

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE ISI VE SU
YÖNETİMİNİN MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif EKER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Doç. Dr. İmdat TAYMAZ

Haziran 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE ISI VE SU
YÖNETİMİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif EKER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 28/06/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Doç.Dr. İmdat Taymaz
Jüri Başkanı



Prof.Dr. Fethi Halıcı
Üye



Prof.Dr. M. Ali YALÇIN
Üye

TEŞEKKÜR

Temiz enerji elde etme yöntemlerinden biri olan yakıt pilleri üzerinde çalışmama vesile olan danışman hocam Doç. Dr. İmdat TAYMAZ' a, bu çalışmanın ortaya çıkmasında gösterdiği ilgiden dolayı Doç. Dr. Fehmi Akgün'e, çalışmalarına katkıda bulunan İsmail Bican'a, deneysel düzeneğin kurulup deneylerin yapılmasında desteğini esirgemeyen Osman Okur'a, Selahattin Uysal'a ve tüm TÜBİTAK Enerji Enstitüsü Yakıt Pili Laboratuvarı çalışanlarına, manevi destekleriyle yaşadığım tüm problemlerde yanımda olan sevgili aileme teŐekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. 1-Boyutlu Modeller.....	3
2.2. 2-Boyutlu Modeller.....	4
2.2. 3-Boyutlu Modeller.....	5
BÖLÜM 3.	
YAKIT PİLLERİ.....	7
3.1. Yakıt Pili Tarihi.....	7
3.2. Yakıt Pili Çeşitleri.....	9
3.2.1. Polimer elektrolit membran yakıt pili (PEMFC).....	10
3.2.2. Alkalın yakıt pili (AFC).....	12
3.2.3. Fosforik asit yakıt pili (PAFC).....	13
3.2.4. Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC).....	14
3.2.5. Katı oksit yakıt pili (SOFC).....	15

BÖLÜM 4.

PROTON DEĞİŞİM MEMBRANLI YAKIT PİLLERİ.....	16
4.1. PEM Yakıt Pili Özellikleri.....	16
4.2. PEM Yakıt Pili Bileşenleri.....	17
4.2.1. Gaz difüzyon tabakası.....	17
4.2.2. Katalizör.....	18
4.2.3. Membran.....	19
4.2.4. Akım toplayıcı plakalar.....	19
4.3. PEM Yakıt Pillerinde Isı Yönetimi.....	20
4.4. PEM Yakıt Pillerinde Su Yönetimi.....	21

BÖLÜM 5.

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	23
5.1. Model Tanımı.....	23
5.2. Matematiksel Model.....	25
5.2.1. Elektro-kimyasal model.....	25
5.2.2. Akım ve kütle korunumu.....	26
5.2.3. Isı kaynakları.....	26
5.2.4. Bazı katsayılar ve özellikler.....	27
5.2.4.1. Gaz fazında maddelerin difüzyon özelliği.....	27
5.2.4.2. Membran iyonik iletkenliği.....	27
5.2.4.3. Osmotik sürüklenme katsayısı.....	27
5.2.4.4. Geri difüzyon akısı.....	27
5.2.4.5. Membran su difüzyon özelliği.....	28
5.2.4.6. Su içeriği.....	28
5.2.4.7. Su buhar basıncı.....	28
5.3. Kabuller.....	28
5.4. Analiz Sonuçları.....	32

BÖLÜM 6.	
DENEYSEL ÇALIŞMA.....	36
6.1. Deneysel Düzenek.....	36
6.2. Deneysel Sonuçları.....	39
6.2.1.Sıcaklığın etkisi.....	40
6.2.2.Giriş gazları debilerinin etkisi.....	43
6.2.3.Nemlendirme sıcaklığı-pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi.....	48
6.2.4. Oksijen debisi-pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi.....	49
6.2.5. Hidrojen debisi-pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi.....	50
BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

PEMFC	: Proton değişim membranlı yakıt pili
PAFC	: Fosforik asit yakıt pili
MCFC	: Erimiş karbonat yakıt pili
SOFC	: Katı oksit yakıt pili
AFC	: Alkalın yakıt pili
MEA	: Membran Electrode Assembly
GDL	: Gaz difüzyon tabakası
i	: Akım
ΔH	: Net entalpi değişimi
h_L	: Suyun entalpi değişimi
D_i^0	: Kütlevi difüzyon katsayısı
S	: Kaynak terimi
σ	: Elektriksel iletkenlik
\emptyset	: Elektrik potansiyeli
γ	: Reaksiyon sırası
R	: Temas direci
λ	: Su içeriği
a	: Su aktivitesi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Sir William R. Grove'un ürettiği yakıt pili.....	8
Şekil 3.2.	PEM Yakıt Pili.....	11
Şekil 3.3.	Alkalin Yakıt Pili.....	12
Şekil 3.4.	Fosforik Asit Yakıt Pili.....	13
Şekil 3.5.	Erimiş Karbonat Yakıt Pili.....	14
Şekil 3.6.	Katı Oksit Yakıt Pili	15
Şekil 4.1.	Yakıt Pili Bileşenleri.....	17
Şekil 4.2.	Karbon elyaf gaz difüzyon tabakasının SEM (Scanning Electron Microscopy)resminin üst görünüşü.....	18
Şekil 4.3.	Karbon destekli Platin katalizörün TEM (Transmission Electron Microscopy)resmi.....	18
Şekil 4.4.	Nafion zarın SEM resmi.....	19
Şekil 4.5.	Akım toplayıcı plakalarda akış kanalları çeşitleri.....	20
Şekil 5.1.	GAMBİT ile oluşturulan PEM yakıt hücresi akım toplayıcı plakanın ağ yapısı.....	24
Şekil 5.2.	GAMBİT ile oluşturulan PEM yakıt hücresinin görünümü.....	29
Şekil 5.3.	Fluent in PEMFC modülünün arayüzü	30
Şekil 5.4.	Modelleme programının (Fluent) akış şeması	31
Şekil 5.5.	Hidrojen konsantrasyonunun akış kanalı boyunca değişimi.....	32
Şekil 5.6.	Akım yoğunluğu değişimi.....	33
Şekil 5.7.	Elektrik potansiyeli dağılımı.....	34
Şekil 5.8.	Katot tarafında su oluşumu	35
Şekil 6.1.	PEM yakıt pili deney düzeneği	36
Şekil 6.2.	Deney düzeneğinde kullanılan hidrojen ve oksijen debi ölçerler..	37
Şekil 6.3.	Sıcaklık ayar paneli	38
Şekil 6.4.	Hidrojen ve oksijen gazlarının nemlendirme düzeneği.....	38

Şekil 6.5.	Deneyde kullanılan PEM yakıt hücresi akım toplayıcı plaka görünümü.....	39
Şekil 6.6.	40°C Nemlendirme sıcaklığında, pil sıcaklığının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi.....	41
Şekil 6.7.	70°C Nemlendirme sıcaklığında, Pil sıcaklığının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi.....	42
Şekil 6.8.	60°C sabit pil sıcaklığında farklı nemlendirme sıcaklıklarının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi.....	43
Şekil 6.9.	40°C pil sıcaklığında anot giriş gaz (H ₂) debisinin etkisi.....	44
Şekil 6.10.	60°C pil sıcaklığında anot giriş gaz (H ₂) debisinin etkisi.....	44
Şekil 6.11.	40°C pil sıcaklığında anot giriş gaz (O ₂) debisinin etkisi.....	45
Şekil 6.12.	60°C pil sıcaklığında anot giriş gaz (O ₂) debisinin etkisi.....	46
Şekil 6.13.	Pil ve nemlendirme sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi....	48
Şekil 6.14.	Oksijen debisi ve pil sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi...	49
Şekil 6.15.	Hidrojen debisi ve pil sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi..	50

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	Yakıt Pilleri ve Özellikleri.....	10
Tablo 5.1.	Modelde kullanılan tasarım parametreleri	24
Tablo 5.2.	Modelde kullanılan fiziksel ve elektrokimyasal parametreler.....	25
Tablo 6.1.	Deney düzeni.....	47

ÖZET

Anahtar kelimeler: PEM yakıt pili, su ve ısı yönetimi

Bu tez, tek hücreden oluşan proton aktaran membran (PEMFC) yakıt hücresinin Fluent PEMFC modülü kullanılarak simülasyonunu ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasını içermektedir. PEM yakıt pili anot ve katot tarafı için dört tabaka; akım toplayıcı tabaka, gaz kanalı, gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabaka ve anot ile katot arasında bulunan membran dahil dokuz tabakadan oluşmaktadır. PEM yakıt pillerinde ısı ve su yönetimi, yakıt debisi, oksijen debisi, pil sıcaklığı ve nemlendirme sıcaklıkları kontrol altında tutularak sağlanabilmektedir. Yapılan deneysel çalışma ile pil sıcaklığının, nemlendirme sıcaklığının, hidrojen debisinin ve oksijen debisinin güç yoğunluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda sıcaklığın PEM yakıt pilinin performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Artan sıcaklıkla birlikte sistemin performansının artmıştır. Ancak belirli bir sıcaklığın üzerindeki değerde ise performans düşmüştür.

MODELLING HEAT AND WATER MANAGEMENT IN PEM FUEL CELL

SUMMARY

Key Words: PEM fuel cell, water and heat management

This thesis covers the simulation and the comparison of the experimental results in of single-cell proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with using Fluent PEMFC module. The PEMFC is made up of nine layers which consist four layers for the anode and cathode sides; current collector, gas channel gas diffusion layer and catalyst layer, and the membrane between the anode and cathode. Water and heat management can be provided by keeping hydrogen flow rate, oxygen flow rate, cell temperature, and humidification temperature under control. The effects of hydrogen flow rate, oxygen flow rate, cell temperature and humidification temperature on power density is examined by the experimental study.

It is found that temperature has an important effect on the performance of PEM fuel cell by the results of experimental study. The increasing temperature increases the performance of the system increases. Even though after exceeding a definite temperature cell performance decreases.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyada kullanılan enerji kaynaklarının başında %60 ile fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz vb.) gelmektedir. Fosil yakıtlar sınırlı rezervlere sahip, emisyonlarının çevreye zararlı etkilerinin olması (sera etkisi, asit yağmurları gibi), belli coğrafi bölgelerde yer alması başlıca dezavantajlarıdır. Son yıllarda dünya üzerindeki bu fosil yakıtların hızla tükenmesi ve gelecekte oluşacak enerji ihtiyacının nasıl karşılanacağı önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları (Güneş, Rüzgâr, Jeotermal, Hidroelektrik, Biyoenerji, Hidrojen vb.) ve nükleer enerji ele alınmaktadır. Nükleer santraller radyoaktif atıklar oluşturmakta, hidroelektrik santraller geniş göl alanlarına ve baraj inşaatı gerektirmekte, jeotermal kaynaklar belli coğrafi alanlarda yer almakta, rüzgâr ve güneş enerjisi ise geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemi gün geçtikçe artan ve üzerinde en çok çalışma yapılan kaynak hidrojen enerjisidir. Dünyanın artan enerji ihtiyacını çevreyi kirletmeden ve sürekli olarak sağlayabilecek en ileri teknolojinin hidrojen enerji sistemi olduğu günümüzde çoğu bilim adamı tarafından kabul edilmiştir. Hidrojen enerjisini en ekonomik ve en verimli kullanan teknolojilerden biri ise yakıt pili teknolojisidir. Bu amaçla yakıt pilleri yapımı son yıllarda uzay çalışmalarının yarattığı ihtiyaçların da etkisiyle önem kazanmaktadır.

Yakıt pilleri, kesintisiz olarak dışarıdan sağlanan yakıtta ait enerji ile reaksiyonların gerçekleşmesi için yine dışarıdan devamlı olarak beslenen oksitleyiciye ait enerjinin elektrokimyasal reaksiyonlar neticesinde elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir.

[1] Bu dönüşüm sonucu yanma ürünü olarak sadece su ve ısı açığa çıkmaktadır.

Bu özelliği nedeniyle çevreci bir teknoloji olan yakıt pilleri ayrıca bünyelerinde hareketli parçalar olmadığı için sessiz ve güvenilirlerdir. Tek bir yakıt pilinin gerilimi 1 volttan daha az olması nedeniyle, gerekli elektrik enerjisini üretmek için seri veya paralel bağlanmak üzere birden fazla yakıt hücresi kullanılmalıdır. Literatürde bu yakıt pili grubu, yığın olarak adlandırılır.

Çalışma verimleri de yüksek olan yakıt pilleri; cep telefonundan otomobile, sabit uygulamalardan uzay araçlarına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Tüm bu özellikleri yan yana konulduğu zaman yakıt pilleri geleceğın teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Yakıt pilleri içerisinde de özellikle Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP) düşük çalışma sıcaklıkları ve yüksek verimleri ile ön plana çıkmaktadır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Özellikle son 10 yıldır PEM tipi yakıt pilleri üzerine çalışmalar hızla artmıştır. Dolayısıyla, yakıt pilinin performansını etkileyen işletme parametrelerinden (basınç, sıcaklık, bağıl nem, debi vb.),tasarım parametrelerine (akış kanalı tipi, geometrisi, membran, katalizör, gaz difüzyon tabakası kalınlıkları, malzemeleri, yakıt pili yığını tipi, sayısı vb.) kadar birçok parametrenin gerçekte ne gibi sonuçlara neden olacağıın bilgisayar ortamında simülasyonu yapılabilmekte ve bu sonuçlar deney verileriyle kıyaslanabilmektedir.

Literatürde yakıt pilleri, özellikle PEMFC ile ilgili olarak performansı etkileyen parametrelerin incelendiği; bir boyuttan üç boyuta, tek fazdan çift faza kadar, farklı işletme koşullarında çok sayıda çalışma vardır.

2.1. 1-Boyutlu Modeller

Springer [2], izotermal, bir boyutlu ve duyarlı hal modeli oluşturmuştur. Anot katalizör tabakası ihmal edilirken katot katalizör tabakası ince aktif bir tabaka olarak kabul etmiştir. Katotta ve membrandaki kayıpları inceleyen analitik bir yaklaşımda bulunmuştur. Bu modelde PEMFC'nin çalışması sırasında membrandaki elektro-osmatik akı ve katotta reaksiyon sonucu su üretimi nedeniyle membrandaki su konsantrasyonunun arttığını belirtmiştir. Bu konsantrasyon bileşeni sayesinde elektro-osmotik akıya ters bir difuzif akı oluşur. Elektrotlarda gaz difüzyon tabakasındaki gaz taşınımı, elektro-osmotik akı ve geri difüzyonla membrandan su geçişi ile elektro-osmotik katsayısının membrandaki su miktarına etkisi hesaplamıştır. Oluşturduğu membran modeli anotla katot arasındaki farklı su konsantrasyonlarında çalışma olanağı sağlar.

Böylece membranda oluşan ohmik direncin belirlenmesine yardımcı olur. Membran-elektrot sınırlarında membrandaki su konsantrasyonu reaktan gazların nemliliğiyle ilişkilendirilmiştir. Elektrot-membran ara yüzeyinde suyun mol kesri hesaplanarak membranda su karakterinin belirlenmesinde gerekli olan sınır koşulları bulunmuştur.

Rowe ve Li [3] çalışmalarında, değişik tasarım ve çalışma koşullarının yakıt pili performansı üzerindeki etkisini araştırmak, su yönetimini ve mekanizmanın temelini anlamak için bir boyutlu izotermal olmayan bir PEM yakıt pili modeli geliştirmişlerdir. Model; değişken membran nemlilik oranını, her iki reaktif buhar için üçlü gaz karışımını, elektrotlardaki doymamış gaz buharıyla su faz değişimini ve pil boyunca sıcaklık değişimi için enerji eşitliklerini içermektedir. Düşük pil çalışma sıcaklıklarında ve kısmen nemlendirilmiş reaktifler için azalmış membran nemlendirilmesinden ortaya çıkan membran direncinin yükselmesinin bir sonucu olarak maksimum sıcaklıklar meydana gelmiştir. Üniform olmayan sıcaklık yükselişi yakıt hücresi yığını için önemli olabilir. Azalmış membran nemliliği nedeniyle ise pil performansında büyük miktarda bir azalma görülmüştür. Model tahminleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bao ve ark. [4], çalışmalarında bir boyutlu kararlı hal izotermal bir model geliştirmişlerdir. İşletme parametrelerinden hava stokyometrik oranı ve katot çıkış basıncını, aynı zamanda anot nemlendirmesinin hücre performansına etkisini incelemişlerdir.

2.2. 2-Boyutlu Modeller

Fuller ve Newman [5], iki boyutlu termal bir PEMFC modeli geliştirmişlerdir. Analizler hem izotermal hem de non-izotermal koşullar altında yapılmıştır. Membranla gaz faz arasındaki su dengesi ile ısı ve su yönetimi ilişkilendirilmiştir. Hücreden ısının uzaklaşmasının PEMFC' nin çalışmasında kritik bir parametre olduğu ortaya konmuştur.

Yi Zong ve ark. [6], üniform olmayan sıcaklıkta çalışan bir PEM tipi yakıt hücresindeki kütle ve enerji transferlerini incelemek için iki boyutlu izotermal ve

izobarik olmayan bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde anot ve katot tarafındaki kanallar boyunca sıcaklık değişiminin akım yoğunluğuna, membrandaki su taşınım olaylarına ve anot girişi nemlendirmesinin performans etkilerini incelemişlerdir.

Singh ve ark. [7], PEMFC' lerdeki iletimin anlaşılabilmesi için ısı ve su yönetiminin ele alındığı bir model kurmuşlardır. Diferansiyel eşitliklerin çözümü sonlu hacim yöntemiyle hesaplanmıştır. Model deneysel verilerle ölçüşmekte olup bir ve iki boyutlu izotermal haller için numerik simülasyonlar yapılmıştır. Modelin iki boyutlu olmasının su yönetiminin açıklanmasında ve pil veriminin belirlenmesinde faydalı olduğunu belirtilmiştir.

Nguyen ve White [8] , PEM yakıt pilinde MEA ve akış kanallarındaki su ve ısı yönetimini incelemek amacıyla deneysel verilerin de kullanıldığı duyarlı halde, nonizotermal, iki fazlı bir model geliştirmişlerdir. Su konsantrasyonu, sıcaklık, kısmi basınç ve akış kanalları boyunca akım yoğunluğu, oksijen reaksiyonlarındaki potansiyel kayıpları ve hücre verimi incelenmiştir. Gaz kanalları boyunca katı fazdan gaz faza ısı geçişi incelenmiştir. Sonuç olarak, özellikle suyun difüzyonun membranın nemlendirilmesinde yetersiz kaldığı yüksek akım yoğunluklarında ohmik kayıpların azaltılması için giriş gazlarının nemlendirilmesinin önemli olduğunu bulmuşlardır.

2.3. 3-Boyutlu Modeller

M. Coppo ve ark. [9], çalışmalarında, PEM yakıt hücresindeki işletme sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Bu model gaz akış kanalındaki gaz akımı ve su oluşumunun etkisinden dolayı GDL yüzeyinden yer değiştiren sıvı su dağılımı ve yönetiminin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Çalışmanın önemli bir sonucu ise hem GDL içerisindeki sıvı su transferi hem de GDL yüzeyinden sıvı suyun yer değiştirmesi hücre performansında etkin rol oynamasıdır.

Sivertsen ve Djilali [10], çalışmalarında, PEM yakıt hücreleri için, karşılaştırmalı sabit sıcaklıkta olmayan 3-B sayısal bir model geliştirmiş ve bu modeli Fluent paket programı kullanarak çözmüşlerdir. Katot ve anotta, elektrokimyasal reaksiyonla

birlikte ısı üretimi gerçekleşmiştir. Model, elektrotlarda ve membranda, elektrik ve iyonik potansiyeller için çözüm yapmaktadır. Analiz sonucunda, toplam akım yoğunluğu ve polarizasyon eğrisinde değişim oluşturmada sadece asimetri parametresinin değiştirilerek farklı dağılımların elde edilebileceği görülmüştür.

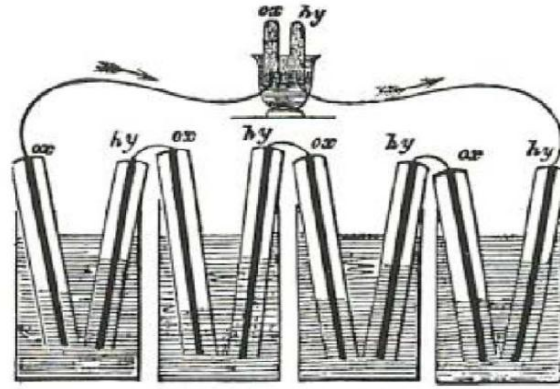
Wang ve ark. [11], ise değişik işletme parametrelerinin PEM yakıt hücresi performansı üzerine etkisini, katot tarafında hava ve anot tarafında saf hidrojen kullanarak, deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler, farklı yakıt hücresi işletme sıcaklıkları, farklı katot ve anot nemlendirme sıcaklıkları, farklı işletme basınçlarının PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisini V-I eğrileri ile göstermişlerdir.

BÖLÜM 3. YAKIT PİLLERİ

Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elemanlardır. Yakıt pili, fosil yakıtların yakılması yerine, yakıt ile oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda enerji üreten bir tür bataryadır. Yakıt olarak genellikle hidrojen kullanılmaktadır. Ancak metan, doğal gaz, etanol, metanol gibi diğer yakıt türleri de kullanılmaktadır.

3.1. Yakıt Pili Tarihi

Yakıt pilleri ilk defa 1838 yılında William Robert Grove tarafından yakıt hücrelerinin temel çalışma prensibi olan su elektrolizinin tersine çevrilmesiyle, hidrojen ve oksijenden elektrik enerjisi üretmeyi başarmıştır. Grove hücresi olarak adlandırılan hücre, çinko sülfat içerisine çinko elektrot ve nitrik asit içerisine platin elektrot daldırılarak oluşturulmuştur. Grove, birisi sülfürik asit kabına diğeri ise oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrotu düzenleyerek elektrotlar arasında sabit bir akım akacağını keşfetmiş ve yaptığı bu ilk deneyde 1,8 volt civarında 12 amperlik akım üretmiştir. Grove, akım aktığı sürece, su seviyesinin her iki tüpte de arttığını belirlemiştir. Grove, birkaç elektrotu seri devreyle bağlayarak bileşimini ayarlamak suretiyle suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini keşfetmiştir. Bunu gaz bataryası adını verdiği ve ilk yakıt pili olarak tanımlayabileceğimiz şekil 3.1'de gösterilen aygıtlı başarmıştır [12].



Şekil 3.1. Sir William R. Grove'un ürettiği yakıt pili [12]

Yakıt pili (fuel cell) terimi ilk olarak 1889 yılında Ludwig Mond ve asistanı Charles Lander tarafından kullanıldı. Onların ilk denemeleri hava ve kömür gazı ile olmuştur. 1900'lü yıllarda araştırmalar sanayinin gelişmesiyle hızlandı, fakat yetersiz teknoloji ve malzeme yetersizliğinden dolayı sonucu hüsrandı.

İlk başarılı pilin icadı ise, 1932 yılında mühendis Francis Bacon tarafından yapıldı. Bacon gözenekli metal elektrotlu alkali yakıt pili sistemleri üzerinde çalışmaktaydı ve araştırmalarını savaştan sonra yayınlamıştır. 1900'lü yılların ortalarında başlayan 2.Dünya Savası araştırmaların çoğunun durmasına neden olmuştur.

Bacon ve arkadaşları 1952'de 5 kW'lık güç üreten bir yakıt hücresi yapmışlardır. Aynı yılın sonlarında Harry Karl Ihring 20 beygir gücünde bir yakıt hücresiyle çalışan bir traktör tasarlamıştır. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt hücresiyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur.

Francis Bacon'ın geliştirdiği hücre sistemi 1968'te insanların Ay'a uçmasını sağlayan NASA yakıt hücresi sisteminin ilk prototipidir. Apollo uzay mekiği projesinde, güvenli olarak yakıt hücrelerinden elektrik ve su elde edilmesinden dolayı uzaydaki rolleri gelecek açısından umut verici olmuştur. Bu başarılar, 1960'larda yakıt pillerinin dünyanın enerji problemine çözüm olacağı umudu doğmuştur

1970 yılında K.Kordesch 4 kişilik hidrojen yakıt hücresi ve piliyle çalışan hibrit bir otomobil üretmiştir. Bu araçla 3 yıl şehir trafiğinde dolaşmıştır. 1970'lere kadar uzay araştırmalarında en üst gelişmişlik düzeyinde olan alkali yakıt pili sistemleri yerini şaşırtıcı bir biçimde, fosforik asitli yakıt pili sistemlerine bırakmıştır. Bu gelişmenin sonucu olarak da hidrokarbonların yeniden yapılandırılması ve geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Japonya'nın bu konulara ilgisi bu dönemde artmıştır ve araştırmalarını hızlandırılmıştır.

3.2. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt ve oksitleyici türü, yakıtın yakıt pilinin dışında veya içinde işlenişi, elektrolit tipi, işletme sıcaklığı, yakıtın besleme biçimi gibi parametrelerin değişimi farklı türleri ortaya çıkarmıştır. Yakıt pili uygulamada işletme sıcaklığı, elektrolit tipi ve yakıt tipine göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre; yakıt pillerini beşe ayırabiliriz.

- Polimer Elektrolit Yakıt Pili (PEMFC)
- Alkalin Yakıt Pili (AFC)
- Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)
- Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)
- Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)

Yakıt pillerinin işletme sıcaklığı ve ömürleri, pilin yapısında kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. İşletme sıcaklığı aynı zamanda yakıt pilinde kullanılacak yakıt açısından da önemli rol oynar. Ayrıca kullanılan yakıtı göre de reaksiyon hızını arttıracak katalizör seçilir. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde kimyasal reaksiyon çok yavaş olur. Reaksiyonu hızlandırmak ve pil verimini arttırmak için katalizör olarak, çok pahalı olan platin kullanılır. Bu da pil maliyetini arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri için bu durum söz konusu değildir. Pil işletme sıcaklığı reaksiyonu hızlandırmak için yeterlidir. Yüksek sıcaklıkta çalışan pillerde katalizör olarak daha ucuz malzemeler kullanılabilir. Tablo 3.1.'de çeşitli yakıt pilleri işletme sıcaklıklarına göre sıralanmıştır.

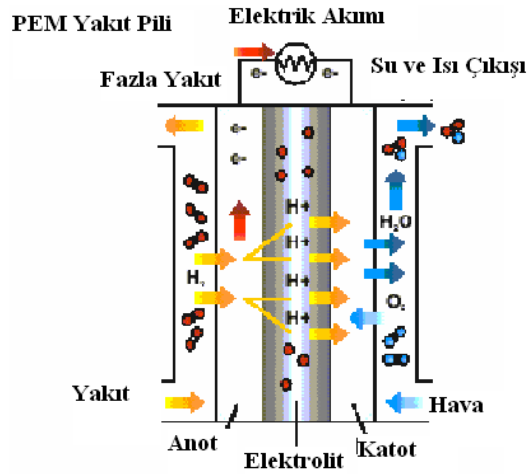
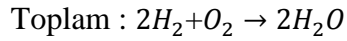
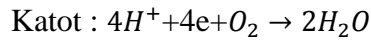
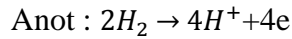
Tablo 3.1. Yakıt Pilleri ve Özellikleri[13]

Yakıt Pili	Proton Değişim zarlı Yakıt Pili	Alkalın Yakıt Pili	Fosforik Asit Yakıt Pili	Erimiş Karbonat Yakıt Pili	Katı Oksit Yakıt Pili
Özellikler					
Elektrolit	Polimer iyon değişim zarı	Potasyum hidroksit (KOH)	Fosforik Asit	Li / K Karbonat	Stabilize Zirkonyum
Elektrolitteki Taşıyıcı	H^+	OH^+	H^+	CO_3^{-2}	O_2^{-2}
İşletme Sıcaklığı	40-80 °C	65-220 °C	205 °C	650°C	1000 °C
Verimleri	% 45	% 40–80	% 37–42	% 45–60	% 60–70
Güç Yoğunluğu (W/kg)	350–1500 (W/kg)	35–105 (W/kg)	120–180 (W/kg)	30–40(W/kg)	15–20(W/kg)
Yakıt Türü	(H_2) Hidrokarbonlar	(H_2)	(H_2) Hidrokarbonlar Fosil yakıtlar	(H_2) Hidrokarbonlar	(H_2) Hidrokarbonlar
Katalizör	Platin	Platin	Platin	Nikel	Perovskites
Pil Bileşeni	Karbon Tabanlı	Karbon Tabanlı	Grafit Tabanlı	Nikel, Paslanmaz çelik	Seramik
Uygulama Alanları	Ulaşım araçları, Askeri Sistemleri	Uzay Çalışmaları	Ticari Uygulamalar (Oteller, Hastaneler)	Elektrik Santralleri	Ticari ve Sanayi alanda Elektrik Santralleri

3.2.1. Polimer Elektrolit Yakıt Pili (PEMFC)

PEM tipi yakıt pillerinde elektrolit, iyon değişim membranıdır. Membran malzemesi florlanmış sülfonik asit polimer veya diğer benzer bir polimerdir. Bu membran su ile ıslatıldığında çok iyi bir proton iletici haline gelir. Yüksek güç yoğunluğuna sahip olan bu tip yakıt pilleri 40-80 °C sıcaklık aralığında çalışırlar. Membran, anot ve katotta kimyasal reaksiyonlar için katalizörlerle bağlantılıdır. Katalizör hidrojen atomunun proton ve elektronlarına ayrışmasına yardımcı olur. Düşük sıcaklıkta çalışması sebebiyle Platin gibi pahalı katalizörler gereklidir. Katalizör CO

zehirlenmesine karşı duyarlıdır. Bu nedenle kullanılan yakıtın saf hidrojen olması gerekir. Hidrojen anot kısmına verilir. Katalizörün yardımıyla hidrojen iyonlarına ayrılır. Elektronlar dış çevrim vasıtasıyla katot tarafına geçerken elektrik enerjisi üretilmiş olur. Protonlar ise membran üzerinden katot tarafına geçerek buradaki oksijen atomları ile birleşir ve su oluşur. Protonun bu hareketi nedeniyle bu tip yakıt pillerinin bir diğer adı da “Proton Değişim Membran Yakıt Pilleri”dir. PEM yakıt pili elektrotları üzerinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



Şekil 3.2. PEM Yakıt Pili (Vanston ve Elliot, 2003)

PEM yakıt pilinin avantajları;

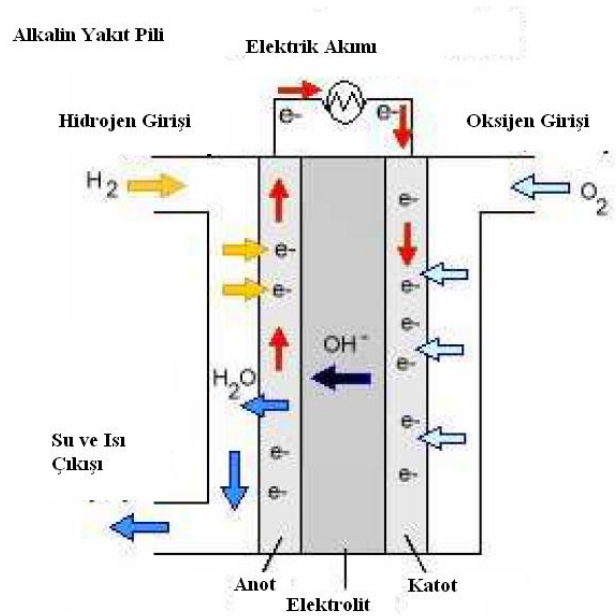
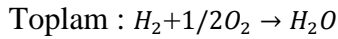
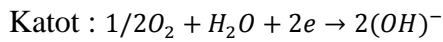
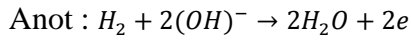
- Düşük işletme sıcaklığında çalışması
- Hızlı bir şekilde başlama özelliği bulunması
- Zar (Membran) korozyonunun daha az olması

PEM yakıt pilinin dezavantajları;

- Saf yakıt kullanma hassasiyeti,
- Katalizör olarak korozyona dayanıklı, maliyeti yüksek platin kullanılmasıdır.

3.2.2. Alkalın Yakıt Pili (AFC)

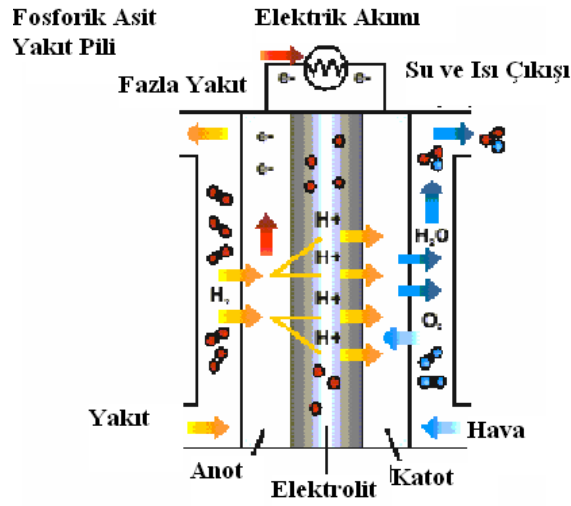
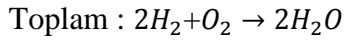
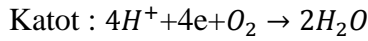
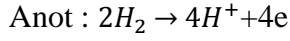
Alkali yakıt pilleri 65-220 °C sıcaklıkta çalışır. Elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılır. İyonik iletkenlik hidroksit (OH) iyonlarının elektrolit içinden geçirilmesiyle sağlanır. Uzay uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılır. Kirleticilere karşı duyarlı olduğu için sadece saf hidrojen ve saf oksijen kullanılır. Çünkü elektrolit CO_2 ile reaksiyona girerek potasyum karbonat oluşturur. Bu tip yakıt pillerinin en önemli dezavantajı kullanılan hidrojenin ve oksitleyicinin çok saf olması gerekliliğidir. Bu ise yakıt pili performansını olumsuz etkiler. Alkalın yakıt pili elektrotları üzerinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



Şekil 3.3. Alkalın Yakıt Pili (Vanston ve Elliot, 2003)

3.2.3. Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)

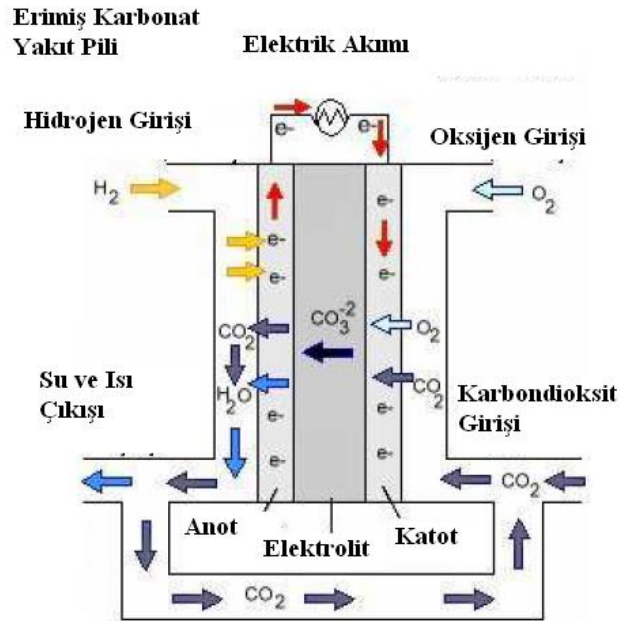
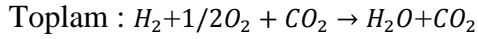
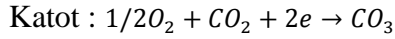
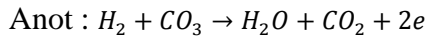
Fosforik asit yakıt pili platin katalizör parçacıkları tutmak için karbon siyahı içeren karbon kağıdından yapılmış anot ve katottan oluşur. PAFC işletme sıcaklığı yaklaşık 205 °C civarındadır. Anot ve katotta platin katalizör PAFC'nin çalışma sıcaklığında kimyasal reaksiyonu artırmak için istenir. PAFC elektrotlar su geçirmez karbon kağıdından oluşan geri dönüşlü tabakaya sahiptir. Reaksiyonlar PEM yakıt piliyle aynıdır. Su yönetimi PAFC için problem değildir. Çünkü fosforik asit PAFC işletme sıcaklığında yeterli iyonik iletkenliğe sahiptir. Fosforik Asit yakıt pili elektrotları üzerinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



Şekil 3.4. Fosforik Asit Yakıt Pili (Vanston ve Elliot, 2003)

3.2.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)

MCFC nikel alaşımlı anot, nikel oksit katottan oluşur. Elektrolit lityum, sodyum ve/veya potasyum alkali karbonatların bileşiminden oluşur. MCFC işletme sıcaklığı 650 °C civarındadır. Bu sıcaklıkta alkali karbonatlar iletken erimiş tuz şeklindedir. Anot ve katot içindeki nikel MCFC'nin yüksek çalışma sıcaklığı yüzünden kimyasal reaksiyonları yeterli düzeye artırır. Erimiş Karbonat yakıt pili elektrotları üzerinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



Şekil 3.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (Vanston ve Elliot, 2003)

Erimiş Karbonat Yakıt Pili'nin avantajları;

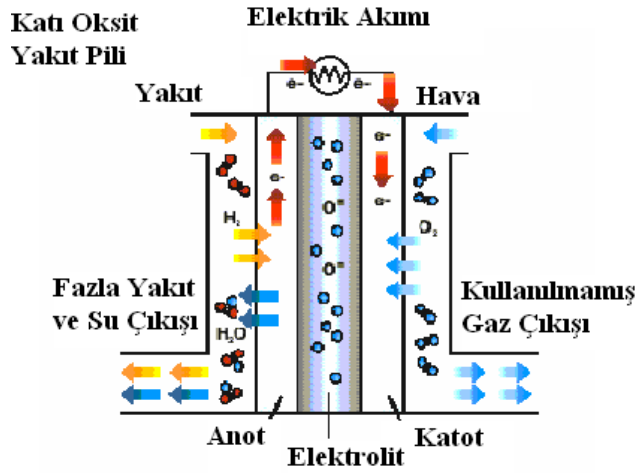
- Yakıtı içten dönüştürme kabiliyeti,
- Daha az maliyetli nikel katalizör,
- CO'in yakıt olarak kullanılması,
- Kojenerasyon potansiyeline sahip olmasıdır.

Erimiş Karbonat Yakıt Pili'nin dezavantajları;

- Erimiş karbonat elektrolitin yüksek aşındırma özelliği,
- Düşük kükürt toleransı,
- Elektrolit sızıntısı,
- Yüksek sıcaklıklarda çalışmaya dayanıklı madde isteğidir.

3.2.5. Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)

Katı Oksit yakıt pilinde elektrolit, katı, gözeneksiz zirkonya'dan oluşmaktadır. İşletim sıcaklığı 1000 °C civarındadır. Anodu metal nikeldir, katot lantan manganit karışımıdır.



Şekil 3.6. Katı Oksit Yakıt Pili (Vanston ve Elliot, 2003)

BÖLÜM 4. PROTON DEĞİŞİM MEMBRANLI YAKIT PİLLERİ

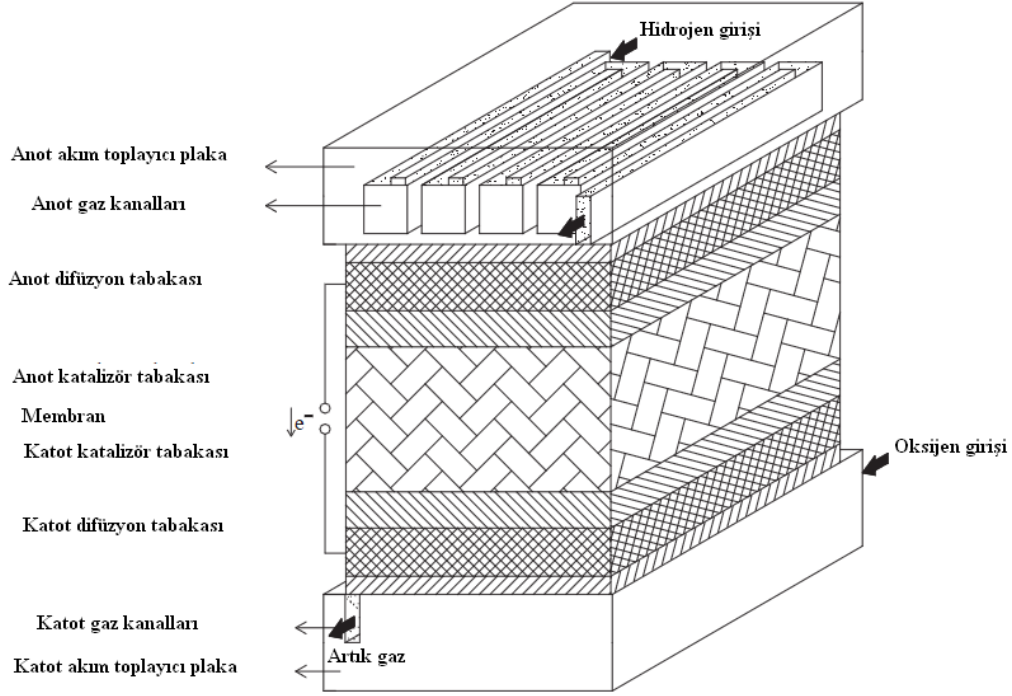
Bu piller proton değişim membranlı yakıt pilleri olarak bilindiği gibi katı polimer yakıt pilleri veya polimer elektrolit yakıt pili olarak bilinir. Pem tipi yakıt pilleri en genel anlamda anot, katot ve bunların arasında iyon iletimi sağlamak için gerekli zardan (membran) oluşur. Anot tarafından hidrojen gazı beslenirken, katot tarafından oksitleyici olarak katot gazı beslenir. Anot ve katot arasındaki gazların direk olarak birbiri ile direk temasını aradaki membran engeller. Anot ve katot tarafında oluşan reaksiyonlar sonucu potansiyel fark oluşur. Yakıt piline bağlanan üreteç yardımı ile elektron hareketi sağlanır ve elektrik üretilmiş olur. Oksijen katottan gelen elektronlar ile membrandan gelen hidrojen iyonları ile reaksiyona girerek su oluşturur.

4.1. PEM Yakıt Pili Özellikleri

PEM yakıt pillerinin çalışma prensibini temel olarak basit bir kimyasal prosele sahiptir. Hidrojen içeriği zengin olan yakıt anottaki gaz akış kanalından girerken, hava veya oksijen de sisteme katottaki gaz akış kanalından girmektedir. Anotta bulunan platin katalizör sayesinde, yakıtın içindeki hidrojen molekülleri proton (+) ve elektronlarına (-) ayrılmaktadır. Anot ve katot katalizör tabakaları arasında bulunan membran sadece hidrojenin katalizörde ayrılan pozitif yüklü iyonlarının katota geçmesine izin vermektedir. Hidrojenin negatif yüklü elektronları katota bir dış devre boyunca ilerleyerek geçmektedirler. Bu ilerleme sonucu da elektrik akımı oluşmaktadır. Katotta bulunan katalizörde sisteme katot tarafından giren oksijen ile anot tarafından gelen hidrojen protonları elektrokimyasal bir reaksiyona girmektedirler. Katottaki pozitif yüklü hidrojen iyonları ile oksijen moleküllerinin birleşmesi sonucu su oluşturmaktadırlar. Bu da yakıt hücrelerinin çevre dostu bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir.

PEM yakıt hücresinin geliştirilme amacı, hidrojen bakımından zengin olan yakıttan elektro-kimyasal reaksiyonlar sonucu yüksek verimde güç üretmektir.

4.2. PEM Yakıt Pili Bileşenleri

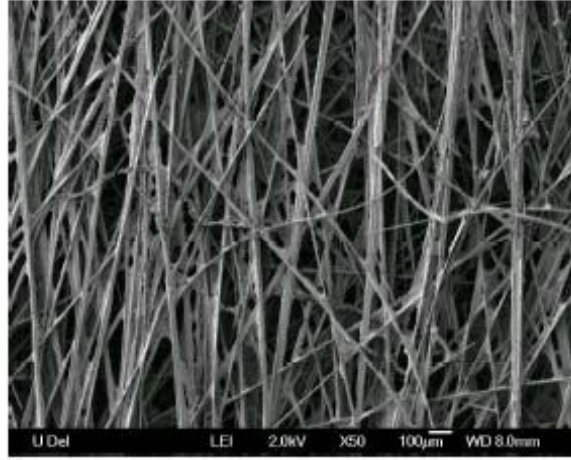


Şekil 4.1. Yakıt Pili Bileşenleri [14]

4.2.1. Gaz Difüzyon Tabakası

Yakıt pillerinde biri anot tarafında diğeri ise katot tarafında olmak üzere iki adet gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve akım toplayıcı plakalar arasında bulunmaktadır. Gaz difüzyon tabakaları elektrokimyasal reaksiyona direk olarak katılmazlar. Gözenekli yapısından dolayı, reaksiyon gazlarının MEA üzerindeki katalizörlere daha iyi yayınmasını sağlarlar. Aynı zamanda reaksiyon sonucu katotta oluşan suyun pil dışına çıkmasını sağlayarak pilde oluşabilecek su taşmalarını engellerler ve oluşan suyu katalizör tabakasından uzaklaştırırlar. Elektriksel olarak iletken malzemedan yapıldıkları için katalizör tabakasının, akım toplayıcı plakalara elektriksel olarak bağlanmalarını sağlarlar. Reaksiyon sonucunda oluşan ısıyı, katalizör tabakasından akım toplayıcı plakalara doğru uzaklaştırırlar. Genellikle

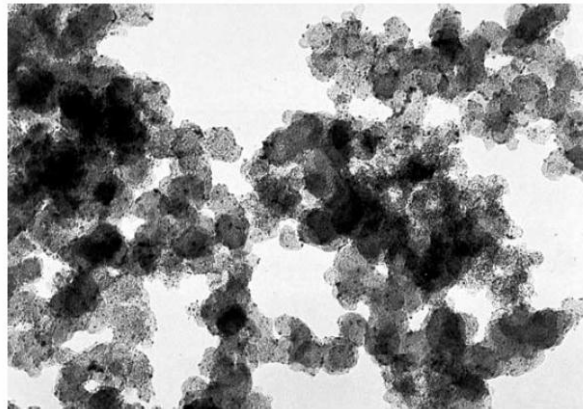
teflonla desteklenmiş karbon kağıdından veya teflonla desteklenmiş dokuma kumaştan üretilmektedirler.



Şekil 4.2. Karbon elyaf gaz difüzyon tabakasının SEM (Scanning Electron Microscopy) resminin üst görünüşü

4.2.2. Katalizör

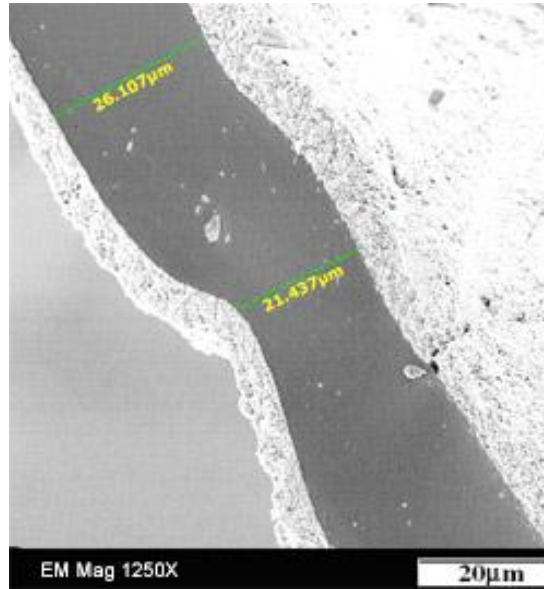
Katalizör tabakaları anot ve katot olmak üzere ikiye ayrılır. Anot katalizör tabakasında, hidrojen, elektron ve protonlarına ayrılmaktadır. Katot katalizör tabakasında ise, hidrojen ve oksijen molekülleri birleşerek bir elektro-kimyasal reaksiyon meydana getirirler. Bu reaksiyon sonucu oluşan su, yine katalizör tabakasında meydana gelmektedir. PEM yakıt pilinde genellikle katalizör tabaka olarak platin kullanılmaktadır. Gaz difüzyon tabakası ve membran ile birleşerek MEA (Membrane-Electrode Assembly) oluştururlar.



Şekil 4.3. Karbon destekli Platin katalizörün TEM (Transmission Electron Microscopy) resmi

4.2.3. Membran

Yakıt pili performansına etkisi sistem içinde membranın en önemli özelliği pildeki anot ve katodu birbirinden ayırmaktır. PEM yakıt pilinin proton iletme özelliğine sahip bileşeni membranların, proton geçirgen özellikte olması, gaz geçirgenliğinin az olması, mekanik dayanımının yüksek olması, uzun süreli kullanımda ısı ve kimyasal direncinin yüksek olması, emniyetli ve ucuz olması gerekmektedir. Polimer elektrolit membranların kalınlığı ticari ürünlerde 12 ile 250 μm arasında değişir. Bunlar arasında en çok bilineni Nafion'dur. Deneysel çalışmada da Nafion 212 zar kullanılmıştır. Nafion çok yüksek kimyasal ve ısı kararlılığına sahiptir. Kuvvetli bazlara, kuvvetli oksitleyici ve indirgeyicilere 100 $^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar kimyasal olarak dayanıklıdır.



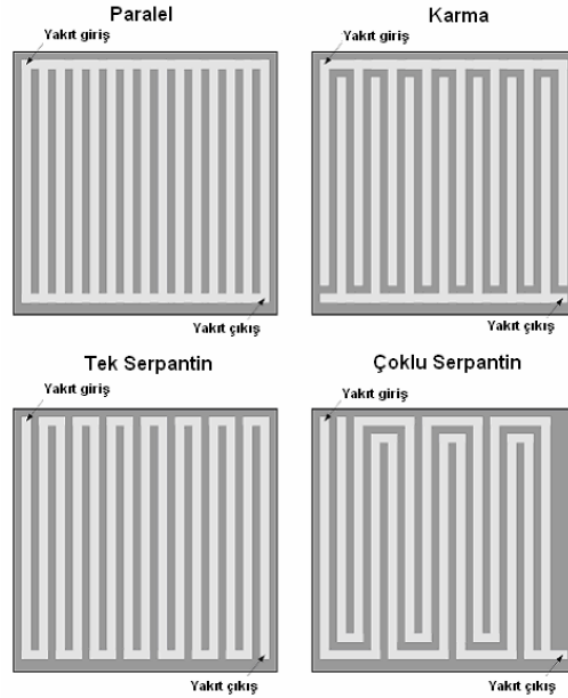
Şekil 4.4. Nafion zarın SEM resmi

4.2.4. Akım Toplayıcı Plakalar

Akım toplayıcı plakalar, MEA'nın karşıt taraflarına yakıt ve oksitleyici geçişini sağlarlar. Her bir akış alanı plakası, MEA'nın gaz ile temasını maksimum seviyede sağlamak için, kıvrımlı bir gaz kanalından oluşur. Gaz kanallarının şekilleri, düzenli güç üretimi, sürekli performans ve reaksiyon ürünü olan suyun kontrolü bakımından çok önemlidir. Akım toplayıcı plakaların yakıt pilleri içindeki görevleri, piller

arasında elektrik iletimini, ısı iletimini sağlamak, pil içinde yakıt ve oksitleyici dağıtmak, pilleri birbirinden ayırmak ve pil içinde su yönetimini sağlamaktır.

Akım toplayıcı plakalar, güç kaybını en aza indirmek için elektriksel olarak iletken olmalı, piller arasında sıcaklık farkı oluşmasını engellemek için ısıl olarak iletken olmalı, yakıt ve oksijenin birbirine karışmasını önlemek için gözeneksiz olmalı, pil içinde su olduğundan dolayı da neme karşı dirençli olmalıdır.



Şekil 4.5. Akım toplayıcı plakalarda akış kanalları çeşitleri

4.3. PEM Yakıt Pillerinde Isı Yönetimi

Yakıt pili performansını etkileyen malzeme özelliklerinin birçoğu sıcaklıkla bağlantılıdır. Eğer pil içerisinde yerel sıcaklık artışları meydana geliyorsa bunlar pil performansı üzerinde olumsuz yönde etkiye neden olacaktır. Pil içerisinde ısı; kısmi faz değişimleriyle, elektriksel aşırı potansiyellerle ve elektrokimyasal reaksiyonlarla açığa çıkar. Açığa çıkan ısı, anot ve katot kanallarında başta sıcaklık ve basınç olmak üzere birçok parametreyi etkilemektedir. Artan sıcaklık yakıt pilinin performansını artırabilmektedir. Ancak, membranın sıcaklığının artması doyma basıncını arttırdığından, membrandaki su aktivasyonunun ve proton iletkenliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Membranın zarar görmesine engel olabilmek için bu ısının bir kısmı pil içerisinden atılmalıdır. Sıcak bölgeler membranda kalıcı bir

hasara neden olabilirler. Kullanılan yakıt ve membran malzemesi, yakıt pilinin çalışması gereken sıcaklık aralığına uygun olmak zorundadır. Gaz fazında yakıtların kullanıldığı Nafion için bu sıcaklık aralığı 80-100°C'dir.

4.4. PEM Yakıt Pillerinde Su Yönetimi

100°C'nin altında çalışmaya ve atmosferik basınca bağlı olarak su sıvı olarak üretilir. Özellikle yüksek akım yoğunluklarında bol miktarda su bulundurulmalıdır. Çünkü kütle iletimi su oluşumuyla ilişkilidir. Membran tamamen doygun olduğunda elektrolitin iletkenliği yüksektir. Bu da yakıt pilinin verimini etkiler. Böylelikle pil performansını etkileyen parametrelerin başında katot katalizör tabakada reaksiyon sonucu oluşan su gelmektedir.

Sistemde oluşan suyun kontrolü ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Çünkü sistemde oluşan suyun miktarı ve kontrolü uygun şartları sağlayamaz ise, yakıt hücresinin performansı düşebilir.

Sistemde oluşan su ile ilgili dikkat edilmesi gereken husus, literatürde belirlenen kritik değerlerin üzerinde herhangi bir değerde oluşursa, açığa çıkan su geri difüzyon sebebiyle anot katalizöre, difüzyon tabakasına ve gaz akış kanalına kadar geri dönüş yapabilir. Bu geri dönüş sırasında katot difüzyon tabakasının gözenekleri kapanarak, membran içine yeteri kadar hidrojen protonu girmeyebilir. Bu da pil performansını azaltması sebebiyle, PEM uygulamalarında istenilmeyen bir durumdur. Yeterli su yönetimi olmadığında, su üretimi ve pilden su taşınmasında bir dengesizlik olur. Su iletimine katkıda bulunan faktörler;

- Pil içindeki su sürüklenmesi,
- Katottan geri difüzyon,
- Suyun anot içindeki yakıt buharından difüzyonudur.

Su iletimi sadece çalışma koşullarının bir fonksiyonu değil ayrıca membran ve elektrot özelliklerinin bir fonksiyonudur. Su sürüklenmesi proton ile osmotik hareket sonucu çekilen su miktarıdır. Çalışma sırasında anodun katottan daha kuru olduğu

yerlerde bir konsantrasyon farkı oluşur. Bu koşullarda, su katottan anoda geri difüzyona uğrar. Membran kalınlığı da önemli bir faktördür. Membran ne kadar ince olursa suyun anoda geri iletimi de o kadar büyük olur. İdeal koşullarda net sıfırlık bir su değişimi olmalıdır. Çok fazla su olduğunda elektrotları su basabilir, reaksiyona giren maddeler seyrelebilir ve membran az da olsa su kaybedebilir. Membranın elektrotta yapışması su kaybı olursa ters olarak etkilenebilir.

Elektrotlar ve elektrolit membran arasında yakın temas olması önemlidir. Çünkü iletken köprü oluşturacak sıvı elektrolit yoktur. Kuru koşullar altında çalışmak membran ömrünü olumsuz etkiler.

Sürekli akış kanalı tasarımı ve uygun çalışma koşulları ayarları temel alınarak güvenli su yönetimi yöntemleri geliştirilmiştir. Eğer üretilenden daha fazla su tüketilirse anottan gelen gazın nemlendirilmesi gerekir, çok fazla nemlendirme olursa da elektrot taşar. Bu da elektrotta gaz difüzyonuyla ilgili sorunlar çıkarır. Akış kanalının girişi ve çıkışı arasındaki sıcaklık artışı suyu hücre içinde tutmak için buharlaşmayı artırır.

BÖLÜM 5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Özellikle son 10 yıldır PEM tipi yakıt hücreleri üzerine çalışmalar hızla artmıştır. Dolayısıyla, yakıt hücresinin performansını etkileyen; işletme parametrelerinden (basınç, sıcaklık, bağıl nem, debi vb.) tasarım parametrelerine (akış kanalı tipi, geometrisi, membran, katalizör, gaz difüzyon tabakası kalınlıkları, malzemeleri, yakıt hücresi yığını tipi, sayısı vb.) kadar birçok parametrenin gerçekte ne gibi sonuçlara neden olacağına bilgisayar ortamında simülasyonu yapılabilmekte ve bu sonuçlar deney verileriyle kıyaslanabilmektedir. Modelleme çalışmalarıyla birlikte;

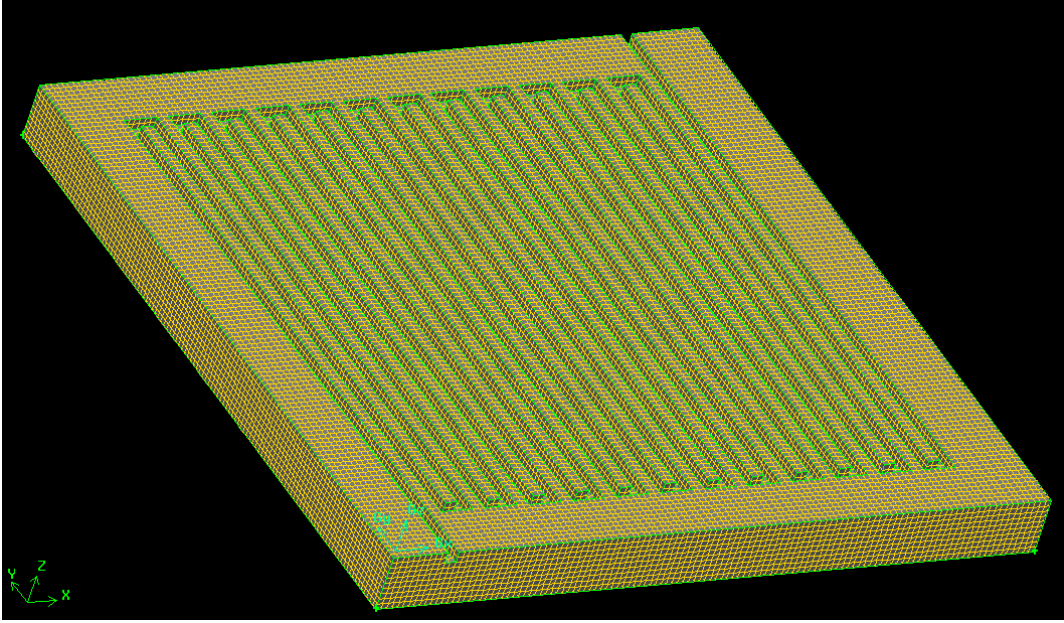
- Membran kalınlığı, türü (Nafion115,Nafion212 gibi),
- Gaz difüzyon tabakası kalınlığı, iletkenliği, gözenekliliği,
- Akış kanalı türü(serpantin, paralel, içiçe, çoklu paralel gibi), geometrik ölçüleri,
- Giriş gazları basıncı, sıcaklığı, bağıl nemliliği,

gibi işletme ve tasarım parametrelerinin polarizasyon eğrileri çıkarılır, hücre performansına etkileri V-I ilişkisiyle gösterilir.

Bu çalışmada, yakıt hücresi ısı ve su yönetiminde etkin rol oynayan sıcaklığın ve giriş gazları debisinin performansa etkileri incelenmiştir.

5.1. Model Tanımı

Bu çalışmada kullanılan PEM yakıt hücresi; membran, anot ve katot katalizör tabakalar, anot ve katot gaz difüzyon tabakaları, anot ve katot gaz kanalları ve akım toplayıcı plakalardan oluşmuştur. PEM yakıt hücresinin fiziksel geometrisi, bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve ağ yapılandırma programı olan GAMBİT kullanılarak oluşturulmuştur.(Şekil 5.1)



Şekil 5.1. GAMBİT ile oluşturulan PEM yakıt hücresi akım toplayıcı plakanın ağ yapısı

Modelleme esnasında kullanılan tasarım parametreleri Tablo 5.1’de, fiziksel ve elektrokimyasal parametreler ise Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Modelde kullanılan tasarım parametreleri

Büyükük	Değer(mm)
Akış kanalı derinliği	1
Akış kanalı genişliği	1
Akış kanalı uzunluğu	50
Gaz difüzyon tabakası kalınlığı	0.270
Katalizör tabakası kalınlığı	0.020
Membran kalınlığı	0.127

Tablo 5.2. Modelde kullanılan fiziksel ve elektrokimyasal parametreler

Büyükük	Değer
Gaz difüzyon tabakası gözenekliliği	0.5
Gaz difüzyon tabakası viskoz direnci	1e+12 1/m ²
Katalizör tabakası gözenekliliği	0.5
Katalizör tabakası viskoz direnci	1e+12 1/m ²
Katalizör tabakası yüzey /hacim oranı	200000 1/m
Referans H ₂ yayınıcı	3e-05 m ² /s
Referans O ₂ yayınıcı	3e-05 m ² /s
Referans H ₂ O yayınıcı	3e-05 m ² /s
Referans akım yoğunluğu (anot)	7500 A/ m ²
Referans akım yoğunluğu (katot)	20 A/ m ²
Hesaplanan elektrolit alanı	0.0025 m ²
Açık devre voltağı	0.95 V
İşletme basıncı	2 atm.
İşletme sıcaklığı	323K, 343 K
Hava giriş debisi	5.0e-6 kg/s
Yakıt giriş debisi	6.0e-7 kg/s

5.2. Matematiksel model

Matematiksel modelde iki elektriksel alan çözülüyor. İlki membran ile katalizör arasında, diğeri ise katalizör ile gaz dağıtım plakaları ve akım toplayıcı arasındadır. Daha sonra katalizörlerdeki reaksiyon oranları girdilere göre hesaplanır. Verilen Potansiyel gerilim değerine göre akım yoğunluğu bulunur. Burada kullanılan denklemler çözümlene yaparken Fluent in kullanmış olduğu denklemlerdir. [15]

5.2.1. Elektro-Kimyasal Model

Elektrokimyasal reaksiyonlar anot ve katotta meydana gelir. Denklem 5.1 elektronun katı yakıt hücre elemanları üzerinden akması durumundaki potansiyeli, denklem 5.2 ise protonun taşınması sürecindeki potansiyeli vermektedir.

$$\nabla(\sigma_{katı}\nabla\phi_{katı}) + R_{katı} = 0 \quad (5.1)$$

$$\nabla(\sigma_{mea}\nabla\phi_{mea}) + R_{mea} = 0 \quad (5.2)$$

Hacimsel transfer akımlarının anot ve katottaki değerleri 5.3 ve 5.4 numaralı denklemler ile verilen Butler-Volmer fonksiyonu yardımıyla bulunur.

$$R_{anot} = (\zeta_{an} j_{an}^{ref}) \left(\frac{|H_2|}{|H_2|_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} \left(e^{\alpha_{anot} \frac{F\eta_{anot}}{RT}} - e^{\alpha_{katot} \frac{F\eta_{anot}}{RT}} \right) \quad (5.3)$$

$$R_{katot} = (\zeta_{ka} j_{ka}^{ref}) \left(\frac{|O_2|}{|O_2|_{ref}} \right)^{\gamma_{ka}} \left(e^{\alpha_{anot} \frac{F\eta_{katot}}{RT}} - e^{\alpha_{katot} \frac{F\eta_{katot}}{RT}} \right) \quad (5.4)$$

5.2.2. Akım ve Kütlenin Korunumu

Kütle korunumu ile ilgili denklemler 5.5, 5.6 ve 5.7' de verilmiştir.

$$S_{H_2} = -\frac{M_{w,H_2}}{2F} \cdot R_{an} < 0 \quad (5.5)$$

$$S_{O_2} = -\frac{M_{w,O_2}}{4F} \cdot R_{kat} < 0 \quad (5.6)$$

$$S_{H_2O} = \frac{M_{w,H_2O}}{2F} \cdot R_{kat} > 0 \quad (5.7)$$

Anot ve katotta üretilen akım değerlerinin aynı olması gerekir. Akımın korunumu için 5.8 numaralı denklem yazılabilir.

$$\int_{an} R_{an} \cdot dV = \int_{kat} R_{kat} \cdot dV \quad (5.8)$$

5.2.3. Isı Kaynakları

Bazı tersinmez olayların etkisi ile kimyasal enerjinin tamamı elektrik enerjisine aktarılamaz. Aşağıda toplam enerji denklemi verilmiştir.

$$S_h = \Delta H - R_{an,kat} \cdot \eta_{an,kat} + i^2 r_{ohm} + h_L \quad (5.9)$$

Burada ΔH elektro-kimyasal reaksiyonlar sonucunda net entalpi değişimini, $R_{an,kat} \cdot \eta_{an,kat}$ anottaki ve katottaki gerilim kayıplarını, $i^2 r_{ohm}$ ise ohmik direnç sonrası oluşan ısıyı, h_L ise suyun yoğuşma/buharlaştırma sonucu entalpi değişimini ifade eder.

5.2.4. Bazı Katsayılar ve Özellikler

5.2.4.1 Gaz Fazında Maddelerin Difüzyon Özelliği

Gaz fazındaki malzemelere ait difüzyon özelliğinin bulunması denklem (5.10) ile ifade edilmiştir.

$$D_i = \varepsilon^{1.5} (1 - s)^{r_s} D_i^0 \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\gamma_p} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\gamma_t} \quad (5.10)$$

D_i^0 referans basınç ve sıcaklıkta i'inci terime ait kütle difüzyon özelliğini ifade etmektedir. Buradaki referans katsayılar $(p_0, T_0, \gamma_p, r_s, \gamma_t)$ için $(101325 \text{ N / m}^2, 300\text{K}, 1, 1.5, 2, 5)$ değerleridir.

5.2.4.2. Membran İyonik İletkenliği

Membran iletkenliği denklem 5.11 ifade edilmektedir. λ su içeriğini ifade etmektedir.

$$\sigma_{mea} = \beta (0.514\lambda - 0.326)^w e^{1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)} \quad (5.11)$$

5.2.4.3. Osmotik Sürüklenme Katsayısı

Osmotik sürüklenme katsayısı 5.12 numaralı denklem ile ifade edilmektedir.

$$\eta_d = 2.5 \frac{\lambda}{22} \quad (5.12)$$

5.2.4.4. Geri Difüzyon Akısı

Geri difüzyon akısı 5.13 numaralı denklem ile ifade edilmektedir.

$$j_w^{diff} = -\frac{\rho_m}{M_m} M_{H_2O} D_l \nabla \lambda \quad (5.13)$$

ρ_m nem içermeyen membranın yoğunluğunu, M_m ise yine nem içermeyen membran ağırlığıdır.

5.2.4.5. Membran Su Difüzyon Özelliği

Membran su difüzyon özelliği denklem 5.14'te verilmiştir.

$$D_l = f(\lambda)e^{2416\left(\frac{1}{303}-\frac{1}{T}\right)} \quad (5.14)$$

5.2.4.6. Su İçeriği

λ simgesi ile ifade edilen su içeriği 5.15 numaralı denklem ile ifade edilmiştir. Buradaki a su aktivitesidir.(5.16)

$$\lambda = 0.043 + 17.18.a - 39.85a^2 + 36a^3 (a < 1) \quad (5.15)$$

$$a = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s \quad (5.16)$$

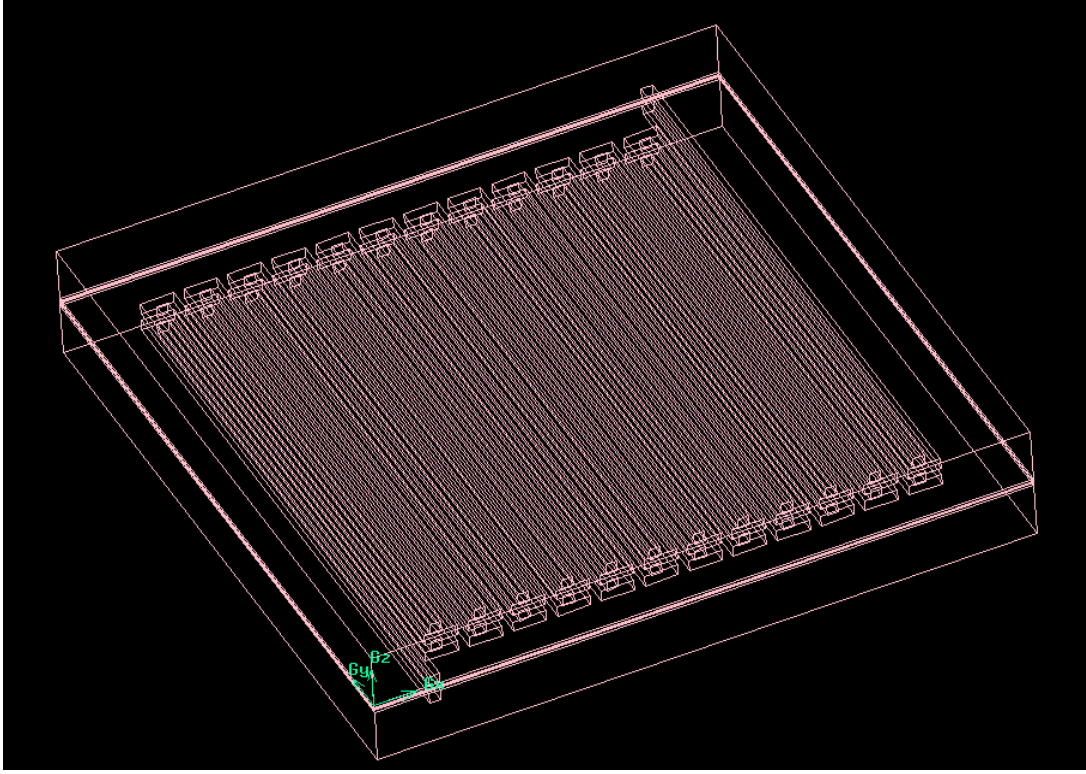
5.2.4.7. Su Buhar Basıncı

Su buhar basıncı buhar molar oranı ile yerel basınç kullanılarak hesaplanır.

$$P_{wv} = x_{H_2O}P \quad (5.17)$$

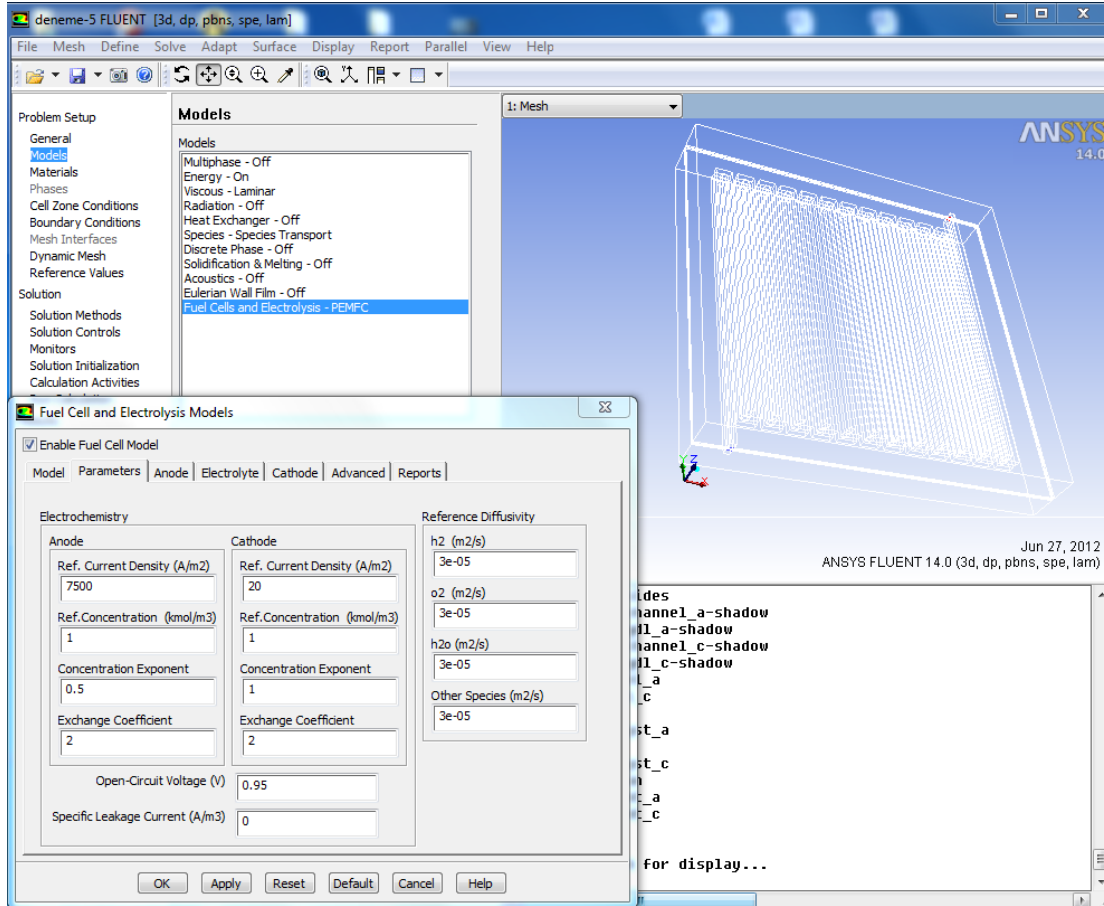
5.3. Kabuller

- Üç boyutlu inceleme yapılmıştır.
- Reaktan gazlar eş yönlü akışlıdır.
- Model yedi bölgeden oluşmaktadır: akım toplayıcı plaka (anot ve katot), katalizör (anot ve katot), gaz difüzyon tabaka (anot ve katot) ve membran.(Şekil 5.2)
- Değişken kütleli debi ve sabit basınçta hidrojen anot girişine, değişken kütleli debi ve sabit basınçta oksijen katot girişine verilmiştir.
- Sistem kararlı halde çalışmaktadır
- Tek faz da inceleme yapılmıştır.
- Gazlar için ideal gaz kanunları uygulanmıştır.
- Akışın laminar olduğu kabul edilmiştir.

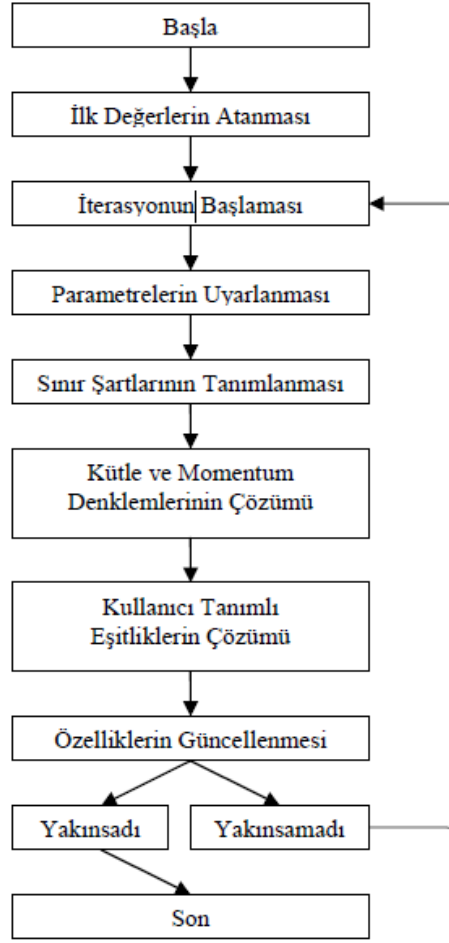


Şekil 5.2. GAMBİT ile oluşturulan PEM yakıt hücresinin görünümü

Üç boyutlu, tek fazlı PEM yakıt hücresinin modellenmesinde ticari bir yazılım olan FLUENT 14.0 programı kullanılmıştır. Bu modelleme çalışması için geçerli olan eşitlikler kullanıcı tanımlı fonksiyonlar(User Defined Function) ile programa aktarılmıştır. DEFINE adı verilen makrolar sayesinde, korunum denklemlerine kaynak terimleri eklenmiş, yayılım katsayıları tanımlanmış, malzeme özellikleri girilmiş ve başlangıç şartları tanımlanmıştır. Şekil 5.3 de program arayüzü verilmiştir. Programda öncelikle korunum eşitlikleri çözümlenip daha sonra da taşınım ve elektrokimyasal denklemler çözümlenerek sonuca ulaşılmıştır. Şekil 5.4'te programın (Fluent) akış şeması verilmektedir. [15]



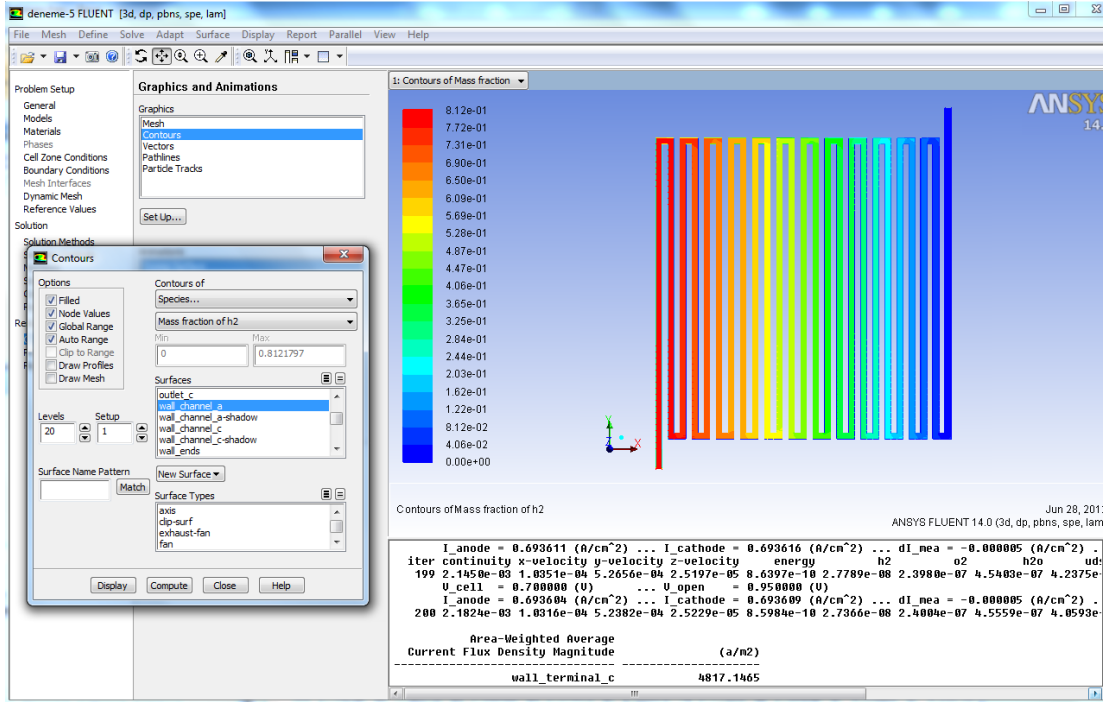
Şekil 5.3. Fluent in PEMFC modülünün arayüzü



Şekil 5.4. Modelleme programının (Fluent) akış şeması

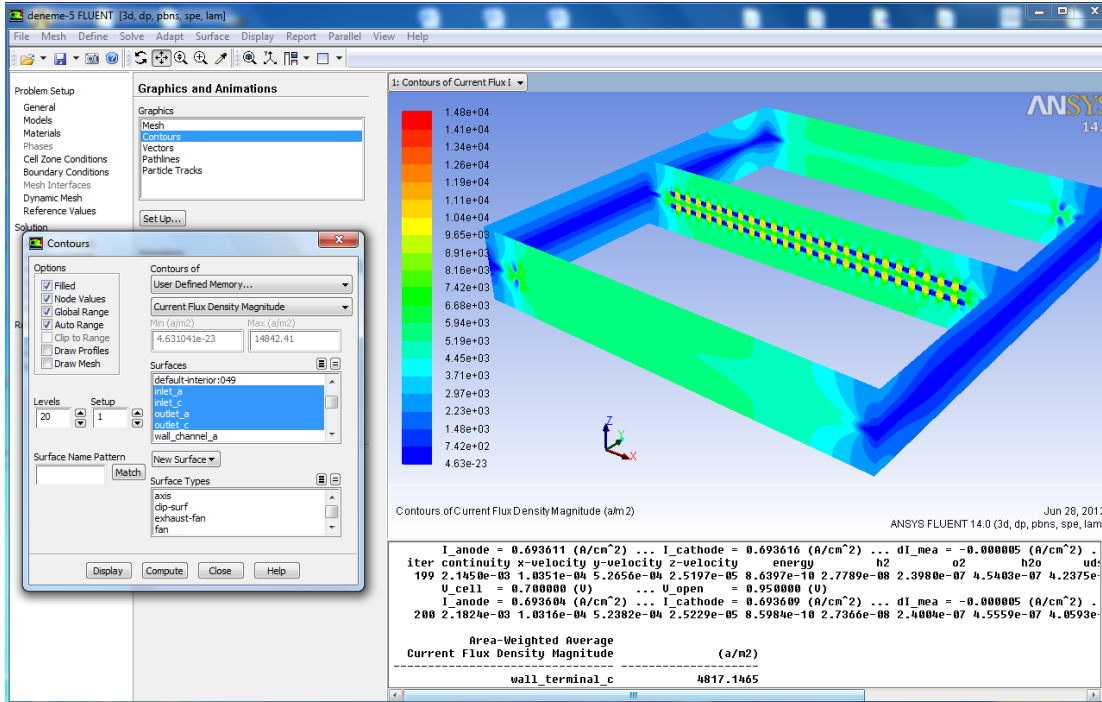
5.4. Analiz Sonuçları

313 K, 343 K pil ve nemlendirme sıcaklığı değerlerinde, giriş basıncını sabit 2 atm. olarak alınıp, farklı anot ve katot giriş debilerinde analizler yapılmıştır. Şekil 5.5 de 5 L/dk. hidrojen ve 5 L/dk. oksijen debisi ve 313 K sıcaklık değerinde hidrojenin akış kanalları boyunca oksijen konsantrasyonunun değişimi verilmiştir.



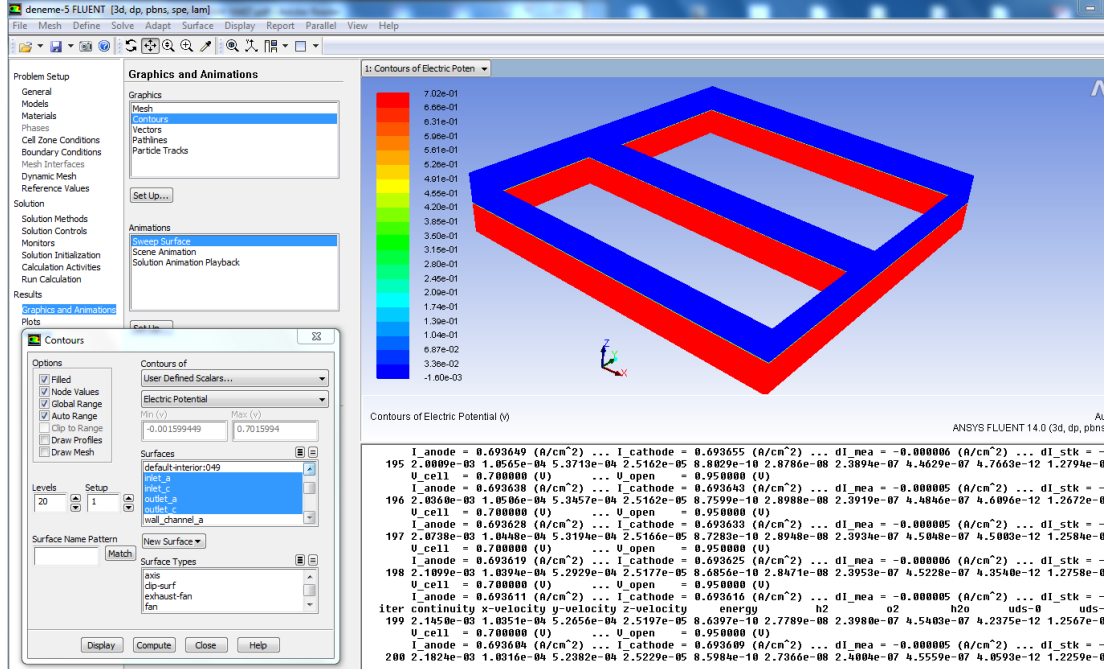
Şekil 5.5. Hidrojen konsantrasyonunun akış kanalı boyunca değişimi

Şekil 5.6 'da yine 313 K sıcaklık değerinde 5 L/dk. oksijen ve hidrojen debilerinde elde edilen akım yoğunluğunun gaz girişlerinden çıkışlarına kadar gelen aşamadaki değişim görülüyor. Akış kanalının girişinde kanal boyunca daha yüksek akım elde edilirken, gaz çıkışına doğru, reaksiyon sonucunda azalan gaz konsantrasyonundan dolayı azalmalar meydana gelmiştir.



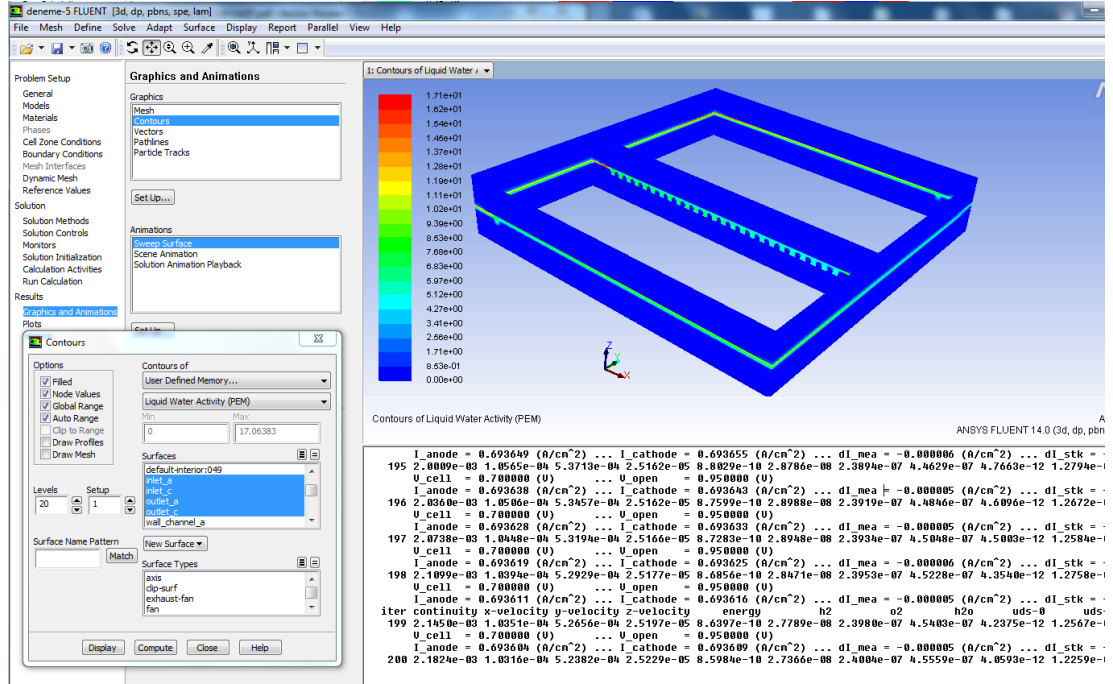
Şekil 5.6. Akım yoğunluğu değişimi

Şekil 5.7 'de 3 boyutlu PEM yakıt hücresi geometrisi üzerinde seçilen yüzeylerdeki elektrik potansiyeli dağılımı görülmektedir. Modelde, anot akım toplayıcının üst yüzeyine sınır şartı olarak hücre potansiyeli için 0 değeri ve katot akım toplayıcının sınır şartı olarak hücre potansiyeli 0.7 V girilmiştir.



Şekil 5.7. Elektrik potansiyeli dağılımı

Şekil 5.8 de elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda katot tarafında oluşan suyun akış kanalı boyunca girişinde ve çıkışındaki değişimi görmektedir.



Şekil 5.8. Katot tarafında su oluşumu

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde PEM yakıt pillerinin ısı ve su yönetiminin pil performansına etkilerinin görülebilmesi amacıyla kullanılan PEM test pili, deney düzeneği ve deney yöntemi anlatılmıştır. Aynı zamanda elde edilen sonuçlar Design-Expert® 8.0 ticari programı sayesinde ayrıntılı şekilde incelenmiş, ısı ve su yönetimi için en uygun pil sıcaklığı, reaksiyon gazlarının nemlendirme sıcaklığı ve reaksiyon gazlarının debisi önerilmiştir.

6.1. Deneysel Düzenek

PEM yakıt pillerinde ısı ve su yönetiminin hücre performansına etkilerinin görülebilmesi amacıyla TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü Yakıt Pili Grubu Laboratuvarında kurulu olan test düzeneği kullanılmıştır. Hidrojen ve oksijen gazlarının yer aldığı yakıt tankı, yakıtın ve oksijenin sisteme girmeden önceki nemlendirme sıcaklıklarını ve pil sıcaklığını değiştiren ısı değiştiricileri, yakıtın ve oksijenin debilerini ölçmeye yarayan akış ölçerler, PEM yakıt pili test hücresi, güç kaynağı, sistemden akım çekilmesini sağlayan elektronik yük ve test datalarının toplandığı bilgisayardan oluşan bu düzenek Şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1. PEM yakıt pili deney düzeneği

Yakıt pilinin anot tarafından giriş yapan hidrojenin debisi ve katot tarafına oksijen tüpünden beslenen oksijen debisi, Şekil 6.2’de görülen debi ölçerler vasıtasıyla istenilen değere ayarlanarak yollanmaktadır. Oluşan (H_2O), su buharı Őeklinde olup yakıt pilinin katot tarafının üst kısmından sistemden uzaklaŐmaktadır. Sonuç olarak meydana gelen termodinamik potansiyeller yakıt pilinin akım toplayıcı plakaları üzerinde elektrik üretilmesini sağlamaktadır. Deney düzeneğindeki akım toplayıcı plakalar üzerinden alınan akım ve voltaj değerleri elektrokimyasal ölüm istasyonuna iletilmektedir.



Şekil 6.2. Deney düzeneğinde kullanılan hidrojen ve oksijen debi  l erler

Sıcaklık parametresinin yakıt pili performansı üzerindeki etkisini incelemek için dört farklı noktada sıcaklık kontrol cihazı kullanılmıştır. Bunlar, hidrojenin ve oksijenin sisteme girmeden hemen önceki nemlendirme sıcaklığını ayarlama da kullanılan termokupl ve anot-katot akım toplayıcı plakalara bağlanan pil sıcaklığını ayarlama da kullanılan termokupllardır. Şekil 6.3’de sıcaklık ayar paneli görülmektedir. Deneylere, giriş sıcaklıkları dengeye ulaŐınca baŐlanmıştı



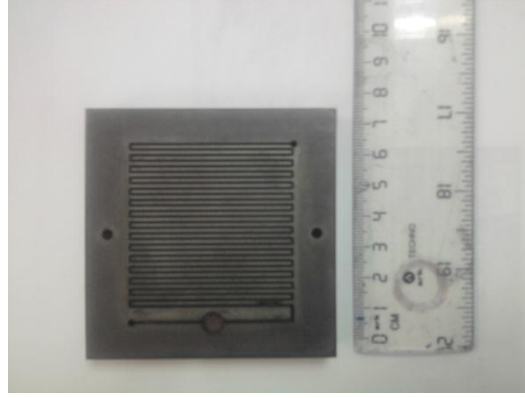
Şekil 6.3. Sıcaklık ayar paneli

Yakıt pilinin, yakıt tankındaki hidrojenin ve oksijen nemlendirmesinin sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir. Hidrojenin ve oksijenin nemlendirme sıcaklığı 40°C ile 70°C arasında olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Hidrojen ve oksijen sisteme girmeden önce nemlendirme sıcaklığının ayarlanması için Şekil 6.4’de görülen su dolu depolardan geçmektedir. Suyun sıcaklığı değiştirilerek, içerisinde geçen gazların nemlendirilmesi istenen sıcaklık değerinde yapılmaktadır.



Şekil 6.4. Hidrojen ve oksijen gazlarının nemlendirme düzeneği

PEM yakıt pili içerisinde yakıt ve oksitleyicinin dağılımını sağlayan, suyun kullanımını ve ısı dağılımını yöneten ve oluşan akımın hücreden taşınımını sağlayan akım toplayıcı plaka Şekil 6.5’de görülmektedir.



Şekil 6.5. Deneyde kullanılan PEM yakıt hücresi akım toplayıcı plaka görünümü

6.2. Deneysel Sonuçları

Deneysel çalışmada

- Sıcaklık
- Hidrojen debisi
- Oksijen debisi

parametrelerinin PEM yakıt pili performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın konusu ısı ve su yönetiminin PEM yakıt pillerinin performansına olan etkilerinin incelenmesi olduğundan deneysel çalışmada incelenen parametreler sıcaklık ve su yönetimidir. Ancak yakıt ve hava debisi değerleri de sistemin performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Deneyde kullanılan yakıt hidrojenidir. Yakıt pilinin, yakıt tankındaki hidrojenin ve oksijen nemlendirmesinin sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir. Pil sıcaklığı 40°C, 60°C ve 80°C, oksijen ve hidrojen nemlendirme sıcaklığı 40°C, 55°C ve 70°C olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Ayrıca hidrojen debisi ve oksijen debisi deneyin diğer değişkenleridir. Hidrojen debisi 2.5 L/dk., 3.75 L/dk., 5 L/dk. olarak, oksijen debisi ise 3 L/dk., 4 L/dk., 5 L/dk. olacak şekilde farklı kombinasyonlarda deneyler yapılmıştır.

6.2.1. Sıcaklığın Etkisi

Tek hücreden oluşan PEM yakıt hücresi deneysel sistemlerinde akım toplayıcı plakalara yerleştirilen ısıtıcılar sayesinde, hücre sıcaklığı çalışma esnasında istenen işletim sıcaklığına getirilir. Bu bölümde pil sıcaklığının farklı nemlendirme sıcaklıklarında yakıt hücresi performansına etkileri polarizasyon eğrileriyle açıklanmıştır.

Pil sıcaklığının etkisi incelenirken;

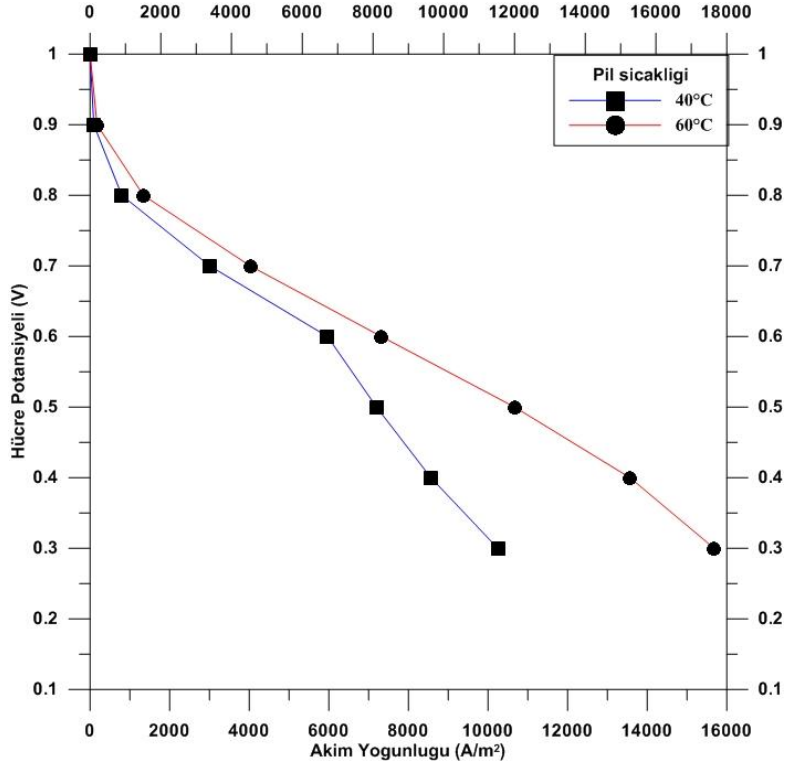
Anot giriş gaz debisi (H_2) : 5 L/dk.

Katot giriş gaz debisi (O_2) : 5 L/dk.

de sabit tutulmuştur.

- a) 40°C Nemlendirme sıcaklığında, Pil sıcaklığının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi

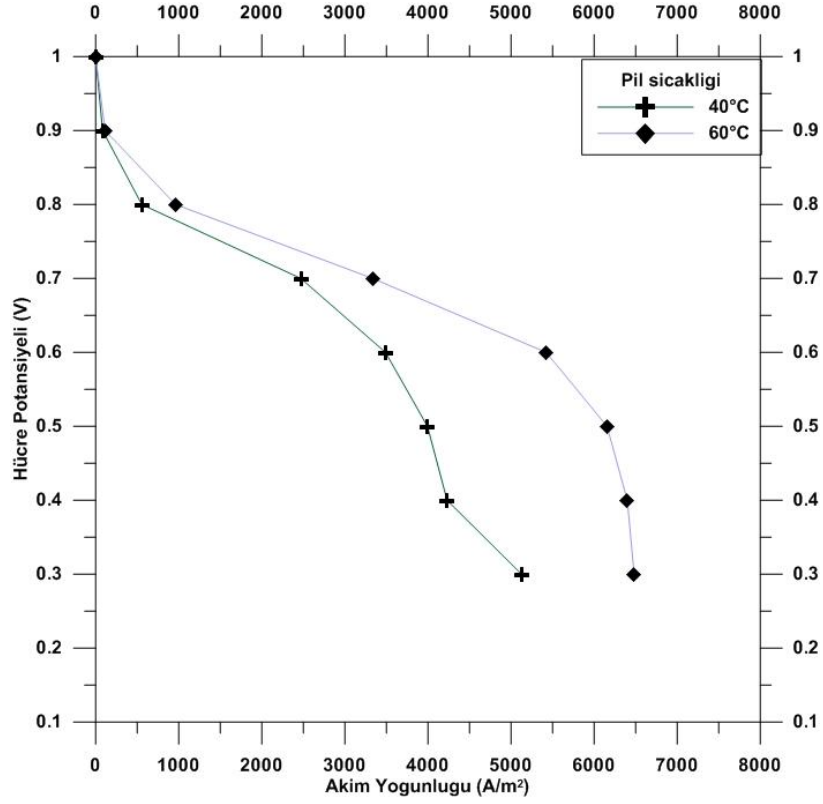
Aşağıdaki grafikte 40°C nemlendirme sıcaklığında gönderilen hidrojen ve oksijenin farklı değerlerdeki pil sıcaklığının akım yoğunluğu-hücre potansiyeli eğrisi verilmiştir. Hücre çalışma sıcaklığının artması ile yakıt hücresi performansı iyileşmekte, hücre çalışma sıcaklığının azalması ile birlikte yakıt hücresi performansı kötüleşmektedir. Bu durumun temel nedeni elektrokimyasal reaksiyonlara ait akım yoğunluklarının hücredeki anot ve katot kısımlarındaki katalizör katmanlarının sıcaklığının artışı ile birlikte artması ve bununla beraber gaz difüzyonunun da artmasıdır.



Şekil 6.6. 40°C Nemlendirme sıcaklığında, pil sıcaklığının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi

b) 70°C Nemlendirme sıcaklığında, Pil sıcaklığının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi

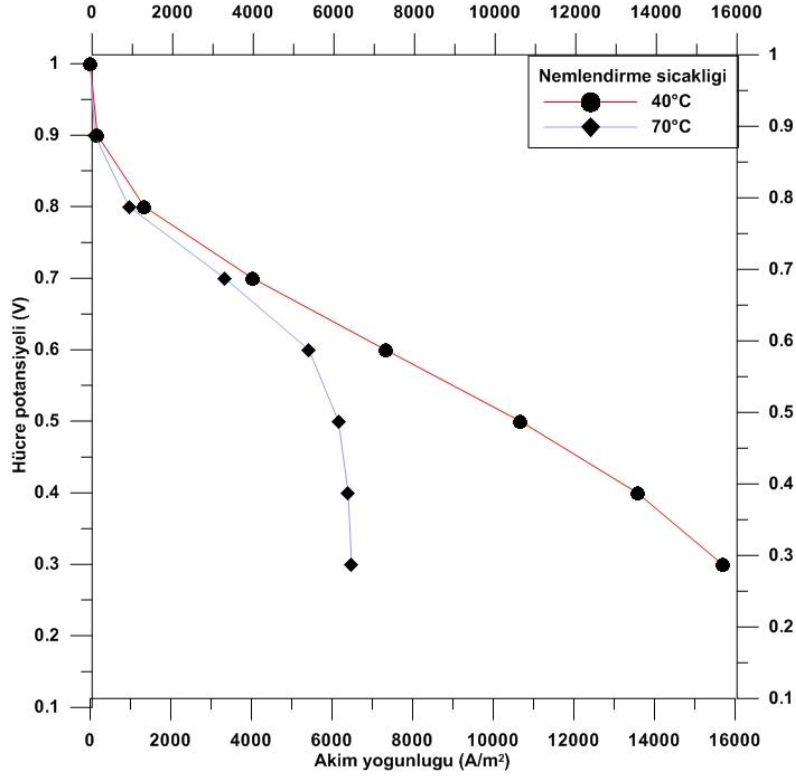
Aşağıdaki grafikte 70°C giriş gazlarının nemlendirme sıcaklığında yine iki farklı pil sıcaklığı değerinde polarizasyon eğrisi çıkarılmıştır. Artmış olan nemlendirme sıcaklığıyla birlikte akım yoğunluğunda genel bir artış meydana gelmiştir. Burada nemlendirme sıcaklığı her iki pil sıcaklığından yüksektir. Dolayısıyla yoğunlaşma meydana gelecek ve bu da performansta düşümlere neden olacaktır. Ancak grafikten görüldüğü üzere nemlendirme sıcaklığına daha yakın olan pil sıcaklığında elde edilen akım yoğunluğu fazladır.



Şekil 6.7. 70°C Nemlendirme sıcaklığında, Pil sıcaklığının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi

c) 60°C sabit pil sıcaklığında farklı nemlendirme sıcaklıklarının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi

Pil performansının sıcaklık ile artmasına neden olabilecek diğer sebep artan performans ile katotta üretilecek olan fazla miktarda sıvı fazdaki suyun artan sıcaklık ile azalmasıdır. Hücreye beslenen gazların (nemlendirme) , sıcaklığından daha düşük bir pil sıcaklığında işletilen bir PEM yakıt hücresinde su daha kolay yoğuşur.



Şekil 6.8. 60°C sabit pil sıcaklığında farklı nemlendirme sıcaklıklarının elde edilen akım yoğunluğuna etkisi

6.2.2. Giriş Gazları Debilerinin Etkisi

a) Anot giriş gaz (H_2) debisinin etkisi;

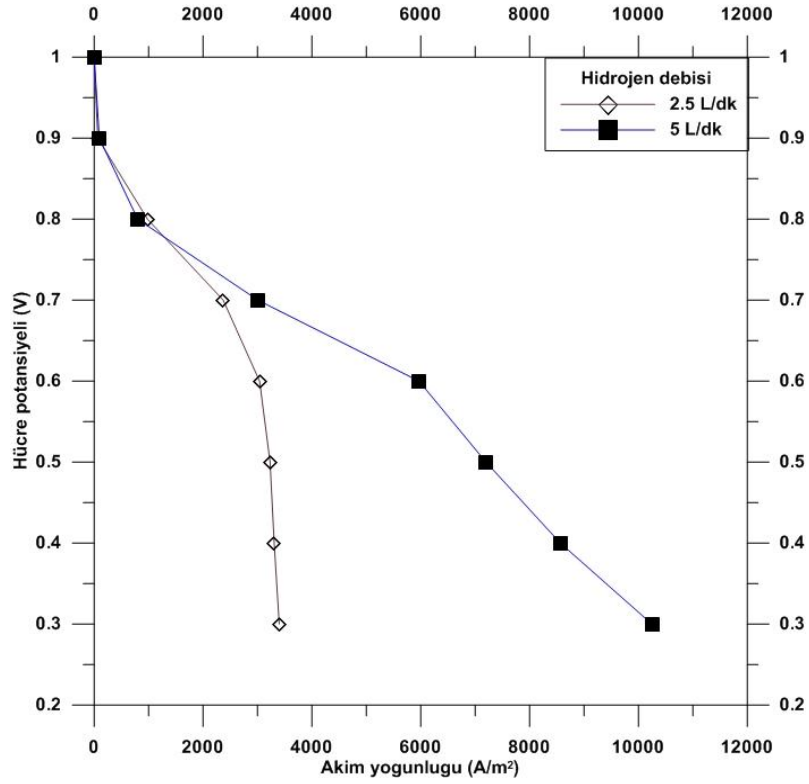
Besleme gazlarından Hidrojen debisinin hücreden çekilen akım yoğunluğuna etkisi incelenirken;

— Katot giriş gaz debisi (O_2) : 5 L/dk.

— Nemlendirme sıcaklığı : 70°C

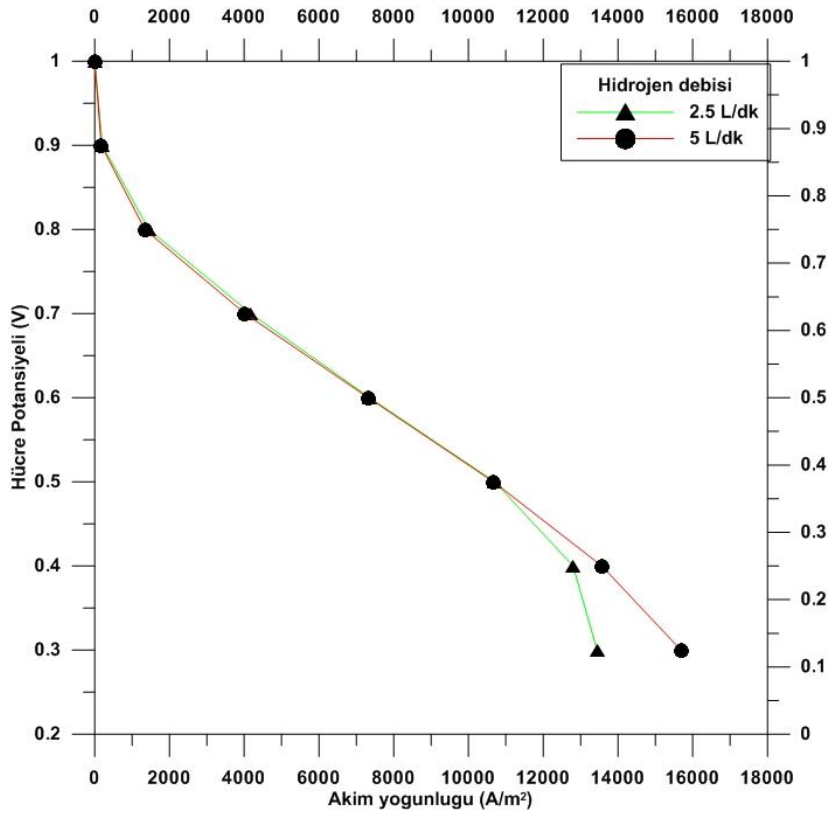
de sabit tutulup farklı pil sıcaklıklarında anot giriş gaz debisinin performansa etkisi incelenmiştir.

— 40°C pil sıcaklığında;



Şekil 6.9. 40°C pil sıcaklığında anot giriş gaz (H_2) debisinin etkisi

— 60°C pil sıcaklığında;



Şekil 6.10. 60°C pil sıcaklığında anot giriş gaz (H_2) debisinin etkisi

Giriş gazlarından hidrojen debisi arttıkça elde edilen akım yoğunluğu artarken, yine grafiklerden anlaşılacağı üzere pil sıcaklığının giriş gazı nemlendirme sıcaklığından düşük olmasından kaynaklanan performans düşüklüğü gözlemleniyor.

b) Katot giriş gaz (O_2) debisinin etkisi;

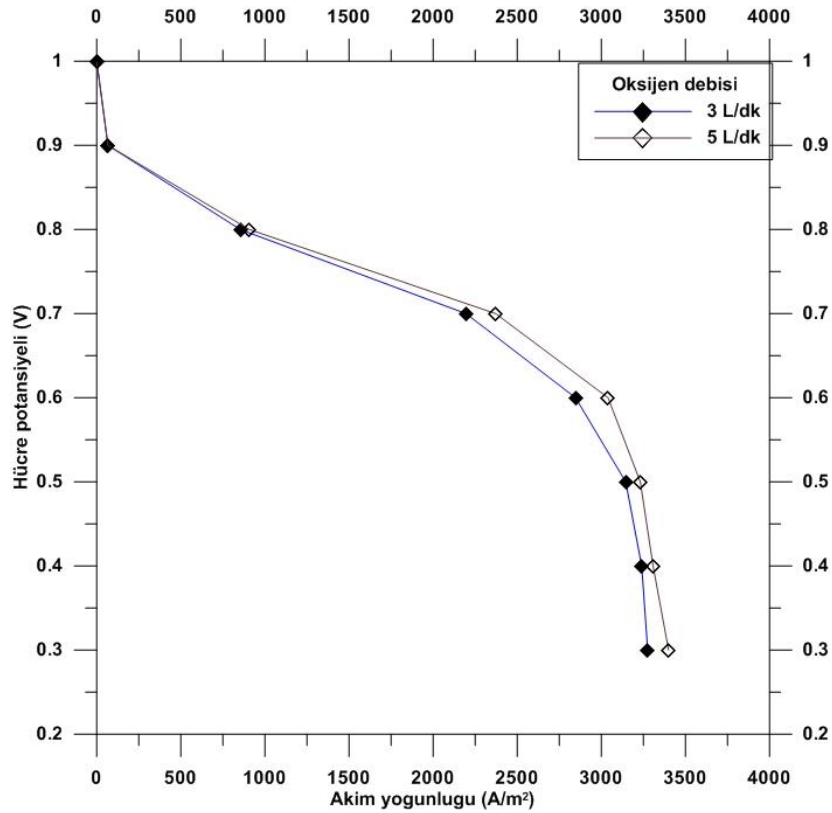
Besleme gazlarından Oksijen debisinin, hücreden çekilen akım yoğunluğuna etkisi incelenirken;

— Anot giriş gaz debisi (H_2) : 2.5L/dk.

— Nemlendirme sıcaklığı : 70°C

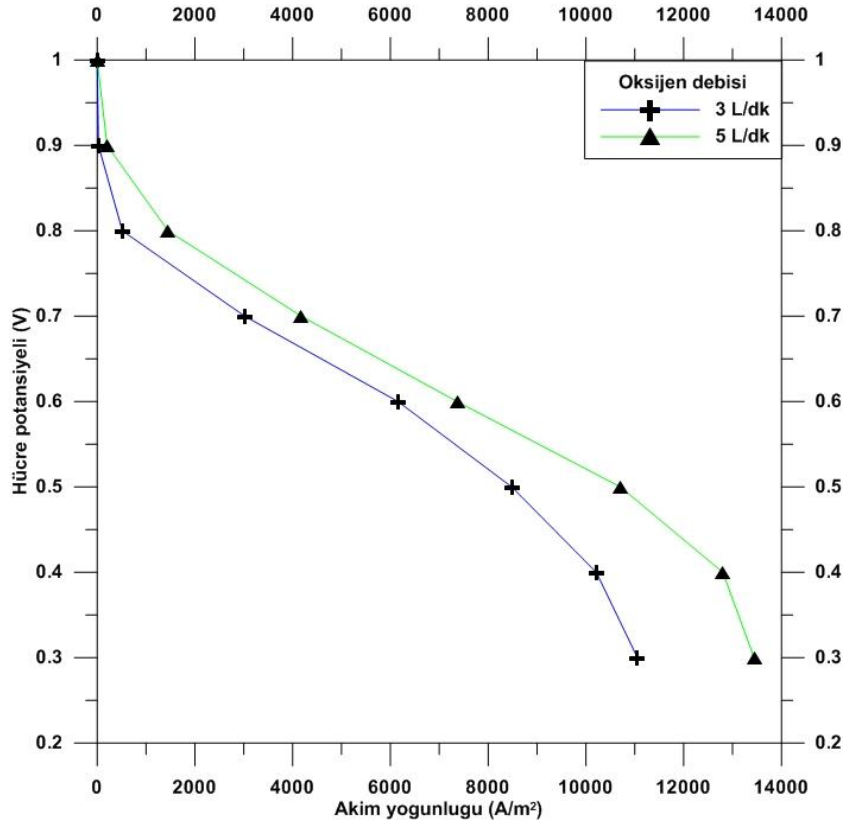
de sabit tutulup farklı pil sıcaklıklarında anot giriş gaz debisinin performansa etkisi incelenmiştir.

— 40°C pil sıcaklığında;



Şekil 6.11. 40°C pil sıcaklığında anot giriş gaz (O_2) debisinin etkisi

— 60°C pil sıcaklığında;



Şekil 6.12. 60°C pil sıcaklığında anot giriş gaz (O_2) debisinin etkisi

Sonuç olarak giriş gazlarından oksijen debisi arttıkça elde edilen akım yoğunluğu artarken, yine grafiklerden anlaşılacağı üzere pil sıcaklığının giriş gazı nemlendirme sıcaklığından düşük olmasından kaynaklanan performans düşüklüğü gözlemleniyor.

Deneylerde bağımsız parametre olarak pil sıcaklığı, nemlendirme sıcaklığı, katot ve anot yakıt debisi değerleri seçilmiştir. Bunlara karşın yakıt pilinden çekilen maksimum akım bağımlı değişken (cevap) olarak değerlendirilmiştir. Deneylerde, 0.6 V değerine karşılık gelen akım değeri temel alınmıştır. Tablo 6.1'de Design-Expert® 8.0 tarafından tanımlanan deney düzeni verilmiştir

Sonuç olarak;

- Nemlendirme sıcaklığı-Pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi
- Oksijen Debisi-Pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi
- Hidrojen Debisi-Pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi incelenmiştir.

Tablo 6.1. Deney Düzeni

No	A.Pil Sıcaklığı (°C)	B.Hidrojen Debisi (L/dk.)	C.Oksijen Debisi (L/dk.)	D.Nemlendirme Sıcaklığı (°C)	Güç (W)
1	60.00	5.00	4.00	55.00	230
2	60.00	2.50	4.00	55.00	171
3	60.00	3.75	4.00	70.00	131
4	80.00	2.50	3.00	40.00	59
5	40.00	2.50	3.00	70.00	196
6	60.00	3.75	3.00	55.00	152
7	40.00	5.00	5.00	40.00	175
8	40.00	5.00	3.00	70.00	216
9	80.00	5.00	5.00	70.00	209
10	60.00	3.75	4.00	40.00	136
11	40.00	2.50	5.00	70.00	237
12	80.00	3.75	4.00	55.00	102
13	40.00	2.50	5.00	40.00	119
14	80.00	5.00	3.00	40.00	46
15	40.00	2.50	3.00	40.00	94
16	80.00	5.00	3.00	70.00	188
17	60.00	3.75	4.00	55.00	216
18	40.00	5.00	5.00	70.00	236
19	40.00	5.00	3.00	40.00	176
20	80.00	5.00	5.00	40.00	26
21	40.00	3.75	4.00	55.00	207
22	80.00	2.50	5.00	40.00	28
23	80.00	2.50	5.00	70.00	101
24	60.00	3.75	5.00	55.00	220
25	80.00	2.50	3.00	70.00	92

6.2.3. Nemlendirme sıcaklığı-Pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi

Değişkenler;

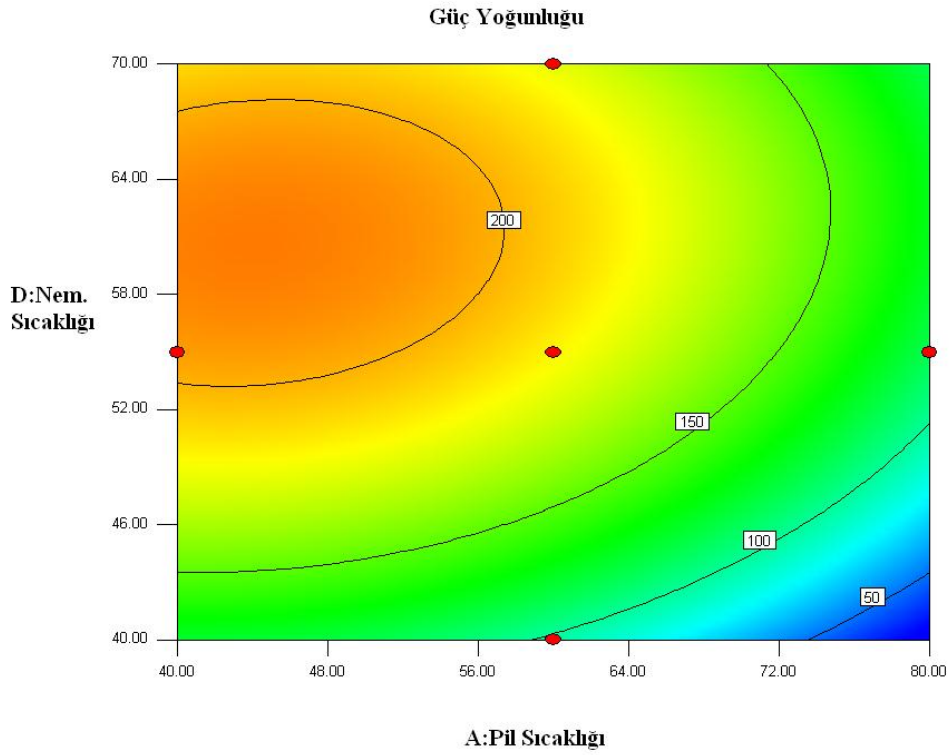
A:Pil Sıcaklığı

D:Nemlendirme Sıcaklığı

Sabitler;

B:Hidrojen debisi=3.75 L/dk.

C:Oksijen debisi=4.75 L/dk.



Şekil 6.13. Pil ve nemlendirme sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi

Şekil 6.13'de pil ve nemlendirme sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi görülmektedir. Pil sıcaklığı ile başlangıçta artış gösteren güç yoğunluğu, 56°C ve üstünde düşmeye başlamıştır. Sabit pil sıcaklığında, nemlendirme sıcaklığı arttırıldığında güç yoğunluğu artmaktadır. Nemlendirme sıcaklığı 60°C'yi geçtikten sonra ise güç yoğunluğu düşmektedir.

6.2.4. Oksijen Debisi-Pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi

Değişkenler;

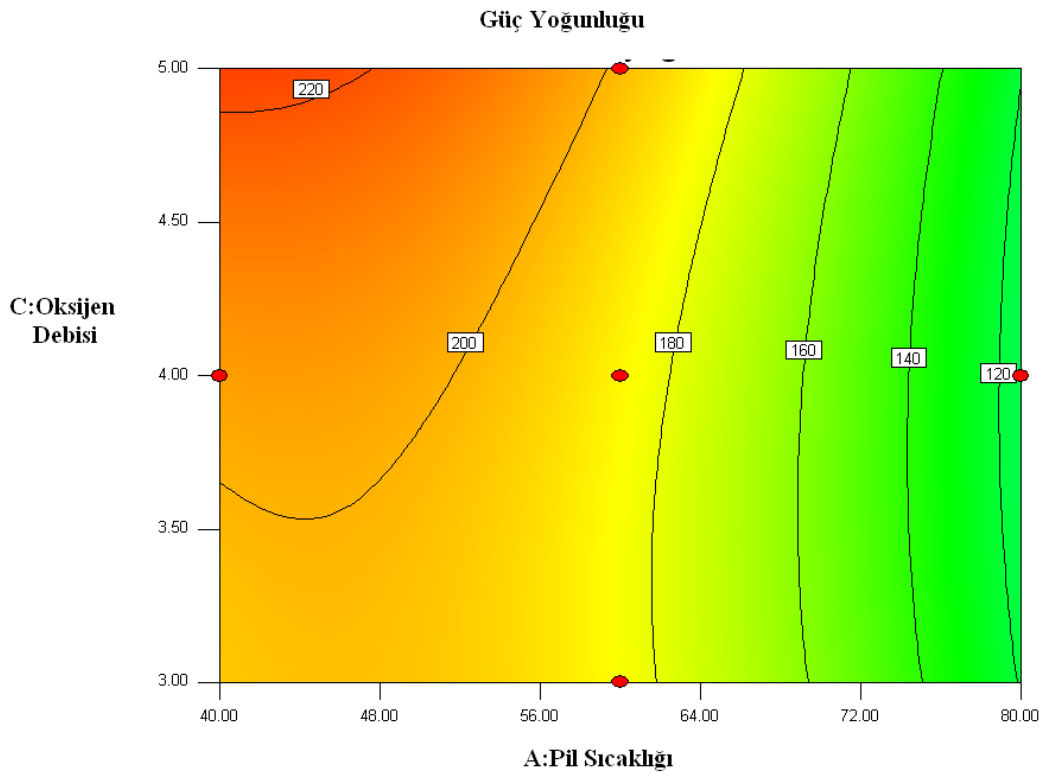
A:Pil Sıcaklığı

C:Oksijen debisi

Sabitler;

B:Hidrojen debisi=3.75 L/dk.

D:Nemlendirme Sıcaklığı=55 °C



Şekil 6.14. Oksijen debisi ve pil sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi

Oksijen debisi ve pil sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 6.14'de verilmiştir. Yaklaşık 60°C'ye kadar olan sabit pil sıcaklıklarında oksijen debisi 3.5 L/dk.' dan düşük debilerde güç yoğunluğunda düşüş vardır. Bu değerden sonra ise durum tersine dönmekte ve oksijen debisi arttıkça güç yoğunluğu da artmaktadır. Fakat pil sıcaklığı 60°C üzerine çıktığında oksijen debisi artsa bile güç yoğunluğunda düşüşler gözlemlenmektedir.

6.2.5. Hidrojen Debisi-Pil sıcaklığının güç yoğunluğuna etkisi

Değişkenler;

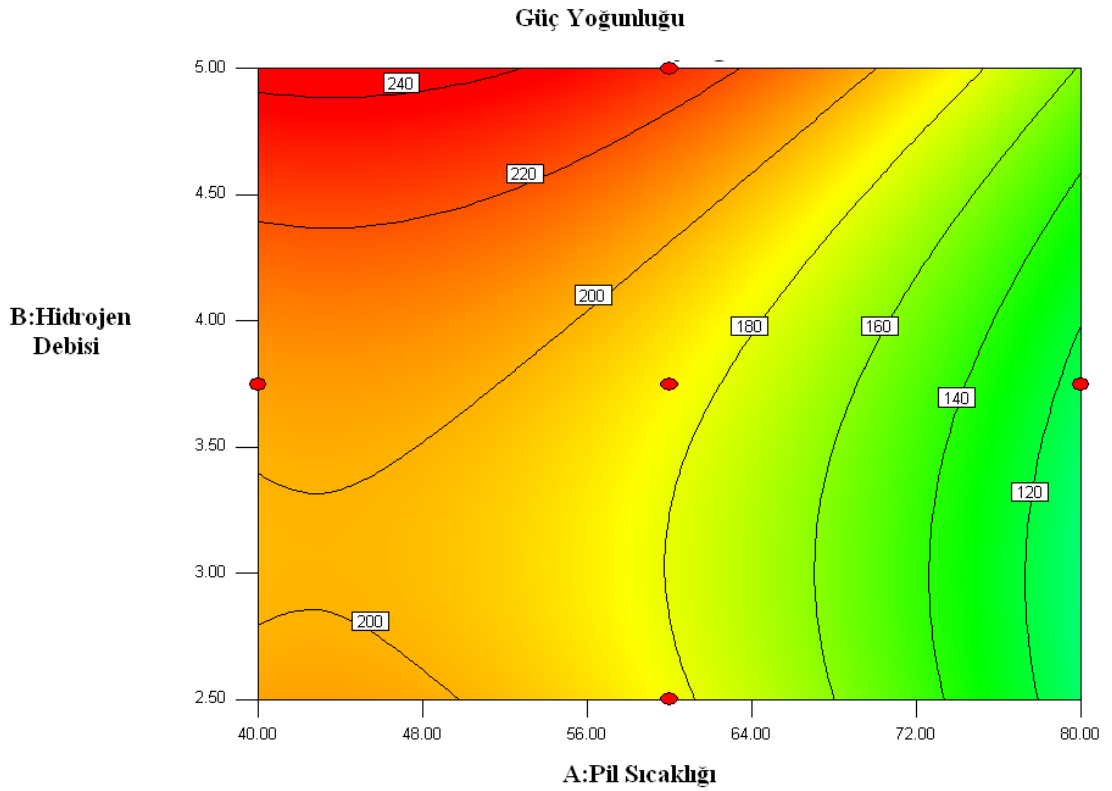
A:Pil Sıcaklığı

B:Hidrojen debisi

Sabitler;

C:Oksijen debisi=4 L/dk.

D:Nemlendirme Sıcaklığı=55 °C



Şekil 6.15. Hidrojen debisi ve pil sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi

Şekil 6.15'te Hidrojen debisi ve pil sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi görülmektedir. Sabit pil sıcaklığında hidrojen debisi yaklaşık 3L/dk. nın altındaki debilerde güç yoğunluğu düşmekte, 3L/dk. nın üzerindeki artış ile birlikte güç yoğunluğunu artmaktadır.

Deneysel sonuçlardan elde edilen verilerle, kullanılan serpantin plakalı PEM tipi yakıt hücresinin verilen şartlar altında, ısı ve su yönetiminin incelenmesi açısından en iyi performansı;

- 70°C Nemlendirme sıcaklığında,
- 60°C pil sıcaklığında,
- Katot giriş gaz debisi (O_2) : 5 L/dk.
- Anot giriş gaz debisi (H_2) : 5 L/dk.

işletme parametrelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PEM yakıt pillerinde ısı ve su yönetiminin, performansına olan etkileri incelenmiştir. Hidrojen debisi, oksijen debisi, pil sıcaklığı ve gazların nemlendirme sıcaklığı, PEM yakıt pillerinde ısı ve su yönetimi açısından önemlidir. Yapılan deneysel çalışma ile pil sıcaklığının, nemlendirme sıcaklığının, hidrojen debisinin ve oksijen debisinin güç yoğunluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sıcaklığın PEM yakıt pilinin performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Artan sıcaklık, elektrokimyasal kinetiklerini arttırarak, sistemin performansının artmasını sağlamıştır. Sıcaklık artışı, hidrojenin membrandan katot tarafına geçişini hızlandırmıştır. Ayrıca suyun membran üzerinden anottan katoda geçişini arttırmıştır. Katotta katalizör ve difüzyon tabakalarındaki su yoğunluğunun artmasıyla performansta kayıplar meydana gelmiştir. Artan oksijen debisi ile oksijen molekülleri, H⁺ iyonlarının oksidasyonuna engel olmuştur. Akış kanallarını tıkayan hücre içinde biriken su, gaz difüzyon tabakası üzerinde bir film tabakası oluşturarak difüzyon direnci meydana getirdiğinden güç yoğunluğu azalma görülmüştür. Ancak oksijen debisi belirli bir değeri geçtikten sonra ise, sistemde biriken bu suyun dışarı atılması sağlandığından güç yoğunluğunda artış meydana gelmiştir

Pil sıcaklığı ile başlangıçta artış gösteren güç yoğunluğu, 56°C ve üstünde düşmeye başlamıştır. Sabit pil sıcaklığında, nemlendirme sıcaklığı arttırıldığında güç yoğunluğu artmaktadır. Nemlendirme sıcaklığı 60°C'yi geçtikten sonra ise güç yoğunluğu düşmektedir.

Oksijen debisi ve pil sıcaklığının güç yoğunluğu üzerinde 60°C'ye kadar sabit pil sıcaklıklarında oksijen debisinin 3.5 L/dk.' dan düşük olduğu durumda güç yoğunluğunda düşüş gerçekleştiği fakat bu değerden sonra ise durum tersine dönmekte ve oksijen debisi arttıkça güç yoğunluğu da artmakta olduğu görülmüştür.

Hidrojen debisi ve pil sıcaklığının güç yoğunluğu üzerine etkisi ise 3L/dk.'nın altındaki debilerde düşmekte, 3L/dk.'nın üzerindeki değerlerde artmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] GEVORKIAN,P.,Sustainable energy systems engineering, Mc Graw Hill, USA; pp.233-234, 2007.
- [2] SPRINGER T. E., ZAWODZINSKI T. A., GOTTFELD S. Polymer electrolyte fuel cell model, J. Electrochem Soc., 138, 1991.
- [3] ROWE,A., LI,X., Mathematical modeling of proton Exchange membrane fuel cells , Journal of Power Sources, 102, pp.82-96, 2001.
- [4] BAOA,C., OUYANGA,M., YI,B.,Analysis of the water and thermal management in proton exchange membrane fuel cell systems , International Journal of Hydrogen Energy , 31, pp.1040 – 1057, 2006.
- [5] FULLER T.F., NEWMAN J., Water and thermal management in solid polymer electrolyte fuel cell, J. Electrochem Soc., 140, pp.1218-1225.
- [4] ZONG,Y., ZHOU, B., SOBIESIAK, A.,Water and thermal management in a single PEM fuel cell with non-uniform stack temperature , Journal of Power Sources, 161, pp. 143–159, 2006.
- [5] SINGH,D., LU,D.M. ,DJILALI N., A two-dimensional analysis of mass transport in proton exchange membrane fuel cells, International Journal of engineering Science, pp.431-45, 1999.
- [6] NYGUYEN,T,V., WHITE,R.,E., A water and thermal management model for proton exchange membrane fuel cells, J. Electrochem Soc., 140, pp. 2178-2186, 1993.
- [9] COPPO, M., SIEGEL, N.P., SPAKOVSKY, M.R., On the influence of temperature on PEM fuel cell operation , Journal of Power Sources, 159, pp. 560-569 ,2005.
- [10] SIVERTSEN,B.R., DJILALI, N., CFD-based modelling of proton exchange membrane fuel cells , Journal of Power Sources, 141, pp. 65-78 ,2005.

- [11] WANG,L., HUSAR, A., ZHOU, T., LIU, H., A parametric study of PEM fuel cell performances, International Journal of Hydrogen Energy, 28, pp. 1263-1272, 2003.
- [12] HOOGERS, G., Fuel Cell Technology Handbook, CRC Press, 2002.
- [13] FUEL CELL HAND BOOK 5. basım. EG&G Services Parsons,Inc. , 2000.
- [14] SPAKOVSKY, A multi-/inter-disciplinary approach to fuel cell system development. The US DoE GATE Center For Automotive Fuel Cell Systems At Virginia Tech., Society of Automotive Engineers, Inc., 2000.
- [15] FLUENT INC., User guide manual.

ÖZGEÇMİŞ

Elif Eker, 23.03.1987 de Sakarya' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2005 yılında başladığı Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2009 yılında bitirdi. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2011 yılından beri Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.