T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU MODELLERDE YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

YUNUS AKSU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. NURCAN TUĞRUL

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU MODELLERDE YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Yunus AKSU tarafından hazırlanan tez çalışması 20.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Dilek ÖZMEN

İstanbul Üniversitesi _____

Prof. Dr. Fatma Jale GÜLEN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Öncelikle çalışmaya başladığımız günden bu yana yapmış olduğu yapmış olduğu katkılarla bu aşamaya gelmemi sağlayan değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca yardımcı olan, yol gösteren Arş. Gör. Ömer KARPUZ'a da teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak bu süreçte destekleriyle yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Haziran, 2018

Yunus AKSU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ ix

ÖZET x

ABSTRACT xii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 7
1.3 Hipotez 8

BÖLÜM 2

YAKIT HÜCRELERİ 9

2.1 Yakıt Hücrelerinin Tarihi 10
2.2 Yakıt Hücrelerinin Sınıflandırılması ve Yakıt Hücresi Çeşitleri 12
2.2.1 Alkali Yakıt Hücresi 13
2.2.2 Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi 14
2.2.3 Fosforik Asit Yakıt Hücresi 15
2.2.4 Katı Oksit Yakıt Hücresi 16
2.2.5 Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi 17
2.3 Yakıt Hücrelerinin Kullanım Alanları 21
2.3.1 Ulaşım Uygulamaları 22
2.3.2 Yerleşik Uygulamalar 25
2.3.3 Yedek Güç Uygulamaları 26
2.4 Yakıt Hücrelerinin Avantajları-Dezavantajları 27

BÖLÜM 3

MATEMATİKSEL MODEL VE VALİDASYON 29

3.1 Denklemler ve Matematiksel Model 30
3.2 Ansys Fluent'te Yakıt Hücresi Simülasyonu Aşamaları 30
3.2.1 Geometry 30
3.2.2 Meshing 31
3.2.3 Fluent 33
3.3 Validasyon (Geçerli Kılma) 34

BÖLÜM 4

SİMÜLASYON 46

4.1 Geometrik Çalışma 46
4.2 Parametrik Çalışmalar 48
4.2.1 Sıcaklık 48
4.2.2 Basınç 50
4.2.3 Porozite 51
4.2.4 Kütlesel Debi 52

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER 53

KAYNAKLAR 56

ÖZGEÇMİŞ 60

SİMGE LİSTESİ

σ	Elektriksel İletkenlik
Φ	Elektrik Potansiyel
R	Hacimsel Transfer Akımı

KISALTMA LİSTESİ

AFC	Alkali Yakıt Hücresi
CL	Katalizör Tabakası
GDL	Gaz Difüzyon Tabakası
PAFC	Fosforik Asit Yakıt Hücresi
PEM	Polimer Elektrolit Membran
PEMFC	Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi
SOFC	Katı Oksit Yakıt Hücresi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Kıvrımlı, paralel ve pim akış alanı geometrisi (soldan sağa)……2
Şekil 1.2 İki kola ayrılan akış kanalları a) Birinci seviye b) İkinci seviye c) Üçüncü seviye 4
Şekil 1.3 Engelli akış kanalı tasarımı …… 5
Şekil 1.4 Hidrofilik ve hidrofobik kanallarda (soldan sağa) suyun ilerleyişi 6
Şekil 2.1 Temel yakıt hücresi .....
Şekil 2.2 William Grove Yakıt Hücresi..... 11
Şekil 2.3 Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi 16
Şekil 2.4 Proton Değişim Membranlı yakıt hücresi 20
Şekil 2.5 Avrupa'da satışa çıkan/çıkmak üzere olan araçlar (soldan sağa) Honda Clarity,Toyota Mirai 23
Şekil 2.6 Londra'da kullanılan Pulsar 2..... 25
Şekil 3.1 Çalışma alanı ve geometri modülü 32
Şekil 3.2 Mesh modülü ve geometri modülüne bağlantısı.....
Şekil 3.3 Fluent modülü..... 35
Şekil 3.4 Yakıt hücresi geometrisinin önden iki boyutlu görünümü 37
Şekil 3.5 Yakıt hücresinin üç boyutlu görünümü..... 37
Şekil 3.6 Yakıt hücresi yüzeylerinin isimlendirilmesi..... 38
Şekil 3.7 Meshing işleminden sonra yakıt hücresinin görüntüsü..... 39
Şekil 3.8 Skewness ve Orthogonal Quality 39
Şekil 3.9 Yakıt hücresi parametrelerinin girildiği program arayüzü 40
Şekil 3.10 Geometrinin eşleştirilmesi ve özelliklerinin tanımlanması..... 40
Şekil 3.11 Yakıt Hücresi Polarizasyon Eğrisi .....
Şekil 3.12 Referans deneysel çalışma verileri ile simülasyon sonuçlarının grafik üzerinde gösterimi …… 44
Şekil 4.1 Yeni geometrinin önden ve yandan görünüşü..... 47
Şekil 4.2 İki geometri performansının karşılaştırılması 48
Şekil 4.3 Farklı sıcaklıklarda yakıt hücresi performansı..... 49
Şekil 4.4 Farklı basınç değerlerinde yakıt hücresi performansı..... 54
Şekil 4.5 GDL porozitesi - yakıt hücresi performansı iliskisi 51
Şekil 4.6 Farklı hidrojen kütlesel debilerinde yakıt hücresi performansı 52

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Yakıt Hücresi Türleri 14
Çizelge 2.2 Yakıt hücresi uygulamaları 22
Çizelge 3.1 Yakıt hücresi parametreleri 36
Çizelge 3.2 Referans Çalışma Verileri ile Simülasyon Sonuçları 44
Çizelge 4.1 Yeni yakıt hücresi geometrisindeki farklılıklar 46

ÖZET

ÜÇ BOYUTLU MODELLERDE YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Yunus AKSU

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Dünyamızın enerji ihtiyacı artan popülasyon ve yaşanan teknolojik gelişmelere bağlı olarak her geçen gün artmaktadır. Günümüzde enerji üretimi için başlıca kaynak olarak fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıt kullanımı sonucu açığa karbondioksit ve karbon monoksit gibi gazların çevreye olan zararlı etkilerinin yanında kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil yakıtların bir gün tükenmesi de olası görülmektedir.

Bu çerçevede fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılabilecek enerji kaynakları hakkında yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılan enerji kaynaklarının en popüler olanlarından biri yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Rüzgâr ve güneşten elektrik enerjisi elde etmek bu konuda günümüzde en çok ismi duyulan sistemler olsa da bu sistemlerin enerji arzı miktarı ve sürekliliği açısından handikapları bulunmaktadır. Mevsim ve günlük hava şartlarına bağlı olarak üretim miktarı değişen bu sistemler enerji arz talep dengesi açısından problem oluşturmaktadır. Bir diğer yöntem olan nükleer enerji ise hem üretim hem de oluşan atığın imhası açısından yüksek derecede riskli bir alternatif olarak görülmektedir.

Bu noktada alternatif olarak hidrojen ve oksijenden karbon emisyonu olmaksızın temiz, sürekli ve sürdürülebilir enerji kaynakları olarak yakıt hücreleri ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında yakıt hücrelerinin geliştirilmesine yönelik olarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda önceden yapılmış bir deneysel çalışmayı referans alarak önce modelimizden elde ettiğimiz sonuçlarla deneysel sonuçları yakalamaya çalıştık. Bunu başardıktan sonra farklı geometride bir yakıt hücresi ile performans karşılaştırması yapılmış sonraki aşamada ise sıcaklık, basınç gibi çalışma koşullarının etkileri incelenmiştir.

Sonuç olarak; enerji ihtiyacının gün geçtikçe arttığı dünyamızda fosil yakıtların alternatifi olabilecek teknolojilerden biri olan yakıt hücrelerinden elde edilen enerji basınç, sıcaklık, porozite ve kütlesel debide yapılan artışa paralel olarak artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Hidrojen, Yakıt Hücresi, 3D Simülasyon, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

ABSTRACT

INVESTIGATION OF PARAMETERS AFFECTING FUEL CELL PERFORMANCE IN THREE DIMENSIONAL MODELS

Yunus AKSU

Department of Chemical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Our world's energy demand is increasing day by day depending on the increasing population and the technological developments. Today, fossil fuels are used as the main source for energy production. As well as the harmful effects of gases such as carbon dioxide and carbon monoxide on the environment, fossil fuels such as coal, natural gas and petroleum are likely to be run out of someday.

Work on energy resources that can be used as an alternative to fossil fuels in this framework continues to increase. One of the most popular energy sources used as an alternative to fossil fuels is renewable energy sources. Producing electricity from the wind turbines and the solar panels is the mostly known systems as renewable energy sources. Despite the being a renewable and energy sources wind and sun have disadvantages on energy supply and continuinuty. These systems vary in production amount depending on the season and daily weather conditions are a problem in terms of energy supply demand balance. Another method, nuclear energy, is seen as a high-risk alternative in terms of both the production and the disposal of the generated waste.

At this point fuel cells which uses hydrogen and oxygen to produce electricity and does not emit green house gases come forward as clean, continuous and sustainable energy sources. In this thesis we made simulations to investigate and improve fuel cell performance. In these simulations, we tried to validate the experimental results with the results we obtained from our model by referring to a previous experimental work. After this, we compare the performance of two fuel cells with different geometries. Fuel cell which had better performance was used in investigation of the effects of operating conditions such as temperature and pressure.

As a result; energy from fuel cells, one of the technologies that could be an alternative to fossil fuels in our world, where energy needs are increasing day by day, has increased in parallel with the increase in pressure, temperature, porosity and mass flow rate.

Keywords: Fuel Cell, 3D Simulation, Energy, Hydrogen, Computational Fluid Dynamics

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

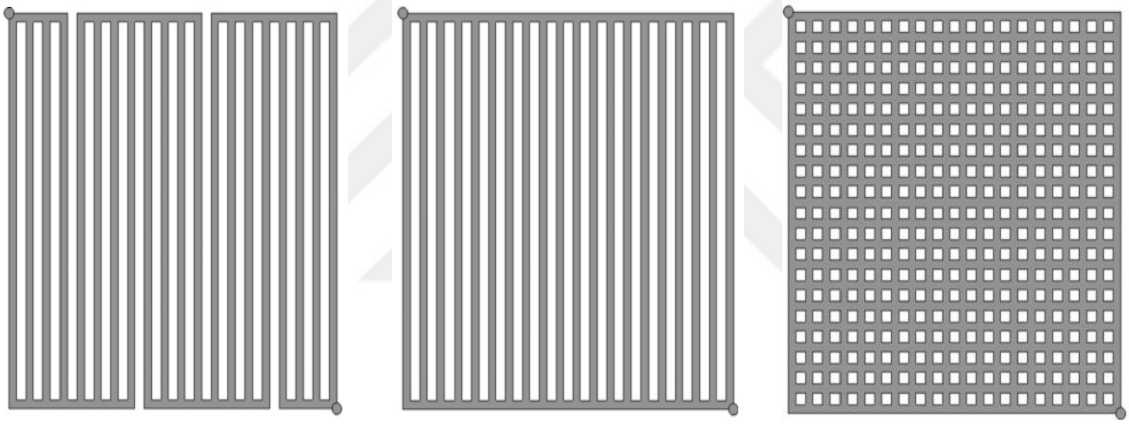
Yakıt hücreleri ya da yakıt pilleri farklı tür yakıtlar kullanarak kimyasal enerjiyi direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Yakıt hücreleri, yakıt olarak genellikle hidrojen kullanmakta olup hidrojen ile oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda enerji üretirler. İçerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar yakıt hücresinin çeşidine bağlı olarak değişmektedir. Günümüzde önemli bir yere sahip olan yenilenebilir enerji için oldukça önemli bir teknolojidir.

Bu konuda yapılmış birçok deneysel çalışma olmakla beraber bizim bu tezde üzerinde çalışmış olduğumuz gibi matematiksel modelleme, bilgisayar destekli tasarım, simülasyon (benzetim) ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği ile alakalı programlar kullanılarak yapılan teorik çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda akış kanalı genişliği ve yüksekliği, kanalların dizilimi gibi geometrik alanlarda yapılmış çalışmaların yanı sıra stokiyometrik oranlar, sıcaklık ve basınç gibi parametrik konularda yapılan çalışmalara rastlamak da mümkündür.

Paşaoğulları ve Wang yaptıkları yakıt hücresinin üç boyutlu matematik modellemesi ile bu konudaki ilk çalışmalardan birini gerçekleştirirken bu modellemenin bilgisayar ortamında benzetimini de yaparak bir deneysel çalışmayla çıkan sonuçlarını kıyaslayıp modellerinin validasyonunu gerçekleştirmişlerdir [1].

Hashemi vd. çalışmalarında düz ve kıvrımlı akış alanlarının etkilerini araştımışlardır. Elde edilen sonuçlar kıvrımlı akış alanlarında akım yoğunluğu ve sıcaklığın daha iyi dağılım oluşturduğunu göstermiştir. Veriler ayrıca literatürdeki deneysel bir çalışma ve küresel ölçütler ile mukayese edildiğinde de iyi derecede uyum gösterdiği saptanmıştır [2].

Lobato vd. yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri üstüne bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada 50 cm^2 boyutunda bir alanda 4 adım kıvrımlı, paralel ve pim olmak üzere üç farklı kanal geometrisi kullanılmıştır (Şekil 1.1). En düşük performans paralel kanallı geometride tespit edilirken bunun sebebi olarak öncelikli kanalların mevcut olmasıyla reaktanların elektrot yüzeyine tam olarak yayılamaması gösterilmiştir. Kıvrımlı kanallardan az da olsa daha iyi bir performans beklenirken iki geometriden de yakın sonuçlar elde edilmiştir [3].



Şekil 1.1 Kıvrımlı,paralel ve pim akış alanı geometrisi (soldan sağa) [3]

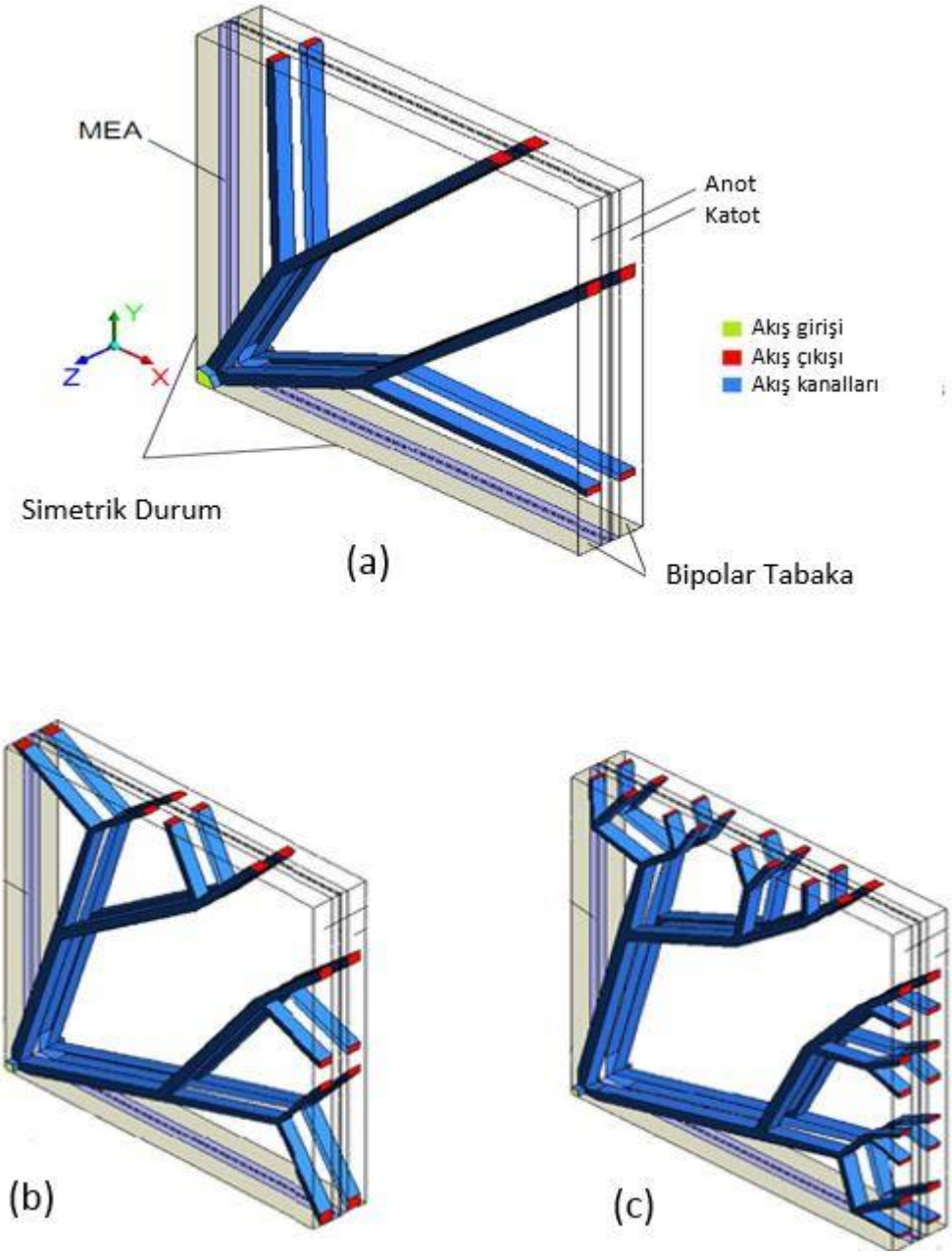
Kuoa vd. gaz akış kanalları dalga biçiminde olan bir yakıt hücresi simülasyonu yapmışlardır. L.Wang ve diğerlerinin yaptıkları model kullanılarak yapılan çalışmada yollardaki hız tümsekleri gibi yerleştirilmişlerdir. Kanal içindeki bu yapılar zorlama konveksiyon oluşmasını sağlayarak giren besleme akımın gaz difüzyon katmanına yönlendirilmesi planlanmıştır. Elde edilen sonuçlar düz kanala sahip bir yakıt hücresi performansıyla kıyaslandığında dalga yapısının performansı artırdığı görülmüştür [4].

Siegel 2008 yılında o zamana kadar yayınlanmış PEM yakıt hücresi modelleri hakkında kapsamlı bir inceleme yazısı yayınlamıştır [5]. Bu yazıda çok sayıda bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu model incelenmiştir. Bu çalışma birçok model için üç boyutlu bir çalışma yapmaksızın bir veya iki boyutlu çalışmaların da birçok model için yeterli olduğunu

göstermiştir. Muhtelif modelleme stratejileri, onların uygulamaları, avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Ayrıca bu yayında mevcut PEM yakıt hücresi modelleme yazılımları arasında yapılan bir karşılaştırma da bulunmaktadır.

Lorenzini-Gutierrez vd. 2013 yılında yeni bir akış kanalı tasarlayarak bunun performasını analiz etmişlerdir. Farklı bir tasarım üzerinde çalıştıkları araştırmalarında iki kola ayrılan akış kanalları kullanılmıştır [6]. İki kola ayrılan bu kanallar üç seviyede incelenmiştir (Şekil 1.2). Ağaç dallarını andıran bu dizayndan elde edilen sonuçlar paralel ve kıvrımlı gibi geleneksel şekildeki tasarımlarla karşılaştırılarak verimliliği araştırıldı. Verilerden çıkan sonuçlara göre bu tasarım geleneksel yöntemlere göre daha az basınç düşüşü ve daha düzgün bir akış dağılımı sağladığı görüldü. Ayrıca dallanma seviyesi arttıkça elde edilen güç ve akımın da artması saptanmıştır.

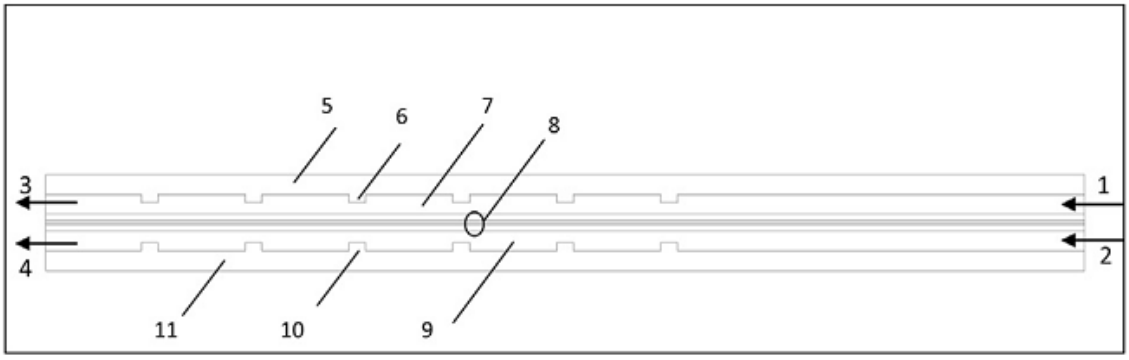
Bir modelde yakıt hücresinin sadece bir özelliği üzerine odaklanmanın ve o özelliği ayrıntılı olarak incelemenin o çalışmayı çok değerli yapacağını düşünen Meng PEM yakıt hücrelerinin soğuk ortam şartlarında çalışmasını incelemiştir [7]. Bir yakıt hücresi $0^{o}C$'nin altı gibi çok düşük sıcaklıklarda çalışırken yakıt hücresinin performansı da bundan sert bir biçimde etkilenmektedir. Düşük sıcaklıklar malzemelerin özelliklerini etkilediği gibi reaksiyona giren gazların da reaksiyon hızlarını etkilemektedir. Hücre boyunca ısı akışınının incelenmesi buz oluşumu ve membranın iyon iletkenliğinin izlenmesi için gereklidir. Çalışmanın sonuçları katottan beslenen gazdaki nemle buz oluşumu arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte oluşan buzun da en çok katottaki katalizör tabakasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca katotta yüksek gaz akış oranının soğukta çalışmaya başlayacak bir yakıt hücresi için faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 1.2 İki kola ayrılan akış kanalları a) Birinci seviye b) İkinci seviye c) Üçüncü seviye [6]

Bilgili vd. araştırmaları da gazların akış alanı üzerine yapılmış farklı bir çalışmadır [8]. Yapılan çalışmada tamamen farklı bir kanal geometrisi tasarlamak yerine her geometride kullanılabilecek, elde edilen verimi arttırıcı bir araştırma amaçlanmaktadır. Bunu gerçekleştirmek için düz bir akış kanalı ve içerisine konulmuş engeller kullanılmıştır. Şekil 1.3 de görülen ve içerisinde engel bulunan tasarım ile engel yerleştirilmemiş tasarımın benzetimi yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında

operasyon koşullarına göre içerisine engel yerleştirilen kanallardan %3 ile %6 arasında daha fazla akım yoğunluğu elde edildiği görülmüştür.



Şekil 1.3 Engelli akış kanalı tasarımı [8]

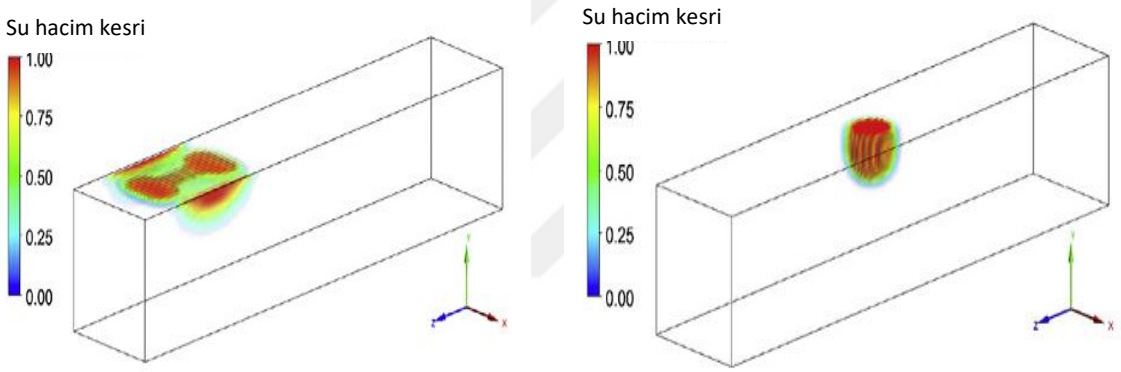
Çalışmakta olan bir yakıt pilinin komponentlerinde zamanla deformasyon olması öngörülebilir bir gerçektir. Zhou vd. yaptıkları çalışmada gaz difüzyon tabakasının uğramış olduğu deformasyonun yakıt hücresinin performansını etkilemesi konusunu ele almışlardır [9]. Bu çalışmada gaz difüzyon katmanının maruz kaldığı kuvvetlerin sebep olduğu deformasyonu araştırmak için bir matematik model geliştirilmiştir. Sonuçlar ise göstermiştir ki bir yakıt hücresinde oluşan deformasyonun büyük kısmı düşük bir mekanik dayanıma sahip olan GDL'de meydana gelmektedir. Bu aşamada daha kalın GDL kullanmak elektrotun suyla dolmaksızın daha fazla kuvvete dayanımını sağlarken daha ince GDL, membranın ihtiyacı olan hidrasyonu da sağlayarak yakıt hücresinin performansını arttırmaktadır.

Neredeyse tüm yakıt hücrelerinin membran bileşeni Nafyon denilen endüstriyel malzemeden oluşmaktadır. Malzemenin üretiminin kolay oluşu ve gerekli şartları sağlaması bu alanda onu neredeyse rakipsiz yapmıştır. Cheddie ve Munroe yaptıkları çalışmayla Nafyon membranlara bir alternatif geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu çerçevede Nafion membran yerine polibenzimizadole membran kullandıkları bir üç boyutlu model geliştirmişlerdir [10]. Daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilen bu membran reaksiyon kinetiğini arttırmış ve oluşan suyun buharlaşmasını sağlayarak oluşan suların bileşenleri kaplaması azaltılmıştır. J.T.Wang'ın yapmış olduğu deneysel çalışmayla doğrulanmış olan bu araştırma yüksek ohmik direnç alanları ile sıcaklık ve nemin etkisinin öngörülmesi için de yardımcı olmuştur.

Abdollahzadeh vd. bir PEM yakıt hücresinin katot bölümüyle ilgili bir araştırma yapmışlardır [11]. Yaptıkları iki boyutlu simülasyonda lineer olmayan denklemlerin sayısını azaltarak

nümerik simülasyonun karmaşıklığını da azaltmışlardır. Bu çalışma, basınç farkı ve çalışma sıcaklığı gibi parametrik çalışmaların yanında GDL kalınlığı ile parametrik ve farklı materyal özelliklerine dayalı geniş çapta bir araştırma olmuştur. Literatürdeki deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar, modelin verileriyle kıyaslandığında modelin deneysel sonuçlara uyumlu olduğu görülmüştür.

Anottaki gaz kanalında iki fazlı akışı incelediği çalışmasında Ferreira vd. hidrojenin giriş hızı, çalışma sıcaklığı ve kanalın ıslanabilirlik parametrelerinin etkileri gözlemlemiştir [12]. Sonuçlar, hidrofilik kanallarda suyun bir film tabaka şeklinde ilerlerken hidrofobik kanallarda ise damlacık olarak ilerlediğini ortaya çıkarmıştır (Şekil 1.5). Hidrojenin giriş hızı ve sıcaklığın arttırılması suyun sistemden uzaklaşmasını hızlandırmasına karşın artan hidrojen hızı basınç düşüşünde de kayda değer artışlar olmasına sebep olmuştur.



Şekil 1.4 Hidrofilik ve hidrofobik kanallarda (soldan sağa) suyun ilerleyişi [12]

Akım yoğunluğunun yakıt hücresinin tüm alanlarına homojen olarak dağılması hücrenin bazı noktalarında aşırı ısınmalar olmaması açısından aranılan bir özelliktir. Zhang vd. tabaka içindeki akış yönlerinin elde edilen akım yoğunluğu değerlerine etkilerini inceledikleri araştırmalarında farklı sonuçlar da gözlemlemişlerdir. Kanallardaki akış yönleri akım yoğunluğu yönünden önemli farklar oluşturmasa da akım yoğunluğunun dağılımı açısından eş yönlü gaz akışı olan kanallarla karşılaştırıldığında akışın zıt yönlü olması akım yoğunluğunun dağılımının daha homojen olmasını sağlamıştır [13].

Yakıt hücrelerinde besleme akımının hızının reaktanların harcanmasına olan etkisi Zeroual vd. tarafından incelenmiştir [14]. Geliştirdikleri üç boyutlu model ile fiziksel ve geometrik parametrelerin reaksiyona giren maddeler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar

düşük hızlarda reaktif gazların tüketiminin daha tekdüze olduğunu göstermiştir. Akış kanallarına engel yerleştirmenin de yüksek hızlarda faydalı olduğu görülmüştür.

Yapılan birçok üç boyutlu çalışmanın yanında literatüre baktığımızda iki boyutlu modelleme ve simülasyon çalışmaları görmek de mümkündür. Güvelioğlu ve Stranger PEM yakıt hücresinin iki boyutlu kararlı halde izotermal bir modelini geliştirmişlerdir. Bu model bir deneysel çalışma ile kıyaslanarak doğruluğunu test edilmiş ve deneysel çalışma ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sonraki aşamada kanal genişliği, bipolar tabaka boyutları, porozite ve bağıl nemlilik gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir. Çıkan sonuçlara göre daha az kanal genişliği ve bipolar tabaka boyutları daha yüksek akım yoğunluğu sağlamaktadır. Anottaki gaz akımının bağıl nemlilik miktarının katottaki bağıl nemlilikten fazla etkili olması da çalışmanın ilgi çekici sonuçlarındandır [15].

PEMFC'lerin en önemli bileşenlerinden biri belki de en önemlisi olan membranın performansının membranın kuruluğuna ve ıslaklığına bağlı olduğunu gösteren birçok çalışma literatürde yer bulmaktadır. Bu çerçevede üretilen elektrik sonucu açığa çıkan su membran için faydalı olmakla beraber su miktarının fazla olması veya suyun yeteri kadarının sistemden dışarı atılamaması ise gaz difüzyon tabakası (GDL) gibi bileşenlerin performansını düşürmektedir. Dawes vd. yaptıkları çalışmada üç boyutlu bir PEMFC modellemesi ile su baskını olarak ifade edilen elektrot gözeneklerinin oluşan suyla dolmasının yakıt hücresi performansına etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmaya göre sıvı hale sistemde bulunan su katot GDL'den reaktiflerin geçişini sınırlandırmakta ve hücreden elde edilebilecek maksimum güç miktarını düşürmektedir. Ayrıca parametrik olarak GDL geçirgenliği, giriş akımı nemliliği ve reaktiflerin difüzivitelerinin etkisi incelenmiştir [16].

1.2 Tezin Amacı

Enerji ihtiyacının sürekli arttığı günümüzde fosil yakıtların tükenme riski ve çevreye vermiş olduğu zararlar insanoğlunu alternatif enerji kaynaklarına yöneltmeye başlamıştır. Rüzgâr ve güneş kaynaklı yenilenebilir enerji sistemlerine dayanan elektrik üretimi zamanımızın en popüler alternatifleri olsa da her ülkenin bunlardan aynı oranda yararlanamıyor olması en iyi şekilde yararlanan ülkelerin dahi iklim koşullarına bağımlı olması nedeniyle süreklilikleri konusunda garantiye sahip olamamaları hala önemli bir sorun oluşturmaktadır.

Günümüzde ulaşımın büyük bölümünün gerçekleştiği karayollarındaki araçların da fosil yakıtlarla yol aldığı da düşünüldüğünde hem yerleşik hem de mobil sistemlerin enerji gereksinimleri için yakıt hücreleri öne çıkmaktadır. Çok çeşitli yapıda ve özellikteki yakıt hücrelerinden PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt hücreleri düşük sıcaklıkta çalışabilmeleri ve yüksek verimleri ile üzerinde en çok araştırma yapılan yakıt hücresi çeşitlerindendir.

Bu tezin amacı Ansys Fluent programında kabul edilmiş yakıt hücresi modellemelerini kullanarak geometrik ve parametrik çalışmalar yapmak suretiyle yakıt hücresinin performansına olan etkilerin araştırılmasıdır.

1.3 Hipotez

Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında, yapılan çalışmaların öncelikle yakıt hücresinden daha fazla verim almaya ve farklı koşullar altındaki performanslarının incelenmesine yönelik olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında da ilk olarak daha önce deneysel olarak gerçekleştirilmiş bir yakıt hücresi çalışması referans alınarak bir model ortaya konulacaktır. Modelin geçerliliği görüldükten sonra her geometrinin madde geçişleri için farklı avantaj ve dezavantajları olduğu gözönüne alınarak farklı bir yakıt hücresi geometrisi ile daha fazla verim elde edilmeye çalışılacaktır.

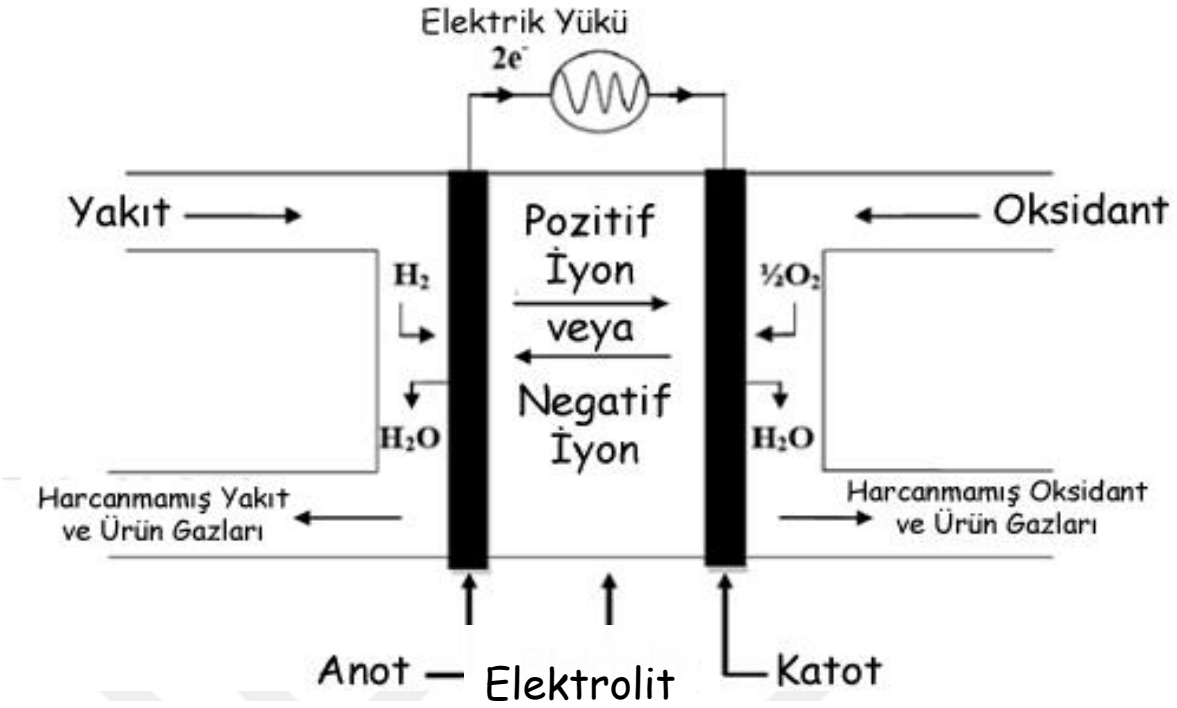
Son aşamada ise daha fazla enerji elde edilen yakıt hücresi geometrisinin performansını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılacaktır. Kimyasal reaksiyonların hızlarını etkileyen sıcaklık, basınç ve madde miktarı gibi parametrelerin elektrokimyasal reaksiyonlar ile enerji üreten yakıt hücresinin performansını da etkilemesi beklenmektedir. Sıcaklık, basınç ve madde miktarının kimyasal reaksiyonların reaksiyon kinetiğini arttırıcağı değerlendirilmektedir.

BÖLÜM 2

YAKIT HÜCRELERİ

Dünyamızın enerji ihtiyacı sanayileşme ve nüfus ile paralel olarak artmaktadır. Halen en popüler enerji kaynağı olan fosil yakıtlar giderek tükenmekte ve kullanımıyla çevreye de zarar vermektedir. Bu da bilim adamlarını ve mühendisleri alternatif enerji kaynakları aramaya yönlendirmiştir. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve nükleer enerji kullanılmakta olan alternatif enerji türlerinin en bilinenlerindendir. Lakin nükleer enerjinin artıklarının yok edilmesi güneş ve rüzgâr enerjisinin doğa ve iklim koşullarına bağlılığı sebebiyle sürekli aynı performansı sağlayamama endişesi taşımaktadır. Bu noktada hidrojen fosil yakıtların en iyi alternatifi olarak durmaktadır. Bu sebepten dolayı da hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt hücreleri ön plana çıkmaktadır.

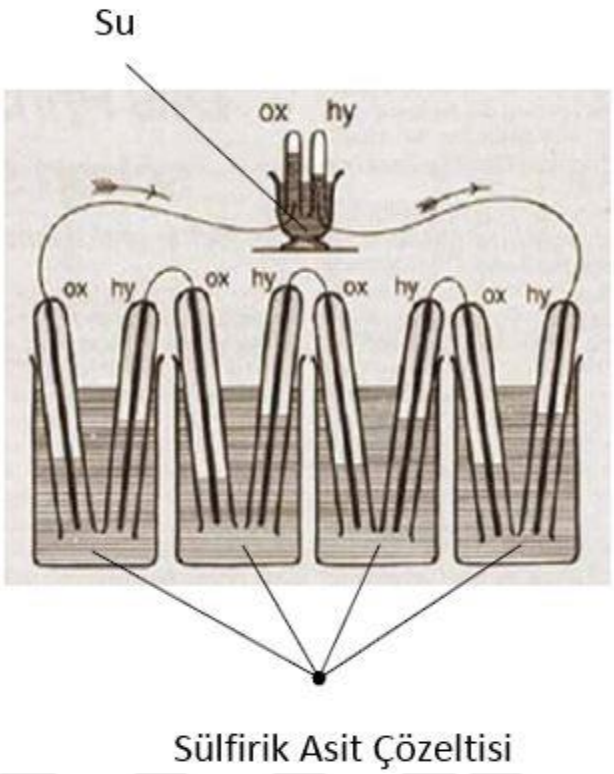
Temel bir yakıt hücresinde (Şekil 2.1) yakıt (genellikle hidrojen) anottan, yakıcı ise (oksijen saf olarak veya hava şeklinde) katottan verilir. Elektrotlarda gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar neticesinde ise elektrik akımı meydana gelir. Yakıt hücreleri bileşen ve karakteristik olarak pillere benzeseler de bir depolama cihazı değil bir enerji dönüşüm aracıdırlar. Yakıt ve yakıcı beslendiği sürece elektrik üretme işlemi sürdürülebilir. Bunlara ek olarak yakıt hücreleri ısı üretimi ve mekanik iş gibi diğer güç üretimi metodlarındaki basamaklar içermediğinden Carnot'un belirttiği termodinamiksel limitlerle kısıtlanamazlar [17]. Yüksek verimli ve çevreye etkisi minimum düzeyde olan bir enerji üretimi sağlarlar.



Şekil 2.1 Temel yakıt hücresi [18]

2.1 Yakıt Hücrelerinin Tarihi

Yakıt hücresi ile ilgili ilk çalışmaların 1838 yılında ortaya çıktığı kabul edilmektedir. Galli fizikçi, kimyager ve avukat William Grove, The London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science dergisinin aralık sayısında yayınlanan mektubunda yapmış olduğu ilkel bir yakıt hücresinden bahseder [19]. Grove bu çalışmasında levha demir, bakır ve porselen plakalar ile seyreltik bir asit ve bakır sülfat çözeltisi kullanmıştır. Aynı dergiye yakın tarihlerde yakıt hücresi çalışmaları konusunda mektup gönderen bir diğer kişi de Alman fizikçi Christian Friedrich Schönbein'dir. O da suda çözünmüş oksijen ve hidrojenden akım üretme konusunda fikirlerini aktarmıştır. William Grove 1842 yılında aynı dergiye gönderdiği çizimi günümüzdeki fosforik asit yakıt hücrelerinin temeli niteliğindedir. Platin bir katalizör üzerinde hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu ile elektrik akımı üretilebileceğini kanıtlayan Grove bu alanda kendi deyimiyle gazlı volta pili üzerinde birçok deneysel çalışma yürütmüştür.



Şekil 2.2 William Grove Yakıt Hücresi [20]

Yakıt hücresi terimi ise ilk defa araştırmalarında kömür gazını yakıt olarak kullanan Charles Langer ve Ludwig Mond tarafından ortaya atılmıştır [21]. Yirminci yüzyılın başlarında kömürün direkt olarak elektriğe dönüştürme ile ilgili girişimler olsa da bu konu karanlıklarda kalmıştır. Yıllar boyunca yakıt hücresinin ticarileştirilmesi için uğraş verilmiş düşük maliyetli ve temiz bir enerji kaynağı rüyası gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Lakin bu rüya 19. yüzyılın sonlarına doğru icat edilen içten yanmalı motorların keşfiyle bir rüya olarak kalmış akademik bir çalışma alanı bilimsel bir uğraşı ve merak seviyesine gerilemiştir.

1900'lerin ortalarına gelindiğinde yakıt hücrelerindeki ilerleme ivme kazandı. 1955 yılında General Elektrik çalışanı olan kimyacı W. Thomas Grubb elektrolit olarak bir polimer membran olan sülfonatlanmış polistiren iyon değişim membranını geliştirdi. Üç yıl sonra meslektaşı Leonard Niedrach bu membran üzerine platin katalizör yerleştirme uygulamasını geliştirmiştir. Bu yakıt hücresi türü Grubb-Niedrach yakıt hücresi olarak anılmaya başlanmıştır [22]. Bu konu üzerine araştırmalara ve geliştirmelere devam eden General Electric çalışmalara NASA ve McDonell Havacılık ile devam eder. Bu çalışmalar da yakıt hücrelerinin NASA'nın Gemini Projesinde meyvelerini verir. Bu da yakıt hücrelerinin pratikteki ilk ticari uygulaması olacaktır. Grove'un yakıt hücresini keşfinden yaklaşık 100 yıl

kadar sonra 1939 yılında Francis T. Bacon ilk alkali yakıt hücresini(AFC) inşa etmiştir. Bacon'un bu çalışması İkinci Dünya Savaşı nedeniyle kesintiye uğramış ancak 1959 yılına gelindiğinde 6 kW gücünde bir AFC inşa ederek bunu bir forklift, kaynak makinesi ve testerenin güç kaynağı olarak kullanmayı başarmıştır [23]. Bu başarılara rağmen alkali yakıt hücresini ticarileştirmekte başarılı olamayan Bacon'ın patentini satın alan Amerikan firması Pratt & Whitney 'nin geliştirdiği AFC Apollo görevinde kullanılmıştır.

1970'lerin ortalarına gelindiğinde fosforik asit yakıt hücreleri popüler olurken 1980'lerin ortalarına doğru ise çalışmalar erimiş karbonat yakıt hücreleri (MCFC) üzerine odaklanmıştır. 1990 yılından itibaren ilgi PEMFC ve SOFC' ye dönmüş ufak çaplı da olsa yerleşik bazı uygulamalar görülmüştür. Temiz enerjiye teşvik eden hükümet politikaları otomobil endüstrisi için de yakıt hücrelerinin gelişmesinde rol oynamıştır. 2000'li yıllardan itibaren CO_2 salınımlarının azaltılması, enerji arzının ve verimliliğinin artırılması fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması konuları gündeme gelmiş ilgi tekrar yakıt hücrelerine dönmüştür. Bilgisayarların da daha güçlü hale gelmesi ve yazılımların geliştirilmesiyle yakıt hücreleri alanındaki çalışmalar deneyselin yanında bir teorik boyut kazanmış oldu. Yapılan modelleme ve benzetim çalışmalarıyla tasarımdan malzeme ve çalışma koşulları ile ilgili parametrelere kadar yakıt hücresinin performansını etkileyebilecek birçok konu üzerindeki araştırma hızla yapılabilir hale gelmiştir.

2.2 Yakıt Hücrelerinin Sınıflandırılması ve Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücreleri birkaç farklı kategoride sınıflandırılabilmektedir. Bunlardan biri çalışma sıcaklığına göre sınıflandırmadır [24]:

Yüksek Sıcaklık Yakıt Hücreleri: Bu tarz yakıt hücreleri 600°C ve üzeri derecelerde çalışırlar ve yüksek bir verimlilik ve güç üretimi sunarlar. Yüksek sıcaklık yakıt hücrelerinin ısınarak çalışmaya başlaması için uzun bir süre gerektirmektedir. Ayrıca büyük sıcaklık değişimlerinin malzeme üzerinde termal stres oluşturması da göz önüne alındığında bu cihazların sıklıkla açılıp kapanması uygun görülmemektedir. Bu tür hücreler sürekli bir güç üretimi gerektiren yerlerde genellikle sabit halde kullanılmaktadır. Solid oksit ve erimiş karbonat yakıt hücreleri yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerini örnek gösterebiliriz.

Orta Sıcaklık Yakıt Hücreleri: Bu tip hücreler 100°C ila 300°C arasında çalışırlar ve orta düzeyde performans ve verimlilik sağlarlar. Bu hücreler daha az güçlü donanımda

olmalarına rağmen yine de iyi bir verim elde edildiği söylenebilir. Yüksek sıcaklıkta çalışan hücreler gibi sabit olarak kullanabilir olmalarının yanı sıra taşınabilir olarak da kullanılabilmektedirler. Bu hücre grubu için en bilinen örnekler fosforik asit yakıt hücresi ve uzay mekiklerinde kullanılmış olan alkalin yakıt hücresidir.

Düşük Sıcaklık Yakıt Hücreleri: 100°C altında çalışma imkânı olan bu tür yakıt hücreleri çalışmaya başladıktan sonra güç üreten hücrelerdir. Bu özellik de onları süreksiz güç ihtiyacı olan taşınabilir uygulamalar için ideal duruma getirmektedir. Düşük sıcaklık yakıt hücreleri sınıfının en çok bilinen çeşidi proton değişim membranlı yakıt hücreleridir.

Günümüzde yakıt hücresi çeşitlerinin artmasıyla artık daha çok kullanılan sınıflandırma yakıt hücresinin elektrolit kısmını oluşturan malzemeye göre yapılan sınıflandırma olmuştur. Bu sınıflandırmaya göre birçok yakıt hücresi çeşidi bulunurken başlıca yakıt hücrelerinin isimleri ve onlara ait bir takım özellikler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

2.2.1 Alkali Yakıt Hücresi

Alkali suda çözünen baz anlamına gelmekte olup Alkali Yakıt Hücresi (AFC) ismini elektrolitinde kullanılan alkali bir maddeden (potasyum hidroksit) almaktadır. Katottan gelen oksijen, su anottaki hidrojenlerden koparılıp dış bir devreden gelen elektronlarla hidroksil bileşiğini oluşturur. Hidroksil iyonları da anoda geçerek burada hidrojen ile reaksiyona girerler. Bu reaksiyon sonucu ortaya su ve elektron açığa çıkar. Açığa çıkan elektronlar harici bir devre üzerinden tekrar katoda gelerek bu süreci baştan başlatır. Bu döngüyü temsil eden denklemleri Denklem 2.1 ve 2.2 de görebiliriz:

$$O_2 + 4e^- + 2H_2O \longrightarrow 4OH^- \quad (2.1)$$

$$2H_2 + 4OH^- \longrightarrow 2H_2O + 4e^- \quad (2.2)$$

AFC'lerin %60 civarındaki yüksek verimleri katottaki oksijenin indirgenme kinetiğinden dolayıdır. Maliyet yönünden de diğer yakıt hücrelerine göre üretimi daha ucuzdur. Pahalı olmayan karbon ve plastik elektrotlar ile potasyum hidroksit elektrolit kullanılırken platine

kıyasla daha ucuz olan kobalt, nikel ve gümüş katalizörler de yüksek verimli katalizörler olarak kullanılabilir [17].

Çizelge 2.1 Yakıt Hücresi Türleri

Yakıt Hücresi Türü	Elektrolit	Yük Taşıyıcı	Çalışma Sıcaklığı	Yakıt
Alkali Yakıt Hücresi (AFC)	KOH	OH^-	60-120 °C	H_2
Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC)	Lityum ve Potasyum Karbonat	CO_3^{-2}	600-700 °C	H_2, CO, CH_4 ve diğer hidrokarbonlar
Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)	Fosforik Asit	H^+	160-220 °C	H_2
Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)	Itrium-Zirkonyum	O^{-2}	600-1000 °C	H_2, CO, CH_4 ve diğer hidrokarbonlar
Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC)	Katı Polimer	H^+	40-80 °C	H_2

2.2.2 Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi

Erimiş karbonatlı yakıt pilleri ortalama 650°C – 700°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışma özelliğine sahiptir. Elektrolit olarak erimiş karbonat kullanılmaktadır. Diğer yakıt hücrelerinden farklı olarak katoduna karbondioksit de beslenmesi gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklarda çalıştığı için elektrotların oluşabilecek korozyona karşı dayanıklı olmaları

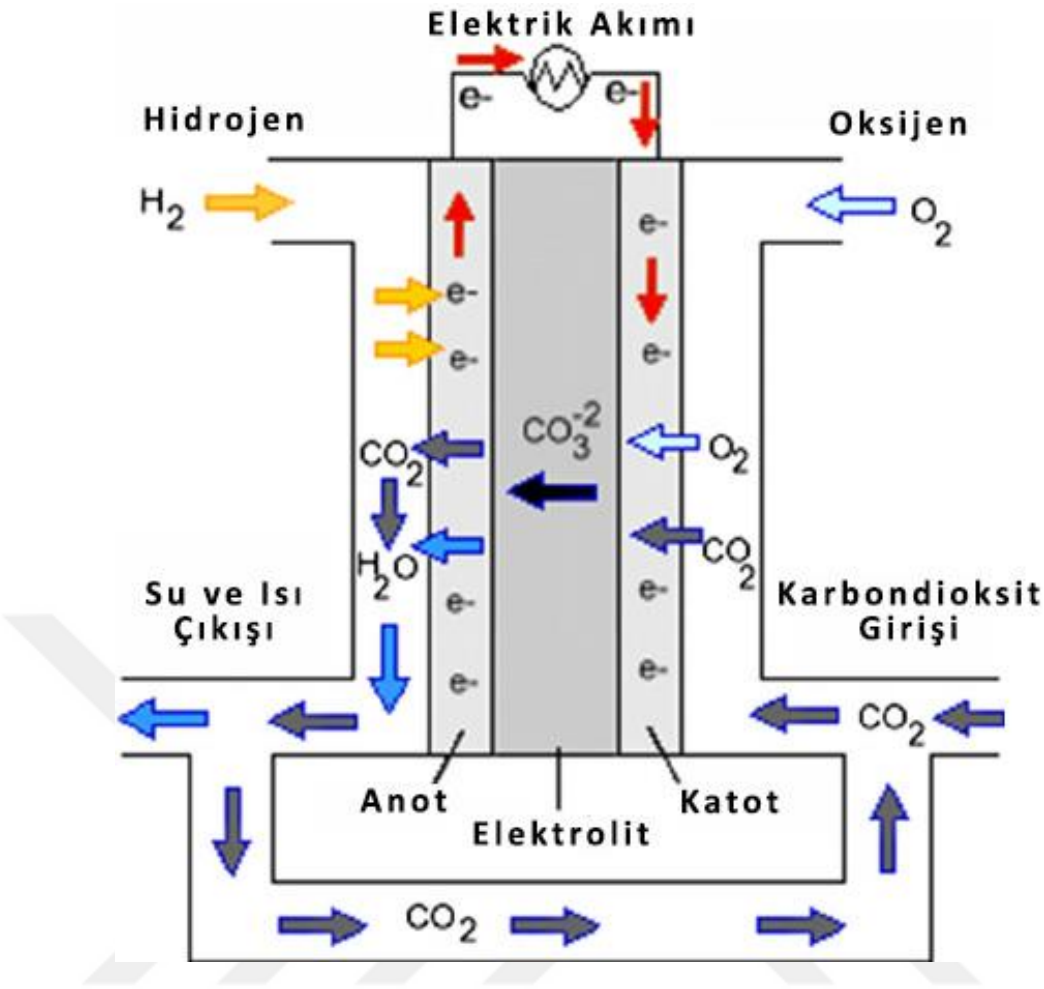
gerekmektedir. En büyük sıkıntıları kısa ömür ve yüksek maliyettir. Elektrik santralları gibi üretim tesislerinde kullanılmaktadırlar[17].

2.2.3 Fosforik Asit Yakıt Hücresi

Yakıt pillerinin bu ismi almasının sebebi elektrolit olarak fosforik asit kullanılmasındandır. Bu tip yakıt pilleri 220°C –230^{o}C sıcaklığa kadar çalışabilmektedir. Düşük miktarda karbon monoksit gazı açığa çıkarmaktadır. Üzerinde en fazla çalışma yapılan yakıt pili çeşitlerinden birisidir. Amerika, Kanada gibi gelişmiş ülkelerde fosforik asitli yakıt pili ile çalışan ve 200 kW güç üretebilen yakıt pili tesisleri kurulmuştur.

United Technologies Corporation isimli bir firmanın Almanya Bocholt'ta St. Agnes Hastanesinde kurduğu fosforik asit yakıt hücresi sistemi 52000 saatten fazla çalışmıştır [26].

PAFC ile güç üretmek diğer avantajlarının aksine maliyet açısından bir dezavantaj oluşturmaktadır. 200 kW güç üreten bir sistem kurulumu için maliyet kW başına 5000$ iken geleneksel gaz türbinlerinde ise maliyet 500$ ile 1000$ arasındadır [27]. Bu maliyet farkına rağmen enerjinin sürekliliğinin önem arz ettiği hastane, banka gibi yerlerde kullanılmakta ve kamuya ait yerlerdekilerin bir kısmı yerel yönetimler, hükümetler ve sivil toplum kuruluşları tarafından sübvanse edilmektedir.



Şekil 2.3 Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi [25]

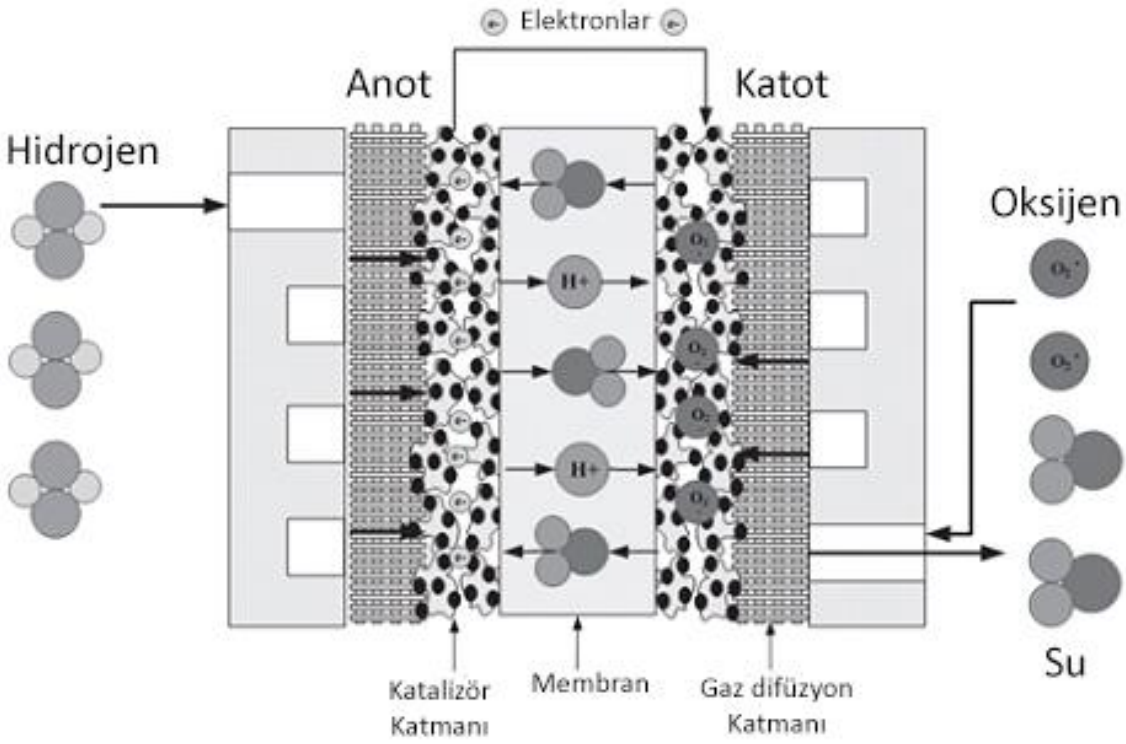
2.2.4 Katı Oksit Yakıt Hücresi

Bir katı oksit yakıt hücresi (SOFC) bir anot ve katot ile onları ayıran elektronların geçişine izin vermeyip katotta oluşan oksijen anyonları geçiren bir elektrolitten meydana gelir. Elektrolit olarak iyonik olarak geçirgen bir katı oksit bulunur. Katottan beslenen havadaki oksijen katotta indirgendikten sonra anottan sisteme giren yakıtı yükseltger.

SOFC'lerin yüksek verim, uzun süreli dayanım, yakıt esnekliği ve nispeten daha düşük maliyetleri onları avantajlı bir hale getirirken en temel dezavantajları ise uzun başlama süreleri ile yüksek sıcaklıklarda çalışmalarından kaynaklanan malzemelerin mekanik ve kimyasal uygunluk sorunlarıdır [18].

2.2.5 Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi

İlk kez 1960'ların uzay programlarında güç kaynağı olarak kullanımını gördüğümüz bu yakıt hücreleri kullanılan membranın polimer olmasından dolayı polimer elektrolit membran yakıt hücreleri olarak da bilinirler. Anoduna beslenen hidrojen yükseltgenirken katottan gelen oksijen ise indirgenir. Yükseltgenme sırasında ortaya çıkan protonlar membran vasıtasıyla katoda geçerek oksijenle birleşir ve su açığa çıkar. Membran elektriksel olarak geçirgen olmadığı için hidrojenden kopan elektronlar başka bir yol izleyerek elektrik akımını oluştururlar. Şekil 2.4'te bu olaylar şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Proton Değişim Membranlı yakıt hücresi [28]

PEMFC'de gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları ise aşağıdaki denklemler ile ifade edebiliriz:

Anot Reaksiyonları: $2H_2 \longrightarrow 4H^+ + 4e^-$ (2.3)

Katot Reaksiyonları: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2\,H_2O$ (2.4)

Toplam Hücre Reaksiyonu: $2H_2 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O$ (2.5)

PEM yakıt hücrelerine benzer bir yakıt hücresi türü de direkt metanol yakıt hücreleridir. Bu yakıt hücreleri de polimer bir elektroda sahip iken katotta gerçekleşen reaksiyonları farklıdır:

Anot Reaksiyonları: $CH_3OH + H_2O \longrightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e$ (2.6)

Katot Reaksiyonları: $3/2\ O_2 + 6H^+ + 6e^- \longrightarrow 3\ H_2O$ (2.7)

Toplam Hücre Reaksiyonu: $CH_3OH + 3/2\ O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O$ (2.8)

Bir PEMFC, temel olarak ortasında bir membran ile anot ve katot olmak üzere onun iki tarafında da bulunan içten dışa doğru gaz difüzyon tabakası (GDL), katalizör tabakası ve bipolar tabaka ya da diğer bir adı akım toplayıcı olan parçalardan oluşur. Yapılan bazı çalışmalarda yakıt hücresinin performansını artırmak için soğutma kanalları ve mikro gözenekli tabaka kullanıldığı da görülmüştür. Bu parçalardan her birinin fiziksel özellikleri, görevleri ve yakıt hücresi performansına etkileri farklıdır.

Bipolar tabaka diğer adıyla akım toplayıcıların PEM yakıt hücresinde birkaç işlevi bulunmaktadır. Farklı malzemelerden yapılabilen akım toplayıcılarda aranan başlıca özellikler gaz geçirmezlik, elektrik ve ısıyı iletim, kimyasal kararlılık, mekanik dayanıklılık, düşük maliyet ve kolay şekil verilebilme olarak sıralanabilir. Gaz akış kanalları da akım toplayıcıların içinde yer alır. Bu kanallar çoğunlukla akım toplayıcıların yüzeyi oyularak oluşturulur. Akım toplayıcılar elektronların taşınması için ana yol olarak görev yapmakta olup elektrik iletkenliğinin iyi olması gerekmektedir. Aksi takdirde yakıt hücresi sisteminde dirençten kaynaklı enerji kaybı yüksek olacaktır.

Yakıt hücrelerinin mekanik olarak stabil olmasını sağlayan akım toplayıcılar kimyasal olarak da kararlı olacak şekilde yapılmalıdır. Yakıt hücresi içerisinde tepkimeye giren hidrojen ve oksijenle temas ettiklerinde çözünmemesi ve korozyona uğramaması, PEM yakıt hücrelerinin nispeten yüksek sıcaklıklarda çalıştığı ve bunun da korozyon hızını arttırdığı göz önüne alındığında bu açıdan önemlidir.

Reaksiyon sonucu yakıt hücresinde açığa çıkan ısının sistemden özellikle de membrandan uzaklaştırılması da membrandan meydana gelecek aşırı ısınma nedeniyle oluşabilecek bozulmalardan kaçınmak için büyük önem taşımaktadır. Son olarak akım toplayıcıların

yapıldığı malzemenin kolay şekil verilebilmesi ve düşük maliyetli olması da yakıt hücrelerinin ticarileşmesi için gerekli özelliklerdir.

Grafit, akım toplayıcılar için yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir. Düşük sıcaklıklarda çalışan yakıt hücrelerinde kullanmak için mekanik, elektriksel ve termal özellikleri iyidir. En özenli özelliği ise kimyasal olarak kararlı olması sayesinde hidrojen ve oksijenle reaksiyona girmemesi ve zarar görmemesidir. Bütün bu iyi özelliklerinin yanında grafit çok kırılgn bir yapıya sahiptir. Bu da ufak bir darbede bile çatlama ve kırılma gibi sorunlara neden olabilir. Yeterli mekanik dayanımı sağlayarak bu tarz bir sorunla karşılaşmamak ve yakıt hücresini ticari uygulamasını da olarak mümkün kılabilmek için kalın grafit plakaları kullanmak ise genel büyüklüğü, ağırlığı ve maliyeti arttıracağından istenen bir durum değildir.

Metaller, akım toplayıcı materyali olarak kullanıldığında grafite iyi bir alternatif olabilirler. Birçok metal presle şekil verilecek kadar esnektir. Bu sayede gaz akış kanalları kolayca üzerine işlenebilir. Ayrıca metaller iyi bir elektrik ve ısı iletimi de sağlarken mekanik sağlamlıkları da üst düzeydedir. İnce bir tabakanın bile yeterli dayanıklılık sağlaması malzeme maliyeti açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu iyi yönlerinin yanında ne yazık ki metallerin birçoğu hidrojen ve oksijene maruz kaldıklarında tepkime verirler ve zarar görüp bozulurlar. Bazı metallerde ise hidrojen gevrekliği veya kırılganlığı da denilen hidrojenin metale nüfuz etmesi nedeniyle oluşan anlık kırılmalar görülebilir. Yüksek sıcaklıkta oksijene maruz kalan metaller ise yükseltgenerek elektriksel, mekanik ve termal özelliklerini kaybetmeye açıktırlar. Bu korozif olaylar metalleri akım toplayıcılarda kullanmadaki en büyük engellerdir.

Akım toplayıcılarla ilişkili yakıt hücrelerinin bir diğer kısmı gaz akış kanallarıdır ve onların oluşturduğu akış alanıdır. Bu kanallar genellikle akım toplayıcıların üzerinde oluşturulan boşluklardır. Ancak büyüklük, şekil, uzunluk gibi parametrelerle çok çeşitli hale gelmektedirler. Her birinin avantajları ve dezavantajlarının olduğu birçok kanal ve akış alanı tasarımı olmakla birlikte yakıt hücresinin performansını etkileyen önemli bir faktördür.

Akış alanının amacı büyük basınç farkı oluşturmadan reaksiyona girecek gazların reaksiyon alanlarına düzgünce dağılması ve oluşan ürünlerin sistemden uzağa taşınmasıdır. Çünkü büyük basınç farkı demek daha güçlü pompalar ve daha fazla maliyet manasına gelir [26].

Reaksiyon gazları bir miktar ısı taşıyabilir. Bu nedenle akış alanı yakıt hücresinin termal özelliklerini etkileyebilir.

Akış alanın bir diğer önemli rolü ise oluşan suyun yönetilmesidir. Anottan gelen hidrojen ile katottan gelen oksijenin birleşimi sonucunda açığa çıkan suyun sisteme hem faydası hem de zararı olabilmektedir. Sistemdeki suyun bir miktarı membranın nemli kalmasını sağlayarak membran performansını artırırken suyun fazla olması durumunda ise GDL ve CL gözeneklerine dolarak reaktant geçişine engel olur. Böylece reaksiyona giren madde miktarı azalır ve elde edilen elektrik enerjisi miktarı azalır. Bu nedenle akış kanallarının sistemdeki fazla suyu uzaklaştırması büyük önem arz etmektedir.

GDL, yakıt hücresinde bipolar tabakadan sonraki dıştan içe ikinci katmandır. Gazlarla reaksiyona girmemesi, mekanik dayanıklık ile ısı ve elektriği iletmesi özellikleriyle de bipolar tabakaya benzerlik gösterir. GDL'in diğer önemli özelliği ise hidrofobik olması yani suyu sevmemesidir. Sistemde oluşan suyu kendinden uzaklaştırması sistem performansı açısından büyük önem arz etmektedir.

Gözenekli ve geçirgen bir yapıya sahip olan GDL yakıt hücresinde reaktantların katalizör üzerine düzgün yayılmasını sağlamaktadır. Tipik bir GDL 0.1-0.3 mm kalınlığında karbon kağıt veya karbon bezden yapılmaktadır.

GDL'in açığa çıkan suyun uzaklaştırabilmesi için hidrofobik yapıda olması gerektiğinden bahsetmiştik. Bu kapsamda GDL, Teflon olarak bilinen politetrafloretilen (PTFE) malzemeyle kaplanır. Sistemdeki suyun uzaklaştırılması konusunda önemli bir görevi olan GDL suyun bir miktarının da sistemde kalarak membranın nemli tutulmasına yardımcı olur.

Bilindiği üzere yakıt hücrelerinde ortaya çıkan enerji bir kimyasal reaksiyon sonu ortaya çıkmaktadır. Yavaş reaksiyon kinetiği reaksiyon hızını düşürerek yakıt hücresi performans kayıplarına yol açmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda çalışmak reaksiyon hızını artırsa da bu sıcaklık artışı membran yapısının bozulmaması adına sınırlı miktarlarda yapılabilmektedir. Bu nedenle reaksiyon hızını artırmak için diğer bir alternatif olan katalizör kullanımı devreye girmektedir.

Yakıt hücrelerinde bu kataliz işlemi katalizör tabakası (CL) ile gerçekleştirilmektedir. Anot ve katotun her ikisinde de yer alır ve yakıt hücresi yarı reaksiyonlarının gerçekleştiği

kısımdır. GDL ile membran arasında yer alan bu yakıt hücresi bileşeni, platin içerikli bir tabaka olarak membrana veya GDL'e preslenir. Temel amaç platin parçacıklarının membrana yakın olmasıdır.

Katalizör tabakasının etkinliğinin optimize edilmesi ve güç üretiminde verimlilik için platin karbon tozundan bir tabaka üzerine yayılarak yüzey alanı artırılmaktadır. Bu metod ticari olarak bulanabilen katalizör tabakalarının genelinde kullanılan yöntemdir [29].

Birinci nesil PEMFC'lerde katalizör tabakaları olarak kullanılan PTFE'ye bağlı platin katalizörler üst düzey uzun dönem performans göstermelerinin yanında yüksek maliyetliydiler [30]. Zira bu katalizör tabakaları pahalı olan platin metalinden 4 mg/cm^2 gibi bol miktarda içermekteydiler. İlerleyen yıllarda yapılan çok sayıda çalışma ile bu miktar önce 0.4 mg/cm^2'ye düşmüş iken kullanılan püskürtme yöntemi sayesinde bu miktarın 0.014 mg/cm^2'ye kadar düşürüldüğü görülmüştür [31].

Yakıt hücresi membranının bir PEMFC'nin en önemli bileşeni olduğunu söylemek yanlış olmaz. Zira PEM yakıt hücresi adını da bu membrandan, polimer elektrolit membran (polymer electrolyt membrane) ya da diğer ismiyle proton değişim membran (proton exchange membrane), almaktadır.

Membranın temel görevi protonların (H^+ iyonlarının) geçişini sağlamak ve bunun yanı elektriksel bir yalıtkanlık göstererek elektronların geçişini engellemektir. Kimyasal ve mekanik açıdan stabil olması da yakıt hücresi yığınları söz konusu olduğunda membrandan aranan özelliklerdendir. Bir proton değişim membran yakıt hücresindeki membrandan beklenen protonların düzgünce dağıtılması ve iletilmesi ile bu işlem sırasında reaksiyona girmiş, reaksiyona girmemiş veya inert gazların diğer tarafa geçmesini engellemektir.

2.3 Yakıt Hücrelerinin Kullanım Alanları

Birkaç watttan yüzlerce kilowatt'a kadar enerji üretebilen yakıt hücreleri bu özellikleri sayesinde elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan hemen her yerde kullanılabilmektedir. Hem sabit hem de hareketli sistemlere enerji üretmekte kullanılan yakıt hücrelerinin kullanım alanlarını ulaşım uygulamaları, yerleşik uygulamalar ve yedek güç uygulamaları olarak üçe ayırabiliriz.

Bu üç uygulamada da kullanılan yakıt hücresi sistemlerinin birbiriyle aynı olmadığını söylemek mümkündür. Her sistem kendine özgü özelliklere ihtiyaç duymaktadır. Örneğin, ulaşım uygulamalarında yakıt hücresinin boyutu büyük önem taşırken yerleşik uygulamalarda boyut kritik bir özellik değildir. Çizelge 2.2'de farklı uygulamalarda ihtiyaç duyulan özellikler kısaca özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 Yakıt hücresi uygulamaları özet tablosu

	Ulaşım	**Yerleşik Uygulamalar**	**Yedek Güç Uygulamarı**
Güç Çıkışı	50-100 kW	1-10 kW & 200 kW	1-10 kW
Çalışma Ömrü	5000 saat	> 40000 saat	<2000 saat
Yüksek Verim	Kritik	Kritik	Kritik değil
Hızlı Başlangıç	Önemli	Önemli değil	Önemli
Çalışma	Kesikli	Sürekli	Kesikli
Tercih Edilen Gerilim	>300 V	110/220 VAC	24 ya da 48 VDC veya 110/220 VAC
Boyut ve Ağırlık	Kritik	Kritik değil	Kritik değil
Maliyet	< 50$ / kW	< 1000 $ / kW	< 5000 $ / kW

2.3.1 Ulaşım Uygulamaları

Başlıca otomobil üreticilerinin neredeyse tamamının bir yakıt hücresi ile çalışan araç prototipine sahip olduğunu görmekteyiz. Bununla birlikte bazı üreticiler ticari üretime geçmiş bulunmakta. Özellikle Uzak Doğu firmalarının bu alanda öncü olduğu görülmektedir. İlk olarak Japonya'da satışa sunulan modellerin bazılarının Avrupa'da satışa sunulduğu bazılarının ise yakın zamanda satışa sunulacağı üreticiler tarafından duyurulmuştur [32, 33]. Şekil 2.5'de yakın zamanda Avrupa'da satışına başlanacak yakıt hücreli otomobiller görülmektedir.



Şekil 2.5 Avrupa'da satışa çıkan/çıkmak üzere olan araçlar (soldan sağa) Honda Clarity [34],Toyota Mirai [35]

1990'lı yıllarda başlayan yakıt hücreli otomobil üretme yarışı günümüzde de devam etmektedir. Şirketleri bu alana yönlendiren en öenmli etmenlerin verimlilik, düşük veya sıfır karbon emisyonu ve yakıtın farklı kaynaklardan sağlanabilmesi olduğu söylenebilir. Bu konudaki en önemli engellerin ise yakıt hücresi ve kullanılacak olan hidrojen maliyetleri olduğu görülmektedir.

Yakıt hücrelerinin araçlara sağladığı güç birkaç farklı yolla olabilimektedir [37]:

1. Yakıt hücresi aracın ihtiyaç duyduğu tüm enerji gereksinimini karşılamak üzere bulunmaktadır. Bu sistemde küçük boyutlu bir batarya bulunabilir ancak bu batarya sadece başlangıçta çalışmaktadır. Bu sistem yapısı sadece direkt hidrojen kullanan yakıt hücresi sistemleri için mümkündür. Aksi halde gerekli dinamik tepkiyi veremeyecektir.
2. Yakıt hücresi aracın sadece temel yükünü sağlayacak boyutta olabilir. Fazla enerji bataryalardan veya ultrakapasitör gibi cihazlardan sağlanır. Paralel-hibrid bir sistem olarak kabul edilebilecek bu sistemde aracın yol alması için gereken enerji yakıt hücresi tarafından sağlanırken hızlanma gibi yoğun enerji gereken durumlarda bataryalar enerji sağlar. Bataryanın sistemde bulunması ani yük değişikliklerine hızlı cevap verilmesi gibi bir avantaj sağlarken fazladan maliyet, yük ve hacim gibi dezavantajları da bulunmaktadır.
3. Bir diğer yakıt hücreli araç sisteminde ise yakıt hücresi sadece bataryaları şarj etmekte kullanılır. Aracın çalışması için gereken gücün tamamı ise bataryalar tarafından sağlanır. Bu sistem de seri-hibrid yapı olarak değerlendirilebilir ve paralel-hibrid sistemle benzer avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

4. Yakıt hücresi aracın hareketine doğrudan bir katkı sağlamaz, yardımcı bir güç olarak görev yapar ve sadece aracın elektrik sistemini idare eder. Bu yapı özellikle soğutucu veya dondurucu ünitesinin bulunduğu kamyon vb. araçlar için öne çıkmaktadır.

Otobüsler ise yakıt hücresi konusunda otomobillerden bazı farklılıklar göstermektedir. Başlıca fark ihtiyaç duyulan gücün büyüklüğünden gelmektedir. Diğer önemli fark ise çok sayıda dur-kalk yaparak çalışmalıdır. Yine de yakıt hücresi kullanan bir otobüs, ortalama yakıt ekonomisi açısından dizel motorlu bir otobüsten neredeyse %15 daha iyidir [38]. Otobüslerin bir filo halinde ve merkezi bir tesisten yönetilmeleri de hidrojen dolumunu kolaylaştırmakta olan bir etmendir.

Otobüslerin yakıt depoları, üzerlerinde yer alan 350 bar basınçlı gaz silindirleridir. Neredeyse tüm otobüslerde bu şekilde olan yakıt depoları yer konusunda problem olmaktan çıkarken hidrojenin havadan hafif olması nedeniyle de güvenli addedilmektedir.

Yakıt hücresi kullanan otobüslerin dizel otobüslere nazaran en büyük avantajları ise sıfır karbondioksit emisyonu ile çalışmalarıdır. Bu konu özellikle hava kirliliği sorunu bulunan ve nüfus yoğunluğu fazla şehirlerde önem arz etmektedir. Bu kapsamda Clean Urban Transport for Europe (Avrupa için Temiz Şehiriçi Taşımacılık) programı ile Amsterdam, Barselona, Hamburg, Londra, Luksemburg, Madrid, Porto, Reyjavik, Stokholm ve Stutgart gibi önemli şehirlerinde hidrojenle çalışan otobüsler kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2.6'da hali hazırda Londra'da kullanılmakta olan otobüs görülmektedir.

Yakıt hücreli otobüslerin ticarileşmesinin önündeki en büyük engeller maliyet ve dayanıklılıktır [35]. Üretimin az sayıda olması nedeniyle kilowatt başı otobüs motoru maliyeti otomobüs motoru maliyetinden yüksek olmaktadır. Ayrıca yılda 6000 saat gibi bir süre çalışan otobüsler için uzun ömürlü motor beklentisi dur-kalklar nedeniyle kesikli çalışmayla birleştiğinde motor üretiminde önemli zorluklara neden olmaktadır.



Şekil 2.6 Londra'da kullanılan yakıt hücreli otobüs Pulsar 2 [38]

Otomobiller ve otobüslerin dışında yakıt hücresinin başta tren olmak üzere forklift ve havaalanı yer servisleri araçları gibi farklı araçlarda da kullanımı üzerine çalışmalar mevcuttur. Bu araçların çoğunluğu prototip olmakla beraber Almanya, Hydrail adı verilen ve testleri Mart 2017'de tamamlanan hidrojen yakıtlı trenden 60 adet alarak 2018 yılı başlarında kullanmayı planlamaktadır [39].

2.3.2 Yerleşik Uygulamalar

Ulaşım araçlarında yakıt hücrelerinin kullanımına yönelik çalışmalar ve ilgi daha yoğun olsa da sabit sistemlerde yakıt hücresi kullanımı daha çok fırsata sahip bir piyasadır. İki sistemin de temel hedefi daha yüksek verim ile daha az karbon salınımıdır. Farklılılar ise yakıt seçimi, güç koşullandırma ve ısı uzaklaştırma konularıdır [40].

Bunun yanında yerleşik sistem uygulamalarının yapısal farklılıkları da bulunmaktadır. Örneğin, otomobillerde kullanılan yakıt hücrelerinde boyut ve ağırlık çok önemli bir husus iken yerleşik sistemlerde kullanılan yakıt hücreleri için dikkate alıncak kadar bir önem arz etmemektedir. Yine otomobil sistemlerinde hızlı başlangıç önemliyken yerleşik sistemlerde acil durum veya yedek güç olarak kullanılan yakıt hücreleri haricindekiler için zamansal bir kısıt söz konusu değildir. Son olarak otomobillerde kullanılan yakıt hücrelerinin çalışma ömrü 3000 - 5000 saat civarında olmakla beraber her ne kadar otobüs ve kamyonlarda bu süre biraz daha uzun olsa da yerleşik yakıt hücrelerinin çalışma ömürlerinin 40000 – 80000 saat (3-5 yıl) civarında olması beklenmektedir.

Yakıt hücrelerinin yerleşik sistemlerde kullanımı ise birkaç farklı şekilde olabilmektedir [40]:

- Elektrik dağıtım şebekesinin olmadığı yerlerde veya şebekeden sağlanan elektrikten daha uyguna mal edilmesi nedeniyle şebekenin yerine tek güç kaynağı olarak
- Elektrik şebekesi ile eşgüdümlü olarak baz yükü sağlamak veya pik noktalardaki farkları karşılamak amacıyla
- Yenilenebilir enerji kaynakları kullanan bir sistemde kaynakla kombine şekilde, kaynağın ihtiyacı karşılayamadığı durumda (rüzgâr türbinleri için rüzgârın olmadığı veya fotovoltaik paneller için havanın bulutlu olduğu veya gece vakti) devreye girmek suretiyle
- Şebeke elektriğinin arıza, bakım vb. sebepler nedeniyle kullanılamaz durumda olduğu hallerde yedek veya acil güç kaynağı olarak

2.3.3 Yedek Güç Uygulamaları

Yedek güç, sisteme ani ve kesintisiz güç sağlayan cihaz olarak tanımlanabilir. Telekomünikasyon sistemleri, bilişim teknolojileri ve bilgisayarlar, üretim prosesleri, güvenlik sistemleri, trafo merkezleri ve demiryolu uygulamaları yedek güç önemli olduğu başlıca yerlerdir. Genel olarak ise enerji kaybının üretkenlikte önemli bir düşüşe veya finansal bir kayba sebep olacağı yerlerde yedek gücün öneminin arttığı söylenebilir.

Yedek güç olarak kullanılan yakıt hücreleri genellikle yakıt olarak hidrojen kullanırlar. Tanklarda muhafaza edilen hidrojenin bittikçe yenilenmesi gerekmektedir. Bu da lojistik problemi olacağı gibi yeni bir iş kolunun doğmasına da sebep olabilir[35]. Bunun için alternatif sistem ise rejeneratif yakıt hücreleridir. Bu sistemde elektrik ihtiyacı şebekeden karşılanır durumda ve yakıt hücresi çalışmazken sistemde entegre olarak bulunan elektrolizer ile sistemde kullanmak üzere hidrojen üretilebilir. Böylece bir fazladan bir hidrojen kaynağına gereksinimi olmadan kullanılabilir.

Kullanım ömürleri açısından burada kullanılan yakıt hücrelerinin çalışma süreleri ortalama 2000 saatten az olmaktadır. Bu tür yakıt hücreleri güç kesintisi sırasında ise en fazla 8 saat sürekli çalışabilmektedirler [35]. Bununla birlikte yedek güç olarak kullanılan yakıt hücrelerinde verimlilik konusu diğer kullanım alanlarına kıyasla daha geri planda kalmaktadır.

Bu alanda kullanılacak yakıt hücrelerinde aranacak en önemli özelliklerden biri kesinti anında en kısa sürede devreye girerek sisteme güç beslemesi yapmasıdır.

2.4 Yakıt Hücrelerinin Avantajları-Dezavantajları

Gelecek vadeden bir alternatif enerji kaynağı olan ve birçok kullanım alanı bulunan yakıt hücrelerinin diğer enerji kaynaklarına göre üstünlüklerini kısaca şöyle sıralayabiliriz:

Yüksek Verim: Günümüzde kullanılan içten yanmalı motorlardan daha verimli olmaları yakıt hücrelerini otomotiv endüstrisi için cazip kılmaktadır. Ayrıca geleneksel enerji santrallerinden de verimli olduklarından merkezi olmayan bir sistemde enerji üretmek için tercih edilebilir.

Çok Düşük veya Sıfır Emisyon: Hidrojen kullanan yakıt hücreleri sıfır emisyon ile çalışmakta dışarı sadece kullanılmayan hava ve su vermektedir. Bu özellik sadece ulaşım için değil birçok kapalı mekân uygulaması için de önemli bir özelliktir. Ancak hidrojenin tam anlamıyla kullanılabilir olmaması nedeniyle bir yakıt dönüştürücünün bulunduğu sistemler ile metanol kullanan yakıt hücrelerinin çalışmaları sonucunda karbondioksit de dahil olmak üzere bazı emisyonlar görülecektir. Ancak bu emisyonlar diğer sistemlere kıyasla çok düşük seviyelerde olacaktır.

Enerjide Dışa Bağımlılığın Azaltılması: Yakıt hücrelerinde kullanılan hidrojenin üretimi için henüz ticari anlamda kabul edilebilir bir yöntem geliştirilememiş olsa da elektroliz gibi çok basit bir yöntemle sudan hidrojen elde etmek mümkündür. Bunun için de yenilenebilir enerji kaynakları, biyokütle vb kaynaklar kullanılarak hidrojen elde edilebilir. Böylece ülkemiz gibi petrol konusunda dışa bağımlı ülkelerde bu bağımlılığın azalması sağlanabilir.

Basitlik ve Düşük Maliyet: Tekrar eden bileşenlerin oluşturduğu tabakalardan meydana gelen yakıt hücrelerinin yapısının oldukça basit olduğu söylenebilir. Bu nedenle seri üretim sürecinde diğer enerji üreten sistemlerle aynı hatta daha düşük maliyette üretimi sağlanabilir.

Uzun Kullanım Ömrü: Yakıt hücrelerinin hareketli parçalardan meydana gelmemesi uzun ömürlü olmalarındaki en önemli etmendir. Günümüz teknolojisi ile üretilen yakıt hücrelerinin kullanım ömürleri olan 3000 - 5000 saat otomotiv alanında kabul edilebilir bir

değer olarak görülmekte iken yapılan geliştirmelerle yerleşik uygulamarda kullanılmak üzere 40000 ila 80000 saate kadar kullanım mümkün olabilmektedir.

Modülerlik: Basit ve modüler olan yapıları sayesinde daha fazla güç ihtiyacı olması halinde sadece sisteme yeni yakıt hücresi ilavesi ile bu sorun çözülebilmektedir. Çok iyi bir planlama ve zahmetli bir izin süreci ile kurulan elektrik santralleri göz önüne alındığında kapasite artışı bir hayli zor bir süreç gibi görünürken diğer yandan yakıt hücreleri ile enerji üretiminde sisteme eklenecek yeni yakıt hücreleri ile kolayca ve daha az maliyetle üretim kapasitesi artışı gerçekleştirilebilir.

Sessizlik: Yakıt hücrelerinin sessiz oluşu başta kapalı mekanlar olmak üzere taşınabilir güç ve askeri alanda kullanımı konusunda öne çıkarmaktadır.

Boyut ve Ağırlık: Çok çeşitli boyutlarda üretilebilme imkanı sunan yakıt hücreleri küçük elektronik cihazlardan büyük binalara kadar birçok alanda enerji üretimi için kullanılabilmektedir. Otomotiv sektörü için ise içten yanmalı motorlarla yakın boyut ve ağırlıkta olmaları nedeniyle tercih edilebilir olmaktadırlar.

Bu öne çıkan özelliklerinin yanında bazı dezavantajları da onların yeterince ticarileşmesi konusunda engel teşkil etmektedir:

Hidrojen: Gezegende en çok bulunan element olmasına rağmen elde edilmesi ve depolanmasının zor olması nedeniyle hala pahalı denebilecek düzeydedir. Özellikle hidrojen ya büyük ve ağır tanklarda ya da çok iyi yalıtılmış süper-soğuk halde şişelerde depolanabilir olması maliyeti arttıran en önemli unsurlardır.

Mevcut Altyapı: Günümüzde başta taşıtlar olmak üzere birçok yerde fosil yakıt kullanılmaktadır. Bu mevcut sistemden hidrojenin yakıt olarak kulladığı sistemlere geçmenin büyük bir maliyet getireceği öngörülmektedir.

Yanıcılık: Çok güçlü bir yakıt olan hidrojen aynı zamanda çok kolay alev alabilmekte olması nedeniyle büyük riskler de içermektedir. Hidrojen gazı %4 ila %75 gibi geniş bir konsantrasyon aralığında havada yanabilmektedir [40].

BÖLÜM 3

MATEMATİKSEL MODEL VE VALİDASYON

Bu bölümde yakıt hücresi simülasyonunun temelini oluşturan denklemlerden bahsedilip oluşturulan simülasyon modelinden elde edilen verilerin deneysel bir çalışma ile kıyaslanması yapılarak modelin geçerliliği test edilmiştir.

Bu simülasyon çalışılmasında Ansys Fluent programı tercih edilmiştir. Ansys Fluent'in bu çalışmada tercih edilmesinin nedeni programın üç boyutlu simülasyon ve modelleme alanında en kapsamlı program olarak kabul edilmesidir. Bununla birlikte programın gelişmiş ara yüzü simülasyon işlemlerini kolaylaştırmakta ve zorlukları azaltmaktadır. Ayrıca programın işlem hızı ve elde edilen sonuçları detaylı ve görsel olarak da sunabilmesi programın tercihi konusunda önemli bir etkendir.

Yapılan bu çalışmada Ansys Fluent programını kullanıldığından yeni bir matematiksel model oluşturma üzerine çalışma yapılmayıp programın içinde gömülü halde bulunan denklemler aracılığıyla bir simülasyon yapılmıştır. Bunun yanında program bu denklemler üzerinde değişiklik yapma imkânı da vermektedir. Ayrıca farklı denklemlerin de programa entegre edilerek simülasyon çalışması yapılması da mümkündür.

Modelin validasyon işlemi ise yapılan bir deneysel çalışmanın verileri ile aynı koşullar oluşturularak sonuçların kıyaslanması ile yapılacaktır. Çıkan sonuçlar karşılaştırılıp yapılan simülasyonun doğruluğu sınanacak ve kullanılan veriler, sınır şartları, ortam şartları ve yapılan tercihler sonraki simülasyon işlemleri için temel kabul edilecektir.

3.1 Denklemler ve Matematiksel Model

Yakıt hücresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara ilişkin denklemleri 2. Bölümde belirtilmiştir. Bu bölümde ise bu reaksiyonlara ilişkin momentum, ısı ve kütle transferi ile elektrokimyasal denklemler, yapılan kabuller ve sınır koşulları anlatılacaktır.

Bölümün girişinde belirtildiği gibi bu tez çalışmasında Ansys Fluent ve onun Fuel Cell and Electrolysis Model eklentisi kullanılmasından dolayı yeni bir denklem türetmek veya matematik model oluşturmak üzerine bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle öncelikle programın kullandığı denklemlerden ve sınır koşullarından söz edilmesi uygun olacaktır.

Elektrokimyasal prensiplere dayanan yakıt hücresine ilişkin hesaplarda temel olan anot ve katot reaksiyonları ile bu reaksiyonların hızlarıdır. Bu reaksiyonların arkasındaki itici güç ise yüzey aşırıgerilimidir. Yüzey aşırıgerilimi, katının faz gerilimi ile membranın faz gerilimi arasındaki farktır. Bu kapsamda iki gerilim denklemi Ansys Fluent Fuel Cell and Electrolysis Model'de çözülür. Bu denklemlerden ilki katı iletken materyaldeki elektron hesabında kullanılan denklem (Denklem 3.1) ve membrandaki iyon transferi hesaplamalarında kullanılan denklemdir (Denklem 3.2) [41].

$$\nabla(\sigma_{sol} . \nabla\emptyset_{sol}) + R_{sol} = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla(\sigma_{mem} . \nabla\emptyset_{mem}) + R_{mem} = 0 \quad (3.2)$$

3.2 Ansys Fluent'te Yakıt Hücresi Simülasyonu Aşamaları

Bir yakıt hücresi simülasyonu temel olarak üç adıma ayırılabilir: Geometrinin oluşturulması, sonlu sayıda hücrelere bölme ve sınır ve ortam koşullarının tanımlanması. Bu üç aşama Ansys Fluent'te üç modül yardımıyla yapılmaktadır: Geometry, Meshing ve Fluent. Bu kısımda söz konusu modüller açıklanacaktır.

3.2.1 Geometry

Bir simülasyon çalışması için ilk adım yakıt hücresinin geometrisinin oluşturulmasıdır. Simülasyon için kullanacağımız Ansys 15.0 programı geometriyi oluşturmak için kendi içinde bir bölüm içerdiğinden Autocad, Solidworks gibi üç boyutlu çizim programlarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Lakin Ansys programının bazı eski sürümlerinde bu özellik mevcut

olmadığından geometrinin farklı bir programda oluşturup simülasyona aktarılması gerekebilir.

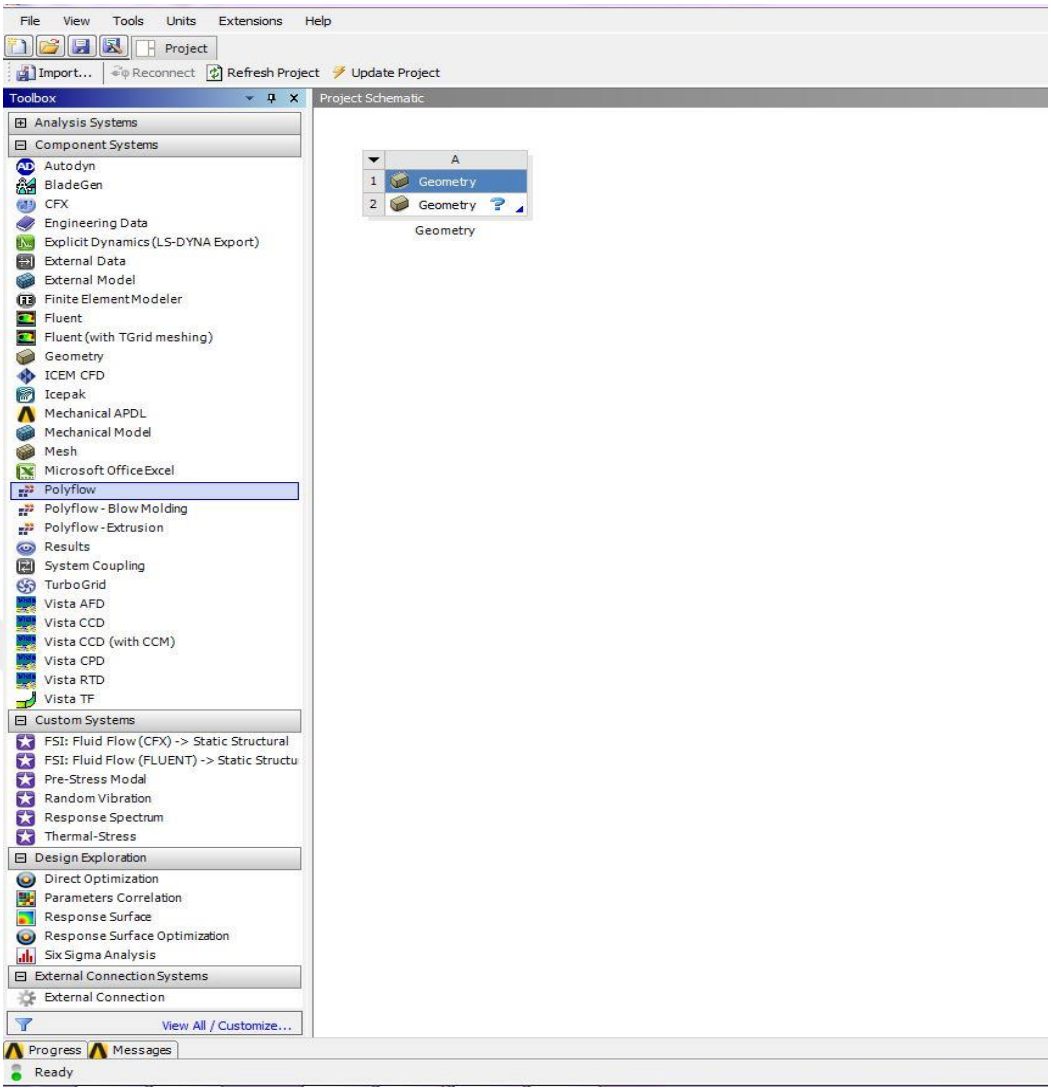
Geometrinin hatasız olarak oluşturulması simülasyonun ilk aşamasıdır. Bu tez çalışmasında simülasyonun doğrulaması için Siegel'in yapmış olduğu çalışmadaki yakıt hücresi geometrisi ve verileri kullanılmıştır [42]. Bu çalışmasında karmaşık bir geometriye sahip olmayan bir model kullanması ve çalışmasındaki parametreleri de makalesinde ayrıntılı olarak yazması bizim bu çalışmayı referans almamızda etkili olmuştur.

Ansys ilk çalıştırıldığında bir çalışma alanı (Workbench) açılmaktadır. Geometriyi oluşturmak için bu alana bir geometri modülü ekleyip çizime başlanabilir. Şekil 3.1'de çalışma alanı ve geometri modülü görülmektedir.

Üç boyutlu bir geometrinin oluşturulması ilk olarak iki boyutlu eskizler olarak çizilip daha sonra yükseklikler tanımlamakla gerçekleştirilmektedir. Üç boyutlu bir simülasyon oluştururken çizim aşamasında oluşturulan parçaların, bir yakıt hücresini düşünüldüğünde tabakaların, temas etmesi gerekiyorsa temas edecek şekilde konumlandırılması, tek seferde çizilmesi zor parçaların ayrı ayrı çizildikten sonra birleştirilmesi ve birbirinden ayrı veya birbiri içine geçmiş halde oluşturulmaması gibi hususlar dikkat edilmesi gereken noktalardır.

3.2.2 Meshing

Ansys oluşturulan geometrilerin çözümü için sonlu hacim yöntemini kullanmaktadır. Sonlu hacim yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerin cebirsel denklemler halinde sunulması ve değerlendirilmesi için kullanılan bir yöntem olup örgüden (mesh) oluşturulmuş geometrideki birbirinden farklı noktalarda ilgili değerlerin hesaplanmasına dayanır. Sonlu hacim ise her bir örgü üzerindeki her bir düğüm noktasını çepeçevre saran ufak hacimli yapıya denir [43].

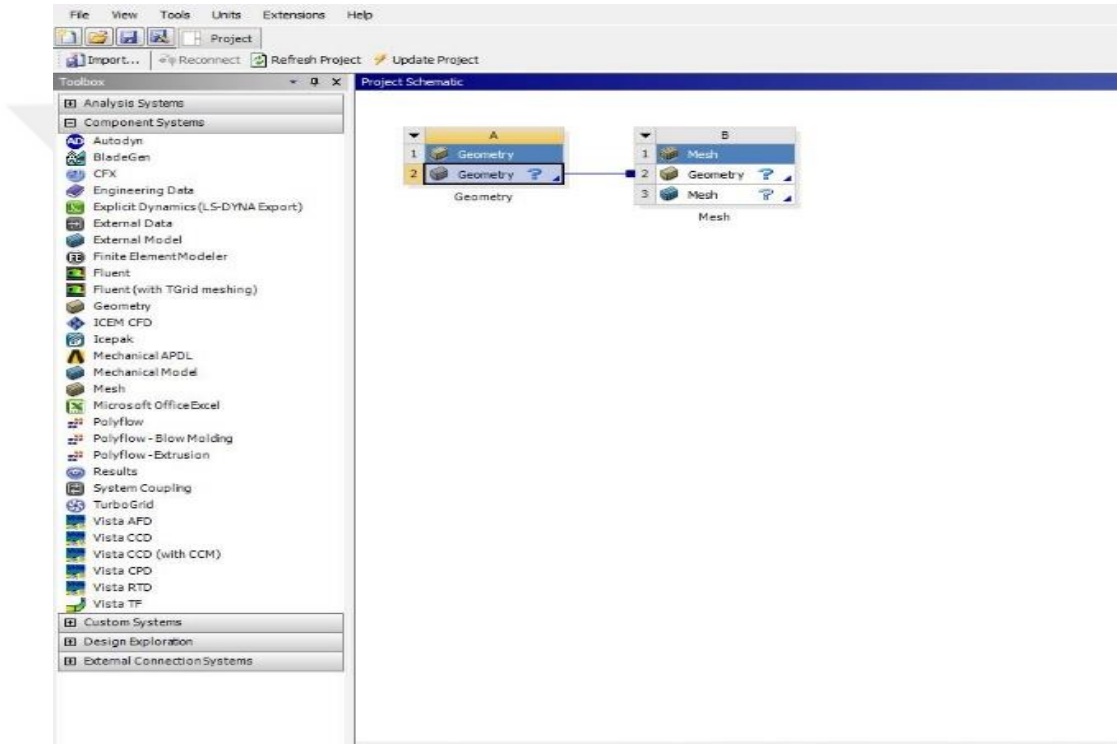


Şekil 3.1 Çalışma alanı ve geometri modülü

Oluşturulan örgülerin adedi ve kalitesinin hesaplamalar üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir. Örgü adedinin hesaplama süresi üzerinde etkisi bulunurken düşük nitelikli örgülerin yanlış sonuçlara yol açacağı ve simülasyonun çalışmamasına sebep olacağı bilinmelidir. Örgülerin nitelik açısından kontrolü için birkaç yöntem bulunmakla birlikte bu çalışmada "orthogonal quality" ve "skewness" (çarpıklık) değerleri göz önüne alınmıştır. Orthogonal quality 0 ila 1 arasında bir değer olmakla birlikte istenen durum 1'e yaklaşmasıdır [44]. Skewness ise maksimum, minimum ve ortalama değerleri olmak üzere üç şekilde program tarafından hesaplanmaktadır. Skewness da 0 ila 1 arasında değerler almakta olup ortalama değerinin 0.95'ten küçük olması simülasyonun çalışılabilir olması için gereklidir. Ayrıca 0'a yaklaşması örgü kalitesinin yüksek olduğunu ifade eder [45].

Bununla birlikte en-boy oranı olarak ifade edilebilen “aspect ratio” değeri de yine mesh kalitesinin ölçülmesi için kullanılan bir değerdir.

Örgüleme işlemine de yine çalışma alanında bir modül oluşturulmakla başlanır. Modülün içerisinde geometri ve mesh olarak iki kısım bulunmaktadır. Programa geometriyi daha önce anlatıldığı gibi ilk aşamada oluşturulan modülden almasını veya dışarıdaki bir kaynaktan alınmasını söylenebilir. Burada yapılan çalışmada Ansys içerisinde çizilen geometriyi alması belirtilmiştir. Şekil 3.2’de “Mesh” modülü ve “Geometry” modülüne bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.2 Mesh modülü ve Geometry modülüne bağlantısı

3.2.3 Fluent

Fluent bölümü, simülasyonun sınır koşullarının girilip hesaplamalı akışkanlar dinamiği denklemleri çerçevesinde çözümü yapılan ve sonuçların elde edildiği bölümüdür. Daha öncede belirttiğimiz gibi Ansys simülasyon alanında en kapsamlı programlardan biri belki de özellikle üç boyutlu simülasyonlar için en kapsamlısıdır. Bunu burada tekrar etmemizin sebebi Fluent’in içerisinde gelen yakıt hücresi modülüdür. Bu modül içerisinde tanımlı olan denklemlerle yakıt hücresi simülasyonu daha kolay gerçekleştirilebilmektedir.

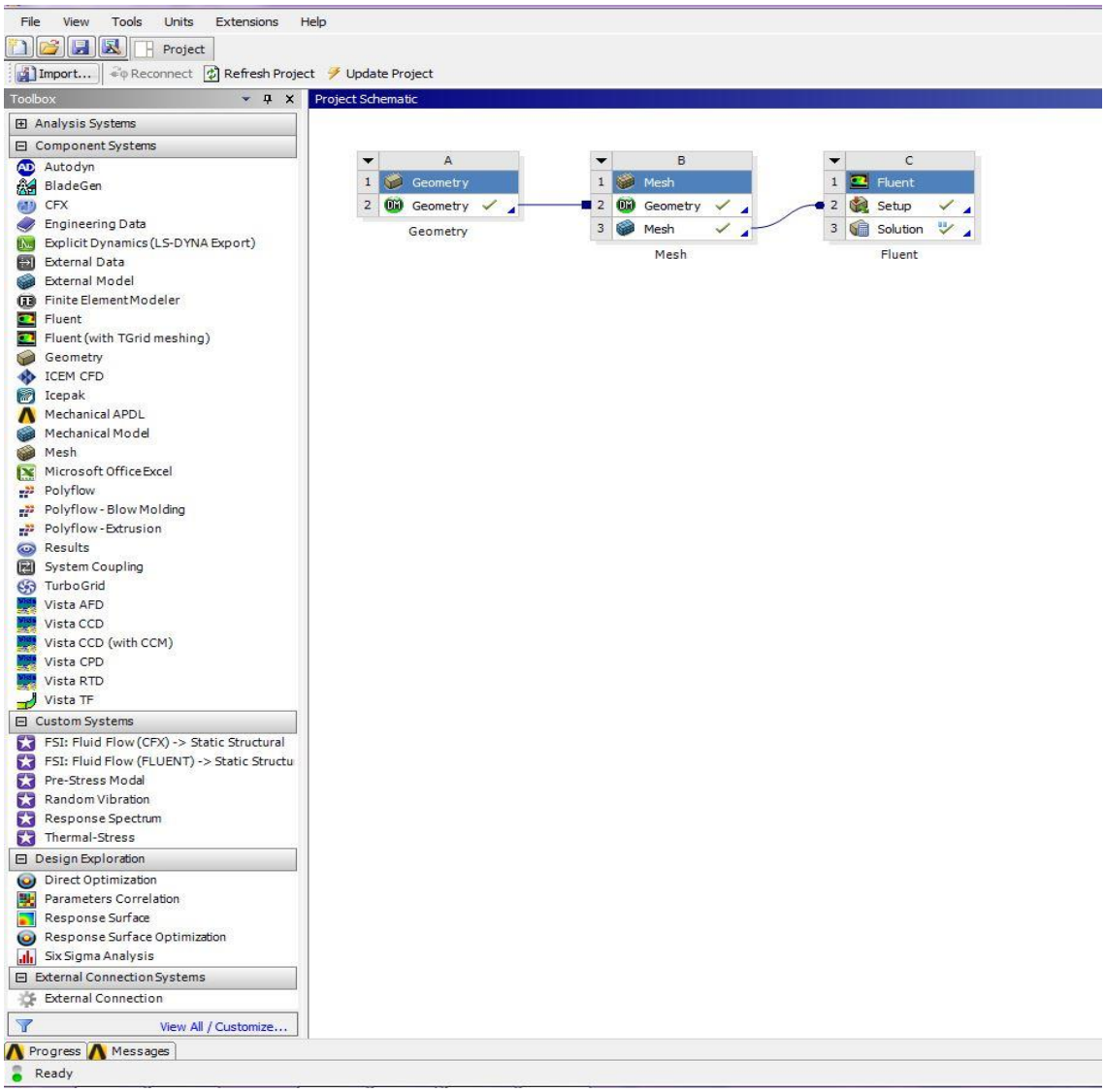
Bu kısımda sıcaklık, basınç gibi parametreler ile bir yakıt hücresinin malzeme özellikleri, giren gazın debisi, gazın bileşenleri, bileşenlerin oranları gibi etmenler hakkında işlem yapılabilmektedir. Fluent modülü de mesh modülünün geometriye bağlandığı gibi mesh modülüne bağlanır. Böylece simülasyon için gerekli veriler birbiriyle entegre hale gelmiş olur.

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de "geometry" ve "mesh" modüllerinin yanlarında soru işareti bulunduğu kolayca fark edilmektedir. Bu işaret henüz bir işlemin yapılmadığı veya yapılmakta olanın tamamlanmadığı anlamına gelmektedir. Program tarafından çalışma esnasında kullanıcıya bu ve buna benzer işaretler sunulmaktadır. Şekil 3.3'de Fluent modülü ile birlikte diğer modüllerin yanlarında işlemlerin düzgün olarak tamamlandığını gösteren tik işareti görülmektedir.

3.3 Validasyon (Geçerli Kılma)

Validasyon işlemi simülasyon çalışmalarının ilk aşamalarından biri ve önemli bir parçasıdır. Genellikle öncesinde yapılan verifikasyon (doğrulama) ile birlikte simülasyonun gerçek hayattaki sistemi ne kadar doğru temsil ettiği konusunda fikir verir.

Doğrulama "modeli doğru kurmak" validasyon ise "doğru modeli kurmak" olarak kısaca ifade edilebilir. Doğrulama işleminde "Model bilgisayara düzgün olarak tanımlandı mı?" ve "Modelin giriş parametreleri ve mantıksal yapısı doğru temsil ediliyor mu?" gibi sorulara cevap aranır. Validasyon işlemi ise genel anlamda bir süreç olmakla birlikte bu işlemin en büyük parçası da kalibrasyondur. Burada amaç, sistem ile model karşılaştırılarak aralarındaki tutarsızlıkların giderilmesiyle modelin geliştirilmeye çalışılmasıdır. Bu süreç elde edilen verilerin gerçek sistemle kıyaslandığında kabul edilebilir hale geldiğine kanaat getirilinceye kadar devam eder.



Şekil 3.3 Fluent modülü

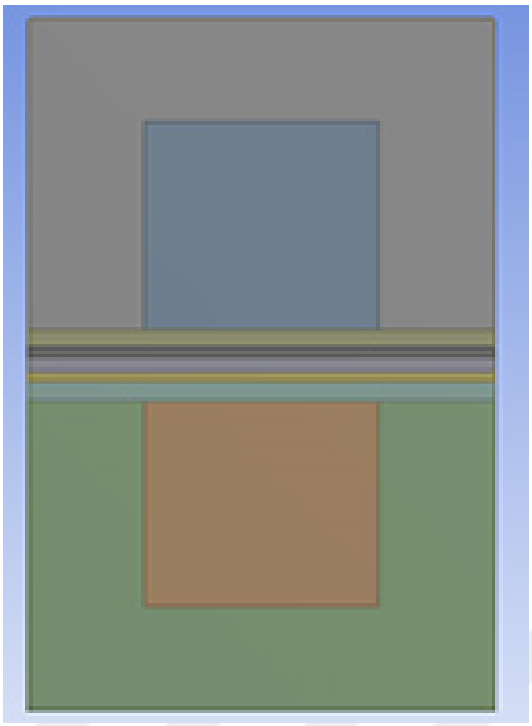
Bu bölümde temel aşamalarını anlatılan bir simülasyon çalışmasının, bu tez çalışmasında referans alınan çalışma olan Siegel vd.'nin [42]'de yapmış olduğu çalışma ile modelin validasyonu yapılacaktır.

İlk aşamada yapılan çalışmada belirtilen ölçüler çerçevesinde yakıt hücresinin üç boyutlu geometrik modeli oluşturulur. Çizelge 3.1'de verilen ölçülere göre çizilen yakıt hücresinin önden ve yandan görünüşü Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te görülebilir.

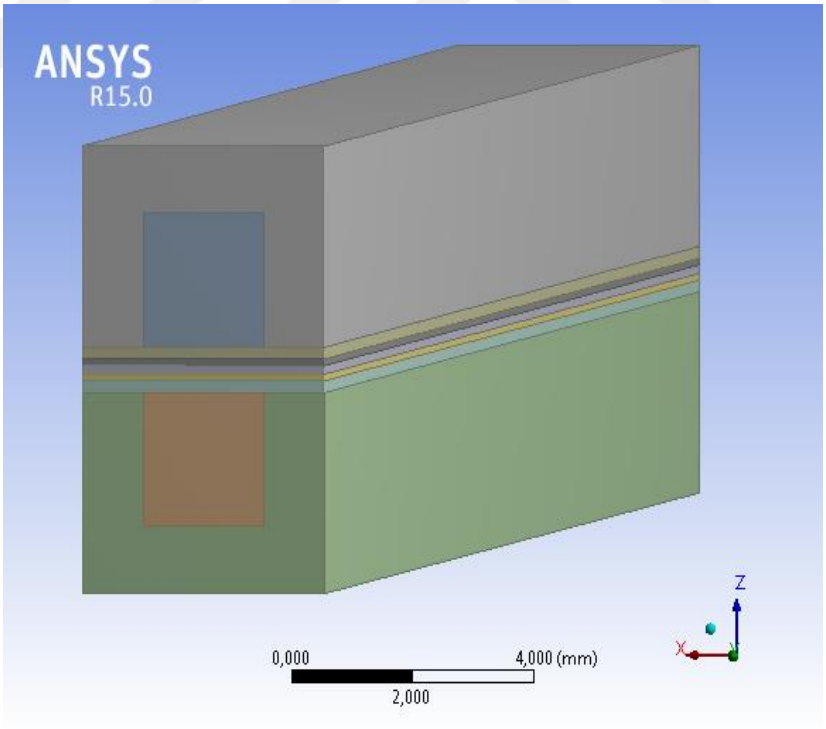
Bu aşamada oluşturulan her yakıt hücresi bileşenini isimlendirmek de daha sonraki çalışmalarda faydası olacak bir işlemdir. Zira program oluşturulan her bileşeni "solid" ismiyle tanımlamaktadır. Bunun da Fluent kısmında membran, katalizör tabakası vb. bileşenleri programa atamada karışıklığa yol açtığı görülmüştür.

Çizelge 3.1 Yakıt hücresi parametreleri [42]

Gaz Kanalı Uzunluğu (mm)	66
Gaz Kanalı Genişliği (mm)	2.0
Gaz Kanalı Yüksekliği (mm)	2.0
GDL kalınlığı (mm)	0.175
Membran kalınlığı (mm)	0.127
Katalizör tabakası kalınlığı (mm)	0.1
Akım toplayıcı kalınlığı (mm)	3.0
GDL porozitesi (-)	0.5
Katalizör tabakası porozitesi (-)	0.09
Katalizör tabakası spesifik alanı (1/mm)	8000
Referans anot akım yoğunluğu (A/m2)	5.0
Referans katot akım yoğunluğu (A/m2)	6.00E-04
Oksijen referans konsanstrasyon (mol/m3)	4.55
Hidrojen referans konsanstrasyon (mol/m3)	21.7
Açık devre voltajı (V)	0.98
GDL geçirgenliği (1/m2)	5.68E+10
Katalizör tabakası geçirgenliği (1/m2) [36]	1.00E+14
Anot giriş basıncı (psig)	24.9
Katot giriş basıncı (psig)	25.5
Anot akış debisi (SLPM)	2.5
Katot akış debisi (SLPM)	50
Anot Bağıl Nem (%)	65
Katot Bağıl Nem (%)	50
Hücre Sıcaklığı (K)	348

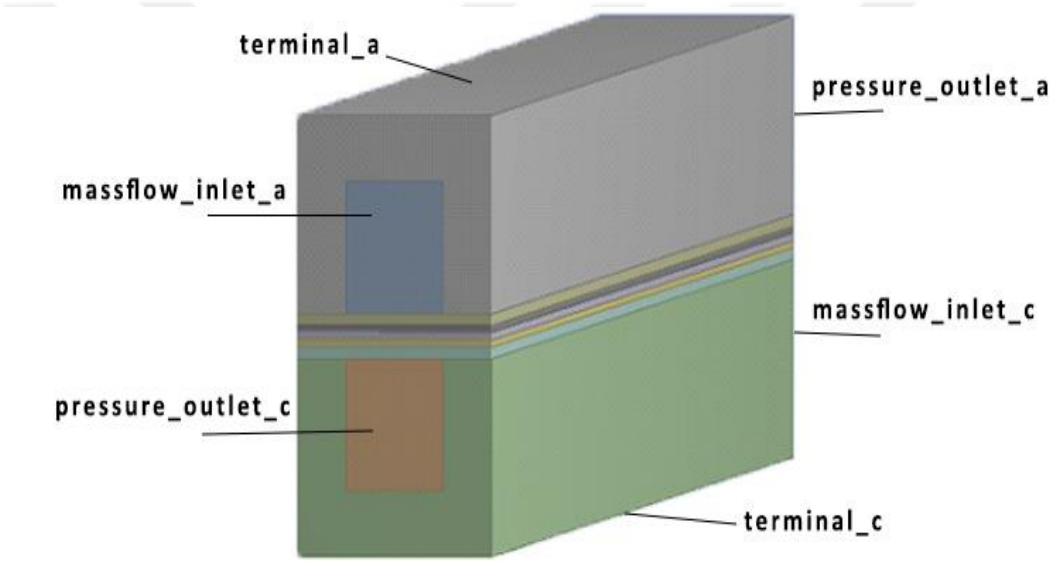


Şekil 3.4 Yakıt hücresi geometrisinin önden iki boyutlu görünümü



Şekil 3.5 Yakıt hücresinin üç boyutlu görünümü

Bu bölümde yapılması gereken işlemlerden biri anot ve katotta yer alan akım toplayıcıların (current collector) solid (katı) diğer kısımların ise fluid (akışkan) olarak tanımlamaktır. Her ne kadar akış kanalları haricindeki parçalar katı birer katman olsa da içinden gaz ve sıvı akışı olması nedeniyle bu kısımların akışkan olarak programa tanıtılması simülasyonun çalışabilmesi için gerekli bir işlemdir. Bununla birlikte bu kısımda veya meshing kısmında da yapabileceğimiz "named selection" işlemi de simülasyon işlemini kolaylaştırıcı bir araçtır. Bu işlemde çizilen geometrinin yüzeylerinden bazılarını spesifik bazı isimlerle isimlendirilerek daha sonraki aşamalarda bunları daha rahat tespit edilebilir ve programda yakıt hücresi bölümü olarak atanabilir veya ilgili bölümleriyle eşleştirilebilir. Bu isimlendirme işlemi Şekil 3.6 üzerinde görülebilir.

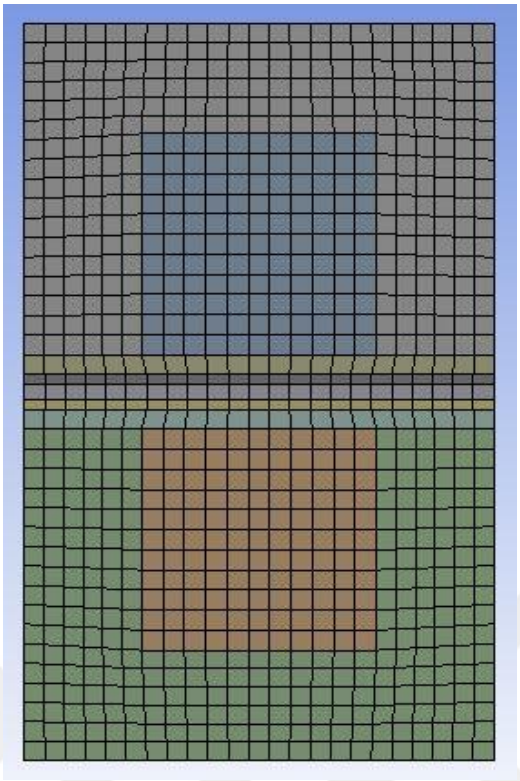


Şekil 3.6 Yakıt hücresi yüzeylerinin isimlendirilmesi

Geometri ile ilgili işlemler tamamladıktan sonra örgüleme işlemine geçilebilir. Önceden de söylediği gibi örgüleme işleminin düzgün olması simülasyonun doğru sonuçlar vermesi için önemli bir adımdır.

Bu çalışmada yakıt hücresinin geometrisine uyum sağlamasının kolay olacağını düşünüldüğünden dikdörtgen prizma örgüler tercih edildi. Örgü sayısının fazla olmasının iterarsyonun süresini uzatacağı bilindiğinden bazı boyutlandırma ve kısıtlamalarla yaklaşık 230000 elemanlı bir örgü elde edildi. Örgüleme işlemininden sonra yakıt hücresinin görüntüsü Şekil 3.7'de verilmiştir.

Şekil 3.7 Örgüleme işleminden sonra yakıt hücresinin görüntüsü



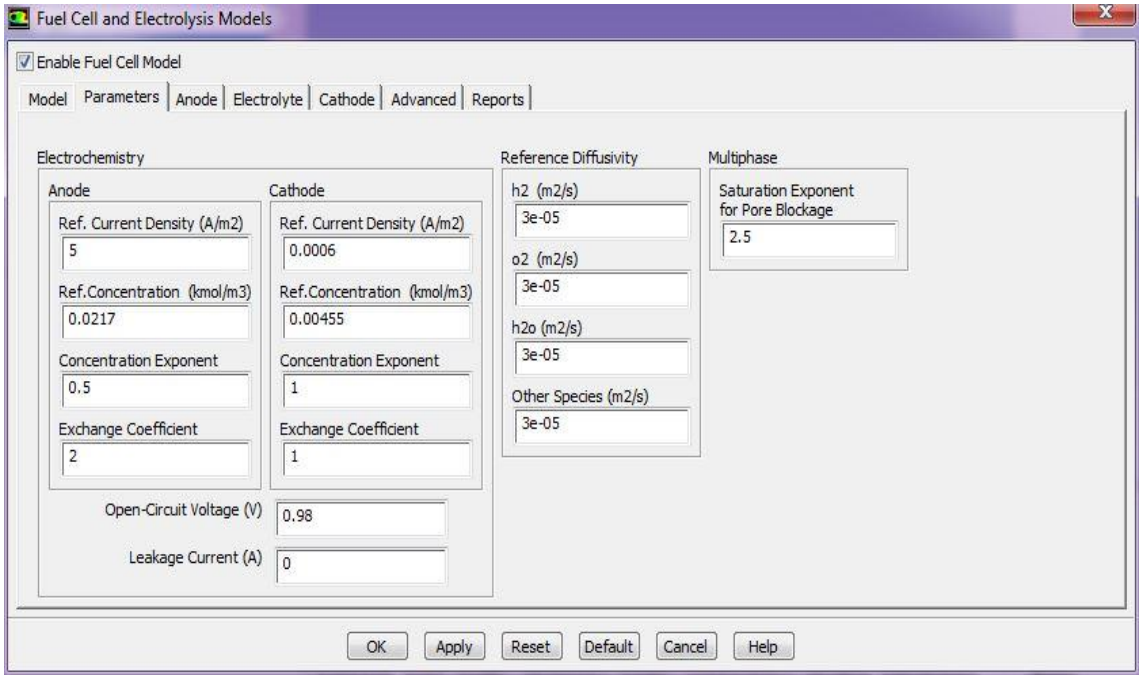
Örgü konusunda yapacağımız son işlem örgülerin nitelik açısından incelenmesidir. Bunun için de önceden bahsedildiği gibi skewness ve orthogonal quality değerlerine bakılır. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere skewness değeri 0'a yaklaşık iken orthogonal quality ise 1'e oldukça yakın olup oluşturulan mesh yapısının nitelik açısından istenilen durumlarda olduğunu göstermektedir.

Mesh Metric	Skewness
Min	1,16274279820005E-09
Max	5,19449109092709E-04
Average	1,25520559890944E-04
Standard Deviation	1,21472845707784E-04

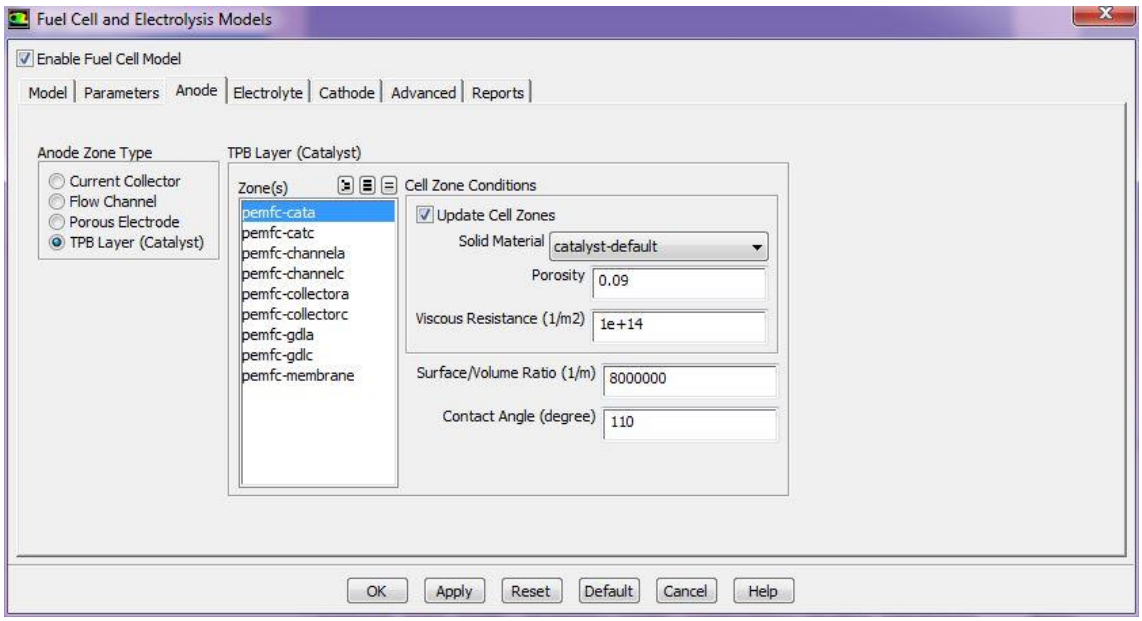
Nodes	250236
Elements	231000
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0,999999633231667
Max	0,999999999999999
Average	0,999999961118023
Standard Deviation	1,28784320722991E-07

Şekil 3.8 Skewness ve Orthogonal Quality

Simülasyonun son aşaması olan Fluent bölümü için Siegel'in [42]'de kullandığı parametrelerin ve sınır koşullarının kullanıldığı bu bölüme başlarken belirtilmiş ve Çizelge 3.1'de verilmişti. Bu veriler Fluent'in içinde yer alan yakıt hücresi modeline ait ara yüze girilir (Şekil 3.9). Bu arayüz yardımıyla çizimimizde yer alan geometrinin parçaları ile Fluent'te tanımlı yakıt hücresi parçalarıyla eşleştirip fiziksel özelliklerini tanımlanır (Şekil 3.10).



Şekil 3.9 Yakıt hücresi parametrelerinin girildiği program arayüzü



Şekil 3.10 Geometrinin eşleştirilmesi ve özelliklerinin tanımlanması

Modelin başarılı olup olmadığına karar verebilmenin yolu polarizasyon eğrisi oluşturup referans çalışmamızla örtüştürmesini incelemektir. Ayrıca yakıt hücresinin performans değerlendirilmeleri de yine polarizasyon eğrisi üzerinden yapılır.

Yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyon sonucunda açığa çıkan elektronlar membrandan geçemeyerek bir elektrik devresi oluştururlar. Bununla birlikte anottan gelen hidrojen iyonları katotta oksijen ile birleşmesinden ısı ve su açığa çıkar. Yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyonla sonucunda kazanılan termodinamik potansiyel, reaksiyon neticesinde anottan katoda geçen elektron sayısı ve açığa çıkan enerji ile ilişkilidir [46]. Yakıt hücresinde meydana gelen reaksiyon sonucu oluşan enerji, Gibbs Serbest Enerjisi değişimi ifade edilir. Serbest enerji değişim (ΔG), sabit sıcaklık ve basınçta gerçekleşen reaksiyonun maksimum elektriksel işe diğer bir deyişle elektriksel enerjiye (W_{elk}) eşittir.

$$\Delta G = W_{elk} = E_{elk} \tag{3.3}$$

Bilindiği üzere ΔG entalpi ve entropi cinsinden şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\Delta G = \Delta H - T\,\Delta S \tag{3.4}$$

Elektriksel enerji ise V potansiyel farklı devrede t sürede geçen i akımına eşittir. Bu durum

$$E_{elk} = V.i.t = W_{elk} \tag{3.5}$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde yer alan i.t ifadesi Q elektriksel yük olarak da ifade edilebilir. Q elektriksel yükü aynı zamanda, n mol başına taşınan elektron miktarı F ise Faraday sabiti olmak üzere

$$Q = n.F \tag{3.6}$$

şeklinde gösterilir. Bu denklemde yer alan "n" hidrojen (H_2) elektronları mevzubahis olduğundan 2 değerini alırken Faraday sabiti ise 96485 Columb / mol'dür. Böylece Denklem 3'teki ifade

$$W_{elk} = V.Q = - V.n.F \tag{3.7}$$

olarak türetilebilir. Gibbs serbest enerji ile elektriksel işin eşit olduğunu belirtmiştik. Bu durumda Denklem 3.4 ve Denklem 3.7'yi birbirine eşitleyip V potansiyel farkı çekildiğinde

$$\Delta H - T\,\Delta S = V.n.F \tag{3.8}$$

$$V= \Delta H - T\,\Delta S \,/\, -n.F \tag{3.9}$$

denklemi elde edilir.

Bu aşamada n ve F değerlerini bilinmektedir. ΔG değeri ise suyun standart oluşum serbest enerjisi olarak iligili termodinamik tablolardan bulunabileceği gibi ΔH ve ΔS değerlerinin bulunup standart sıcaklık olan 25 ^{o}C'de hesaplanarak da yerine yazılabilir. Bu işlemde dikkat edilmesi gereken nokta ise suyun tamamının sıvı fazda oluştuğunun kabul edilmesidir. Suyun gaz ve sıvı olarak oluşum entalpileri sırasıyla 228,57 kJ/mol ve -237,3 kj/mol'dür. Değerler Denklem 7'de yerine konulduğunda yakıt hücresinin ideal potansiyeli;

V= -237.300 J/mol / (-2)(96485) = 1,23 V (3.10)

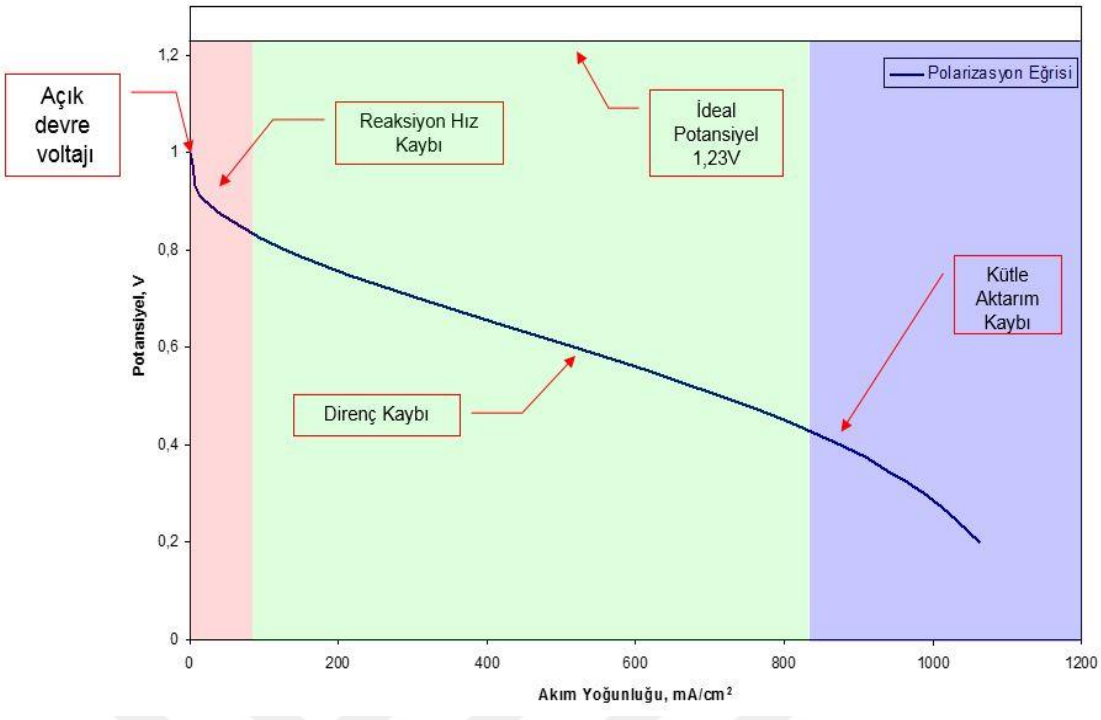
olarak hesaplanabilir.

Yakıt hücreleri tersinir olmayan bazı kayıplar nedeniyle ideal potansiyellerinden uzaklaşırlar. Bir yakıt hücresinin verimliliğini tespit etmede ise polarizasyon eğrisi en önemli gösterge kabul edilir (Şekil 3.11).

Şekil 3.11 de yakıt pili çalışmanın başında ideal potansiyelinden uzakta olduğu görülmektedir. Açık devre voltajı, genel olarak ideal potansiyelden 0.1 V - 0.2 V aşağıda yer almaktadır. Buna kullanılan malzemelerin iç dirençleri vb. durumların yol açtığı değerlendirilmektedir. Bunun tespiti bir takım testlerle gerçekleştirilmektedir. Referans kabul edilen çalışmada ise 0.98 V olarak verilmiştir.

PEM yakıt hücreleri ele alındığında üç önemli kayıp faktörü bulunduğu görülmektedir. Bunlar kinetik kayıp (reaksiyon hız kaybı), ohmik kayıp (direnç kaybı) ve kütle transfer kaybı olarak isimlendirilebilir.

İlk olarak, düşük yük bölgesinde 0.8 V seviyesine hızlı bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüş oksijenin katotta yavaş indirgenmesi kinetiği sonucunda meydana gelmektedir. Aktivasyon polarizasyonu olarak bilinen bu voltaj kaybı katot yüzeyindeki elektrokimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisinin üstesinden gelmek için gerekli olan aşırı gerilimdir.



Şekil 3.11 Yakıt Hücresi Polarizasyon Eğrisi [47]

Bu kaybı azaltmak maksadıyla katalizör olarak Platin kullanılmaktadır. Platin ticari olarak en iyi katalizör olsa da yeterince verimli değildir [48]. Bu kısımda direnç kayıpları ve kütle transfer kayıpları ihmal edilebilir düzeydedirler.

Sonraki aşamada yükün artmasıyla beraber kinetik kayıplara direnç kaybı da eklenir. Bu yakıt hücresinin içdirencinin sebep olduğu bir kayıptır ve büyük oranda membrandan kaynaklanmaktadır.

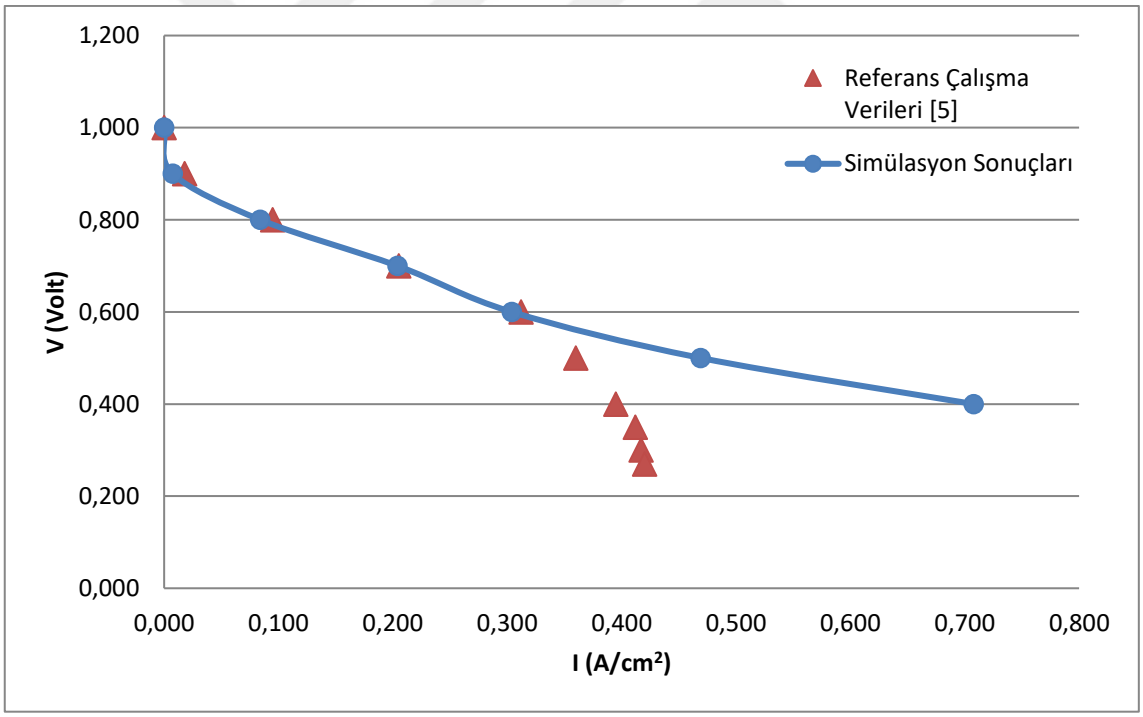
Son olarak görülen düşüş ise reaktantların katot tarafına yeterince hızlı geçememesinden kaynaklanan kütle aktarım kaybıdır. Elektrodun düşük porozitesi ve oluşan suyun gözenekleri tıkaması vb. reaktant akışını engelleyen olaylar bu kayba yol açmaktadır.

Bir yakıt hücresi modelinin polarizasyon eğrisini oluşturmak için simülasyon farklı gerilimlerde tekrarlanıp bunlara karşılık gelen akım yoğunluğu değerleri bulunarak bir grafik üzerinde referans çalışma ile birleştirilir.

Yakıt hücresi modelinden elde edilen sonuçlar ile referans çalışma verileri Çizelge 3.2'de verilmiş olup sonuçlar Şekil 3.12'deki grafik üzerinde de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Referans Çalışma Verileri ile Simülasyon Sonuçları

Gerilim (Volt)	Referans Çalışma Verileri (I/cm^2)	Simülasyon Sonuçları (I/cm^2)
1,000	0,000	0,000
0,900	0,018	0,008
0,800	0,095	0,084
0,700	0,205	0,204
0,600	0,312	0,304
0,500	0,360	0,469
0,400	0,395	0,708



Şekil 3.12 Referans deneysel çalışma verileri ile simülasyon sonuçlarının grafik üzerinde gösterimi

Grafiğe bakıldığında başlangıçtaki değerlerin birbiriyle uyumlu olduğu ancak bir noktadan sonra büyük bir sapma olduğu görülmektedir. Bu sapmanın Siegel'in çalışmasında kullanmış olduğu "agglomarate model" kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Zira yapılan diğer yakıt hücresi çalışmalarında ortaya çıkan polarizasyon eğrileri de göz önüne alındığında Siegel'in

çalışmasında ortaya çıkan eğrinin spesifik bir eğri olduğunu ve bizim modelimizin çalışır olduğunu söylenebilir. Bir sonraki kısımda bu modelde kullanılan hesaplama metotları, iterasyon seçimleri vb. tercihleri farklı geometri ve parametrik değişkenlerin etkisinin araştırılmasında kullanacaktır.

BÖLÜM 4

SİMÜLASYON

Çalışmanın bu bölümü iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada validasyonu yapılan yakıt hücresi modelinde kullanılan ortam şartları ve sınır koşullarını değiştirmeden yeni bir yakıt hücresi geometrisi oluşturup ikisinin performansı karşılaştırılmıştır. Bu yakıt hücresi şeklen validasyonda kullanılan yakıt hücresinin aynısı olmakla birlikte en ve boy uzunluklarında farklılık göstermektedir.

İkinci kısımda ise karşılaştırılan yakıt hücrelerinden daha iyi performans elde edilen yakıt hücresinin performansını farklı parametreler altında inceleyerek bu parametrelerin performansı etkileyip etkilemediğini etkiliyorsa hangi yönde etkilediğini tespit etmeye çalışılmıştır.

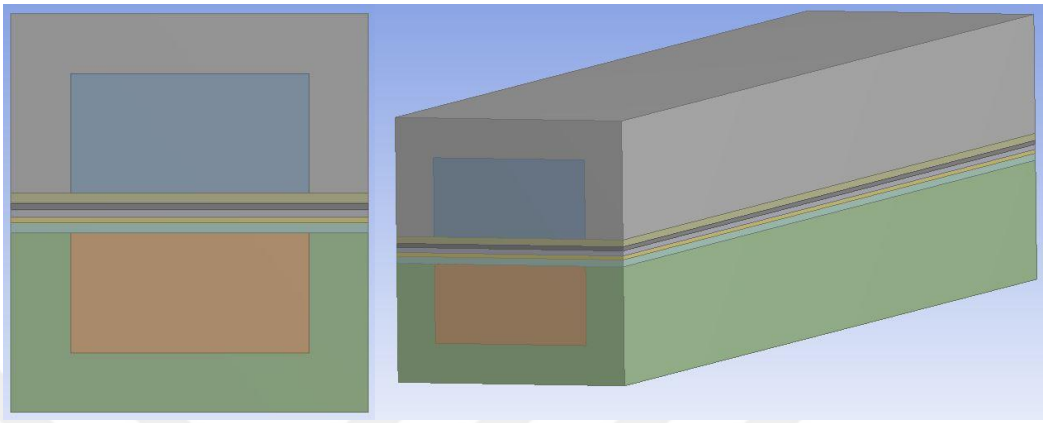
4.1 Geometrik Çalışma

Bu kısımda sıcaklık, basınç ve kütlesel debi gibi parametrelerin değişmediği operasyon koşullarında yakıt hücresinde, geometrik ölçülerde değişiklikler yapılarak yakıt hücresi performansındaki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda Çizelge 3.1'de verilen parametreler temel alınarak farklılık gösteren kısımlarını Çizelge 4.1'de gösterilen yakıt hücresi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1 Yeni yakıt hücresi geometrisindeki farklılıklar

Gaz Kanalı Uzunluğu (mm)	33
Gaz Kanalı Genişliği (mm)	4.0
Gaz Kanalı Giriş Alanı (mm^2)	8.0

Yeni oluşturulan yakıt hücresi, validasyon için oluşturmuş olan yakıt hücresinden şekil olarak bir farklılık göstermemektedir (Şekil 4.1). Burada gazların gaz difüzyon tabakası ile temas ettiği yüzey alanı değişmeden geometrinin değişmesiyle performansının nasıl değiştiği araştırılmıştır.

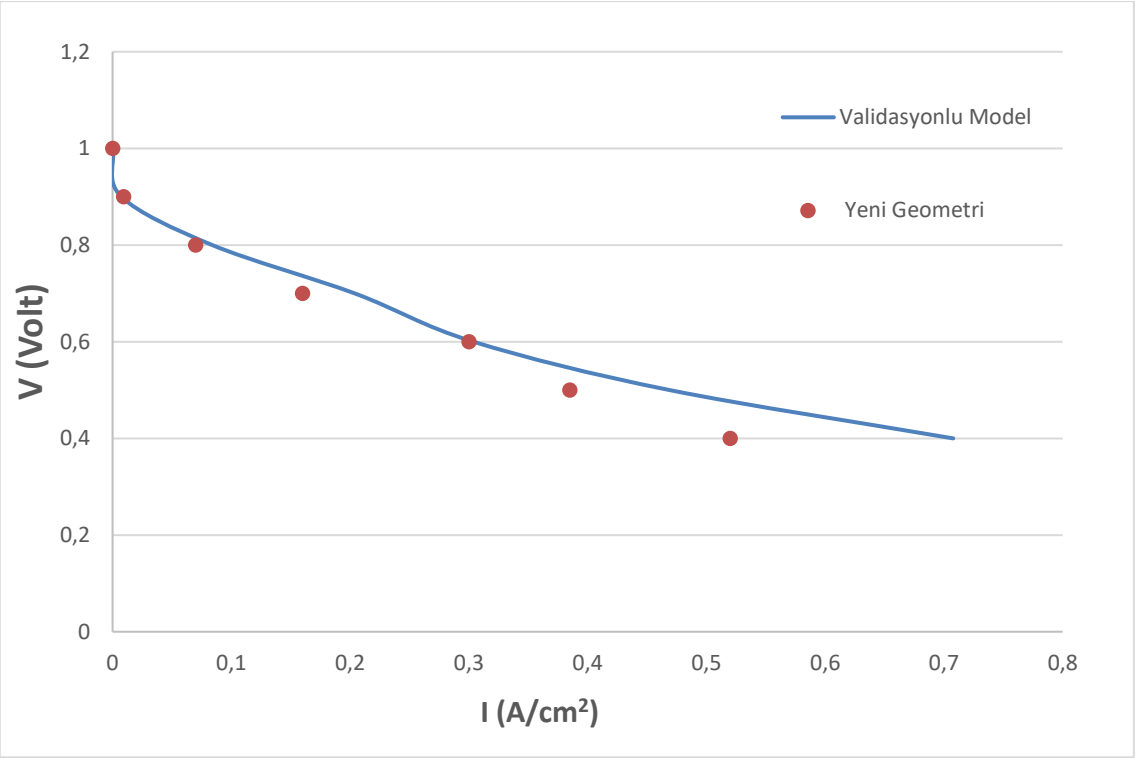


Şekil 4. 1 Yeni geometrinin önden ve yandan görünüşü

Sıcaklık, basınç vb parametrelerin değişmediği simülasyon çalışmasından elde edilen verilerle bir polarizasyon eğrisi oluşturuldu. Bu eğri kıyaslamanın kolay olması için validasyonu yapılmış modelin polarizayon eğrisi ile birleştirildi (Şekil 4.2).

Sonuçlar incelediğinde elde edilen polarizasyon eğrilerinin neredeyse aynı olduğunu görülmektedir. Bu da performanslarının birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte validasyon modelinin verilerinin az da olsa daha iyi bir performansa sahip olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

Bu kıyaslamadan çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise yakıt hücresi uzunluğunun sonuçlara etkisinin olmadığıdır. Tam olarak yarı uzunlukta bir yakıt hücresi geometrisi olmasına rağmen elde edilen akım yoğunluğu değerleri neredeyse eşittir. Bu da daha önce söylemiş olduğumuz gibi yakıt hücrelerinin performans kıyaslamalarında yakıt hücresi büyüklüğünden bağımsız olması iiçin elde edilen akım miktarının değil akım yoğunluğunun kullanılması işlemini doğrulamaktadır.



Şekil 4.2 İki geometri performansının karşılaştırılması

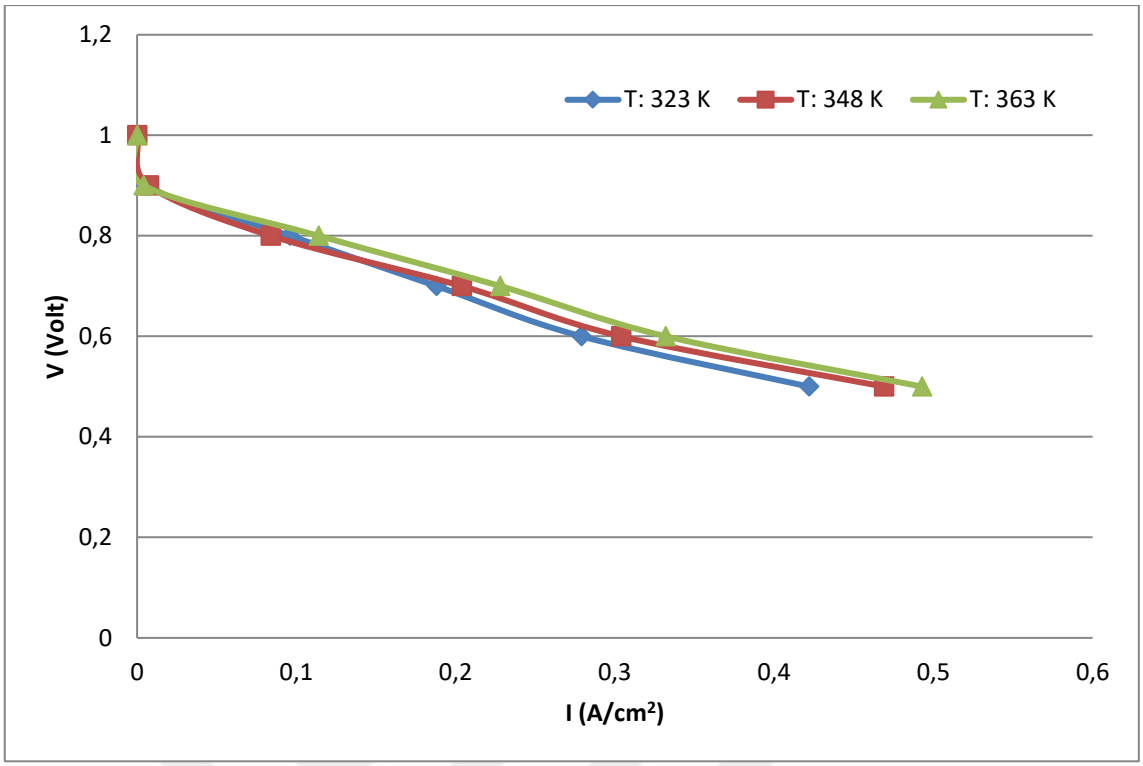
4.2 Parametrik Çalışmalar

Çalışmanın bu kısmında, önceki kısmında yapılmış olan geometrik çalışma sonucunda her ne kadar yakın bir performans göstermiş olsalar da az bir farkla önde olan yakıt hücresi modeline ilişkin parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Bu kapsamda sıcaklık, basınç, porozite ve kütlesel debi parametrelerindeki değişimin söz konusu yakıt hücresinin performansına olan etkisi incelenmiştir.

4.2.1 Sıcaklık

İlk incelenen parametre sıcaklık oldu. Bunun için bir adet validasyon sıcaklığının üzerinde bir adet de altında bir sıcaklıkta simülasyon gerçekleştirilerek polarizasyon eğrileri oluşturuldu. Bu eğriler kıyaslanmak için orijinal eğriyle aynı grafiğe yerleştirildi (Şekil 4.3).



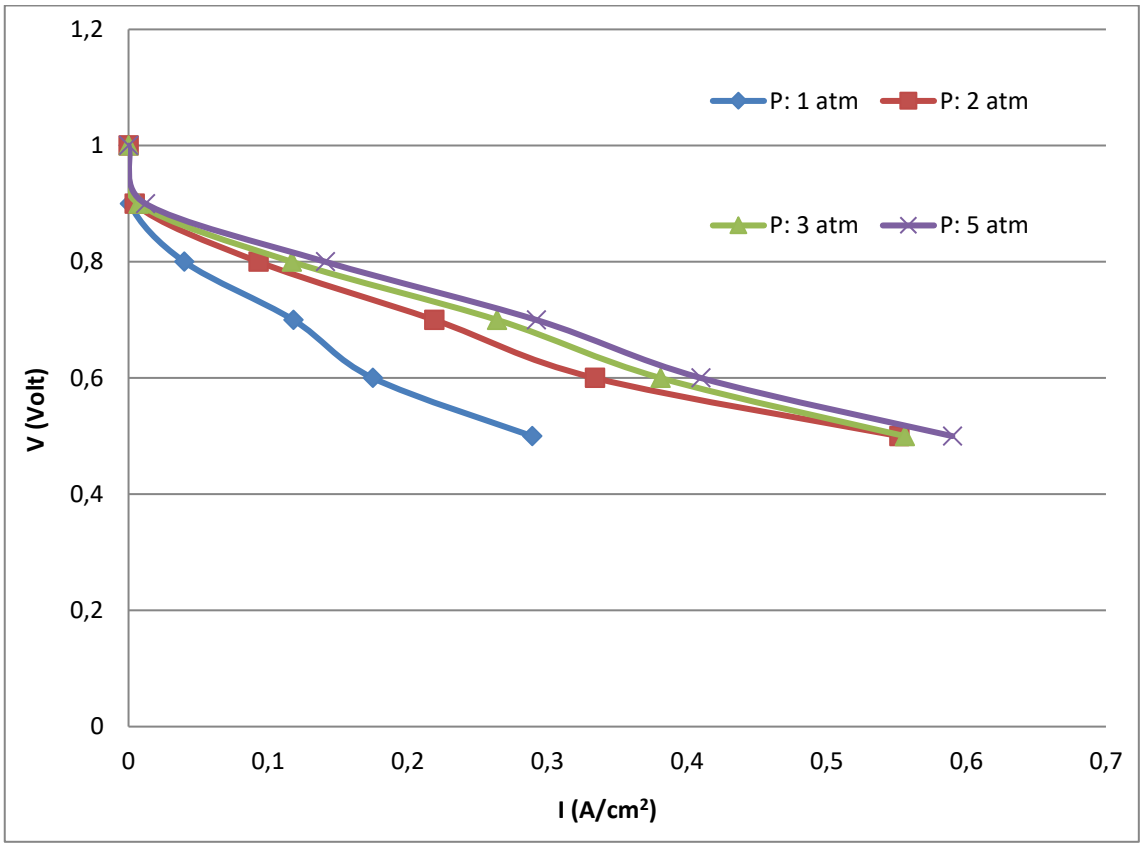
Şekil 4.3 Farklı sıcaklıklarda yakıt hücresi performansı

Çalışma sıcaklığı yakıt hücresi performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklığın artması ile elektrolitin ohmik direncinde azalma meydana gelirken elektrotta meydana gelen reaksiyonların da kinetiğini hızlandırır. Ayrıca kütle transferi kısıtlarını da azaltır. Bu sayılanların tamamı yakıt hücresi performansını arttıran etmenler olarak sayılabilir. Ancak sıcaklığı arttırarak yakıt hücresi performansını arttırmak da kısıtlara takılmaktadır.

Bunların ilki yüksek sıcaklıklarda membranın yapısında bozulma meydan gelmesidir. Deformasyona uğrayan membranın performansının büyük oranda düşebileceği gibi kullanılmaz hale gelmesi de büyük bir olasılıktır. Yüksek sıcaklığın bir diğer sıkıtlayıcı özelliği de dehidrasyona sebep olmasıdır. Yakıt hücresinden yüksek sıcaklıkta hızla buharlaşarak uzaklaşan su, membranın nemli kalmamasına neden olarak iyonik iletkenliğini düşürmektedir.

4.2.2 Basınç

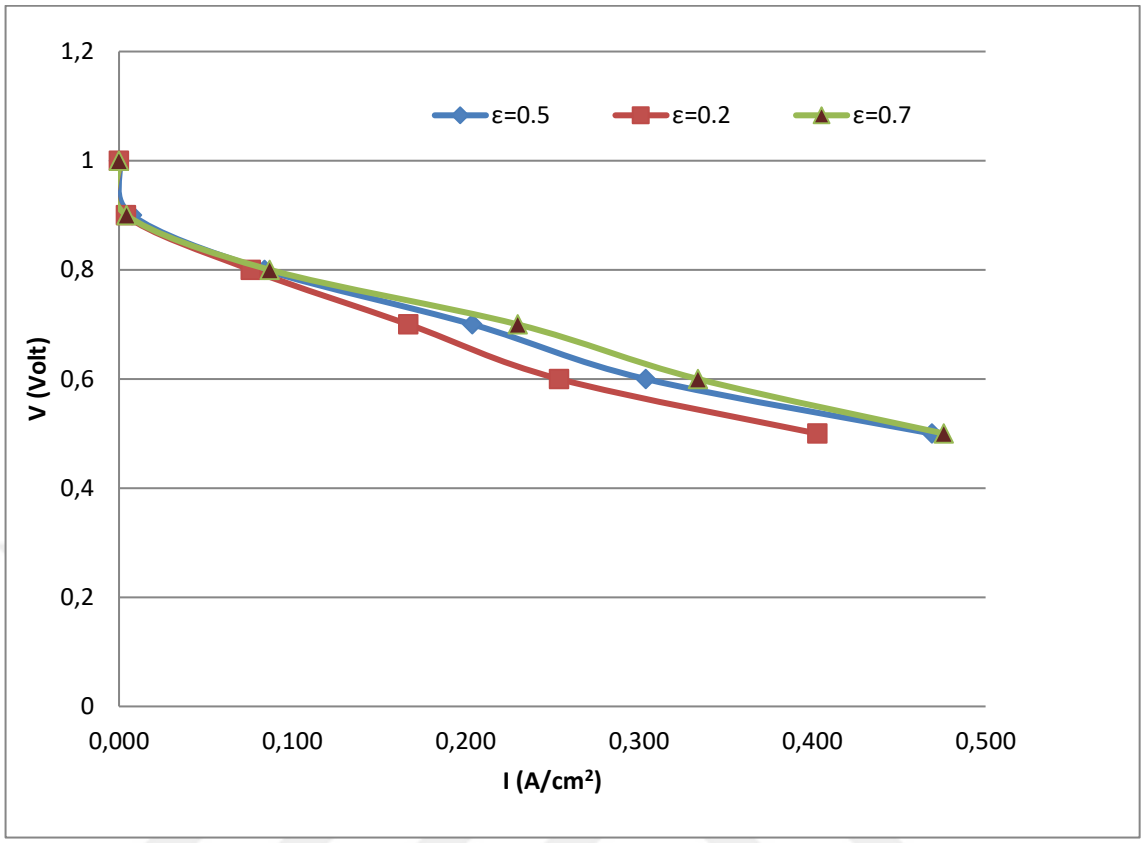
Yakıt hücresi performasını etkileyen bir diğer parametre de çalışma basıncıdır. Grafikte de görüldüğü gibi (Şekil 4.4) artan basınç yakıt hücresinden elde edilen enerjiyi arttırmaktadır. Basıncı artan gazların hacmi azalır. Aynı hacim içerisinde daha çok tanecik olması çarpışma kuramı da göz önüne alındığında daha fazla çarpışma ve reaksiyon oluşumuna sebep olacağı değerlendirilebilir. Daha reaktantların daha fazla reaksiyona girmesi daha çok enerji elde edilmesini sağlar.



Şekil 4.4 Farklı basınç değerlerinde yakıt hücresi performansı

Bununla birlikte gazların basıncının arttırılması da bazı kısıtlara takılmaktadır. Bunlardan en önemlisi maliyettir. Daha yüksek basınç için kullanılacak kompresörler yatırım maliyetlerini arttırırken yine bu cihazların kullanacağı enerji miktarı da artacaktır. Ayrıca sunulan gücün artmasıyla cihazların boyutlarında ve ağırlıklarında da artış olacağı öngörülebilir. Bu da yakıt hücresinin kullanılacağı yere göre dezavantajlı bir duruma yol açabilir.

4.2.3 Porozite



Şekil 4.5 GDL porozitesi - yakıt hücresi performansı iliskisi

Bu tez çalışmasında yakıt hücresi performansına etkisi incelenmiş olan bir diğer parametre ise porozitedir. Yakıt hücresi bileşenlerine bakıldığında iki tür bileşen için porozite faktöründen bahsetmenin mümkün olduğu görülmektedir: Gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakası. Bu çalışmada gaz difüzyon tabakasının porozitesi üzerine bir çalışma yapılmıştır.

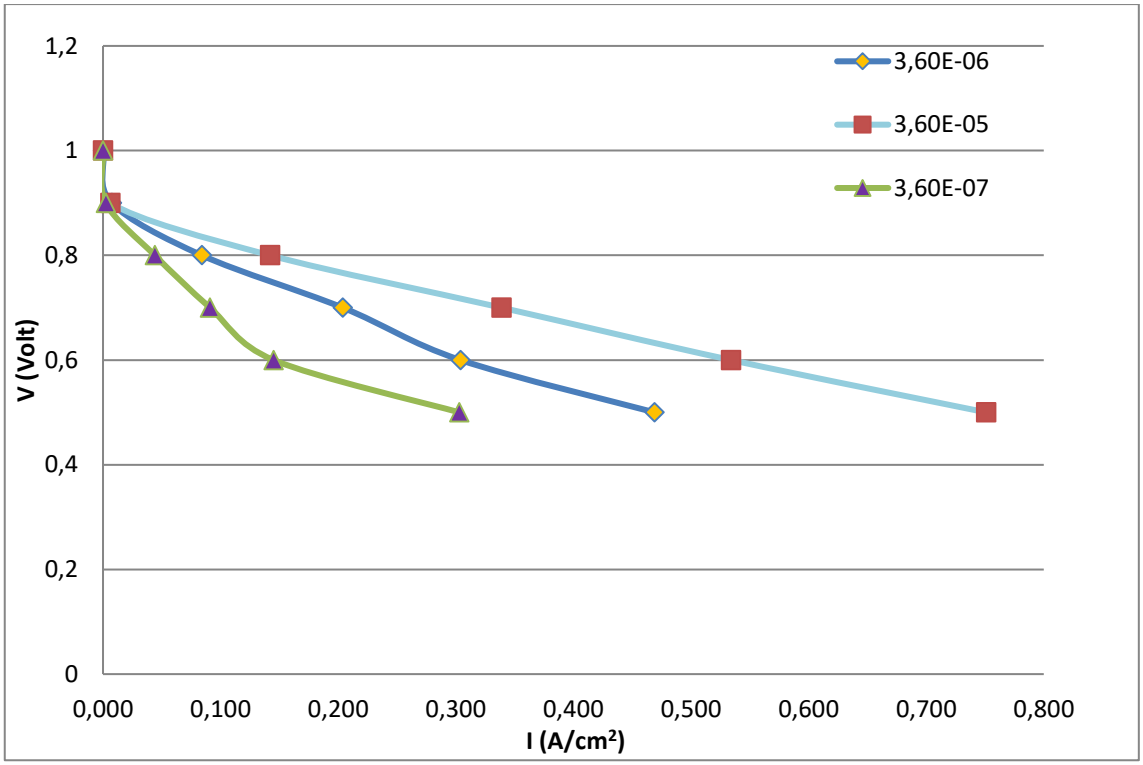
Deneysel çalışmada 0.5 olarak alınmış olan porozite değeri ile ϵ=0.2 ve ϵ=0.7 ile yapmış olduğumuz simülasyon çalışmalarına ait sonuçlar Şekil 4.5'te grafik olarak gösterilmiştir.

Grafikte porozitenin azaltıldığı simülasyonda yakıt hücresinden alınan performansın düştüğü, daha yüksek porozitede elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu artışı daha yüksek porozite değerine sahip gaz difüzyon tabakasında reaksiyona girecek gazların miktarında da artış olmasıyla ilişkilendirmek doğru olacaktır.

Bununla birlikte porozitedeki yüksek oranda artışa rağmen akım yoğunluğundaki artışın çok yüksek olmadığı da grafikten anlaşılmaktadır. Bunun nedeni olarak ise artan porozite nedeniyle azalan elektriksel iletkenlik gösterilebilir [49].

4.2.4 Kütlesel Debi

Bu tez çalışmasının konusu olarak ele alınan son parametre ise kütlesel debidir. Bilindiği üzere yakıt hücresinde anot ve katot kısmı olmak üzere iki kısımda akış bulunmaktadır. Biz simülasyon çalışmalarımızda anot kısmındaki akışa ait kütlesel debinin etkisi üzerine inceleme yapılmıştır.



Şekil 4.6 Farklı hidrojen kütlesel debilerinde yakıt hücresi performansı

Üç farklı kütlesel debi değeriyle yaptığımız simülasyonlarda, hidrojenin kütlesel debisinde yapılan artışın akım yoğınluğunda da artışa yol açtığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.6). Bu artışın kaynağı olarak ise reaksiyona giren madde miktarında (hidrojen) artış olması gösterilebilir.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin performansları üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu kapsamda yapılmış bir deneysel çalışmanın verileriyle Ansys Fluent programında bir yakıt hücresi modeli oluşturularak modelin geçerliliği test edilmiştir. Model ile yapılan simülasyon çalışmasından elde edilen verilerin deneysel çalışma ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Oluşturulan modelin geçerliliği kanıtlandıktan sonra model parametreleri farklı bir yakıt hücresi geometrisinde uygulanmış ve yeni yakıt hücresine ilişkin performans verileri elde edilmiştir. İki yakıt hücresinin performansı karşılaştırılarak daha başarılı olan yakıt hücresinin performansı sıcaklık, basınç ve porozite gibi parametreler değiştirilerek iyileştirilmeye çalışılmış bir yandan da bu parametrelerin performansa etkisi incelenmiştir. Yapılan tüm çalışmalara ilişkin elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Benzer geometrili yakıt hücreleri birbirlerine yakın performanslar göstermişlerdir. Geometrilere ilişkin beklentinin gazın yakıt hücresi içerisindeki hareketini kolaylaştırmak, difüzyonunu arttırarak reaksiyona giren miktarda artış sağlamak olduğu göz önüne alınırsa geometriyle ilgili çalışmalarda eğimli akış kanalları, dikdörtgen olmayan kanal şekilleri ve kanal üzerine engel yerleştirme gibi farklı çalışmalarda bulunulmasının uygun olduğu değerlendirilmektedir.
- Artan sıcaklık, yakıt hücresi performansı üzerinde olumlu bir etki yapmıştır. Buna sıcaklığın elektrolitin ohmik direncinin düşürmesi ve yüksek sıcaklığın reaksiyon kinetğini arttırmasının sebep olduğunu söylemek mümkündür. Yüksek sıcaklık ayrıca ortaya çıkan suyun uzaklaştırılmasına da katkı sağlamaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken bazı durumlar mevcuttur. Bunların ilki aşırı sıcaklığın bileşenlerin özellikle membranın yapısını bozabileceğidir. Yapılan çalışmalar yakıt hücreleri için ideal sıcaklıkların 80-

$100^{O}C$ olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte yüksek sıcaklıkta çalışmaya uygun membranlar da üretilmiş olup bu bu tarz PEM yakıt hücreleri $150^{O}C$ sıcaklıklarda çalışmaya uydundurlar. Diğer bir dezavantaj ise reaktanların bu sıcaklığa getirilmesi için harcanması gereken bir enerjidir. Bu da sisteme hem fazladan maliyet hem de yakıt hücresi boyutunda artış anlamına gelecektir. Bu da bazı uygulamalar için kullanımı zorlaştıracak belki de mümkün olmaktan çıkaracaktır.

- Basınç ise PEM yakıt hücresi performansı için olumlu etkiye sahip bir diğer parametredir. Artan basınç gazların hacmini küçülterek aynı hacimde daha çok tanecik bulunmasını sağlayarak çarpışma olasılığını arttırmaktadır. Ancak basınç da sıcaklık gibi ekstra maliyete sebep olarak birim enerji maliyetinin artmasına sebep olacak bir parametredir.
- Porozite ise etkisinin en az gözlemlendiği parametre olarak görülebilir. Yüksek porozite değerinde daha yüksek akım yoğunluğu değerleri elde edilse de bu değerler arasında belirgin bir fark bulunmadığı görülmektedir.
- Kütlesel debinin ise yakıt hücresi performansı açısından önemli bir yere sahip olduğu görülmüştür. Hidrojen miktarındaki artışlar elde edilen akım değerine de artış olarak yansımaktadır. Artan hidrojen miktarı reaksiyon oluşma ihtimalini arttırmaktadır. Buradaki çalışma sadece anot tarafında yapılmış olup katot tarafında yapılacak çalışmada da aynı doğrultuda sonuçların elde edileceği düşünülmektedir. Buradaki kritik nokta ise yine birim enerji maliyeti olmaktadır. Çünkü hidrojen eldesi hala hidrojeni yakıt olarak kullananan yakıt hücrelerinin yaygınlaşması için yeterli seviyede ve maliyette değildir. Burada ise reaksiyonu arttırmak için aşırı oranda hidrojen kullanmanın maliyetlerde de önemli artışlara sebep olacağı düşünülmelidir. Ancak hidrojenin yakıldığı oksijenin kaynağı olarak ise hava kullanılması maliyetlere olan etkisinin aynı oranda olmayacağı değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak; enerji ihtiyacının gün geçtikçe arttığı dünyamızda fosil yakıtların alternatifi olabilecek teknolojilerden biri olan yakıt hücrelerinden elde edilen enerji basınç, sıcaklık, porozite ve kütlesel debide yapılan artışa paralel olarak artmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak, elde edilen enerjinin birim maliyetinin hesaplanarak diğer bilinen elektrik üretim yöntemleriyle elde edilen elektrik enerjisinin maliyetleri ile kıyaslanması yapılabilir. Uygun maliyet/performans kıstasları ile ticari bir ürüne dönüştürülüp yaygınlaşması sağlanabilir.

Bu anlamda bu tez çalışmasının bu alanda ileriye yönelik çalışmalara temel olup yol gösterebileceği umut edilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Paşaoğulları, U. ve Wang, C.Y., "Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell using Fluent", 2002 Fluent User Group Meeting, 10-12 June 2002, Manchester.

[2] Hashemi, F., Rowshanzamir, S., ve Rezakazemi, M. (2012). "CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields", Mathematical and Computer Modelling, 55:1540–1557.

[3] Lobato, J., Canizares, P., Rodrigo, M. A., Pinar, F. J., Mena, E., ve Ubeda, D. (2010). "Three-dimensional model of a 50 cm^2 high temperature PEM fuel cell. Study of the flow channel geometry influence", International Journal of Hydrogen Energy, 35:5510–5520.

[4] Kuoa, J.-K., Yenb, T.-H. ve Chen, C.-K. (2008). "Three-dimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels", Journal of Power Sources, 177(1), 96–103.

[5] Siegel, C., (2008). "Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells", Energy, 33(9), 1331-1352.

[6] Lorenzini-Gutierrez, D., Hernandez-Guerrero, A., Ramos-Alvarado, B., Perez-Raya, I. ve Alatorre-Ordaz, A. (2013). "Performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell using tree-shaped designs for flow distribution", International Journal of Hydrogen Energy, 38:14750-14763.

[7] Meng, H., (2008). "A PEM fuel cell model for cold-start simulations", Journal of Power Sources, 178 (1):141-150.

[8] Bilgili, M., Bosomoiu, M. ve Tsotridis, G. (2015). "Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions", International Journal of Hydrogen Energy, 40: 2303–2311.

[9] Zhou, Y., Jiao,K., Du,Q.,Yin, Y. ve Li, X. (2013). "Gas diffusion layer deformation and its effect on the transport characteristics and performance of proton exchange membrane fuel cell", International Journal of Hydrogen Energy, 38: 12891-12903.

[10] Cheddie, D. F. ve Munroe N. D. H., (2006). "Three dimensional modeling of high temperature PEM fuel cells", Journal of Power Sources, 160(1): 215–223.

[11] Abdollahzadeh, M., Pascoa. J.C., Ranjbar, A.A. ve Esmaili, Q., (2014). "Analysis of PEM (Polymer Electrolyte Membrane) fuel cell cathode two-dimensional modeling", Energy, 68: 478-494.

[12] Ferreira, R. B., Falcao, D.S., Oliveira, V.B. ve Pinto, A.M.F.R.,(2015). "Numerical simulations of two-phase flow in an anode gas channel of a proton exchange membrane fuel cell", Energy, 82 :619-628.

[13] Zhang, H., Pei, P., Li, P. ve Yuan,X., (2010). "The conception of in-plate adverse-flow flow field for a proton exchange membrane fuel cell", International Journal of Hydrogen Energy, 35: 9124-9133.

[14] Zeroual, M., Ben Moussa, H. ve Tamerabet, M., (2012). "Effect of gas flow velocity in the channels of consumption reactants in a fuel cell type (PEMFC)", Energy Procedia, 18:317 – 326.

[15] Güvelioğlu, G. H. ve Stenger, H. G. (2005). "Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells", Journal of Power Sources, 147:95–106.

[16] Dawes, J.E., Hanspalb, N.S., Family, O.A. ve Turan, A. (2009). "Three-dimensional CFD modelling of PEM fuel cells: An investigation into the effects of water flooding", Chemical Engineering Science, 64(12):2781-2794.

[17] U.S. Department of Energy, (2004). Fuel Cell Handbook, 7, West Virginia.

[18] Beyribey, D.B., (2012), Advanced Electrode/Electrolyte Materials For Low and Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[19] Wikipedia, Fuel Cell, https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell, 11 Mart 2016.

[20] Fairbanks, J. W., (2004), Engine Maturity, Efficiency, and Potential Improvements http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2004/session1/2004_deer_fairbanks.pdf, 11 Mart 2016.

[21] Wikipedia, Yakıt Hücresi, https://en.wikipedia.org/wiki/Yakıt_hücresi, 16 Mart 2016.

[22] Fuel Cell Today, History, http://www.fuelcelltoday.com/history, 12 Mart 2016.

[23] Behling, N. H., (2013). Fuel Cells: Current Technology Challenges And Future Research Needs, First Edition, Elsevier, Amsterdam.

[24] Arvay, A. (2011). Proton Exchange Membrane Fuel Cell Modeling and Simulation using Ansys Fluent, Yüksek Lisans Tezi, Arizona State University.

[25] Vaghari,H., Jafarizadeh-Malmiri,H., Berenjian, A. ve Anarjan, N., (2013). "Recent advances in application of chitosan in fuel cells", http://sustainablechemicalprocesses.springeropen.com/articles/10.1186/2043-7129-1-16, 4 Nisan 2016.

[26] Newswire, News, http://www.prnewswire.com/news-releases/fuel-cell-at-german-hospital-tops-10-million-kilowatt-hours-of-operation-56795852.html, 20 Mart 2017.

[27] U.S. Department of Energy, (1999). Review of Combined Heat and Power Technologies, Yayın No: 98R020974, Washington.

[28] Spiegel,C., (2008). PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB, First Edition, California.

[29] Larminie, J. ve Dicks, A., (2003). Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, Wiley, West Sussex.

[30] Wilson, M.S., Valerio, J.A. ve Gottesfeld, S., (1995). "Low platinum loading electrodes for polymer electrolyte fuel cells fabricated using thermoplastic ionomers", Electrochimica Acta, 40(3):355-363.

[31] O'Hayre, R., Lee, S.J., Cha, S.W. ve Prinz, F.B., (2002). "A sharp peak in the performance of sputtered platinum fuel cells at ultra-low platinum loading", J. Power Sources, 109:483–493.

[32] Honda, Haberler, https://honda.com.tr/haberler/ilk-honda-clarity-fuel-cell-avrupaya-ulasti, 19 Haziran 2017.

[33] Toyota, Haberler ve Etkinlikler, https://www.toyota.com.tr/about/news_and_events/toyota-mirai-avrupada-yayginlasmaya-devam-ediyor.json, 19 Haziran 2017.

[34] Car and Driver, Honda, http://www.caranddriver.com/honda/clarity, 20 Haziran 2017.

[35] Car and Driver, Toyota, http://www.caranddriver.com/toyota/mirai, 20 Haziran 2017.

[36] Barbir, F., (2013). PEM Fuel Cells Theory and Practice, Elsevier, California.

[37] Hoogers, F., (2003). Fuel Cell Technology Handbook, CRC Press, Boca Raton.

[38] Transport for London, Improving Buses, https://tfl.gov.uk/modes/buses/improving-buses, 27 Eylül 2017.

[39] CNN, This hydrogen-powered train emits only water, http://money.cnn.com/2017/04/12/technology/germany-hydrogen-powered-train/index.html, 5 Mayıs 2017.

[40] Green Garage, 11 Big Advantages and Disadvantages of Hydrogen Fuel Cells, https://greengarageblog.org/11-big-advantages-and-disadvantages-of-hydrogen-fuel-cells.

[41] Scribd, Ansys Fluent Fuel Cell Modules Manual, https://tr.scribd.com/document/348271590/ANSYS-Fluent-Fuel-Cell-Modules-Manual-pdf, 16 Temmuz 2017.

[42] Siegel, N.P., Ellis, M.W., Nelson, D.J. ve von Spakovsky, M.R. (2003). "Single domain PEMFC model based on agglomerate catalyst geometry".

[43] Wikipedia, Sonlu Hacim Yöntemi, https://tr.wikipedia.org/wiki/Sonlu_hacim_y%C3%B6ntemi, 18 Temmuz 2016.

[44] Sharcnet, Orthogonal Quality, https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_msh/msh_orthogonal_quality.html, 18 Mayıs 2016.

[45] Sharcnet, Skewness, https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_msh/msh_skewness.html, 18 Mayıs 2016.

[46] Kaytaoğlu, S. ve Akyalçın, L., Anadolu Üniversitesi Perspektifinde PEM Yakıt Hücresi Çalışmaları, http://home.anadolu.edu.tr/~skaytako/web_malzemeleri/Mikro-kojen07-.ppt, 4 Nisan 2016.

[47] Karaoğlan, M.U. ve Kuralay, N.S., (2014). "PEM Yakıt Hücresi Modeli," Mühendis ve Makina, 55(657):51-58.

[48] Researchgate, Why does the voltage of fuel cells decrease when we increase the load (i.e. current)?, https://www.researchgate.net/post/Why_does_the_voltage_of_fuel_cells_decrease_when_we_increase_the_load_ie_current, 5 Nisan 2017

[49] Larbi, B., Alimi, W., Chouikh, R. ve Guizani, A., (2012). "Effect of porosity and pressure on the PEM fuel cell performance", International Journal of Hydrogen Energy, 38: 8542-8549.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yunus AKSU

Doğum Tarihi ve Yeri : 05.06.1989 – Bakırköy

Yabancı Dili : İngilizce, Almanca

E-posta : yunus3478@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Kimya Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2013
Lise	Fen Bilimleri	Cağaoğlu Anadolu Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2015-	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu	Enerji Uzman Yardımcısı

YAYINLARI

Bildiri

1. Aksu, Y. , Karpuz, Ö. ve Saraç, H., (2016). “3 Boyutlu Modellerde Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Performansını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi”, 12. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 23-26 Ağustos, İzmir.