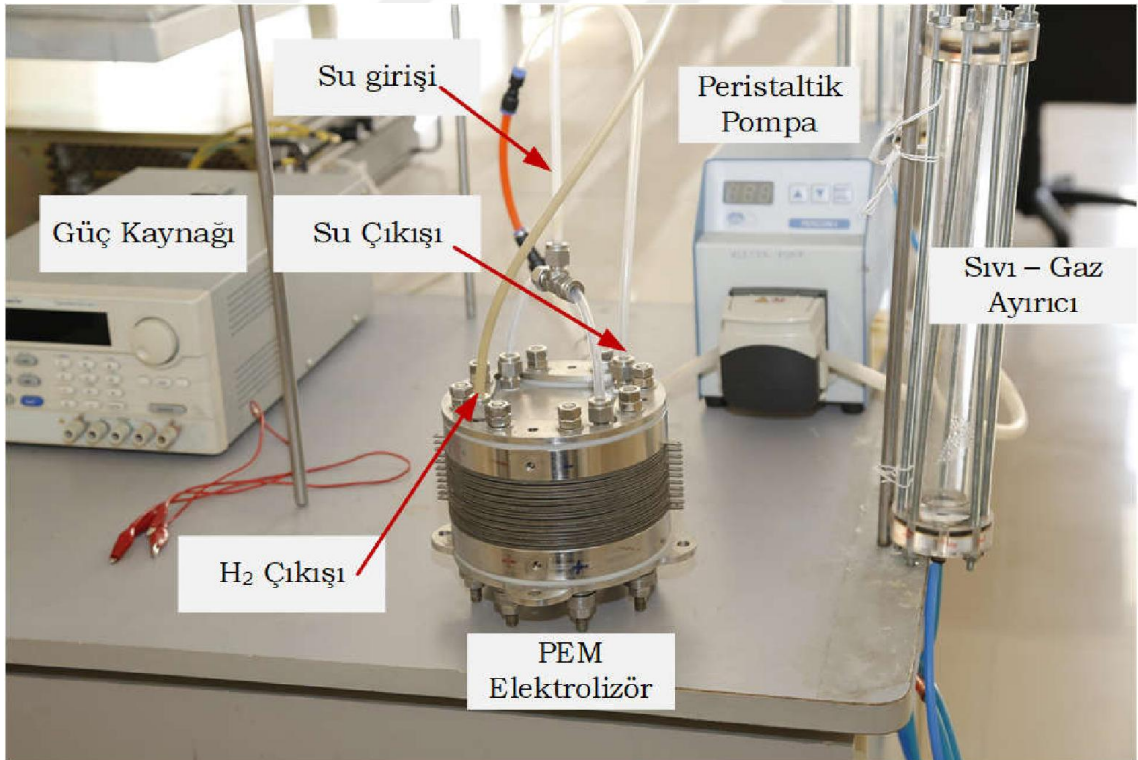
Şekil 3.16. Sistem bileşenlerinin performansa etkisi

Benzetim modeli birçok konuda bizlere fikir verebilir, tasarımları ve prototipleme süreçlerini kısaltıp maliyetleri düşürebilir. Ancak model performansı deneysel veriler ile de kıyaslanarak doğruluğundan emin olunmalıdır. Deneysel olarak PEM elektrolizörlerin karakteristiklerini anlamak ve akım gerilim grafiklerini elde etmek için yapılan çalışmalarda 100 cm² aktif alana sahip tek hücreli bir elektrolizöre 2 l/dk su beslemesi yapılarak akım gerilim verileri alınmıştır. Buna göre 100 cm² aktif alana sahip olan ve atmosferik basınçta çalıştırılan model ve deneysel hücrenin performans karşılaştırılması Şekil 3.17’de görülebilir. Şekilde de görüldüğü üzere 0 A/cm² den 0.02 A/cm²’e kadar elektrolizör tam olarak aktif olmadığından bu aralık için deneysel olarak sonuç almak mümkün değildir.



Şekil 3.17. Aynı parametreler için deneysel hücre ve model karşılaştırması

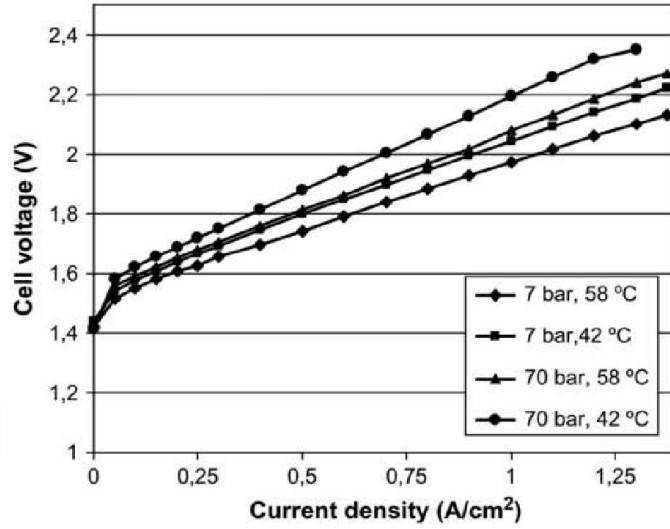
Deney düzeneğini gösteren görsel ise 10 hücreli bir elektrolizörün kullanıldığı deney için çekilen Fotoğraf 3.2'deki gibidir.



Fotoğraf 3.2. 10 hücreli PEM elektrolizör test düzeneğine ait bir görüntü

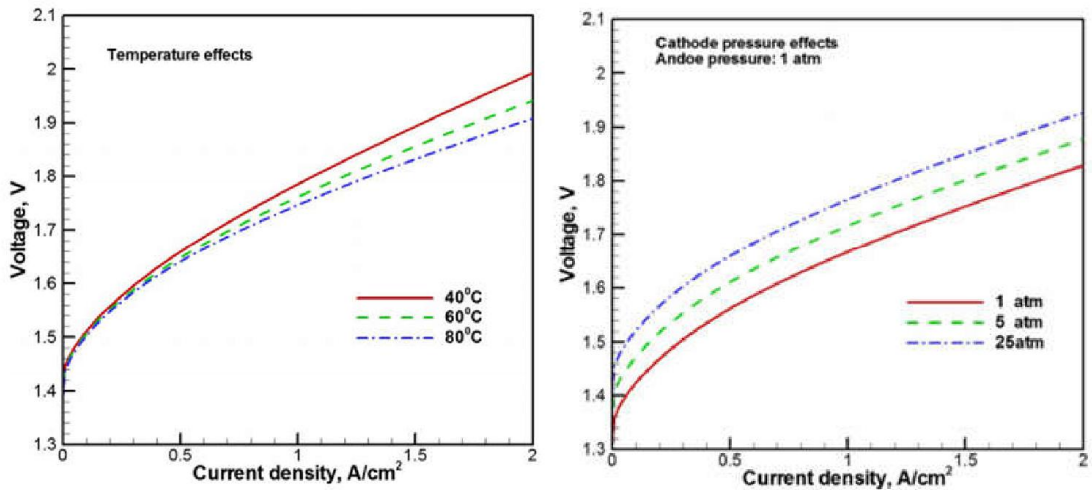
Deneysel veriler haricinde literatürdeki diğer deneysel çalışmalar ve modellere ait sonuçlar ile de karşılaştırmalar yapılarak modelin doğruluğu üzerinde görüş elde edilebilir.

Santarelli ve arkadaşlarının (2009) çalışmalarında elde edilen sonuçlara göre farklı sıcaklık ve basınç değerleri için akım - gerilim grafiği elde edilmiş olup sonuçlar Şekil 3.18'de görülebilir.



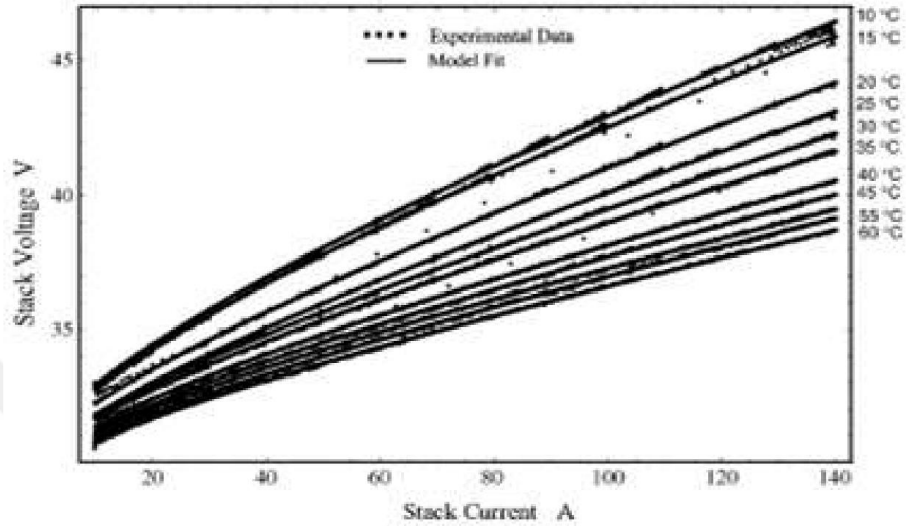
Şekil 3.18. Santarelli ve arkadaşlarının (2009) farklı basınç ve sıcaklık değerleri için akım-gerilim grafiği

Han ve arkadaşlarının (2015) çalışmasında ise farklı sıcaklık ve basınçlar için akım ve gerilim grafikleri iki farklı grafik halinde elde edilmiştir ilgili grafikler Şekil 3.19'da görülebilir.



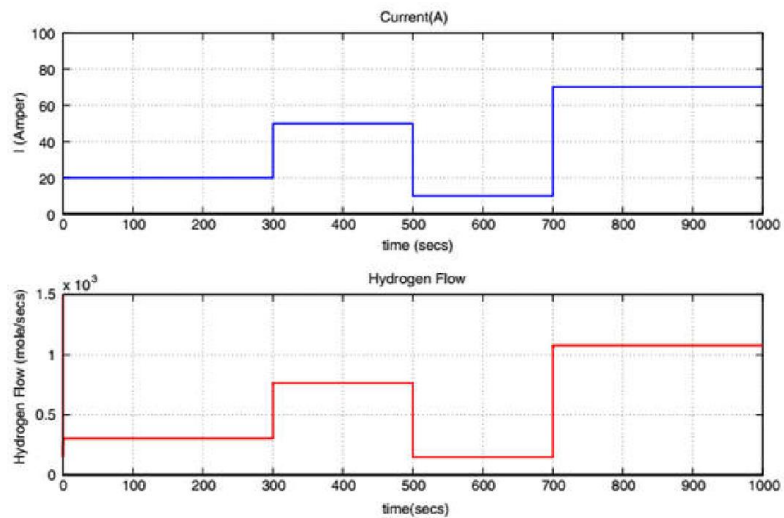
Şekil 3.19. Han ve arkadaşlarının (2015) farklı basınç ve sıcaklık değerleri için akım-gerilim grafikleri

Dale ve arkadaşlarının (2008) çalışmasında ise 6kW güç tüketimine sahip PEM elektrolizörün farklı sıcaklıklar için yapılan deneysel çalışma ve eğri uydurulan model sonuçları üzerinden akım- gerilim verileri elde edilmiş ve bu sonuçlar tek grafik üzerinde verilmiştir, grafikler Şekil 3.20’de görülebilir.



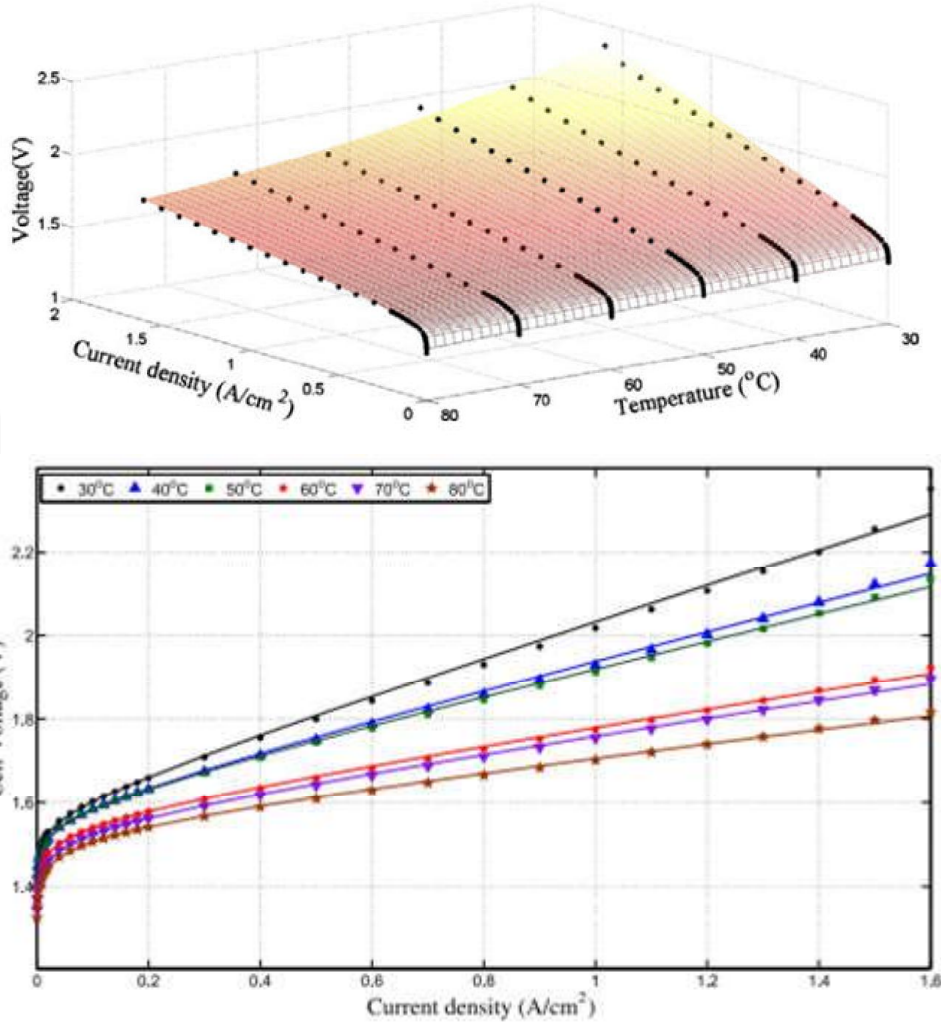
Şekil 3.20. Dale ve arkadaşlarının (2008) farklı sıcaklık değerleri için akım-gerilim grafikleri

Görgün 'ün çalışmasında (2006) ise PEM elektrolizör modeli üzerinde akım girişine karşılık üretilen hidrojenin molar miktarı grafik halinde gösterilmiştir. Bu çalışmaya ait grafik ise Şekil 3.21’de verilmiştir.



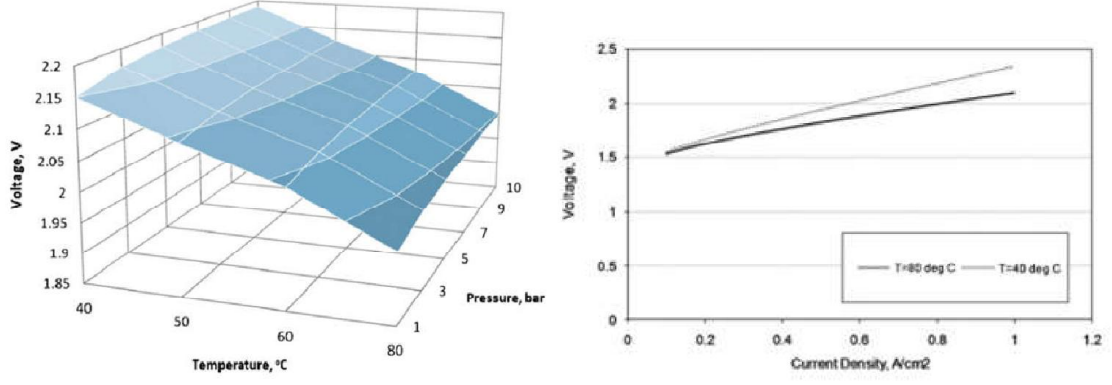
Şekil 3.21. Görgün' ün (2006) çalışmasına ait akım-molar hidrojen grafiği

Garcia-Valverde ve arkadaşlarının (2012) çalışmasında ise farklı sıcaklık ve basınçlar için akım ve gerilim grafiği hem üç boyutlu grafik olarak hem de farklı sıcaklıkların voltaja etkisi grafik olarak elde edilmiştir ilgili grafikler Şekil 3.22'de görülebilir.



Şekil 3.22. Garcia-Valverde ve arkadaşlarının (2011) farklı basınç ve sıcaklık değerleri için akım-gerilim grafikleri

Awasthi ve arkadaşlarının (2011) çalışmasında ise farklı sıcaklık ve basınçlar için akım ve gerilim grafiği hem üç boyutlu grafik olarak hem de iki farklı sıcaklığın voltaja etkisi grafik olarak elde edilmiştir ilgili grafikler Şekil 3.23'de görülebilir.



Şekil 3.23. Awasthi ve arkadaşlarının (2011) farklı basınç ve sıcaklık değerleri için akım-gerilim grafikleri

Literatürdeki başlıca kaynaklarda verilen deneysel ve model sonuçlarının da tez çalışmasındaki sonuçlar ile paralellik gösterdiği görülebilir.

BÖLÜM IV

ENERJİNİN DEPOLANMASI

4.1 Yenilenebilir Elektrik Enerjisinin Bataryalarda Depolanması

Günümüzde gerek ticari ürün bazında gerekse araştırmalar bazında enerji depolama teknolojileri gün geçtikçe gelişmekte ve çeşitlenmektedir. Elektrik enerjisinin depolanması denildiğinde ilk akla gelen elektro-kimyasal bataryalara enerjinin şarj edilmesi olup bu yöntemlerin teknolojisine bağlı olarak çeşitli üstünlükleri ve eksiklikleri mevcuttur.

İlk ve en olgunlaşmış batarya teknolojisi olan kurşun-asit bataryalar düşük maliyet, kolay bakım ve en düşük self-deşarj miktarları ile ön plana çıkmaktadır. Sınırlı ve nispeten düşük çevrim ömürleri, düşük enerji yoğunlukları, değişken sıcaklıklarda azalan verim, derin deşarj durumunda zarar görmeleri ve çevreye zararlı maddeleri bünyesinde barındırması ile bilinmektedir. Şarj-Deşarj verimleri ise %75 civarındadır (Baker, 2008; Nair ve Garimella, 2010).

Nikel-kadmiyum bataryalar ise kurşun-asit bataryalara göre yüksek enerji yoğunlukları, uzun çevrim ömürleri ve düşük bakım gereksinimleri ile öne çıkmaktadırlar. Ancak kadmiyumun çevreye olan zararlı etkileri nedeni ile kullanımı giderek azalmaktadır (Nair ve Garimella, 2010).

Nikel metal hidrit bataryalar diğer bataryalara göre zararlı maddeler bulundurmamaları nedeni ile çevre dostu sayılabilir. Nikel kadmiyum bataryalara oranla %25-30 daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak self-deşarj problemleri bu bataryaların uzun süreli depolama için kullanımlarını zora sokmaktadır. Bunların yanında maliyet olarak lityum iyon pillere göre daha uygun maliyete sahiptirler (Nair ve Garimella, 2010).

Sodyum sülfür bataryalar neredeyse %100 kabul edilen şarj-deşarj verimleri ile dikkat çekmektedirler. Bunun yanı sıra 300 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmaları ve bu sıcaklığı sağlamak için dışarıdan bir enerji kaynağı kullanılması göz önünde

bulundurulduğunda verimlerinin düşeceği açıktır. Buna rağmen yüksek güçlü sistemlerde kullanımının uygun olması ve uygun sistemlerde kullanılması durumunda oldukça tatminkâr sonuçlar alınabilmesi ile en umut vadeden teknolojilerden biridir. Ancak yüksek maliyeti en önemli dezavantajlarıdır (Divya ve Østergaard, 2009).

Sodyum nikel klorit (ZEBRA) bataryalara bakıldığında ise yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle nispeten daha küçük hacim ve ağırlıkları ile öne çıkmaktadırlar. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda sorunsuz çalışabilmeleri ve aşırı şarj ve deşarjaya uygun olmaları nedeni ile birçok uygulamaya uygun görülmekte özellikle de elektrikli taşıt uygulamaları için halen araştırılmaktadır (Dustmann, 2004; Baker, 2008).

En gelişmiş batarya teknolojisi ise lityum iyon bataryalar olarak görülmektedir. Gelişmelerinin ve yaygınlaşmalarının en büyük nedeni olarak %100 e yakın bir enerji depolama verimliliği ve hücre başına 4 V civarında bir enerji yoğunluğu ile bataryalar arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları sayesinde küçük boyutları ile hayatımızdaki birçok elektronik aletin içine dâhil olmuş olmaları gösterilebilir. Ancak şarj edilmeleri sırasındaki düzenin karmaşıklığı, elektrolit yapılarının termodinamik açıdan düzensizliği, aşırı ve düzensiz şarj durumlarında yapılarında oluşan kalıcı hasarlar, düşük çevrim ömürleri ve sıcaklık değişimlerinden oldukça fazla etkilenmeleri, kullanılan maddelerin zor bulunması gibi dezavantajları vardır. Bu nedenlerle önümüzdeki yıllarda hassas kimyasal yapılarının geliştirilmesi elzemdir (Scrosati ve Garche, 2010).

Diğer bir önemli sistem ise ultra kapasitörler olup hızlı şarj deşarj yetenekleri ile geleneksel bataryaların önüne geçmektedir, bunun yanında geleneksel bataryaların birkaç bin ile ifade edilen çevrim ömürleri yanında ultra kapasitörlerin bir milyon civarı çevrim ömürleri ile bu sorunu da aşmaktadırlar. Diğer bir avantajları ise sıcaklık değişimlerinden etkilenmemeleridir. Ancak bütün bu avantajlara rağmen enerji yoğunlukları göz önüne alındığında enerji yoğunlukları geleneksel bataryaların sadece %5'i miktara erişebilmektedir (Burke, 2000).

Bütün batarya teknolojilerine bakıldığında sıcaklık değişimlerinin olumsuz etkileri, aşırı şarj ve deşarj ile düzensiz şarj durumunda zarar görmeleri, self-deşarj diye ifade edilen kullanılmama halinde bile şarj miktarlarının azalması, uzun şarj olma ve ani değişimlere ani cevap vermede yavaş kalmaları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının

depolanması için uygun görülmemektedirler. Yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte sorunsuz çalışabilmeleri için enerji dalgalanmaları nedeni ile düzensiz şarj, ani deşarj isteklerine hızlı cevap, her türlü iklimsel koşuldan etkilenmeden çalışma ve olabildiğince uzun çevrim ömrüne sahip olması beklenmektedir. Ancak günümüzün batarya teknolojileri hem teknolojik seviyeleri hem de maliyetleri nedeni ile bu isteklere yeterli cevabı verememektedir. Bu nedenle hidrojen gazının enerji taşıyıcısı ve depolayıcısı olarak kullanılması hibrit sistemlerde yenilebilir kaynaklar için oldukça uygun ikinci bir seçenek olarak görülmektedir. Hidrojenin yüksek basınçta küçük hacimlere depolanabilmesi, self-deşarj konusundaki neredeyse problemsiz olmaları, çevreye oldukça dost olup sızıntı durumunda doğrudan atmosferin en üst tabakasına çıkarak ortamı terk etmesi ve oldukça uzun çevrim ömürleri ile ön plana çıkmaktadır.

4.2 Hidrojen Gazının Depolanması

Hidrojenin depolanması konusu literatürde hidrojen teknolojileri konusunda çalışılan en popüler konulardan biridir. Bu yöntemde alternatif enerji kaynaklarının kullanıldığı dağıtık sistemler ile şebekeden bağımsız sistemlerde enerjinin fazla kısmının ihtiyaç fazlası olduğu zamanlarda hidrojen formunda depolanması ve ihtiyaç duyulan saatlerde ise tekrar elektrik enerjisine çevrilerek kullanılması oldukça performanslı ve etkili bir yöntem olarak görülmektedir.

Depolama için farklı tipte depolama tankları kullanılabilmekte ve literatürde her bir yöntemin farklı üstünlüklerinden ve eksikliklerinden bahsedilmektedir. Çelik ve alüminyumdan yapılan metal tüplerde depolanan hidrojenin depolama tankına ağırlıkça oranı en fazla %5 seviyelerine ulaşabilirken kompozit yapıli tüplerde bu oran %12 civarlarına kadar yükselebilmektedir. Bu tez çalışmasında da kompozit yapıli tüplerin depolama amacıyla kullanılması planlanmıştır.

Hidrojenin sıvılaştırılarak depolanması yönteminde ise hidrojen düşük sıcaklıklara soğutulup sıkıştırılarak depolanmaktadır. Bu yöntemde depolanan hidrojenin depolama tankına oranı %26 gibi yüksek değerlere ulaşabilse de soğutulma ve sıkıştırma işlemi için harcanan enerji miktarı depolanan hidrojenden elde edilecek enerjinin neredeyse üçte biri miktarındadır. Hem bahsi geçen verim sorunu hem de düşük sıcaklık ihtiyacı nedeniyle her uygulamaya uygun olmamakta ve sonuçta da kullanılabilirliği düşük olmaktadır.

Hidrojenin metal hidrürlerde depolanması yönteminde ise depolanan hidrojenin depoya ağırlıkça oranı %4,5 gibi oldukça düşük seviyelerde kalmakta ayrıca depolamanın kimyasal bağ oluşturma yoluyla yapılması nedeniyle kullanım süresince kapasitelerinin düşmesi ve hacimlerine oranla yüksek ağırlıkları nedeniyle dezavantajlı duruma düşmektedirler.

Ağırlığının %10 u civarında hidrojeni depolayabilen sodyum bor hidrür ile hidrojen depolama da ise depolanan hidrojenin oda sıcaklığında alınabilmesi, patlama riski barındırmamaları ile avantajlı görülmektedir. Tek dezavantajı ise hidrojen ayrıştırılırken ortaya çıkan metaboratın tekrar sodyum bor hidrüre dönüştürmek için yüksek enerji tüketimidir.

En son geliştirilen teknoloji ise karbon nano tüpler olup %68 e varan ağırlık oranı ile oldukça dikkat çekicidir. Ancak henüz geliştirilmelerinin devam etmesi ve çok yüksek maliyetleri nedeniyle kullanımları önündeki en büyük engeldir (Darkrim vd., 2002).

4.2.1 Hidrojen gazının yüksek basınçta depolanması

Klasik yüksek basınçlı depolama tankları maliyetçe ucuz çelik malzemelerden üretilmekte olup 300 bar basınç seviyelerine kadar testlere dayanabilmektedir, güvenlik açısından sürekli kullanım basıncı ise en yüksek 200 bar civarında seçilmektedir. Ancak daha fazla hidrojeni daha küçük hacimlerde sıkıştırma isteği bu değerlerin arttırılması ihtiyacını doğurmaktadır. Basınç değerinin arttırılması isteğinin yanı sıra çeper sızdırmazlığının da arttırılması ve mobil uygulamalar için tank ağırlığının düşürülmesi istenmektedir. Bu amaçla ortaya çıkan güçlendirilmiş karbon fiber, kompozit tüpler hem düşük ağırlık hem de iç basınca karşı daha yüksek mukavemetleri ile öne çıkmaktadır. 600 bar' a kadar çıkan test basınçları ve 450 bar gibi yüksek değerlerde uzun kullanım dayanımı sunması ile ihtiyaç duyulan değerleri sağlamaktadır. Bu değerleri daha fiziksel ifade edecek olursak 450 bar değerinde depolama yapılan bir tüpte 1 kg hidrojeni depolamak için gereken hacim 55 litredir, 1 kg hidrojenen elde edilebilecek enerji değeri ise 39.44 kW saattir. Ortalama elektrik enerjisi tüketimine sahip bir evin günde 6 kW elektrik enerjisi tükettiği varsayılırsa böyle bir evi kayıplar da hesaba katıldığında 3 günden fazla süre enerji bakımından idame edebileceği görülmektedir.

Hidrojeni kompozit tanklarda depolamayı sisteminde kullanan en önemli örnek günümüzün en bilinen hidrojen teknolojisi olan Japonya menşeli Toyota markasına ait tamamen hidrojenden elde edilen elektrik enerjisi ile çalışmakta olan Mirai model adına sahip otomobillerdir. Toyota için Japon kimya şirketi Ube Industries tarafından üretilen güçlendirilmiş karbon-fiber tüpler günümüz teknolojisine göre gelişmiş malzeme teknolojisine sahip olup 700 bar değerine kadar depolama sağlayabilmektedir. %5.7 ağırlık oranıyla ise bu konudaki dünyadaki en iyi yakıt-depo ağırlık oranını sunmaktadır (Toyota, 2017).



1. İç Katman : Hidrojen sızdırmazlığını sağlayan polimer katman

2. Orta Katman : İlk katmana dayanım desteği sağlayan güçlendirilmiş karbon fiber katman

3. Dış Katman : İç yapıyı dış etkilerden koruyan güçlendirilmiş cam fiber katman

Şekil 4.1. Gelişmiş kompozit hidrojen depolama tanklarının kesit görünümü (Toyota, 2017)

Bahsedilen kompozit tüpler otomobillerde dahi kullanılabilir hale gelmesi ne seviyede geliştiklerinin ve yüksek iç basınç değerlerine rağmen çeşitli nedenlerle infilak etme olasılıklarının da ne derece düşük olduğunu anlamamıza yardımcı olmaktadır. Toyota bu modelini çarpışma testlerinde de denemiş ve birçok çarpışma senaryosunda depolama tanklarının herhangi bir zarar görmediği ve fonksiyonlarını sürdürdüğü rapor edilmiştir.

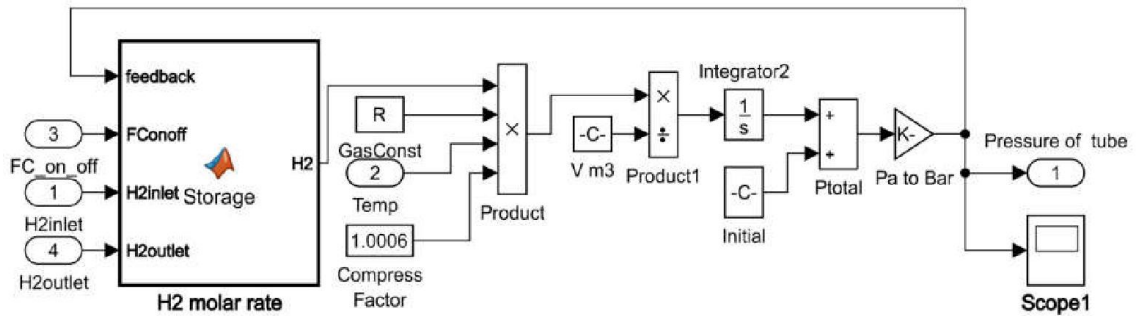
Hidrojen gazının yüksek basınçta depolanması ile ilgili henüz ülkemizde sadece hidrojen gazı için bir yönetmelik bulunmasa da Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığının yayınladığı basınçlı gaz tüpleri ile güvenli çalışma adlı yönergede dikkat edilmesi gereken hususlar sıralanmıştır. Bunun dışında ise iş güvenliği açısından depolama ünitesi sağlayıcısının sağladığı güvenlik talimatlarına uyulması elzemdir.

4.2.2 Yüksek basınçta depolama matematiksel modeli

Hidrojen depolama tankı işlevi itibari ile düşünüldüğünde sistemde üretilen hidrojen çalışma zamanı boyunca güneş enerjisi şiddetinin değişimi ile anlık olarak değişen bir hidrojen molar debisi girişine sahip olacaktır. Bu nedenle model denklemi depolama tankına giren anlık molar hidrojen debisi cinsinden çıkarılmalıdır. Model denklemi ideal gaz denklemi temel alınarak çıkarılabilir. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{tank} = z \cdot \frac{N_{H_2} \cdot R \cdot T_{tank}}{M_{H_2} \cdot V_{tank}} + P_{ilk} \quad (4.1)$$

Burada z hidrojenin sıkıştırılabilirlik faktörü, M hidrojenin molar kütlesi, N_{H_2} hidrojenin anlık molar miktarı, T_{tank} depolama tankı sıcaklığı, V_{tank} depolama tankı hacmidir. Bu denkleme göre depolama tankı Simulink ortamında modellenecek olursa



Şekil 4.2. Hidrojen depolama tankının Simulink modeli

BÖLÜM V

HİDROJEN GAZINDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ

5.1 Yakıt Pillerinin Özellikleri ve Çalışma Prensipleri

Yakıt pilleri çevre dostu ve yüksek verimli elektro-kimyasal enerji dönüşüm sistemleridir. Herhangi bir ısı makinesi kullanılmaksızın sadece kimyasal reaksiyonlar sonucu elektrik enerjisi üretebilirler. Yakıt pilleri sarsıntısız ve sessiz çalışmaları, küçük boyutları, yüksek verimleri ve atık ısılarının da tekrar kullanılabilir olması ile öne çıkmaktadır. Ayrıca atık ısılarının tekrar kullanılması ile verimleri daha da arttırılabilir.

Yakıt pilleri güç ihtiyacına göre hücre sayıları arttırılarak kolayca ölçeklendirilebilir olmaları, çevreye zararsız ve sessiz olmaları sayesinde bireysel kullanım için kullanıcıya yakın konumlandırılabilmesi, çok düşük emisyon değerleri, yakıt pili çeşidine göre değişmekle beraber saf hidrojenin yanı sıra doğal gaz, etanol, metanol, dizel veya kömür gazı gibi hidrokarbonları da kullanabilmeleri ve katı atık probleminin olmaması atık olarak sadece saf su çıkışı olması üstün görülen yönleridir.

Yakıt pillerinde en yüksek verim yakıt olarak hidrojenin kullanılması ile elde edilir. Diğer yakıtların kullanımında ise verim bir miktar düşmekle birlikte atık olarak saf suyun yanı sıra az miktarda da olsa sera gazı çıkışı olmaktadır. Yakıt pillerinin en önemli üstünlüklerinin çevreci olmaları düşünüldüğünde hidrojen dışında diğer yakıtların kullanılmasının çevrecilik açısından uygun olmadığı anlaşılmaktadır.

Hidrojen gazının enerjisi yakıt pillerinde herhangi bir hareketli parçayı tahrik etmek için kullanılmaz, bunun yerine kimyasal olarak oksijen ile birleşir ve su molekülünü oluşturur bu sırada da açığa çıkan elektronlar sayesinde elektriksel enerji üretmiş olur. Bu döngü içerisinde hiçbir hareketli parça bulunmaması sayesinde mevcut geleneksel motorlardaki çevrimlerden çok daha verimlidir.

Yakıt pillerinde yakıt girişi anot tarafından yapılırken katot yarı hücresinden ise oksijen veya hava girişi yapılır. Oksijen ve hidrojen birleşerek suyu oluştururken ortaya elektrik

ve ısı enerjileri çıkar. Kimyasal enerjiyi anında elektrik enerjisine çevirmeleri ile bataryalara benzetilebilir.

5.2 Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri kullanılan yakıt türü, elektrolit cinsi ve çalışma koşullarına göre farklılaşmaktadır. Bu yakıt pillerinden başlıcaları incelenecek olursa Alkali yakıt pilleri, PEM yakıt pilleri, katı oksit yakıt pilleri, doğrudan metanollü yakıt pilleri, fosforik asit yakıt pilleri ve erimiş karbonatlı yakıt pilleri ön plana çıkmaktadır.

5.2.1 Alkali yakıt pilleri

Elektrolizörlerde olduğu gibi yakıt pillerinde alkali yakıt pilleri ilk yakıt pili teknolojilerindedir. İlk olarak uzay çalışmaları sırasında geliştirilmiştir. Hidroksit iyonuna sahip eriyik haldeki sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit elektrolit olarak kullanılmaktadır. Katalizör olarak ise nikel, gümüş ve metal oksitler kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklıkları ise 100-250 °C arasındadır. Verimleri ise %70 civarındadır.

5.2.2 Polimer elektrot membranlı (PEM) yakıt pilleri

Yapısında flor ve sülfonik asit bulunduran polimer ve çok ince yapıdaki bir zardan oluşan elektrolit kullanır. Kullanılan Nafion zar çeşitlerine bağlı olarak 10-20 mikron aralığında farklı kalınlıklardadır. Nafion zar inceldikçe yakıt pillerinin verimlilikleri de artmaktadır. Nafion zar kimyasal yapısı gereği 120 °C civarında erimekte ve tamamen deforme olmaktadır. Bu nedenle uzun kullanım için bu sıcaklık olabildiğince 80 °C civarında tutulmaktadır. Diğer yakıt pillerine oranla nispeten daha düşük sıcaklıklarda çalışması nedeniyle platin, paladyum gibi daha iyi katalizörlere ihtiyaç duyar ve bu durum da maliyetleri artırmaktadır. Verimleri ise %50 civarında olup düşük güç seviyelerinde daha verimli çalışmaktadırlar. Herhangi bir atık ortaya çıkarmadan ve herhangi bir hareketli parça bulundurmamaları nedeni ile aşınmadan uzun süreler çalışabilmektedirler. Tez çalışmasının ilerleyen kısımlarında PEM yakıt pilleri çalışma mekanizmaları ve dinamik modeli ile birlikte daha detaylı incelenecektir.

5.2.3 Katı oksit yakıt pilleri

Katı oksit yakıt pillerinde bir metal oksit olan itriyum eklenmiş zirkonyum oksit elektrolit olarak kullanılır. İtiryum eklenerek yapısal olarak kusurlu hale gelen zirkonyum oksit elektrot, oksijen iyonlarını taşıyabilir hale gelmektedir, yani bir nevi yapısal kusurdan yararlanılmaktadır. Bu yapısal durumun yanı sıra elektrolitin gözeneksiz olması da istenir, bu sayede elektrokimyasal yollar haricinde bir doğrudan temasın önüne geçilmiş olmaktadır. Bu elektrolit 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda oksijen iyonu geçirgenliğine sahip olmakta ve bu özelliği oksijenin katottan anoda geçişinin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Çalışması esnasında yüksek sıcaklık nedeni ile sadece katı ve gaz fazı bulunmakta ve bu nedenle diğer yakıt pillerinden yapı bakımından daha basit hale gelmektedirler. Ayrıca yüksek sıcaklıkta çalışmaları kojenerasyon ile ısı geri kazanım imkânını arttırmakta ve ısı geri kazanımı ile oldukça yüksek verim değerlerine çıkılabilmektedir.

5.2.4 Doğrudan metanollü yakıt pilleri

Doğrudan metanol kullanan yakıt pilleri özellikleri ve çalışma prensipleri itibari ile PEM yakıt piline benzemekte ancak yakıt olarak saf hidrojen yerine yapısında hidrojen bulunduran metanol kullanılması ile farklılaşmaktadır. Yakıt pilinin anot tarafından sıvı metanol ve su karışımı ile beslenirken katot tarafından oksijen beslenmesi yapılır. Verimleri %40 civarında olup çalışma sıcaklıkları 50-100 °C arasındadır. Yine PEM yakıt pillerinde olduğu gibi düşük çalışma sıcaklıkları nedeni ile ihtiyaç duyulan pahalı katalizörler doğrudan metanollü yakıt pillerinde de maliyetleri arttırmaktadır.

5.2.5 Erimiş karbonat yakıt pilleri

Periyodik cetveldeki birinci grup metalleri lityum, sodyum ve potasyum gibi metallerin alkali karbonat seramikleri elektrolit olarak kullanılır. Katı oksit yakıt pilleri gibi erimiş karbonat yakıt pilleri de oldukça yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadır (600-700 °C). Verimleri ise %60 civarında olup yine katı oksit yakıt pilleri gibi yüksek sıcaklıkları nedeniyle kojenerasyon ile ısı geri kazanımı mümkün olduğundan bu verimleri %80'lere kadar arttırılabilir. Yüksek sıcaklık gereksinimi nedeni ile düşük güçlü sistemler için verimli değildir, bu nedenle 1 MW ile 20 MW aralığındaki güçler için tasarlanırlar.

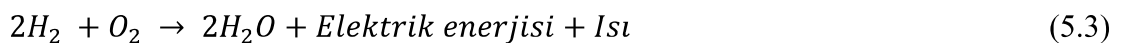
5.2.6 Fosforik asit yakıt pilleri

Bu tip yakıt pillerinde yakıt piline adını da veren fosforik asit elektrolit olarak kullanılır. Fosforik asidin kullanımı nedeni ile katalizör olarak birinci grup metallerin katalizör olarak kullanımı asit ile kuvvetli tepkimeye girmeleri nedeni ile imkânsızdır, bu nedenle platin ve türevleri katalizör olarak kullanılır. Bu durum da maliyeti artırır. Ayrıca hem asit kullanımı hem de 150-200 °C gibi yüksek sıcaklıkta çalışmaları sebebi ile aşınma ve deforme olma sorunları yüksektir. Ancak yine de ticari olarak piyasada en çok bulunan yakıt pili türüdür. Bu yakıt pilinde verim %40-50 civarında olup kojenerasyon ile %80'ler civarına çıkarılabilir.

5.3 PEM Yakıt Pilleri

PEM yakıt pilleri hassas yapısı gereği yakıt olarak saf veya safa çok yakın diye nitelendirilebilecek hidrojeni yakıt olarak kullanır, bu nedenle su oluşum tepkimesi gerçekleşirken oksijen ve hidrojen dışında tepkimeye giren üçüncü bir element bulunmaz, böylece tepkime çıkışında sadece saf su elde edilir. Her ne kadar yakıt pilinin oksijen beslemesi için kabaca filtre edilmiş hava kullanılsa da havada bulunan azot tepkimeye dâhil olmayarak kontaminasyon oluşturmaz. Hatta azotun bu özelliği nedeni ile yakıt pilinin temizlenmesi, tıkalı kanalların açılması, flooding diye tabir edilen ve oluşması istenmeyen kanalların su kabarcıkları ile tıkanması olayının giderilmesi için de yine girişlerden azot gönderilerek temizlenmesi sağlanır.

PEM yakıt pilinde meydana gelen tepkimeler ise anot yarı hücresinde denklem 5.1, katot yarı hücresinde 5.2'deki gibi gerçekleşir. Toplam reaksiyon ise 5.3'de görülebilir.



Her ne kadar kimyasal denklemlerden anlaşılmasa da yakıt pilinin dinamikleri dolayısı ile giren oksijen ve hidrojen bileşenlerinin belirli basınç ve kalitede olması istenir. Örneğin en bilinen firmalardan Ballard ticari firması kendisinin MK5-E model PEM yakıt

pili için 10 bar civarında basınçlı saf veya safa yakın hidrojen girişi ve atmosferik basınçta bir hava beslemesi yapılmasını önerir.

5.4 PEM Yakıt Pili Dinamik Modeli

PEM elektrolizör modelinde olduğu gibi anot ve katot yarı hücreleri ile membran kısımlarından oluşan üç parça halinde modellenebilir. Bu kısımlara ek olarak bir de voltaj ve verim hesaplamalarının yapıldığı dördüncü bir kısım mevcuttur. Bu bölümde fiziklerinin ve bu fiziklere ait denklemlerin bazı özel durumlar dışında elektrolizör ile aynı olması nedeni ve bu fiziklerle ilgili ayrıntılı incelemenin bölüm üçte yapılmış olması nedeni ile farklılıklar ve genel denklemler üzerinde durulacaktır. Gerekli durumlarda referanslar üçüncü bölümdeki ilgili açıklama ve denklemlere verilmiştir.

5.4.1 PEM yakıt pili anot kısmı matematiksel modeli

Anot kısmı molar miktarlar ve kısmi basınçlar için aşağıdaki eşitlikler kurulabilir. Molar miktarlar için 5.4 ve 5.5 denklemleri yazılabilir.

$$N_{H_2a} = N_{H_2ai} - N_{H_2ao} - N_{H_2used} \quad (5.4)$$

$$N_{H_2Oa} = N_{H_2Oai} + N_{H_2Oao} + N_{H_2Oeod} + N_{H_2Odif} + N_{H_2Oback} \quad (5.5)$$

Kısmi basınçlar için ise denklem 5.6 ve 5.7 kullanılabilir.

$$P_{H_2a} = \frac{RT}{V_a} (N_{H_2ai} - N_{H_2ao} - N_{H_2used}) \quad (5.6)$$

$$P_{H_2Oa} = \frac{RT}{V_a} (N_{H_2Oai} + N_{H_2Oao} + N_{H_2Oeod} + N_{H_2Odif} + N_{H_2Oback}) \quad (5.7)$$

$$P_a = P_{H_2a} + P_{H_2Oa} \quad (5.8)$$

Hidrojen girişi membran özelliklerini geliştirmek daha verimli çalışmasını sağlamak amacı ile nemlendirilmelidir. Hidrojenin ne kadar nemlendirileceği yani ne kadar oranda su taşıyacağı ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$y_{H_2Oai} = \frac{a \cdot P_{sat}}{P_a} \quad (5.9)$$

$$N_{H_2O_{ai}} = \frac{y_{H_2O_{ai}}}{1-y_{H_2O_{ai}}} \cdot N_{H_2ai} = \frac{S_{H_2} \cdot I}{2F} \cdot \frac{a \cdot P_{sat}}{P_a - (a \cdot P_{sat})} \quad (5.10)$$

Burada S stokiyometri değeri, y molar oran, a ise su buharı aktifliğidir a değeri daha önce bahsi geçen denklem 3.24 ile hesaplanabilir. Formülasyonda su buharı aktifliği yerine bağıl nem değeri kullanımı daha doğrudur, ancak hesaplamalarda kolaylık olması açısından ideal gaz kabulleri yapıldığından buradaki gaz karışımının da ideal gibi davrandığı varsayılırsa bağıl nem yerine su buharı aktifliği kullanılabilir. Anlık molar miktarlar bulunduğu göre türlerin molar oranları da aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$y_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P_a} \quad (5.11)$$

$$y_{H_2O} = \frac{P_{O_2}}{P_a} \quad (5.12)$$

5.4.2 PEM yakıt pili katot kısmı matematiksel modeli

Katot kısmı hidrojen pozitif iyonları ile oksijenin birleşerek suyu oluşturduğu kısımdır. Katot kısmında molar miktarlar ve kısmi basınçlar için aşağıdaki eşitlikler kurulabilir. 5.13 ve 5.14 de molar miktarlar için yazılan eşitlikler görülebilir.

$$N_{O_{2c}} = N_{O_{2ci}} - N_{O_{2ao}} - N_{O_{2used}} \quad (5.13)$$

$$N_{H_2O_c} = N_{H_2O_{ci}} - N_{H_2O_{co}} + N_{H_2O_{eod}} + N_{H_2O_{dif}} - N_{H_2O_{back}} + N_{H_2O_g} \quad (5.14)$$

Kısmi basınçlar denklem 5.15 ve 5.16, toplam basınç ise 5.17'deki gibi hesaplanabilir.

$$P_{O_{2c}} = \frac{RT}{V_c} (N_{O_{2ci}} - N_{O_{2ao}} - N_{O_{2used}}) \quad (5.15)$$

$$P_{H_2O_c} = \frac{RT}{V_c} (N_{H_2O_{ci}} - N_{H_2O_{co}} + N_{H_2O_{eod}} + N_{H_2O_{dif}} - N_{H_2O_{back}} + N_{H_2O_g}) \quad (5.16)$$

$$P_c = P_{O_c} + P_{H_2O_c} \quad (5.17)$$

Kullanılan ve üretilen türlerin molar miktarları ise Faraday denkleminde elde edilebilir.

$$N_{O_{2used}} = \frac{n \cdot A \cdot I}{4F} \quad (5.18)$$

$$N_{H_2 used} = \frac{n \cdot A \cdot I}{2F} \quad (5.19)$$

$$N_{H_2O g} = \frac{n \cdot A \cdot I}{2F} \quad (5.20)$$

Anlık molar miktarlar bulunduğuna göre türlerin molar oranları da aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$y_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_c} \quad (5.21)$$

$$y_{H_2O} = \frac{P_{O_2}}{P_c} \quad (5.22)$$

5.4.3 PEM Yakıt Pili Membran Kısmı Matematiksel Modeli

Membran davranışı gözlemlendiğinde membranın PEM elektrolizördeki ile aynı mekanizmalara sahip olduğu görülecektir. Bakıldığında yine suyun kütsel taşınımı için difüzyon ve elektro-osmotik sürüklenme ile hidrojenin geri difüzyonu mekanizmaları mevcuttur. Sadece bu geçişler elektrolizördekinin tersi yönlerde gerçekleşmektedir.

İlgili denklemlere erişmek için bu tez çalışmasının üçüncü bölümüne göz atılabilir. Suyun difüzyonu için 3.25 ve bunu izleyen denklemler, suyun elektro-osmotik sürüklenmesi için 3.20 ve bunu izleyen denklemler, hidrojenin geri difüzyonu için ise 3.30 numaralı denklemler incelenebilir.

5.4.4 PEM yakıt pili voltaj hesaplamaları kısmı matematiksel modeli

Bir PEM yakıt pilin voltaj eşitliği 5.23 numaralı denklemde olduğu gibi ifade edilebilir. PEM elektrolizörlerde voltaj değerini arttırarak harcanan güç miktarını arttırıp verimi düşüren aktivasyon, omik ve kütle transferi potansiyelleri yakıt pilinde ise üretilen potansiyel fark miktarını düşürerek yine verimi düşüren yönde etki etmektedir.

$$V_{cell} = E_{th} - V_{act,an} - V_{act,ca} - V_{ohm,e} - V_{ohm,i} - V_{mt,an} - V_{mt,ca}$$

$$V_{steady} = E_{th} - V_{ohm,e} - V_{ohm,i} \quad (5.23)$$

$$V_{transient} = V_{act,an} + V_{act,ca} + V_{mt,an} + V_{mt,ca}$$

$$V_{cell} = V_{steady} + V_{transient}$$

Burada Nernst voltajı ve omik voltajlar sürekli duruma etki ederken, aktivasyon ve kütle transferi kaynaklı konsantrasyon voltajları geçici durumda etkilerini göstermektedir. PEM elektrolizörlerde de bahsedildiği gibi eğer akış alanı gaz fazındaki türleri dışarı atmak için uygunsa düşük ve ortalama akım yoğunlukları için kütle transferinden kaynaklanan potansiyel farklar ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu nedenle 3 A/m² akım yoğunluğu değerlerine kadar kütle transferi kaynaklı potansiyel farklar göz ardı edilebilir. Nernst voltajı aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$E_{th} = E_0 + \frac{R \cdot T_{el}}{2F} \cdot \left[\ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \right] \quad (5.24)$$

Aktivasyon voltajı ise elektrolizördeki benzer şekilde anot ve katot için ayrı ayrı hesaplanıp denklem 5.25 ve 5.26 da verildiği gibi ifade edilebilir.

$$V_{act,an} = \frac{R \cdot T_{an}}{\alpha_{an} F} \cdot \arcsin \left(\frac{i}{2i_{0,an}} \right) \quad (5.25)$$

$$V_{act,ca} = \frac{R \cdot T_{ca}}{\alpha_{ca} F} \cdot \arcsin \left(\frac{i}{2i_{0,ca}} \right) \quad (5.26)$$

Omik voltaj ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$V_{ohm} = i \cdot R_{ohm,i} \quad (5.27)$$

$$R_{ohm,i} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (5.28)$$

Burada t_m membranın kalınlığı, σ_m ise membranın iletkenliği olup daha önce bölüm üçte bahsi geçen 3.37 denklemi ile hesaplanmaktadır. Sonuç olarak omik dirençlerden kaynaklanan toplam kaybı denklem 3.38'deki gibi ifade etmemiz mümkündür.

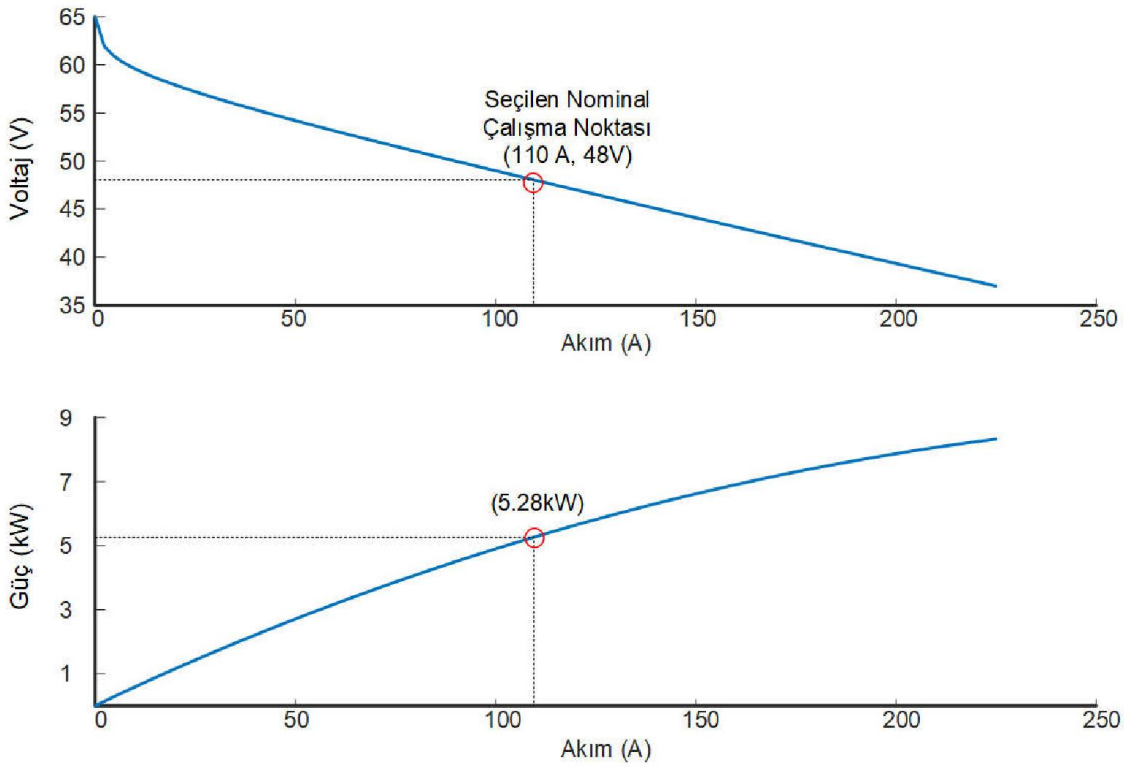
$$V_{ohm} = i \cdot (R_{ohm,i} + R_{ohm,e}) \quad (5.29)$$

Yakıt pillerindeki verimi ise denklem 5.30 ile ifade etmemiz mümkündür. Maksimum teorik verim ise denklem 5.31 ile hesaplanabilir.

$$\eta_{yp} = \frac{V_{yp}}{1.48} \quad (5.30)$$

$$\eta_{yp} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta G/nF}{\Delta H/nF} = \frac{1.23}{1.48} = 0.83 \quad (5.31)$$

Bu bilgiler ışığında hazırlanan modele sistem ihtiyaçları doğrultusunda PEM YP için parametreler belirlenmiştir. Sistemde 48V düzeyinde DA bir bara hattı bulunduğundan bu değere en yakın değerlerde çalışması için nominal voltaj olarak 48 V seçilmiştir. Bu amaçla 50 hücreli bir yakıt pili düşünülmüş, nominal gücü ise 5280 W olarak planlanmıştır. %55 verim ile 75 °C için nominal güçte çalışacak olan yakıt pilinin anlık yakıt tüketimi ise dakikada 34 litre 1 atm basınçtaki hidrojenidir. Belirlenen parametrelerin benzetim ortamındaki yakıt pili modeline ait akım-gerilim ve akım-güç değerlerine ait grafikler de Şekil 5.1'de görülebilir.



Şekil 5.1. Yakıt piline ait akım-gerilim ve akım-güç grafikleri

BÖLÜM VI

BÜTÜNLEŞİK SİSTEM MODELİ

6.1 Sistemin Tanımlanması ve Elemanları

Tez çalışmasının giriş kısmında bahsi geçen, çalışması ve elemanları kısaca tanımlanan ardından diğer bölümlerde ise ana elemanları tanımlanarak modelleri hazırlanan sistemin detaylı açıklaması ve diğer modellerin bütünleşik hale getirilmesi bu bölümde anlatılacaktır.

Sistemin ana parçaları olarak; yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş pili, hidrojen üretici olarak PEM elektrolizör ve hidrojenin elektrik enerjisine dönüşümü için ise PEM yakıt pili sayılabilir.

Yenilenebilir güneş enerjisi gün boyunca toplanmakta ve DA/DA yükseltici tip bir dönüştürücü ile 48 V DA seviyesine çıkarılarak DA bara hattına aktarılmaktadır. Bir kontrolör ile evin anlık yükü ile bara hattındaki güç karşılaştırılarak güneşten elde edilen enerjinin yeterli olması yakıt pili çalıştırılmayarak sadece bu kaynaktan ile konutun enerji ihtiyacı karşılanacaktır.

Güneş enerjisinin konutun enerji ihtiyacını karşılayabildiği ve konutun enerji ihtiyacının da üzerinde bir güç miktarına sahip olduğunda ise artık enerji miktarı PEM elektrolizöre yönlendirilerek artık elektrik enerjisinin hidrojen formunda depolanması sağlanacaktır. Böylece güneş enerjisinin yetersiz kaldığı veya tamamen ortadan kaybolduğu durumlar için verimli bir depolama sağlanmış olup, depolanan hidrojenin ihtiyaç halinde yakıt pilinde yakılarak ihtiyacın giderilmesi sağlanacaktır.

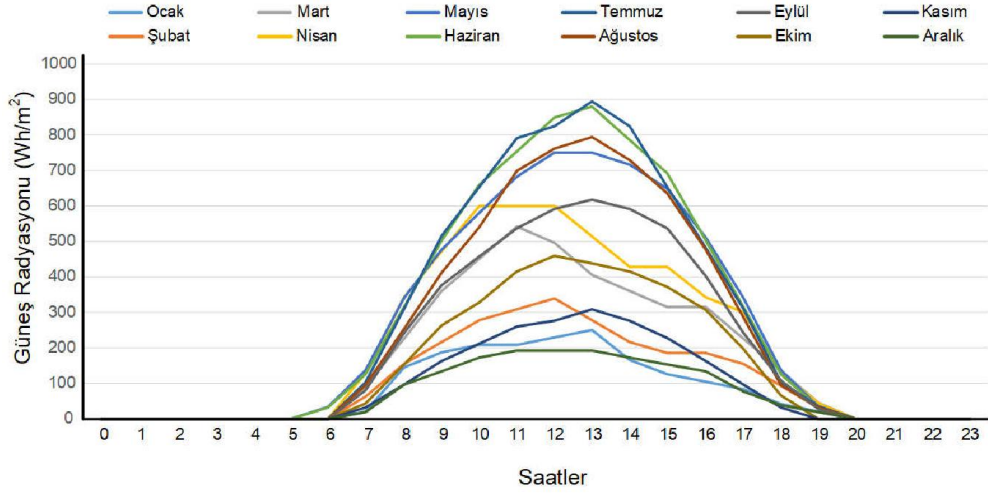
Bu işlemler sırasında olası gecikmelerin önlenmesi ve hızlı cevap karakteristiğinin iyileştirilmesi amacı ile küçük boyutlarda bir batarya grubu ile DA bara hattı desteklenecektir. Yakıt pillerinin kısa geçici hal cevap süreleri evsel yükler için oldukça yeterli görülmektedir (Amphlett vd., 1996; Pathapati vd., 2005). Yine de kontrolör tarafından denetlenen ani geçişleri yumuşatmak ve süreklilik karakterini daha da

iyileştirmek için küçük boyutlu bir batarya grubunun DA bara hattına paralel bağlanması uygun görülmüştür.

Sistem bu haliyle sürekli bir elektrik enerjisi sağlayıcısı olarak çalışmaktayken çalışma sırasında ortaya çıkan atık enerjinin de değerlendirilmesi verimi oldukça yukarı seviyelere taşıyacaktır. Isı geri kazanımı sayesinde ısıtıcılar için elektrik kullanımı en aza inecek ve ısı enerjisi daha verimli bir yolla konuta sağlanmış olacaktır. PEM elektrolizör ve PEM yakıt pilinin zarar görmemeleri için zaten belli sıcaklık değerlerinin üzerine çıkarılmayıp sıcaklık yönetimlerinin yapılması gerekmekte olup ısı geri kazanımı yapılmayacak olsa dahi performanslı kullanımlarda soğutulmaları gerekmektedir. Soğutma işlemi plakalı eşanjörler ile yapılırken hem sistem sıcaklığı kontrol altına alınıp hem de kazanılan ısı ile hem bir sıcak su kazanı sürekli hazır tutulup hem de konutun boyut, yalıtım ve yapı özelliklerine bağlı olarak birkaç odasının ısıtılması sağlanabilir.

6.2 Güneş Enerjisi Profili

Sistemin güneş radyasyonu miktarının sabit veya rastgele değerler alınması durumunda benzetim sistem parametreleri ve alınan sonuçların gerçek bir sisteme uzak kalacağı düşünüldüğünden gerçeğe en yakın veriler benzetim ortamında oluşturulmaya çalışılmıştır. Güneş radyasyonu datalarının oluşturulması için bölüm iki de belirtilen Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün güneş enerjisi atlası dataları kaynak olarak kullanılmıştır. Ancak bu datalardan en fazla günlük toplam enerji bilgisine erişilebileceği ve gün içindeki saatlere göre güneş radyasyonu şiddeti değişiminin elde edilemeyeceğinden saate göre değişen günlük profil için Hindistan'da yapılan bir çalışmanın kuzey yarım küre için günlük profili örnek alınmıştır. Ancak günlük toplam enerji şiddeti ülkemizin verilerine eşitlenmiştir. Bu durumda ortaya çıkan aylara göre günlük enerji değişim grafiği Şekil 6.1'de görülebilir.



Şekil 6.1. Güneş enerjisi miktarının saatlik değişiminin aylara göre grafiği

Benzetim çalışmasının esnekliği sayesinde istenildiğinde sistemin kurulması planlanan bölgede güneş enerjisi ölçümleri yapılarak mevcut profil yerine sisteme girilip bu datalara göre sonuçlar alınabilir ve sistem parametreleri yeniden hesaplanabilir.

6.3 Konutun Yük Profili

Konutun yük profilinin oluşturulması için ortalama bir konutun ihtiyaçları o konutta bulunabilecek elektronik aletlerin güçleri ve sayıları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Belirlenen ihtiyaçlar saatlik olarak planlanmış ve her saat için kullanıldığı varsayılan elektronik aletlerin güçleri toplamı ile o saat içinde kullanılan enerji miktarı elde edilmiştir. Konutun yük profili Çizelge 6.1'de görülebilir.

Belirlenen ortalama tüketim değerleri ile dinamik bir yük davranışı elde edilebilir fakat istenirse de verilerin saatlik yerine daha küçük aralıklarla planlanabileceği bir ev üzerinden, birkaç gün boyunca harcanan enerji miktarları kayıt edilmek sureti ile bunların bir ortalamasının da sisteme girilmesi mümkündür. Bu nedenle sistem ihtiyaçlar ve istekler doğrultusunda bu yönden de geliştirilebilme esnekliğine sahiptir.

Çizelge 6.1. Konut için enerji kullanımı profili

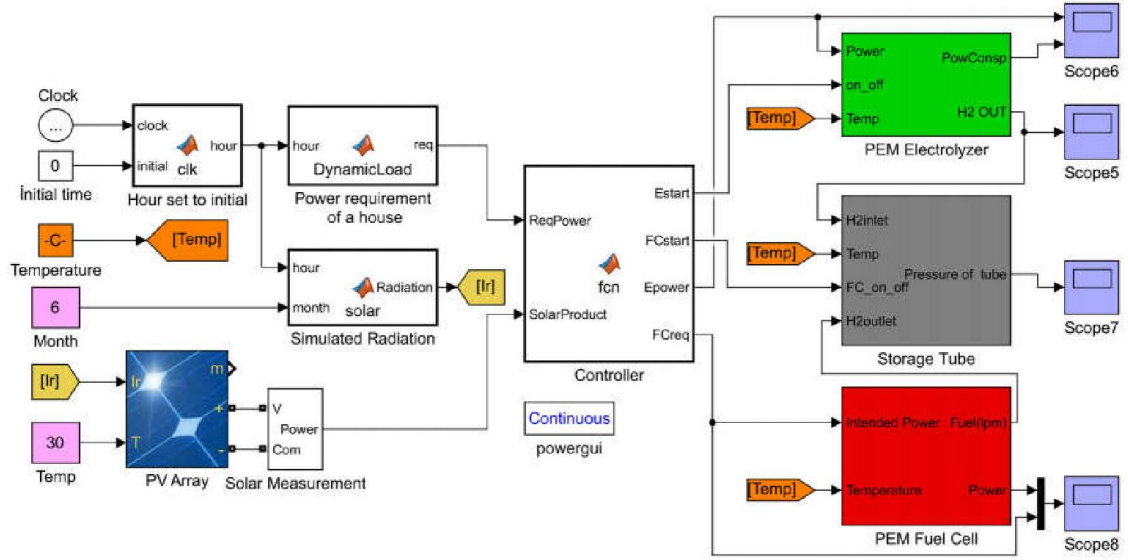
Saat/Cihaz	Aydınlatma (W)	Ütü, Bulaşık ve Çamaşır Makineleri (W)	Mutfak Aletleri (Fırın, Buzdolabı, Su ısıtıcı) (W)	Televizyon, Bilgisayar (W)	Toplam (W)
00-01	20		30		50
01-02	20		30		50
02-03	20		30		50
03-04	20		30		50
04-05	20		30		50
05-06	20		30		50
06-07	20		30		50
07-08			130		130
08-09			30		30
09-10			30		30
10-11			30	200	230
11-12		500	30	200	730
10-13		500	30	200	730
13-14		250	130		380
14-15			30		30
15-16			30		30
16-17			30		30
17-18			30		30
18-19			130	200	330
19-20	200		180	200	580
20-21	200		30	500	730
21-22	200		30	500	730
22-23	150		30	200	380
23-00	100		30	200	330

6.4 Bütünleşik Sistemin Matlab / Simulink Modeli

Bütünleşik sistemin modellenmesi için gereken alt modeller ve model için gerekli girişler önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bahsi geçen alt modellerin birbirleri ile sorunsuz çalışabilmesi için modelleme aşamasında aynı türden fiziksel büyüklükte giriş ve çıkışların ayarlanmış olması gerekmektedir. Farklı fiziksel büyüklüklerin ise uygun biçimde dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir.

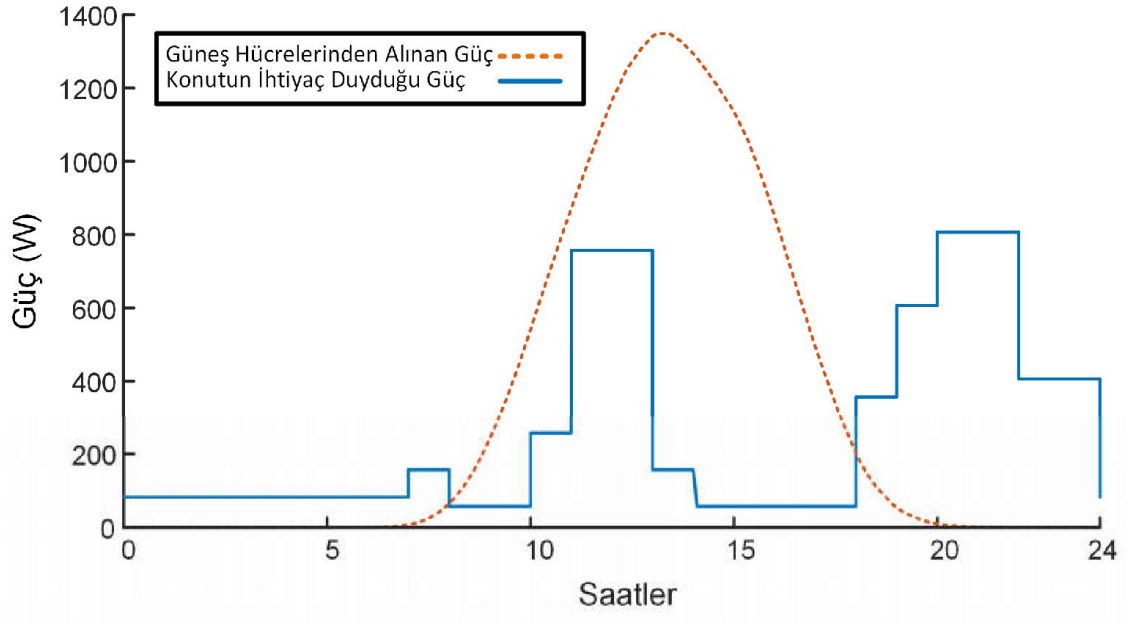
Bu kapsamda modellenen PEM elektrolizör, PEM yakıt pili ve güneş hücre dizisi modelleri sisteme eklenmiş olup bunlara ek olarak güneş radyasyonu miktarının

hesaplayan ve konutun yük miktarını anlık olarak hesaplayan bloklar ve kontrolör bloğu da eklenmiştir.



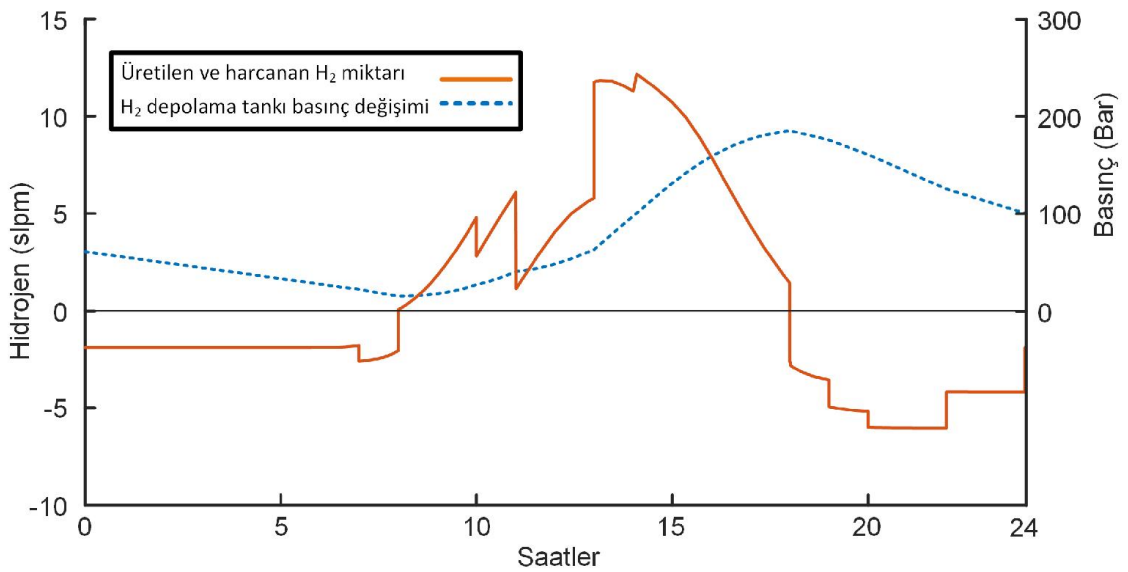
Şekil 6.2. Bütünleşik sisteme ait Matlab / Simulink modeli

Bütünleşik sistemin girişleri sistemin parametreleri ile güneş enerjisi radyasyonu ve konutun enerji ihtiyacıdır. Bu girişler ise istenilen senaryo durumuna göre düzenlenebilir. Hazırlanan senaryoya göre sisteme girilmiş güneş enerjisi ve sistem yükü değişimine sistemin seçilen parametreler çerçevesinde verdiği cevaplar aşağıdaki sonuç grafiklerinde incelenerek daha iyi anlaşılabilir. İlk olarak sisteme girilen yük ve haziran ayı için güneş hücrelerinden alınan yük profili Şekil 6.3'de incelenebilir.



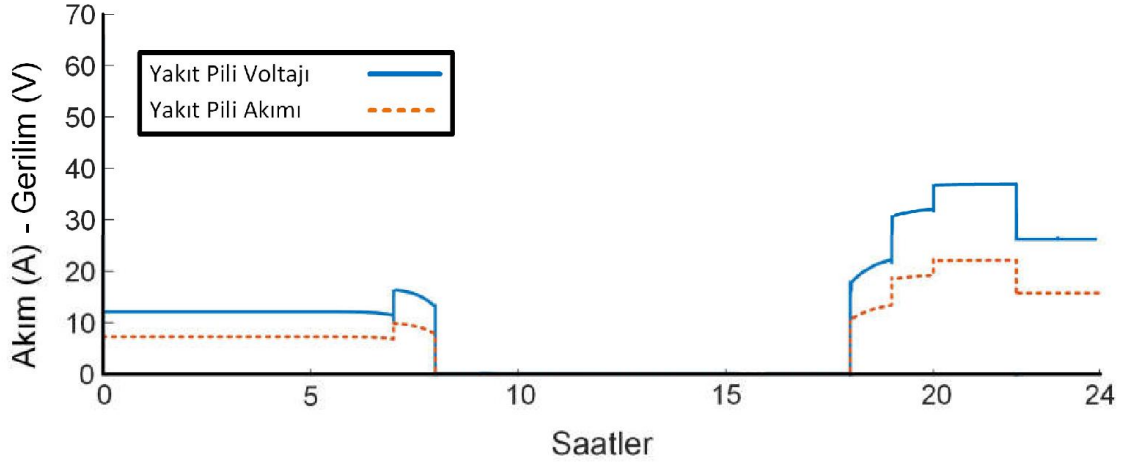
Şekil 6.3. Sisteme girilen yük ve güneş hücrelerinden elde edilen güç

Burada güneş hücresi parametreleri için Panasonic ticari markasının PE240M modeli olup nominal gücü 240 W tır. Bu panellerden 12 adet paralel bağlı olacak şekilde planlanmış ve benzetime girilmiştir. Her bir panelin yüzey alanı ise 1.64 m²'dir. Bu koşullar altında alınan enerjinin harcanan enerjiden yüksek olduğu anlarda enerjinin fazla kısmı ile üretilen hidrojenin litre türünden değeri ve depolama tüpünün basınç değişimi Şekil 6.4'de görülebilir.

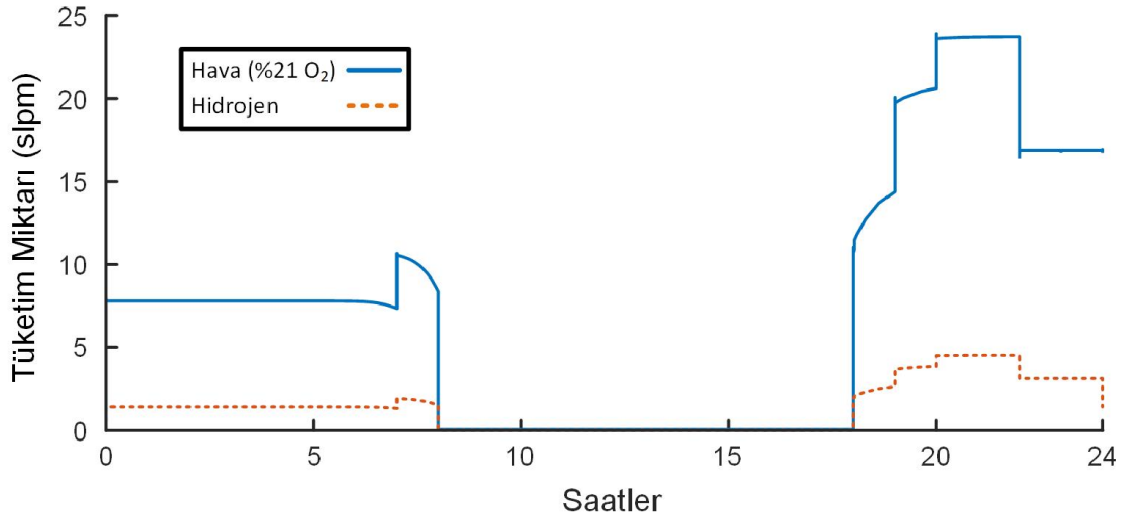


Şekil 6.4. Üretilen - harcanan hidrojen gazı miktarı ve depolama basıncı değişimi

Hidrojeni kullanarak enerji üreten PEM yakıt pilinin tükettiği hidrojen ve oksijen miktarları ile tüketilen hidrojene karşılık üretilen akım ve gerilim grafikleri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da görülebilir.

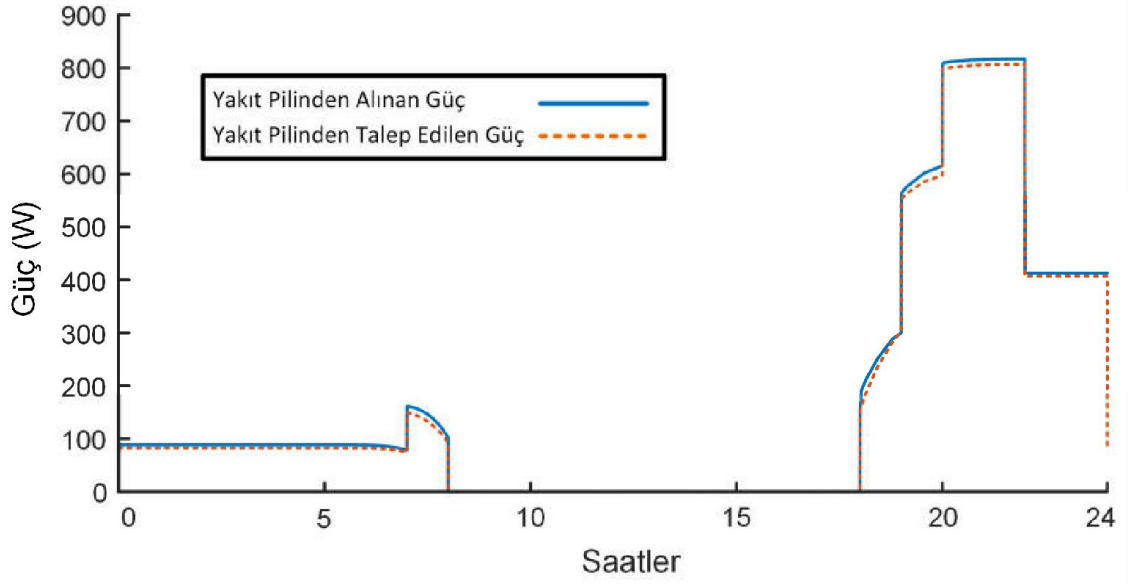


Şekil 6.5. PEM yakıt pilinin ürettiği akım ve gerilim değerleri



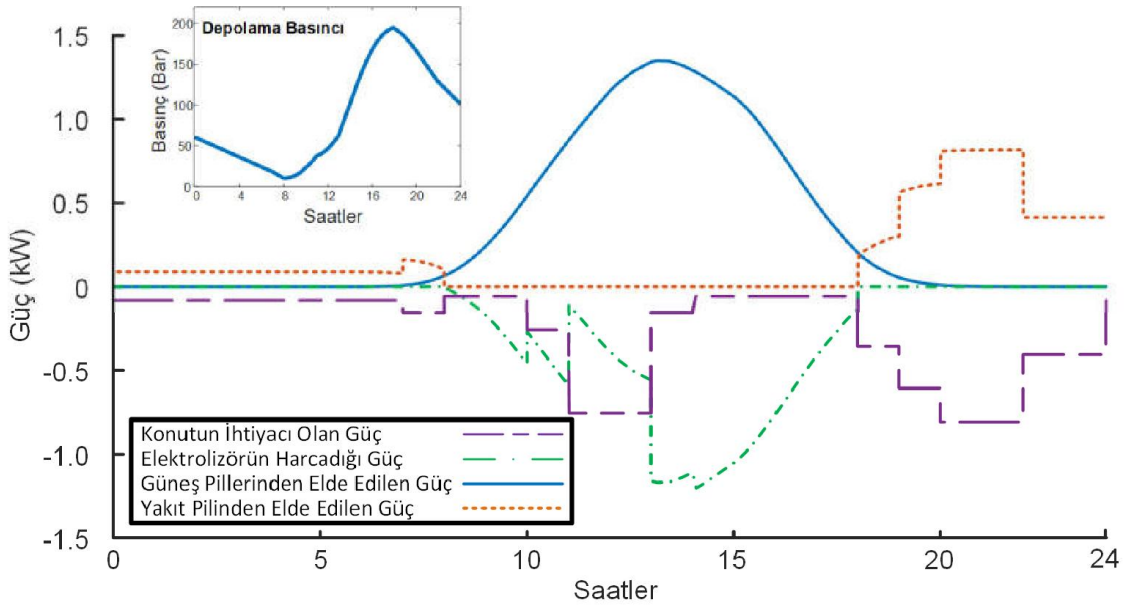
Şekil 6.6. PEM yakıt pilinin tükettiği hidrojen ve oksijen miktarları

Yakıt pilinin bu senaryoya göre karşılaması beklenen enerji miktarı ve yakıt pilinin buna karşılık ürettiği enerji miktarı Şekil 6.7'de görülebilir.



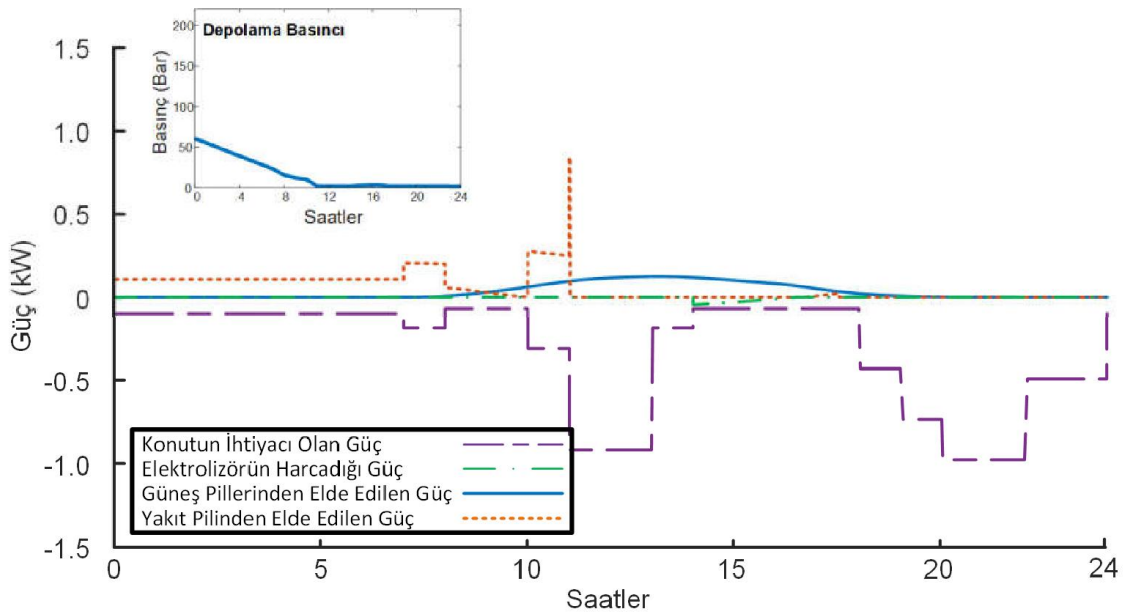
Şekil 6.7. Yakıt pilinden karşılanması beklenen güç ve yakıt pilinin ürettiği güç

Bu grafikte yakıt pilinin oldukça iyi bir geçici hal cevabı ile sistemi desteklediği ve sürekliliği sağladığı görülebilir. Bu durum üzerinde yakıt pili için tasarlanan kontrolcünün başarısı da oldukça etkilidir. Durumun daha net anlaşılması için üretilen ve tüketilen enerjilerin aynı grafik üzerinde gösterimi ve ayrıca farklı senaryolar altında modelin incelenmesi yararlı olabilir.



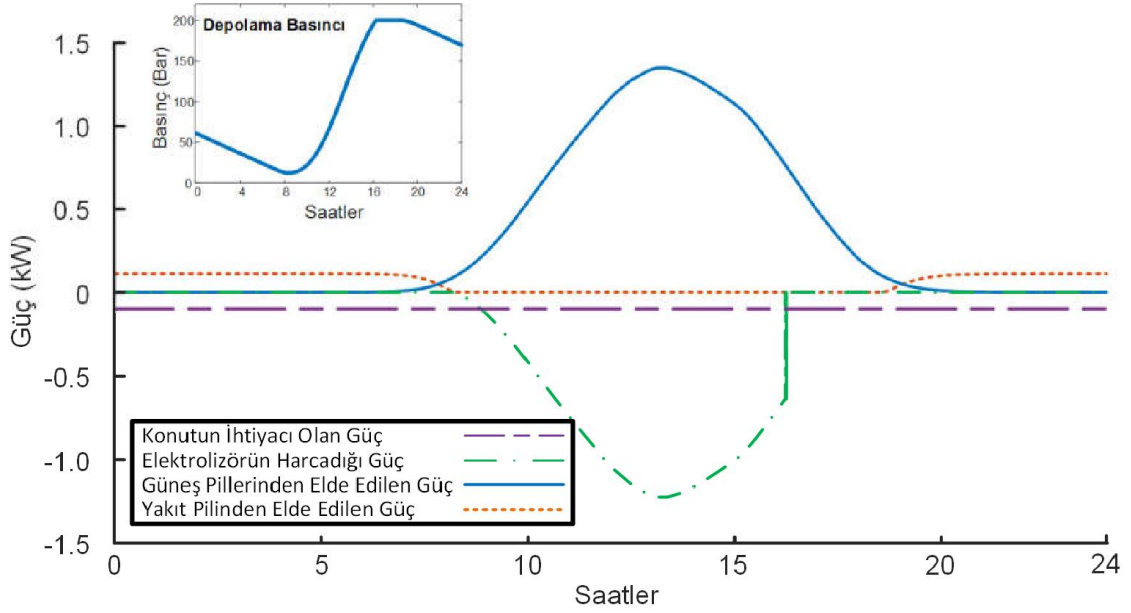
Şekil 6.8. Birinci senaryoya göre bütünleşik sistemin ürettiği ve tükettiği enerji miktarları

Birinci senaryoda konutun yük profili Çizelge 6.1'deki gibidir. Haziran ayı güneş enerjisi değerleri için; 12 adet paralel bağlı her biri 1.64 m² yüzey alanına sahip güneş paneli, 100 cm² aktif alana sahip 13 hücreli PEM elektrolizör ve 50 hücreli bir PEM yakıt pili kullanılmıştır, hidrojen depolama tankı hacmi ise 10 litredir. Elektrolizör ve yakıt pili boyutları ve diğer detay parametreleri ise güç tüketimi örneklenen konut için yeterlidir. Bu koşullar altında güneş enerjisi radyasyonunun yüksek olduğu aylardan biri olan haziran ayı için 12 adet güneş paneli yeterli görülmüştür, ancak farklı coğrafi konumda ve farklı mevsim için bu sayı değişecektir. Farklı bir mevsim için yetersiz sayıda güneş pili kullanılması halinde ise ortaya çıkacak durumu diğer senaryolar ile inceleyebiliriz.



Şekil 6.9. İkinci senaryoya göre bütünleşik sistemin ürettiği ve tükettiği enerji miktarları

İkinci senaryo ise sistemin yetersiz kaldığı bir durumu örneklemek için yapılmış olup bu senaryoda bütün parametreler aynı tutulmuş ancak mevsim olarak güneşlenmenin en düşük olduğu ay olan aralık ayı seçilerek güneşlenme miktarı bu ayın verilerine göre kullanılmıştır. Bu durumda haziran ayı için yeterli olan 12 adet paralel bağlı güneş paneli yetersiz hale gelmiştir. Bu durum için depo için verilen 60 barlık başlangıç basıncındaki hidrojen tükenmeye başlamış ve gündüz vakitlerinde güneşten elde edilen enerjinin çok düşük boyutlarda kalarak yeniden hidrojen elde edilememesi nedeni ile tükenmiştir. Böylece bütünleşik sistem saat 11'den sonra konutun enerji ihtiyacını karşılayamamıştır. Bu da daha fazla sayıda güneş paneline ihtiyaç olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.10. Üçüncü senaryoya göre bütünleşik sistemin ürettiği ve tükettiği enerji miktarları

Üçüncü senaryoda ise sistemin konut yerine kırsal bir alandaki 24 saat sürekli çalışan ve gün boyu sabit enerji kullanan bir yükün enerjisinin karşılanması örneklenmiştir. Bu senaryoda yükün sürekli olarak 100 Wh enerji tüketmekte olan bir yükü beslediği varsayılmış, yine haziran ayı verileri için 12 adet güneş paneli kullanılarak ve diğer parametreler sabit tutularak benzetim sonuçları alınmıştır. Bu senaryoda ayrıca güneş panellerinden alınan enerjinin fazla olması nedeni ile hidrojen depolama tankı 200 bar basınca kadar dolmuş ancak bu basınç değerine erişildikten sonra kontrolör elektrolizörün çalışmasını durdurmuştur. Gün sonunda hidrojen depolama tankı basıncı başlangıç basıncından yaklaşık 100 bar daha fazladır, bu da benzer güneşlenme değerlerine sahip bir sonraki gün için elektrolizörün çok daha az çalışacağı anlamına gelmektedir.

BÖLÜM VII

SONUÇ

Modelleme çalışmaları neticesinde bahsedilen sistemin fiziksel hale getirilerek kullanılabilirliğinin mümkün olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanı sıra model aracılığı ile uygulamanın boyutları ve uygulama yapılacak konuma göre sistem parametrelerinin ayrı ayrı özgün olarak hesaplanmasının ve bu parametrelerin en iyilenmesinin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sayede model aracılığı ile çok farklı boyutlardaki ve farklı coğrafi şartlardaki uygulamaların maliyet hesapları için gerekli parametreler de yüksek doğrulukla tespit edilebilecektir.

Tez çalışmasının bu yönü ile sistemin fiziksel hale getirilebilir olmasına katkısı olduğu gibi bilimsel açıdan da literatüre katkıları bulunmaktadır. Bu açıdan bakılacak olursa, literatürde hakkında eser sayıda çalışma bulunan PEM elektrolizör matematiksel modelini tüm fizikleri ile ifade edebilmesi ve diğer modellerinde eklenmesi ile daha önce tamamı bütünlük olarak Simulink ortamında modellenmemiş olan bahsi geçen sistemin tüm matematiksel eşitlikleri çıkarılarak bir araya getirilerek bir arada ifade etmesi ile de önemli görülmektedir.

Ayrıca sistem parametrelerinin hızlıca güncellenebilir, farklı senaryolar için anında sonuç alınabilir oluşu, istenildiğinde farklı karşılaştırmalara ait grafiklerin de elde edilebilir oluşu ile kullanıcı ve araştırmacılara katkı sağlayacaktır.

Gelecekte bu çalışma bir paket program veya yine Simulink üzerinde bir arayüz haline getirilebileceği gibi rüzgâr ve mikro-hidro gibi yenilenebilir diğer kaynakların da modele eklenmesi ile kullanıcının istediği bileşenleri seçerek bu seçimlere yönelik sonuçlar elde etmesi, parametreleri tespit etmesi mümkün olabilecektir. Ayrıca bunun yanı sıra paket programa eklenebilecek eniyileme algoritmaları ile de en uygun parametrelerin istenen boyutlar için tespiti sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

Abdin, Z., Webb, C.J. and Gray, E.M., “Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell”, *International Journal of Hydrogen Energy* 40(39), 13243–13257, 2015.

Abdol Rahim, A.H., Tijani, A.S., Kamarudin, S.K. and Hanapi, S., “An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production: Modeling and mass transport”, *Journal of Power Sources* 309, 56–65, 2016.

Amphlett, J.C., Mann, R.F., Peppley, B.A., Roberge, P.R. and Rodrigues, A., “A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells”, *Journal of Power Sources* 61(1), 183–188, 1996.

Aouali, F.Z., Becherif, M., Tabanjat, A., Emziane, M., Mohammedi, K., Krehi, S. and Khellaf, A., “Modelling and Experimental Analysis of a PEM Electrolyser Powered by a Solar Photovoltaic Panel”, *Energy Procedia* 62, 714–722, 2014.

Arsov, G.L., “Improved parametric PSpice model of a PEM fuel cell”, *Optimization of Electrical and Electronic Equipment 11th International Conference*, Brasov, Romania, s. 203–208, 22-24 May, 2008.

Awasthi, A., Scott, K. and Basu, S., “Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production”, *International Journal of Hydrogen Energy* 36(22), 14779–14786, 2011.

Baker, J., “New technology and possible advances in energy storage”, *Energy Policy* 36(12), 4368–4373, 2008.

Burke, A., “Ultracapacitors: why, how, and where is the technology”, *Journal of power sources* 91(1), 37–50, 2000.

Cetin, E., Yilanci, A., Oner, Y., Colak, M., Kasikci, I. and Ozturk, H.K., “Electrical analysis of a hybrid photovoltaic-hydrogen/fuel cell energy system in Denizli, Turkey”, *Energy and Buildings* 41(9), 975–981, 2009.

Colson, C.M. and Nehrir, M.H., “Evaluating the Benefits of a Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Combined Heat and Power Plant for Energy Sustainability and Emissions Avoidance”, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 26(1), 140–148, 2011.

Dale, N.V., Mann, M.D. and Salehfar, H., “Semiempirical model based on thermodynamic principles for determining 6kW proton exchange membrane electrolyzer stack characteristics”, *Journal of Power Sources* 185(2), 1348–1353, 2008.

Darkrim, F.L., Malbrunot, P. and Tartaglia, G.P., “Review of hydrogen storage by adsorption in carbon nanotubes”, *International Journal of Hydrogen Energy* 27(2), 193–202, 2002.

Del Real, A.J., Arce, A. and Bordons, C., “Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model”, *Journal of Power Sources* 173(1), 310–324, 2007.

Divya, K.C. and Østergaard, J., “Battery energy storage technology for power systems- An overview”, *Electric Power Systems Research* 79(4), 511–520, 2009.

Dustmann, C.H., “Advances in ZEBRA batteries”. *Journal of Power Sources* 127(1–2), 85–92, 2004.

Garcia-Valverde, R., Miguel, C., Martinezbejar, R. and Urbina, A. “Optimized photovoltaic generator–water electrolyser coupling through a controlled DC–DC converter”. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(20), 5352–5362, 2008.

Gorgun, H., “Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer”. *International Journal of Hydrogen Energy* 31(1), 29–38, 2006.

Grigoriev, S.A., Kalinnikov, A.A., Millet, P., Porembsky, V.I. and Fateev, V.N., “Mathematical modeling of high-pressure PEM water electrolysis”, *Journal of Applied Electrochemistry* 40(5), 921–932, 2010.

Hamada, Y., Takeda, K., Goto, R. and Kubota, H., “Hybrid utilization of renewable energy and fuel cells for residential energy systems”, *Energy and Buildings* 43(12), 3680–3684, 2011.

Han, B., Steen, S.M., Mo, J. and Zhang, F.Y., “Electrochemical performance modeling of a proton exchange membrane electrolyzer cell for hydrogen energy”, *International Journal of Hydrogen Energy* 40(22), 7006–7016, 2015.

Haraldsson, K. and Wipke, K., “Evaluating PEM fuel cell system models”, *Journal of Power Sources* 126(1–2), 88–97, 2004.

International Energy Agency, Key world energy statistics, *IEA Head of Communication and Information Office*, Paris, France, 2016.

Jalilzadeh, S., Rohani, A., Kord, H. and Nemati, M., “Optimum design of a hybrid Photovoltaic/Fuel Cell energy system for stand-alone applications”, *ECTI-CON 6th International Conference*, Chonburi, Thailand, s. 152–155, 6-9 May, 2009.

Jiang, Z., and Rahimi-Eichi, H., “Design, modeling and simulation of a green building energy system”, *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, Alberta Canada, s. 1–7, 26-30 Jul, 2009.

Karaveli, A.B., Soytaş, U. and Akinoglu, B.G., “Comparison of large scale solar PV (photovoltaic) and nuclear power plant investments in an emerging market”, *Energy* 84, 656–665, 2015.

Konopka, A.J. and Gregory, D.P., “Hydrogen production by electrolysis - Present and future”, *10. Annual Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference*, Newark, Del., USA, s. 1184–1193, 18-22 Aug, 1975.

LaConti, A.B. and Swette, L., “Special applications using PEM-technology”, *Handbook of Fuel Cells. John Wiley & Sons, Ltd*, 2010.

Lee, B., Park, K. and Kim, H.-M., “Dynamic simulation of PEM water electrolysis and comparison with experiments”, *International Journal of Electrochemical Science* 8, 235–248, 2013.

Li, X., Qu, S., Yu, H., Hou, M., Shao, Z. and Yi, B., “Membrane water-flow rate in electrolyzer cells with a solid polymer electrolyte (SPE)”, *Journal of Power Sources* 190(2), 534–537, 2009.

Little, M., Thomson, M. and Infield, D., “Electrical integration of renewable energy into stand-alone power supplies incorporating hydrogen storage”, *International Journal of Hydrogen Energy* 32(10–11), 1582–1588, 2007.

Lorenzo, E., “Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems”, *Progensa* 1994.

Maclay, J.D., Brouwer, J. and Samuelsen, G.S., “Experimental results for hybrid energy storage systems coupled to photovoltaic generation in residential applications”, *International Journal of Hydrogen Energy* 36(19), 12130–12140, 2011.

Marangio, F., Santarelli, M. and Cali, M., “Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production”, *International Journal of Hydrogen Energy* 34(3), 1143–1158, 2009.

Medina, P. and Santarelli, M., “Analysis of water transport in a high pressure PEM electrolyzer”, *International Journal of Hydrogen Energy* 35(11), 5173–5186, 2010.

Nair, N.K.C. and Garimella, N. “Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration”, *Energy and Buildings* 42(11), 2124–2130, 2010.

Nie, J., Chen, Y. and Boehm, R.F., “Numerical modeling of two-phase flow in a bipolar plate of a PEM electrolyzer cell”, *International Mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME*, Boston, Massachusetts, USA, s . 783–788, 2008.

Nie, J., Chen, Y., Cohen, S., Carter, B. and Boehm, R.F., “Non-uniform velocity distributions in bipolar plate PEM electrolysis cell”, *5th Joint Fluids Engineering Conference American Society of Mechanical Engineers*, San Diego, California, USA, s. 1339–1345, 17–20 Jul, 2007.

Ogden, J.M., “Prospects for building a hydrogen energy infrastructure”, *Annual Review of Energy and the Environment* 24(1), 227–279, 1999.

Olesen, A.C., Rømer, C. and Kær, S.K., “A numerical study of the gas-liquid, two-phase flow maldistribution in the anode of a high pressure PEM water electrolysis cell”, *International Journal of Hydrogen Energy* 41(1), 52–68, 2016.

Pathapati, P.R., Xue, X. and Tang, J., “A new dynamic model for predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system”, *Renewable Energy* 30(1), 1–22, 2005.

Paul, B., “Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolyzers in solar–hydrogen systems for remote area power supply”, *International Journal of Hydrogen Energy* 33(2), 490–498, 2008.

Press, R.J., “Introduction to hydrogen technology”, *Wiley*, Hoboken, NJ, 2009.

Rohland, B., Eberle, K., Ströbel, R., Scholta, J. and Garche, J., “Electrochemical hydrogen compressor”. *Electrochimica Acta* 43(24), 3841–3846, 1998.

Salem, R.R., “Theory of the electrolysis of water”, *Protection of Metals* 44(2), 120–125, 2008.

Santarelli, M., “Design and analysis of stand-alone hydrogen energy systems with different renewable sources”, *International Journal of Hydrogen Energy* 29(15), 1571–1586, 2004.

Santarelli, M.G., Torchio, M.F. and Cochis, P., “Parameters estimation of a PEM fuel cell polarization curve and analysis of their behavior with temperature”. *Journal of Power Sources* 159(2), 824–835, 2006.

Schalenbach, M., Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J. and Stolten, D., “Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover”, *International Journal of Hydrogen Energy* 38(35), 14921–14933, 2013.

Scrosati, B. and Garche, J. “Lithium batteries: Status, prospects and future”, *Journal of Power Sources* 195(9), 2419–2430, 2010.

Selamet, O.F. and Ergoktas, M.S., “Effects of bolt torque and contact resistance on the performance of the polymer electrolyte membrane electrolyzers”, *Journal of Power Sources* 281, 103–113, 2015.

Shahnia, F., Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G. and Zare, F., “Operation and control of a hybrid microgrid containing unbalanced and nonlinear loads”, *Electric Power Systems Research* 80(8), 954–965, 2010.

Shen, M., Bennett, N., Ding, Y. and Scott, K., “A concise model for evaluating water electrolysis”, *International Journal of Hydrogen Energy* 36(22), 14335–14341, 2011.

Spiegel, C., “PEM fuel cell modeling and simulation using Matlab”, *Academic Press/Elsevier*, Amsterdam, Boston, 2008.

Springer, T.E., Zawodzinski, T.A. and Gottesfeld, S., “Polymer electrolyte fuel cell model”, *Journal of the Electrochemical Society* 138(8), 2334–2342, 1991.

Stewart, E.M., Lutz, A.E., Schoenung, S., Chiesa, M., Keller, J.O., Fletcher, J. and Cruden, A., “Modeling, analysis and control system development for the Italian hydrogen house”, *International Journal of Hydrogen Energy* 34(4), 1638–1646, 2009.

Ströbel, R., Oszcipok, M., Fasil, M., Rohland, B., Jörissen, L. and Garche, J., “The compression of hydrogen in an electrochemical cell based on a PE fuel cell design”, *Journal of Power Sources* 105(2), 208–215, 2002.

Toyota, “Toyota Mirai FCV”, <http://www.toyota.com/mirai/>, 20 Mart 2017.

Wang, C., Nehrir, M.H. and Shaw, S.R., “Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits”, *Energy Conversion, IEEE Transactions* 20(2), 442–451, 2005.

Wikipedia, “Energy density”, http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Energy_density, 17 Haziran 2017.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, “Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA)”, <http://www.eie.gov.tr/> , 10 Haziran 2017.

Yigit, T. and Selamet, O.F., “Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system”, *International Journal of Hydrogen Energy* 41(32), 13901–13914, 2016.

Zervas, P.L., Sarimveis, H., Palyvos, J.A. and Markatos, N.C.G., “Model-based optimal control of a hybrid power generation system consisting of photovoltaic arrays and fuel cells”, *Journal of Power Sources* 181(2), 327–338, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Tevfik YİĞİT 24.09.1992 tarihinde Hekimhan'da doğdu. İlköğreniminin ilk 4 yılını Hekimhan'da, devamını ise Malatya'da tamamladı. 2006 yılında Malatya Turgut Özal Anadolu Lisesini kazanarak lise eğitimini bu okulda tamamladı. 2010 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2014'de mezun oldu. Eylül 2014'de Fırat Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. Şubat 2015'de Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü yüksek lisans programına geçiş yaptı. Halen Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmakta olup mekatronik mühendisliği alanında çalışmalarına devam etmektedir.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale ile 1 (bir) adet ulusal bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Yigit, T. and Selamet, O. F., “Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system”. *International Journal of Hydrogen Energy* 41(32), 13901–13914, 2016.

Yiğit, T., ve Selamet, O. F., “Polimer elektrot membranlı elektrolizörün matematiksel modeli ve Simulink modelinin geliştirilmesi”. *Ulusal Hidrojen Teknolojileri Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye, s.75-84, 20-23 Aralık, 2015.

