PEM YAKIT HÜCRELİ ARAÇLARDA TERMAL VE SU YÖNETİM SİSTEMLERİNİN TEORİK VE NÜMERİK İNCELENMESİ

YUNUS EMRE ÖZTÜRK

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PEM YAKIT HÜCRELİ ARAÇLARDA TERMAL VE SU YÖNETİM SİSTEMLERİNİN TEORİK VE NÜMERİK İNCELENMESİ

Yunus Emre ÖZTÜRK

0009-0009-7983-6399

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PEM YAKIT HÜCRELİ ARAÇLARDA TERMAL VE SU YÖNETİM SİSTEMLERİNİN TEORİK VE NÜMERİK İNCELENMESİ

Yunus Emre ÖZTÜRK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Günümüzde yaşanan enerji krizi nedeniyle birçok endüstri yeni, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları ve enerji sistemleri arayışına girmişlerdir. Otomotiv endüstrisi de benzer şekilde bu enerji krizi ve çevre kirliliği nedenleriyle içten yanmalı motor teknolojileri yerine alternatif tahrik sistemleri üzerine odaklanmıştır. Bu kapsamda proton değişim membranlı yakıt hücreleri ve teknolojileri yenilenebilir, temiz ve sürdürülebilir enerji konularında otomotiv endüstrisi için umut vadetmektedir. Bu noktada bu batarya sisteminin araçta kullanımı için termal ve su yönetim alt sistemleri bataryanın stabil, güvenli ve yüksek performansta çalışabilmesi için kritik önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında binek bir araçta kullanılabilecek 100 kW güce sahip proton değişim membranlı yakıt hücresinin termal ve su yönetim kısımları bir boyutlu nümerik yöntem kullanılarak ele alınmış, farklı koşullar altındaki durumları incelenmiştir. Elde edilen bulguların ışığında binek bir araçta proton değişim membranlı yakıt hücresinin kullanılabilirliği ve sistem gereksinimlerinin sağlanabilirliği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri, Bir Boyutlu Akışkan Simülasyonları, Termal Yönetim Sistemleri, Su Yönetim Sistemleri, GT-Suite
2023, ix +60 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

THEORETICAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE THERMAL AND WATER MANAGEMENT SYSTEMS IN THE PEMFC VEHICLES

Yunus Emre ÖZTÜRK

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Due to the current energy crisis, many industries have been working on new, renewable and sustainable energy sources and energy systems. Similarly, the automotive industry has been focusing on alternative propulsion systems instead of internal combustion engine technologies due to this energy crisis and environmental pollution. In this context, proton exchange membrane fuel cells and its technologies are promising for the automotive industry in terms of renewable, clean and sustainable energy. At this point, thermal and water management subsystems for the use of this battery system in the vehicle have critical importance for the battery to work in a stable, safe and high performance.

In this thesis, the thermal and water management subsystems of a 100 kW proton exchange membrane fuel cell that can be used in a passenger vehicle are handled using one-dimensional numerical method, and their situations under different conditions are examined. According to the results of this thesis, the usability of the proton exchange membrane fuel cell in a passenger vehicle and the availability of the system requirements have been demonstrated.

Key words: Proton Exchange Membran Fuel Cell, One Dimensional CFD Simulations, Thermal Management Systems, Water Management Systems, GT-Suite.
2023, ix +60 pages

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında emeği geçen danışmanım Prof. Dr. Muhsin KILIÇ başta olmak üzere, tüm akademisyen hocalarıma, her zaman yanımda olan eşim Şevval ÖZTÜRK ve aileme, manevi desteği için dostlarım Canberk MOLLA ve Candaş YURDAKUL' a teşekkürlerimi sunarım.

Yunus Emre ÖZTÜRK

…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Yakıt Hücresi Nedir? 4
2.2. Yakıt Hücrelerinin Tarihi 5
2.3. Yakıt Hücresi Çeşitleri 11
2.3.1. Alkali Yakıt Hücresi (AYH) 11
2.3.2. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PDMYH) 12
2.3.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (FAYH) 14
2.3.4. Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (EKYH) 15
2.3.5. Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH) 16
2.4. PDM Yakıt Hücresi Sistemi ve Komponentleri 17
2.4.1. PDM Yakıt Hücresi ve Batarya Bütünü 17
2.4.2. PDM Yakıt Hücresi Yakıt Sistemi 19
2.4.3. PDM Yakıt Hücresi Hava Emiş ve Su Yönetim (Egzoz) Sistemleri 20
2.4.4. PDM Yakıt Hücresi ve Termal Yönetim Sistemi (Soğutma Sistemi) 23
3. YÖNTEM VE METOT 26
3.1. PDM Yakıt Hücresinin Termodinamiği ve Kimyası 26
3.2. PDM Yakıt Hücresinin Sistem Kayıpları 29
3.2.1. Aktivasyon Kayıpları 30
3.2.2. Yakıt Geçişi ve İç Elektrik Akımları 31
3.2.3. Omik Kayıplar 31
3.2.4. Kütle Transferi ve Derişim Kayıpları 31
3.2.5. Kayıplar Toplamı ve Net Gerilim Değeri 32
3.3. PDM Yakıt Hücresi Çalışma Koşulları 32
3.4. Genel Korunum Denklemleri 33
3.4.1. Kütlenin Korunumu 34
3.4.2. Momentumun Korunumu 34
3.4.3. Enerjinin Korunumu 35
3.5. Bir Boyutlu PDM Yakıt Hücreli Batarya Sisteminin ve Komponentlerinin Modellenmesi 37
3.5.1. PDM Yakıt Hücreli Batarya Sistem Modeli 37
3.5.2. PDM Yakıt Hücreli Batarya Termal Yönetim Sistemi Modeli 41
3.5.3. PDM Yakıt Hücreli Batarya Hava Emiş ve Su Yönetim Sistemleri Modeli 45
3.5.4. Analiz Koşulları ve Çevrimler 47
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 51
4.1. PDM Yakıt Hücreli Batarya Modeli 51
4.2. PDM Yakıt Hücreli Batarya Hava Emiş Sistemi Modeli 52
4.3. PDM Yakıt Hücreli Batarya Termal Yönetim Sistemi Modeli 53
4.4. PDM Yakıt Hücreli Batarya Su Yönetim Sistemi Modeli 54
5. SONUÇ 56

KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ 60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
CO_2	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
H^+	Hidrojen İyonu
O_2	Oksijen
e^-	Elektron
H_2O	Su
H_2	Hidrojen
h_f	Entalpi (kJ/mol)
ΔG	Gibbs Serbest Enerjisi (kJ/mol)
ΔH	İç Enerji (kJ/mol)
T	Sıcaklık (K)
ΔS	Entropi (kJ/molK)
W	Elektriksel İş (J/mol)
q	Elektriksel Yük (coulombs/mol)
n	Molekül Başına Düşen Elektron Adedi
F	Faraday Sabiti
E	Elektrik Potansiyeli (V)
η	Verim
V_{AD}	Açık Devre Gerilimi (V)
V_{akt}	Aktivasyon Kayıpları Nedeniyle Oluşan Gerilim Farkı (V)
V_{om}	Omik Kayıpları Nedeniyle Oluşan Gerilim Farkı (V)
V_{der}	Derişim Kayıpları Nedeniyle Oluşan Gerilim Farkı (V)
$V_{İA}$	İç Akış Kayıpları Nedeniyle Oluşan Gerilim Farkı (V)
$V_{hücre}$	Hücre Oluşan Net Gerilim (V)
i	Akım (A)
R	İdeal Gaz Sabiti (J/molK)
S_m	Kütle ve Momentum Korunum Denklemleri için Kaynak Terimi
u	Hız Vektörü (m/s)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
P	Akışkan Basıncı (Pa)
μ^{ef}	Akışkanların ve/veya Karışımlarının Ortalama Viskozitesi (kg/ms)
K	Difüzyon Tabakasının Geçirgenliği (m^2)
ε	Difüzyon Tabakasının Gözenekliliği
ε_m	Membran Tabakasının Gözenekliliği
K_f	Elektro Kinetik Geçirgenlik (m^2)
K_p	Hidrolik Geçirgenlik (m^2)
c_f	Sabitlenmiş Elektrik Yükünün Yoğunluğu (mol/m^3)
n_f	İyonlarla Taşınan Elektron Miktarı (kJ/mol)
ϕ_m	İyonların Faz Potansiyeli
c_p	Özgül Isı (J/kgK)
k	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
S_e	Enerji Korunum Denklemi için Kaynak Terimi
A_{fg}	Birim Hacimde Faz Değişimi Olan Yüzey Alanı (1/m)
σ	Buharlaşma Katsayısı (kg/m^2s)
x_{sat}	Doyma Kuruluk Derecesi

x_{H2O}	Su Buharının Kuruluk Derecesi
Δh_{fg}	Buharlaşma Isısı (J/kg)
i_e	Akım Yoğunluğu (A/m^2)
κ_s	Geçirgen Difüzyon Tabakasının Elektrik İletkenliği (S/cm)
i_m	İyon Akım Yoğunluğu (A/m^2)
κ_m	Katalist Yüzeyinin Elektrik İletkenliği (S/cm)

Kısaltmalar	**Açıklama**
PDM	Proton Değişim Membranlı
DC	Direkt Akım
YSYH	Yüksek Sıcaklıklı Yakıt Hücresi
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
AYH	Alkali Yakıt Hücresi
FAYH	Fosforik Asit Yakıt Hücresi
EKYH	Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi
KOYH	Katı Oksit Yakıt Hücresi
OEM	Original Equipment Manufacturer
NEDC	Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü
WLTP	Uluslararası Uyumlu Hale Getirilmiş Hafif Araç Test Prosedürü
US06	Tamamlayıcı Federal Test Prosedürü
HSHS	Hava Soğutmalı Hava Soğutucu

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Yakıt hücresinin temel şeması	4
Şekil 2.2.	Volta pili (Sandstede ve arkadaşları, 2003)	6
Şekil 2.3.	Grove 'un yakıt hücreli batarya modeli (Liebhafsky ve Cairns, 1968)	7
Şekil 2.4.	Bacon' un ilk yüksek basınçlı yakıt hücresi (Bacon, 1960)	9
Şekil 2.5.	Bacon tarafından yapılmış ilk çift katmanlı gözenekli elektrot (Adams & Bacon, 1963)	9
Şekil 2.6.	Bacon tarafından tasarlanan yakıt hücresi sistemi (Vielstich, 1970)	10
Şekil 2.7.	PDM yakıt hücreli batarya sistemi ve komponentleri	17
Şekil 2.8.	Temel PDM yakıt hücresi bütünü komponentleri	18
Şekil 2.9.	PDM yakıt hücreli batarya yakıt sistemi	19
Şekil 2.10.	PDM yakıt hücreli batarya hava emiş ve su yönetim sistemleri	21
Şekil 2.11.	Mann+Hummel PDM yakıt hücreli batarya hava emiş filtresi (Harenbrock ve arkadaşları, 2020)	22
Şekil 2.12.	PDM yakıt hücreli batarya soğutma sistemi	24
Şekil 3.1.	PDM yakıt hücresine olan enerji girdi ve çıktılarının şeması	29
Şekil 3.2.	Farklı çalışma aralıklarında değişen gerilim değeri (Larminie ve Dicks, 2003, Fuel cell systems explained)	30
Şekil 3.3.	GT-Suite ile 100 kW PDM yakıt hücreli batarya sistem modeli	39
Şekil 3.4.	Bir boyutlu model ile verilen polarizasyon eğrisi	40
Şekil 3.5	PDM yakıt hücreli batarya termal yönetimi sistemi	42
Şekil 3.6	PDM yakıt hücreli batarya hava emiş ve su yönetimi sistemi	46
Şekil 3.7.	NEDC sürüş profili	48
Şekil 3.8.	WLTP-Class 2 sürüş profili	48
Şekil 3.9.	US06 sürüş profili	48
Şekil 3.10.	Farklı sürüş koşulları ile oluşturulmuş üç senaryo	49
Şekil 3.11.	NEDC yakıt sürüş koşulu	50
Şekil 3.12.	WLTP-Class 2 yakıt sürüş koşulu	50
Şekil 3.13.	US06 yakıt sürüş koşulu	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Farklı yakıt hücrelerinin temel özellikleri (Peighambardoust ve arkadaşları, 2010) 11
Çizelge 3.1. PDM yakıt hücresinde aktif olarak kullanılan maddelerin entalpi ve entropi değerleri (Barbir, 2012) 27
Çizelge 3.2. Sıcaklığa bağlı olarak entalpi, Gibbs serbest enerjisi, entropi ve potansiyel gerilim değerlerinin değişimi (Barbir, 2012) 28
Çizelge 3.3. Standart PDM yakıt hücreli bataryaların çalışma koşulları (Barbir, 2012) 33
Çizelge 3.4. Ballard PDM yakıt hücreli bataryanın özellikleri (Ballard, 2023) 38
Çizelge 3.5. Toyota Mirai 2017 PDM yakıt hücreli bataryanın özellikleri 39
Çizelge 3.6. Bir boyutlu 100 kW PDM yakıt hücreli batarya modeli ana girdileri 40
Çizelge 3.7. Soğutma boruları ölçüleri 44
Çizelge 3.8. Genleşme tankı ölçüleri 44
Çizelge 3.9. Soğutma pompası özellikleri 44
Çizelge 3.10. Isı değiştirici özellikleri 44
Çizelge 3.11. Hava emiş ve egzoz borularının özellikleri 47
Çizelge 3.12. Hava kompresörü özellikleri 47
Çizelge 3.13. Hava filtresi özellikleri 47
Çizelge 4.1. PDM yakıt hücreli batarya modeli için hesaplanan değerler-1 51
Çizelge 4.2. PDM yakıt hücreli batarya modeli için hesaplanan değerler-2 51
Çizelge 4.3. Toyota Mirai test sonuçları (Lohse-Busch ve arkadaşları, 2018) 52
Çizelge 4.4. PDM yakıt hücreli batarya hava emiş modeli için hesaplanan değerler 52
Çizelge 4.5. PDM yakıt hücreli batarya radyatör modeli için hesaplanan değerler 53
Çizelge 4.6. PDM yakıt hücreli batarya su yönetim modeli için hesaplanan değerler 54

1. GİRİŞ

Günümüzde dünya birçok endüstride karşımıza çıkan net bir enerji krizi ile karşı karşıya olduğumuz bir çağda bulunmaktadır. İklim değişikliği, dünya atmosferinin bozunması, çevre kirliliği, yenilenemez enerji kaynaklarının kullanımı, emisyon gazlarının atmosfere salınımı, sürdürülemez malzemelerin kullanımı gibi etmenler dünyanın ekolojik, biyolojik ve enerji dengelerini bozmaktadır. Bu nedenle bilim insanları ve mühendisler bu problemleri çözmek adına yeni icatlar, çalışmalar, sistemler, kısaca çözümler ortaya koymak için çalışmaktadırlar.

Otomotiv endüstrisi de benzer şekilde güncel durumunda çoğunlukla içten yanmalı motorlar ile araçları tahrik ettirmeleri nedeniyle ve bu motorlarda da yüksek çoğunlukla yenilenemez benzin ve dizel yakıtlar kullanıldığı için ciddi oranda emisyon gazı salınımı yapmaktadırlar. Bu noktada günümüzde bu tahrik mekanizmasına güç verecek alternatif enerjiler üzerine çalışılmaktadır. Bu amaçla otomotiv sektöründe de emisyonu azaltmak ve daha temiz enerji kullanmak için elektrifikasyon devrine girilmiştir.

Bu yeni elektrifikasyon çağında başı çeken iki önemli yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki bu tez çalışmasının da konusu olan yakıt hücresi teknolojisidir. Bunun yanı sıra lityum iyon bataryalarla da elektrik üretilip elektrik motorlarına besleme yapılması da söz konusudur. Bu noktada temiz enerji üretimi konusunda hidrojenli yakıt hücreleri çok daha umut vadedicidir. Yeşil hidrojen üretim tekniklerinin de gelişmesi ile yakıt hücrelerine beslenen hidrojen yakıt hücresindeki reaksiyonlar sonucunda su ve su buharı üreterek ortama bu karışımın salınımını yapmaktadır.

Öte yandan lityum iyon bataryalarının üretim proseslerindeki kirlilik, bataryanın şarjı için gerekli olan elektriğin halen birçok uygulamada dizel jeneratörler ile üretiliyor olması ve lityum elementinin dünya genelindeki madenlerde sınırlı sayıda bulunuyor olması gibi nedenlerden dolayı %100 temiz enerji arayışında halen geliştirilmesi gereken yönleri olduğunu net bir şekilde göstermektedir.

Bu tez kapsamında Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreli Araçlara odaklanılmıştır. Bu tezin amacı farklı termal ve su yönetimi sistemlerinin incelenmesi ve karşılaştırılmasıdır. Tez kapsamında detaylıca bahsedildiği gibi yakıt hücrelerinin sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için basınç, sıcaklık, nem gibi parametrelerinin belirli kondisyonlarda çalışması gerekmektedir. PDM yakıt hücreli bir araçta farklı sürüş koşullarında bu sistemlerin ayrıca kontrol edilmesi ve bu farklı sürüş koşullarındaki sistem davranışlarının optimize edilmesi yakıt pilinin uygun şekilde çalışması için önemi kritik düzeydedir.

Bu noktada sistem seviyesinde ve araç seviyesinde yapılacak nümerik 1 boyutlu analizler ile sistem ve araç seviyesi simüle edilerek termal ve su yönetim sistemleri optimize edilmektedir. Aynı prensip ile içten yanmalı motor sistemleri ve lityum iyon bataryalı araçların destek sistemleri modellenmektedir.

1 boyutlu akışkan gücü benzetim metodu diğer iki ve üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerine göre çok daha kompleks sistemlerin birlikte modellenmesini sunmanın yanında birçok farklı döngü ve sürüş koşulunu tüm sistem ve araç seviyesinde modelleme imkânı sunmaktadır. Diğer nümerik yaklaşımlara göre ayrıca çok daha fazla durumu eş zamanlı olarak çok daha hızlı bir şekilde çözmektedir.

Bu tez kapsamında 1 boyutlu akışkan gücü benzetimi programı GT-Suite kullanılarak PDM yakıt hücreli araç termal ve su yönetim sistemleri modellenmiş ve belirli yol koşullarında simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında endüstride kullanılan PDM yakıt hücreli bataryalar referans alınarak 100 kW değerinde bir yakıt hücreli batarya modellenmiştir. Bu 100 kW değerindeki PDM yakıt hücreli bataryanın termal ve su yönetim sistemleri ve ek olarak yakıt sistemi modellenerek alınabilecek maksimum güç ve sürüş koşullarındaki durumu incelenmiştir. 1 boyutlu akışkan gücü benzetimi ile modellenen termal, su ve yakıt sistemlerinin komponentlerinin birçok farklı ölçüleri, sınır koşulları ve performans girdileri ile farklı senaryolarda modelleme imkanı bulunmuş ve optimum sistem ve komponent seçimleri yapılabilmiştir.

Ayrıca termal ve su yönetim sisteminin çalışma performansı ve yeterliliği incelenip araç üzerindeki kullanımın mümkün olup olmadığı irdelenmiştir. Böylece standart binek bir araç için PDM yakıt hücreli batarya kullanımının uygunluğu ortaya konmuştur. Bu noktada hedef olarak 90-100 kW değerindeki içten yanmalı motora sahip bir aracın performansına ulaşmak ve mümkünse geçmek hedeflenmiştir.

Paralel olarak bu tez kapsamında yakıt hücresi tarihi, PDM yakıt hücreli batarya sistemleri, çalışma koşulları, teorik yaklaşımı gibi diğer önemli noktalar da incelenmiş ve açıklanmıştır.

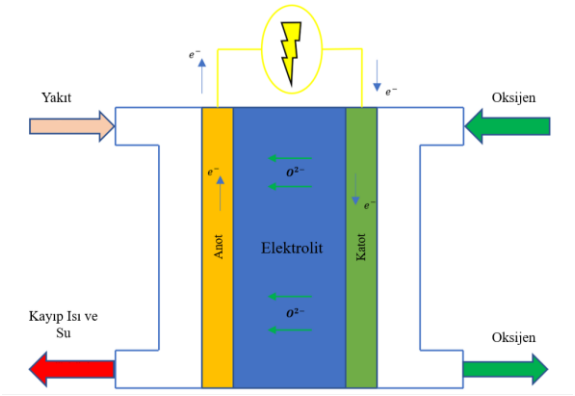
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yakıt Hücresi Nedir?

Geçtiğimiz son 30 yılda yakıt pili kullanımı giderek artmıştır. Gelişen yeni teknolojilere göre (taşınabilir, sabit ve ihtiyaç duyduğu gücü sağlayabilen) yakıt pilleri, otomotiv endüstrisinde içten yanmalı motorlar yerine araçlara güç sağlamak için tercih edilebilmektedir.

Bir mühendis olarak, bu yeni enerji sisteminin kapasite ve olanaklarını anlamak önemlidir. Yakıt hücrelerine bakıldığında bataryaya benzediği söylenebilir. Yakıt hücreleri enerji dönüştürücüdür ve enerjiyi taşıyabilen yakıtın kimyasal enerjisini dönüştürürler. Bilinen enerji dönüştürücü motorlar, yakıtın kimyasal enerjisini ısı ve buhara dönüştürür ve daha sonra bu enerjiyi mekanik hareket için kullanır. Ancak yakıt hücresi enerjiyi dönüştürmek için içinde hareketli bir parçaya ihtiyaç duymaz. DC akım ile doğrudan enerji sağlayabilirler.

Yukarıda vurgulandığı gibi, yakıt pilleri bir pil gibidir. Yakıt hücrelerinin içinde Şekil 2.1 ile gösterildiği gibi piller gibi elektrotlar ve elektrolitler bulunur. Ama bazı farklılıkları bulunmaktadır. Piller elektrokimyasal reaksiyonlarla elektrik üretebilir. Talepleri yoktur ve deşarj olabilirler. Ancak yakıt hücrelerinde, elektrik üretmek için yakıt ve reaktanın sürekli olarak yakıt hücresine beslenmesi gerekir. Ve yakıt hücreleri, yakıt hücrelerinin besleme sistemini kesene kadar deşarj olmaz. (Barbir, 2012)



Şekil 2.1. Yakıt hücresinin temel şeması

2.2.Yakıt Hücrelerinin Tarihi

Geçtiğimiz son 30 sene içerisinde yakıt hücrelerinin araştırılması ve incelenmesi temiz enerji arayışındaki ana konulardan biri olmuştur. Ancak bu yakıt pili teknolojisinin sadece 30 yıldır geliştirildiği anlamına gelmemektedir. İlk adımları neredeyse iki yüzyıl öncesinde atılmıştır.

Yakıt pillerinin tarihi incelenmek isteniyorsa yolculuğun başlangıcı aslında oksijen ve hidrojen elementlerine dayanmaktadır. Hidrojen evrende ve dünyada en çok bulunan elementlerin başında gelmektedir. Dünyanın atmosfer tabakalarından biri olan litosfer tabakası bünyesinde bol miktarda hidrojen ve oksijen bulundurmaktadır. Litosfer tabakasının yaklaşık kalınlığı 16 km olmakla beraber içerisinde 49,4% oranında oksijen ve 15,4% oranında hidrojen bulunmaktadır. Bu yapıya sahip bir atmosferde bulunmanın sonucu olarak oksijenin ve hidrojenin keşfi kaçınılmaz olmuştur.

Oksijeni ilk kez Carl Wilhelm Scheele 1772 yılında keşfetmiştir. Hava ve Ateş Üzerinde Kimyasal Gözlemler ve Deneyler kitabında Scheele, atmosferde bulunan iki farklı akışkandan bahsetmektedir. Bunlardan biri yanma reaksiyonunun gerçekleştirecek kimyasal yapıya sahipken diğer gaz yanmayı önleyici bir yapıya sahiptir.

Oksijenin keşfinden sonra Lavoisier, kırmızı cıva oksiti ısıtma deneylerini tekrarladı ve 1774'te araştırmayı çok daha ileri götürdü.

Bu çalışmaya paralel olarak Lavoisier yanmayan hava üzerinde çalışmalar gerçekleştirdi. Çalışmaları sonucunda suyun hidrojenin yanması sonucu ortaya çıktığını keşfetti. Benzer sonuca ulaşması ile Henry Cavendish 1766 yılında hidrojeni keşfetti. Bir önceki cümlelerde bahsedildiği gibi Cavendish hidrojeni tespit eden tek kişi değildi ancak hidrojenin doğasını ilk kez tanımlayan Cavendish olmuştu. (Sandstede ve arkadaşları, 2003)

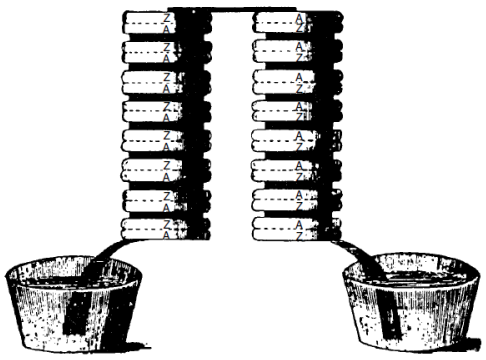
Elektrokimyanın ilk adımları Galvani' nin deneyleri ile atılmıştır. Galvani ölü kurbağalara elektrik akımı vererek deneyler gerçekleştirmiştir. Kısa bir süreliğine elektrik

enerjisinin kaynağı biyolojik organizmalar olarak kabul edilmiştir. Galvani ’den sonra Volta aynı deney üzerinde çalışarak bu biyolojik elektrik enerjisi üzerine odaklanmıştır ancak fark etmiştir ki kurbağaların elektrik kaynağı olmadığını, ancak elektik akımının bir indikatörü olduklarını tespit etmiştir.

1800 yılında Volta bir rapor yayınlamıştır ve raporunda yeni bir aparat olan Volta pilinden sıkça söz etmektedir. Pil o zamana kadar yapılmış ilk yüksek gerilim ile sürekli elektrik akımı sağlayan elektrik kaynağıdır. Bu pile ait şema Şekil 2.2 ile verildiği gibi görülmektedir.

Faraday aynı zamanda elektrokimyayı anlamak için elektrokimya fiziksel hadisenin üzerine de çalıştı. Bu çalışmaların ışığında 1834 yılında Faraday Kanunlarını geliştirmiştir.

1- Akım üreten elektrokimyasal reaksiyon sistemden geçen elektriksel yüklemeye doğru orantılıdır.
2- Belirli miktarda elektrik yükü ile üretilen veya tüketilen malzemeler, eşdeğer ağırlıkları ile ilişkilidir. (Sandstede ve arkadaşları, 2003)



Şekil 2.2. Volta pili (Sandstede ve arkadaşları, 2003)

Eğer yakıt hücreleri ile alakalı çalışmalar yapmış araştırmacılar ve incelemeler incelenecek olursa Sir William Robert Grove’ un 1839 yılında ilk yakıt hücresini icat ettiğinin kabul edildiği görülebilir. Ancak yakıt hücrelerinin tarihi incelendiğinde bir ismin daha göz önünde olduğu unutulmamalıdır. Profesör Christian Friedrich

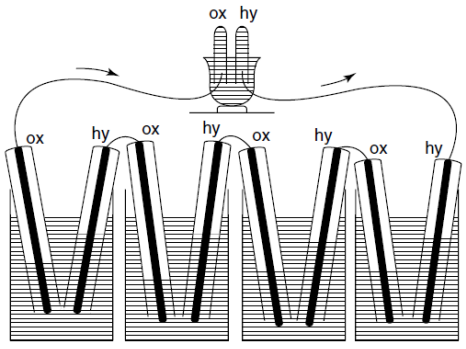
Schoenbein. Schoenbein’ in yaptığı yayın Grove’ un yaptığı yayından bir ay öncesinde aynı dergide yayınlanmıştır.

Schoenbein ilk defa yakıt hücresinin etkilerini deneysel sonuçlarına dayanarak yayınında dile getirmiştir. Tüpleri, ortasında seyreltik sülfürik asidin bulunduğu bir platin folyo içeren hidrojen ve oksijenle doldurmuştur. Bu tüpleri Volta pili ile bağlamış ve elektrik kaynağını tüplerden çıkardığında platin folyolar arasındaki gerilimi hala ölçebilmişti, böylece gaz zinciri (hidrojen ve oksijen zincirinin gerilimi) Schoenbein tarafından keşfedildi.

Grove da deneylerini benzer sonuçları alarak tamamlamıştı ancak Grove’ un çalışmasının amacı Schoenbein’ den farklıydı. Grove’ un ana konsepti gaz bataryası olarak adlandıracağı yeni bir tür batarya ortaya koymaktı.

Grove yeni gazlı voltaik bataryası ile ilgili çalışmasını yayınladı. Grove dört birim hücreyi yan yana sıralayarak birbirlerine Şekil 2.3 ile verildiği gibi bağlamıştı. Suyun elektrik enerjisini akımla birlikte yakıt hücresi adını verdiği bataryaya aktardı.

Grove bu yayını, çalışmaları ve araştırmaları ile yakıt hücresinin mucidi unvanını almıştır. (Sandstede ve arkadaşları, 2003) Schoenbein ve Grove' un etkisi yakıt pillerinin gelişimi için büyük önem arz etmektedir.



Şekil 2.3. Grove ’un yakıt hücreli batarya modeli (Liebhafsky ve Cairns, 1968)

Mond ve Langer, Grove' un yayınladığı ve geliştirdiği yakıt hücreleri üzerine çalıştılar. 1889 yılında incelemelerini yaparken yakıt hücresinin üç parçasının alanının arttırılmasının yakıt hücresinin verimini arttıracağını keşfettiler.

Mond ve Langer' in yaptığı çalışmalar günümüzde kullanılan fosforik asit yakıt hücrelerine ilham olmuş ve yol göstermiştir. (Ortiz-Rivera ve arkadaşları, 2003)

Friedrich Wilhem Ostwald, Leipzig'de Fiziksel Kimya Profesörüydü. Enerji konularında profesyoneldi. Elektrokimyayı teşvik etti. Sürekli elektrik enerjisi geliştirmenin tüm yollarını aramıştır. Bu sayede yakıt hücrelerinin teorik altyapısını geliştirmiştir. (1902-1923) (Ortiz-Rivera ve diğerleri, 2003)

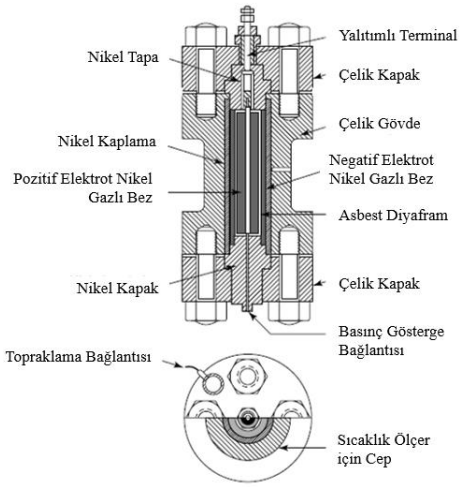
1896'da William W. Jacques özellikle kömüre odaklandı. Kömürün kimyasal enerjisini elektrik enerjisine çevirmeye çalışmış ve başarmıştır.

Jacques'ın icadının çalışma prensibi, bir karbon elektrot ile reaksiyona girmesi için alkali elektrolit üzerine hava enjekte etmekti. Bu prensiple bir karbon pil geliştirdi. Ancak sonucuna bakıldığında, bu pilin veriminin beklediği gibi olmadığı görülüyordu. (Andújar ve Segura, 2009)

Emil Baur, Oswald'dan ilham aldı ve yakıt hücresi üzerinde çalıştı. Neredeyse tüm yakıt hücresi tiplerine odaklandı. Ancak bunlardan ikisi yakıt hücresinin tarihçesi için önemlidir. Birincisi erimiş veya yarı katı elektrolit ile yapılan yakıt pili, diğeri ise katı elektrolit ile yapılan yakıt pilidir.

H. Pries, Baur' a 1930'da tipi zirkonyum olan katı oksit elektrolitli ilk YSYH' ni (Yüksek Sıcaklık Yakıt Hücresi) geliştirmesinde yardımcı oldu. (Ortiz-Rivera ve diğerleri, 2003) Baur ayrıca yakıt hücrelerini ve elektrotları özel olarak gruplara ayırdı. (Sandstede ve diğerleri, 2003)

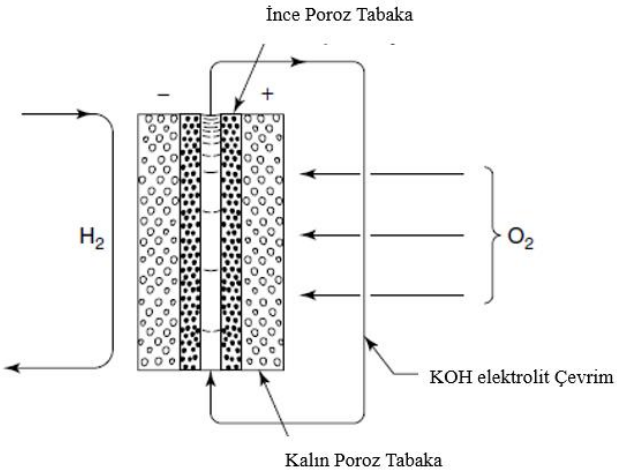
Francis Thomas Bacon, en başarılı yakıt hücresi bilimcisi ve uzmanlarından biriydi. 1938' de Şekil 2.4 ile görüldüğü gibi yüksek basınç hücresine sahip bir cihaz tasarladı ve önerdi.



Şekil 2.4. Bacon' un ilk yüksek basınçlı yakıt hücresi (Bacon, 1960)

Bu yakıt hücresi 210 bar basınçta ve 200 °C sıcaklıkta çalışabilmektedir. Elektrolizör olarak kullanıldığında 160 bar basınçta ve 100 °C sıcaklıkta çalışıyordu. Bu koşullarda hücrenin akım yoğunluğu, 0,89 V' ta sabitlenene kadar 13 $mAcm^{-2}$ 'ye ulaşmıştır.

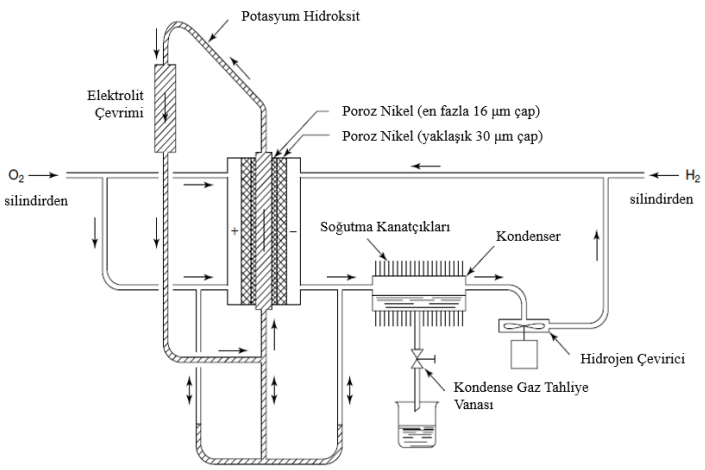
1949'da Bacon, Şekil 2.5 ile görüldüğü gibi sinterlenmiş elektrot olan yeni elektrot geliştirdi. Bu çift katmanlı elektrot, nikel tozundan yapılmıştır. Bu yakıt hücresinin akım yoğunluğu 0,6 V' ta 1076 $mAcm^{-2}$ idi.



Şekil 2.5. Bacon tarafından yapılmış ilk çift katmanlı gözenekli elektrot (Adams & Bacon, 1963)

Bir sonraki adım için, farklı bir şirkette Bacon, hücrenin korozyon sorunu nedeniyle yakıt hücresinin katodu için bir kaplama geliştirdi. Bacon, yüksek iletkenlik için katmanın malzemesini saf nikel oksit olarak değiştirdi. Bu yeni yakıt pili sisteminde kullanılan elektrotlar 1/16 inç kalınlığa ve 5 inç çapa sahipti. Yakıt pili altı hücreden oluşturuldu ve elektrolit olarak (%37-50) potasyum hidroksit çözeltisi ile dolduruldu. Yakıt pilinin çalışma koşulları 200 °C sıcaklık ve 400 psi basınca sahipti.

Bu şartlar ve yeni tasarım ile sürekli fazda aküden 150 W güç alan 0,2 Wcm^{-2} güç yoğunluğu ile çalışan bir batarya ortaya konmuştur. Bacon çalışmasını göstermiş ve raporunu 1954 yılında Londra'da yayınlamıştır. Aşağıda bahsedilen yakıt pili Şekil 2.6 ile görülmektedir. (Bacon ve Beama, 1954) (Sandstede ve diğerleri, 2003)



Şekil 2.6. Bacon tarafından tasarlanan yakıt hücresi sistemi (Vielstich, 1970)

Pratt & Whitney olarak bilinen şirket, Bacon'ın patentlerini 1959' da lisansladı ve 1961' de aldı. Çünkü Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (namı diğer NASA), Pratt & Whitney' e Apollo görevi için bir yakıt hücresi geliştirmesini emretti.

Görevin durumuna göre yakıt hücresi yığınının ağırlığını azaltmak zorunda kaldılar. Bu sorunun üstesinden gelmek için Pratt & Whitney, potasyum hidroksit karışımının konsantrasyonunu %75 olarak değiştirdi, böylece bu karışım 200-230 °C' de hala sıvı fazını koruyabilirdi. Bu çözüm ile yığın ağırlığı azaltıldı. Ve nihayet 1966' da yakıt hücreli ilk uçuş tamamlandı. (Sandstede ve diğerleri, 2003)

2.3. Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücreleri yalnız bir çeşitten oluşmamak ile birçok farklı türe sahiptir. Bu çeşitlilik endüstriye farklı kullanım koşullarında farklı yakı hücreli bataryalar kullanma imkânı sağlamaktadır. Kimi yakıt hücreli bataryalar yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta çalışırken, bir diğer kısmı daha düşük sıcaklık ve basınçta çalışma imkânı sunmaktadır. Bu noktada yakıt hücrelerini birbirinden ayıran temel özellikleri, farklı kimyasal reaksiyonlarını, fiziksel kabullerini ve çalışma koşullarını anlamak önem arz etmektedir. Bu bilgiler ışığında farklı uygulama alanları için hangi yakıt hücresinin kullanılacağı ve yeni yakıt hücrelerinin geliştirilmesi gibi konularda farklı tür yakıt hücrelerinin incelenmesinin yardımcı olacağı aşikardır.

Genel olarak farklı yakıt hücreleri ve farklı koşulları Çizelge 2.1. Farklı yakıt hücrelerinin temel özellikleri (Peighambardoust ve arkadaşları, 2010) ile verildiği gibi görülebilir.

Çizelge 2.1. Farklı yakıt hücrelerinin temel özellikleri (Peighambardoust ve arkadaşları, 2010)

Yakıt Hücreleri	**Çalışma Sıcaklıkları (°C)**	**Güç Yoğunlukları (mW/cm^2)**	**Yakıt Verimi**	**Ömür (saat)**	**Maliyet ($/kW)**
AYH	60-90	100-200	40-60	>10000	>200
FAYH	160-220	200	55	>40000	>3000
PDMYH	50-80	350	45-60	>40000	>200
EKYH	600-700	100	60-65	>40000	>1000
KOYH	800-1000	240	55-65	>40000	>1500

2.3.1. Alkali Yakıt Hücresi (AYH)

Yakıt hücrelerinin tarihi kısmında da dile getirildiği gibi alkali yakıt hücresi endüstride devreye alınan ve uygulama alanlarında kullanılan hidrojenden elektrik üretimini mümkün kılan ilk yakıt hücresiydi.

Alkali yakıt hücreleri genel olarak sıvı potasyum hidroksit katkılı bir elektrolit kullanmaktadır. Genel olarak kullanılan potasyum hidroksit oranı %30 civarlarındadır.

Bu noktada belirli miktarda kullanılan sıvı potasyum hidroksit sürekli sirküle edilerek soğutma amacıyla kullanılmaktadır. (McLean ve arkadaşları, 2002)

Alkali yakıt hücresindeki elektrodlar iki farklı katmandan oluşmaktadır. Bunlardan biri aktif elektro katalist katmanı ve diğeri de hidrofobik katmandır. Bu noktada hidrofobik tabaka reaksiyon gazlarının sızmasını önler ve reaksiyonun başlamasını tetikleyici bölgeye gazların difüzyon ile aktarılmasında rol oynar. Bu difüzyonu gerçekleştirebilmek için organik ve gözenekli bir yapıya sahip olması gerekmektedir. (De Geeter ve arkadaşları, 1999)

Genel olarak alkali yakıt hücrelerinin çalışma koşullarına bakılacak olursa 1 atm basınçta 65 °C ile 220 °C sıcaklık aralıklarında çalışmaktadır. Sıcaklık aralıklarına bakıldığında da görüldüğü gibi düşük sıcaklıklı yakıt hücreleri grubuna girmektedir. Her hücre yaklaşık olarak 1.2 V elektrik akımı sağlayabilmektedir. Yüksek verimlilikli, korozyon riski olmayan ve hafif bir yakıt hücresidir.

Ancak düşük CO_2 toleransı nedeniyle CO ppm oranı ve çökelti oluşturma ihtimali çok yüksektir. Bu nedenle sisteme beslenen oksijen ve hidrojenin saflığının çok yüksek olması beklenir. Ayrıca elektrolit kısmında kullanılan sıvı potasyum hidroksit kontrol etmesi ve bakımı oldukça güç bir yakıt pili olmasına neden olmaktadır. Bu gibi etkiler nedeniyle de ömür olarak diğer yakıt hücrelerine kıyasla daha kısa ömürlüdür. (Andújar ve Segura, 2009)

2.3.2. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PDMYH)

Polimer yapıdaki ilk membran teknolojisi General Electric tarafından ortaya konulmuştur. Proton değişim membranlı yakıt hücreleri yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerinden ayrılarak düşük sıcaklık sınıfına girmiştir. Çalışma sıcaklık aralığı genel olarak 60-80 °C aralığındadır. Yüksek güç yoğunluğu ile elektrik sağladığı sistemlerin güç taleplerine hızlı bir şekilde cevap verebilmektedirler. Düşük sıcaklık ve yüksek enerji yoğunluğu sayesinde otomotiv uygulamalarında sıkça karşılaşılmaktadır.

PDM yakıt hücreleri elektrolit üzerinden $2H^+$ iyonlarını taşır. Artı yüklü hidrojen iyonlarını taşıdığı için adını bu özelliğinden almaktadır. Alkali yakıt hücrelerine nazaran CO_2 toleransı bulunmamaktadır. Bu da atmosferden aldığı havayı direkt olarak kullanabilme imkânı sağlamaktadır. Bu özellikleri ile 50 W' tan 120 kW'lara kadar geniş bir aralıkta enerji sağlayabilmektedirler. (Andújar ve Segura, 2009)

PDM yakıt hücreleri katot tarafında oksijen ile, anot tarafında ise hidrojen ile beslenmektedir. Anotta molekül başına 2 elektron kaybeden ve hidrojen iyonu halini alan hidrojen, değişimli membran yardımı ile katot tarafına geçer. Ardından beslenen oksijen ve iletilen elektronun birleşmesi ile su meydana gelmektedir. Katot tarafındaki çıkış manifoltu ile oluşan su ve su buharı sistemden uzaklaştırılır. Böylece sistem elektrik üretimi için gerekli olan reaksiyonları gerçekleştirmiş ve elektrik akımını üretmiş olur.

PDM yakıt hücreleri, anot ve katot arasında kullandığı katı polimer film tabakası sayesinde düşük sıcaklıklarda çalışma imkânı sunar ve bu imkânı sağlarken diğer yakıt hücrelerine kıyasla daha az karmaşık bir yapı sağlar. Yüksek voltaj, yüksek akım ve yüksek güç yoğunlukları sayesinde birçok uygulama alanında etkin kullanım şansı vardır. Bunların yanında reaksiyona girecek gaz veya sıvılar için farklı basınç değerlerinde çalışabilme yeteneğine sahiptir. (Andújar ve Segura, 2009)

Elbette mükemmel olmamakla birlikte, beslenen hidrojenin içerisinde herhangi bir kontaminant bulunmamalıdır. Reaksiyonun gerçekleştirilebilmesi için belirli aralıklarda nemlendirilmeli ve belirli aralıklarda da oluşan su ve su buharının tahliye edilmesi gerekmektedir. Bu da sisteme ekstra komponent eklenmesini beraberinde getirir.
Ayrıca membran ve katalist kısımlarında sırasıyla katı polimer ve platinyum gibi pahalı malzemeler kullanılması gerekmektedir. Bu da PDM yakıt hücrelerinin maliyet değerini arttırmaktadır. (Peighambardoust ve arkadaşları, 2010)

Yine de gelişen teknolojiler ile bu maliyet ve mühendislik problemleri için alternatif ve efektif çözümler üretilmektedir. Yakın gelecekte bu problemlerin azalacağı aşikardır.

Bu çalışma kapsamında otomotivde kullanıma en yatkın olan PDM yakıt hücreleri üzerine odaklanılmıştır. Bu noktada bir sonraki bölümlerde PDM yakıt hücresi ve PDM yakıt hücresi sistemi detaylıca ele alınmıştır.

2.3.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (FAYH)

Fosforik asit yakıt hücresi adını elektrolit kısmında kullanılan fosforik asitten almaktadır. Genel olarak bu yakıt hücreleri direkt saf oksijen yerine PDM yakıt hücreleri gibi hava kullanmaktadırlar.

Fosforik asit yakıt hücreleri ortak kullanım inşaat yapılarında enerji sağlamak için sıkça kullanılmaktadır. Ortalama bir fosforik yakıt hücreli bataryanın her bir hücresi elektrik üretimi safhasında yaklaşık %40 verimlere ulaşabilmektedir.

PDM yakıt hücreli bataryalara kıyasla çalışma sıcaklıkları bir miktar daha yüksektir. Yaklaşık olarak 1 atm basınç altında 150-200 °C aralığında bir çalışma koşulu imkânı sunar. Bu noktada sözü edilen bu hücreler hücre başı 1,1 V gerilim ile elektrik akımı üretirler.

PDM yakıt hücreleri ile benzer şekilde elektrolitlerinde hidrojen iyonu geçmektedir. Adını aldığı fosforik asit kısmı elektrolit yapısının içerisinde bulunmaktadır. Elektrolit silisyum karbürden yapılmış bir matristen ve içerisinde belirli oranda bulunan fosforik asitten oluşmaktadır. Benzer şekilde asit olarak fosforik asit yerine sülfürik asit kullanan yakıt pili örnekleri de bulunmaktadır. Bu asidik ortama yerleştirilmiş 200 °C gibi sıcaklıklara dayanan yakıt hücresi elektroliti sistemde stabil çalışma imkânı sunmaktadır.

Karbondioksite olan toleransları çok yüksek olduğu için herhangi bir problem yaşamadan hava ile direkt etkileşime girebilirler ve orta sıcaklıklarda çalışan yakıt hücresi grubuna girdikleri için kayıp olan ısının belirli bir miktarını eş zamanlı jenerasyon uygulamalı örneklerinde kullanma şansları bulunmaktadır.

Ancak verim olarak diğer yakıt hücrelerinin gerisinde kalmasının yanında ayrıca asidik yapısı nedeniyle normal koşullar altında korozyona eğilimli ve yapısı gereği ağır ve büyük hacimlidirler. Bu nedenle bazı yerleştirme ve güvenlik sorunlarından kaçınmak zorlaşmaktadır. (Andújar ve Segura, 2009)

2.3.4. Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (EKYH)

Eriyik Karbonat yakıt hücreleri elektrolit olarak lityum karbonat ve potasyum karışımı bir elektrolit kullanmaktadır. Diğer yakıt hücrelerinden farklı olarak eksi yüklü karbonat iyonlarını taşıyarak elektrik üretimi sağlamaktadır. Bu noktada bu transfer işlemi yine diğer yakıt hücrelerinden farklı olarak iyon transferini anottan katoda olacak şekilde değil de katottan anota olacak şekilde gerçekleştirmektedir.

600-700 °C gibi sıcaklık aralıklarında çalışma imkanı sunan eriyik karbonat yakıt hücreleri, diğer düşük ve orta sıcaklık yakıt hücrelerine göre çok daha geniş basınç aralıklarında çalışabilmektedirler. Bu basınç aralığı genel olarak 1-10 atm basınç aralığında değişmektedir.

Her bir hücre yaklaşık olarak 0,7-1 V arası gerilim ile elektrik akımı sağlayabilmektedir. Çok yüksek boyut aralıklarında güç sağlayabilen ve reaksiyon esnasında oksijen yanında karbondioksit gazına ihtiyaç duyan bir yakı hücresi türüdür.

Diğer yakıt hücresi sistemlerinden farklı olarak elektrolitten geçen karbonatın hidrojenle olan reaksiyonu sonucu oluşan karbondioksiti bir çevrim vasıtasıyla katot tarafına geri beslemek gerekmektedir. Böylece reaksiyon ve yakıt hücresi verimi arttırılabilir.

Yüksek enerji verimleri, yüksek miktarda ısı açığa çıkartmaları ve herhangi bir değerli metal kullanımına ihtiyaç duymadıkları için avantaja sahiptirler ancak çalışmaya başlaması için ön ısıtmaya, düşük sülfür toleransına ve sıvı elektrolit kullanımı nedeniyle kontrol ve bakım problemlerine sahiptir. (Andújar ve Segura, 2009)

Genel olarak üç ana başlıkta kullanım alanlarından bahsedilebilir. Enerji üretme, dönüştürme ve depolama, malzeme ve üretim prosesleri ve son olarak ileri gaz prosesleri ve gazlaştırma teknolojileri başlıca kullanım alanlarıdır. (Frangini ve Masi, 2016)

2.3.5. Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH)

Katı oksit yakıt hücreleri diğer yakıt hücrelerinden farklı olarak genelde katı oksit zirkonyum, nikel veya kobalt elektrolitlerinden negatif oksijen iyonlarını transfer ederek elektrik akımı üretirler. Diğer bölümlerde bahsedilmiş olan yakıt hücrelerine kıyasla 1000 °C gibi sıcaklıklarda çalışarak yüksek sıcaklık yakıt hücresi sınıfına girmektedirler. Genel olarak hücre başın 0,8 V ya da 1 V gibi bir gerilim ile elektrik akımı üretmektedirler. (Andújar ve Segura, 2009)

Ayrıca diğer yakıt hücrelerinde farklı olarak katı oksit yakıt hücresini tabaka ve tüp formunda üretme metodu bulunmaktadır. Farklı uygulama alanlarında bu çeşitlilik avantaj sağlayabilmektedir ancak şekil değişim ile güç yoğunluğu, üretim maliyeti, yüksek sıcaklıkta hücrenin formunu ve sızdırmazlığını koruması gibi özellikler açısından birbiri arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Bu konu hakkında iki farklı konfigürasyonu Timurkutluk ve arkadaşları detaylı olarak incelemiştir ve genel olarak plaka formundaki katı oksit yakıt hücrelerinin performans ve maliyet açısından daha avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır. (Timurkutluk ve arkadaşları, 2016)

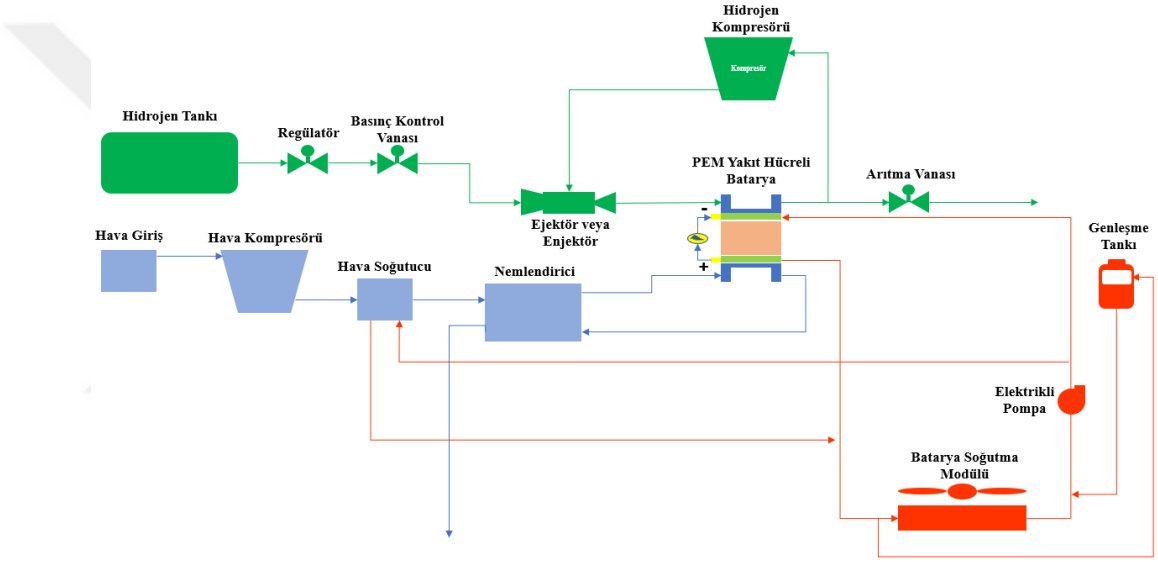
Yüksek sıcaklık sınıfına girmesi ile bünyesinden reaksiyon sonucu yüksek miktarda ısı açığa çıkartabilir ve bu yüksek sıcaklık sayesinde reaksiyon hızı ciddi oranda artmaktadır. Bununla birlikte yüksek verim ve performans elde etmek mümkün hale gelir.

Genel olarak bakıldığında eriyik karbonat yakıt hücrelerine kıyasla çok daha yoğun akım üretimi yapabilmektedirler. Elektrolit kısmı tamamen katı olduğu için sıvı elektrolitler gibi bakım ve kontrol açısından daha az sorun ortaya çıkmaktadır. Ancak benzer şekilde sülfüre karşı toleransı düşüktür ve teknolojisi yeterince gelişmiş değildir. (Andújar ve Segura, 2009)

2.4. PDM Yakıt Hücresi Sistemi ve Komponentleri

Genel olarak PDM yakıt hücresi ile çalışan sistemler belirli komponentleri sistemlerinde bulundurmak zorundadırlar. Bahsi geçen komponentlerin varlığı PDM yakıt hücresinin stabil ve en verimli halinde çalışabilmesi için gerekli olan kritik komponentlerdir.

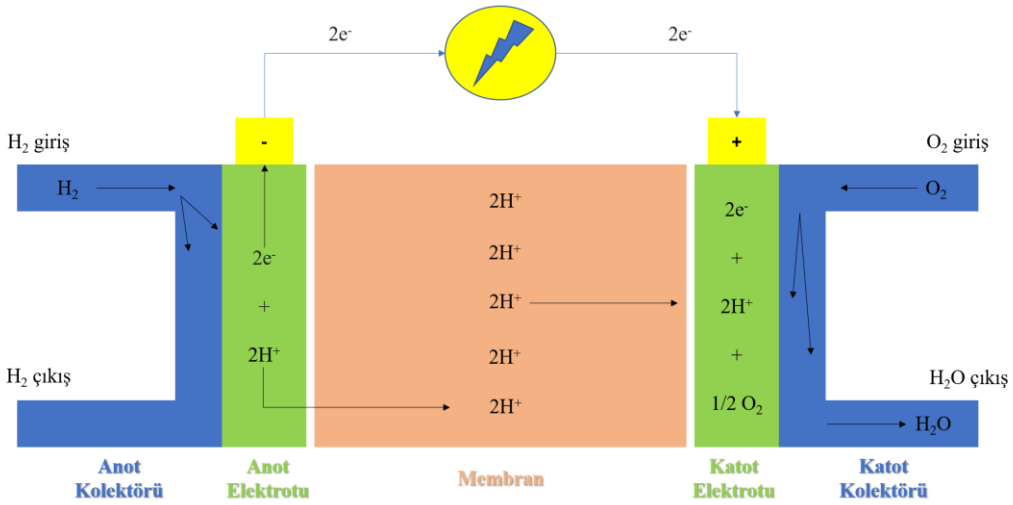
Bu çalışma kapsamında özellikle otomotiv sektöründe binek araçlarda kullanılması hedeflenen PDM yakıt hücresinin etkin çalışması için gerekli olan komponentlerden bahsedilmiştir. Şekil 2.7 ile PDM yakıt hücreli batarya sistemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.7. PDM yakıt hücreli batarya sistemi ve komponentleri

2.4.1. PDM Yakıt Hücresi ve Batarya Bütünü

Hücre yapısı temelde PDM yakıt hücreli bataryanın elektrik akımını ürettiği ve elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği ana bütün olarak düşünülebilir. Temel olarak ana hücre bütünü Şekil 2.8 ile gösterildiği gibi katot ve anot elektrotları, membran ve katot ve anot kolektörlerinden oluşur.



Şekil 2.8. Temel PDM yakıt hücresi bütünü komponentleri

PDM yakıt hücreleri için en kritik parça adını da aldığı polimer membran yapısı ve iki tarafında bulunan gözenekli elektrotlardır. Bu gözenekli yapılar sayesinde reaktif sistem gazları difüze olarak istenilen dağılımı sağlayabilmektedirler.

Şekil 2.8 ile gösterilen yapı ayrıca üretim aşamasında da birlikte bir araya getirildiği için membran elektrot bütünü olarak da adlandırılmaktadır. (Barbir, 2012)

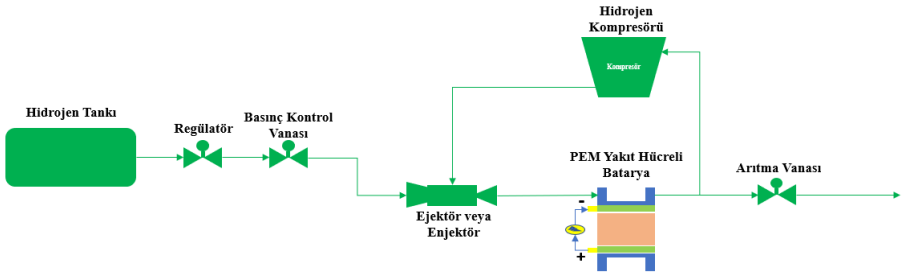
Membran, pozitif yüklü hidrojen iyonlarını katot tarafına difüze edebilecek kadar geçirgen ve iletken olmalıdır. Aynı zamanda hidrojen ve oksijen reaksiyon gazlarının karışmasına karşı gerekli tutuculuğu sağlayıp kimyasal ve fiziksel olarak stabil bir yapıya sahip olmalıdır. (Gottesfeld ve Zawodzinski, 1997) Bu noktada Dupont tarafından üretilen Nafyon malzemesi ile membran üretimi PDM yakıt hücrelerinin membran teknolojisinde başı çekmektedir. Birçok uygulamada Nafion ile üretilen PDM yakıt hücreleri kullanılmaktadır.

Şekil 2.8 ile görüldüğü gibi PDM yakıt hücresinde oluşacak reaksiyon için gerekli olan reaktif gaz ve yakıtın kolektörlere beslenmesi gerekmektedir. Şema ile gösterilmediği halde reaksiyon sonucu oluşan ısının sonucu olarak membran ve elektrot bölgesinde sıcaklık artışı söz konusudur.

2.4.2. PDM Yakıt Hücresi Yakıt Sistemi

Hidrojen beslemesinin yapıldığı ve reaksiyona girmeyen hidrojenin tekrar beslenmesi adına geri besleme yapıldığı sistem bütününe yakıt sistemi denilmektedir.

Genel olarak hidrojen tankı, basınç regülatörü, kontrol vanası, enjektör, artıma vanası ve hidrojen kompresörü gibi komponentlerden oluşmaktadır. Şekil 2.9 ile yakıt sistemi komponentleri görülebilmektedir.



Şekil 2.9. PDM yakıt hücreli batarya yakıt sistemi

Şekil ile de görüldüğü gibi PDM yakıt hücresi ve batarya bütününe elektrik akımını üretmesi için gerekli olan hidrojen beslemesi yapılmaktadır. Bu besleme sistemi direkt olarak enjektör veya ejektör tarafından anot kolektörüne yapılmaktadır.

Bilindiği üzere hidrojenin yeterli miktarda depolanabilmesi için yüksek sıkıştırma oranlarında basınçlandırılması gerekmektedir. Birçok otomotiv çalışmasında yüksek hacimde ve birden fazla tank mevcuttur. Bu noktada tankların yüksek basınca dayanması ve sızdırmazlık konusunda avantajlı olması gerekmektedir. Bu nedenle birçok uygulamada tanklar için karbon fiber malzeme kullanımı uygun görülmüştür. Böylece 700 bar basınca kadar dayanabilen tanklar elde edilebilir. Bu yüksek basınç kapasitesi sayesinde hidrojen depolamak daha kolay hale gelmektedir. (Yoshida ve Kojima, 2015) Ancak sisteme 700 bar ile hidrojen beslemek oldukça maliyetli ve fiziksel olarak mümkün olamayacağı için bu basıncın düşürülmesi gerekmektedir. Aksi takdirde PDM yakıt hücresi bu yüksek basınca karşı dayanamaz. Yalnızca yakıt hücresi değil, hidrojenin dağıtımında rol alacak olan borularında bu basınca dayanması için ciddi bir maliyet

harcanması gerekmektedir. Bu nedenle yüksek basınçlı hidrojenin sisteme girmesinden önce bir basınç regülatörü kullanımı zorunludur.

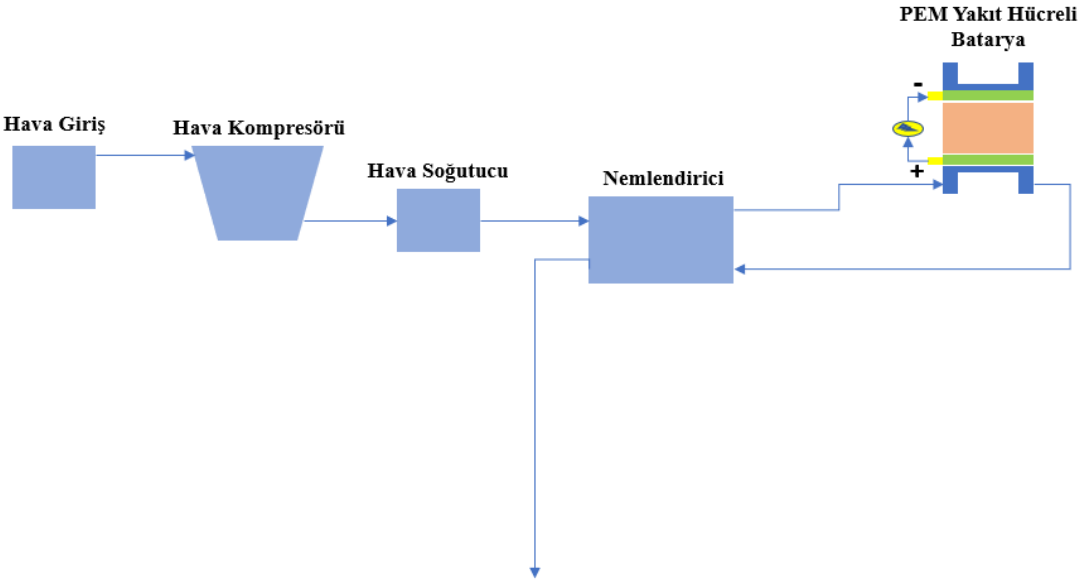
Basınç regülatörü ve basınç kontrol vanası ile sistemin güvenliği sağlanmaktadır. Bu noktadan sonra basıncı düşürülmüş hidrojen anot kolektörüne olabildiğinde homojen bir şekilde belirli bir basınçta dağıtılması gerekmektedir. Bu noktada önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi PDM yakıt hücreleri belirli basınç aralıklarında çalışmaktadır ve bu nedenle sisteme bu basıncı sağlayacak ve homojen dağılım oluşturacak komponentler tercih edilmelidir. Bu gereksinimler nedeniyle komponent olarak bir ejektör veya enjektör kullanmak genel olarak uygundur.

PDM yakıt hücresi içerisinde gerçekleşen reaksiyon %100 verim ile gerçekleşmemektedir. Bu nedenle reaksiyona girmeyen belirli miktardaki hidrojenin sisteme geri kazandırılıp yakıt tasarrufu yapılması gerekmektedir. Anot kolektörü çıkışında bulunan arıtma vanası vasıtasıyla içerisinde kontaminant bulunan bu hidrojen gaz karışımı arıtılarak ejektör veya enjektör kısmına kompresör yardımıyla geri beslenir.

Genel olarak bu komponentlerden oluşan yakıt sistemi aslında daha kompleks bir yapıya sahiptir. İçten yanmalı motorlar gibi yakıtın belirli devirlerde ve kondisyonlarda farklı debilerde beslenmesi gerekir. Ayrıca arıtma ve güvenlik hatlarında birçok farklı döngü ve besleme elemanı bulunmaktadır ancak bu anlatım temel olarak bir PDM yakıt hücreli bataryanın yakıt sistemi için en kritik olan komponentlerini ele almıştır.

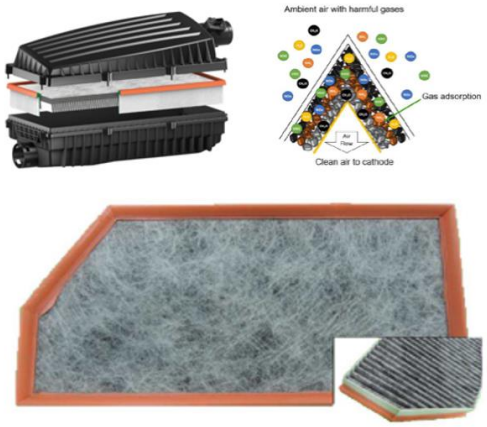
2.4.3. PDM Yakıt Hücresi Hava Emiş ve Su Yönetim (Egzoz) Sistemleri

Reaktif gazın beslemesinin yapıldığı ve sonucunda reaksiyona girmeyen havanın ve katot elektrotunda oluşan su ve su buharı karışımının tahliye edildiği sistem bütününe ise hava emiş ve egzoz sistemi veya hava emiş ve su yönetim sistemi denilmektedir. Şekil 2.10 ile verildiği gibi hava emiş ve su yönetim sistemleri görülmektedir.



Şekil 2.10. PDM yakıt hücreli batarya hava emiş ve su yönetim sistemleri

PDM yakıt hücreli bataryalarda reaktif gaz olarak oksijen kullanılmaktadır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi PDM yakıt hücreleri diğer bazı yakıt hücrelerine nazaran direkt saf reaktif gaz kullanımına ihtiyaç duymazlar. Bu noktada diğer yakıt hücrelerine göre kontaminant gazlara olan toleransları yüksektir. Ancak bu herhangi bir filtrasyon kullanımına gerek olmadığı anlamına gelmemektir. Sistem içerisinde bulunan kompresörün, ısı değiştiricilerin ve en önemlisi yakıt hücresinin neme, suya ve toza karşı hassasiyeti vardır. Bu nedenle hava girişi ile filtre kullanılması gerekmektedir. Bu konuda içten yanmalı araçlarda da hava emiş sistemi üretimi konusunda deneyimli Mann+Hummel firmasının yaptığı filtre elemanları Şekil 2.11 ile verildiği gibi gösterilmiştir. (Harenbrock ve arkadaşları, 2020)



Şekil 2.11. Mann+Hummel PDM yakıt hücreli batarya hava emiş filtresi (Harenbrock ve arkadaşları, 2020)

İçten yanmalı motorlara nazaran herhangi bir emiş gücü bulundurmayan yakıt hücresi sistemleri havayı beslemek için belirli bir komponente ihtiyaç duymaktadırlar. Beslemenin gerçekleşmesi için sisteme beslenecek havanın bir kompresör vasıtasıyla basınçlandırılması gerekmektedir. Kompresörde basınçlanan havanın ideal gaz denklemine göre sıcaklığı artacağı için soğutma sistemine bağlı bir hava soğutucu radyatör ile soğutulması ve reaksiyon için en verimli sıcaklığa getirilmesi gerekmektedir.

İdeal sıcaklığa getirilen havanın yakıt hücresine gönderilmesi için çalışma koşullarına uygun nem oranına sahip olması gerekmektedir. Bu noktada bir nemlendirici bulunması önem arz etmektedir. Nemlendirici gerekli nemi sağlamak için katot kolektörünün çıkışında tahliye edilen suyu kullanır. Nemlendirilen hava katot kolektör girişine beslenerek verimli reaksiyon gerçekleştirilir.

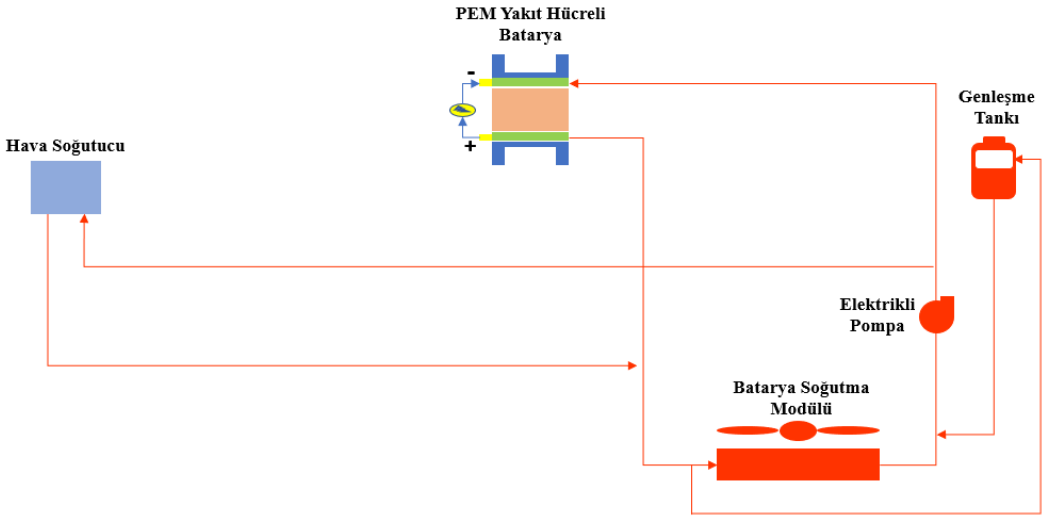
Genelde fazla suyun yakıt hücresinden uzaklaştırılması gerekmektedir ve bu oluşan su kolektör çıkışında egzoz veya su tahliye boruları ile gerçekleştirilir. Ancak yakıt hücresinin reaksiyona başlaması ve sürdürmesi için elektrolitin ve elektrotların belirli bir nem oranında olması gerekmektedir. Bu nem oranı nemlendirici ile sağlansa bile belirli durumlarda fazla olan bu nem miktarının azaltılması için ayrıca su ayrıştırıcıları kullanılmaktadır.

Bu noktada sudan ve nemden korunmak için filtre öncesi, nemlendirici sonrası ve egzoz çıkışında su ayrıştırıcıları bulunmaktadır. Bu ayrıştırıcılarda sensörlerden aldığı verilere göre santrifüj miktarını arttırıp azaltarak fazla nem ve suyun dengelenmesini sağlamaktadırlar. Böylece sistem basit bir hava emiş ve egzoz sisteminden su yönetim sistemine evrilmiş olur. (Harenbrock ve arkadaşları, 2020)

2.4.4. PDM Yakıt Hücresi ve Termal Yönetim Sistemi (Soğutma Sistemi)

PDM yakıt hücreleri elektrokimyasal bir reaksiyon sonucu elektrik akımı üretmektedirler. Elektrokimyasal reaksiyon sonucu reaksiyon çıktısı olarak ısı da ortaya çıkmaktadır. Oluşan bu ısı reaksiyon devam ettikçe artar ve yakıt hücresinin zamanla sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bu sıcaklık artışı zamanla arttıkça yakıt hücresinin performansını düşürmekle beraber artmaya devam ederse yakıt hücresine zarar vermektedir. Optimum çalışma için optimum sıcaklık değerinin korunması gerekmektedir. Bu sıcaklık aralığı düşük sıcaklıkta çalışan PDM yakıt hücreleri için 60-80 °C aralığında iken yüksek sıcaklıkta çalışan PDM yakıt hücreleri için 120-200 °C aralığında değişmektedir. (Rosli ve arkadaşları, 2017)

Bu nedenle PDM yakıt hücrelerinin ve diğer yakıt hücrelerinin de optimum sıcaklıkta çalışabilmeleri için sisteme özgü soğutma sistemlerine ihtiyaç duymaktadırlar. Şekil 2.12 ile verildiği gibi PDM yakıt hücreli bir bataryanın soğutma sistemi temel olarak verilmiştir.



Şekil 2.12. PDM yakıt hücreli batarya soğutma sistemi

Temel olarak yakıt hücreli sistemlerin soğutmasında da içten yanmalı motora sahip sistemlerin soğutma sistemindeki ısı değiştiriciler, pompalar, genleşme tankları ve borular kullanılmaktadır.

PDM yakıt hücresinde üretilen ısıyı almak için soğutucu akışkan soğutma çevriminde çevrim akışkanı olarak kullanılmaktadır. Su ve glikol karışımı burada kullanılabilecek alternatif soğutucu akışkanlardan birisidir. Yakıt hücresinden çıkan akışkan soğumak üzere batarya soğutma modülüne gönderilir. (Bargal ve arkadaşları, 2020)
Batarya soğutma modülü bünyesinde başta radyatör, elektro fan ve fan davlumbazından oluşmaktadır. Ayrıca farklı uygulamalarda hava soğutucu ısı değiştirici ve kondenseri de bünyesinde bulundurabilir. Modül içerisinde bulunan radyatör sayısı soğutma çevrimi sayısına göre artar veya azalır.

Batarya soğutma modülü ile soğutulan akışkan içten yanmalı motorlarda kullanılan tahrikli devir daim pompasının olmaması nedeniyle elektrikli bir pompa vasıtasıyla sistem içerisinde çevrilmektedir.

Çevrim esnasında sıcaklık artışıyla birlikte akışkanın bir kısmı buharlaşabilir ve soğutma sistemi basıncında artışlar meydana gelebilir. Bu basınç artışlarının önlenmesi ve ana çevrimdeki soğutucu akışkanın azalması durumunda soğutucu akışkan beslemesi

yapılabilmesi için genleşme tankı kullanılmalıdır. Genleşme tankı kapağında bulunan yaylı mekanizma sayesinde belirlenmiş basınç değerini aşan basınç artışları durumunda kapaktaki diyaframa kuvvet uygulayarak basıncı aynı bir emniyet vanası gibi dengelemektedir. Halk arasında yedek su tankı olarak da bilinmektedir. (Zakaria ve arkadaşları, 2016)

Soğutma sistemi birçok çevrimden oluşmaktadır. Bu çevrimler diğer elektronik komponentlerin veya kritik güç aktarım organlarının soğutulması için tasarlanmaktadırlar. Ancak bu çalışma kapsamında yüksek sıcaklık çevrimi olarak adlandıracağımız PDM yakıt hücreli bataryanın soğutma çevrimi incelenecektir.

3. YÖNTEM VE METOT

3.1. PDM Yakıt Hücresinin Termodinamiği ve Kimyası

PDM yakıt hücrelerinin katot ve anotlarında olmak üzere iki kimyasal reaksiyon gerçekleşmektedir. Bilindiği gibi anot tarafında hidrojen molekülü elektron kaybeder ve katot tarafında oksijen ile birleşerek su oluşturur. Reaksiyon dinamikleri aşağıda verildiği gibi gerçekleşmektedir.

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \tag{3.1}$$

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \tag{3.2}$$

Bu iki reaksiyona genel olarak bakıldığında genel denklem,

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2 \rightarrow H_2O \tag{3.3}$$

şeklini almaktadır. Herhangi bir kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan ısıyı bulmak için yapılması gereken reaksiyona giren ve çıkan maddelerin ısılarının farkı ile elde edilmektedir. Bu noktada eğer bu ısı miktarı PDM yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyon için yazılacak olursa,

$$\Delta H = \left(h_f\right)_{H_2O} - \left(h_f\right)_{H_2} - \frac{1}{2\left(h_f\right)_{O_2}} \tag{3.4}$$

Bu denkleme göre sıvı suyun entalpi değeri oda sıcaklığında -286 kJ/mol olarak alınır ve oksijen ve hidrojen moleküllerinin entalpisi 0 olarak alınırsa reaksiyon sonucu açığa çıkan ısı miktarı -286 kJ/mol olarak kabul edilebilir. (Cengel ve arkadaşları, 2011, Thermodynamics: an engineering approach) Ayrıca oda sıcaklığında ve 1 atmosfer basınçta PDM yakıt hücresinde aktif olarak kullanılan maddelerin entalpi ve entropi değerleri Çizelge 3.1. ile paylaşılmıştır.

Çizelge 3.1. PDM yakıt hücresinde aktif olarak kullanılan maddelerin entalpi ve entropi değerleri (Barbir, 2012)

Akışkan (298,15 K değerinde)	Entalpi (kJ/mol)	Entropi (kJ/molK)
Hidrojen	0	0,13066
Oksijen	0	0,20517
Sıvı Su	-286,02	0,06996
Su buharı	-241,98	0,18884

Kimyasal reaksiyon sonucunda bir entropide belirli miktarda bir artış meydana gelmektedir. Bu artış nedeniyle hidrojenin yanma reaksiyonu sonucunda üretilen enerji tamamen elektrik enerjisi olarak kullanılamaz ve entropi artışı ile paralel olarak belirli bir miktarda ısı enerjisi açığa çıkar. Bu belirli orandaki ısı ve elektrik üretimi oranı Gibbs serbest enerjisi olarak adlandırılmaktadır ve aşağıda verildiği gibi denklem görülebilir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \tag{3.5}$$

Denklem ile de net görüleceği gibi sistem içerisinde tersinmezlik nedeniyle bazı kayıplar olması gerekmektedir. Benzer şekilde entropi miktarı reaksiyona giren ve çıkan maddelerin farkı alınarak bulunabilir ve Gibbs serbest enerjisi elde edilebilir.

Genel olarak bir elektrik işinden bahsedilmesi gerektiğinde bu işe etken iki parametre bulunmaktadır. Bunlar elektriksel akım ve gerilimdir. Bu noktada bu elektriksel iş basitçe (3.6) ile verildiği gibi ifade edilebilir.

$$W = qE \tag{3.6}$$

Burada W elektriksel işi J/mol cinsinden, q elektriksel yükü coulombs/mol cinsinden ve E ise elektrik potansiyelini Volt cinsinden ifade etmektedir. Burada elektriksel yük elektrik teorisine göre Faraday sabiti (F) ve elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan elektrik ile olan bağıntısı nedeniyle molekül başına düşen elektron (n) olarak yazılacak olursa denklem 3.6 aşağıdaki hali alır.

$$W = nFE \tag{3.7}$$

Teorik olarak sistemin yaptığı iş ile denklem 3.5 ile elde ettiğimiz Gibbs serbest enerji değerinin negatifine eşit olması beklenmektedir. Bu noktada eğer elektriksel iş yerine Gibbs serbest enerjisi yazılacak olursa yakıt hücresinden elde edilecek gerilim değeri hesaplanabilir.

$$E = -\frac{\Delta G}{nF} \tag{3.8}$$

Teorik olarak bu değer PDM yakıt hücresi için hesaplanmak istenirse çizelgeler ile verilen değerler referans alındığında oda sıcaklığında potansiyel değeri 1.23 V olarak hesaplanmaktadır.

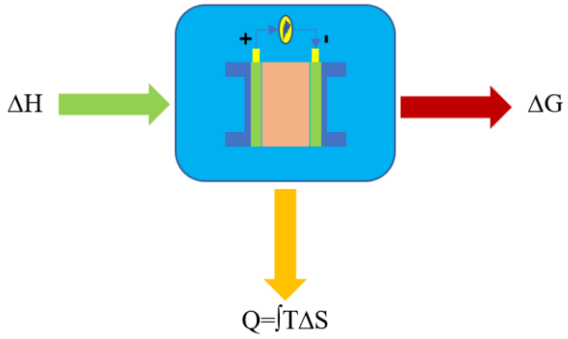
Ek olarak potansiyel voltaj değerini etkileyen bir diğer parametrenin sıcaklık olduğu aşikardır. Eğer 3.5 denklemi ile verilen Gibbs serbest enerjisi potansiyel hesabında kullanılan 3.8 denkleminde yerine konulursa sıcaklık değişimi ile voltaj değerinin de değişeceği görülmektedir. Çizelge 3.2. ile verildiği gibi bu değişim gözlemlenebilir.

Çizelge 3.2. Sıcaklığa bağlı olarak entalpi, Gibbs serbest enerjisi, entropi ve potansiyel gerilim değerlerinin değişimi (Barbir, 2012)

Sıcaklık (K)	**ΔH (kJ/mol)**	**ΔG (kJ/mol)**	**ΔS (kJ/molK)**	**E (V)**
298,15	-286,02	-237,34	-0,16328	1,23
333,15	-284,85	-231,63	-0,15975	1,2
353,15	-284,18	-228,42	-0,15791	1,184
373,15	-283,52	-225,24	-0,15617	1,167

Benzer şekilde Gibbs serbest enerjisi ile verilen sıcaklık parametresi ideal gaz denklemi kullanılarak tekrardan yazılırsa sıcaklığa benzer şekilde gerilim değerlerinde değişiklik olacağı gözlemlenebilir.

Bu teorik yaklaşımlar ışığında yakıt hücrelerinin teorik verimi hesaplanabilir hale gelmektedir. Şekil 3.1 ile verildiği gibi bir yakıt hücresi sisteminin enerji girdi ve çıktıları ele alınırsa teorik olarak maksimum verim bu şema üzerinden hesaplanabilir.



Şekil 3.1. PDM yakıt hücresine olan enerji girdi ve çıktılarının şeması

Bu durumda verim hesaplanacak olursa önceki verilen çizelge değerleri referans alınarak teorik maksimum verim 3.9 denklemi ile verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H_{AID}} = \frac{237{,}34}{286{,}02} = \%83 \tag{3.9}$$

Bu hesaplama ile bir yakıt hücresinden elde edilebilecek maksimum verim ortaya konmuş ve temel kimyasal ve termodinamik inceleme yapılmıştır. (Barbir, 2012)

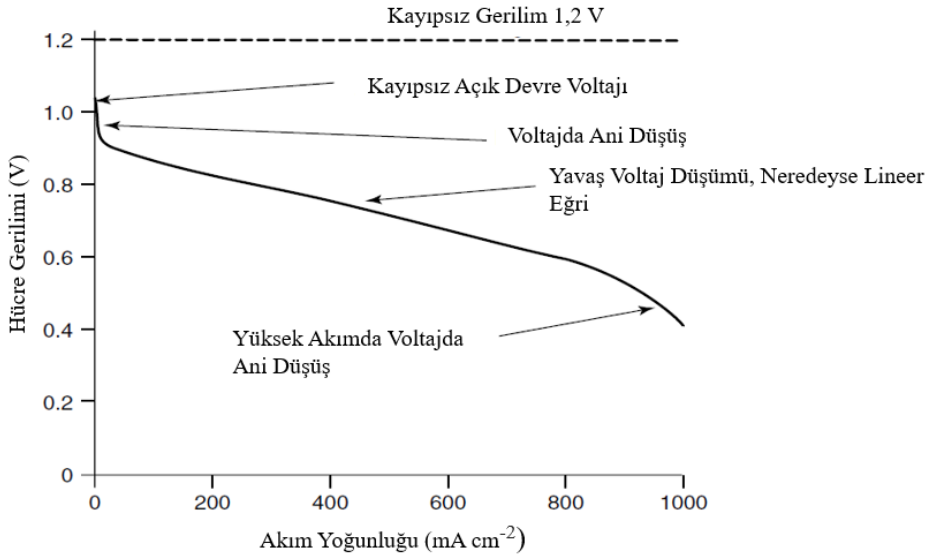
Bu noktada nümerik olarak yapılacak simülasyonlar sonrası araç seviyesinde modellenecek bir PDM yakıt hücreli bataryada verim değeri incelenecektir.

3.2. PDM Yakıt Hücresinin Sistem Kayıpları

PDM yakıt hücreleri ve diğer tipteki yakıt hücreleri elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda sistem %100 verim ile çalışmadığı için belirli çeşitlerde kayıplar meydana gelmektedir. Önceki bölümde de ele alınan potansiyel gerilim hesaplamak için kullanılan denklem 3.8 ele alınsın. Bu noktada PDM yakıt hücreli bir sistem için n değeri 2 elektrona karşılık gelmektedir ve denklem 3.10 halini almaktadır.

$$E = V_{AD} = -\frac{\Delta G}{2F} \tag{3.10}$$

Bu denklem referans alınarak gerilim değeri yakıt hücresi için hesaplanacak olursa ortalama 100 °C civarında çalışan bir yakıt hücresi için 1,2 V gibi bir değer ile karşılaşılır. Ancak Şekil 3.2 ile de verildiği gibi bu değer gerçek koşullarda ölçülmemektedir. Bu da belirli bir kayıp olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu denklemin bir diğer tanımı da açık devre voltaj değeridir ve birimi volttur.



Şekil 3.2. Farklı çalışma aralıklarında değişen gerilim değeri (Larminie ve Dicks, 2003, Fuel cell systems explained)

3.2.1. Aktivasyon Kayıpları

Aktivasyon kayıpları genel olarak elektrotlar üzerinde reaksiyon hızının azalması nedeniyle meydana gelmektedir. Kimyasal reaksiyon sonucunda reaksiyon ortamında elektronlar elektrotlardan taşınmaya başlanır ve bu süreçte taşınma esnasında oluşan gerilmede geçiş nedeniyle voltaj düşümü meydana gelmektedir. (Barbir, 2012). Bu kayıp değeri 3.11 numaralı denklem ile verildiği gibi hesaplanıp modellenmiştir. (Tafel Denklemi).

$$V_{akt} = \frac{RT}{2\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \tag{3.11}$$

3.2.2. Yakıt Geçişi ve İç Elektrik Akımları

Hidrojen iyonları normal teorik şartlar altında membrandan geçirilir ancak bu her zaman eldeki tüm yakıtın geçeceği anlamına gelmez. Ayrıca bazı durumlarda elektron geçirmemesi gereken elektrolit bazı elektronların geçmesine neden olabilir. Bu iki durum nedeniyle beklenen performanstan daha farklı bir performans ile karşılaşılır ve bu bir kayıp olarak sistemde tesir etmektedir. (Spiegel, 2011)

3.2.3. Omik Kayıplar

Omik kayıplar temelde birçok elektrik ile çalışan sistemde karşılaştığımız bir kayıp türüdür. Sistem içerisinde elektrik akımın ve elektronların iletildiği hatlar, konnektörler ve diğer elektriksel bağlantı elemanlarının malzemeleri, yapısal ve geometrik özellikleri nedeniyle oluşan direnç nedeniyle meydana gelmektedir. Yakıt hücresinde ek olarak hidrojen iyonlarının elektrolit üzerinden akımına olan direnç olarak da görülmektedir. (Barbir, 2012). Bu kayıp değeri 3.12 numaralı denklem ile verildiği gibi hesaplanıp modellenmiştir.

$$V_{om} = I \times R \tag{3.12}$$

3.2.4. Kütle Transferi ve Derişim Kayıpları

PDM yakıt hücreleri çalışma süreleri boyunca reaksiyon sonucu su molekülü açığa çıkartmaktadır. Oluşan bu su molekülleri katot kolektöründe sistemin farklı çalışma koşullarında farklı derişimlerde bulunmaktadır. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi bu derişim miktarı su yönetim sistemleri ile dengeye alınmazsa zamanla reaksiyon performansını düşürmektedir. Bu da sistemde kayıp olarak görülmektedir. (Larminie ve Dicks, 2003, Fuel cell systems explained). Bu kayıp değeri 3.13 numaralı denklem ile verildiği gibi hesaplanıp modellenmiştir.

$$V_{der} = -Cln\left(1 - \frac{i}{i_0}\right) \tag{3.13}$$

3.2.5. Kayıplar Toplamı ve Net Gerilim Değeri

Önceki bölümlerde bahsedilen kayıplar tek bir denklemde toplanarak hücre başına düşen net gerilim değeri yazılabilir. Bu noktada ideal gaz denklemleri ile Gibbs serbest enerjisinden elde edilen denklemlerin Tafel eşitliği ile birleştirilmesi ile elde edilen her bir kayıp aynı birimden birlikte yazılarak net gerilimi veren denklem elde edilmiş olur. Genel olarak aktivasyon, Omik ve derişim kayıpları baskın geldiği için bu üç kayıp ile yazılan denklem ayrıca yakıt hücresinin polarizasyon eğrisini vermektedir. Böylece yakıt hücresinin performans karakteristiği elde edilmiş olur.

$$V_{hücre} = V_{AD} - V_{akt} - V_{der} - V_{om} - V_{İA} \tag{3.14}$$

Bu denklemde V_{AD} açık devre gerilimini, $V_{hücre}$ hücredeki net gerilim değerini, V_{akt} anot veya katottaki oluşan aktivasyon kaybı nedeniyle oluşan gerilim düşüşünü, V_{der} anot veya katottaki oluşan derişim kaybı nedeniyle oluşan gerilim düşüşünü, V_{om} sistemdeki Omik kayıplar nedeniyle oluşan gerilim düşüşünü ve $V_{İA}$ iç elektrik akımlarındaki değişkenlik nedeniyle oluşan gerilim düşüşünü ifade etmektedir.

3.3. PDM Yakıt Hücresi Çalışma Koşulları

PDM yakıt hücreleri diğer sistemler gibi belirli basınç, sıcaklık ve debi oranlarında çalışmaktadırlar. Genel olarak önceki teorik anlatımlarda referans alındığında basınç ve sıcaklık artışları yakıt hücrelerinin performanslarını arttırıyor olsa dahi PDM yakıt hücrelerinde bu artışın bir limiti bulunmaktadır. Bu noktada kullandığı membran teknolojisi ve elektrot malzemeleri, difüzyon tabakaları gibi komponentlerin belirli sıcaklık ve basınca dayanmaktadır.

Bir PDM yakıt hücresinde basınç ve sıcaklık arttırılmak istenirse, sisteme ek birçok komponenti beraberinde getirmektedir. Bu noktada sistemin gerekli sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşabilmesi için iyi bir su yönetim sistemine ve haliyle iyi bir termal yönetim sistemine ihtiyaç duymaktadır. Sistemi basınçlandıracak komponentler (örneğin, kompresör, regülatör, emniyet vanaları vb.) hava emiş ve su yönetim sistemine

bağlanarak basınçlandırma işlemini gerçekleştirirler. Ayrıca bu sistemler de birlikte çalıştıkları bütünleşmiş ısı değiştirici komponentler nedeniyle termal yönetim sistemine bağlıdırlar. Çizelge 3.3 ile temel bir PDM yakıt hücreli bataryanın çalışma koşulları verilmiştir. (Barbir, 2012)

Çizelge 3.3. Standart PDM yakıt hücreli bataryaların çalışma koşulları (Barbir, 2012)

Başlangıç Koşulu (Hidrojen ve Hava): 1 bar' dan 4 bar'a	
Basınç (bar)	12 bar'a kadar
Sıcaklık (°C)	50-80
Akışkan Besleme Oranı	Hidrojen: 1-1,2
	Oksijen: 1,2-1,5
	Hava: 2-2,5
Reaksiyona Girecek Ürünlerin Nem Oranı	Hidrojen: 0-%125
	Oksijen/Hava: 0-%100

3.4. Genel Korunum Denklemleri

Bu tez kapsamında bahsedildiği gibi PDM yakıt hücreli batarya sistemleri modellenmiştir. Bu modelleme çalışması yapılırken belirli kabuller ve korunum denklemleri referans alınarak simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak sistemdeki akışkanların ve komponentlerin nümerik çözümünde yapılan kabuller aşağıda verildiği gibidir.

- İdeal gaz özellikleri
- İdeal gaz karışımları
- Sıkıştırılamaz akış
- İzotropik ve homojen membran ve elektrot yapısı
- Yakıt hücresinin temel elektrot ve membran yapısı dışında etki eden küçük miktardaki Omik kayıpların ihmal edilmesi
- Gözenekli yapıda bulunan komponentlerin içerisinden olan kütle ve enerji transferlerinin makro ölçüde hacim ortalamalı korunum denklemine göre modellenmesi

Bu kabullerin yanı sıra sistemlerin modellemesinde bazı genel korunum denklemleri kullanılmıştır. Bu denklemler GT-Suite 1 boyutlu sistem modellerinde kullanılmış ve analiz kapsamında genel korunum denklemleri çözdürülmüştür.

3.4.1. Kütlenin Korunumu

Genel olarak PDM yakıt hücreli batarya sistemlerinde akışkan fazında çözüm yapılmıştır. Bu noktada kolektörler, gaz ve sıvı kanalları, gözenekli bölgeler temelde genel kütle korunum denklemi kullanılarak çözülmüştür. Kütle korunum denklemi 3.15 numaralı denklem ile verildiği gibi kullanılmıştır.

$$\varepsilon_{ef}\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla\left(\rho_g \vec{u}\right) = S_m \tag{3.15}$$

Burada ρ_g ideal gaz karışımlarının ve akışkan karışımlarının yoğunluklarını, u hız vektörünü, S_m kaynak terimini ve ε_{ef} gaz fazındaki akışkanların efektif gözeneklilik değerlerini ifade etmektedir. S_m kaynak terimi membran içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon sonucunda oluşan kütleye göre değişmektedir. (Giovanazzi, 2020)

3.4.2. Momentumun Korunumu

Momentum korunumu 3.16 numaralı denklem ile verildiği gibi kullanılmıştır.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\nabla P + \nabla\left(\mu_{ef}\nabla u\right) + S_m \tag{3.16}$$

Bu denklemde P akışkan basıncını, μ_{ef} akışkanların ve/veya karışımlarının ortalama viskozite değerini ve S_m ise benzer şekilde kaynak terimini ifade etmektedir. Burada kaynak terimi yakıt pilinin farklı bölgelerinde farklı değerler ve değişkenlere sahiptir. Gaz kanallarından geçen akışkan için kaynak terimi 3.17 numaralı denklem ile verildiği gibidir.

$$S_m = 0 \tag{3.17}$$

Katalist tabakasının destek ve boşluk kısımlarını olduğu bölgelerdeki akışkan için kaynak terimi 3.18 numaralı denklem ile verildiği gibidir.

$$S_m = -\frac{\mu}{K}\varepsilon u \tag{3.18}$$

Burada K elektrotlar ve membran arasındaki geçirgen difüzyon tabakasının geçirgenliğini, ε ise bu tabakanın gözenekliliğini tanımlamaktadır.

Membran kısmındaki polimer yapının olduğu bölgedeki su geçişinin modellendiği durumda momentum korunumundaki kaynak terimi 3.19 numaralı denklem ile verildiği halini alır.

$$S_m = -\frac{\mu}{K_p}\varepsilon_m x_m u + \frac{K_\phi}{K_P} c_f n_f F \nabla \phi_m \tag{3.19}$$

Burada ε_m membranın su geçirgenliğini, x_m katalist bölgesinde bulunan iyonların hacim fraksiyonunu, K_f elektro kinetik geçirgenlik değerini, K_p membranın hidrolik geçirgenliğini, c_f sabitlenmiş elektrik yükünün yoğunluğunu, n_f iyonlarla taşınan elektron miktarını, F Faraday sabitini ve son olarak ϕ_m iyonların faz potansiyelini ifade etmektedir. (Barbir, 2012)

3.4.3. Enerjinin Korunumu

PDM yakıt hücreli batarya sistemleri için genel olarak kullanılan enerji korunum denklemi 3.20 numaralı denklem ile verildiği gibidir.

$$\left(\rho c_p\right)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\rho c_p\right)_{ef} (u \nabla T) = \nabla\left(k_{ef} \nabla T\right) + S_e \tag{3.20}$$

Bu denklemde kullanılan c_p akışkanların ve/veya karışımlarının ortalama özgül ısısını, T sıcaklığı, k ısıl iletim katsayısını ve S_e enerjinin korunumu için kaynak terimini ifade etmektedir. Ayrıca denklemde ef indisi ile ifade edilen kısımlar sistemdeki gözenekli bölgeler için de geçerli olduğunu ifade etmektedir ve katsayılar gözeneklilik özelliğine göre tanımlanmalıdır.

Enerjinin korunumu denkleminde yine diğer korunum denklemlerinde olduğu gibi farklı bölgeler için farklı kaynak terimleri kullanılarak denklemi düzenlemek ve bu düzenlenmiş denkleme göre çözüm yapmak gerekmektedir. Bu noktada kolektör taraflarında gerçekleşecek yegane ısı üretim kaynakları faz değişimleri olmaktadır. Bu noktada kaynak terimi kolektörlerde yoğuşma ve buharlaştırmaya göre düzenlenmelidir. Bu düzenleme Bosnjakovic' in buharlaşma prosesinde ısı değişim miktarını ifade eden sabiti kullanılarak yazılacak olursa kaynak terimi 3.21 elde edilir.

$$S_e = -\sigma A_{fg}\left(x_{sat} - x_{H_2O_{(g)}}\right)\Delta h_{fg} \tag{3.21}$$

Burada σ buharlaşma katsayısını, A_{fg} birim hacimde faz değişimi olan yüzey alanını, x_{sat} doyma kuruluk derecesini, x_{H2O} su buharının kuruluk derecesini ve Δh_{fg} buharlaşma ısısını ifade etmektedir.

Benzer şekilde elektrotlar ve membran arasındaki geçirgen difüzyon tabakasının olduğu bölgedeki kaynak terim yazılacak olursa 3.22 ile verilen denklem elde edilir.

$$S_e = \frac{i_e^2}{\kappa_s} - \sigma A_{fg}\left(x_{sat} - x_{H_2O_{(g)}}\right)\Delta h_{fg} \tag{3.22}$$

Görüldüğü gibi geçirgen difüzyon tabakalarında kolektörlere kıyasla ek olarak omik direnç nedeniyle de bir terim eklenmiştir ki bu beklendik bir durumdur. Bu durumda denklemdeki ekstra gelen terimler i_e akım yoğunluğunu ve κ_s geçirgen difüzyon tabakasının elektrik iletkenliğini ifade etmektedir.

Membran kısmına gelindiğinde ise yalnızca omik dirençler ile modellenmektedir. Bu durumda kaynak terimi 3.23 ile verildiği halini alır.

$$S_e = \frac{i_m^2}{\kappa_m} \tag{3.23}$$

Membran bölgesi için verilen denklemdeki terimler ise i_m iyon akım yoğunluğunu ve κ_m ise katalist yüzeyinin elektrik iletkenliğini ifade etmektedir.

3.5. Bir Boyutlu PDM Yakıt Hücreli Batarya Sisteminin ve Komponentlerinin Modellenmesi

Bu tez kapsamında PDM yakıt hücreli batarya ile tahrik edilen bir binek aracın istenen koşullarda çalışması için gerekli olan sistem tasarımının, kurulumunun ve simülasyonun yapılması hedeflenmiştir. Bu noktada önceki bölümlerde de bahsedilen PDM yakıt hücreli batarya sisteminin, termal yönetim sisteminin, hava emiş ve su yönetim sistemlerinin ve yakıt sisteminin modellenmesi gerekmektedir. Her bir alt sistem kendine has komponentlere ve sistem gereksinimlerine ihtiyaç duymaktadır.

Bu bölüm kapsamında her bir alt sistem ayrı ayrı ele alınarak incelenmiş ve sonunda birbirlerine entegre edilip simüle edilmiştir.

3.5.1. PDM Yakıt Hücreli Batarya Sistem Modeli

Bilindiği gibi PDM yakıt hücreli batarya ile tahrik edilen bazı taşıt modelleri endüstride bulunmaktadır. Bu araç modelleri genel olarak belirli oranlarda özelliklere sahip PDM yakıt hücrelerini bünyelerinde bulundurmaktadırlar. Yüksek menzil ve yüksek performans isterleri olan bu yakıt hücreleri yüklü araçların itki isterlerine karşılayacak şekilde modellenmeleri gerekmektedir. Bu noktada çoğu OEM bu hücrelerin detay özelliklerinin paylaşılması konusunda titiz çalışmaktadır. Bu nedenle literatür kapsamında ele alınan bazı veriler ışığında modelde kullanılacak yakıt hücreli batarya özellikleri 100 kW değeri sağlayacak şekilde sentezlenmiştir.

Bu noktada iki temel PDM yakıt hücreli batarya ele alınmıştır. Ballard tarafından yapılan yakıt hücresi ve Toyota Mirai aracının yakıt hücresi. Böylece iki farklı yakıt hücresinin avantajlı özellikleri ve birbirini tamamlayan parametreleri sentezlenerek modelde kullanılabilir 100 kW değerindeki PDM yakıt hücresi elde edilmiştir. Bu noktada Ballard ve Toyota Mirai yakıt hücreleri kataloglarından 100 kW değere sahip hücreler seçilerek sentez yakınsanmıştır. Model kapsamında sistem simülasyonu yapıldığında da bataryanın uygun çalışıp çalışmadığı kontrol edilerek modellenen yakıt hücresi doğrulanmıştır.

Bu iki referans yakıt hücresinin temel özellikleri Çizelge 3.4. ve Çizelge 3.5 ile verildiği gibidir. Bu özellikler ışığında bir boyutlu ortamda 100 kW değerindeki yakıt hücreli batarya modellenmiştir.

Çizelge 3.4. Ballard PDM yakıt hücreli bataryanın özellikleri (Ballard, 2023)

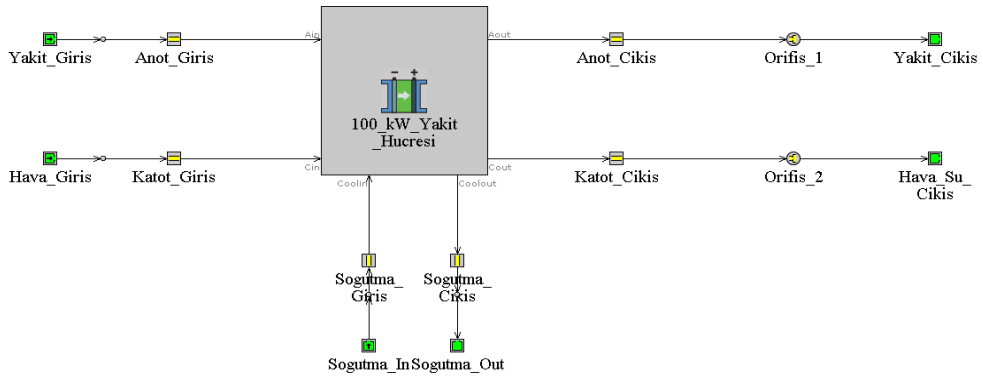
Ballard FCmove™-HD+ PDM Yakıt Hücreli Batarya	
Net Sistem Gücü (kW)	100
Sistem Çalışma Akımı (A)	20-360
Sistem Çalışma Gerilimi (V)	280-560
En, Boy ve Yükseklik Oranı (mm)	1056 × 630 × 650
Ağırlık (kg)	260
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-30 °C ile +50 °C arası
Kısa Süreli Limit Çalışma Sıcaklığı (°C)	-40 °C ile +80 °C arası
Yakıt Türü	Hidrojen Gazı
Yakıt Besleme Basıncı (bar)	8
Soğutucu Akışkan	Su ve Glikol Karışımı
Radyatör Çıkış Sıcaklığı (°C)	maksimum 60 °C

Benzer şekilde Toyota Mirai için değerler Çizelge 3.5 ile verilmiştir. (Lohse-Busch ve arkadaşları, 2018) (Yoshida ve Kojima, 2015)

Çizelge 3.5. Toyota Mirai 2017 PDM yakıt hücreli bataryanın özellikleri

Toyota Mirai 2017 PDM Yakıt Hücreli Batarya	
Net Sistem Gücü (kW)	114
Hacimsel Güç Yoğunluğu (kW/L)	3,1
Hücre Sayısı	370
Hücre Kalınlığı (mm)	1,34
Gerilim Değeri (V)	239,1
Yakıt Hücresine Giren Hava Sıcaklığı	38 °C
Hava Besleme Sıcaklığı	26 °C
Hava Besleme Debisi (Litre/dakika)	300
Yakıt Türü	Hidrojen Gazı
Aktif Yüzey Alanı (cm^2)	237
Soğutucu Akışkan	Su ve Glikol Karışımı
Radyatör Çıkış Sıcaklığı (°C)	45 °C

Bu bilgiler ışığında 100 kW PDM yakıt hücreli batarya Şekil 3.3 ile verildiği gibi GT-Suite arayüzünde modellenmiştir.



Şekil 3.3. GT-Suite ile 100 kW PDM yakıt hücreli batarya sistem modeli

Burada yeşil ile verilen çevresel komponentler ilgili sistemlerle bağlanması için ayrıca eklenmiştir. Bu sayede çalışmanın ilerleyen fazlarında modellenen termal yönetim sistemi, yakıt sistemi, hava emiş ve su yönetim sistemlerine bağlanmıştır.

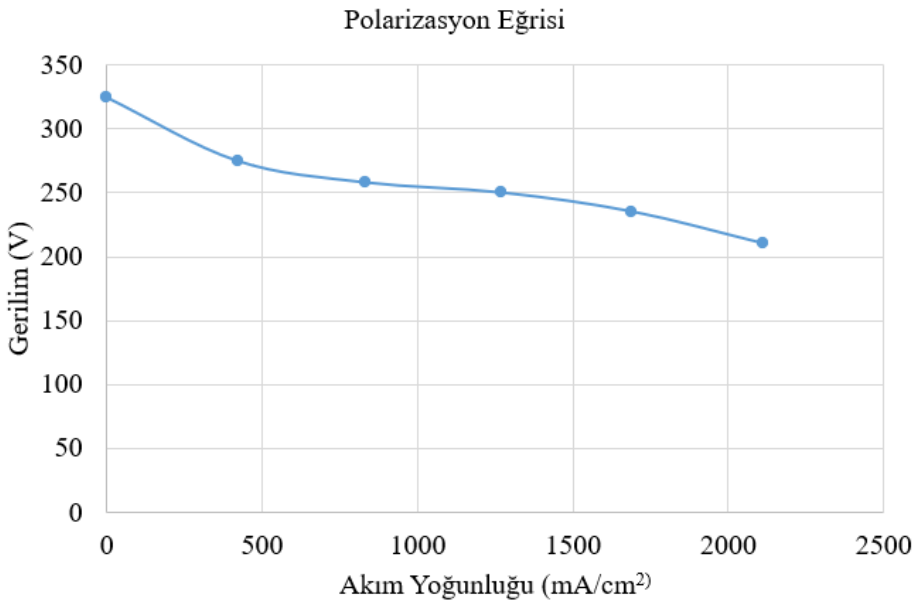
Boru komponentleri ile PDM yakıt hücreli bataryanın kolektörlerine olan bağlantılar modellenmiştir ve bu bağlantıların sistem ile arasına orifis bağlantıları konularak bu noktalardan ölçüm alınması hedeflenmiştir.

100 kW yakıt hücreli batarya modülünün ana özellikleri bir boyutlu modele Çizelge 3.6 ile verildiği gibi tanımlanmıştır.

Çizelge 3.6. Bir boyutlu 100 kW PDM yakıt hücreli batarya modeli ana girdileri

100 kW PDM Yakıt Hücresi	
Hücre Sayısı	370
Aktif Yüzey Alanı (cm)	237
Ağırlık (kg)	260
Anot Malzemesi	Grafit
Bipolar Plaka Malzemesi	Alüminyum
Katot Malzemesi	Grafit

Ayrıca referans yakıt hücreli bataryalardan alınan değerlere göre bir boyutlu modele polarizasyon eğrisi ile Şekil 3.4 verildiği gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.4. Bir boyutlu model ile verilen polarizasyon eğrisi

3.5.2. PDM Yakıt Hücreli Batarya Termal Yönetim Sistemi Modeli

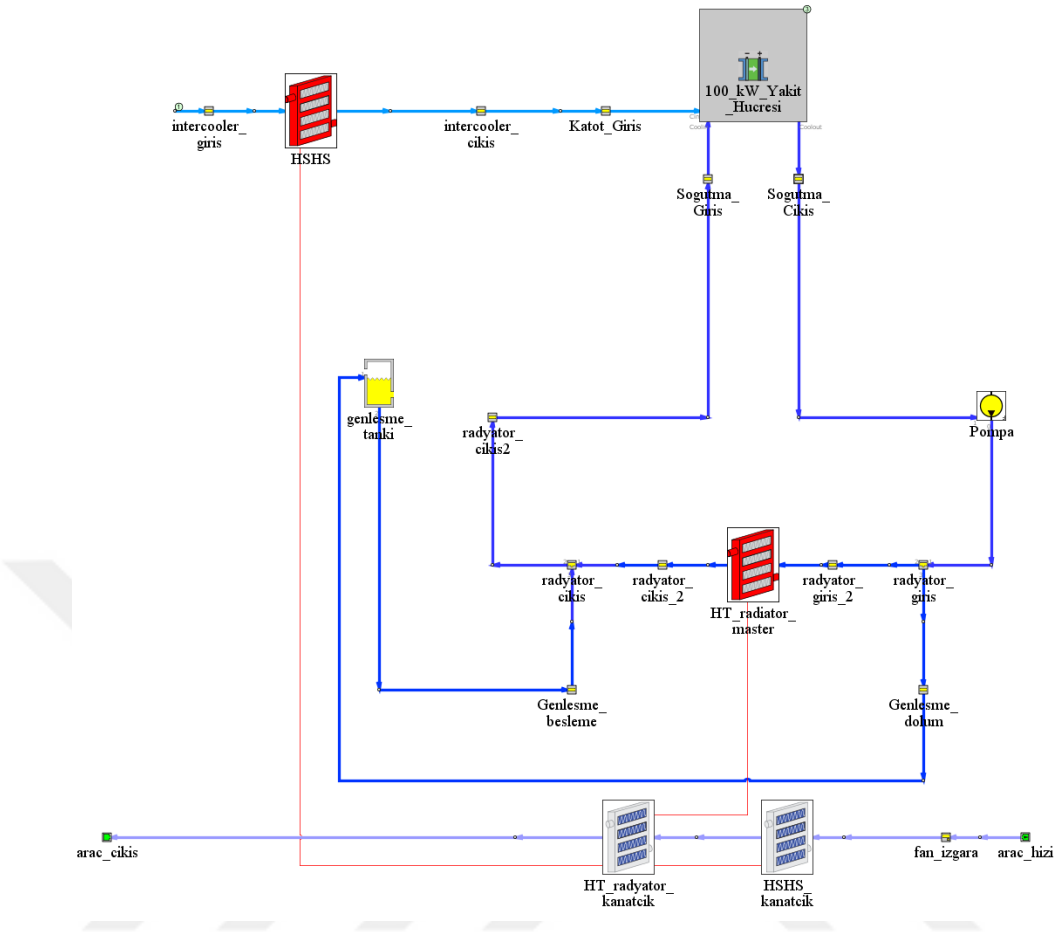
PDM yakıt hücreli bataryaların uygun çalışma koşullarında çalışabilmesi için önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi termal açıdan PDM yakıt hücresinin uygun sıcaklıklarda çalışması gerekmektedir. Bu kapsamda içerisinde elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan enerji çıkışı nedeniyle PDM yakıt hücreleri yüksek performansa ve gerilim değerlerine ulaştıklarında sıcaklıklarında artış meydana gelmektedir.

Çizelge 3.3 ile verildiği gibi standart PDM yakıt hücreli bataryaların optimum çalışma sıcaklık aralıkları 50-80 °C arasında değişmektedir. Bu noktada araçtan yüksek gerilim ve performans talebi geldiği noktada sistemin optimum sıcaklıkta kalmasını sağlayacak termal yönetim sistemine ihtiyaç vardır.

Bu tez kapsamında teoride 100 kW enerji sağlayabilen bir PDM yakıt hücreli bataryalı binek araç ele alınmıştır. Bu noktada bu yakıt hücresinin araç entegrasyonunda soğutma ve termal yönetim sistemi de benzer şekilde içten yanmalı, hibrit ve elektrikli araçlar referans alınarak komponent seçimleri yapılmıştır.

Termal sistemin kurulumunda başlıca kullanılması öngörülen komponentler aşağıda verildiği gibidir.

- Yüksek Sıcaklık Radyatörü
- Soğutma Boruları
- Soğutma Pompası
- Genleşme Tankı
- Hava Soğutmalı Hava Soğutucu (HSHS)
- PDM Yakıt Hücreli Batarya Soğutma Kanalları
- Fan



Şekil 3.5 PDM yakıt hücreli batarya termal yönetimi sistemi

100 kW değerindeki PDM yakıt hücreli bataryanın termal yönetim sistemi bütünü Şekil 3.5 ile verildiği gibi görülmektedir. Bu noktada soğutma sistemi kapalı bir devre olarak 1.4 bar sistem çalışma basıncı ile set edilerek çalışmaya başlamaktadır. Herhangi bir tahrik ile basınçlandırılmadığı için soğutucu akışkan 130 W değerindeki elektronik su pompası ile sistem içerisinde dolaştırılmaktadır.

Benzer şekilde hava besleme sisteminde içten yanmalı motorlardaki gibi herhangi bir piston basıncı olmadığı için herhangi bir emiş gerçekleşememektedir. Bu noktada havanın yakıt hücreli bataryaya beslenebilmesi adına hava kompresörü ile hava beslemesi yapılması gerekmektedir. Kompresör kullanımı ile artan hava sıcaklığının düşürülmesi için soğutma sisteminin yakıt hücreli batarya soğutma modülüne bütünleşmiş bir ısı değiştirici kullanılmalıdır. Bu ısı değiştirici içten yanmalı motorlardan da bilindiği gibi hava soğutmalı hava soğutucu olan hava soğutmalı hava soğutucu olarak ele alınmıştır.

Termal yönetim sistemi belirli noktalarda sistem içerisinde gereksiniminin üzerinde sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşabilir ve bu riskli durumlara karşı sistemi güvenli hale getirmek gerekmektedir. Bu kapsamda artan sıcaklıkla birlikte buharlaşarak sistemin basıncını arttıran soğutma sıvısının gaz hali sistemden tahliye edilmelidir. Bu noktada genleşme tankı sistemin güvenli basınçta kalmasını sağlayarak basınçlı buharı sistemden tahliye eder. Soğutma çevrimi içerisinde azalan soğutucu akışkan miktarına karşı ek olarak sisteme soğutucu akışkan beslemesi yapmaktadır. Bu nedenle halk arasında yedek su deposu olarak da bilinmektedir.

Sistem içerisindeki soğutucu akışkanın iletimi kauçuk soğutma boruları ile yapılmıştır. Kauçuk malzeme otomotiv endüstrisinde birçok alanda kullanılmakla beraber soğutma sistemlerindeki borularda sıkça kullanılmaktadırlar. Soğutma sistemi ortalama sıcaklık değerlerine uyum sağlaması, kolay forma sokulabilmeleri, soğutma sistemi standart basınç aralıklarına karşı dayanımlı olmaları ve plastiklere oranla maliyet açısından uygun olması kauçuk malzemeyi soğutma sistemlerinde kullanılması konusunda birinci sıraya yerleştirmektedir.

Son olarak termal yönetim sistemindeki ısı değiştiricilerin soğutulmasındaki temel akışkan olan havanın momentum kazanması için fan sisteme entegre edilmiştir. Ayrıca ilerleyen bölümlerde de bahsedileceği gibi farklı sürüş koşullarında sisteme tesir eden havanın hızı için sürüş koşulları arac_hizi komponenti ile tanımlanmıştır.

Sistem kapsamında bu sürüş koşulları NEDC, WLTP Class 2 ve US06 olarak belirlenmiş ve bu yol şartlarına göre hava akış hızları ve fan performans eğrisi modele tanımlanmıştır. Bu girdiler sayesinde normalde GT-Suite kapsamında soğutma, egzoz ve hava emiş sistemleri için önerilen sürekli çözüm yöntemi bu sürüş koşullarının değişken beslemelerini referans alarak ortalama bir değer tayininde bulunulmasını sağlamıştır.

Bahsi geçen bu termal yönetim sistemi komponentleri aşağıda verildiği temel özellikleri sistem modeline tanımlanmıştır. Belirlenen girdiler ile 100 kW değerinde bir PDM yakıt hücresinin termal isterlerini sağlayacak termal yönetim sistemi modellenmiştir.

Çizelge 3.7. Soğutma boruları ölçüleri

Borular			
Parça Adı	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Malzeme
Radyatör Giriş	30	450	EPDM
Radyatör Çıkış	30	330	EPDM
Genleşme Tankı Dolum	5	400	EPDM
Genleşme Tankı Besleme	20	400	EPDM

Çizelge 3.8. Genleşme tankı ölçüleri

Genleşme Tankı	
Dolum Çapı (mm)	5
Besleme Çapı (mm)	20
Dolu Yükseklik (mm)	60
Yükseklik (mm)	100
Hacim(m^3)	0,002

Çizelge 3.9. Soğutma pompası özellikleri

Pompa	
Tür	Santrifüj Pompa
Güç (W)	130
Maksimum Debi (L/h)	3000
Akışkan	Su Glikol Karışımı

Çizelge 3.10. Isı değiştirici özellikleri

Isı Değiştiriciler	
Alüminyum Radyatör	
En (mm)	500
Boy (mm)	450
Kalınlık (mm)	15
Giriş ve Çıkış Çapları (mm)	33
Alüminyum Hava Soğutmalı Hava Soğutucu	
En (mm)	550
Boy (mm)	120
Kalınlık (mm)	50
Giriş ve Çıkış Çapları (mm)	50

Fan özellikleri ve araç hızı bilgilerinin detayları sürüş koşullarının anlatıldığı Analiz Koşulları ve Çevrimler kısmında ele alınmıştır.

Sistemde kullanılan akışkan %60 su ve %40 glikol karışımıyla elde edilmiştir. Akışkan özellikleri GT-Suite kütüphanesinden hazır olarak elde edilmiştir.

3.5.3. PDM Yakıt Hücreli Batarya Hava Emiş ve Su Yönetim Sistemleri Modeli

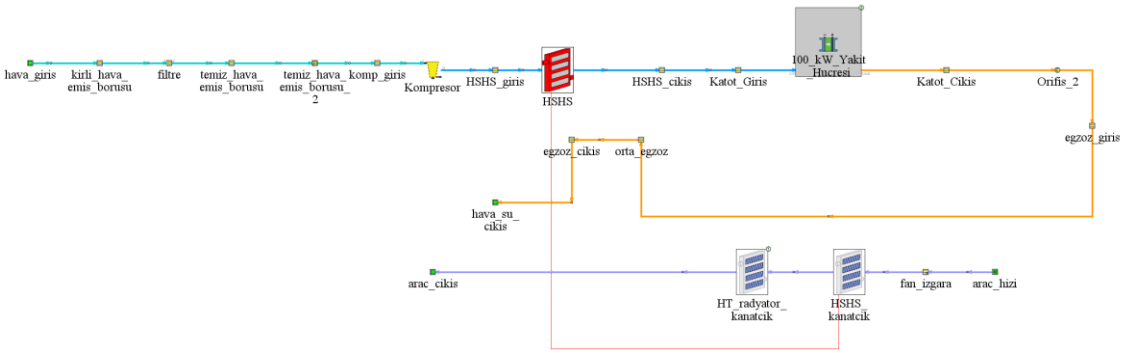
PDM yakıt hücreli batarya sistemleri bünyesindeki reaksiyonun gerçekleşmesi için oksijene ihtiyaç duymaktadırlar. Bu noktada önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi basıncı arttırılmış belirli miktardaki oksijenin sisteme sağlanabilmesi için uygun hava emiş sistemi tasarlanmalı ve reaksiyon sonrasında tepkimeye girmemiş havanın ve suyun sistemden tahliye edilmesi gerekmektedir.

Bu referans bilgilere ve literatür araştırmalarına göre hava emiş ve su yönetimi sistemleri (hava emiş ve egzoz sistemleri) bir boyutlu simülasyon modelinde aşağıda verilen komponentleri içermektedir.

- Kirli hava emiş borusu
- Hava filtre kutusu
- Hava filtresi
- Temiz hava emiş borusu
- Hava kompresörü
- Hava soğutmalı hava soğutucu boruları
- Egzoz manifold borusu
- Orta egzoz borusu
- Egzoz çıkış borusu

Bu komponentler yardımıyla gerekli temiz hava sisteme istenen basınç değerinde beslenerek, reaksiyon sonucunda açığa çıkan fazla su ve hava sistemden atılmaktadır. Ayrıca reaksiyon sonucunda oluşan yüksek sıcaklığın büyük kısmı egzoz ile

uzaklaştırılmaktadır. Şekil 2.6 ile verildiği gibi hava emiş ve su yönetim sistemleri görülmektedir.



Şekil 3.6 PDM yakıt hücreli batarya hava emiş ve su yönetimi sistemi

Hava emiş sistemi içten yanmalı motora sahip araçlardakine benzer olarak kirli hava emiş borusunda ısıl yükü az olması ve maliyet açısından uygun olması nedeniyle EPDM malzeme kullanılmıştır. Ancak kompresör kısmına yakın temiz hava emiş borusunda ise termoplastik malzeme tercihi yapılmıştır. Benzer şekilde kompresör çıkışından sonra gelen hava soğutmalı hava soğutucu boruları için sıcaklık dayanımı daha yüksek ve sertlik değeri daha düşük olan silikon malzeme kullanılması tercih edilmiştir. Böylece hava soğutmalı hava soğutucu kanatçık ve kılcal borularına gelen dinamik yükler karşısında hava soğutmalı hava soğutucu fiziksel yapısının korunması hedeflenmiştir.

İçten yanmalı motorlar ile gelen emiş gücü sağlanamadığı için yakıt hücreli bataryalarda besleme yapılması adına hava kompresörü kullanılmıştır ve bu kompresör seçimi yakıt hücrelerinin ihtiyacı olan debi ve basınç değerini sağlayacak nitelikte seçilmiştir.

100 kW gibi yüksek güç değerine sahip yakıt hücreli bataryalar katot çıkışlarında çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmektedirler. Bu sıcaklık değerine dayanabilen bir plastik malzeme kullanımı mümkün olamayabileceği için egzoz boruları paslanmaz çelik kullanılarak tasarlanmış ve bir boyutlu simülasyon modeline entegre edilmiştir.

Genel olarak bahsi geçen komponentlerin özellikleri aşağıda verilen çizelgeler ile gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.11. Hava emiş ve egzoz borularının özellikleri

Hava Emiş & Egzoz Boruları			
Parça Adı	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Malzeme
Kirli Hava Emiş	60	50	EPDM
Temiz Hava Emiş	60	150	TPV
HSHS Giriş	50	950	Silikon
HSHS Çıkış	50	950	Silikon
Egzoz Manifold	45	600	Paslanmaz Çelik
Orta Egzoz	45	1500	Paslanmaz Çelik
Egzoz Çıkış	45	500	Paslanmaz Çelik

Çizelge 3.12. Hava kompresörü özellikleri

Kompresör	
Ortalama Güç (W)	400
Maksimum Güç (W)	1600
Verim	40%
Akışkan	Hava

Çizelge 3.13. Hava filtresi özellikleri

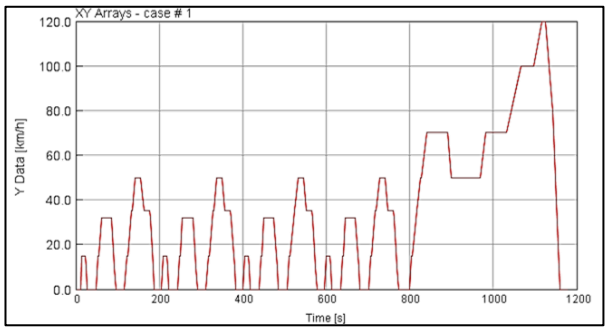
Hava Filtresi	
Giriş Çapı (mm)	60
Çıkış Çapı (mm)	60
Hacim (L)	9
Malzeme	Polipropilen

3.5.4. Analiz Koşulları ve Çevrimler

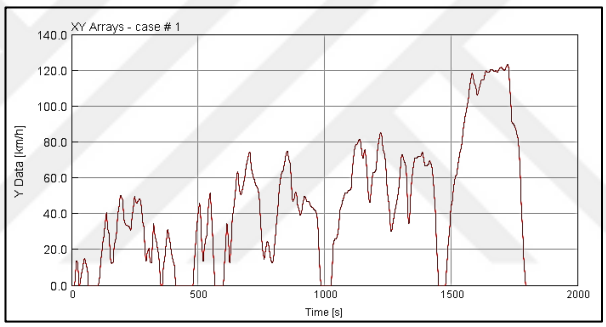
Bu tez kapsamında 100 kW değerindeki bir PDM yakıt hücreli bataryaya sahip binek bir aracın termal, hava emiş ve su yönetim sistemleri ele alınmıştır. Bu kapsamda bu sistemlerin halihazırda otomotiv sektöründe karşılığı olabilecek araçlar ile kıyaslanması ve benzer sürüş koşullarında elde ettikleri değerlerin karşılaştırılması gerekmektedir.

Karşılaştırmaların sağlıklı yapılabilmesi adına literatürde ve otomotiv sektöründe sıkça kullanılan sürüş koşullarının bir boyutlu sistem modeline entegre edilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında NEDC, WLTP Class 2 ve US06 sürüş koşulları hedef alınarak modelin sınır koşulları olarak tanımlanmışlardır. Bu sürüş koşullarının grafik değerleri

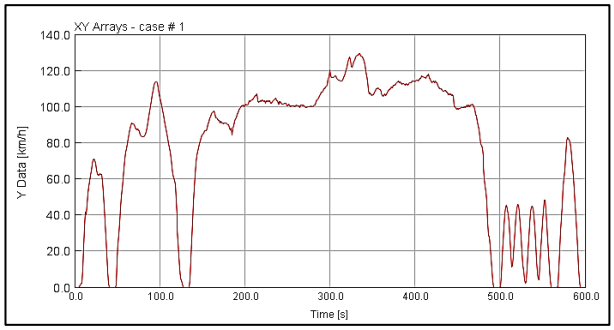
Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 ile verildiği gibi görülebilmektedir. GT-Suite kütüphanesinde bu sürüş profilleri mevcut olarak bulunmakta ve direkt olarak kullanılabilmektedir.



Şekil 3.7. NEDC sürüş profili



Şekil 3.8.WLTP-Class 2 sürüş profili



Şekil 3.9. US06 sürüş profili

Bu sürüş profilleri araç hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedirler. NEDC ve WLTP Class 2 sürüş profilleri gündelik standart kullanıma daha uygunken US06 sürüş profili daha çok performans isteyen bir sürüş profili sunmaktadır. Bu sürüş koşullarına

göre modelleme yapmak için aslen araç modeli kullanılması da gereklidir ancak belirli hız profillerinde ne kadar hava girişi olacağı ve ne kadar yakıt beslemesi yapılacağı bilgileri bu sürüş profilleri üzerinden hesaplanabilir.

Lohse-Busch ve arkadaşlarının yaptığı testlerin sonuçlarına göre 100 kW bir aracın bu sürüş koşullarında elde ettiği yakıt tüketimleri referans alınarak sisteme sürüş koşulları özelinde yakıt beslemesi yapılmıştır. Bu referans değerler alındığında sürüş koşullarının modelde farklı senaryolar olarak girilmesi mümkün hale gelmektedir. Girilen senaryolar Şekil 3.10 ile verildiği gibi görülmektedir.

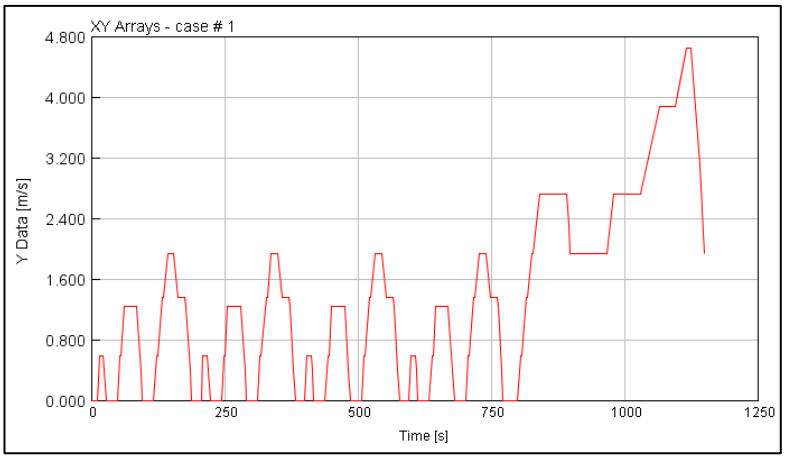
Parameter	Unit	Description	Case 1	Case 2	Case 3
Case On/Off		Check Box to Turn Case On	☑	☑	☑
Case Label		Unique Text for Plot Legends			
surus_dongusu	m/s		NEDC	WLTC_Class2	US06
yakit	m/s		NEDC_yakit	WLTC_yakit	US06_yakit

Şekil 3.10. Farklı sürüş koşulları ile oluşturulmuş üç senaryo

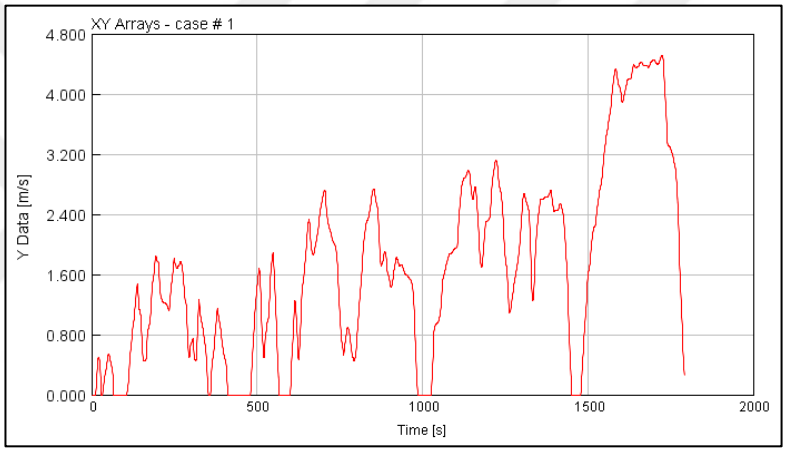
Bu senaryolarla birlikte surus_dongusu olarak tanımlanan parametre ile PDM yakıt hücreli batarya soğutma modülünden geçen hava miktarı araç hızına göre verilmiş olup termal etki gözlemlenebilir hale gelmiştir.

Ek olarak yakıt parametresi ile bahsi geçen sürüş koşullarının sağlanabileceği yakıt besleme miktarları PDM yakıt hücreli batarya sistemine beslenebilir hale gelmiştir. Böylece araç entegrasyonuna ihtiyaç kalmadan sistem seviyesinde sürüş koşullarının ortalama çıktıları elde edilmiştir.

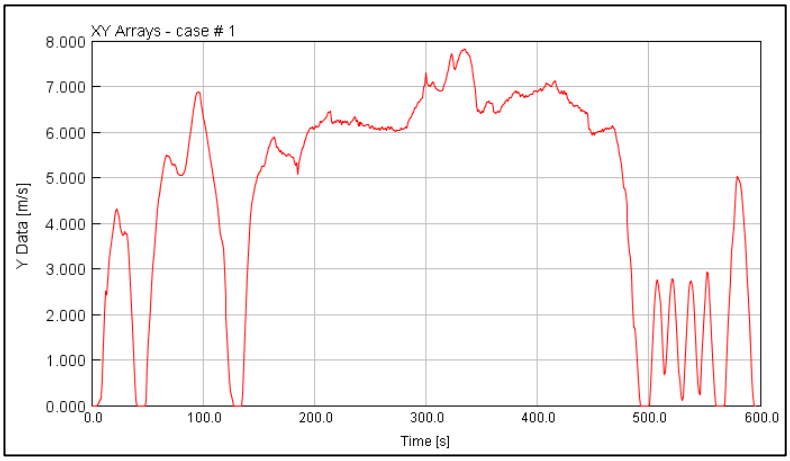
Böylece yakıt besleme için oluşturulan sürüş profilleri Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 ile verildiği gibi bir boyutlu modele tanımlanmıştır. Modelin simüle ettiği süreler ise benzer şekilde sürüş profillerinde belirtilen sürelere göre değişmektedir.



Şekil 3.11. NEDC yakıt sürüş koşulu



Şekil 3.12. WLTP-Class 2 yakıt sürüş koşulu



Şekil 3.13. US06 yakıt sürüş koşulu

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. PDM Yakıt Hücreli Batarya Modeli

GT-Suite ortamında modellenen bir boyutlu PDM yakıt hücreli batarya sistemi birçok farklı açıdan ele alınarak incelenmiş ve 100 kW güce sahip diğer PDM yakıt hücreli batarya modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda PDM yakıt hücreli batarya sisteminin gerilim, akım, güç, yakıt tüketim verimi, oksijen tüketimi, hidrojen tüketimi, katot sıcaklığı ve soğutma kanalarının çıkış sıcaklıkları değerleri NEDC, WLTP Class 2 ve US06 sürüş profillerine göre hesaplanmış ve incelenmiştir.

Bu kapsamda elde edilen değerler senaryolara göre sırasıyla Senaryo 1 NEDC, Senaryo 2 WLTP Class 2 ve Senaryo 3 US06 olacak şekilde verilmiştir. Bu parametreler ile ilgili bulgular Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 ile verildiği gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. PDM yakıt hücreli batarya modeli için hesaplanan değerler-1

PDM yakıt hücreli batarya modeli için hesaplanan değerler-1			
Senaryolar	NEDC	WLTP-Class2	US06
Gerilim (V)	159,15706	159,75342	159,99129
Akım (A)	77,793594	77,750885	77,530556
Yakıt Hücresi Gücü (kW)	36,102806	36,08299	35,980736
Yakıt Tüketim verimi (%)	34,237102	34,368894	34,419534

Çizelge 4.2. PDM yakıt hücreli batarya modeli için hesaplanan değerler-2

PDM yakıt hücreli batarya modeli için hesaplanan değerler-2			
Senaryolar	NEDC	WLTP-Class2	US06
Yakıt Hücresi Enerji Eldesi (kW/h)	37,082	24,803	74,306
Oksijen Tüketimi (g/s)	2,3865788	2,3852684	2,378509
Hidrojen Tüketimi (g/s)	0,30100724	0,300842	0,29998946

Referans değerlere bakıldığında yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi kapsamında ürettiği gerilim ve akım değerleri tutarlı bulunmuş ve yeterli elektriksel gücün sağlandığı ortaya konulmuştur. Bu noktada Toyota Mirai ile Lohse-Busch ve arkadaşlarının yaptığı testlerin sonuçlarına göre elde edilen gerilim değerlerine karşılık gelen akım değerleri

daha düşük sonuçlar vermektedir. Bu da üretilen güç miktarının modellenen PDM yakıt hücreli bataryada daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.3. Toyota Mirai test sonuçları (Lohse-Busch ve arkadaşları, 2018)

Toyota Mirai Test Sonuçları	
Gerilim (V)	160
Akım (A)	35
NEDC Sürüş Profilinde Elde Edilen Güç (kW)	14
WLTP-Class 2 Sürüş Profilinde Elde Edilen Güç (kW)	22
US06 Sürüş Profilinde Elde Edilen Güç (kW)	40

Benzer şekilde farklı sürüş koşulları ele alındığında ise Toyota Mirai bu sürüş koşullarında daha düşük güç beslemesi ile sürüş koşullarını tamamlamaktadır. Bu noktada avantaj araç üstünde yapılan testler ile PDM yakıt hücreli batarya sisteminin bir bataryayı beslemesi ve elektrik motorlarına araç girdisi ve ihtiyacına göre mümkün olan en uygun güç beslemesini sağlayabiliyor olması ile elde etmiştir.

4.2. PDM Yakıt Hücreli Batarya Hava Emiş Sistemi Modeli

PDM yakıt hücreli bataryanın hava emiş sistemi GT-Suite ortamında modellenerek kritik parametreleri hesaplanmış. Bu kapsamda incelenen ve hesaplanan kritik parametreler HSHS giriş debisi, HSHS giriş ve çıkış sıcaklıkları ve kompresör basınç değerleri farklı sürüş profillerinde ele alınarak incelenmiştir. Çizelge 4.4 ile verildiği gibi görülebilir.

Çizelge 4.4. PDM yakıt hücreli batarya hava emiş modeli için hesaplanan değerler

PDM yakıt hücreli batarya hava emiş modeli için hesaplanan değerler			
Senaryolar	NEDC	WLTP-Class2	US06
Radyatör Giriş Kütlesel Debisi (g/s)	5,132209	5,130852	5,144697
Giriş Sıcaklığı (°C)	100,95416	100,964165	100,7769
Çıkış Sıcaklığı (°C)	27,553888	27,569025	27,44757
Kompresör Çıkış Basıncı (bar)	1,5381017	1,5381849	1,536585

Hava besleme sisteminde atmosferden alınan havanın kompresör ile basılması sonucu sistemin oksijen beslemesi yapıldığı konusundan tez kapsamında bahsedilmiştir. Bu noktada kompresör bir boyutlu analiz çıktıları ışığında istenilen basınçlandırmayı yapmış ve sisteme gerekli olan oksijen sağlanmıştır. Bu basınçlandırma değeri bulgular ışığında ortalamada yaklaşık olarak 1,537 bar olarak hesaplanmıştır.

Kompresör yardımı ile tahrik edilen havanın sıcaklığı artmaktadır. Bu sıcaklık değeri ortalamada 72,3 °C olarak hesaplanmıştır. Bu noktada HSHS yardımı ile soğutulan hava ortalamada 27,6 °C sıcaklık değerine kadar düşürülebilmiştir.

4.3. PDM Yakıt Hücreli Batarya Termal Yönetim Sistemi Modeli

PDM yakıt hücreli bataryanın termal yönetim sistemi PDM yakıt hücreli batarya modelinin bir boyutlu analiz sonuçlarının incelendiği bölümde ek olarak ayrıca ele alınmıştır. Bu bölüm kapsamında sistemin radyatör parametreleri ele alınmış ve bu bulgular incelenmiştir. Bulgular Çizelge 4.5 ile verildiği gibi görülebilir.

Çizelge 4.5. PDM yakıt hücreli batarya radyatör modeli için hesaplanan değerler

PDM yakıt hücreli batarya radyatör modeli için hesaplanan değerler			
Senaryolar	NEDC	WLTP-Class2	US06
Radyatör Giriş Kütlesel Debisi (g/s)	12,593252	12,59352	12,587289
Giriş Sıcaklığı (ºC)	52,40988	52,51632	52,49722
Çıkış Sıcaklığı (ºC)	36,54516	36,5448	36,54476

Termal yönetim sistemi ele alındığında sistemin soğutma çevriminin başarılı bir şekilde çalıştığı ve ortalamada gereken 36,5 °C'ye yakın değerlerde PDM yakıt hücreli batarya sistemine soğutucu akışkan beslemesi yaptığı gözlemlenmiştir. Bu noktada kullanılan radyatörün yeterli miktarda ısı transferi yaptığı söylenebilir. Yapılan ısı transferinin sağlanabilmesi için gerekli olan momentumu sağlayan pompanın da benzer şekilde sistemde uygun bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir.

Soğutma sistemi basınçları kontrol edildiğinde ortalamada 1,06 bar ile çalıştığı gözlemlenmiştir ve EPDM su boruları bu basınç değeri altında rahatlıkla

çalışabilmektedir. Ek olarak genleşme tankı bu basınç dengesinin kurulmasında etkin rol oynamış ve sistemin kritik 1,4 bar basıncın üstüne çıkmasına engel olduğu gözlemlenmiştir.

4.4. PDM Yakıt Hücreli Batarya Su Yönetim Sistemi Modeli

PDM yakıt hücreli bataryanın su yönetim sistemi bir boyutlu model ile ele alınarak modellenmiş ve hesaplanmıştır. Bu kapsamda oluşan su buharının tahliyesi ve egzoz için kritik olan basınç düşüşü miktarları Çizelge 4.6 ile verildiği gibi incelenmiştir.

Çizelge 4.6. PDM yakıt hücreli batarya su yönetim modeli için hesaplanan değerler

PDM yakıt hücreli batarya radyatör modeli için hesaplanan değerler			
Senaryolar	NEDC	WLTP-Class2	US06
Basınç Düşüşü (bar)	0,565205	0,5650655	0,5635769
Egzoz Sıcaklıkları (°C)	411,67526	412,4871	410,4215

PDM yakıt hücreli batarya sistemi içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan ısı katot tarafındaki manifold ile egzoz sistemi yardımıyla sistemden uzaklaştırılmaktadır. Bu noktada egzoz su yönetim sistemine bağlı olarak çalışan bir komponent olsa dahi termal yönetim sisteminin çalışma yükünü azaltmaktadır. 100 kW gibi yüksek güç değerine sahip yakıt hücrelerinin egzoz gazlarının sıcaklıkları haliyle bu nedenle yüksek olmaktadır. Bir boyutlu model ile görülebileceği gibi bu çıkış sıcaklığı ortalamada yaklaşık olarak 436,2 °C olarak hesaplanmıştır.

Egzoz sistemi gerekli tahliyeyi yapmakla birlikte sistemde belirli bir basınç düşüşü oluşturarak tüm sistemin gürültülü çalışmasını da önlemeyi hedeflemektedir. Bu noktada bir boyutlu modelin çözümü incelendiğinde ortalamada yaklaşık olarak 0,56 bar düşüş sağlayarak bu gürültünün önlenebileceğini göstermektedir. Böylece sistem atmosfer basıncına yakın basınçlara çalışabilmektedir.

Hava besleme sisteminde atmosferden alınan havanın kompresör ile basılması sonucu sistemin oksijen beslemesi yapıldığı konusundan tez kapsamında bahsedilmiştir. Bu noktada kompresör bir boyutlu analiz çıktıları ışığında istenilen basınçlandırmayı yapmış

ve sisteme gerekli olan oksijen sağlanmıştır. Bu basınçlandırma değeri bulgular ışığında ortalamada yaklaşık olarak 1,537 bar olarak hesaplanmıştır.

5. SONUÇ

Bu tez kapsamında binek bir araçta kullanılmak için maksimum 100 kW değere kadar güç sağlayabilen bir PDM yakıt hücresi tasarlanıp, modellenmesi hedeflenmiştir. Bu hedefle birlikte sistemin termal ve su yönetim sistemlerine odaklanarak gerekli sistem gereksinimlerinin sağlanması üzerine odaklanılmıştır.

Elde edilen bulgular ışığında modellenen 100 kW maksimum değere sahip PDM yakıt hücreli batarya sistemi halihazırda üretilen 100 kW değere yakın PDM yakıt hücreleri ve araçlarıyla kıyaslanmıştır. Bu noktada 114 kW maksimum güce sahip Toyota Mirai ve Ballard PDM yakıt hücreli batarya modülü hedef alınarak Toyota Mirai ile Lohse-Busch ve arkadaşlarının yaptığı testlerin sonuçlarına göre kıyaslama yapılmıştır.

Bir boyutlu olarak enerji ve termodinamik incelemeleri yapılması hedeflenen modelde kontrolcüler, elektrik motorları ve araç entegrasyonu hesap edilmemiştir. Ancak elde edilen veriler ışığında bu entegrasyonunda farklı disiplinlerle birlikte çalışılarak ortaya konulduğunda modellenen yakıt hücreli batarya sisteminin binek bir araç için yeterli tahriki ve beslemeyi yapabileceği ön görülmektedir.

Bu tez kapsamında yalnızca PDM yakıt hücreli batarya sistemi, termal, hava ve su yönetim sistemleri incelenmiştir. Bu nedenle sistemde basit düzeyde bir yakıt besleme sistemi bulunmaktadır. Kayıp olan hidrojen ve kontrol sistemi olmayan bir yakıt sistemi nedeniyle yakıt verimi yaklaşık olarak %33 civarında hesaplanmıştır.

Gelecek çalışmalar ile yakıt sistemin detaylı modellenmesi ile bu verim değerinin artacağı ve bulgular kısmında elde edilen yakıt tüketim verimi değerlerinin yükseleceği öngörülmektedir.

Tüm simülasyonlar GT-Suite paket programı ile gerçekleştirilmiştir. GT-Suite 2019 yılı ile PDM yakıt hücreli batarya modelinin beta sürümünü programına dahil etmiştir. İlerleyen yıllarda yakıt hücresi teknolojisinin de ilerlemesi ile model daha kapsamlı hale

getirilebilir. Ek olarak Bazı komponentlerin optimizasyonunda iki ve üç boyutlu HAD analizlerinden destek alınarak sistem daha verimli çalışabilir hale getirilebilir.

Analiz bulguları modellenen termal, hava ve su yönetim sistemleri PDM yakıt hücreli batarya sisteminin gerekli sistem ihtiyaçlarını karşıladığını ve birçok farklı senaryoda stabil bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu referans ile çalışmanın bir ileri adıma taşınarak gelecek çalışmalarda öncelikle tüm araç modellemesi yapılması hedeflenmiş ve ardından binek bir araca entegre edilerek fiziksel testlerinin yapılması hedeflenmiştir.

Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisi de PDM modülünün yerleşimin binek araç mimarisine uygun olarak yapılması gerektiğidir. Çalışma kapsamında bu sınırı aşmak için birçok komponent bilinen içten yanmalı motora sahip binek araçlarda kullanıldığı şekilleri ile sistem gereksinimlerini sağlaması hedeflenerek seçilmiştir. Böylece gelecek çalışmalarda kullanılacak olan termal, hava ve su yönetim sistemlerinin entegrasyonu araç mimarisinde rahatlıkla yerleştirilebilir.

KAYNAKLAR

Barbir, Frano. *PEM fuel cells: theory and practice*. Academic press, 2012.

H. A. Liebhafsky and E. J. Cairns, 'Fuel Cells and Fuel Batteries', John Wiley & Sons, New York (1968).

Ortiz-Rivera, E. I., Reyes-Hernandez, A. L., & Febo, R. A. (2007, August). Understanding the history of fuel cells. In *2007 IEEE conference on the history of electric power* (pp. 117-122). IEEE.

Andújar, J. M., & Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and sustainable energy reviews, 13*(9), 2309-2322.

F. T. Bacon, 'The High Pressure Hydrogen/Oxygen Fuel Cell', in "Fuel Cells, Symposium of the ACS", Atlantic City, Reinhold Publishing Corp., New York and Chapman & Hall, London, G. J. Young (Ed), Vol. I, pp. 51–77 (1960).

A. M. Adams, F. T. Bacon and R. G. H. Watson, 'The High-Pressure Hydrogen/oxygen Fuel Cell', in "Fuel Cells", W. Mitchell, Jr (Ed), Academic Press, New York, pp. 129–192 (1963).

F. T. Bacon, Beama J., 6, 61 (1954).

W. Vielstich, 'Fuel Cells', Wiley-Interscience, London (1970).

McLean, G. F., Niet, T., Prince-Richard, S., & Djilali, N. (2002). An assessment of alkaline fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, *27*(5), 507-526.

De Geeter E, Mangan M, Spaegen S, Stinissen W, Vennekens G. Alkaline fuel cells for road traction. J Power Sources 1999;80:207–12

Andújar, J. M., & Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. Renewable and sustainable energy reviews, 13(9), 2309-2322.

Peighambardoust, S. J., Rowshanzamir, S., & Amjadi, M. (2010). Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. International journal of hydrogen energy, 35(17), 9349-9384.

Frangini, S., & Masi, A. (2016). Molten carbonates for advanced and sustainable energy applications: Part II. Review of recent literature. International Journal of Hydrogen Energy, 41(42), 18971-18994.

Timurkutluk, B., Timurkutluk, C., Mat, M. D., & Kaplan, Y. (2016). A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 1101-1121.

Gottesfeld, S., & Zawodzinski, T. A. (1997). Polymer electrolyte fuel cells. *Advances in electrochemical science and engineering*, *5*, 195-301.

Yoshida, T., & Kojima, K. (2015). Toyota MIRAI fuel cell vehicle and progress toward a future hydrogen society. The Electrochemical Society Interface, 24(2), 45.

Harenbrock, M., Korn, A., Weber, A., & Hallbauer, E. (2020). Integrated cathode air flow management for fuel cell electric vehicles. ECS Transactions, 96(1), 191.

Rosli, R. E., Sulong, A. B., Daud, W. R. W., Zulkifley, M. A., Husaini, T., Rosli, M. I., ... & Haque, M. A. (2017). A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system. International Journal of Hydrogen Energy, 42(14), 9293-9314.

Bargal, M. H., Abdelkareem, M. A., Tao, Q., Li, J., Shi, J., & Wang, Y. (2020). Liquid cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks: A detailed survey. Alexandria Engineering Journal, 59(2), 635-655.

Zakaria, I., Azmi, W. H., Mamat, A. M. I., Mamat, R., Saidur, R., Talib, S. A., & Mohamed, W. A. N. W. (2016). Thermal analysis of Al2O3–water ethylene glycol mixture nanofluid for single PEM fuel cell cooling plate: an experimental study. International Journal of Hydrogen Energy, 41(9), 5096-5112.

Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2011). Thermodynamics: an engineering approach (Vol. 5, p. 445). New York: McGraw-hill.

Larminie, J., Dicks, A., & McDonald, M. S. (2003). Fuel cell systems explained (Vol. 2, pp. 207-225). Chichester, UK: J. Wiley.

Spiegel, C. (2011). PEM fuel cell modeling and simulation using MATLAB. Elsevier.

GIOVANAZZI, F. (2020). Numerical modeling of PEM Fuel Cell through 3D and 1D approaches: an analysis of geometrical features and relative humidity effects.

Bosnjakovic F. Technical Thermodynamics. New York: Holt Rinehart and Winston; 1965.

Lohse-Busch, H., Stutenberg, K., Duoba, M., & Iliev, S. (2018). Technology assessment of a fuel cell vehicle: 2017 Toyota Mirai (No. ANL/ESD-18/12). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).

Ballard's FCmove™, 2023, Fuel Cell Power Module for Heavy Duty Motive Specification Sheet, https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/spc5111379-0a.pdf?sfvrsn=8210de80_4