

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOĞRUDAN METANOLLÜ YAKIT PİLİNE**  
**DAYALI HİBRİT TAŞIT TAHRİK SİSTEMİ İÇİN**  
**YARI-TEORİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE**  
**SİMÜLASYONU**

**Mustafa Umut KARAOĞLAN**

**Mart, 2019**

**İZMİR**

**DOĞRUDAN METANOLLÜ YAKIT PİLİNE  
DAYALI HİBRİT TAŞIT TAHRİK SİSTEMİ İÇİN  
YARI-TEORİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE  
SİMÜLASYONU**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon-İmalat Programı**

**Mustafa Umut KARAOĞLAN**

**Mart, 2019**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU


MUSTAFA Umut KARAOĞLAN, tarafından PROF. DR. NUSRET SEFA KURALAY yönetiminde hazırlanan “DOĞRUDAN METANOLLÜ YAKIT PİLİNE DAYALI HİBRİT TAŞIT TAHRİK SİSTEMİ İÇİN YARI-TEORİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE SİMÜLASYONU” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. Nusret Sefa KURALAY

Yönetici

  
Doç. Dr. Can Özgür ÇOLPAN

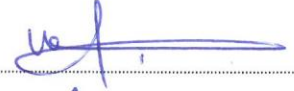
Tez İzleme Komitesi Üyesi

  
Doç. Dr. Levent ÇETİN


Tez İzleme Komitesi Üyesi

  
Prof. Dr. M. Barış ÖZERDEM

Jüri Üyesi

  
Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ

Jüri Üyesi

  
Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN  
Müdür  
Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Çalışmanın başlangıcından sonuna kadar bilgi, deneyim ve tecrübesiyle, beni yönlendiren, otomotiv alanında yetişmemi sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Nusret Sefa KURALAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süre zarfında, görüş ve önerileriyle bu çalışmaya koydukları olumlu yönde katkılarından dolayı, tez izleme komitesi üyeleri Doç. Dr. Can Özgür Çolpan ve Doç. Dr. Levent ÇETİN'e teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalarda yol gösteren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Andreas GLÜSEN ve Dr. Martin MÜLLER ile yardımları için Arş. Gör. Alper Can İNCE'ye teşekkür ederim.

Yoğun çalışmalarım boyunca yanımda sabır ve anlayışla yer alan, kendisiyle aynı süreci paylaştığım sevgili eşim Seçil TURAN KARAOĞLAN'a teşekkür ederim.

Desteklerini benden esirgemeyen, anneme, babama, ve kardeşime teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Dokuz Eylül Üniversitesi 2017.KB.FEN.005 numaralı BAP projesi tarafından desteklenmiştir.

Mustafa Umut KARAOĞLAN

# DOĞRUDAN METANOLLÜ YAKIT PİLİNE DAYALI HİBRİT TAŞIT TAHRİK SİSTEMİ İÇİN YARI-TEORİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE SİMÜLASYONU

## ÖZ

Yüksek yakıt ve enerji sarfiyatının önüne geçmek ve taşıt kaynaklı egzoz emisyon değerlerin azaltılmasına yönelik çalışmalar otomotiv sektöründe önemli bir yere sahiptir. Bu amaca yönelik olarak taşıtlarda, sadece petrol türevli bir yakıtın kullanımı yerine batarya, kapasitör veya yakıt pili gibi birden fazla temiz enerji kaynağının tek başına veya birlikte kullanılabilirdiği elektrikli veya hibrit tahrik sistemleri geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, doğrudan metanollü yakıt piline dayalı hibrit bir taşıt tahrik sisteminin Yarı-Teorik modeli geliştirilerek, araç için uygun hız profili ve işletme stratejisine göre bu tahrik sisteminin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, enerji kaynağı olarak hibrit tahrik sisteminde ele alınan batarya için matematiksel model kullanılmış, doğrudan metanollü yakıt pili için ise hem bir boyutlu yakıt pili modeli geliştirilmiş hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney ve modeller ile belirlenen tahrik sistemi yapı elemanlarının karakteristik özelliklerine göre bir taşıt için işletme stratejisi oluşturularak yakıt pili ve batarya arasındaki çalışma ilişkisi ifade edilmiştir. Sistemin simülasyonu ile hibrit taşıtın tüm komponentlerinin çıkış parametreleri belirlenerek taşıt performansı ve bu performansa etki eden faktörler incelenmiştir. Doğrudan yakıt piline dayalı hibrit tahrik sistemi için geliştirilen yarı teorik modelin simülasyonu ile hem konvansiyonel taşıtlara göre daha çevreci ve verimli bir taşıtın çalışması ve performansı analiz edilmiş hem de teorik modele göre daha doğru, deneysel çalışmalara göre ise daha basit bir model geliştirilerek araştırmacılara sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Doğrudan metanollü yakıt pili, hibrit taşıt, yarı teorik model, sistem simülasyonu

# DEVELOPMENT AND SIMULATION OF SEMI-THEORETICAL MODEL FOR A HYBRID VEHICLE POWERTRAIN SYSTEM BASED ON DIRECT METHANOL FUEL CELL

## ABSTRACT

Studies about preventing high fuel and energy consumption and reducing the vehicle exhaust emission values, have an important role in the automotive sector. For this purpose, electric or hybrid powertrain systems are developed that more than one clean energy source such as battery, capacitor or fuel cell can be used alone or in combination in vehicles instead of using only petroleum-based fuel.

In this study, a Semi-Theoretical model of a hybrid vehicle powertrain system based on direct methanol fuel cell was developed and it simulated with the suitable speed profile and operating strategy for the vehicle. In this context, a mathematical model was used for the battery, which was considered as an energy source in the hybrid powertrain system, and both a one-dimensional fuel cell model was developed and experimental studies were carried out for the direct methanol fuel cell. According to the characteristics of structural elements of the powertrain system which is determined by experiments and models, the operational relationship between fuel cell and battery is expressed by the developed operating strategy for the vehicle. The output parameters of all components of the hybrid vehicle were determined by the simulation of the system and the performance of the vehicle and the factors affecting this performance were investigated. Both the operation and performance of a more environmental and efficient vehicle compared to conventional vehicles were analyzed with the simulation of the semi-theoretical model developed for the hybrid powertrain system based on direct methanol fuel cell and the model which is more accurate than the theoretical model and more simple than experimental studies, was presented for the researchers.

**Keywords:** Direct methanol fuel cell, hybrid vehicle, semi theoretical model, system simulation

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ - HİBRİT TAHRİK SİSTEMİ ELEMANLARININ MATEMATİKSEL MODELİ.....</b>	<b>7</b>
2.1 Taşıt Modeli .....	7
2.2 Batarya.....	9
2.2.1 Batarya Tipleri ve Temel Özellikleri.....	9
2.2.2 Batarya Modeli .....	12
2.3 Doğrudan Metanollü Yakıt Pili Teorik Modeli.....	14
2.4 Elektrik Motoru ve Konvertör .....	21
<b>BÖLÜM ÜÇ - DOĞRUDAN METANOLLÜ YAKIT PİLİ HÜCRE VE YIĞIN PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ.....</b>	<b>26</b>
3.1 Tek Hücre İçin DMYP Testi .....	26
3.2 Beş Hücreli DMYP Yığın Testi .....	30
<b>BÖLÜM DÖRT - HİBRİT TAŞIT SİMÜLASYON MODELİ VE DENEY VERİLERİNİN MODELE ENTEGRASYONU .....</b>	<b>38</b>
4.1 Hibrit Taşıt Tahriki için Simülasyon Modeli .....	41

4.2 Yarı Teorik ve Genişletilmiş DMYP Modeli .....	45
4.2.1 Sabit Katot Akış Debisi için Deney Sonuçlarının DMYP Modeline Entegrasyonu .....	45
4.2.2 Değişken Katot Akış Debisi için Deney Sonuçlarının DMYP Modeline Entegrasyonu .....	47
4.2.3 DMYP Modelinde Su ve Metanol Denge Denklemleri.....	48
<b>BÖLÜM BEŞ - ÇEŞİTLİ İŞLETME STRATEJİLERİNE GÖRE TAHRİK SİSTEMİ SİMÜLASYONU .....</b>	<b>52</b>
5.1 Teorik DMYP Hibrit Taşıt Modelinin Simülasyonunda Batarya Tipinin Etkisi .....	56
5.2 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP Modellerinin Simülasyonu	64
5.3 DMYP Performansının Teorik ve Deneysel Olarak Mukayesesi .....	71
<b>BÖLÜM ALTI - SONUÇ .....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>85</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Batarya Simulink modeli (a) temel batarya parametrelerinin doluluk oranına göre değişimi (b).....	13
Şekil 2.2 DMYP sistemi ve elemanları .....	16
Şekil 2.3 Bir boyutlu DMYP modeline göre farklı metanol konsantrasyonları için hücre voltajı .....	19
Şekil 2.4 Lineerleştirilmiş voltaj fonksiyonu için DMYP Simulink modeli (a) ve 0.5 M metanol derişimi için akım yoğunluğuna göre hücre performansı (b)..	20
Şekil 2.5 Elektrik motoru moment ve güç karakteristiği .....	22
Şekil 2.6 Elektrik motoru verim haritası ile anlık elektrik motoru veriminin hesaplanması.....	23
Şekil 2.7 DC/DC konvertör kullanım gereksinimine göre yakıt pilli hibrit taşıt konseptleri .....	24
Şekil 2.8 Belirli giriş-çıkış voltajları ve giriş akımı için DC/DC konvertör Simulink modeli .....	25
Şekil 3.1 DMYP hücre test istasyonu .....	27
Şekil 3.2 Farklı katot akış debisi (KAD) ve metanol konsantrasyonu için hücre karakteristikleri .....	29
Şekil 3.3 DMYP yığın test istasyonu .....	31
Şekil 3.4 Çeşitli $i_x$ girdileri için farklı katot akış debilerine ( $15, 12, 10 \text{ ml} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dk}^{-1}$ ) göre ortalama hücre voltajının veri sayısına göre değişimi ( $i_x$ değerleri için birim $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ olarak verilmiştir) .....	34
Şekil 3.5 Çeşitli $i_x$ girdileri için farklı katot akış debilerine ( $30, 25, 20 \text{ ml} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dk}^{-1}$ ) göre ortalama hücre voltajının veri sayısına göre değişimi ( $i_x$ değerleri için birim $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ olarak verilmiştir) .....	35
Şekil 3.7 Farklı $i_x$ değerleri ve katot akış debilerinde ( $10, 12, 15, 20, 25, 30 \text{ ml} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dk}^{-1}$ ) DMYP yığında elde edilen ortalama hücre voltajı ve gücü ( $i_x$ değerleri için birim $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ alınmıştır).....	37
Şekil 4.1 DMYP kullanılan hibrit elektrikli taşıt yapı elemanları ve enerji akışı .....	39
Şekil 4.2 Taşıt tahrikinde temel enerji dönüşümleri: gerçek (a), simülasyon yaklaşımı (b) .....	41

Şekil 4.3 Sistem simülasyonda kullanılan temel blok ve kontrollerin giriş-çıkış parametreleri.....	42
Şekil 4.4 DMYP kullanılan hibrit elektrikli taşıt simülasyon modeli.....	44
Şekil 4.5 Sabit KAD değeri için deneysel olarak elde edilen hücre voltajı (a), metanol geçiş yoğunluğu (b) ve su geçişi (c) değerlerinin DMYP modeline entegrasyonu.....	46
Şekil 4.6 Değişken KAD değerleri için deneysel olarak elde edilen hücre voltajı, metanol geçiş yoğunluğu ve su geçişi değerlerinin DMYP modeline entegrasyonu.....	47
Şekil 4.7 DMYP denge denklemleri giriş ve çıkış parametreleri.....	48
Şekil 4.8 DMYP denge denklemleri için Simulink diyagramı .....	49
Şekil 5.1 Taşıt seyir profili (a) ile elektrik motorunda gerekli güç (b) ve moment (c) değerleri.....	54
Şekil 5.2 DMYP hibrit taşıt için genel simülasyon algoritması.....	55
Şekil 5.3 Teorik model simülasyonunda kullanılan işletme stratejilerinin algoritması: Strateji 1 (a) ve Strateji 2 (b) .....	58
Şekil 5.4 Teorik model simülasyonunda kullanılan işletme stratejilerinin Simulink blok diyagramları: Strateji 1 (a) ve Strateji 2 (b).....	59
Şekil 5.5 Çeşitli batarya tipleri ile kullanım durumunda DMYP metanol tüketimi (a,d,g), güç çıkışı (b,e,h) ile batarya güç gereksinimi (c,f,i): Strateji 1 .....	61
Şekil 5.6 Çeşitli batarya tipleri ile kullanım durumunda DMYP metanol tüketimi (a,d,g), güç çıkışı (b,e,h) ile batarya güç gereksinimi (c,f,i): Strateji 2 .....	62
Şekil 5.7 Teorik modelin simülasyonu süresince SOC değişimi .....	63
Şekil 5.8 Yarı-Teorik (a) ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik (b) modellerin simülasyon algoritmaları.....	65
Şekil 5.9 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: batarya (a), DMYP (b) ve DMYP ekipmanlarındaki (c) güç gereksinimi .....	66
Şekil 5.10 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: SOC değişimi (a), batarya voltajı (b) ve kayıp batarya voltajı (c) .....	67
Şekil 5.11 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: metanol konsantrasyonu (a), akım yoğunluğu (b) ve geçiş akımı yoğunluğu (c).....	68

Şekil 5.12 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: DMYP yığının voltajı (a), metanol tüketimi (b) ve CO <sub>2</sub> üretimi (c) .....	69
Şekil 5.13 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: kimyasal reaksiyon sonucu (a), metanol geçişi sebebiyle (b) ve su geçişi ile oluşan su üretimi (c) .....	70
Şekil 5.14 Çeşitli metanol konsantrasyonu ve sıcaklık değerleri için bir boyutlu DMYP modeline göre nümerik hücre voltajı sonuçları.....	72
Şekil 5.15 Çeşitli akım yoğunlukları için metanol konsantrasyonuna ve sıcaklığa göre çalışma parametreleri (Metanol Konsantrasyonu: C <sub>MeOH</sub> , Sıcaklık: T, Metanol Geçiş Akım Yoğunluğu: i <sub>x</sub> , Katot Akış Debisi: KAD): 0.1 A·cm <sup>-2</sup> (a,b), 0.15 A·cm <sup>-2</sup> (c,d) ve 0.2 A·cm <sup>-2</sup> (e,f) .....	74
Şekil 5.16 Çeşitli akım yoğunlukları için metanol konsantrasyonuna göre hücre voltajının mukayesesi: 0.1 A·cm <sup>-2</sup> (a), 0.15 A·cm <sup>-2</sup> (b) ve 0.2 A·cm <sup>-2</sup> (c)	76
Şekil 5.17 Çeşitli akım yoğunlukları için çalışma sıcaklığına göre hücre voltajının mukayesesi: 0.1 A·cm <sup>-2</sup> (a), 0.15 A·cm <sup>-2</sup> (b) ve 0.2 A·cm <sup>-2</sup> (c) .....	77

## TABLULAR LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 2.1 Çeşitli batarya tiplerinin temel özellikleri .....	11
Tablo 2.2 Bir boyutlu DMYP modeli giriş parametreleri .....	18
Tablo 3.1 KAD değerleri 10 ve 15 ml·cm <sup>-2</sup> ·dk <sup>-1</sup> için çeşitli metanol konsantrasyonlarında DMYP hücre test parametreleri.....	28
Tablo 3.2 KAD değerleri 10, 12, 15, 20, 25 ve 30 ml·cm <sup>-2</sup> ·dk <sup>-1</sup> için DMYP yığını test parametreleri.....	33
Tablo 5.1 Hibrit taşıt tahrikine ait simülasyon parametreleri .....	53
Tablo 5.2 Batarya kütlesi 4 kg için batarya model parametreleri (AAPPC, b.t.).....	56
Tablo 5.3 Batarya iç direnç ve voltajı için kullanılan polinomun katsayıları .....	57
Tablo 5.4 Tek bir DMYP hücresinin testi için çalışma parametreleri .....	73

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Fosil bazlı yakıt tüketiminin çevresel ve ekonomik açıdan doğurduğu olumsuz sonuçlar neticesinde, son yıllarda batarya ve yakıt pilinin kullanıldığı hibrit tahrik alternatiflerinin taşıtlarda uygulanması ve geliştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Yüksek egzoz emisyonuna neden olan ve düşük verimle çalışan içten yanmalı motora sahip araçlara kıyasla elektrik motorunun ve bunun enerji ihtiyacı için batarya ile yakıt pillerinin bulunduğu daha çevreci ve ekonomik taşıt tiplerinin otomotiv endüstrisinde kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır (Kuralay, 2013). Otomotiv endüstrisinin her alanında (binek araç, ağır taşıt, hizmet araçları vs.) kullanılabilir bu temiz ve verimli, elektrikli veya hibrit taşıtların tahrik sisteminin modellenmesi, bu sistemin yol şartlarına göre simülasyonu ve testi sonucunda günlük hayatta kullanılabilir bir taşıtın tasarlanması ve doğrulanması, bu alandaki çalışmaların artarak ülkemizin bu konudaki teknolojik birikiminin gelişmesine yol açacaktır.

İçten yanmalı motorların (İYM) kullanıldığı konvansiyonel taşıtlara nazaran elektrikli taşıtlar, bünyesinde enerji kaynağı olarak sadece batarya bulundurması sebebiyle herhangi bir egzoz salınımına neden olmayan ve enerji sarfiyatı düşük araçlardır. Buna karşın elektrikli araçların, ağırlık ve hacim yönünden batarya kapasitesinin çok fazla arttırılamaması sebebiyle menzilin düşük olması söz konusudur (Larminie ve Lowry, 2003). Bu dezavantajın bertaraf edilmesi için taşıtlarda, iki enerji kaynağının kullanıldığı hibrit tahrik sistemleri geliştirilmiştir. Hibrit tahrikli araçlarda güç kaynağı olarak İYM ve elektrik motoru (EM), enerji kaynağı olarak ise petrol türevli yakıtlar ve batarya kullanılabildiği gibi enerji kaynağı olarak yakıt pilleri ile bataryalar, güç kaynağı olarak ise sadece EM kullanılabilmektedir (Hofmann, 2014; Mi ve diğer., 2011).

Yakıt pillerinin pek çok farklı tipi olmasına rağmen, hibrit taşıtlarda, proton değişim membranlı yakıt pili (PDMYP) ile doğrudan metanollü yakıt pili (DMYP) kullanılmaktadır. Yakıt olarak yüksek basınçta depolanan hidrojenin kullanıldığı

PDMYP, görece yüksek verimine karşın, yakıt deposunun maliyeti, hidrojenin ulaşılabilirliği ve yaygın altyapı ihtiyacı sebebiyle doğrudan metanollü yakıt piline göre dezavantajlı bir konumda yer almaktadır (Larminie ve Dicks, 2003). DMYP, sıvı olarak depolanan metanolün, su ile birlikte bir solüsyon halinde yakıt piline gönderildiği bir sistemdir (Revankar ve Majumdar, 2014). Dolayısıyla, gerek yakıtın kolay elde edilebilirliği, gerekse düşük maliyeti sebebiyle DMYP kullanılarak araç bataryasının desteklenmesi suretiyle bir hibrit taşıt tahrikinin oluşturulması büyük önem arz etmektedir.

Bünyesinde DMYP bulunan hibrit taşıtların performans değerlerinin ve karakteristik özelliklerinin belirlenebilmesi için gerekli simülasyon çalışmalarında yakıt piline ait matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde genellikle DMYP modeli için bir boyutlu ve iki boyutlu modellemeler kullanılmaktadır. Her iki tip modelde, taşınım (metanol, su ve oksijen için), süreklilik, momentum, kütle ve elektrokimyasal reaksiyon denklemleri ile güç yoğunluğu ve hücre voltajı gibi değerler hesaplanırken (Çolpan, 2013), bir boyutlu modelde metanol konsantrasyonunun dağılımı, membran kalınlığı boyunca çizgisel, iki boyutlu modelde ise yüzeysel olarak incelenmektedir (Çolpan ve diğer., 2011; Çolpan ve diğer., 2012). Garcia ve diğer. (2004) anottaki çok basamaklı metanol oksidasyon reaksiyonlarının kinetiğini dikkate alarak oluşturdukları bir boyutlu DMYP matematiksel modeli ile bir yakıt hücresinin voltaj, metanol konsantrasyon dağılımı ve kayıp akım değerlerini hesaplamışlardır. Wang ve Wang (2003) ise bir DMYP için kütle, taşınım ve elektrokimyasal reaksiyon denklemleri ile farklı metanol konsantrasyonlarındaki hücre voltajı ve metanol geçişi değerlerini hesaplamışlardır. Premkumar ve diğer. (2014) 500 W'lık DMYP için hücre ve yığın modelini Matlab/Simulink ile oluşturarak belirli bir akım gereksinimine göre hücre voltajı, gücü ve yakıt pili sıcaklığını hesaplamışlardır. Argyropoulos ve diğer. (2002) DMYP için elde ettiği deneysel sonuçlara göre ampirik bir yakıt pili modeli geliştirerek farklı sıcaklık değerlerine göre hücre voltajını belirlemişlerdir. Joseph ve diğer. (2015) bir DMYP için ampirik elektrokimyasal reaksiyon denklemlerine ilaveten kütle ve ısı denge denklemini kullanarak teorik enerji ve ekserji analizi gerçekleştirmiştir. Siebke ve diğer. (2003) DMYP denge denklemleri ile oluşturduğu

yakıt pili matematiksel modelinde, farklı sıcaklık ve katot hava debileri için hücre voltajı belirlemiştir.

Teorik DMYP modellerine dayalı hesaplamaların yanı sıra, hücre performansının belirlenmesi için deneysel yöntemlerin kullanılmasına ve elde edilen deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların kıyaslanması ile ilgili çalışmalara da literatürde sıkça rastlanmaktadır. Ge ve Liu (2005), bir DMYP hücresinin performansını ve buna etkiyen faktörleri farklı çalışma sıcaklığı, metanol konsantrasyonu ile anot ve katot debileri için belirlemiştir. Bresciani ve diğer. (2014) 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip bir DMYP hücresinin, 1 ve 2 molar konsantrasyon ile farklı anot ve katot stokiometrik oranlarında yakıt piline beslenmesi durumunda, hücre voltajı ve metanol geçişini deneysel olarak inceleyerek 600 saat süresince hücre içerisindeki metanol ve su miktarının değişimini belirlemiştir. Chen ve diğer. (2006) tarafından geliştirilen ve 18 hücreden oluşan, taşınabilir uygulamalarda kullanıma uygun bir DMYP yakıt pili yığınının testi sonucunda sistemin performansını belirlemişler ve maksimum 33 W değerinde çıkış gücü elde etmişlerdir. Kim ve diğer. (2006) ise 106 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip, 50 W'lık DMYP yığının deneysel olarak farklı sıcaklık ve metanol konsantrasyonları için çalışma karakteristiklerini incelemiştir. Benzer bir diğer çalışmada ise Joh ve diğer. (2008), 138 cm<sup>2</sup> aktif alana ve 42 hücreye sahip 400 W'lık bir DMYP geliştirerek deneysel olarak performans karakteristiklerini incelemiştir. DMYP ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçların matematiksel modellerle kıyaslanması, bir boyutlu DMYP modeli için (Falcao ve diğer., 2015; Lee ve diğer., 2017) veya iki fazlı anot akışı (Casalegno ve Marchesi, 2008) için gerçekleştirilebilmektedir. Bu kıyaslamalar sonucunda matematiksel yakıt pili modelinin sonuçları ile deneysel sonuçların özellikle hücre voltajı ve çıkış gücü açısından uyumlu olması modelin doğruluğunu göstermektedir.

Bir hibrit taşıtın çalışması ve farklı yol koşullarında seyri esnasında tahrik sisteminde yer alan DMYP ve batarya modellerinin arasındaki çalışma uyumu, işletme stratejisi veya kontrol stratejisi olarak tarif edilmektedir (Ehsani ve diğer., 2010). Her iki enerji kaynağının, koordineli ve yüksek verimde çalışarak taşıtın her koşuldaki güç ve moment ihtiyacını karşılamaya yönelik işletme karakteristiklerinin

belirlenmesi ise güç veya enerji yönetimi başlığında incelenmektedir (Williamson ve diğer., 2013). Li ve diğer. (2017), menzili arttırılmış elektrikli bir taşıtın batarya ile güç destek ünitesi arasındaki güç dağılım problemini çözmek amacıyla enerji yönetim optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Xi ve diğer. (2014), elektrikli araçlardaki enerji verimini arttırmak amacıyla geliştirdikleri optimal enerji yönetim stratejisi ile gerçek zamanlı çalışmaya uyumlu bir kontrolcü hiyerarşisi önermişlerdir. Marzougui ve diğer. (2017), içerisinde yakıt pili, batarya ve ultrakapasitör bulunan bir hibrit araç için geliştirdikleri enerji yönetim algoritması ile üç enerji kaynağında ihtiyaç olan gücü regule edecek konvertörlerdeki akımı kesin olarak belirlemeyi amaçlamışlardır. Carignano ve diğer. (2017), enerji ihtiyaç kestirimine bağlı olarak yakıt pilli ve süper kapasitörlü bir hibrit araç için önerdikleri enerji yönetim stratejisi ile yakıt ekonomisinde iyileştirmeler sağlamışlardır. Tejwani ve Suthar (2017) ise şebekeye bağlı güneş pilleri ile yakıt pilinden müteşekkil hibrit bir sistemin güç yönetiminin modellemesi, tasarımı ve analizini çalışmışlardır. Mokrani ve diğer. (2017), elektrikli taşıtlarda yakıt pillerinde üretilen güç fazlasının geri kazanımı için iki adet güç yönetim algoritması geliştirmişlerdir. Bassam ve diğer. (2016), batarya ve yakıt pilinin kullanıldığı hibrit bir deniz taşıtı için enerji yönetim stratejisi olarak geliştirilmiş oransal-integral kontrolcü önermiş ve bununla elde ettiği sonuçları orijinal oransal-integral kontrolcü, eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu stratejisi ve durum bazlı enerji yönetim stratejisiyle kıyaslayarak yakıt pili verimi ve yakıt tüketiminde elde ettiği gelişmeleri göstermişlerdir. Hwang ve diğer. (2012), yakıt pilli hibrit bir taşıt için bir güç yönetim algoritması önermişler ve bu algoritma kullanılarak yaptıkları simülasyonun sonuçlarını deneysel olarak belirli bir hız profili için doğrulamışlardır.

Güç ve enerji elemanlarının matematiksel modelleri ile belirlenen ve araç tahrik tipine uyumlu olan güç/enerji yönetim algoritmalarının birlikte bulunduğu taşıt simülasyon modelinin çözümü ile bir hibrit taşıtın çalışma ve performans karakteristikleri belirlenebilmektedir. Bu simülasyonlar, taşıtların çalışma koşullarına uygun hız profili girdileri esas alınarak nümerik olarak yapılmaktadırlar (Das ve diğer., 2017). Li ve diğer. (2016), yakıt pili ve süperkapasitör içeren hibrit bir iş makinası uygulaması için yaptığı simülasyon çalışması sonucunda güç kaynağının



boyutlandırılması, yakıt tüketimi ve maliyet analizi hakkında değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Marx ve diğer. (2017), otomobil uygulaması için birden çok yığına sahip yakıt pili grubu ile bataryanın bulunduğu sistemin analizini üç farklı standart sürüş çevrimi için gerçekleştirerek yakıt tüketimi ile yakıt pili ve bataryada zamanla meydana gelen kapasite kaybını belirlemişlerdir. Feroldi ve Carignano (2016), süperkapasitörlü ve yakıt pilli hibrit bir taşıt için yaptıkları simülasyonlarla farklı sürüş çevrimleri için boyutlandırmanın etkisini incelemişlerdir. Odeim ve diğer. (2014), yakıt pilli hibrit tahrikli bir aracın batarya doluluk oranını hesaplamış ve simülasyon sonuçları ile deney sonuçlarını kıyaslamışlardır. Huang ve diğer. (2016) ile Varnhagen ve diğer. (2011) ise hibrit bir taşıt için yaptıkları simülasyon çalışmasında Matlab/Simulink tabanlı çalışan bir paket program olan ADVISOR programını kullanmışlardır. Huang ve diğer. (2017) ise kendi oluşturdukları Simulink simülasyon modeli ile yaptıkları nümerik analiz ile yakıt pilli bir motorsikletin yokuş çıkma kabiliyetini belirlemişlerdir.

Matematiksel olarak kurulu modele dayalı simülasyon sonuçları ile temel çalışma parametreleri ve performans değerlerinin belirlenmesiyle hibrit taşıt konstrüksiyonun uygulamasının yapılması için gerekli zemin hazırlanmış olmaktadır. Fontela ve diğer. (2007), simülasyon sonucunda elde ettikleri değerlere göre yakıt pilli hibrit sistem konseptini bir havaalanı aracına entegre etmişlerdir. Miranda ve diğer. (2017), belirli bir güzergahta seyreden bir yolcu otobüsün seyir süresince güç gereksinimini ve enerji dağılımını belirlemişler ve uygulamasını 21 tonluk bir otobüs üzerinde yapmışlardır. Yakıt pilinin menzil uzatıcı olarak eklendiği elektrikli bir hafif taşıt uygulaması, Casolari ve diğer. (2014) tarafından gerçekleştirilerek araçta menzil artışı sağlanmıştır. Tolj ve diğer. (2013), yakıt pilli hibrit elektrikli araç uygulaması ile yakıt pilinin sürüş performansına etkisini incelemişlerdir. Bir diğer hafif araç uygulamasında Hwang ve Chang (2012), yakıt pilli hibrit aracın verim, güç ve hızlanma karakteristiklerini belirlemişlerdir. Mergel ve diğer. (2012) ise bataryayı DMYP ile destekleyen hibrit bir fabrika içi forklift aracının yakıt pili ve batarya kapasitelerini, hızlanma, yavaşlama ve sabit hız bölgelerinden ibaret bir çevrime göre tasarlayarak üretmişlerdir.

Bu çalışmada ilk olarak, DMYP ile bataryanın enerji kaynağı olarak kullanıldığı bir hibrit tahrik sistemi için yapı elemanlarının matematiksel modelleri detaylandırılmıştır. DMYP için hem modelleme kısmında bir boyutlu yakıt pili modeli oluşturulmuş, hem de tek bir hücre ve beş hücreden oluşan kısa yığın için DMYP sistemi deneysel olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Yakıt pili, batarya, elektrik motoru gibi komponentler ile hibrit bir aracın çalışma koşullarına göre işletme stratejisi belirlenerek hem teorik model verilerini hem de deneysel DMYP sonuçlarını kapsayan yeni bir Yarı-Teorik güç yönetim algoritması önerilmiştir. Farklı batarya tiplerine, yakıt pilinin teorik-deneysel sonuçlarına ve taşıtın öngörülen hız profiline göre hibrit tahrik sisteminin simülasyonu yapılarak enerji ve güç kaynaklarındaki güç gereksinimi, batarya doluluk oranı ve yakıt pili metanol tüketimi gibi temel parametreler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarla birlikte, batarya, yakıt pili, güç yönetim sistemi vb. sistemlere ait parametrelerin, daha verimli, çevreci ve ekonomik bir araç tahrikinin elde edilmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## BÖLÜM İKİ

### HİBRİT TAHRİK SİSTEMİ ELEMANLARININ MATEMATİKSEL MODELİ

#### 2.1 Taşıt Modeli

Bir aracın hareketi sırasında, araçta bulunan tahrik motoru (içten yanmalı motor, elektrik motoru veya her ikisi birden) tarafından aşılması gereken seyir dirençleri ortaya çıkar. Dirençlerin toplamı, aracın ileri doğru hareketi için motordan tahrik tekerleklerine iletilmesi gereken kuvveti belirler. Motor tarafından üretilen tahrik momentinin hareket dirençlerini yenmek için kullanılmasıyla birlikte bir aracın ulaşabileceği maksimum hızı, yokuş tırmanma kabiliyeti ve ivmelenme yeteneği hesaplanabilir (Kuralay, 2008).

Aracın hareketinin sürekliliği için tahrik motoru, hareket dirençleri ve tahrik sistemindeki kayıplardan oluşan direnç kuvvetlerini yenebilmek için sürekli olarak moment üretir. Seyir durumunda bir araç üzerine yuvarlanma direnci ( $F_R$ ), hava direnci ( $F_L$ ), yokuş direnci ( $F_{St}$ ) ivme direnci ( $F_a$ ) etkimektedir. Yuvarlanma direnci, taşıt lastiğinin araç hareketi boyunca şekil değişiminden dolayı oluşmaktadır. Hava direnci, taşıt hızına, aracın aerodinamik yapısına ve araç kesit alanına bağlı olarak bir akışkan içerisinde (hava) hareket eden aracın üzerine gelen direnç kuvvetidir. Aracın düz yolda sabit hızla hareketi dışında yokuş çıkma veya hızlanma durumunda ise sırasıyla yokuş direnci ve ivmelenme dirençleri oluşur. Taşıt üzerine etkiyen bu direnç kuvvetleri aşağıdaki gibi formüle edilmektedir (Karaoğlan, 2014).

$$F_R = m \cdot g \cdot f_R \quad (2.1)$$

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin \delta \quad (2.2)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_w \cdot V^2 \quad (2.3)$$

$$F_a = \lambda \cdot m \cdot a \quad (2.4)$$

Burada  $m$  araç kütlesini,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $f_R$  yuvarlanma direnç katsayısını,  $\delta$  yokuş eğim açısını,  $\rho$  hava yoğunluğunu,  $C_w$  aracın aerodinamik katsayısını,  $V$  araç hızını,  $a$  araç ivmesini ifade etmektedir. Araçta bulunan dönen elemanların ivmelenme etkisi  $\lambda$  katsayısıyla gösterilmiştir. Sabit basamaklı vites kutusu kullanılan elektrikli araçlar ile seri hibrit (taşıt hareketini sadece elektrik motoru ile sağlandığı hibrit konstrüksiyonu) tipinde  $\lambda$  değeri, vites çevrim oranı değişmediği için değeri sabit kalmaktadır.

Yukarıdaki hareket direnç kuvvetleri kullanılarak araç hareketinin matematiksel olarak temsil edilmesi bazı kabuller çerçevesinde gerçekleşir (Mashadi ve Crolla, 2012). Taşıt modelinde uygulanan bu kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Taşıt hareketi sadece boyuna yönde harekettir.
- Tekerlek kayması ihmal edilmiştir.
- Sistemde herhangi bir titreşim ve sönümlenme yoktur.
- Tekerlek dinamik yarıçapı ve yuvarlanma direnç katsayısı hareket boyunca sabit kalmaktadır.
- Taşıt hareketi rüzgârsız bir ortamda gerçekleşmektedir.

Araç tahrik tekerleklerinde oluşan direnç kuvvetleri dolayısıyla elektrik motoru üzerinde oluşan çıkış momenti ( $M_{EM\text{Çıkış}}$ ), devir sayısı ( $n_{EM}$ ) ve çıkış gücü ( $P_{EM\text{Çıkış}}$ ) ihtiyacı sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$M_{EM\text{Çıkış}} = \frac{\sum F \cdot \eta_M \cdot r_{dyn}}{i} \quad (2.5)$$

$$n_{EM} = \frac{V \cdot 60 \cdot i}{2\pi \cdot r_{dyn}} \quad (2.6)$$

$$P_{EM_{Çıkış}} = \frac{M_{EM_{Çıkış}} \cdot n_{EM}}{9549} \quad (2.7)$$

Burada  $\Sigma F$ , hareket koşuluna göre (düz yol, yokuş çıkma, ivmelenme vs.) araç tekerleklerine etkiyen direnç kuvvetlerinin toplamıdır. Elektrik motoru ile tekerlekler arasındaki mekanik verim  $\eta_M$ , tekerlek dinamik yarıçapı  $r_{dyn}$  ve motor ile tekerlekler arasında uygulanan redüksiyon neticesinde oluşan çevrim oranı  $i$  ile gösterilmiştir.

## 2.2 Batarya

### 2.2.1 Batarya Tipleri ve Temel Özellikleri

Alternatif taşıt tahriklerinde batarya tipleri, batarya kapasitesi ve batarya modelleri araç performansının hesaplanması ve doğrulanmasında önemli rol oynamaktadır. Salt elektrikli araçlarda bataryalar, tek enerji kaynağı olarak araçtaki en yüksek maliyet ve ağırlığa sahip komponenttir. Hibrit taşıtlarda ise bataryalar genellikle birincil enerji kaynağı olurken ultrakapasitörler, süperkapasitörler veya yakıt pilleri tarafından desteklenirler.

Bataryalar temel olarak iki veya daha fazla batarya hücresinin birlikte bulunduğu ve bu hücrelerin kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdüğü sistemlerdir. Kimyasal reaksiyon, bir batarya hücresindeki pozitif ve negatif elektrotlar ile elektrolit üzerinde gerçekleşerek DC elektrik akımı oluşturur. Bir hibrit veya elektrikli aracın veriminin ve ulaşabileceği menzil değerinin yüksekliği, bataryasının kapasitesinin [Wh], özgül enerjisinin [ $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ], enerji yoğunluğunun [ $\text{Wh} \cdot \text{L}^{-1}$ ], özgül gücünün [ $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] ve güç yoğunluğunun [ $\text{W} \cdot \text{L}^{-1}$ ] yüksek olması ile kendinden deşarj oranı (self-discharging) ve iç direncinin [ $\Omega$ ] düşük olmasına bağlıdır (Larminie ve Lowry, 2003). Araç tipi ve kullanım özelliklerine bağlı olarak uygun batarya tipinin ve kapasitesinin yukarıdaki batarya özellikleri dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir.

Kurşun asit bataryalar genellikle konvansiyonel taşıtlarda akü olarak kullanılmasına karşın küçük çaplı elektrikli taşıtlarda da (Tolj ve diğer., 2013; Casolari ve diğer., 2014) kullanım alanı bulmaktadır. Aktif madde olarak negatif elektrodunda kurşun, pozitif elektrodunda kurşun dioksit bulunan kurşun asit bataryalarda, elektrolit olarak seyreltilmiş sülfürik asit içerisinde aşağıdaki gibi bir tersinir genel kimyasal reaksiyon gerçekleşmektedir.



Kurşun asit bataryaların verimleri deşarj oranı ve çalışma sıcaklığına bağılı olarak %80 civarında olup iç dirençleri oldukça düşüktür. Buna karşın diğer batarya çeşitlerine göre özgül enerji ve enerji yoğunluğu değerleri düşük olduğundan elektrikli ve hibrit taşıtlarda nadiren tercih edilmektedirler (Reif ve diğer., 2012).

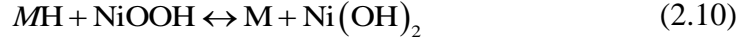
Nikel kadmiyum (NiCd) bataryalar pozitif elektrodunda nikel oksihidroksit ve negatif elektrodunda metalik kadmiyum bulunduran bir batarya çeşididir. Bu batarya tipinde elektrik enerjisi, aşağıda belirtilen genel kimyasal reaksiyon sonucunda oluşmaktadır.



Bu tip bataryalar, yüksek özgül güç, uzun çevrim ömrü, geniş çalışma sıcaklığı aralığı ve düşük kendinden deşarj oranına sahip olmasından dolayı büyük bir avantaja sahiptir. Buna karşın her bir batarya hücresinin çalışma voltajı düşük ve bu sebeple batarya maliyetleri yüksektir. Ayrıca kadmiyum maddesi de çevresel açıdan zararlı ve kanserojen bir maddedir (Linden ve Reddy, 2001).

Hibrit ve elektrikli taşıt bataryalarında sıkça tercih edilen nikel metal hidrit (NiMH) bataryaların pozitif elektrodu NiCd bataryalar ile aynı olup negatif elektrodunda metal hidrit içerisinde absorbe edilmiş hidrojen kullanılmaktadır. Negatif elektrotta metalden alınan hidrojenin reaksiyona girmesi sonucunda yakıt

pilleriindeki gibi su ve elektron açığa çıkmaktadır. NiMH bataryalar için genel reaksiyon formülü aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.



NiMH bataryalar enerji ve güç yoğunluğu açısından NiCd bataryalara göre daha iyi özelliklere sahiptirler. Ayrıca NiMH bataryalar, NiCd bataryalara göre daha hızlı şarj edilebilmektedir. Bu sebeple NiMH bataryalarda soğutma sisteminin kullanılması gerekmektedir (Larminie ve Lowry, 2003).

Lityum iyon (Li-iyon) bataryalar ise yüksek özgül enerji/güç değerleri ile hibrit ve elektrikli araç bataryalarında en çok tercih edilen batarya tipidir. Elektrik enerjisi bu bataryalarda lityum-karbon ile metaloksidin, karbon ve lityum-metalokside aşağıdaki gibi bir reaksiyon ile tersinir olarak dönüşebilmesi ile elde edilmektedir (Jiang ve Zhang, 2015).



Li-iyon bataryalar aynı kapasite için diğer bataryalara göre ağırlık yönünden ciddi avantajlara sahip olmasına rağmen maliyet olarak diğer bataryalara göre dezavantajlı bir konumdadır. Tablo 2.1’de bahsedilen dört batarya tipine ait temel karakteristik özellikler karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Larminie ve Lowry, 2003; Chau, 2015).

Tablo 2.1 Çeşitli batarya tiplerinin temel özellikleri (Larminie ve Lowry, 2003; Chau, 2015)

Batarya Tipi	Kurşun Asit	NiCd	NiMH	Li-iyon
Özgül Enerji	20-35 Wh·kg <sup>-1</sup>	40-60 Wh·kg <sup>-1</sup>	60-120 Wh·kg <sup>-1</sup>	90-160 Wh·kg <sup>-1</sup>
Enerji Yoğunluğu	55-95 Wh·L <sup>-1</sup>	70-90 Wh·L <sup>-1</sup>	~ 150 Wh·L <sup>-1</sup>	~ 150 Wh·L <sup>-1</sup>
Özgül Güç	~ 250 W·kg <sup>-1</sup>	150-350 W·kg <sup>-1</sup>	150-400 W·kg <sup>-1</sup>	250-450 W·kg <sup>-1</sup>
Nominal Hücre Voltajı	2 V	1,2 V	1,2 V	3,5 V
Kendinden Deşarj Oranı	~ %2/Gün	~ %0,5/Gün	~ %5/Gün	~ %10/Ay
Çevrim Ömrü	~ 800	~ 1200	> 1000	> 1000

### 2.2.2 Batarya Modeli

Batarya modeli temel olarak elektrikli veya hibrit araçlarda güç yönetim algoritmasına göre oluşturulan batarya yönetim sisteminin ana çıktısı olan batarya doluluk oranının (SOC – State of Charge) doğru bir şekilde tahmin edilmesini amaçlar. Anlık SOC değeri, taşıtın çalışması esnasında doğrudan batarya üzerinden ölçülemediği için batarya tipinin karakteristik özelliklerini de yansıtan bir batarya modeli kullanılarak anlık akım ihtiyacına göre hesaplanabilmektedir (Rahn ve Wang, 2013).

Bataryayı modellemek için çeşitli modelleme yöntemleri ve yaklaşımları olmasına karşın en temel ve basit haliyle bir batarya Rint modeli ile ifade edilebilmektedir. Bu modele göre batarya şarj ve deşarj durumunda değişebilen bir iç direnç (R) ile batarya açık devre voltajına sahip olan bir voltaj kaynağından ( $U_{Bat}$ ) oluşur. Bataryalarda bu her iki değer de SOC değerine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca batarya iç direnci SOC değerine bağlı olarak şarj ve deşarj durumlarında farklılık göstermektedir. Zamanla bataryada ihtiyaç olan akım  $I_{Bat}$  olmak üzere batarya güç çıkışı ( $P_{Bat}$ ) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Karaoğlan, 2014).

$$P_{Bat} = U_{Bat} (SOC) \cdot I_{Bat}(t) - I_{Bat}^2(t) \cdot R(SOC, sign(P_{Bat})) \quad (2.12)$$

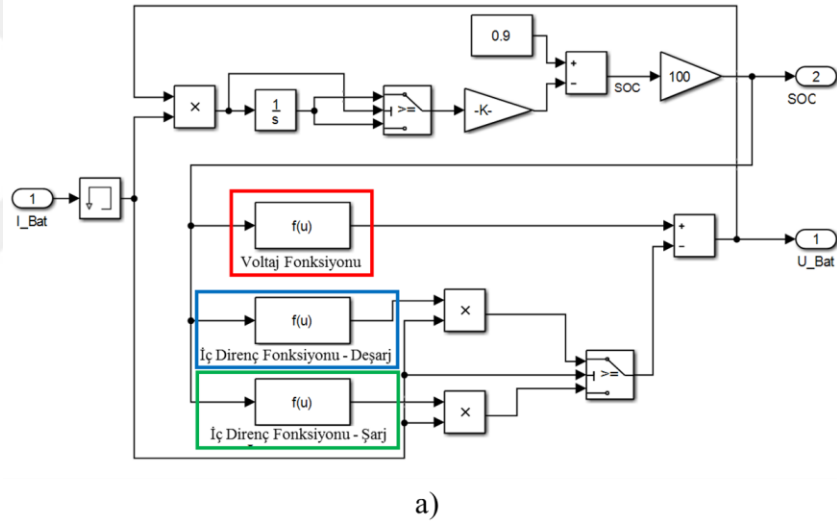
Yukarıdaki denklemde şarj ve deşarj durumunda güç ve akım ifadelerinin işaretinin değişeceği de göz önüne alınırsa,  $R_s$  şarj durumundaki iç direnç,  $R_d$  ise deşarj durumundaki iç direnç olmak üzere, taşıtın hareketi sırasında araç üzerinde etkin hareket dirençlerini yenebilmek için gerekli deşarj akımı  $I_{Bat,d}$ , frenleme durumunda rekuperasyon (fren enerjisinin geri kazanımı) yoluyla bataryaya depolanan şarj akımı  $I_{Bat,s}$  aşağıdaki gibi meydana gelmektedir.

$$I_{Bat,s} = \frac{-U_{Bat} + \sqrt{U_{Bat}^2 + 4 \cdot R_s \cdot P_{Bat}}}{2 \cdot R_s} \quad (2.13)$$

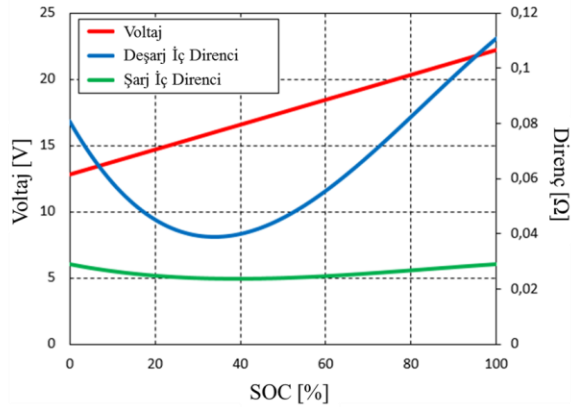


$$I_{Bat,d} = \frac{U_{Bat} - \sqrt{U_{Bat}^2 - 4 \cdot R_d \cdot P_{Bat}}}{2 \cdot R_d} \quad (2.14)$$

Yukarıda şarj ve deşarj durumunda geçerli olan akım ifadeleri ile SOC durumunun bağıntısını temel alan batarya modeli Şekil 2.1a'da gösterilmiştir. Simulink ortamında temel blok diyagramları vasıtasıyla oluşturulan bu modelde anlık olarak bataryada gerekli akım girdisine göre anlık batarya voltajı ve SOC değeri hesaplanmaktadır. Anlık SOC değerine bağlı olarak değişen parametreler olan batarya nominal voltaj değeri ( $U_N$ ), şarj durumundaki iç direnç ( $R_s$ ) ve deşarj durumundaki iç direncin ( $R_d$ ) SOC'ye bağlı değişim fonksiyonunun bulunduğu blok diyagramları sırasıyla kırmızı, mavi ve yeşil ile renk belirtilmiştir. Şekil 2.1b'de örnek bir batarya modülü için bu değişimlerin karakteristiği gösterilmiştir.



a)



b)

Şekil 2.1 Batarya Simulink modeli (a) temel batarya parametrelerinin doluluk oranına göre değişimi (b)

Batarya modelinde belirtilen K çarpanı kapasite faktörü (1/batarya kapasitesi), 0,9 katsayısı ise SOC değerinin başlangıç değerini göstermektedir. Bu iki katsayıya ilave olarak modelde yüzde cinsinden SOC çıktısı vermek için son olarak 100 ile çarpım işlemi uygulanmıştır. Batarya iç dirençleri nedeniyle, nominal batarya voltajına göre oluşabilecek maksimum batarya çıkış gücü ile gerçek batarya çıkış gücü arasındaki oran batarya verimi şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_{Bat} = \frac{U_{Bat} \cdot I_{Bat} - I_{Bat}^2 \cdot R}{U_N \cdot I_{Bat}} \quad (2.15)$$

Batarya doluluk oranının değişimi, şarj ve deşarj durumuna göre (batarya gücünün pozitif ve negatif olmasına göre) aşağıdaki gibi matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$SOC = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\int U_{Bat} \cdot I_{Bat} \cdot dt}{\eta_{Bat} \cdot U_N \cdot C_N}, P_{Bat} \geq 0 \\ \frac{\eta_{Bat} \cdot \int U_{Bat} \cdot I_{Bat} \cdot dt}{U_N \cdot C_N}, P_{Bat} < 0 \end{array} \right\} \quad (2.16)$$

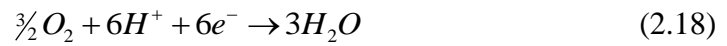
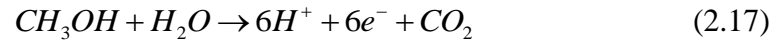
Yukarıdaki formüllerde  $C_N$  nominal batarya kapasitesini [Ah] ifade etmektedir. SOC ifadesinin batarya modelinde, farklı batarya tiplerine göre iç direnç ve nominal batarya voltajı değişimleri ile birlikte kullanılması, hibrit ve elektrikli taşıt simülasyonlarında gerçeğe yakın sonuç elde etmek için gereklidir. Bunun için bu çalışmada yapılmış simülasyonlarda bu faktör dahil edilmiştir.

### 2.3 Doğrudan Metanollü Yakıt Pili Teorik Modeli

Tahrik sistemindeki enerji dönüşümleri yönünden incelendiğinde, hibrit taşıtlarda yakıtın kimyasal enerjisinin mekanik enerjiye dönüştüğü içten yanmalı motorların yerine aynı kimyasal enerjinin elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüğü yakıt pillerinin kullanılması, sistem verimini arttırmaktadır. Yakıt pilleri enerji dönüşüm yönünden batarya ile benzer olmakla

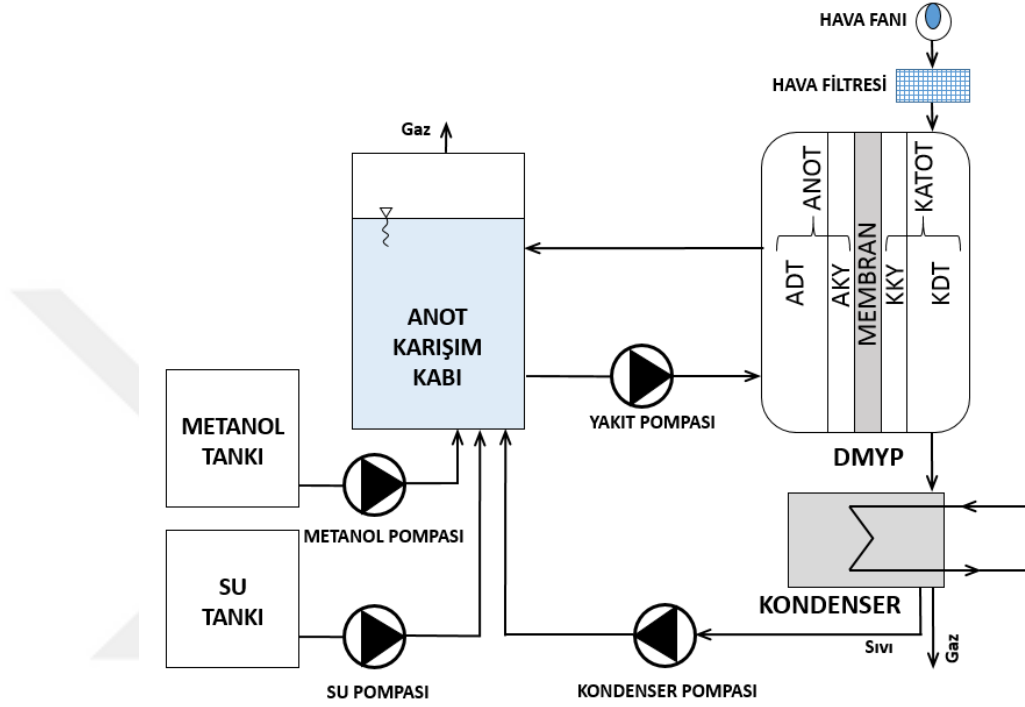
birlikte, bataryadan farklı olarak, yakıt pilinde sisteme giren oksidasyon elemanı (hava) ve yakıt (hidrojen, metanol vs.) sebebiyle kontrol hacmi dışından kütle akışına izin verilmektedir. Yakıt pilleri, hücre geometrisi (membran kalınlığı, hücre aktif alanı vs.), işletme sabitleri (taşıma katsayısı, transfer katsayısı vs.), çalışma koşulları (metanol konsantrasyonu, katot hava basıncı vs.) ve malzeme özellikleri gibi girdi parametrelerine göre gerçekleşen su, metanol ve oksijen taşınımı sonucunda oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda yüksek bir verim ile voltaj ve güç çıktısının alındığı sistemlerdir (Mench, 2008).

Yakıt pillerinin otomotiv alanında kullanılan birkaç tipi olmasına rağmen, son yıllarda DMYP kullanılarak orta ve küçük çaplı araçlarda oluşturulan hibrit sistemlerde, birinci bölümde bahsedilen avantajlarından dolayı önemli artışlar gerçekleşmiştir. DMYP, anot üzerinden metanol-su karışımı ve katot üzerinden hava beslemesi ile birlikte ürün olarak suyun çıktığı ve sistemden elektron geçişinin sağlandığı elektrokimyasal değişimleri ifade etmektedir. Bir yakıt pili hücresi elektron geçirmeyen bir membran (M), anot destek tabakası (ADT), anot katalist yüzeyi (AKT), katot destek tabakası (KDT) ve katot katalist yüzeyinden (KKY) oluşmaktadır. Yakıt pilinin anot tarafını ADT ile AKY oluştururken, katot tarafı KDT ve KKY'den meydana gelmektedir. Elektrokimyasal yolla DMYP içerisinde meydana gelen reaksiyonlar sırasıyla anot, katot ve toplam reaksiyon için aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.2'de DMYP ile oluşturulmuş bir yakıt pili sistemi, yakıt hücresinin ve sistemin elemanları ile birlikte gösterilmiştir. Bulduğu depolardan metanol ile su, pompa vasıtasıyla anot karışım kabına ayrı ayrı beslenir. Anot karışım kabında istenilen metanol konsantrasyonunun sağlanmasının ardından metanol su karışımı

anoda gönderilir. Katot tarafından ise fan yardımıyla bir filtreden geçirilerek hava girişi sağlanır. Oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik elde edilirken, üretilen su kondenser vasıtasıyla yoğunlaştırularak tekrar anot karışım kabına iletilir. Anoda gönderilen metanol su karışımının fazlası ve üretilen CO<sub>2</sub> gazı anot karışım kabına dönerek buradan gazın dışarı atılması sağlanır.



Şekil 2.2 DMYP sistemi ve elemanları

Yakıt pili içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda yakıt pilinin hücre voltajı eğrisi (polarizasyon eğrisi), güç yoğunluğu ve verim değerlerinin belirlenebilmesi için kullanılan taşınım ve elektrokimyasal denklemler için yakıt pili modelinde bazı kabul ve varsayımların yapılması gerekmektedir (Colpan ve diğer., 2011). Bir boyutlu yakıt pili modeli için geçerli olan temel kabuller aşağıda sıralanmıştır.

- Yakıt pili izotermal ve kararlı durumda çalışmaktadır.
- Katot katalist yüzeyinde metanol tamamen tüketilmektedir.

- Hücre giriş ve çıkış sıcaklıkları eşit olup çalışma sıcaklığı şeklinde tarif edilmiştir.
- Tüm gazlar ideal gaz, sıvılar ise sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir.

Yukarıdaki kabuller dahilinde yakıt piline gönderilen metanol içerisindeki hidrojenin ideal durumda kimyasal enerjisi ile oluşacak voltaj değeri ile (açık devre voltajı- $V_{ADV}$ ) hücre içerisinde oluşan kayıplar arasındaki fark hücre voltajına eşittir. Elektrot yüzeylerinde kimyasal reaksiyonun yavaşlamasından dolayı anot ve katotta aktivasyon kayıpları (sırasıyla  $V_{akt,a}$  ve  $V_{akt,k}$ ) meydana gelmektedir. Hücre içerisindeki elektrolit sıvısının iyon geçişine karşı direnci nedeniyle ohmik kayıplar ( $V_{ohm}$ ) oluşmaktadır. Elektrot yüzeyinde metanol konsantrasyonu düşüşü sebebiyle ise anot ve katotta konsantrasyon kayıpları (sırasıyla  $V_{kon,a}$  ve  $V_{kon,k}$ ) voltaj değerini düşürmektedir (Larminie ve Dicks, 2003). DMYP için hücre voltajı çıkışı ( $V_{DMYP}$ ) ve voltaj kayıpları sırasıyla aşağıda ifade edilmiştir.

$$V_{DMYP} = V_{ADV} - V_{akt,a} - V_{akt,k} - V_{ohm} - V_{kon,a} - V_{kon,k} \quad (2.20)$$

$$V_{akt,a} = \left( \frac{R \cdot T}{\alpha_a \cdot F} \right) \cdot \ln \left( \frac{i}{i_{oa}} \right) \quad (2.21)$$

$$V_{akt,k} = \left( \frac{R \cdot T}{\alpha_k \cdot F} \right) \cdot \ln \left( \frac{i + i_x}{i_{ok}} \right) \quad (2.22)$$

$$V_{ohm} = \left( \frac{t_M}{\sigma_M} \right) \cdot i \quad (2.23)$$

$$V_{kon,a} = \left( \frac{-R \cdot T}{v_a \cdot F} \right) \cdot \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{lim,a}} \right) \quad (2.24)$$

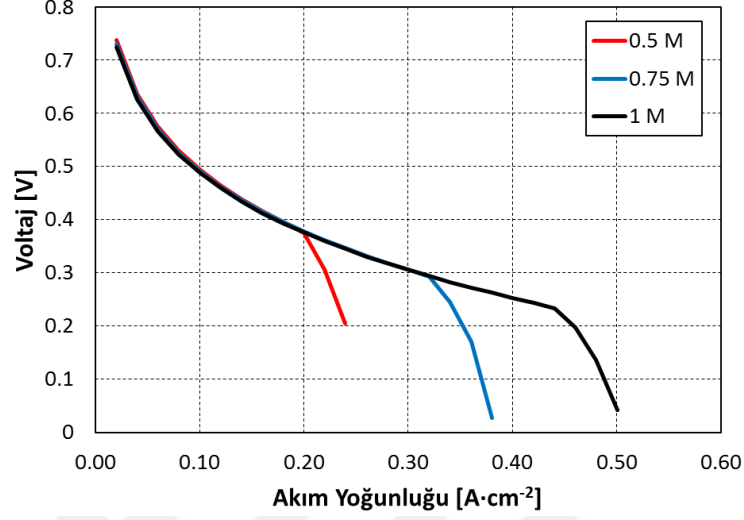
$$V_{kon,k} = \left( \frac{-R \cdot T}{v_k \cdot F} \right) \cdot \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{lim,k}} \right) \quad (2.25)$$

Aktivasyon kayıpları için; T çalışma sıcaklığı [K], R üniversal gaz sabiti (8,314 J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>), F Faraday sabiti (96485 s·A·mol<sup>-1</sup>), i akım yoğunluğu [A·cm<sup>-2</sup>], i<sub>oa</sub> ve i<sub>ok</sub> anot ve katot için değişim akım yoğunluğu değerleri [A·cm<sup>-2</sup>], α<sub>a</sub> ve α<sub>k</sub> sırasıyla anot ve katot transfer katsayıları ve i<sub>x</sub> metanol geçişi için geçiş akım yoğunluğu değerini [A·cm<sup>-2</sup>] ifade etmektedir. Ohmik kayıplar ise membran kalınlığına (t<sub>M</sub>) ve bu bölgedeki iletkenlik değerlerine (σ<sub>M</sub>) bağlı olarak akım yoğunluğuna göre değişmektedir. Konsantrasyon kayıpları için v<sub>a</sub> ve v<sub>k</sub> sırasıyla anot ve katot için reaksiyona giren bir elemanın bir moldeki üretilen veya tüketilen proton sayısı, i<sub>lim,a</sub> ve i<sub>lim,k</sub> anot ve katottaki limit akım yoğunluğu [A·cm<sup>-2</sup>] değerleridir (Colpan ve diğer., 2011). Tablo 2.2’de bir boyutlu DMYP modeli için kullanılan bazı giriş parametreleri ve katsayılar gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Bir boyutlu DMYP modeli giriş parametreleri

Giriş Parametreleri	Değer	Birim
Anot destek tabakası kalınlığı	0,014	cm
Anot katalist yüzeyi kalınlığı	0,002	cm
Membran kalınlığı	0,0127	cm
Katot katalist yüzeyi kalınlığı	0,004	cm
Katot destek tabakası kalınlığı	0,014	cm
Anot destek tabakası porozitesi	0,6	-
Katot destek tabakası porozitesi	0,6	-
Membran porozitesi	0,28	-
Açık devre voltajı	1,21	V
Katot basıncı	1	atm
Çalışma sıcaklığı	343	K
Metanol konsantrasyonu	0,5	mol/l
Anot transfer katsayısı	0,24	-
Katot transfer katsayısı	0,87	-
Membran iletkenliği	0,2	S·cm <sup>-1</sup>
Anot limit akım yoğunluğu	0,29	A·cm <sup>-2</sup>
Katot limit akım yoğunluğu	68,5	A·cm <sup>-2</sup>

Tablo 2.2’de verilen değerlerin kullanılmasıyla 70°C çalışma sıcaklığı, 1 atm katot giriş havası basıncı ve 0,5 M, 0,75 M ve 1 M metanol konsantrasyonları için hücre voltajı değerleri Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Bir boyutlu DMYP modeline göre farklı metanol konsantrasyonları için hücre voltajı

Bir boyutlu yakıt pili modeline göre farklı metanol konsantrasyonları için akım yoğunluğuna göre elde edilen sonuçlarda bir yakıt pili hücresinin voltaj karakteristiği görülmektedir. Metanol konsantrasyonunun artmasıyla yakıt pilinden alınabilecek akımın sınır değeri artarken düşük akım yoğunluklarında yüksek voltaj değerine ulaşılabilir. Ayrıca düşük akım yoğunluğunun olduğu yerlerde metanol konsantrasyonunun düşük olması az da olsa voltaj değerini arttırmaktadır.

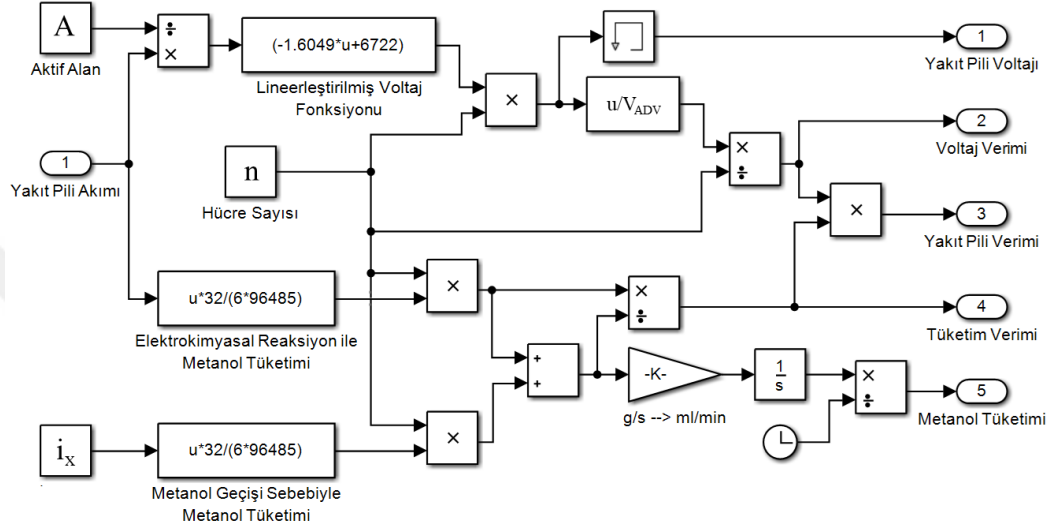
Hesaplanan hücre voltajı ve tüketilen metanol miktarına göre bir DMYP'nin voltaj verimi ( $\eta_V$ ), tüketim verimi ( $\eta_T$ ) ve toplam verimi ( $\eta_{DMYP}$ ) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Wilhelm, 2010).

$$\eta_V = \frac{V_{DMYP}}{V_{ADV}} \quad (2.26)$$

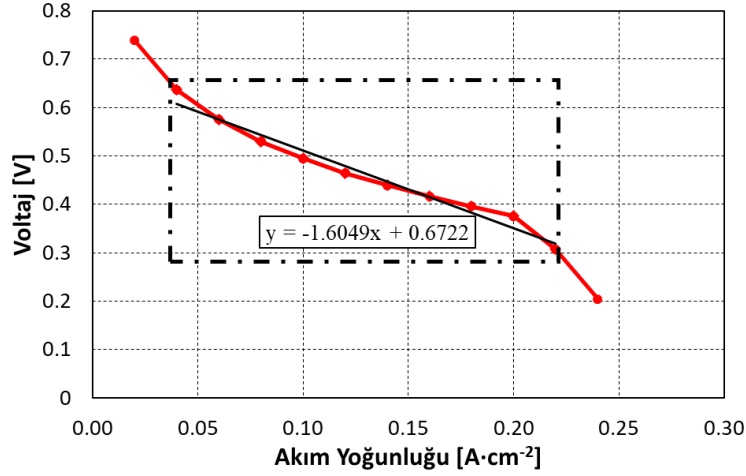
$$\eta_T = \frac{\dot{m}_{MeOH,R}}{\dot{m}_{MeOH,R} + \dot{m}_{MeOH,X}} \quad (2.27)$$

$$\eta_{DMYP} = \eta_V \cdot \eta_T \quad (2.28)$$

Yakıt pilinden talep edilen akım ihtiyacı girdisine göre n hücre sayısı ve A aktif alanı için yakıt pili voltajı, verim değerleri ile metanol tüketiminin hesaplandığı yakıt pili modelinin Simulink diyagramı Şekil 2.4a'da gösterilmiştir.



a)



b)

Şekil 2.4 Lineerleştirilmiş voltaj fonksiyonu için DMYP Simulink modeli (a) ve 0,5 M metanol derişimi için akım yoğunluğuna göre hücre performansı (b)

Oluşturulan bu DMYP modelinde  $i_x$  sabit olarak metanol geçiş akım yoğunluğunu ifade etmektedir. Yukarıda verilen denklemler sonucunda hesaplanan hücre voltajı,

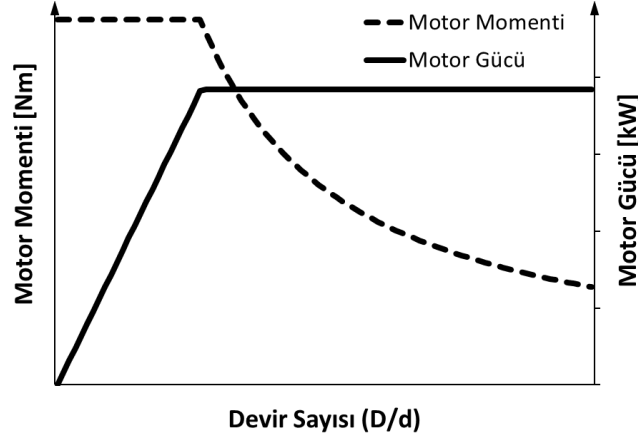


0,04-0,22 A·cm<sup>-2</sup> akım yoğunluğu aralığında lineer olarak kabul edilmiş ve DMYP modelinde “Lineerleştirilmiş Voltaj Fonksiyonu” olarak tanımlanmıştır. Şekil 2.4b’de modelde hücre voltajı hesabı için esas alınan, 0,5 M metanol konsantrasyonu için hücre voltajının değişimi ile belirtilen akım yoğunluğu aralığında değerinin lineer fonksiyonu gösterilmiştir.

Tamamen teorik hesaplamalara dayalı ve hücre voltajı hesaplamasına bağlı olarak oluşturulan bir boyutlu DMYP modelinde, metanol geçişi ( $i_x$ ) sabit kabul edilmiş, su geçişi sebebiyle yakıt pilinde meydana gelen su üretimi ( $\dot{m}_{su,x}$ ) ise modele dahil edilmemiştir. Sonraki bölümlerde bahsedilecek olan geliştirilmiş ve “Yarı-Teorik” olarak isimlendirilmiş DMYP modelinde, deneysel olarak elde edilen veriler kullanılarak  $i_x$  ve  $\dot{m}_{su,x}$ , akım yoğunluğu ve metanol konsantrasyonuna bağlı olarak modele eklenmiştir. Ayrıca, hücre voltajının değişimi de akım yoğunluğu ve metanol konsantrasyonuna göre değişen fonksiyon olarak tanımlanarak aracın farklı çalışma koşullarında değişken akım talebi doğrultusunda yakıt pilinin çalışma karakteristiği Yarı-Teorik DMYP modelinde gerçeğe daha yakın ve doğru bir şekilde modellenebilmiştir.

## 2.4 Elektrik Motoru ve Konvertör

Elektrik motorları, bir veya birden fazla enerji kaynağından aldığı akımı, dönme hareketine dönüştüren, elektrikli ve hibrit araçlar için temel tahrik gücü ve momenti kaynağıdır. Elektrikli tahrik, yüksek verim, yüksek devir sayılarında çalışma imkanı, güç başına yüksek özgül ağırlık, çevre dostu olması ve bakım kolaylığı açısından içten yanmalı motorlarla tahrike göre avantajlı durumdadır. Elektrik motorları devir sayılarına bağlı olarak farklı hızlarda sabit moment ve sabit güç karakteristiği sunarlar. Bir taşıtın seyri sırasında oluşan gerekli direnç kuvvetlerini karşılamaya uygun olarak, düşük hız bölgelerinde yüksek moment ile yüksek hızlarda düşük moment ve sabit nominal güç sağlaması nedeniyle elektrik motorları, otomotiv uygulamaları için ideal güç/moment karakteristiğine sahiptir (Khajepour ve diğer., 2014). Elektrikli ve hibrit araç tahrikinde kullanılan bir elektrik motorunun güç ve momentinin devir sayısına göre karakteristiği Şekil 2.5’te gösterilmiştir.

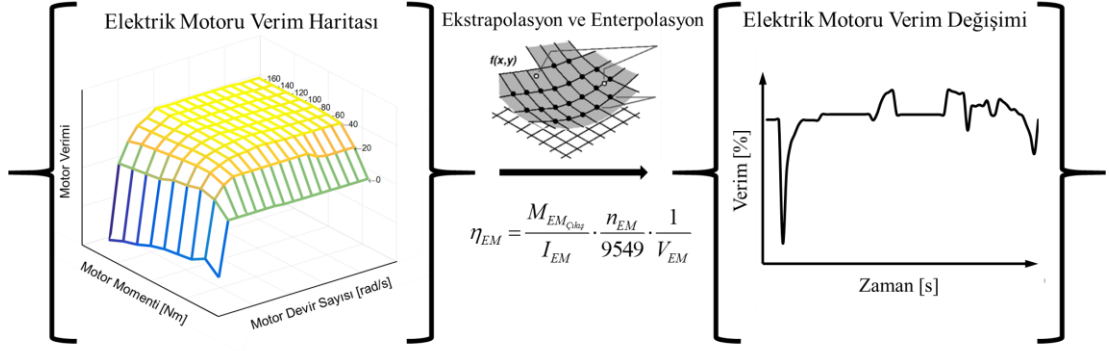


Şekil 2.5 Elektrik motoru moment ve güç karakteristiği

Otomotiv uygulamalarında kullanılan elektrik motorları, doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) motorları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki motor tipinin de kendi içinde rotor ve stator şekillerine bağlı olarak farklı çeşitlerinin olmasına rağmen, genel olarak AC motorlar boyut, maliyet, verim ve bakım yönünden DC motorlara göre avantajlıdır (Hayes ve Goodarzi, 2018). DC motorlar ise uzun ömür gerektiren otomotiv uygulamalarında kolay kullanım özelliğinden dolayı tercih edilmektedir (Akpınar, 2011).

Bu çalışma kapsamında yapılan matematiksel hesaplamalarda, moment ve devir sayısına bağlı olarak verim haritası bilinen bir DC elektrik motoru kullanılmıştır. Taşıtın seyir hızına göre belirlenen elektrik motoru devir sayısı (denklem 2.6) ve gerekli elektrik motoru çıkış momentine (denklem 2.5) göre motor verimi, motor verim haritasında verilen değerler kullanılarak yapılan ekstrapolasyon ve enterpolasyonlar ile zamana bağlı olarak ifade edilmektedir. Elektrik motoru veriminin hesaplama yöntemi Şekil 2.6'da anlatılmaktadır. Motor veriminin ifadesi aşağıda belirtilen elektrik motorunda gerekli akım ifadesinden elde edilmiştir.

$$I_{EM}(t) = \int \frac{M_{EM_{Çıkış}}(t)}{\eta_{EM}(t)} \cdot \frac{n_{EM}(t)}{9549} \cdot \frac{1}{V_{EM}} \cdot dt \quad (2.29)$$



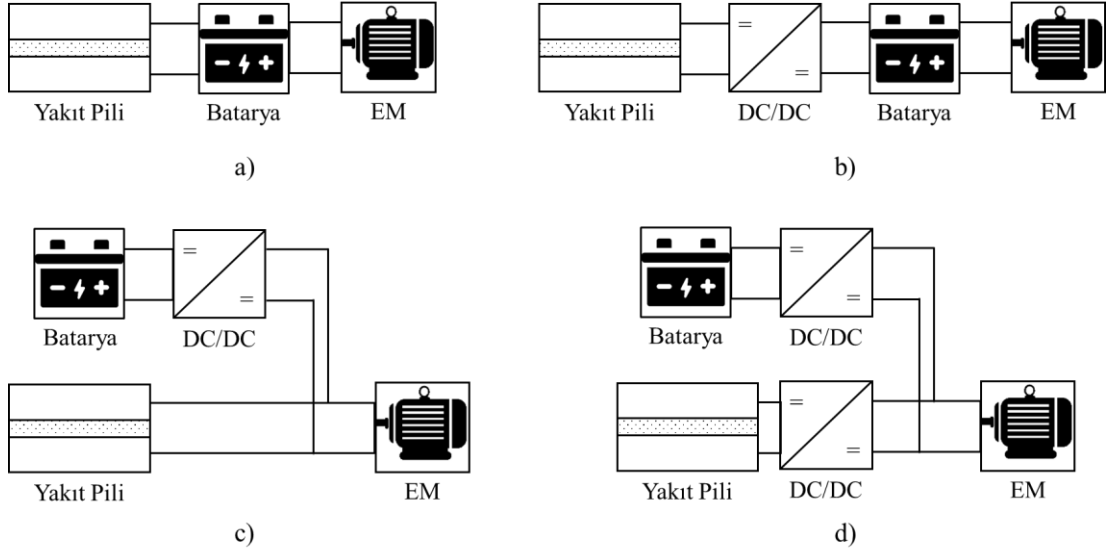
Şekil 2.6 Elektrik motoru verim haritası ile anlık elektrik motoru veriminin hesaplanması

Dinamik olarak motor veriminin tanımlanması ve frenleme anında negatif fren ivmesinden ( $\alpha^-$ ) dolayı oluşan fren enerjisinin depolanmasının da dahil edilmesiyle elektrik motoru anlık gücü ( $P_{EM}$ ) aşağıdaki gibidir.

$$P_{EM} = \frac{(F_R + F_{St} + \lambda \cdot m \cdot a^+ + \lambda \cdot m \cdot a^- \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM} \cdot i_F) \cdot V}{1000 \cdot \eta_M \cdot \eta_{EM}} \quad (2.30)$$

Burada  $a^+$  tahrik için gerekli pozitif ivmelenmeyi,  $a^-$  rejenerasyon için kullanılan negatif frenleme ivmesini,  $V$  taşıt hızını ve  $\eta_{EM}$  dinamik elektrik motoru verimini ifade etmektedir. Fren enerjisi, elektrik motorunun jeneratör olarak çalışması sonucunda frenleme anında depolanacağı için elektrik motorunun bulunduğu tahrik aksında oluşturulabilecek frenleme kuvvetinin değeri depo enerjisi için belirleyici olmaktadır. Bu sebeple  $i_F$  oranı elektrik motorunun bulunduğu aksta oluşturulan fren kuvvetinin toplam fren kuvvetine oranı şeklinde ifade edilmektedir.

Yakıt pili ve bataryanın bulunduğu hibrit taşıt konstrüksiyonlarında elektrik motoru, batarya ve yakıt pili çalışma voltajlarının değerlerine bağlı olarak bu elemanlar arasında DC/DC konvertörün kullanılması gerekebilmektedir. Hibrit tahrikin uygulanacağı aracın boyutuna bağlı olarak elektrik motoru kapasitesi, batarya kapasitesi ve taşıt menziline istenilen oranda elektrikli tahrike göre artırılabilmesi için gerekli yakıt pilinin hücre sayısına bağlı olarak DC/DC konvertörün uygulanma alternatifleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 DC/DC konvertör kullanım gereksinimine göre yakıt pilli hibrit taşıt konseptleri

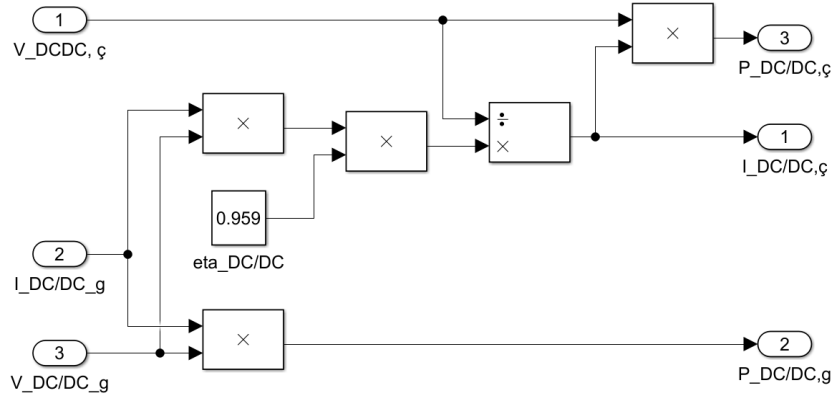
Yapı elemanlarının çalışma voltajlarının eşit olması durumunda herhangi bir DC/DC konvertöre ihtiyaç duyulmazken (Şekil 2.7a) batarya ile elektrik motoru voltajının eşit olması (Şekil 2.7b) veya elektrik motoru ile yakıt pilinin eşit çalışma voltajına sahip olması durumunda (Şekil 2.7c) bir adet DC/DC konvertör gerekmektedir. Bunun yanında her üç elemenda farklı çalışma voltajı bulunuyorsa (Şekil 2.7d) iki adet DC/DC konvertör kullanılmalıdır.

DC/DC konvertörler, buldukları yere göre kendinden önceki elemanın çıkış voltajının, kendinden sonraki elemanın giriş voltajına belirli bir verimde ( $\eta_{DCDC}$ ) dönüşümünü gerçekleştirirler. Kullanılan konvertörün çıkış gücü ( $P_{DCDC,\phi}$ ) ve çıkış akımı değerleri ( $I_{DCDC,\phi}$ ) sırasıyla konvertör giriş değerleri (giriş akımı- $I_{DCDC,g}$  ve giriş voltajı- $U_{DCDC,g}$ ) ile belirli olan çıkış voltajına ( $U_{DCDC,\phi}$ ) göre aşağıda ifade edilmiştir. Elektrik motoru için çıkış voltajı sabit kabul edilmiş, batarya için ise doluluk oranı ve iç direnç durumuna göre hesaplanarak belirlenmiştir.

$$P_{DCDC,\phi} = \eta_{DCDC} \cdot P_{DCDC,g} \quad (2.31)$$

$$I_{DCDC,\phi} = \frac{\eta_{DCDC} \cdot I_{DCDC,g} \cdot U_{DCDC,g}}{U_{DCDC,\phi}} \quad (2.32)$$

Oluşturulan hibrit taşıt modelinde kullanılan DC/DC konvertör için elektronik detaylara girilmeden sadece konvertör verimi ile voltaj dönüşümü için çıkış gücü ve akımı için Simulink modeli Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Belirli giriş-çıkış voltajları ve giriş akımı için DC/DC konvertör Simulink modeli

## BÖLÜM ÜÇ

### DOĞRUDAN METANOLLÜ YAKIT PİLİ HÜCRE VE YIĞIN PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Teorik olarak elektrokimyasal reaksiyon denklemleri ile bir DMYP için akım yoğunluğuna göre hesaplanan hücre voltajı ve gücü, bazı koşullarda gerçeğe yakın sonuçlar vermesine rağmen, yakıt pilinin çalışma kabiliyeti ve kullanım koşulları ancak yakıt pili sistemi, hücre veya yığın bazında deneysel olarak incelendiğinde elde edilebilmektedir (Hacquard, 2005). Örneğin, teorik olarak yakıt pilinin ürettiği voltajın belirlenmesi için anot ve katottan yeterli beslemenin yapıldığının kabul edilmesiyle anot ve katot debilerinin miktarının değişiminin, yakıt pili performansına etkisi belirlenmemektedir. DMYP'nin deneysel olarak incelenmesi ile birlikte sabit anot akış debisi için (AAD), çeşitli akım yoğunluklarına ( $i$ ) göre elde edilen hücre voltaj değerine, katot akış debisinin (KAD), metanol konsantrasyonunun ( $C_{MeOH}$ ) ve metanol geçiş yoğunluklarının ( $i_x$ ) etkisi dahil edilmektedir. Ayrıca, yakıt pilinin istenen akım yoğunluğu ve metanol konsantrasyonu değerlerinde çalışması için gerekli minimum KAD değeri deneysel olarak belirlenerek yakıt pilinin çalışma kabiliyeti belirlenir.

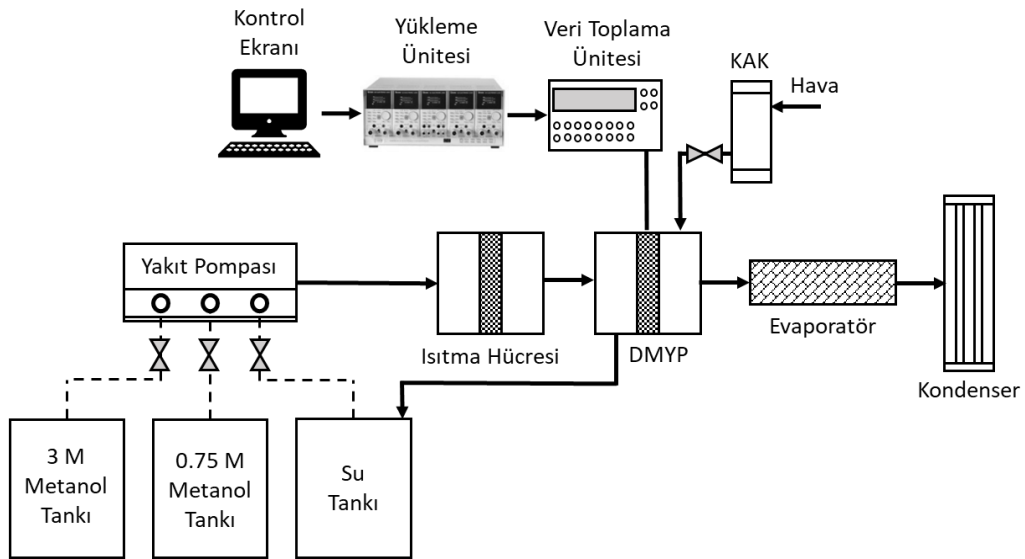
Bu çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalar, Jülich Araştırma Merkezi-Almanya, Enerji ve İklim Araştırmaları Enstitüsü, Elektrokimyasal Proses Mühendisliği Biriminde (Forschungszentrum Jülich-Germany, Institut für Energie und Klimaforschung, Elektrochemische Verfahrenstechnik IEK-3) bulunan DMYP test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, yakıt pili performansı ve işletme parametresindeki değişimin yakıt pili performansına etkisi, deneysel olarak, tek hücre ve beş hücreden oluşan bir kısa yığın için ayrı ayrı belirlenmiştir.

#### 3.1 Tek Hücre İçin DMYP Testi

Tek bir DMYP hücresinin performansının belirlenmesi için tek hücre test istasyonu kullanılmaktadır. Bu test istasyonunda, 4,2x4,2 boyutlarındaki bir DMYP

hücresinin çeşitli akım yoğunluğu değerleri için ( $i$ ), farklı çalışma sıcaklığı ( $T_A$ ), katot akış debisi ( $KAD$ ) ve metanol konsantrasyonlarında ( $C_{MeOH}$ ) çalışması sonucunda hücre voltajı ve metanol geçiş akımı yoğunluğu ( $i_x$ ) değerleri ölçülmektedir. Test istasyonunun şematik görünümü Şekil 3.1’de gösterildiği gibidir.

Test istasyonunda yer alan 3 adet tankta 3 M ve 0,75 M değerinde metanol su karışımı ile saf su bulunmaktadır. Bu tanklardaki sıvılar, valfler vasıtasıyla istenilen metanol konsantrasyonunda ayarlanarak üç kanallı yakıt pompasına iletilmektedir. Yakıt pompası, metanol solüsyonunu bir ısıtma hücreğine göndermektedir. Isınan metanol-su karışımı ise DMYP anot tarafına iletilmektedir. Sistemde, gerekli akımı tüketen ve kontrol eden bir elektronik yükleme ünitesi, hücre değerlerini kaydeden bir veri toplama ünitesi ile tüm deney parametrelerinin ayarlandığı ve anlık olarak izlenebildiği kontrol ekranı DMYP hücreğine bağlıdır. Yakıt pili katot tarafına hava arzu edilen debide katot akış kontrolcüsü (KAK) ile gönderilmektedir. Katot çıkışında ise tüm sıvıları buharlaştırmak için bir ısıtıcı (evaporatör), su buharını ölçen bir nem sensörü, sıvı suyu toplayan bir kondenser ve kondenser üzerinde  $CO_2$  konsantrasyonunu ölçen bir  $CO_2$  sensörü bulunmaktadır. Katot çıkış gazları içerisindeki su ve  $CO_2$ 'nin ayrımı kondenser içerisinde gerçekleşmektedir. Metanol geçiş akımı yoğunluğu, ölçülen  $CO_2$  konsantrasyonuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Burada, anottan katoda geçen tüm metanolün katotta oksidize olarak  $CO_2$  oluşturduğu kabul edilmektedir.



Şekil 3.1 DMYP hücre test istasyonu

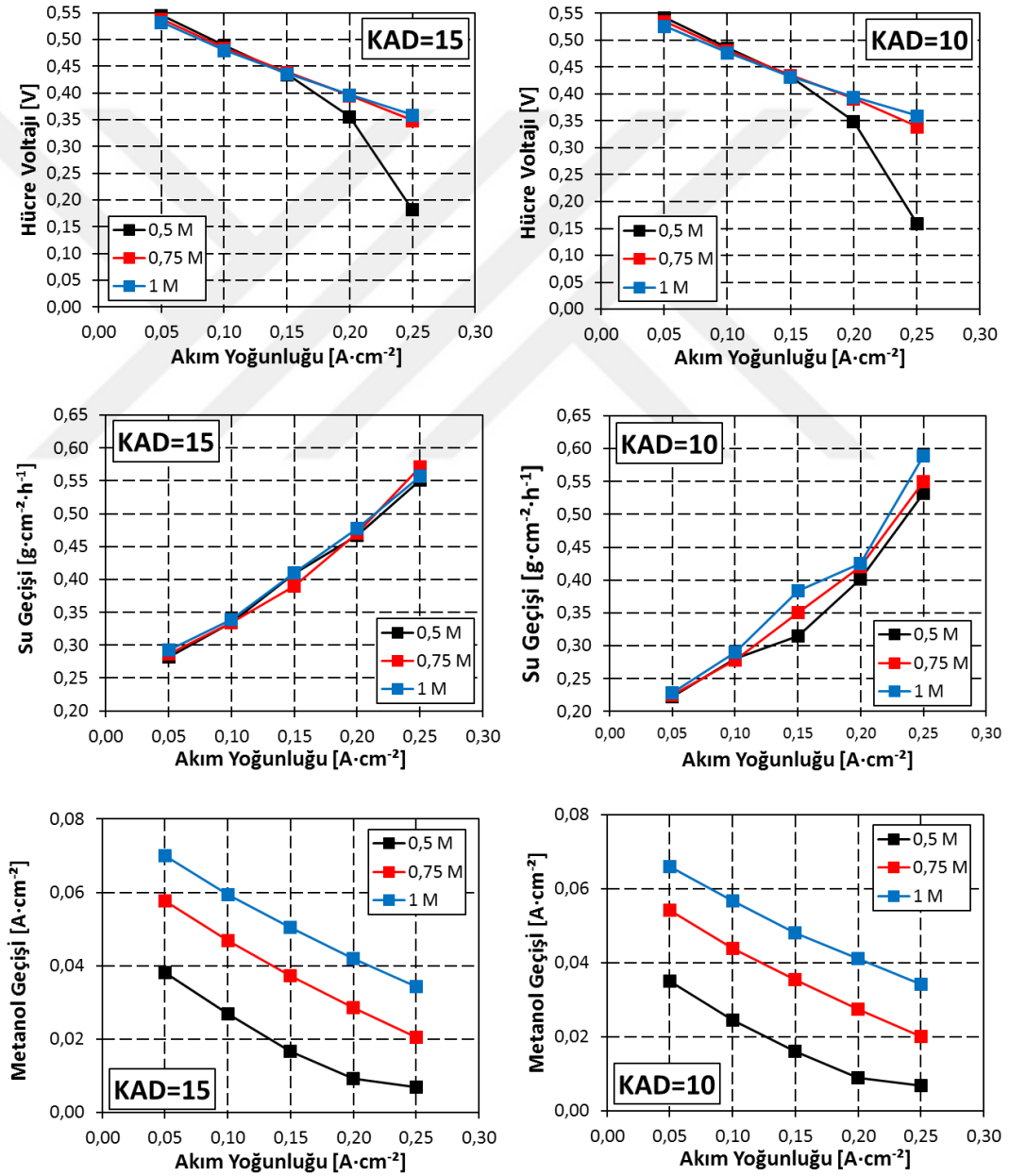
DMYP hücresi için minimum  $0,05 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  akım yoğunluğu ( $i$ ) değerinden itibaren  $0,05 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  arttırılarak maksimum  $0,25 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  değerine kadar ölçümler yapılmıştır. Yapılan deneylerde deney süresi, yakıt pili sıcaklığı ve çalışma basıncı sırasıyla 1 saat,  $70^\circ\text{C}$  ve 1 atm olarak ayarlanmıştır. Metanol-su karışımı 0,5 M, 0,75 M ve 1 M konsantrasyon ( $C_{\text{MeOH}}$ ) değerlerinde anot akış debisi (AAD)  $0,2 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  olacak şekilde (dk birimi dakikayı ifade etmektedir) yakıt pili anot tarafına beslenmektedir. Katot tarafında ise kuru hava  $15 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  ve  $10 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  katot akış debisi (KAD) ile yakıt piline gönderilmektedir. DMYP tek hücresinin farklı çalışma koşulları altındaki performansının deneysel olarak belirlenmesi için test düzeneğinde kullanılan giriş parametreleri Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1 KAD değerleri 10 ve 15  $\text{ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  için çeşitli metanol konsantrasyonlarında DMYP hücre test parametreleri

<b>t</b> [s]	<b>i</b> [ $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	<b>AAD</b> [ $\text{ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$ ]	<b>KAD</b> [ $\text{ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$ ]	<b><math>C_{\text{MeOH}}</math></b> [ $\text{Mol}\cdot\text{lt}^{-1}$ ]
7100	0,000	0,2	10	1
3600	0,050	0,2	15	0,5
3600	0,050	0,2	10	0,5
3600	0,100	0,2	15	0,5
3600	0,100	0,2	10	0,5
3600	0,150	0,2	15	0,5
3600	0,150	0,2	10	0,5
3600	0,200	0,2	15	0,5
3600	0,200	0,2	10	0,5
3600	0,250	0,2	15	0,5
3600	0,250	0,2	10	0,5
3600	0,050	0,2	15	0,75
3600	0,050	0,2	10	0,75
3600	0,100	0,2	15	0,75
3600	0,100	0,2	10	0,75
3600	0,150	0,2	15	0,75
3600	0,150	0,2	10	0,75
3600	0,200	0,2	15	0,75
3600	0,200	0,2	10	0,75
3600	0,250	0,2	15	0,75
3600	0,250	0,2	10	0,75
3600	0,050	0,2	15	1
3600	0,050	0,2	10	1
3600	0,100	0,2	15	1
3600	0,100	0,2	10	1
3600	0,150	0,2	15	1
3600	0,150	0,2	10	1
3600	0,200	0,2	15	1
3600	0,200	0,2	10	1
3600	0,250	0,2	15	1
3600	0,250	0,2	10	1
7200	0,000	0,2	10	1



Belirlenen giriş parametrelerine göre ölçümlere başlanmadan önce yakıt pili 2 saat boyunca  $70^{\circ}\text{C}$  değerine kadar sistem herhangi bir akım üretmeden, çalışma sıcaklığına ulaşmak için ısıtılmaktadır. Eğer test sırasında yakıt pilinin, herhangi bir akım yoğunluğunda hücre voltajı  $0,1\text{ V}$  değerinden düşük olursa, anot katalistinde oluşacak korozyonu önlemek için test sistemi bir sonraki adıma geçecek şekilde ayarlanmıştır. Testin son kısmında ise 2 saat süresince yakıt pili  $70^{\circ}\text{C}$  değerine kadar soğutulmaktadır. Ayarlanan giriş parametrelerine göre elde edilen test sonuçları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



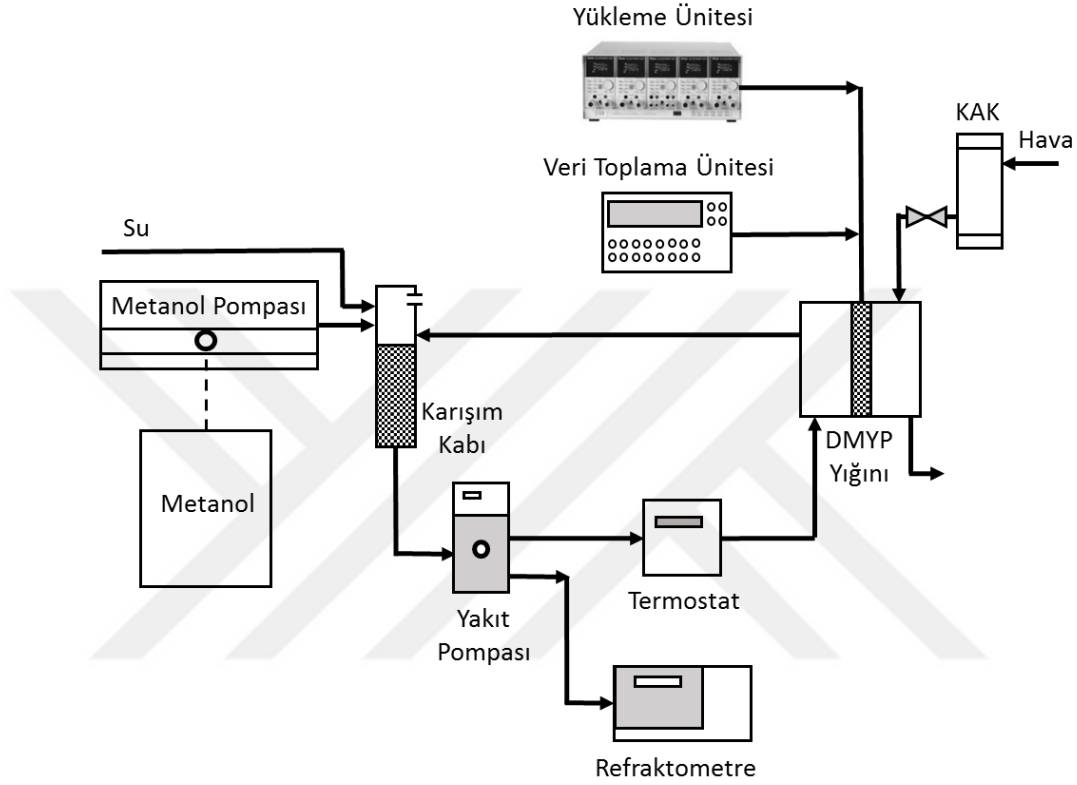
Şekil 3.2 Farklı katot akış debisi (KAD) ve metanol konsantrasyonu için hücre karakteristikleri

Tek bir DMYP hücresi için yapılan deneylerden, farklı çalışma koşullarında yakıt pilinin hücre voltajı, su geçişi ve metanol geçişi değerleri elde edilmiştir. Hücre voltajı, düşük akım yoğunluğu değerlerinde 0,5 M için en yüksek değerde elde edilirken, akım yoğunluğunun artmasıyla önce 0,75 M değerinde (0,15-0,20 A·cm<sup>-2</sup> aralığında) sonra da 1 M değerinde (0,20 A·cm<sup>-2</sup> değerinden sonra) en yüksek hücre voltajına ulaşılmaktadır. KAD değerinin azalması genel olarak hücre voltajını arttırırken bu artış en fazla yüksek akım yoğunluğu değerlerinde meydana gelmektedir (Şekil 3.2a-b). Su geçişi değeri, 15 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> KAD değerinde, düşük akım yoğunluğunda ve 1 M metanol konsantrasyonu için en yüksek değerine ulaşmıştır. Akım yoğunluğu değerinin artışıyla birlikte artan su geçişinde maksimum değer, aynı KAD için ise 0,75 M konsantrasyonda oluşmaktadır. KAD değerinin 15 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> değerinde, 10 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> değerine düşürülmesiyle birlikte genel olarak su geçişi azalmış fakat yalnız 0,25 A·cm<sup>-2</sup> ve 1 M konsantrasyon için artış meydana gelmiştir (Şekil 3.2c-d). Şekil 3.2e-f'ye bakıldığında ise metanol konsantrasyonunun azalması, akım yoğunluğunun artması ve KAD değerinin azalması durumlarında metanol geçişi değerleri azalmaktadır. Buna göre en yüksek metanol geçişi 0,07 A·cm<sup>-2</sup> değeri ile, 1 M metanol konsantrasyonu, 0,05 A·cm<sup>-2</sup> akım yoğunluğu ve 15 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> KAD giriş değerleri için elde edilmektedir. Sonuçlara genel olarak bakıldığında, akım yoğunluğunun artmasına göre hücre voltajının ve metanol geçişinin azaldığı, su geçişinin ise arttığı görülmektedir. Dolayısıyla yüksek hücre voltajı ile düşük su ve metanol geçişinin DMYP hücresinde elde edilebilmesi için çalışma parametrelerinin uygun seçilmesinin büyük önem arz ettiği söylenebilmektedir.

### 3.2 Beş Hücreli DMYP Yığın Testi

Johnson Matthey membran elektrot bileşimi (MEB) kullanılan 315 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip beş DMYP hücresinin seri bağlanması ile oluşturulan kısa yığına (short stack) ait deneysel ölçümler Şekil 3.3'de detayı verilen yığın test istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde, debisi metanol pompası tarafından kontrol edilen saf metanol ve saf su ayrı ayrı bir karışım kabına gönderilerek karışım kabında metanol-su karışımı elde edilmektedir. Elde edilen metanol solüsyonu, bir yakıt pompası vasıtasıyla yakıt pili yığınının anot tarafına gönderilerek, katottan beslenen

hava ile tepkimeye sokulmaktadır. Deney düzeneğinde çeşitli akım yoğunluğu değerleri ( $i$ ) için metanol geçiş yoğunluğu ( $i_x$ ) ve katot akış debisi (KAD) giriş parametresi olarak ayarlanabilmektedir. Belirlenen giriş parametrelerine göre deney sonucunda yakıt pili çalışma sıcaklığı ve metanol konsantrasyonu ( $C_{MeOH}$ ) ölçülmektedir.



Şekil 3.3 DMYP yığın test istasyonu

DMYP yığın test istasyonunda girdi ve ayar parametreleri bir bilgisayar ile kontrol edilip test süresince izlenebilmektedir. Yakıt pili yığnında üretilen elektrik akımı, yükleme ünitesinde tüketilmekte, elde edilen veriler ise her 10 saniyede bir veri toplama ünitesi tarafından kaydedilmektedir. Katot akış kontrolcüsü (KAK), katottan beslenen havanın debisini kontrol ederek farklı KAD değerleri için gerekli debiyi ayarlamaktadır. Yakıt pompasından DMYP yığına gönderilen metanol su karışımı hattından alınan örnek, refraktometreye iletilerek metanol konsantrasyonunun ölçümü yapılmaktadır. Termostat ise karışım kabı ve boru hatlarındaki termal kayıpları kompanse etmesi için metanol solüsyonunu yığın çıkış sıcaklığına kadar

ısıtmaktadır. Ayrıca sıcaklık değerleri, anot girişi, anot çıkışı ve katot çıkışında yer alan termometreler ile ölçülmektedir.

Yapılan deneylerde, farklı akım yoğunluğu ( $i$ ), metanol geçişi akım yoğunluğu ( $i_x$ ) ve katot akış debisi (KAD) değerlerinde DMYP yığını voltajının ölçülmesi amaçlanmaktadır. Deney sırasında metanol geçişi akım yoğunluğu girdisine karşılık refraktometre vasıtasıyla metanol konsantrasyonu ölçülmektedir. Ölçülen metanol konsantrasyonu aynı zamanda  $i$  ve  $i_x$  değerlerine göre anot karışım kabına yeniden doldurulan metanolün değerini ifade etmektedir. Aynı akım yoğunluğu ve KAD için deney başlangıcından birkaç saat sonra denge durumunda sabit metanol konsantrasyonu oluşmakta ve bu değer ölçülmektedir. Test sırasında bu denge durumuna ulaşıncaya kadar  $i_x$  değeri değiştirilerek ayarlama gerçekleştirilir. Örneğin, gerçek  $i_x$  değeri, giriş parametresinde verilen değerden yüksekse DMYP yığını içerisinde tüketilen metanol, metanol pompası ile karışım kabına gönderilen değerden daha fazla anlamına gelmektedir. Bu sebeple metanol konsantrasyonu ve buna bağlı olarak  $i_x$  giriş değeri, gerçek değer ile dengeye ulaşıncaya kadar düşecektir.

Metanol geçişi ve ideal voltaj değerinden (açık devre voltajı) düşüşe sebep olan elektrokimyasal kayıplar (aktivasyon, ohmik, konsantrasyon kayıpları) sonucunda DMYP yığnında açığa çıkan ısı ile sıcaklık yükselmektedir. Katottaki suyun yoğunlaşması ile ise yığnın soğuması sonucunda giriş ve çıkış sıcaklıkları dengeye ulaşmaktadır. Sıcaklığın kontrolü bir termostat vasıtasıyla yapılmaktadır. Metanol-su solüsyonunun, ayarlanan sıcaklık değerinde DMYP yığnına gönderilip aynı sıcaklıkta yığndan çıkışı gerçekleşmektedir. Böylece karışım kabı ve borularda meydana gelen termal kayıplar kompanse edilmektedir. Her ne kadar yalıtım ile yığnda meydana gelen termal kayıplar azaltılmışsa da düşük miktarda termal kayıplar meydana gelmektedir.

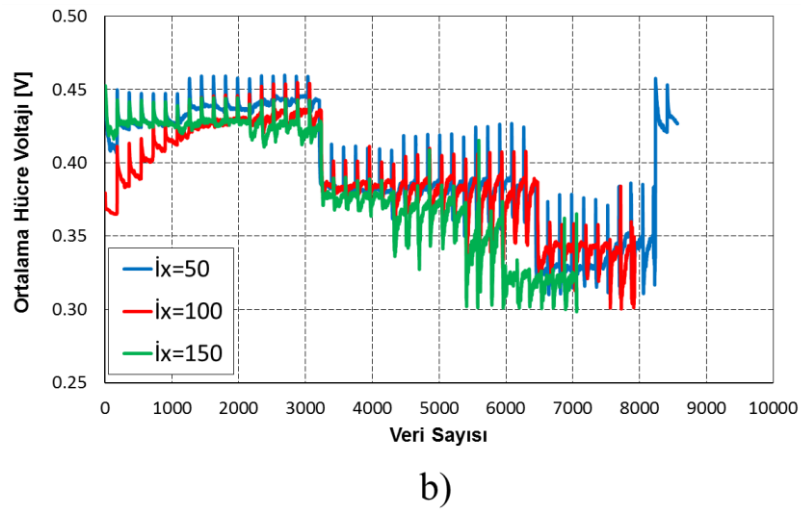
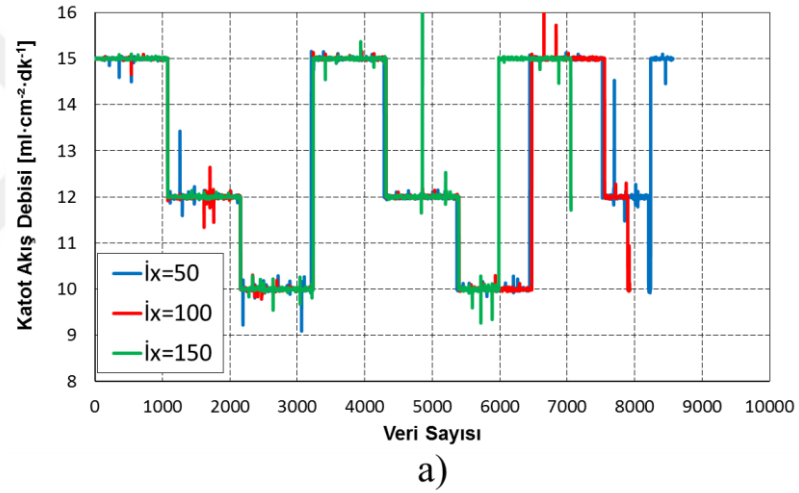
Sabit anot akış debisi (AAD) ve farklı çalışma koşulları altında DMYP yığını performansının ölçülmesi için belirlenen giriş parametreleri deney süresine göre Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 KAD değerleri 10, 12, 15, 20, 25 ve 30 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> için DMYP yığıcı test parametreleri

Amaç	Tekrar Sayısı	t [s]	i [A·cm <sup>-2</sup> ]	AAD [ml·cm <sup>-2</sup> ·dk <sup>-1</sup> ]	KAD [ml·cm <sup>-2</sup> ·dk <sup>-1</sup> ]	i <sub>x</sub> [A·cm <sup>-2</sup> ]
Isıtma	1	3600	0	0,22	10	0,075
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,1	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,05
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,05
		15	0	0,3	0	0,05
		10	0	0,3	35	0,05
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,15	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,05
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,05
		15	0	0,3	0	0,05
		10	0	0,3	35	0,05
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,2	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,05
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,05
		15	0	0,3	0	0,05
		10	0	0,3	35	0,05
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,1	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,1
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,1
		15	0	0,3	0	0,1
		10	0	0,3	35	0,1
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,15	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,1
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,1
		15	0	0,3	0	0,1
		10	0	0,3	35	0,1
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,2	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,1
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,1
		15	0	0,3	0	0,1
		10	0	0,3	35	0,1
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,1	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,15
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,15
		15	0	0,3	0	0,15
		10	0	0,3	35	0,15
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,15	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,15
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,15
		15	0	0,3	0	0,15
		10	0	0,3	35	0,15
İstenilen KAD girdisi (KAD <sub>i</sub> ) için yığın testi	6	1800	0,2	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,15
		3	0	0,3	KAD <sub>i</sub>	0,15
		15	0	0,3	0	0,15
		10	0	0,3	35	0,15
Soğutma	1	7200	0	0,22	10	0,075

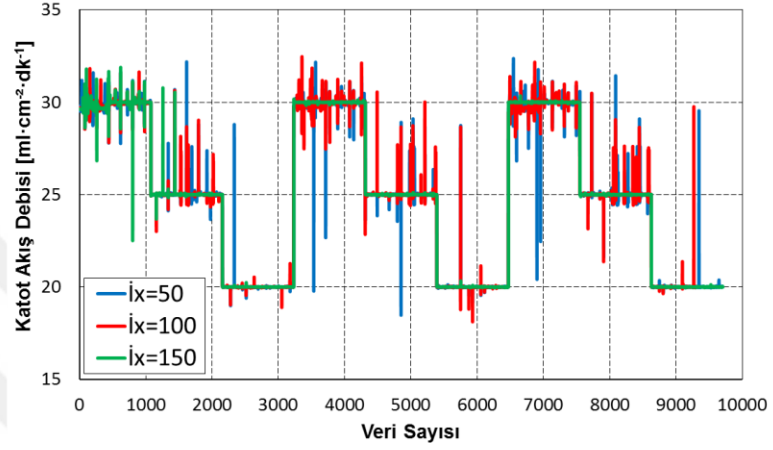
Deney başlangıcında yer alan 1 saatlik bir ısıtma evresi ile yakıt pilinden herhangi bir akım alınmadan, 0,22 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> AAD ve 10 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> KAD değerinde DMYP 70°C'ye kadar ısıtılmaktadır. KAD değerinin 10, 12, 15, 20, 25 ve 30 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> değerleri için her bir değer tek tek 3 farklı akım yoğunluğu (i) ve 3 farklı metanol geçişi akım yoğunluğu (i<sub>x</sub>) değerleriyle birlikte giriş parametrelerini oluşturduğu kapsamlı bir ölçüm varyasyonu oluşturulmuştur. İncelenen i değerleri 0,1, 0,15 ve 0,2 A·cm<sup>-2</sup> ve i<sub>x</sub> değerleri 0,05, 0,1 ve 0,15 A·cm<sup>-2</sup> olarak belirlenmiştir. Her bir varyasyon 6 kere tekrar edilerek denge durumundaki DMYP yığıcı çalışma

parametreleri belirlenmiştir. Her bir deney sırasıyla, belirlenen giriş parametrelerinde yarım saatlik ölçüm, 0 akım yoğunluğunda 3 saniye çalışma, 0 akım yoğunluğu ve 0 KAD ile 15 saniye çalışma ve 0 akım yoğunluğu ve  $35 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  KAD değerinde 10 saniye çalışmayı kapsamaktadır. Tüm test parametrelerine ait deneylerin yapılmasının ardından, 2 saatlik bir soğuma prosesinde  $0 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  akım yoğunluğu,  $10 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  KAD ve  $0,075 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$   $i_x$  değerleri kullanılarak testler tamamlanmıştır. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de sırasıyla  $10, 12, 15 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  KAD ve  $20, 25, 30 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  KAD değerleri için 3 farklı  $i_x$  değerinde ( $0,05, 0,1, 0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) test süresince KAD değerinin anlık değişimi (Şekil 3.4a ve Şekil 3.5a) ile DMYP yığını ortalama hücre voltajı (Şekil 3.4b ve Şekil 3.5b) gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar, 3 farklı KAD değeri için art arda  $0,1, 0,15$  ve  $0,2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  akım yoğunluğu talebinde gerçekleşen değerleri ifade etmektedir.

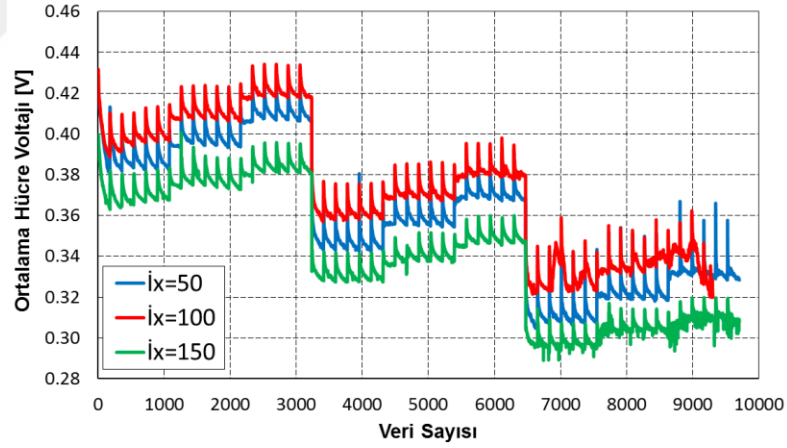


Şekil 3.4 Çeşitli  $i_x$  girdileri için farklı katot akış debilerine ( $15, 12, 10 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$ ) göre ortalama hücre voltajının veri sayısına göre değişimi ( $i_x$  değerleri için birim  $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  olarak verilmiştir)

Elde edilen sonuçlara bakıldığında en yüksek ortalama hücre voltajının,  $i_x$  değerinin en düşük olduğu zamanlarda oluştuğu görülmektedir. Aynı  $i_x$  değerleri için KAD değerlerinin azalmasıyla ortalama hücre voltajı değerlerinde artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu voltaj artışı, düşük KAD değerleri için az miktarda olmasına rağmen, yüksek KAD değerlerinde (Şekil 3.5) daha belirgin olmaktadır.



a)



b)

Şekil 3.5 Çeşitli  $i_x$  girdileri için farklı katot akış debilerine ( $30, 25, 20 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$ ) göre ortalama hücre voltajının veri sayısına göre değişimi ( $i_x$  değerleri için birim  $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  olarak verilmiştir)

DMYP yığnında istenen akım yoğunluğu değerini elde etmek için oluşturulan sistemde, metanol geçiş akımı yoğunluğuna ve uygulanan KAD değerine göre yakıt pilinin talep edilen akım yoğunluğunu karşılaması veya istenen akım değerini üretememesi söz konusudur. Şekil 3.6'da teste tabi tutulan yakıt pili yığnının hangi

parametrelere göre başarılı veya başarısız olduğu gösterilmektedir. Buna göre tüm  $i_x$  değerlerinde,  $0,2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  akım yoğunluğu için KAD değerinin 10 veya  $12 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  seçilmesi halinde yakıt pilinin çalışması başarısız olmaktadır. Buna ilaveten,  $i_x$  değerlerinin  $0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  olması halinde,  $0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  akım yoğunluğu için KAD değeri  $10 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  olarak uygulandığında da yakıt pili voltaj çıkışı oluşmamaktadır.

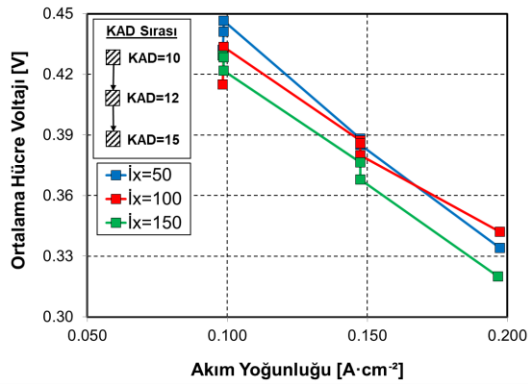
	$i_x=0.05 \text{ [A}\cdot\text{cm}^{-2}]$						$i_x=0.1 \text{ [A}\cdot\text{cm}^{-2}]$						$i_x=0.15 \text{ [A}\cdot\text{cm}^{-2}]$					
	KAD [ $\text{ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$ ]						KAD [ $\text{ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$ ]						KAD [ $\text{ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$ ]					
Akım Yoğunluğu	10	12	15	20	25	30	10	12	15	20	25	30	10	12	15	20	25	30
$i=0.1 \text{ [A}\cdot\text{cm}^{-2}]$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$i=0.15 \text{ [A}\cdot\text{cm}^{-2}]$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
$i=0.2 \text{ [A}\cdot\text{cm}^{-2}]$	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓

Şekil 3.6 Çeşitli KAD,  $i$  ve  $i_x$  girdileri için DMYP yığını çalışma performansı

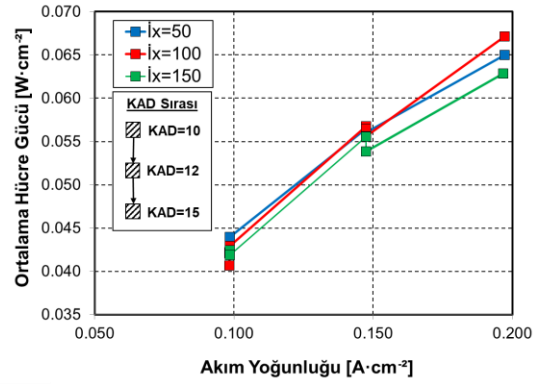
Test süresince her 10 saniyede bir alınan verilere göre oluşturulan DMYP yığını ortalama hücre voltajı değerinin denge durumundaki akım yoğunluğuna bağlı olarak ifade edilmiş hali Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Test sırasında yakıt pili çalışmasının başarılı olduğu bölgeler için uygulanan  $i_x$  değerlerine göre ortalama hücre voltajı ile birim alan başına ortalama yakıt pili güç çıkışı sırasıyla 15, 12 ve  $10 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  KAD değerleri için Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b'de, 30, 25 ve  $20 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  KAD değerleri için ise Şekil 3.7c ve Şekil 3.7d'de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere KAD değerinin düşük seçilmesi sonucunda yüksek KAD değerlerine oranla ortalama hücre voltajında artış meydana gelmektedir. Fakat düşük KAD uygulanması ile metanol geçişinin yoğunluğunun yüksek olması halinde yakıt pili akım üretmekte başarısız olmaktadır. Yakıt pilinden çekilen akımın artması ile de ortalama hücre voltajı düşmektedir. Voltaj karakteristiğinden farklı olarak birim alana göre ortalama yakıt pili gücü ise (güç yoğunluğu) akım yoğunluğunun artışı ile artmaktadır.

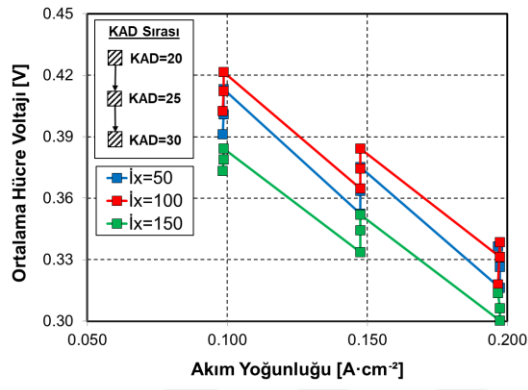




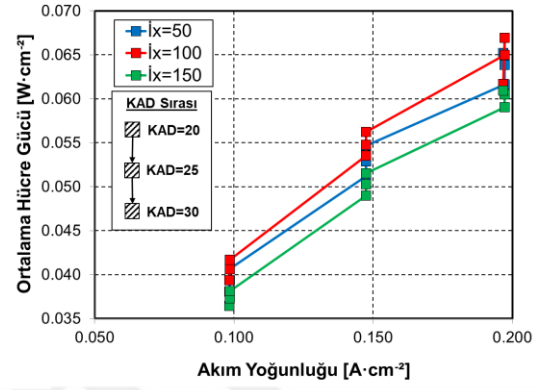
a)



b)



c)



d)

Şekil 3.7 Farklı  $i_x$  değerleri ve katot akış debilerinde (10, 12, 15, 20, 25, 30 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup>) DMYP yığımında elde edilen ortalama hücre voltajı ve gücü ( $i_x$  değerleri için birim mA·cm<sup>-2</sup> alınmıştır)

## **BÖLÜM DÖRT**

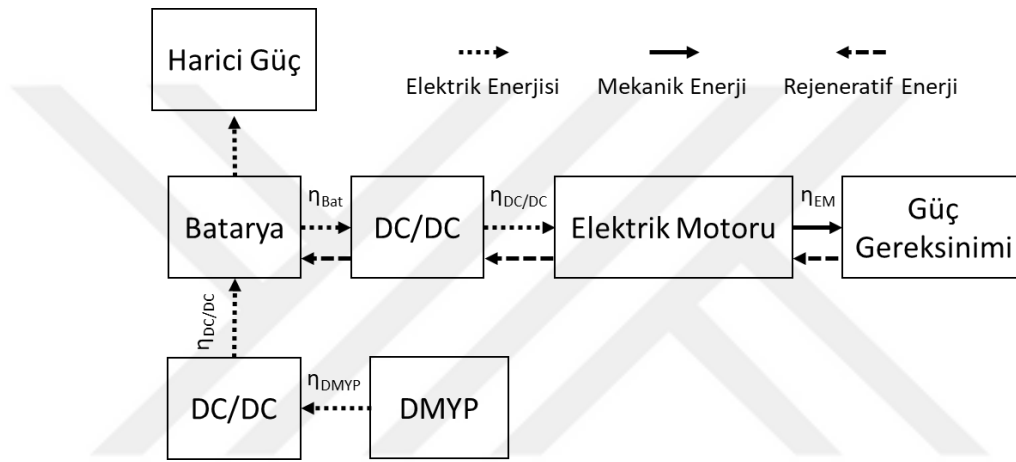
### **HİBRİT TAŞIT SİMÜLASYON MODELİ VE DENEY VERİLERİNİN MODELE ENTEGRASYONU**

İçten yanmalı motorların (İYM) kullanıldığı (otto veya dizel çevrimine göre çalışan) konvansiyonel taşıtlar, yüksek enerji yoğunluğuna sahip petrol türevli yakıtlar ile uzun sürüş menziline sahip olmalarına karşın, yakıt ekonomisi ve çevre kirliliği açısından oldukça kötü performansa sahiptir. Bu sebeple, İYM ve petrol türevli yakıtların yerine elektrik motoru (EM) ve çeşitli enerji depolayıcıları kullanılarak konstrükte edilen hibrit taşıtlar sayesinde tahrik verimi yükseltilerek, yakıt (enerji) ekonomisi ve çevre kirliliğinde iyileşmeler sağlanmıştır (Kuralay, 2013).

Hibrit taşıtlarda, güç ve moment kaynağı olarak hem İYM hem de EM bulunması durumunda, araç tahriki temel olarak seri ve paralel hibrit olarak ikiye ayrılmaktadır. Seri hibrit tipinde İYM ile araç tahriki arasında herhangi bir mekanik bağ bulunmazken, EM araç hareketini sağlamaktadır. İYM ise çalışması halinde kendisine bağlı bir jeneratör üzerinden bataryayı şarj etmektedir. Bu yapı tarzında, İYM ile EM arasında herhangi bir mekanik bağ olmadığından, İYM en verimli olduğu çalışma aralığında çalıştırılabilir ve İYM'un araç içinde konumlandırılması esnekler. Bunun yanında seri hibritte, enerji dönüşümleri göreceli olarak daha fazla ve bulunması gerekli olan jeneratör sebebiyle ek ağırlık ve maliyet yüksek olmaktadır. Paralel hibrit tipinde ise hem İYM hem de EM araç tahrikinde görev alabilmektedir. Bu sayede daha düşük kapasiteli bir İYM kullanımı paralel hibritte mümkün olabilmektedir. Buna karşın, İYM ve EM tahrikinin birleştirilmesi için bir moment toplama kutusuna ihtiyaç olması ve daha karmaşık enerji yönetim sistemine gereksinim duyulması paralel hibritte maliyeti arttıran etmenlerdir (Ehsani ve diğer., 2010).

Hibrit tahrikte İYM ve EM'nun birlikte kullanılmasıyla ortaya çıkan bu kesin ve keskin ayırım, tahrik elemanı olarak sadece EM kullanılması durumunda ortadan kalkmaktadır. Bu durumda, alternatifsiz olarak taşıt EM tarafından hareket

ettirilmekte, hibritleşme ise bataryaya ilave olarak farklı enerji depolayıcılarının kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Her ne kadar ikincil enerji kaynağının sisteme bağlantı şekline bağlı olarak (sadece birincil enerji kaynağına bağlanabilmesi veya hem birincil enerji kaynağına hem de elektrik motoruna bağlanabilmesi durumları) seri ve paralel hibrit şeklinde farklılık gösterse de enerji dönüşüm verimi ve konstrüktif açıdan aralarında ciddi farklar bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen ve DMYP ile bataryanın enerji (akım) kaynağı olarak birlikte yer aldığı, yakıt pilli hibrit elektrikli araca ait tahrik sistemi yapı elemanları ve enerji akışı seri hibrit tipi için Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 DMYP kullanılan hibrit elektrikli taşıt yapı elemanları ve enerji akışı

Şekil 4.1’de verilen tahrik tipinde taşıtın hareketine bağlı olarak oluşan güç gereksinimi EM tarafından karşılanmakta, EM ise gerekli akımı bataryadan temin etmektedir. Gerekli durumlarda DMYP, bataryaya enerji sağlamaktadır. Sistemde yer alan DC/DC konvertörler, DMYP ile batarya ve batarya ile EM arasında voltaj dengelemesi yapmaktadır. Araçta tahrik sistemindeki güçten ayrı olarak ihtiyaç olan harici güçler ise bataryadan çekilen akım vasıtasıyla karşılanmaktadır. Bu güç değerleri ayrıca, yüksek voltajın kullanıldığı yüksek güçlü araçlarda, tahrik bataryasına ilave olarak kullanılan düşük voltajlı batarya grubundan da karşılanabilmektedir.

Taşıtın işletme koşullarına göre yapı elemanlarının çalışma durumundaki karakteristikleri, yakıt pilli hibrit tahrik için aşağıdaki gibi meydana gelmektedir (Zhang ve Mi, 2011).

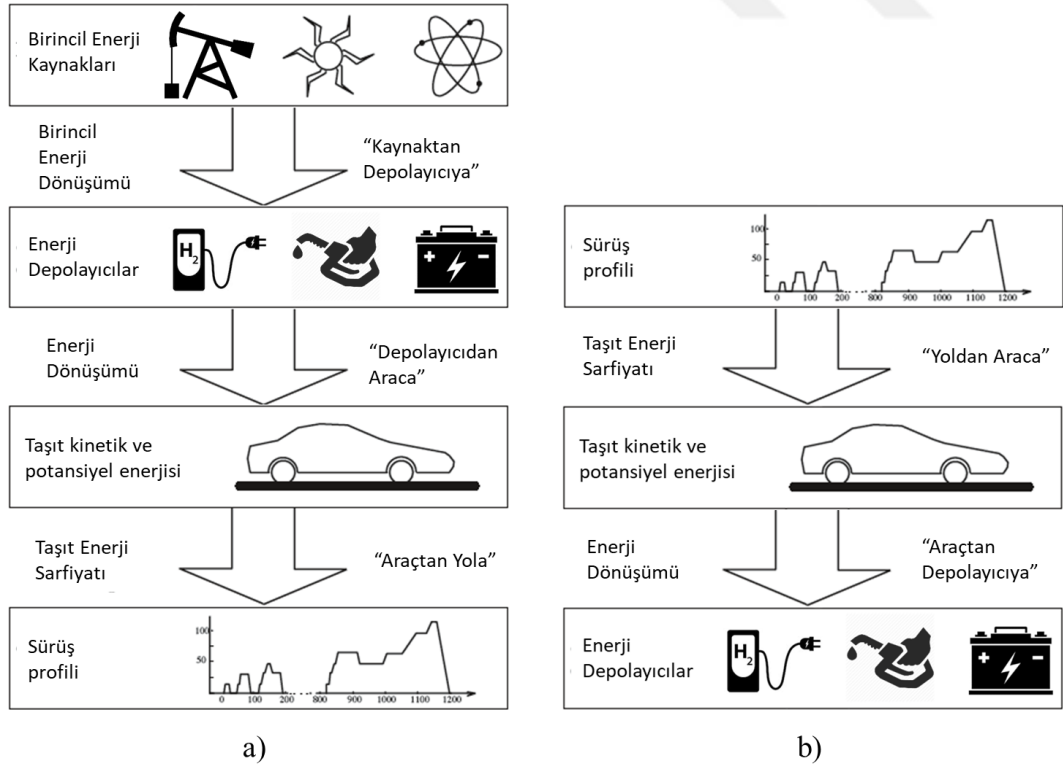
- Yakıt pili tahriki: bataryadan herhangi bir akım çekilmeksizin gerekli tüm güçlerin yakıt pili tarafından karşılanması durumu ifade etmektedir. Bu durumda yakıt pili doğrudan elektrik motorunu beslemektedir.
- Batarya tahriki: yakıt pilinin kapalı olduğu, EM beslemesinin sadece batarya tarafından yapıldığı durumu ifade etmektedir.
- Hibrit tahrik: hem yakıt pilinin hem de bataryanın etkin olup elektrik motorundaki gerekli akımı birlikte karşıladıkları durumu ifade etmektedir. Bu durum yüksek gücün gerekli olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır.
- Parçalı tahrik: yakıt pilinin çalışarak ürettiği akımın bir kısmını araç tahriki için elektrik motoruna, kalan kısmını ise şarj olması için bataryaya gönderdiği durumu ifade etmektedir.
- Frenleme: frenleme durumunda geri kazanılabilir fren enerjisinin EM üzerinden bataryaya şarj edilme durumunu ifade etmektedir. Bu durumda EM jeneratör olarak çalışarak kapasitesi dahilinde fren enerjisini akıma dönüştürerek bataryayı besler.

Yukarıda belirtilen çalışma durumları, yeterli miktarda enerji kapasitesi ve çıkış gücünün batarya ve yakıt pilinde bulunması halinde geçerli ifadelerdir. Yakıt pili veya bataryadan herhangi birinin ikincil enerji kaynağı olarak daha düşük kapasiteye sahip olması durumunda yukarıdaki bazı durumların tercihi ihtimal dışı olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında seri hibrit tipine uygun bir şekilde oluşturulan, DMYP ve bataryanın bulunduğu hibrit tahrik sisteminin simülasyonu incelenmiştir. Burada kullanılan DMYP, bataryaya göre daha düşük akım çıkış kapasitesine sahip ikincil enerji kaynağı olarak ele alınmaktadır. Sistemde gerekli tahrik gücü ise sadece EM tarafından karşılanmaktadır.

#### 4.1 Hibrit Taşıt Tahriki için Simülasyon Modeli

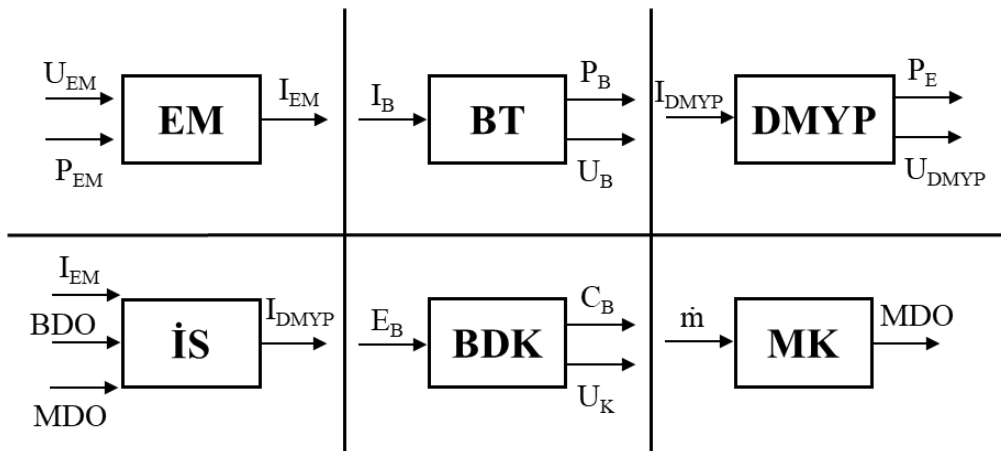
Bir taşıtın hareketi için gerekli olan enerjinin akışı genel olarak incelendiğinde, hareket enerjisinin birincil enerji kaynağından (petrol, güneş, nükleer vs.) sürüş profili için gereken enerji sarfiyatına kadar olan dönüşümü matematiksel olarak ifade edilebilmektedir. Gerçek kullanım durumunda birincil enerji kaynağından yakıt deposu ve batarya gibi enerji depolayıcılarına aktarılan enerji (kaynaktan depolayıcıya), buradan aracın İYM ve EM gibi bir tahrik makinasına gönderilir (depolayıcıdan araca). Sürücünün inisiyatifine bağlı olarak araç motorundan alınan tahrik sonucunda ise taşıt, arzu edilen hızda hareketini gerçekleştirmektedir (araçtan yola). Gerçekte yaşanan bu olaylar hareket modelinin simüle edilmesi istenildiğinde, sürüş profilinden enerji depolayıcılara kadar meydana gelen enerji dönüşümlerinin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu vesile ile model tabanlı sayısal metotlar sistem yapısının analizi, kontrolü ve optimizasyonu için kullanılmaktadır (Szumanowski, 2013). Şekil 4.2’de taşıt tahrikinde meydana gelen enerji dönüşümleri gerçek durum ve simülasyon yaklaşımı için şematize edilmiştir.



Şekil 4.2 Taşıt tahrikinde temel enerji dönüşümleri: gerçek (a), simülasyon yaklaşımı (b) (Guzzella ve Sciarretta, (2005)’den düzenlenmiştir).

Taşıtın bilinen hız profilinden yola çıkılarak EM ve enerji depolayıcılar üzerindeki güç-enerji gereksiniminin belirlenmesine dayalı simülasyon metodu, yarı statik yaklaşım olarak adlandırılmaktadır (Guzzella ve Sciarretta, 2005). Bu prensibe dayalı olarak yapılan simülasyonlarda ana girdi parametresini taşıtın hız profili teşkil etmektedir. Hız profilleri, taşıt simülasyonlarında girdi parametresi veya şasi dinamometresi üzerinden gerçek taşıt hızı olarak uygulanan standart veya özel sürüş çevrimlerini kapsamaktadır. Bu test çevrimleri, konvansiyonel veya hibrit taşıtlarda egzoz emisyonu ölçümü, yakıt sarfiyatı ve taşıt menzilin deneyssel veya nümerik olarak belirlenmesi amacıyla tercih edilmektedir (Jager ve diğer., 2013). Bu amaçla belirli yükteki ve hız karakteristiklerindeki araçlar için uluslararası regülasyonlar tarafından kabul görmüş standart test çevrimleri (USA: Federal Test Prosedürü – FTP, Avrupa: Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi – NEDC vs.) ile özel amaçlı test çevrimleri (İstanbul Test Çevrimi vb.) kullanılmaktadır (Zhang ve Mi, 2011).

Zamana göre hız girdisi belli olan bir aracın, aynı zaman dilimi içerisinde elektrik motorunda gerekli olan devir, moment ve güç değerleri önceki bölümlerde açıklanan taşıt modeli denklemlerine göre (denklem 2.1-2.7) hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalardan elde edilen EM güç gereksinimi ( $P_{EM}$ ) ile EM çalışma voltajı ( $U_{EM}$ ) tahrik makinasının giriş parametrelerini oluşturmaktadır. Şekil 4.3'te hibrit tahrik simülasyonunda yer alan temel yapı elemanları (EM: Elektrik Motoru, BT: Batarya, DMYP: Doğrudan Metanollü Yakıt Pili) ile kontrol bloklarının (İS: İşletme Stratejisi, BDK: Batarya Doluluk Kontrolü, MK: Metanol Kontrolü) parametreleri verilmiştir.



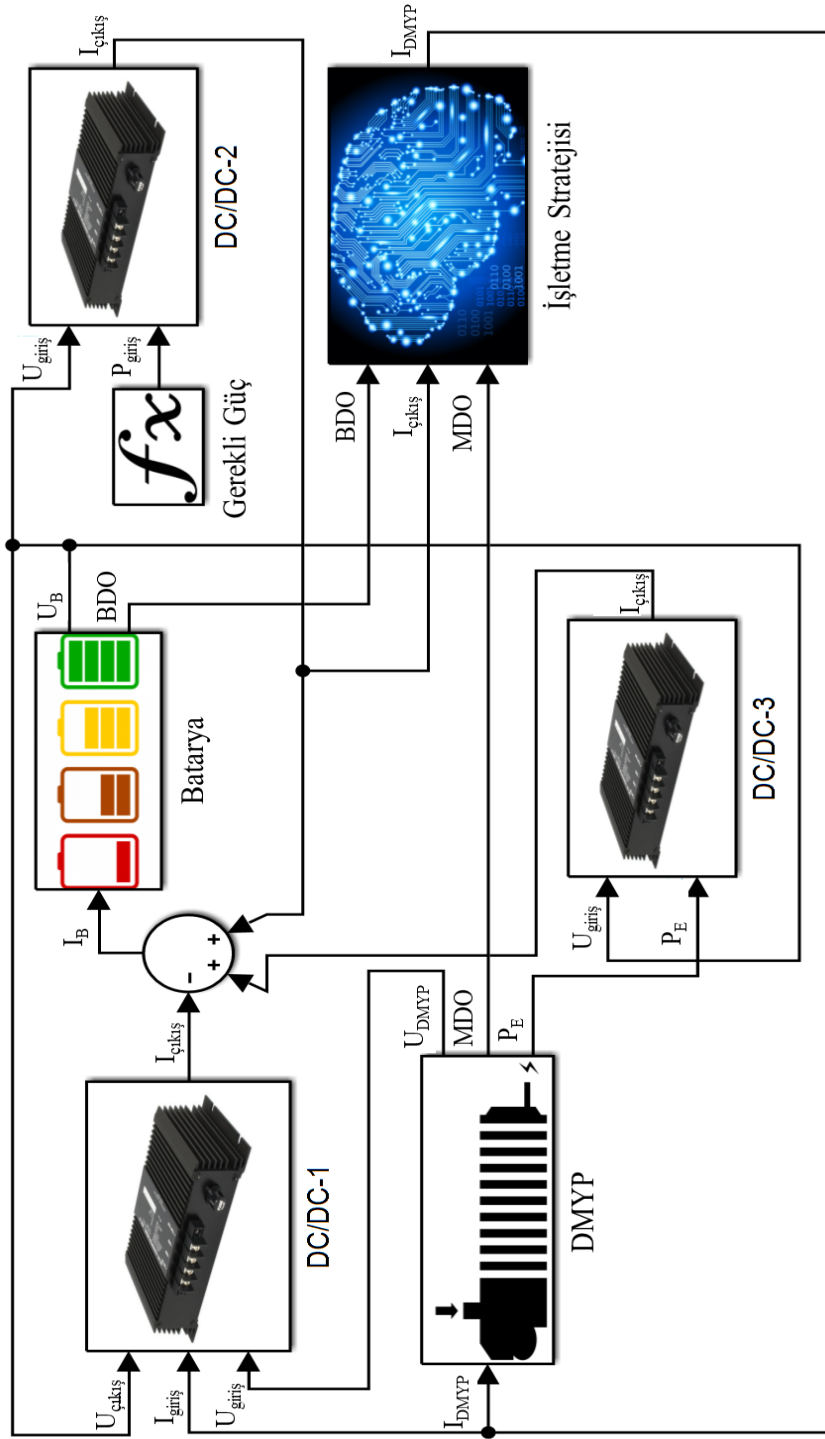
Şekil 4.3 Sistem simülasyonunda kullanılan temel blok ve kontrollerin giriş-çıkış parametreleri

Taşıtın hız profiline göre belirlenmiş olan  $P_{EM}$  ile çalışma voltajına göre EM çıkış akımı ( $I_{EM}$ ) hesaplanmaktadır. EM çıkış akımının, batarya doluluk oranı (BDO) ve metanol doluluk oranı (MDO) ile birlikte aracın işletme stratejisine göre değerlendirilmesi sonucunda DMYP üzerinden alınacak akımın değeri ( $I_{DMYP}$ ) belirlenmektedir. Sistemde iki adet enerji kaynağı bulunması sebebiyle, belirlenen  $I_{DMYP}$  değeri ile aynı zamanda batarya akımının ( $I_B$ ) değeri de ortaya çıkmaktadır. Giriş akımlarına göre bataryada çıkış voltajı ( $U_B$ ) ve gücü ( $P_B$ ), DMYP’de ise çıkış voltajı ( $U_{DMYP}$ ) değerleri hesaplanmaktadır. Batarya doluluk oranının kontrolü (BDK) anlık olarak bataryadan çekilen enerji miktarına göre belirlenmekte, bunun sonucunda ise batarya kapasitesi ( $C_B$ ) ile bataryadaki voltaj kayıpları ( $U_K$ ) değişmektedir. Araç üzerinde bulunan metanol tankının içerisinde kalan metanolün doluluk yüzdesi (MDO) ve bunun kontrolü (MK) ise anlık olarak tüketilen metanol miktarına ( $m$ ) bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Giriş ve çıkış parametreleri belirlenen hibrit tahrik sistemi elemanları (batarya, DMYP, DC/DC konvertör) ile işletme stratejisine ait matematiksel modeller ve bu modeller arasındaki bağı tanımlanması neticesinde elde edilen simülasyon modeli Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

Oluşturulan simülasyon modeli Matlab®/Simulink® ortamında geliştirilmiştir. Bir Matlab eklentisi olan Simulink, blok diyagramlarına dayalı, kolay ve etkili matematiksel modellemeye imkan tanıması ve hızlı simülasyon çözümü sunması sebebiyle taşıt sistemlerinin analizinde sıkça tercih edilmektedir (Gou ve diğer., 2010).

Geliştirilen simülasyon modelinde, araç hızına bağlı olarak taşıt modelinde yer alan denklemlerle hesaplanan elektrik motorundaki güç değeri, zamanın fonksiyonu olarak “Gerekli Güç” diyagramı ile sistemin giriş parametresini oluşturmaktadır. Simülasyon sisteminde, EM ile batarya arasında, batarya ile DMYP arasında ve DMYP ekipmanlarının (fan, pompa vb.) güç sarfiyatlarının ( $P_E$ ) sebep olduğu akım miktarını hesaplamak amacıyla, model detayları Bölüm 2.4’te verilen üç adet DC/DC konvertör bulunmaktadır.



Şekil 4.4 DMYP kullanılan hibrit elektrikli taşıt simülasyon modeli



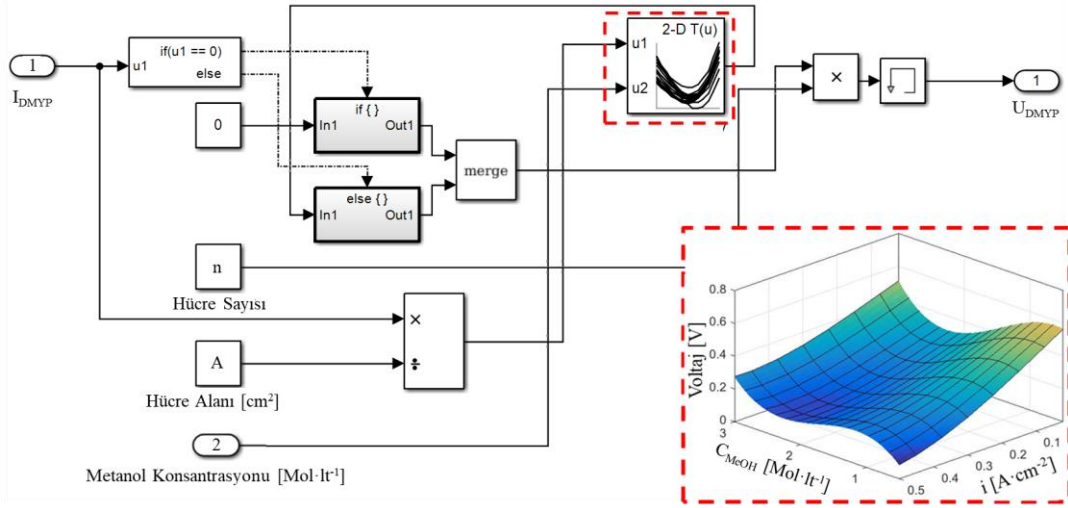
Elektrik motorunda gerekli akım ile DMYP ekipmanları için gerekli akımlar, tahrik sisteminde batarya ve DMYP tarafından karşılanmaktadır. Geliştirilen modelde zamana bağlı olarak bir yapı elemanında hesaplanan sonuç değeri başka bir yapı elemanında girdi değeri olarak kullanıldığından simülasyon bir döngü halinde sonlanana kadar ilerlemektedir. DMYP modeli, teorik ve Yarı-Teorik model olmasına göre Bölüm 2.3'te bahsedildiği gibi veya Bölüm 4.2'de anlatılacağı gibi kurulmaktadır. İşletme stratejisinin bulunduğu bloğun temel amacı yakıt pilinden çekilecek akımı belirlemek olup detayları Bölüm 5'te verilecektir.

## **4.2 Yarı-Teorik ve Genişletilmiş DMYP Modeli**

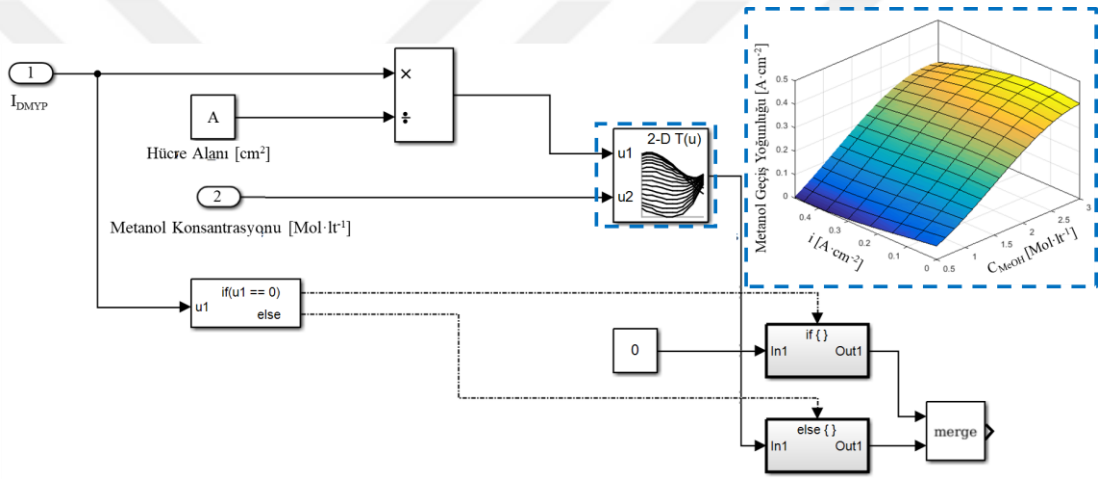
Teorik sonuçlara ilave olarak deneysel yolla belirli bir anot akış debisi değeri için hem sabit katot akış debisi (KAD) ile değişken metanol konsantrasyonunda hem de değişken KAD ve metanol konsantrasyonunda elde edilen voltaj, metanol geçiş yoğunluğu ve su geçişi değerleri çeşitli akım yoğunluğu değerlerine göre DMYP modeli içerisine eklenmiştir. Ayrıca DMYP'nin işletme esnasında metanol tüketimi, CO<sub>2</sub> üretimi, su üretimi ve ekipmanların güç sarfiyatlarının hesaplanması amacıyla kütle denge denklemlerini içeren bir alt model, DMYP modeli içerisine ilave edilerek genişletilmiş DMYP modeli elde edilmiştir.

### ***4.2.1 Sabit Katot Akış Debisi için Deney Sonuçlarının DMYP Modeline Entegrasyonu***

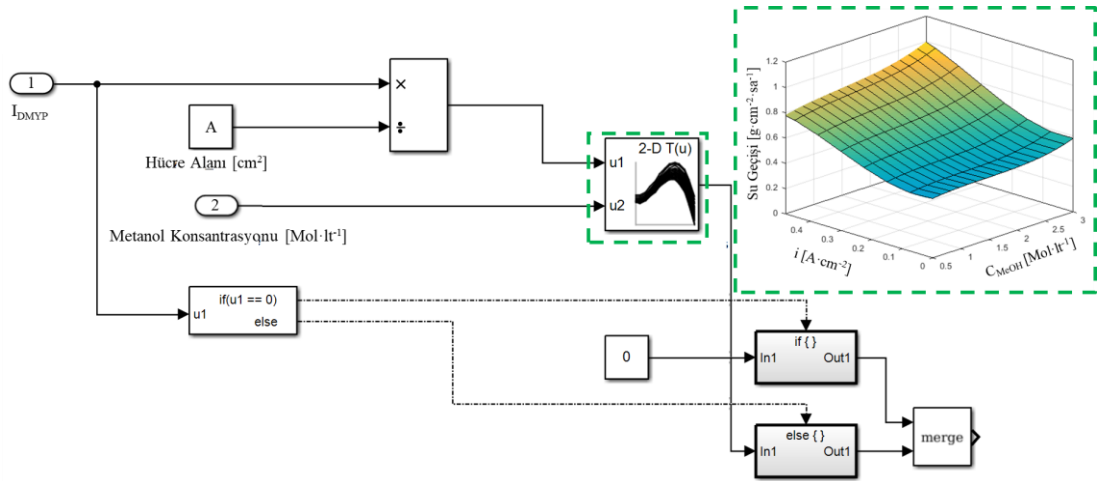
İşletme stratejisi tarafından belirlenen DMYP çalışma akımına göre belirlenen akım yoğunluğu değeri ile istenilen metanol konsantrasyonlarındaki çalışma durumları için tek hücre deneyinin sonuçları, iki değişkenli tablo bloğu ile DMYP modeline eklenmiştir. Tek hücre testinde çalışma sıcaklığının 70°C ve katot akış debisinin 10 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> olması durumunda elde edilen sonuçlar, DMYP'nin sabit KAD değerindeki Yarı-Teorik modeli için kullanılmıştır. Şekil 4.5'te akım girdisine karşılık DMYP voltajı, metanol geçiş yoğunluğu ve su geçişinin deney sonuçlarının modele ilavesi gösterilmektedir. Her alt modelde bulunan iki değişkenli tabloda kullanılan değerler, tüm sonuçlar için modelin sağ alt tarafında bulunan grafik ile gösterilmiştir.



a)



b)



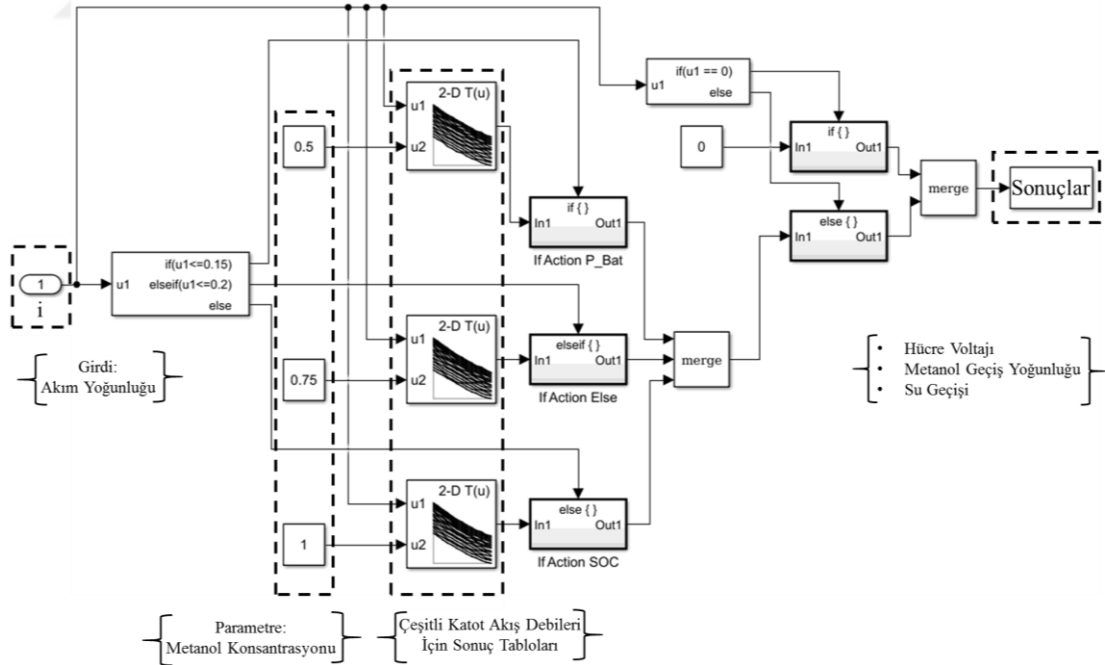
c)

Şekil 4.5 Sabit KAD değeri için deneysel olarak elde edilen hücre voltajı (a), metanol geçiş yoğunluğu (b) ve su geçişi (c) değerlerinin DMYP modeline entegrasyonu

Deney sonuçları için seçilen girdi parametrelerinin dışında bir metanol konsantrasyonu veya akım yoğunluğu değeri için sonuç istenildiğinde, modelde girilen değerler için enterpolasyon veya ekstrapolasyon yapılmaktadır. DMYP'den herhangi bir akım talebi olmaması durumunda sistemin ekstrapolasyon yaparak bir değer bulmaması için DMYP modelinde “eğer” (if) blokları ile sıfır akım talebi için sıfır sonuç değerinin verilmesi sağlanmıştır.

#### 4.2.2 Değişken Katot Akış Debisi için Deney Sonuçlarının DMYP Modeline Entegrasyonu

Tek hücre için yapılan deneysel çalışmalarda girdi parametreleri olarak çeşitli metanol konsantrasyonları ve akım yoğunluğunun yanı sıra farklı katot akış debilerinin hücre performansına etkileri de araştırılmıştır. Şekil 4.5'te tek bir KAD değeri için verilen iki değişkenli tablo bloğu sayısı, her bir sonuç için değişken katot akış debi değeri sayısı kadar arttırılmalıdır. Şekil 4.6'da her üç performans sonucu için geliştirilmiş Simulink alt model diyagramları görülmektedir.



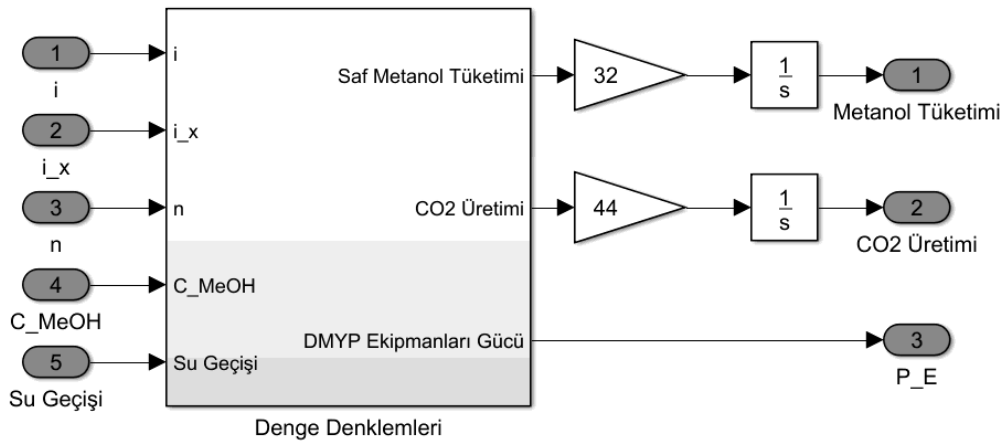
Şekil 4.6 Değişken KAD değerleri için deneysel olarak elde edilen hücre voltajı, metanol geçiş yoğunluğu ve su geçişi değerlerinin DMYP modeline entegrasyonu

Verilen örnekte, kullanılan işletme stratejisine göre akım yoğunluğu girdisine karşılık kullanılması gereken metanol konsantrasyonu sonuç tablolarının girdisi için tarif edilmiştir.

Belirlenen metanol konsantrasyonu ve gerekli akım yoğunluğu değerine göre üç farklı KAD değeri için deney sonuçlarını içeren tablo blokları kullanılmaktadır. Deney sonuçlarının modele entegrasyonu amacıyla hazırlanan Simulink alt modelinin tüm sonuçlar için genelleştirilmiş hali Şekil 4.6’da gösterilmekte olup, aynı model altyapısı, üç sonuç değeri için de sadece tabloların değişmesiyle tekrarlanmaktadır.

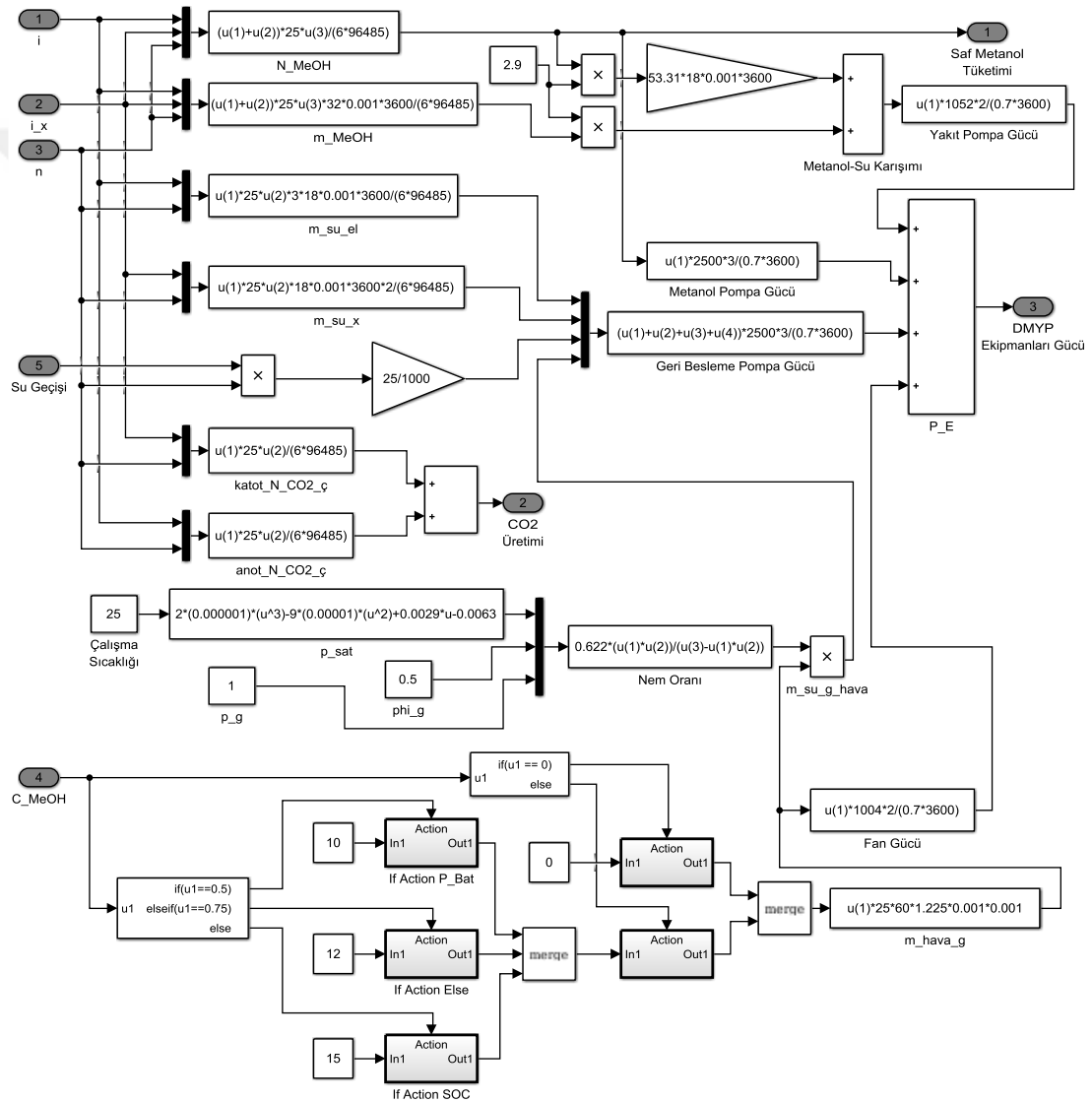
#### 4.2.3 DMYP Modelinde Su ve Metanol Denge Denklemleri

Yakıt pilli hibrit bir taşıtın kullanım koşuluna göre gerekli DMYP akım yoğunluğu ( $i$ ), hücre sayısı ( $n$ ) ve metanol konsantrasyonuna ( $C_{MeOH}$ ) ilaveten tek bir DMYP hücresinin testi ile elde edilen metanol geçiş yoğunluğu ( $i_x$ ) ve su geçişine ait deney sonuçlarının girdi kabul edildiği, DMYP Simulink modeli içerisinde çalışan “Denge Denklemleri” isimli bir alt model oluşturulmuştur. Bahsedilen girdi değerlerine karşılık anlık metanol tüketimi,  $CO_2$  üretimi ve DMYP ekipmanları gücünün ( $P_E$ ) hesaplandığı bu alt modelin parametreleri Şekil 4.7’de şematize edilmiştir.



Şekil 4.7 DMYP denge denklemleri giriş ve çıkış parametreleri

Saf metanol tüketimi ve CO<sub>2</sub> üretimi için sonuçlar “Denge Denklemleri” alt modelinde [mol·s<sup>-1</sup>] bulunmuş, DMYP modeli içerisinde ise integral elemanı ve mol kütlesi çarpanı (saf metanol için 32 g·mol<sup>-1</sup>, CO<sub>2</sub> için 44 g·mol<sup>-1</sup>) kullanılarak [g] birimine çevrilmiştir. DMYP ekipmanları gücü (P<sub>E</sub>) ise [W] olarak hesaplanmaktadır. Denge denklemleri alt modelinde hesaplanan sonuçlara ait denklemler ile parametreler arasındaki ilişkiler için Simulink ortamında geliştirilmiş blok diyagramları Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 DMYP denge denklemleri için Simulink diyagramı

Denge denklemleri ile anlık olarak metanol tüketimi, su ve CO<sub>2</sub> üretim debileri ile DMYP ekipmanlarının harcadığı güç değerleri belirlenmektedir. Hücre sayısı, akım

yoğunluğu ve metanol geçiş yoğunluğu değerlerine bağlı olarak DMYP için saf metanol tüketim debisi, elektrokimyasal yolla ortaya çıkan suyun debisi ve metanol geçişi sebebiyle oluşan suyun debisi hesaplanmaktadır. Ayrıca belirli ortam sıcaklığı, katot basıncı ve bağıl nem değerlerine göre katottan yakıt piline alınan hava debisi ve bu hava içerisindeki neme bağlı olarak giriş havası kaynaklı su debisi belirlenmiştir. Bu hesaplamalarda ortam sıcaklığı 25°C, ortam basıncı 1 atm ve bağıl nem 0,5 olarak kabul edilmiştir.

DMYP ekipmanları sebebiyle oluşan güç gereksinimi hesabı, Bölüm 2.3'te anlatılan DMYP modelinde yer alan fan, yakıt pompası, metanol pompası ve geri besleme pompası elemanları için yapılmıştır. Her bir eleman için o elemanda gerekli olan güç değeri aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilmektedir.

$$P_i = (\dot{m}_i \cdot c_{p_i} \cdot \Delta T_i) / \eta_i \quad (4.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $P_i$ , herhangi bir eleman için gerekli gücü,  $\dot{m}_i$  ile ifade edilen değer, ilgili elemanın üzerinden geçen akışkanın (sıvı veya gaz) kütleli debisini,  $c_{p_i}$  değeri ilgili akışkanın özgül ısısını,  $\Delta T_i$  ilgili elemanın giriş-çıkış sıcaklık farkını ve  $\eta_i$  ise ilgili elemanın verim değerini ifade etmektedir. Hesaplamalarda her elemanın verim değeri 0,7 olarak kabul edilmiştir. Elemanların giriş ile çıkış arasındaki sıcaklık farkları ise literatürde yer alan çalışmalardan da faydalanılarak (Wu, 2010; Lee ve diğer., 2017) fan ve yakıt pompası için 2°C, geri besleme pompası ve metanol pompası için ise 3°C olarak kabul edilmiştir.

Yakıt pilinin gerekli akım ihtiyacını karşıladığı işletme durumunda metanol hem elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla hem de anottan katoda doğrudan geçişi sebebiyle tüketilmektedir. Elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda tüketilen metanol ( $\dot{m}_{MeOH,R}$ ) ile anottan katoda geçiş sebebiyle tüketilen metanol ( $\dot{m}_{MeOH,X}$ ) aşağıdaki gibi [ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ] biriminden formüle edilmektedir.

$$\dot{m}_{MeOH,R} = i \cdot A \cdot n \cdot M_{MeOH} \cdot 3.6 / (6 \cdot F) \quad (4.2)$$

$$\dot{m}_{MeOH,x} = i_x \cdot A \cdot n \cdot M_{MeOH} \cdot 3.6 / (6 \cdot F) \quad (4.3)$$

Bu ifadelerde n hücre sayısını,  $M_{MeOH}$  metanolün mol kütleini (32 g·mol<sup>-1</sup>) ve A yakıt pilinin aktif alanını temsil etmektedir.

CO<sub>2</sub> gazı hem elektrokimyasal yolla anotta hem de metanol geçişi nedeniyle katoda geçen metanol ile oksijenin tepkimesi sonucunda katotta üretilmektedir. Toplam üretilen CO<sub>2</sub> miktarı [kg·h<sup>-1</sup>] aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{m}_{CO_2} = (i + i_x) \cdot A \cdot n \cdot M_{MeOH} \cdot 3.6 / (6 \cdot F) \quad (4.4)$$

Yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda dört farklı şekilde su üretimi gerçekleşmektedir. Katotta meydana gelen reaksiyonlar sonucunda üretilen su ( $\dot{m}_{su,R}$ ), metanol geçişi dolayısıyla katotta metanolün su ile tepkimesinden açığa çıkan su ( $\dot{m}_{su,x}$ ) ve katot havasındaki nem dolayısıyla oluşan suya ( $\dot{m}_{su,n}$ ) ait kütleli debi ifadeleri sırasıyla [kg·h<sup>-1</sup>] olarak aşağıda gösterildiği gibidir.

$$\dot{m}_{su,R} = i \cdot A \cdot n \cdot M_{MeOH} \cdot 3.6 / (2 \cdot F) \quad (4.5)$$

$$\dot{m}_{su,x} = i_x \cdot A \cdot n \cdot M_{MeOH} \cdot 3.6 / (3 \cdot F) \quad (4.6)$$

$$\dot{m}_{su,n} = (i + i_x) \cdot A \cdot n \cdot \frac{\lambda_C}{y_{O_2}} \cdot \sum (y_i \cdot M_i) \cdot 3.6 \cdot 0.622 \cdot \frac{p_b \cdot \varphi}{p - p_b \cdot \varphi} / (4 \cdot F) \quad (4.7)$$

Bu ifadelerde  $y_i$  havadaki gazlara ait mol kesrini,  $p_b$  sıcaklığa bağlı olarak değişen buhar basıncını,  $\varphi$  bağıl nem oranını ifade etmektedir. Bir diğer su üretimi ise anottan katoda su geçişi ile ifade edilmektedir. Bu yolla üretilen suyun miktarı ( $\dot{m}_{su,g}$ ) ise deneysel yollarla ölçülmektedir. Akım yoğunluğu ve metanol konsantrasyonuna bağlı olarak ölçülen su geçişi değerleri, Bölüm 4.2.1 ve Bölüm 4.2.2’de anlatıldığı şekliyle simülasyona dahil edilmektedir.

## **BÖLÜM BEŞ**

### **ÇEŞİTLİ İŞLETME STRATEJİLERİNE GÖRE TAHRİK SİSTEMİ SİMÜLASYONU**

Bünyesinde herhangi bir hibritleşme özelliği bulunmayan konvansiyonel taşıtlarda, sürücü tarafından kontrol edilen gaz ve fren pedalı vasıtasıyla içten yanmalı motorun çalışma rejimi doğrudan ayarlanabildiği için karmaşık kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Fakat hibrit tahrik sistemlerinde ilave bir enerji dönüştürücüsü (batarya veya yakıt pili) kullanıldığından dolayı, işletme stratejisi veya başka bir tabirle enerji yönetim stratejisinin tasarımı ve uygulaması hibrit taşıtlarda büyük önem arz etmektedir. Hibrit taşıtlarda da konvansiyonel taşıtlarda olduğu gibi tek kontrol girdisi sürücü tarafından verilen komut olmasına rağmen verilen bu komuttan, tahrik sistemindeki tüm güç ve enerji üreteçleri etkilenmektedir. Bu sebeple, tahrik sistemi elemanları arasındaki çalışma rejiminin, toplam çalışma verimini arttırmak, yakıt ekonomisi sağlamak ve çevre kirliliğini önlemek gibi amaçlara yönelik olarak ayarlanması, hibrit taşıtlarda işletme stratejisinin tasarımına doğrudan bağlıdır (Fletcher, 2017).

İşletme stratejisi temel olarak, hibrit tahrik sisteminde mekanik gücü üreten içten yanmalı motor ile elektrik motoru arasındaki çalışma düzeni ve batarya ile yakıt pili gibi enerji depolayıcıları arasındaki öncelik sırasını ifade eden kontrol algoritmalarıdır. Bu çalışma kapsamında incelenen tahrik sisteminde içten yanmalı motor bulunmaması sebebiyle, tasarlanan işletme stratejileri sadece batarya ile yakıt pili arasındaki çalışma düzenini kapsamaktadır.

Birincil enerji kaynağının batarya olduğu hibrit taşıtlarda uygulanan işletme stratejileri temel olarak iki farklı şekilde tasarlanmaktadır. Birinci olarak, taşıt bataryasının belirli bir alt SOC limitine kadar boşalmasına müsaade edilir ve bu noktadan sonra aracın ikincil enerji kaynağı (yakıt pili) yüksek güçte çalışarak bataryayı şarj eder. İkinci tipte ise bataryanın belirlenen bir üst SOC değeri civarında kalabilmesi için ikincil enerji kaynağı sürekli olarak kısmi güçlerde çalışarak bataryayı şarj etmektedir (Ehsani ve diğer., 2010; Badin, 2013).



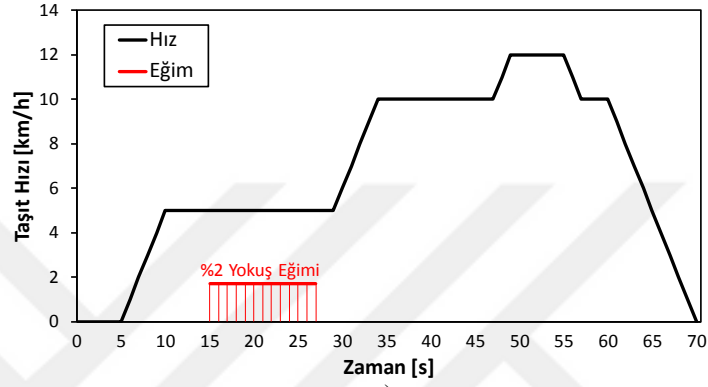
Seyir şartlarına göre zamana bağlı olarak her bir hibrit tahrik elemanının çalışma noktaları (güç, moment, akım, voltaj vb.) işletme stratejisinin kriterlerine bağlı olarak belirlenmektedir. Simülasyon süresi, yapılacak olan simülasyonun amacına ve incelenen aracın özelliklerine bağlı olarak kullanılan standart veya özel test çevrimlerinin süresine eşittir. Tercih edilen test çevriminde, zamana bağlı olarak taşıt hızı ve yokuş eğimi, girdi parametresi olarak kullanılabilir. Aracın seyir koşullarına göre hız, ivme ve yokuş bilgileri kullanılarak, araç üzerine etkiyen hareket dirençlerinden dolayı (denklem 2.1-2.4) yakıt pilli hibrit araçlarda kullanılan tahrik makinasında (elektrik motoru) gerekli güç, devir sayısı ve moment değerleri (denklem 2.5-2.7) hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan simülasyonlar için kullanılan araca ait bazı katsayılar Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Hibrit taşıt tahrikine ait simülasyon parametreleri

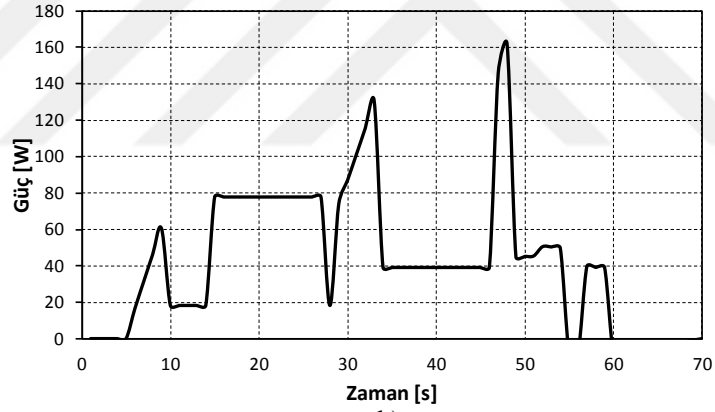
Parametre	Sembol	Değer	Birim
Yuvarlanma direnç katsayısı	$f_R$	0,009	-
Yerçekimi ivmesi	$g$	9,81	$m \cdot s^{-2}$
Araç kütlesi	$m$	120	kg
Hava yoğunluğu	$\rho_L$	1,2	$kg \cdot m^{-3}$
Araç kesit alanı	$A$	0,5	$m^2$
Araç aerodinamik katsayısı	$c_w$	0,28	-
Tekerlek dinamik yarıçapı	$r_{dyn}$	0,21	m
Mekanik verim	$\eta_M$	0,9	-
Konvertör verimi	$\eta_{DC/DC}$	0,959	-
Çevrim oranı	$i$	2	-
Dönen kütlelerin ivme etkisi	$\lambda$	1,02	-
Yokuş eğimi	$\delta$	2	%

Bu çalışmada, tahrik sisteminde kullanılan batarya ve yakıt pili gibi elemanların kapasitesinin düşük tutulup, yapılan simülasyonlar sonrasında meydana gelen değişimlerin, belirli sayıda test çevrimi için daha geniş çerçevede incelenebilmesi için araç kütlesi düşük olacak şekilde kabul edilmiştir. Bu sayede simülasyon zamanı ve ona bağlı olarak Simulink çözücü süresinin kısaltılması amaçlanmıştır. Küçük kütleli bir taşıt için sistemde kullanılan çevrim oranı 2 olarak kabul edilmiştir. Bu boyutlardaki bir araca uygun olarak diğer katsayılar (yuvarlanma ve aerodinamik direnç katsayısı vb.) ve boyutsal parametreler (tekerlek yarıçapı vb.) uygun şekilde belirlenmiştir. Ayrıca, hesaplamalarda esas alınan araç özelliklerine göre hız çevrimi özel olarak kurgulanmıştır. Burada, 70 saniyelik bir hız profili ve bu süre içerisinde 7 saniyelik ilave yokuş eğimi (%2) tanımlanmıştır. Hız profili, üç adet hızlanma ivmesi

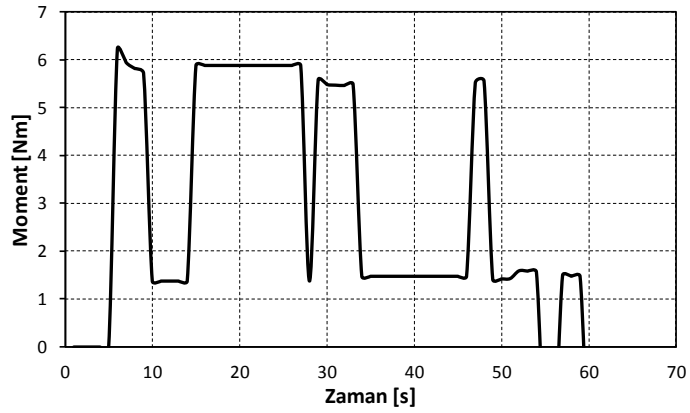
ve iki adet yavaşlama ivmesi içermekte ve bu çevrimde araç maksimum 12 km/h hıza ulaşmaktadır. Kullanılan hız profilinin ve seyir koşuluna göre çevrim zamanına bağlı olarak elektrik motorunda hesaplanan gerekli güç ve moment gereksiniminin değişimi Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Buna göre yukarıda belirtilen değerlere sahip aracın Şekil 5.1a’daki gibi bir seyri sırasında elektrik motorunda maksimum 165 W güç ve 6,4 Nm moment değerine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.



a)



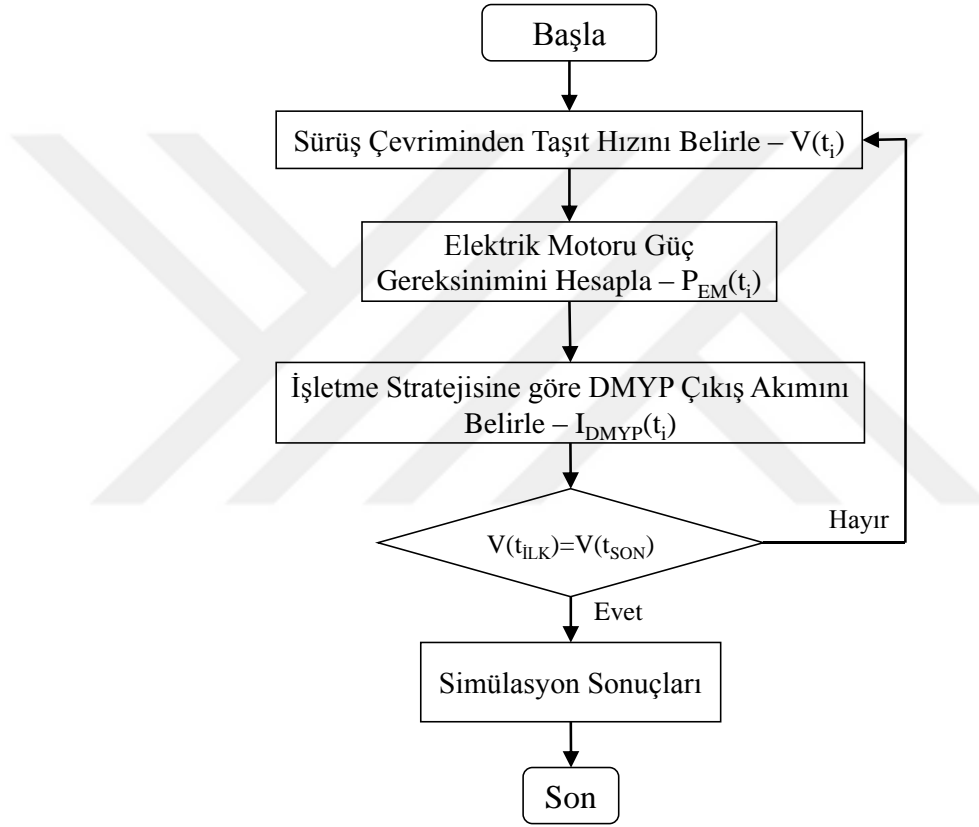
b)



c)

Şekil 5.1 Taşıt seyir profili (a) ile elektrik motorunda gerekli güç (b) ve moment (c) değerleri

DMYP hibrit taşıt tahrik sisteminde elektrik motoru üzerinde gerekli mekanik güç ve moment değeri, elektrik motorunun çalışma voltajı ve akım beslemesi sonucunda meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen (Bölüm 4.1’de detayı açıklanan ve Şekil 4.4’te gösterilen) simülasyon modeli, elektrik motorundaki güç girdisine bağlı olarak diğer komponentlerdeki akım ve voltaj değerlerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla oluşturulan simülasyon modeli temel olarak Şekil 5.2’de gösterilen algoritmaya dayanmaktadır.



Şekil 5.2 DMYP hibrit taşıt için genel simülasyon algoritması

Genel simülasyon algoritmasında sürüş çevriminin ilk saniyesinden son saniyesine kadar elektrik motoru güç gereksinimi ve bunun sonucuna bağlı olarak kullanılan işletme stratejisine göre DMYP çıkış akımı hesaplanmaktadır. İfade edilen algorithmada işletme stratejisinin değişmesi halinde, DMYP çıkış akımının değeri değişerek diğer elemanlardaki çıkış değerlerini etkileyecektir. Simülasyon sonuçları kısmı ile DMYP içerisinde meydana gelen metanol tüketimi, CO<sub>2</sub> ve su üretimleri ile batarya ve DC/DC konvertörlerine ait çıkış değerleri ifade edilmektedir.

## 5.1 Teorik DMYP Hibrit Taşıt Modelinin Simülasyonunda Batarya Tipinin Etkisi

Özellikle küçük kütle ve boyuta sahip hibrit taşıtların tasarımında kullanılan birincil enerji kaynağının (genellikle batarya) tipi, taşıt performansı ve ekonomisinin iyileştirilmesinde büyük rol oynamaktadır. Günümüzde hibrit tahrikli araçların bataryasında genellikle lityum-iyon (Li-iyon), nikel metal hidrit (NiMH) ve nikel kadmiyum (NiCd) bataryalar tercih edilmektedir (Kurzweil, 2013). Küçük boyut ve kapasiteli araçlarda da hacim ve ağırlık sınırlaması gibi nedenlerden dolayı kullanılan bataryanın istenilen ihtiyacı karşılayabilecek özellikte olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında Bölüm 5.1’de, 4 kg batarya kütlesi için üç farklı batarya tipinin (Li-iyon, NiMH ve NiCd) birincil enerji kaynağı olarak kullanıldığı bir DMYP hibrit taşıt tahriki incelenmiştir. DMYP ve batarya arasındaki çalışma düzeni iki farklı işletme stratejisi (Strateji 1 ve Strateji 2) kullanılarak hibrit tahrik sisteminin simülasyonu ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Taşıt bataryası için kabul edilen değerler Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Batarya kütlesi 4 kg için batarya model parametreleri (AAPPC, b.t.)

Parametre	Li-iyon	NiMH	NiCd
Maksimum hücre voltajı (V)	3,2	3,6	3,6
Hücre kapasitesi (Ah)	4,5	5	5
Hücre sayısı	30	15	10
Hücre maliyeti (\$)	23,90	22	21,95
Hücre kütlesi (g)	130	266	390
Batarya kapasitesi (Wh)	432	270	180

Sistem simülasyonu ile doğru sonuçların elde edilebilmesi için batarya modelinde, batarya ile ilgili şarj ve deşarj durumları için iç direnç ( $R_{s,d}$ ) ve batarya voltajının ( $U_{Bat}$ ) SOC değerine bağlı değişimlerinin batarya modeline dahil edilmesi Bölüm 2.2.2’de ifade edilmiştir. Bu her iki değişkenin ( $R_{s,d}$  ve  $U_{Bat}$ ) SOC değerine bağlı değişimi aşağıdaki formülde belirtildiği gibi sırasıyla 3. ve 1. dereceden polinom şeklinde ifade edilmiştir. Burada kullanılan a, b, c ve d katsayıları polinomun katsayılarını göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} R_{s,d} & U_{Bat} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} a \cdot (SOC)^3 + b \cdot (SOC)^2 + c \cdot (SOC) + d \\ c \cdot (SOC) + d \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Her bir batarya tipi için ilgili değişkenin polinomunu ifade edebilmek amacıyla kullanılan a, b, c ve d katsayılarının değerleri Tablo 5.3'te gösterilmiştir. Bu katsayılar, Matlab/Simulink tabanlı çalışan bir paket program olan ADVISOR programının batarya kütüphanesinden alınan değerlere göre elde edilmiştir. ADVISOR programı yakıt pilli ve hibrit elektrikli araçların simülasyon ve optimizasyon çalışmalarında sıkça tercih edilen bir program olup ayrıca kütüphanesinde yer alan tahrik sistemi elemanlarına ait bilgilerden de birçok çalışmada yararlanılmıştır (Ogburn, 2000; Guenther, 2001; Same ve diğer., 2010; Turkmen ve diğer., 2017).

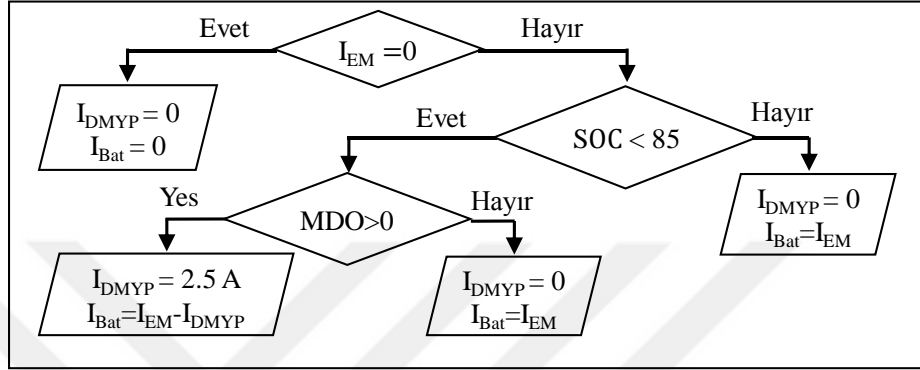
Tablo 5.3 Batarya iç direnç ve voltajı için kullanılan polinom katsayıları

Parametre	a	b	c	d
Li-iyon - $R_{s,d}$ [ $\Omega$ ]	$-2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	-0,002	0,080
NiMH - $R_{s,d}$ [ $\Omega$ ]	$-2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	-0,001	0,081
NiCd - $R_{s,d}$ [ $\Omega$ ]	$2 \cdot 10^{-8}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	0,0003	0,036
Li-iyon - $U_{Bat}$ [V]	-	-	0,094	23,28
NiMH - $U_{Bat}$ [V]	-	-	0,037	31,75
NiCd - $U_{Bat}$ [V]	-	-	0,039	31,68

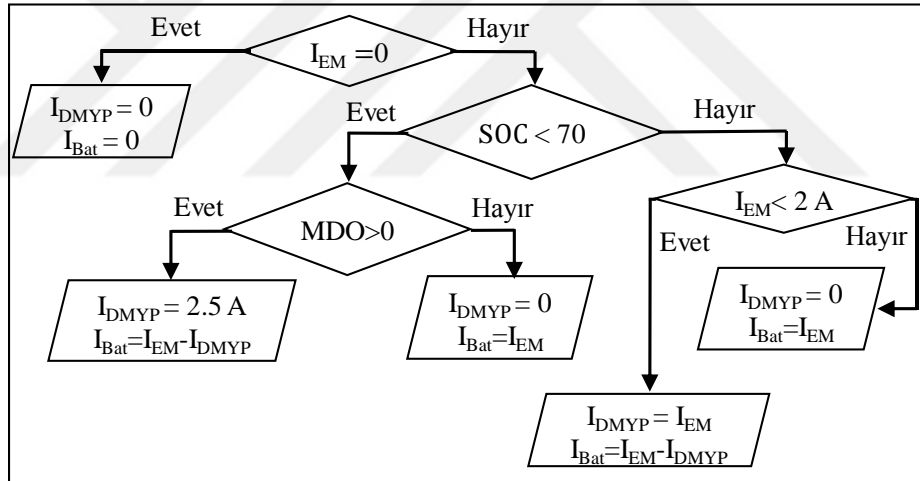
Sistemde ikincil enerji kaynağı olarak her bir hücrenin aktif alanı  $25 \text{ cm}^2$  olan ve 10 hücreden oluşan bir yığına sahip DMYP'nin kullanıldığı kabul edilmiştir. DMYP modelinde, bir boyutlu yakıt pili modeli kullanılarak elde edilen polarizasyon eğrisi kullanılmıştır. Ayrıca DMYP'nin sürekli kararlı durumda çalıştığı ve yığın voltajının hücre voltajı ile hücre sayısının çarpımına eşit olduğu kabul edilmiştir. DMYP için metanol solüsyon tankının hacmi 1 litre olarak kabul edilmiştir. Yakıt piline beslenen metanol su karışımının molaritesi 0,5 molar olarak alınmıştır.

Farklı batarya tiplerinin simülasyonu için hibrit tahrik sistemine entegre edilmek üzere iki farklı işletme stratejisi geliştirilerek kıyaslamalarda (Bölüm 5.1) Strateji 1 ve Strateji 2 olarak isimlendirilmiştir (Karaoğlan ve diğer., 2019). Şekil 5.3'te her iki strateji için elektrik motoru çalışma akımı ( $I_{EM}$ ), SOC ve metanol tankı doluluk oranına (MDO) göre batarya çalışma akımı ( $I_{Bat}$ ) ve DMYP çıkış akımı ( $I_{DMYP}$ ) değerleri açıklanmıştır. Strateji 1'de  $I_{EM}$  değerinin sıfırdan farklı olması durumunda eğer SOC değeri %85'in üstünde ise DMYP çalışmazken, %85'ten alt değerlerde tankta metanol bulunması durumunda DMYP maksimum gücünde 2,5 A çıkış akımı

verecek şekilde çalışmaktadır. Strateji 2’de ise %70 SOC değerinin üzerinde batarya doluluk durumunda eğer  $I_{EM}$  2A değerinden düşükse elektrik motorundaki akım ihtiyacı DMYP tarafından karşılanmaktadır. SOC değeri %70’in altında ise Strateji 1’e benzer şekilde, tankta metanol bulunması durumunda DMYP maksimum gücünde 2,5 A çıkış akımı verecek şekilde çalışmaktadır.



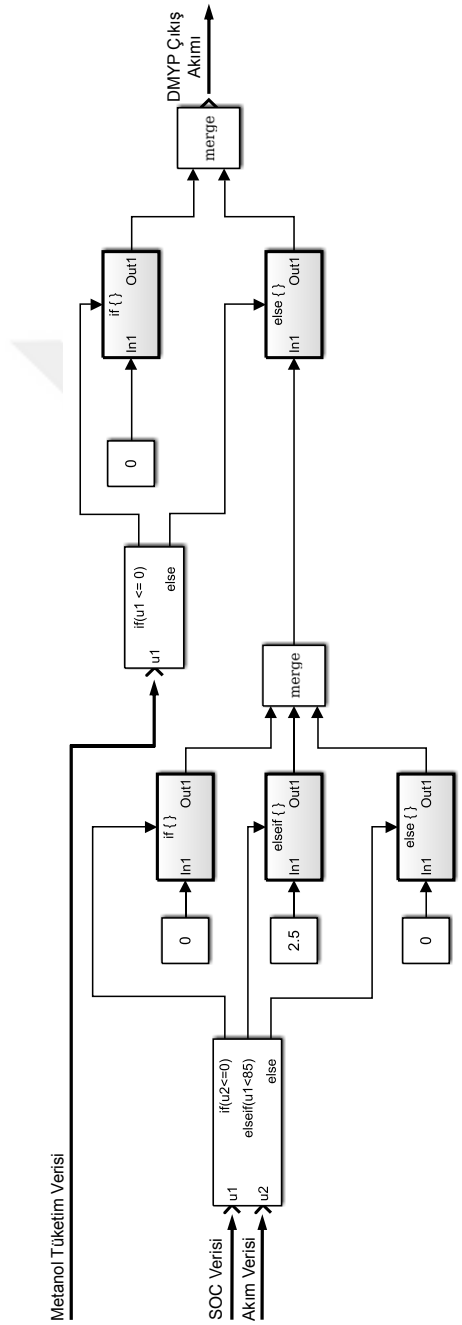
a)



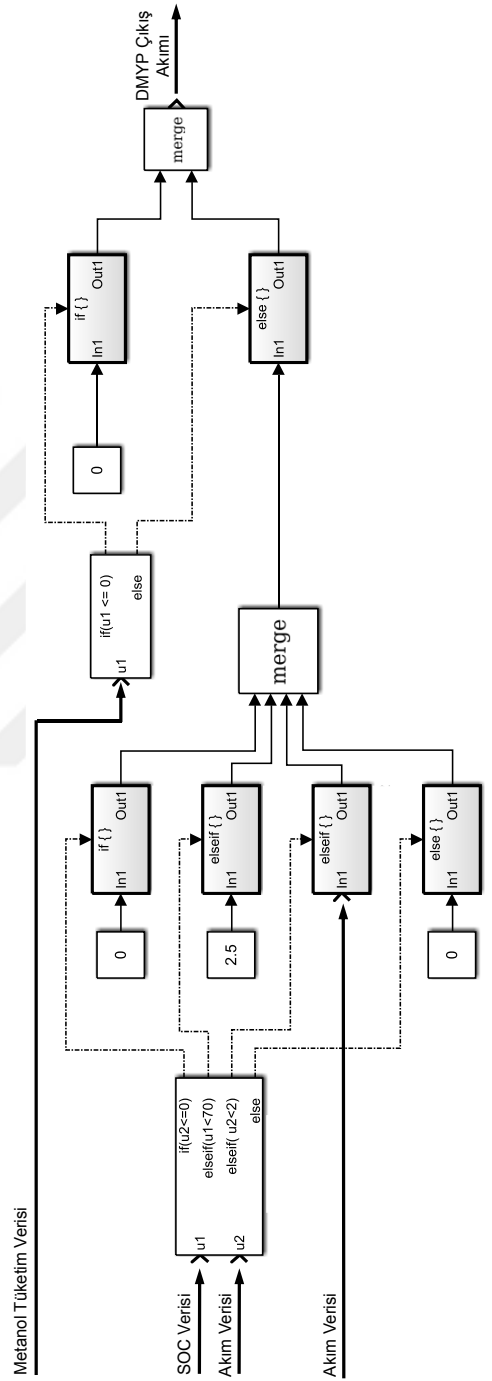
b)

Şekil 5.3 Teorik model simülasyonunda kullanılan işletme stratejilerinin algoritması: Strateji 1 (a) ve Strateji 2 (b)

Şekil 5.4’te geliştirilen her iki strateji için Simulink ortamında oluşturulan alt modellerin detayları gösterilmektedir. Her iki stratejide de işletme stratejileri için oluşturulan alt model metanol tüketim verisi, SOC verisi ve akım (elektrik motoru) verisi girdilerine karşılık DMYP çıkış akımını hesaplamaktadır. Elektrik motorunda gerekli akım ile  $I_{DMYP}$  arasındaki fark da  $I_{Bat}$  değerine eşit olmaktadır.



a)



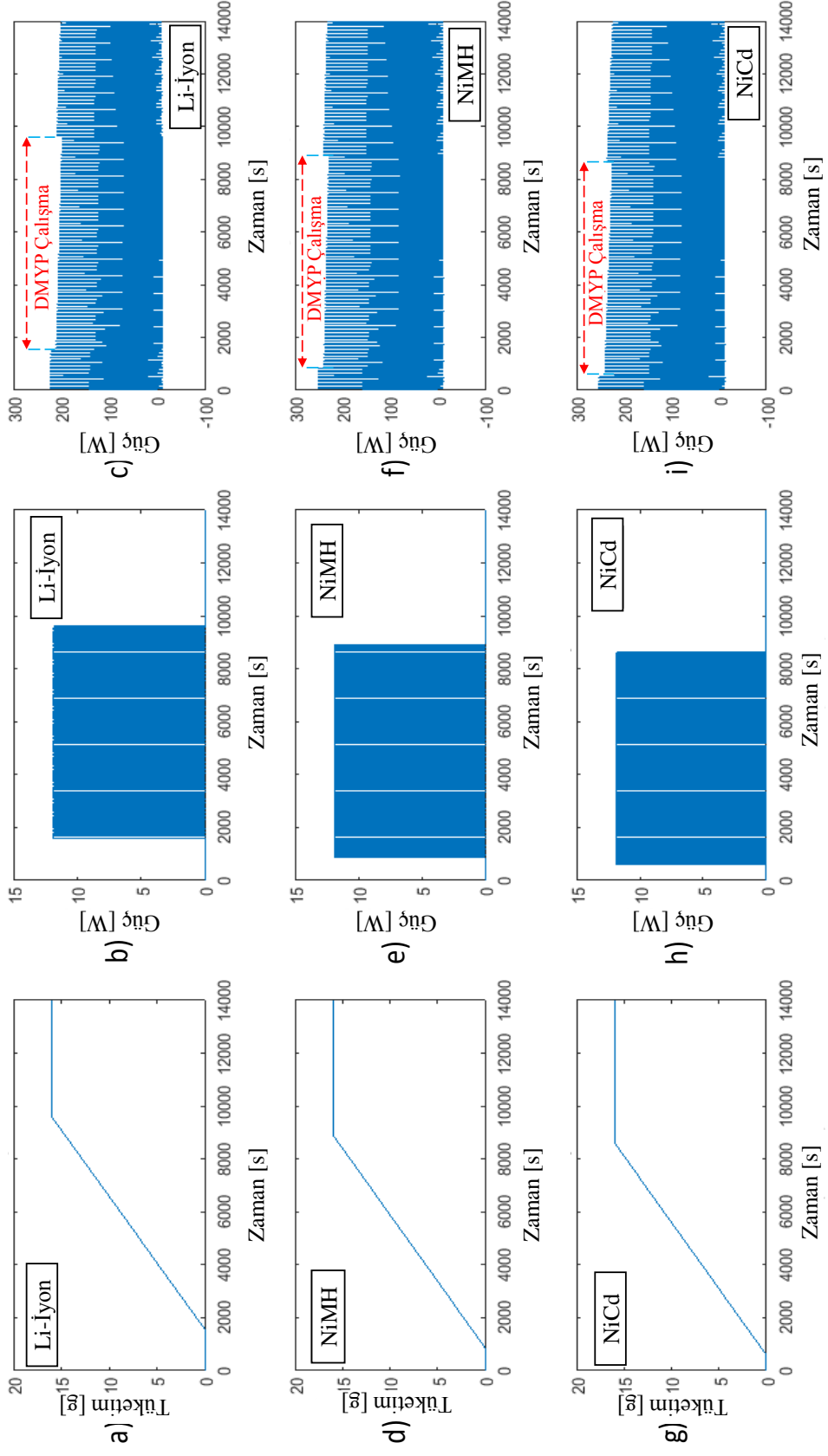
b)

Şekil 5.4 Teorik model simülasyonunda kullanılan işletme stratejilerinin Simulink blok diyagramları: Strateji 1 (a) ve Strateji 2 (b)

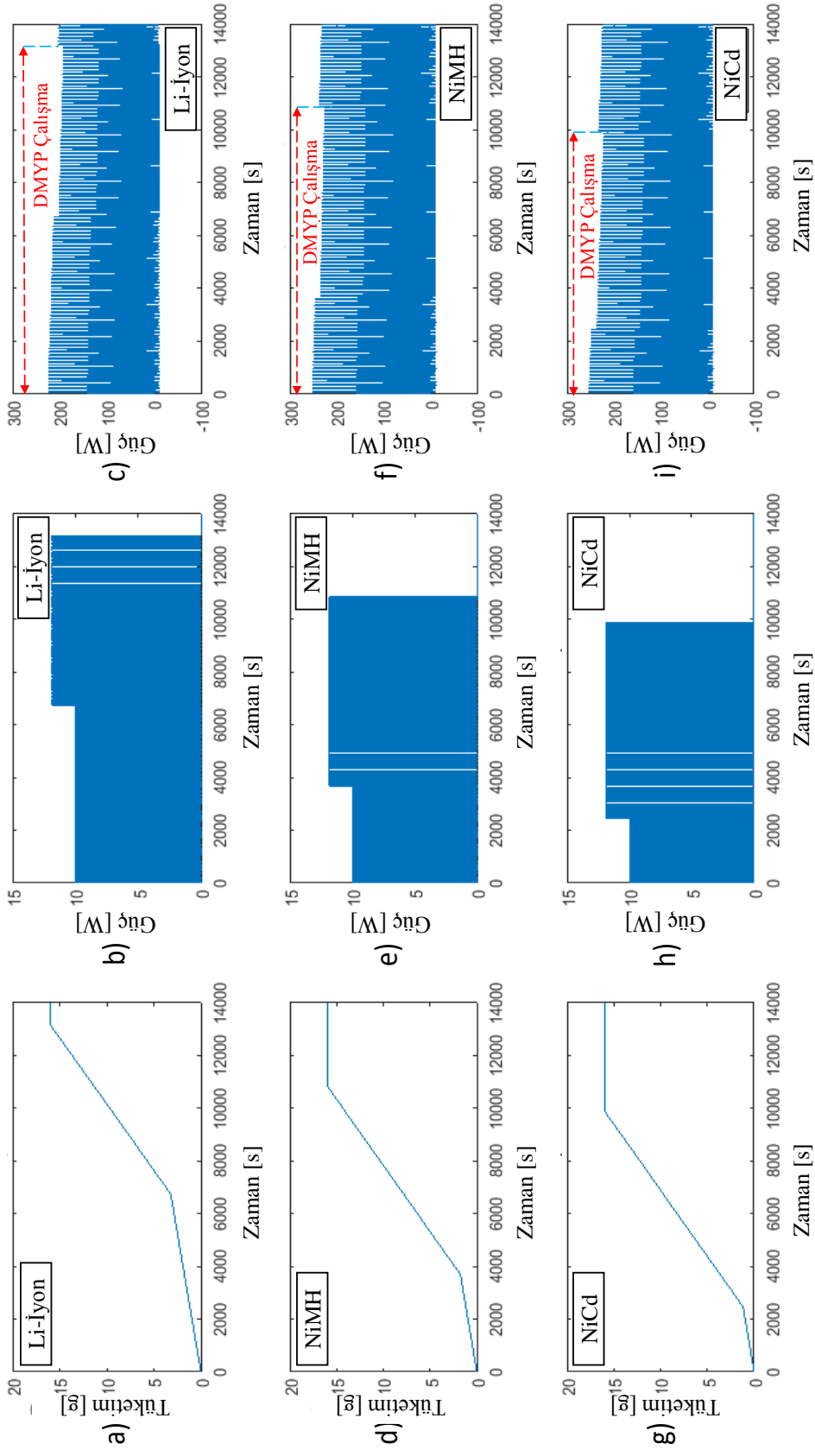
Geliştirilen her iki işletme stratejisi için de hibrit tahrik sisteminin simülasyonu, üç farklı batarya tipi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan test çevriminin art arda 200 defa tekrar etmesi sonucunda oluşan elektrik motoru güç girdisine göre simülasyon süresi maksimum 14000 saniye olmaktadır. Şekil 5.5'te Strateji 1 için metanol tüketimi, DMYP yığını güç çıkışı ve batarya güç çıkışı değerleri her bir batarya tipi için gösterilmiştir. DMYP'ye yakıt olarak beslenen metanol-su karışımından tüketilen saf metanolün (1 litre yakıt tankı içerisinde 16 g saf metanol bulunmaktadır) miktarı Şekil 5.5a, 5.5d ve 5.5g'de, DMYP güç çıkışı Şekil 5.5b, 5.5e ve 5.5h'de, batarya gücü ise Şekil 5.5c, 5.5f ve 5.5i'de sırasıyla Li-iyon, NiMH ve NiCd batarya tiplerinin bulunduğu hibrit tahrik için gösterilmektedir. Batarya tipleri içerisinde, DMYP ilk olarak NiCd, son olarak da Li-iyon bataryanın bulunduğu tahrik sisteminde çalışmaya başlamaktadır. Her batarya tipinin kullanıldığı durumda da DMYP çalışması halinde 12 W'lık bir güç çıkışı meydana gelmektedir. DMYP'nin devreye girmesiyle hem bataryadan doğrudan talep edilen güç değeri düşmekte hem de batarya iç direnci ile voltaj kayıpları azaldığı için batarya verimi artmaktadır. DMYP çalışması sırasında batarya gücündeki değişimler belirgin bir şekilde gözlenebilmektedir.

Şekil 5.5d'de ise Strateji 2 için metanol tüketimi, DMYP yığını güç çıkışı ve batarya güç çıkışı değerleri bir önceki grafikte aynı sırada her bir batarya tipi için gösterilmiştir. Strateji 2'nin tercih edilmesi durumunda elektrik motorunun akım gereksinimi 2 A değerinin altında ise DMYP, simülasyon başlangıcından SOC değeri %70'e ulaşıncaya kadar çalışmaktadır. En uzun DMYP çalışma süresi yaklaşık 11000 saniye ile Li-iyon bataryanın kullanıldığı durumda gerçekleşmektedir. Kısmi yükleme durumunda (SOC'nin %70'ten büyük olması durumunda) DMYP güç çıkışı maksimum 10 W olurken, SOC değeri %70'in altına düştüğünde 12 W olmaktadır. DMYP çalışması sırasında batarya gücündeki azalmalar Strateji 2'de daha uzun sürmektedir. DMYP çalışmasına bağlı olarak Strateji 2'de batarya güç çıkışındaki azalma Strateji 1'e göre daha yüksek olmaktadır. Bu sebeple, batarya güç talebine bağlı olarak SOC değerinin azalması Strateji 2'de daha yavaş olmakta, bu durum ise daha düşük iç direnç ve batarya açık devre voltaj kaybına yol açmakta ve Strateji 1'e göre Strateji 2'de daha yüksek batarya verimi elde edilmesini sağlamaktadır.



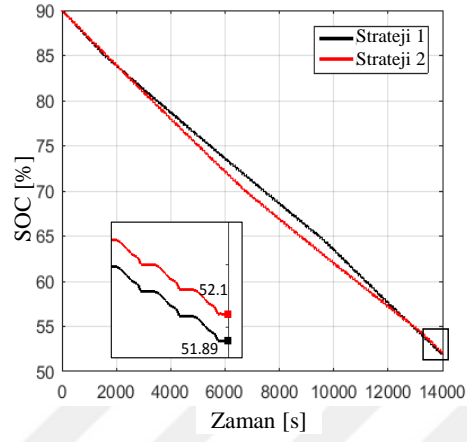


Şekil 5.5 Çeşitli batarya tipleri ile kullanım durumunda DMYP metanol tüketimi (a,d,g), güç çıkışı (b,e,h) ile batarya güç gereksinimi (c,f,i): Strateji 1

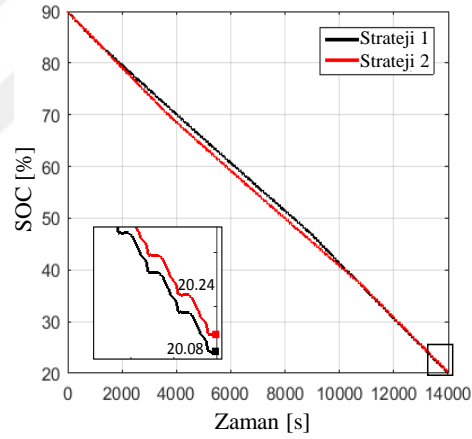


Şekil 5.6 Çeşitli batarya tipleri ile kullanım durumunda DMYP metanol tüketimi (a,d,g), güç çıkışı (b,e,h) ile batarya güç gereksinimi (c,f,i): Strateji 2

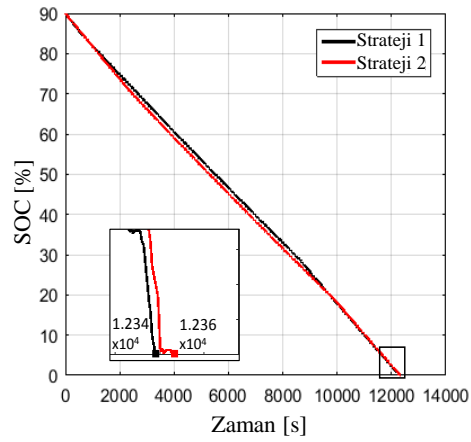
Simülasyon süresince SOC değerinde meydana gelen değişimler her batarya tipinin kullanıldığı durumlar için Şekil 5.7’de sunulmuştur. Simülasyon başlangıcında SOC başlangıç değeri %90 olarak ayarlanmış ve simülasyon bitimindeki son SOC değerleri büyütülerek gösterilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 5.7 Teorik modelin simülasyonu süresince SOC değişimi

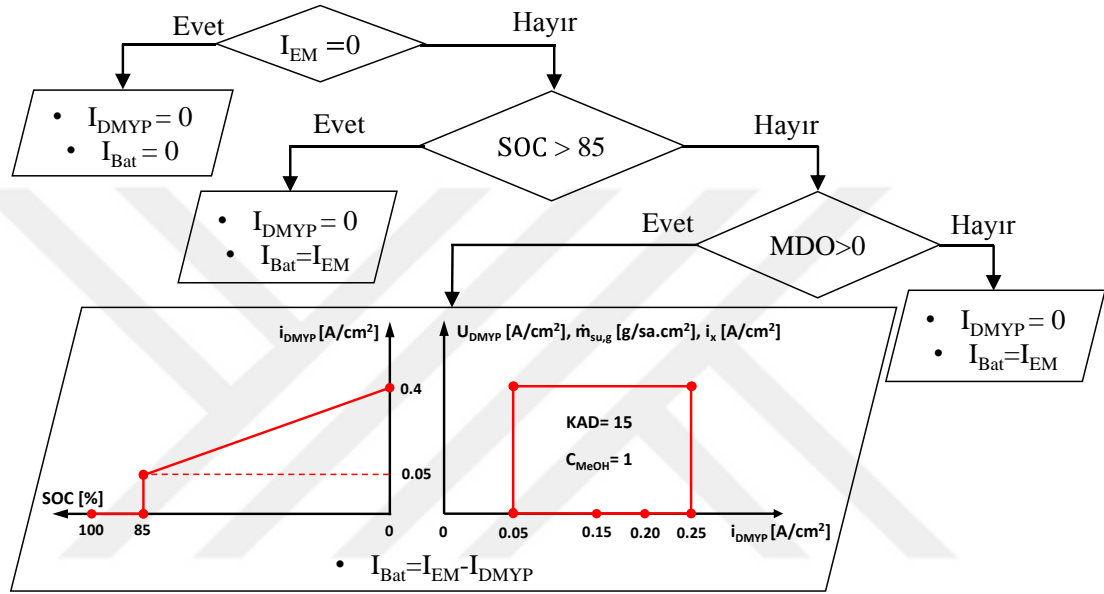
Li-iyon bataryanın kullanıldığı durumda SOC değeri %38, NiMH bataryanın kullanıldığı durumda %70 düşmektedir. NiCd batarya tipinin kullanılması halinde ise simülasyon tamamlanamadan batarya boşalmaktadır. Li-iyon ve NiMH tiplerinde simülasyon sonunda kalan batarya kapasitesi Strateji 2'nin kullanılması halinde daha yüksek olmaktadır. NiCd batarya tipinde ise Strateji 2 ile simülasyon süresi daha uzun olmaktadır.

## 5.2 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP Modellerinin Simülasyonu

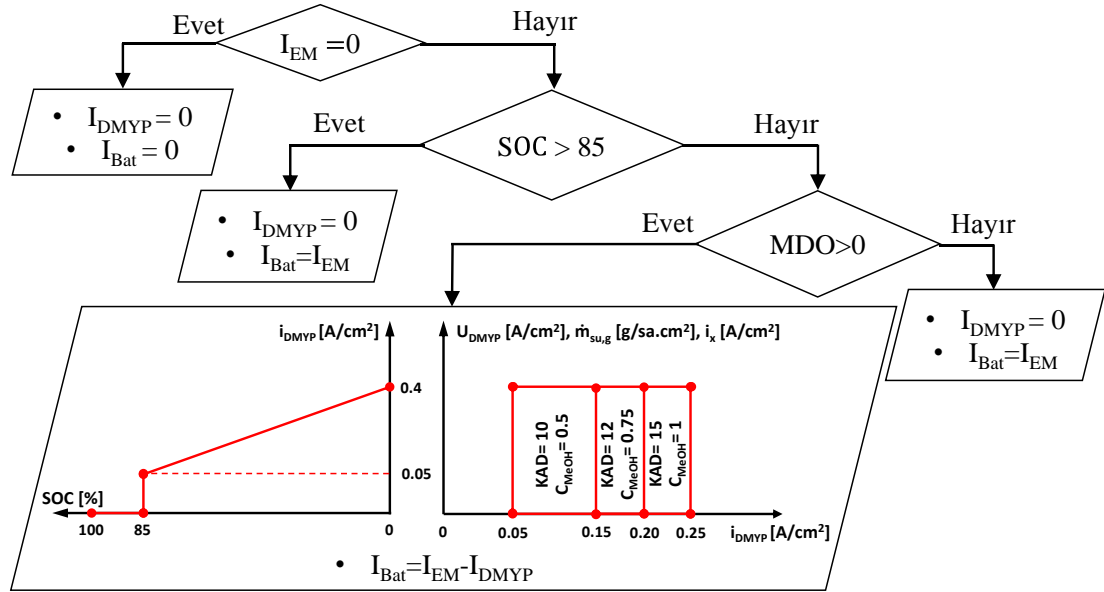
Yakıt pilli hibrit tahrikli araçlarda genellikle birincil enerji kaynağı olarak kullanılan bataryanın tipi ve kapasitesinin belirlenmesi kadar ikincil enerji kaynağı olan yakıt pillerinin çalışma karakteristiklerinin doğru şekilde tayini de araç performansı ve ekonomisi üzerinde etkisi yüksek olmaktadır. Bölüm 5.1'de incelemeye konu araç ve Li-iyon batarya özellikleri aynı tutularak (farklı olarak araç kütlesi 100 kg alınmıştır) bu bölümde bir boyutlu DMYP modeli yerine Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP modelleri kullanılmış ve sistem performansı analiz edilmiştir. Geliştirilen hibrit tahrik sisteminin simülasyonu sonucunda DMYP için yığın çıkış gücü, ekipmanlarının gücü, metanol ve su üretimi ile CO<sub>2</sub> tüketimi değerleri, batarya için SOC değişimi, batarya voltajı ve gücü gibi değerler simülasyon süresince elde edilmiştir.

Deneysel olarak elde edilen tek bir yakıt pili hücresine ait (Bölüm 3.1) hücre voltajı, metanol geçiş yoğunluğu ve su geçişi sonuçlarının (Şekil 3.2) DMYP modeline entegre edilmesi (Bölüm 4.2.1 ve Bölüm 4.2.2) sonucunda geliştirilen model bir boyutlu teorik modelden farklı olarak “Yarı-Teorik” bir hal almıştır. DMYP modelinde kullanılan tek yakıt pili hücresine ait sonuçlar hücre sayısı ile çarpılarak yığın değerleri olarak kabul edilmiştir. Bu mukayese için DMYP yığınınnda hücre sayısı 20 olarak alınmıştır. Yarı-Teorik modelde, DMYP'nin çalışması sırasında tüm akım yoğunluğu değerleri için katot akış debisi (KAD) 15 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> ve metanol konsantrasyonu (C<sub>MEOH</sub>) 1 M değerinde sabit olmaktadır. Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP modelinde ise deneysel olarak elde edilen sonuçlara göre optimum çalışma rejimi (yüksek hücre voltajı ile düşük metanol ve su geçişi)

için DMYP akım yoğunluğuna göre üç farklı çalışma bölgesine ayrılmıştır. Buna göre, 0,05 – 0,15 A·cm<sup>-2</sup> aralığında KAD 10 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> ve C<sub>MeOH</sub> 0.5 M, 0.15-0.2 A·cm<sup>-2</sup> aralığında KAD 12 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> ve C<sub>MeOH</sub> 0,75 M ve 0,2-0,25 A·cm<sup>-2</sup> aralığında KAD 15 ml·cm<sup>-2</sup>·dk<sup>-1</sup> ve C<sub>MeOH</sub> 1 M olarak DMYP çalışmaktadır. Şekil 5.8’de Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modelin simülasyonu için kullanılan işletme stratejisinin detayı ve gerekli DMYP akım yoğunluğuna göre yakıt pili çalışma karakteristikleri gösterilmiştir.



a)

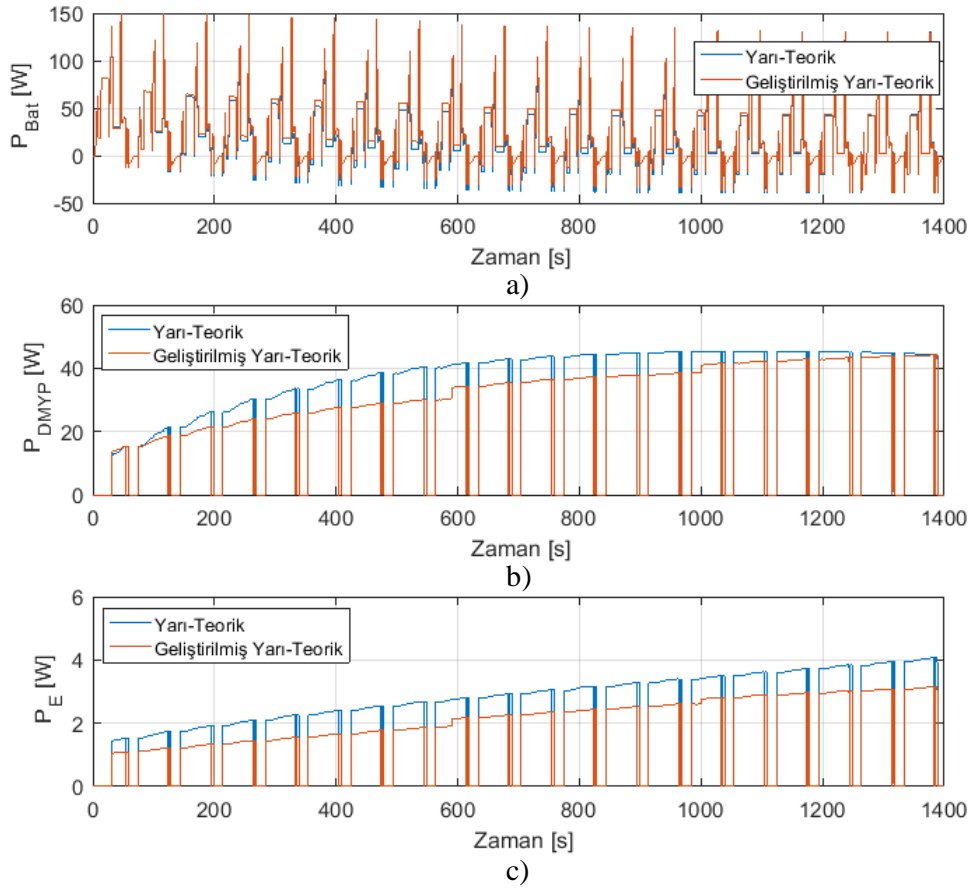


b)

Şekil 5.8 Yarı-Teorik (a) ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik (b) modellerin simülasyon algoritmaları

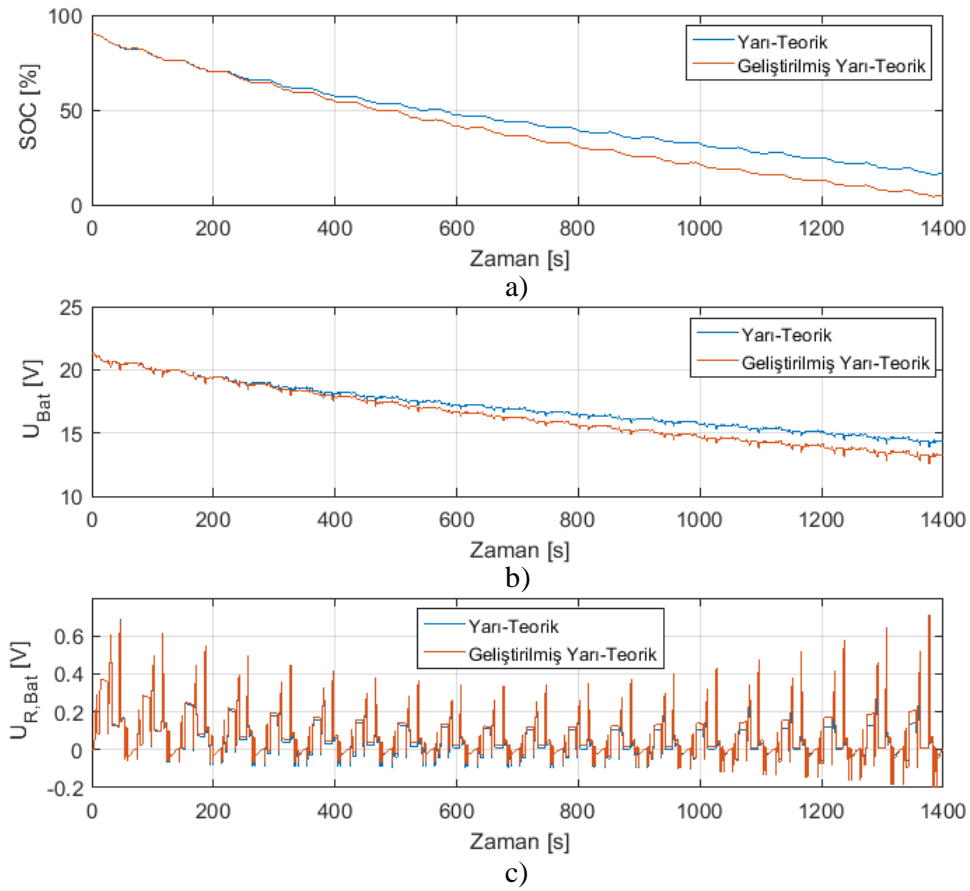
Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP modellerinin simülasyonu için kullanılan işletme stratejisi Şekil 5.2’de verilen genel simülasyon algoritmasına göre ve Bölüm 5.1’de incelenen Strateji 1’e benzer olarak oluşturulmuştur. Strateji 1’den farkı ise DMYP akımının %85’in altındaki SOC değerleri için değişken olması ve DMYP’nin farklı işletme parametrelerinde çalışması olmaktadır. DMYP’nin çeşitli akım yoğunluklarında farklı molariteler için elde edilen deneysel sonuçları Şekil 4.4’te gösterilen simülasyon modelinin içerisindeki DMYP alt modeline entegre edilmiştir. Simülasyon için girdiler (elektrik motoru güç ve akımı), taşıt hız profili 20 defa tekrar edilerek sisteme aktarılmıştır.

Şekil 5.9’da Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP modellerinin simülasyonu sonucunda batarya ve DMYP çıkış gücü ( $P_{Bat}$ ,  $P_{DMYP}$ ) ile DMYP ekipmanlarının güç sarfiyatlarının ( $P_E$ ) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



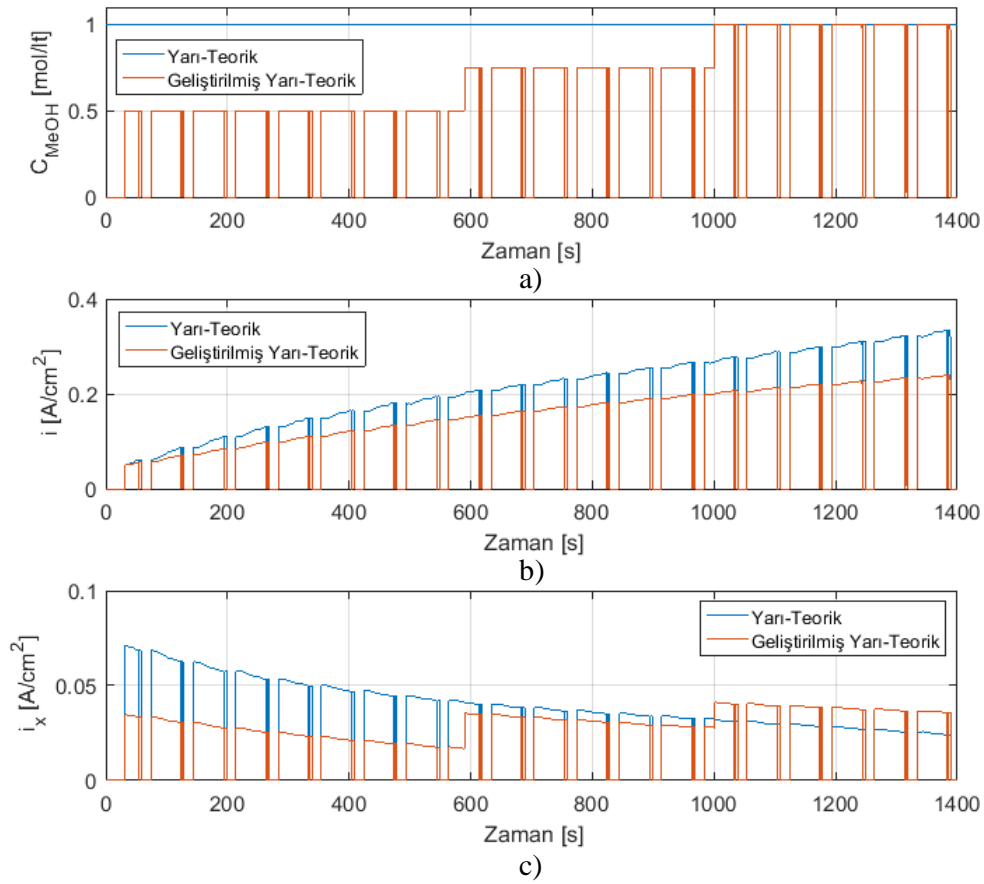
Şekil 5.9 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: batarya (a), DMYP (b) ve DMYP ekipmanlarındaki (c) güç gereksinimi

Simülasyon başlangıcından kısa bir süre sonra SOC değerinin %85'in altına inmesiyle birlikte DMYP devreye girmektedir. Maksimum batarya gücü, DMYP'nin çalışmadığı durumda yaklaşık 150 W olurken (Şekil 5.9a), simülasyonun son zamanlarında SOC değerinin düşmesiyle birlikte maksimum DMYP akımına karşılık yaklaşık maksimum 45 W değerinde güç çıkışı DMYP'den sağlanmaktadır. Yarı-Teorik modele göre DMYP'nin çalıştığı bölgelerde zamanla regresif bir şekilde artan DMYP gücü oluşmasına karşın, Geliştirilmiş Yarı-Teorik modele göre DMYP, farklı KAD ve  $C_{MeOH}$  değerleri altında çalışacağından daha az eğimle ve kırık bir karakteristikte DMYP gücü artmaktadır (Şekil 5.9b). DMYP ekipmanlarının ise güç sarfiyatı maksimum 4 W olarak Yarı-Teorik model ile gerçekleşmektedir. Şekil 5.10'da ise Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP modellerinin simülasyonu sonucunda SOC, batarya voltajı ( $U_{Bat}$ ) ile batarya iç dirençlerinden dolayı oluşan voltaj kaybının ( $U_{R,Bat}$ ) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: SOC değişimi (a), batarya voltajı (b) ve kayıp batarya voltajı (c)

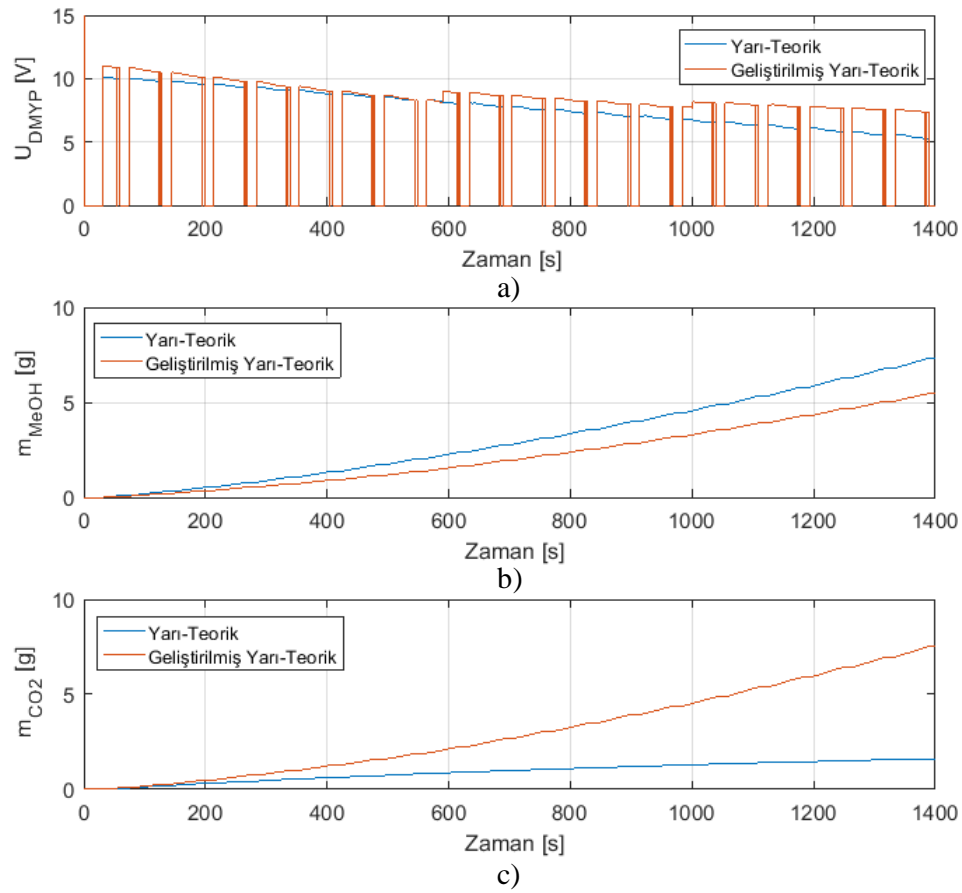
Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP modellerin simülasyonu sonucu elde edilen SOC değerinin, başlangıç değeri olan %90'dan 1400 s simülasyon süresince değişimi Şekil 5.10a'da verilmiştir. Hibrit ve elektrikli taşıtlar için en önemli parametrelerden birisi olan SOC değeri simülasyon sonunda, Geliştirilmiş Yarı-Teorik modelin kullanılması durumunda %10'un altına düşmesine rağmen Yarı-Teorik modelin kullanılması halinde %20'nin üzerinde kalmaktadır. SOC değerine bağlı olarak batarya iç direnci ve batarya açık devre voltajının değişimi sonucunda batarya çalışma voltajının değişimi Şekil 5.10b'de gösterilmiştir. Geliştirilmiş Yarı-Teorik modelin kullanılması durumunda, batarya gücüne ve SOC değerine bağlı olarak batarya çalışma voltajı Yarı-Teorik modele göre daha düşük değer almaktadır. Geliştirilmiş Yarı-Teorik model ile elde edilen batarya voltaj kaybı değeri ise biraz daha fazla olmaktadır (Şekil 5.10c). Şekil 5.10'da DMYP üzerinde elde edilen  $C_{MeOH}$ ,  $i$  ve  $i_x$  değerlerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.11 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: metanol konsantrasyonu (a), akım yoğunluğu (b) ve geçiş akımı yoğunluğu (c)

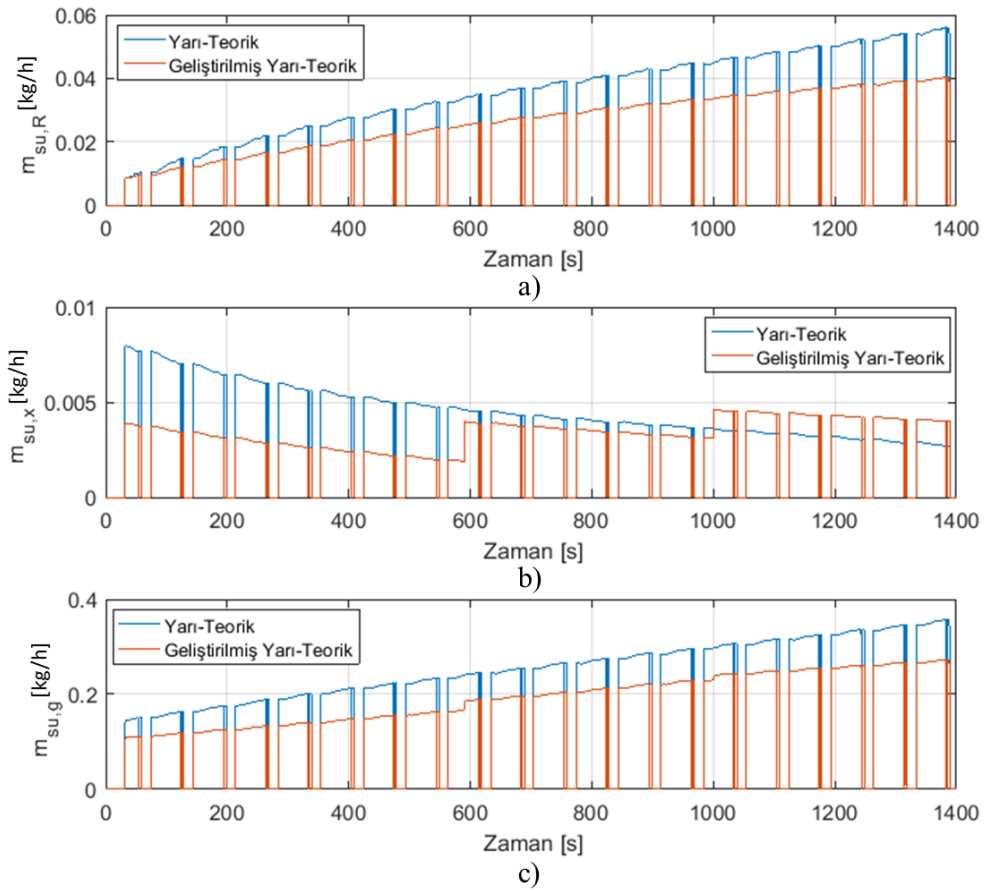


Simülasyon süresince Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin kullanılması ile DMYP çalışma metanol konsantrasyonunun ( $C_{MeOH}$ ) değişimi Şekil 5.11a'daki gibi olmaktadır. Geliştirilmiş Yarı-Teorik model ile 600. ve 1000. saniyelerde konsantrasyon değeri akım yoğunluğuna bağlı olarak değişirken Yarı-Teorik yaklaşımda 1 M sabit konsantrasyon değeri tüm simülasyon boyunca geçerli olmaktadır. Yarı-Teorik model ile DMYP'den talep edilen akım yoğunluğu değeri Geliştirilmiş Yarı-Teorik modele göre daha yüksek olmaktadır (Şekil 5.11b). Metanol geçiş akım yoğunluğu ( $i_x$ ) ise 1000. saniyeye kadar (KAD  $15 \text{ ml} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dk}^{-1}$  ve  $C_{MeOH}$  1 M olana kadar) Yarı-Teorik model kullanıldığında daha yüksek, 1000-1400 saniyeler arasında ise Geliştirilmiş Yarı-Teorik model kullanıldığında daha yüksek değer almaktadır. Şekil 5.12'de simülasyon boyunca DMYP voltajı ( $U_{DMYP}$ ), saf metanol tüketim miktarı ( $m_{MeOH}$ ) ve üretilen  $CO_2$ 'nin zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.12 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: DMYP yığın voltajı (a), metanol tüketimi (b) ve  $CO_2$  üretimi (c)

Simülasyon başlangıcında DMYP'den talep edilen akım yoğunluğunun düşük olması sebebiyle oluşan DMYP voltajı en yüksek değerlerini almakta, akımın artmasıyla birlikte ise voltaj değeri düşmektedir. Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin kullanılması ile oluşan maksimum voltaj değeri sırasıyla 10 V ve 11 V olmaktadır (Şekil 5.12a). DMYP'de saf metanol zamana göre artan bir şekilde tüketilmekte, Yarı-Teorik model ile tüketilen metanol miktarı Geliştirilmiş Yarı-Teorik model ile elde edilen sonuçtan daha yüksek olmaktadır (Şekil 5.12b). CO<sub>2</sub> üretimi ise Yarı-Teorik model ile zamana göre yaklaşık sabit bir değerde olurken, Geliştirilmiş Yarı-Teorik model ile progresif olarak değişmektedir (Şekil 5.12c). Şekil 5.13'de simülasyon boyunca DMYP'de elektrokimyasal reaksiyonlar ile üretilen su miktarı ( $m_{su,R}$ ), metanol geçişi sebebiyle üretilen su miktarı ( $m_{su,x}$ ) ve anottan katoda doğrudan geçen su miktarının ( $m_{su,g}$ ) zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.13 Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerin simülasyon sonuçları: kimyasal reaksiyon sonucu (a), metanol geçişi sebebiyle (b) ve su geçişi ile oluşan su üretimi (c)

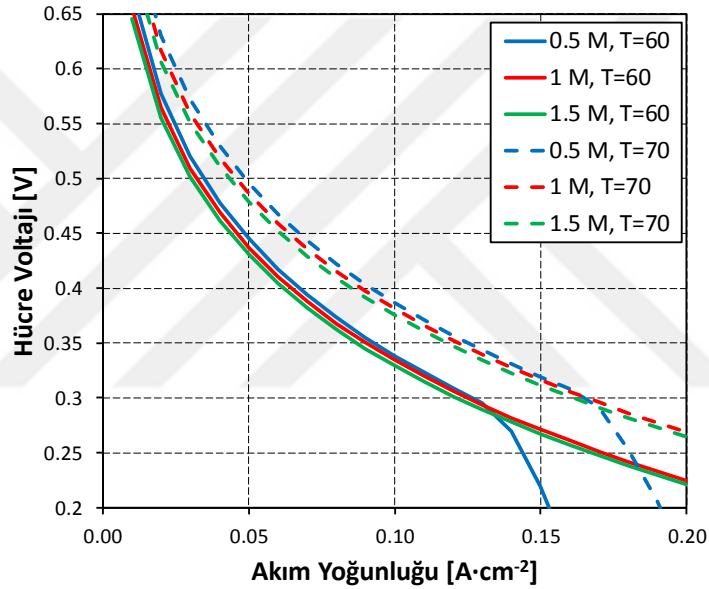
Elektrokimyasal reaksiyonlar ile üretilen su miktarı ( $m_{su,R}$ ), her iki model için de zamanla regresif bir artış göstermekte olup en yüksek akım yoğunluğu ihtiyacının bulunduğu simülasyonun son zamanlarında Yarı-Teorik model ile  $0,056 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , Geliştirilmiş Yarı-Teorik model ile ise  $0,04 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  değerine ulaşmaktadır (Şekil 5.13a). KAD ve  $C_{MeOH}$  değerlerinin Geliştirilmiş Yarı-Teorik modelde zamanla değişmesinden dolayı metanol geçişi sebebiyle üretilen su miktarındaki ( $m_{su,x}$ ) kademe atlamaları Şekil 5.13b'de görülebilmektedir. Bu değer maksimum olarak, Yarı-Teorik model ile  $0,008 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , Geliştirilmiş Yarı-Teorik model ile ise  $0,0045 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  değerine ulaşmaktadır. Tek bir hücre için deneysel olarak belirlenen anottan katoda doğrudan geçen su miktarı ( $m_{su,g}$ ) simülasyon sonunda incelenen özellikteki DMYP için Şekil 5.13c'de görülebilmektedir. Bu değer,  $m_{su,x}$  değerine kıyasla KAD ve  $C_{MeOH}$  değerinden daha az etkilenmektedir.

### 5.3 DMYP Performansının Teorik ve Deneysel Olarak Mukayesesi

Teorik, Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modellerle yapılan DMYP hibrit tahrik sisteminin simülasyonları ile taşıt performansı ve tahrik komponentlerinin çalışma karakteristikleri belirlenebilmektedir. Fakat bu çalışmalarda tek bir DMYP hücresi için teorik olarak belirlenen hücre voltajı veya Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik modeller kullanılarak belirlenen DMYP çalışma karakteristikleri ile hücre sayısının çarpılarak elde edilen sonucun DMYP yığının performansına eşit olduğu kabul edilmektedir. Literatür özetinde (Bölüm 1) incelenen çalışmalarda da genellikle tek hücre veya yığın için çalışmalar bulunmakla birlikte 1 boyutlu DMYP modeli veya tek hücre testiyle elde edilen DMYP sonuçları ile yığın karakteristikleri arasındaki ilişkiyi inceleyen herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple, bu başlık altında bir boyutlu DMYP kullanılarak elde edilmiş hücre voltajı, tek hücre testi ile deneysel olarak bulunan hücre voltajı ve beş hücreli bir DMYP kısa yığınının testi sonucunda bulunan ortalama hücre voltajı mukayese edilmiştir.

Hücre voltajları arasındaki mukayeselerde daha önce açıklanan bir boyutlu teorik DMYP modeli (Bölüm 2.3) kullanılmış ve bu hesaplamalar DMYP'nin farklı sıcaklık ve metanol konsantrasyonunda çalışması durumu için parametrik olarak incelenmiştir. Bir boyutlu DMYP nümerik sonucu, 0,5 M, 1 M ve 1,5 M metanol

konsantrasyonu ve çalışma sıcaklığının 60°C ve 70°C değerleri için elde edilmiştir. DMYP modeli olarak bir boyutlu modelin kullanılmasından dolayı (model sınır ve kısıtlamaları nedeniyle) KAD ve AAD değerlerinin hücre voltajı üzerindeki etkisi hesaplamalarda ihmal edilmiştir. DMYP modelinin sonuçlarına göre en yüksek hücre voltajı, 0,13 A·cm<sup>-2</sup> değerinin altında 0,5 M için meydana gelmektedir. DMYP'den talep edilen akım yoğunluğunun artmasıyla maksimum hücre voltajı daha yüksek metanol konsantrasyonlarında oluşmaktadır. Sıcaklığın ise hücre voltajı üzerine etkisi metanol konsantrasyonuna göre daha fazla olmaktadır. DMYP modeli kullanılarak elde edilen hücre voltajı sonuçları Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Çeşitli metanol konsantrasyonu ve sıcaklık değerleri için bir boyutlu DMYP modeline göre nümerik hücre voltajı sonuçları

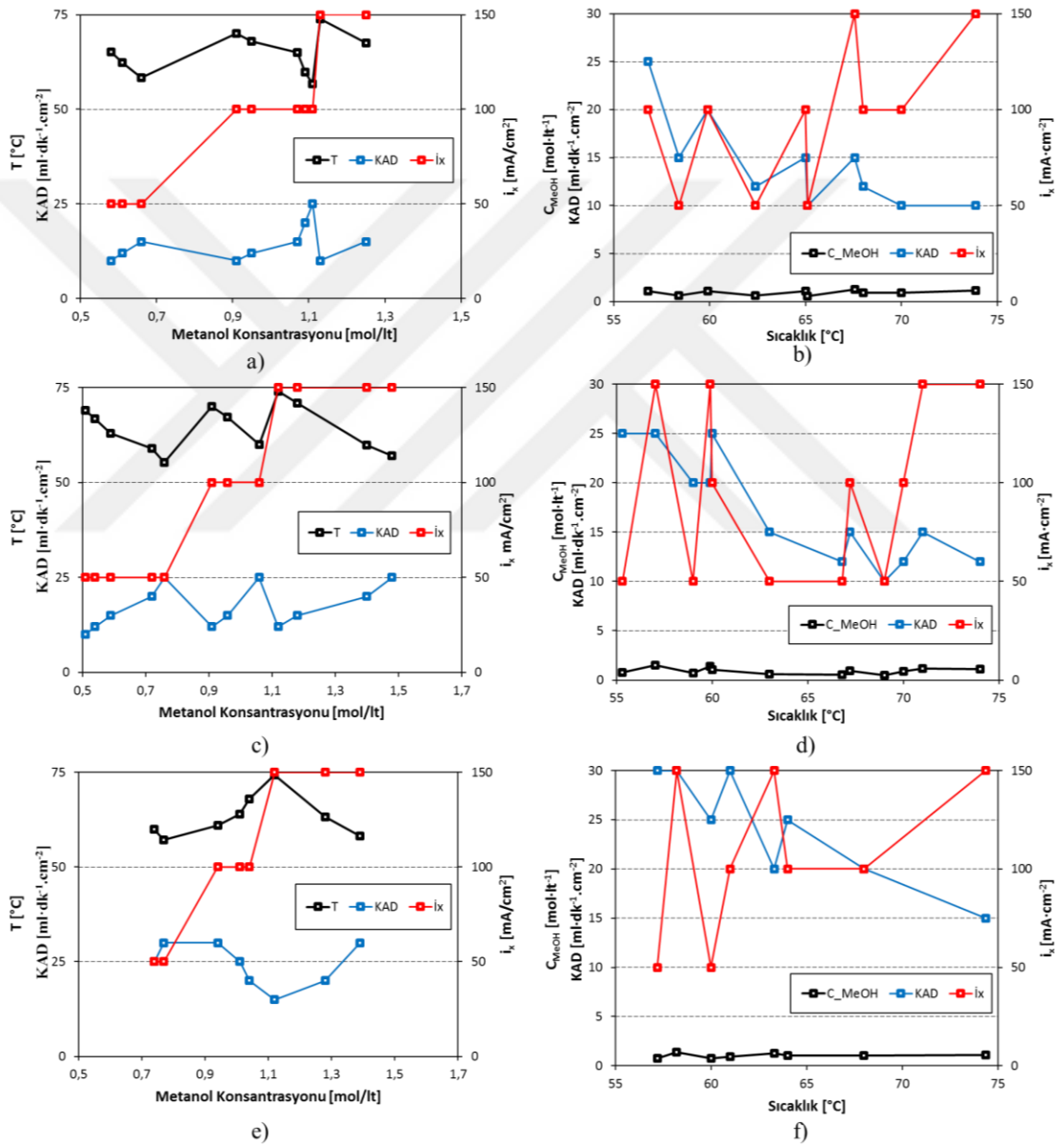
Tek hücre için DMYP hücre voltajı ölçümleri Bölüm 3.1'de detayı açıklanan biçimde ve Şekil 3.1'de gösterilmiş olan test istasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Tek hücre DMYP testi için ise çeşitli akım yoğunlukları için KAD, sıcaklık ve metanol konsantrasyonu gibi değerler çalışma parametresi olarak kullanılmaktadır. Hem teorik hücre voltajı sonuçlarının hesaplanması, hem de tek hücre DMYP voltajının ölçülmesi için gereken mukayese parametreleri DMYP yığın testi sonucunda elde edilen değerlerle belirlenmektedir. DMYP yığın performansı Bölüm 3.2'de açıklanan test esaslarına göre ve Tablo 3.2'deki başlangıç parametreleri kullanılarak elde edilmiştir.

DMYP yığın testinde sabit anot akış debisinde, akım yoğunluğunun  $0,1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,  $0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  ve  $0,2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  değerleri için ayrı ayrı testler gerçekleştirilmiştir. Her bir testte 6 farklı KAD değeri ( $10, 12, 15, 20, 25$  ve  $30 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$ ) ve 3 farklı  $i_x$  değeri ( $0,05, 0,1$  ve  $0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) kullanılmaktadır. Her bir varyasyona ait test 6 defa tekrarlanmakta ve her bir ölçüm 1800 dk sürmektedir. Test sırasında anlık olarak metanol ve su besleme miktarı kontrol edilmektedir. Beslenen ve sistemden geri çıkan metanol miktarına ve oluşan akıma göre belirlenen metanol geçiş yoğunluğu değerinin ( $i_x$ ), girdi parametresi olarak deney başlangıcında belirlenen  $i_x$  değerine eşitlenmesi sistemin dengeye ulaştığını göstermektedir. DMYP yığını için Tablo 3.2’de verilen bazı çalışma parametrelerine ait sonuçlar, sistemin dengeye ulaşamaması veya talep edilen akım yoğunluğunun verilen KAD ve metanol konsantrasyonu ile sağlanamaması gibi nedenlerden dolayı alınamamakta yani DMYP verilen parametreler için çalışmasını gerçekleştirilememektedir. Bu sebeple özellikle yüksek akım yoğunlukları için elde edilen sonuç sayısı, test sayısından düşük olmaktadır. Tablo 5.4’te akım yoğunluğuna ve KAD’ye göre DMYP yığın testi sonucu elde edilmiş ve DMYP tek hücre testine girdi parametresi olarak ayarlanmış metanol konsantrasyonu ( $C_{\text{MeOH}}$ ) ve çalışma sıcaklığı (T) değerleri görülmektedir.

Tablo 5.4 Tek bir DMYP hücresinin testi için çalışma parametreleri

<i>No</i>	<i>i</i>	KAD	$C_{\text{MeOH}}$	T	<i>No</i>	<i>i</i>	KAD	$C_{\text{MeOH}}$	T	<i>No</i>	<i>i</i>	KAD	$C_{\text{MeOH}}$	T
<b>1</b>	0,1	0,01	1	76	<b>16</b>	0,15	0,015	0,95	67	<b>31</b>	0,15	0,02	1,4	59
<b>2</b>	0,15	0,01	1	76	<b>17</b>	0,15	0,012	0,55	66	<b>32</b>	0,15	0,02	0,7	59
<b>3</b>	0,2	0,015	1,1	74	<b>18</b>	0,1	0,015	1	65	<b>33</b>	0,1	0,015	0,65	58
<b>4</b>	0,15	0,012	1,1	74	<b>19</b>	0,1	0,01	0,55	65	<b>34</b>	0,2	0,03	1,4	58
<b>5</b>	0,1	0,01	1,1	73	<b>20</b>	0,2	0,025	1	64	<b>35</b>	0,15	0,03	1,1	57
<b>6</b>	0,1	0,01	0,8	73	<b>21</b>	0,015	0,02	1	63	<b>36</b>	0,15	0,025	1,5	57
<b>7</b>	0,15	0,015	1,2	71	<b>22</b>	0,05	0,02	0,7	63	<b>37</b>	0,2	0,03	0,75	57
<b>8</b>	0,1	0,012	0,5	71	<b>23</b>	0,2	0,02	1,2	63	<b>38</b>	0,1	0,025	1,1	56
<b>9</b>	0,1	0,015	0,9	70	<b>24</b>	0,15	0,015	0,6	63	<b>39</b>	0,15	0,025	0,75	55
<b>10</b>	0,15	0,012	0,9	70	<b>25</b>	0,1	0,012	0,6	62	<b>40</b>	0,1	0,02	1,5	55
<b>11</b>	0,1	0,01	0,9	70	<b>26</b>	0,2	0,03	0,95	61	<b>41</b>	0,15	0,03	1,5	54
<b>12</b>	0,15	0,01	0,5	69	<b>27</b>	0,1	0,025	1,3	60	<b>42</b>	0,1	0,03	1,1	53
<b>13</b>	0,1	0,012	0,95	68	<b>28</b>	0,15	0,025	1	60	<b>43</b>	0,15	0,025	1,5	53
<b>14</b>	0,2	0,02	1	68	<b>29</b>	0,2	0,025	0,75	60	<b>44</b>	0,1	0,02	0,75	53
<b>15</b>	0,1	0,015	1,25	67	<b>30</b>	0,1	0,02	1,1	59	<b>45</b>	0,15	0,03	0,8	52

DMYP yığın testi sonucunda toplanan 45 adet farklı çalışma parametresinde hücre voltajı sonucu elde edilmiş ve bu değerler Tablo 5.4'te çalışma sıcaklığına göre sıralanmıştır. Yığın testinden elde edilen sonuçlarla DMYP tek hücre testi için 0,5-1,5 M ve 55-75°C aralığında 3 farklı akım yoğunluğu için 45 adet test parametresi elde edilmiştir. Şekil 5.15'te tüm mukayese parametreleri metanol konsantrasyonu ve sıcaklığa bağlı olarak görülmektedir.

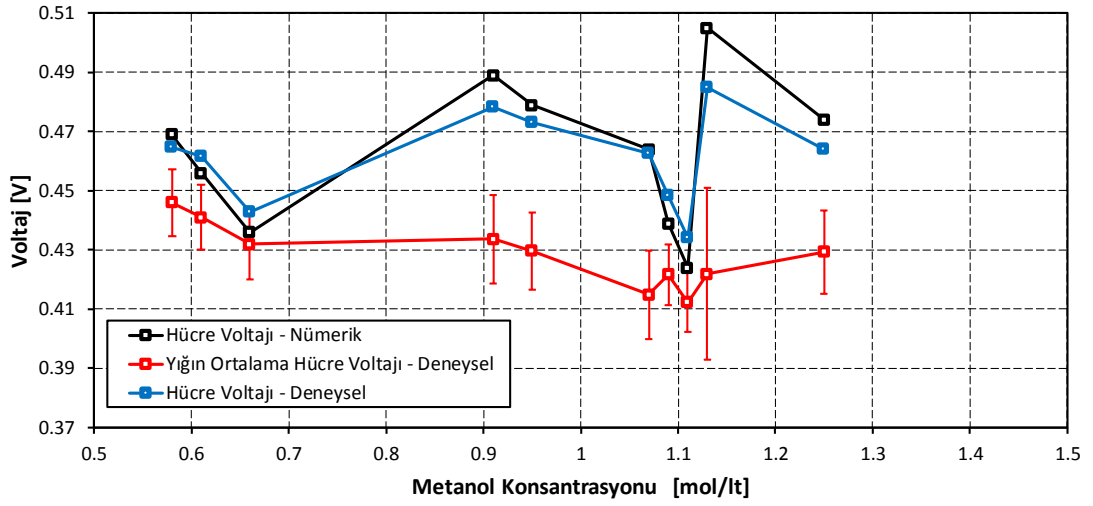


Şekil 5.15 Çeşitli akım yoğunlukları için metanol konsantrasyonuna ve sıcaklığa göre çalışma parametreleri (Metanol Konsantrasyonu:  $C_{MeOH}$ , Sıcaklık: T, Metanol Geçiş Akım Yoğunluğu:  $i_x$ , Katot Akış Debişi: KAD): 0,1 A·cm<sup>-2</sup> (a,b), 0,15 A·cm<sup>-2</sup> (c,d) ve 0,2 A·cm<sup>-2</sup> (e,f)

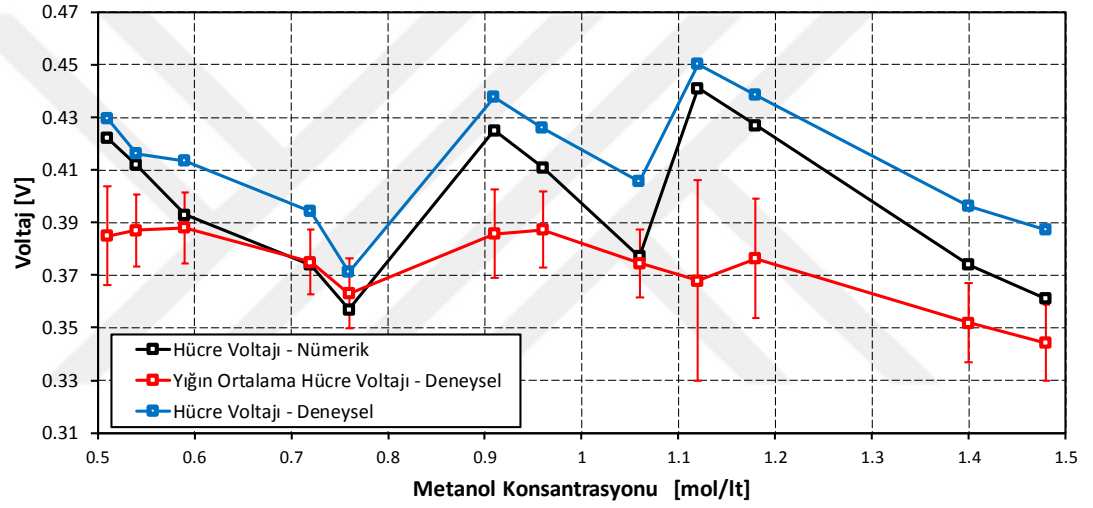
Akım yoğunluğunun  $0,1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  olması durumunda Şekil 5.15a-b,  $0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  olması durumunda Şekil 5.15c-d ve  $0,2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  olması durumunda Şekil 5.15e-f'de; konsantrasyona bağlı olarak T, KAD ve  $i_x$ , sıcaklığa bağlı olarak ise  $C_{\text{MeOH}}$ , KAD ve  $i_x$  değerleri yer almaktadır. Metanol konsantrasyonuna bağlı olan parametrelerin grafiklerinde T ve KAD değerleri aynı eksen, sıcaklığa bağlı olan parametrelerin grafiklerinde ise  $C_{\text{MeOH}}$  ve KAD değerleri aynı eksen ortak kullanılmaktadır.

Teorik DMYP modeli, tek hücre DMYP testi hücre voltajı ile DMYP kısa yığın ortalama hücre voltajına ait mukayese sonuçları, Şekil 5.15'te verilen çalışma parametrelerine göre, Şekil 5.16'da metanol konsantrasyonuna, Şekil 5.17'de ise sıcaklığa bağlı olarak gösterilmiştir. Mukayese sonucunun verildiği her iki grafikte de voltaj sonuçları, akım yoğunluğunun  $0,1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (Şekil 5.16a ve Şekil 5.17a),  $0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (Şekil 5.16b ve Şekil 5.17b) ve  $0,2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (Şekil 5.16c ve Şekil 5.17c) olması durumu için ifade edilmiştir. Ayrıca DMYP kısa yığına ait beş hücrenin ortalama hücre voltajı sonuçlarına standart sapma değerleri de ilave edilerek grafik üzerinde gösterilmiştir.

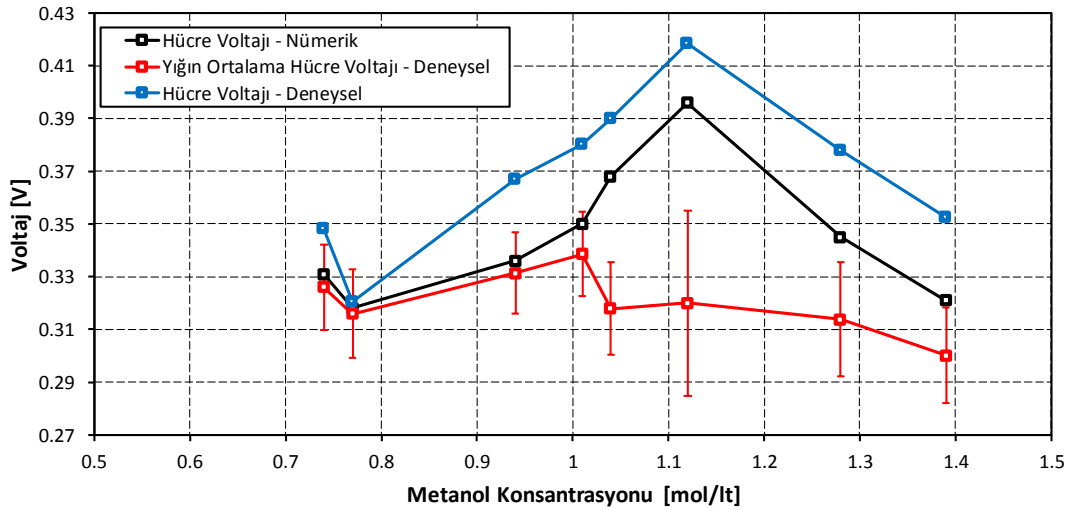
Şekil 5.16'da metanol konsantrasyonuna göre verilen hücre voltajı sonuçlarına göre,  $0,1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  için en yüksek hücre voltajı, nümerik ve deneysel hücre voltajı sonucu ile  $0,505 \text{ V}$  olarak elde edilmektedir. Bu sonuç değeri, sıcaklık ve metanol geçiş yoğunluğunun en yüksek, KAD'nin en düşük olduğu durumda meydana gelmektedir. Nümerik ve deneysel tek hücre voltajı sonucu, tüm akım yoğunluklarında birbirine yakın değerler verse de, yığın ortalama voltajı, özellikle metanol konsantrasyonunun arttığı durumlarda diğer sonuçlardan farklılaşmaktadır. Maksimum yığın ortalama voltajı  $0,445 \text{ V}$  olarak  $0,1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  için en düşük metanol konsantrasyonu değerinde meydana gelmektedir. Akım yoğunluğunun artmasıyla nümerik ve deneysel tek hücre voltajı sonucu arasındaki fark da açılmaktadır. En yüksek hücre voltajı değerine  $0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  için deneysel tek hücre voltajının  $0,45 \text{ V}$ , nümerik hücre voltajının  $0,4 \text{ V}$  ve deneysel yığın ortalama voltajının  $0,398 \text{ V}$  değerleri ile ulaşılmaktadır. KAD'nin en yüksek, sıcaklığın en düşük olduğu durumlarda tüm akım yoğunluklarındaki nümerik hücre voltajı, deneysel tek hücre voltajı ve deneysel yığın ortalama voltajı değerleri birbirine yakın olmaktadır.



a)



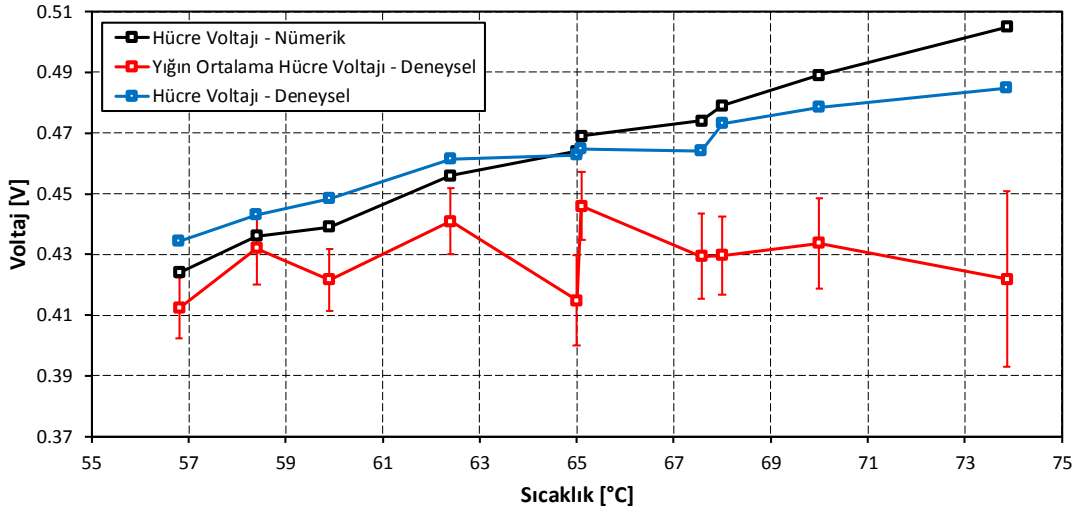
b)



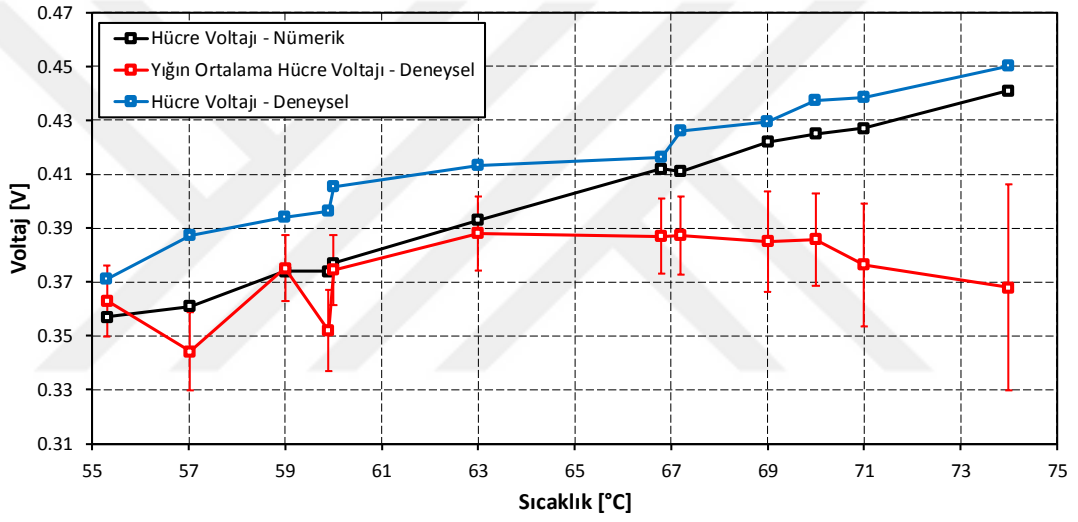
c)

Şekil 5.16 Çeşitli akım yoğunlukları için metanol konsantrasyonuna göre hücre voltajının mukayesesi: 0,1 A·cm<sup>-2</sup> (a), 0,15 A·cm<sup>-2</sup> (b) ve 0,2 A·cm<sup>-2</sup> (c)

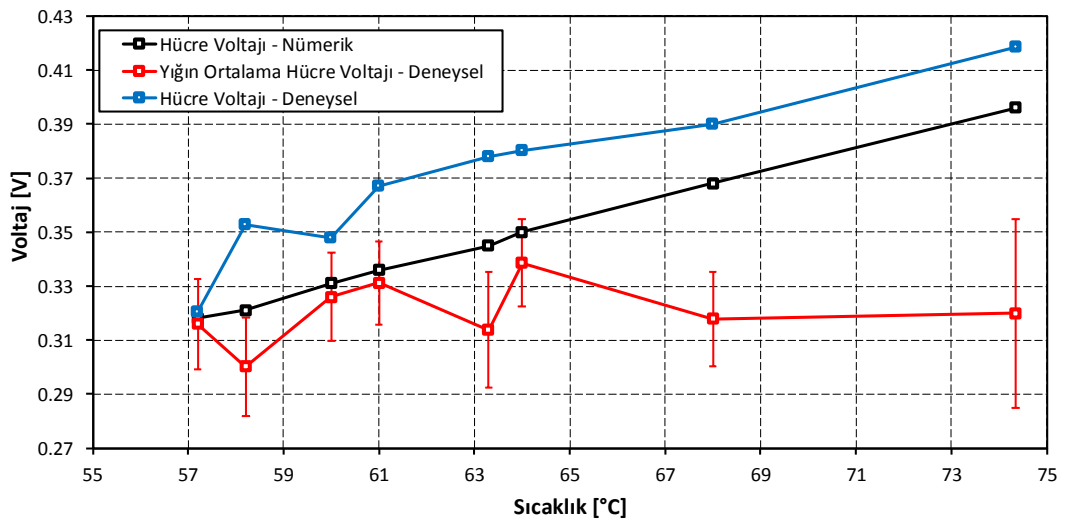




a)



b)



c)

Şekil 5.17 Çeşitli akım yoğunlukları için çalışma sıcaklığına göre hücre voltajının mukayesesi: 0,1 A·cm<sup>-2</sup> (a), 0,15 A·cm<sup>-2</sup> (b) ve 0,2 A·cm<sup>-2</sup> (c)

DMYP performansına etki eden en önemli parametrelerden birisi de sıcaklık değeridir. Bu sebeple nümerik hücre voltajı, deneysel tek hücre voltajı ve deneysel yığın ortalama voltajı sonuçlarının sıcaklığa göre sıralanması DMYP'nin çalışma karakteristiği hakkında daha doğrudan çıkarımlar yapma imkanı verebilecektir. Şekil 5.17'de sıcaklığa göre verilen hücre voltajı sonuçlarına göre, nümerik ve deneysel tek hücre DMYP voltajında doğrudan sıcaklıkla orantılı bir artış gözlenirken, deneysel yığın ortalama voltajında sıcaklığa bağlılık diğerlerine göre daha az olmaktadır. Deneysel yığın ortalama voltajında, metanol geçiş yoğunluğunun artmasıyla, sıcaklığın artmasına rağmen hücre voltajının azaldığı görülmektedir. Genel eğilim olarak tüm parametreler dikkate alınıp sonuçlar incelendiğinde ise ortaya çıkan hücre voltajı değerleri deneysel tek hücre voltajında en yüksek olup, deneysel yığın ortalama voltajında en düşük değerlerde olmaktadır.

## BÖLÜM ALTI

### SONUÇ

Çevresel ve ekonomik etkilerinden dolayı dünya genelinde içten yanmalı motor kullanan araçlardan ziyade, elektrikli ve hibrit taşıtlara yönelik araştırma ve geliştirme faaliyetleri, uzun bir süreden beri devam etmektedir. Bu kapsamda, uluslararası pazarda, yüksek satış sayılarına sahip birçok araç üreticisi, elektrikli ve hibrit araç tasarımı, analiz ve Ar-Ge alanında çalışma yapan yeni birimler kurmuş, bunun yanında sadece elektrikli veya hibrit araç üreticisi birçok yeni marka da ortaya çıkmıştır. Ülkemizde ise dünya pazarına girebilecek, elektrikli ve hibrit yerli araç geliştirmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Elektrikli taşıtlarda görülen düşük taşıt menzili ve yüksek batarya maliyeti gibi temel dezavantajlar sebebiyle, bataryaya ilave olarak başka bir enerji kaynağının daha kullanıldığı hibrit taşıtlar ön plana çıksa da hibrit taşıtlarda içten yanmalı motor kullanımı, bu dezavantajların tamamen giderilmesinin önüne geçmektedir. Bu sebeple araştırmacılar, içten yanmalı motorun olmadığı hibrit taşıt olarak yakıt pilli hibrit elektrikli taşıt üzerinde çalışmaya başlamışlardır. Diğer alternatiflere göre daha yeni ve maliyeti biraz daha yüksek olan yakıt pilli hibrit araçların, yakın zamanlarda performans ve maliyetindeki iyileşmelerle birlikte, gelecekte araç piyasasına tamamen hakim olacağı öngörülmektedir. Bunun için ülkemizde de, yakıt pili ve yakıt pilli hibrit taşıt için tasarım, modelleme, simülasyon, analiz ve test konusunda kaliteli ve üretim hedefli çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Bu amaca yönelik olarak bu çalışmada, taşıt tahrik komponentlerinin modellemesi, taşıtta kullanılacak bir yakıt pilinin deneysel olarak çalışma karakteristiklerinin belirlenmesi, batarya SOC değerinin belirlenmesi, işletme stratejisi tasarımı konularında çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda batarya tipinin, işletme stratejisinin ve yakıt pili modelleme tipinin taşıt çalışma karakteristikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada yakıt pili olarak, diğer yakıt pili çeşitlerine göre üretim ve işletme maliyeti daha düşük olan doğrudan metanollü yakıt pilinin (DMYP) kullanımı tercih edilmiştir.

DMYP modellemesi ve testi konusunda, Almanya'da bulunan Jülich Araştırma Merkezi (Forschungszentrum Jülich) ile kurulan ve 2017.KB.FEN.005 numaralı BAP projesi ile maddi olarak desteklenen koordinasyon sonucunda deneysel çalışmalar, tek hücre ve kısa yığın için gerçekleştirilmiştir. Çeşitli çalışma şartları ve çevre koşulları için deneylerden elde edilen sonuçların, DMYP matematiksel modelinde kullanılması ile geliştirilen özgün Yarı-Teorik DMYP modeli taşıt simülasyonlarında kullanılmıştır. Geliştirilen Yarı-Teorik model ile DMYP'nin işletilmesi gerçeğe yakın olarak modellenebilmiş ve gerçekleştirilen taşıt simülasyonlarının daha doğru sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, bir boyutlu modelleme, tek hücre ve yığın testi sonucunda elde edilen DMYP performansının mukayesesinin yapılmasıyla, hem yakıt pili modelinin hem de modellemede tek bir hücre bilgisinin alınmasının doğruluğunun gösterilmesi, çalışmanın bir diğer özgün yönünü oluşturmaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlar neticesinde, kullanılan batarya tipi ve işletme stratejisinin etkisine (Bölüm 5.1), Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik DMYP modeli ve işletme stratejisinin etkisine (Bölüm 5.2) ve bir boyutlu modelleme, tek hücre ve yığın testi sonucunda elde edilen DMYP performansının mukayesesine (Bölüm 5.3) yönelik elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Batarya veriminin batarya çalışma voltajı ile batarya açık devre voltajı arasındaki oran olarak tarif edilmesi ile çeşitli batarya tiplerinin tahrik simülasyonunda Strateji 1 ve Strateji 2 ile birlikte sırasıyla Li-iyon bataryada %93,1 ve %93,3, NiMH bataryada %93,8 ve %93,7 ve NiCd bataryada %92,2 ve %92,1 verime ulaşılmıştır.
- SOC değişimine göre batarya voltajı düşüşünün verime etkisi, batarya iç direncinden dolayı batarya veriminin düşmesine oranla oldukça yüksektir. Toplam batarya voltaj düşüşünde, batarya doluluk oranı (SOC) değişimine dayalı voltaj düşüşünün etkisi, Strateji 1 ve Strateji 2 ile birlikte sırasıyla Li-iyon bataryada %95,7 ve %95,9, NiMH bataryada %96,6 ve %96,7 ve NiCd bataryada %98,5 ve %98,1 olarak meydana gelmektedir.

- Eşit batarya kütlesi için simülasyonu yapılan araca göre birim batarya maliyeti Li-iyon batarya için 0,42 \$/W·h, NiMH batarya için 0,30 \$/W·h ve NiCd batarya için 0,31 \$/W·h olmaktadır.
- Simülasyon sonucuna göre en yüksek taşıt menziline her iki işletme stratejisi için de sırasıyla Li-iyon, NiMH ve NiCd bataryaların kullanılması durumunda ulaşılabilmektedir. Buna ilaveten Strateji 2 ile daha düşük batarya güç sarfiyatına ulaşıldığı için bu işletme stratejisinin kullanımı ile taşıt menziline artış sağlanılabilmektedir.
- Tek yakıt pili hücresinin testlerinden alınan optimum çalışma noktalarına göre, değişken metanol konsantrasyonu ( $C_{MeOH}$ ) ve katot akış debisi'nin (KAD), DMYP çalışması sırasında tercih edilmesi sonucunda, akım yoğunluğuna göre tek bir hücreden alınan voltaj değeri artmaktadır. Bu sebeple, eşit akım talebi için DMYP güç çıkışı değişken çalışma şartlarında daha az olmaktadır. Sabit rejimde çalışmada, değişken rejimde çalışmaya göre maksimum güç, düşük metanol konsantrasyonu ve KAD ile yüksek akım talebinin olduğu bölgelerde, %26 daha fazla meydana gelmektedir.
- DMYP'nin hem sabit hem de değişken metanol konsantrasyonu ve KAD (Yarı-Teorik ve Geliştirilmiş Yarı-Teorik) değerleri ile çalışmasının modellenerek gerçekleştirilen taşıt simülasyonu sonucunda maksimum DMYP güç çıkışına göre DMYP ekipmanları için maksimum güç sarfiyatı sırasıyla 4 W ve 3 W olmaktadır. Buna göre taşıt tahrikinde DMYP'nin değişken metanol konsantrasyonu ve KAD değerinde çalıştırılması güç tasarrufu açısından avantajlı olmaktadır.
- Değişken metanol konsantrasyonu ve KAD ile DMYP'nin çalışması halinde daha düşük güç çıkışı yakıt pilinden gerçekleşmekte, bunun neticesinde bataryanın SOC değerindeki düşüş daha yüksek olmaktadır. Değişken çalışma şartlarında, sabit çalışma rejimine göre, DMYP çalışma voltajı ve CO<sub>2</sub> üretimi yüksek, metanol tüketimi daha düşük olmaktadır.

- Tüm simülasyon süresince metanol geçiş yoğunluğu, elektrokimyasal yolla üretilen su miktarı, metanol geçişi sebebiyle üretilen su miktarı ve anottan katota su geçişi değerleri, değişken metanol konsantrasyonu ve KAD'nin kullanılmasıyla düşmektedir.
- Çalışma parametrelerinin DMYP performansına etkisi ve DMYP performansında model ile deneysel çalışmalar arasındaki farklılıkların belirlenmesine yönelik mukayese çalışmasında, en yüksek DMYP hücre voltajı sıcaklığın en yüksek olduğu çalışma durumunda,  $0,1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  için  $0,505 \text{ V}$  ile nümerik hesaplama sonucunda,  $0,15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  ve  $0,2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  için sırasıyla  $0,45 \text{ V}$  ve  $0,42 \text{ V}$  ile tek hücre deneyi sonucunda elde edilmiştir.
- DMYP performansını etkileyen en önemli parametrenin çalışma sıcaklığı olduğu görülmüş, özellikle nümerik hesaplama ve tek hücre testi sonuçlarına göre, hücre voltajı ile çalışma sıcaklığı arasında doğru orantılı bir değişim gözlenmiştir.
- DMYP, yığın olarak kullanıldığında ise her ne kadar sıcaklık artışına göre ortalama hücre voltajı artsa da, metanol konsantrasyonu, KAD ve metanol geçiş yoğunluğu DMYP performansını etkilemektedir. Örneğin; özellikle yüksek sıcaklıklarda etkisi daha fazla olmakla birlikte, çalışma sıcaklığının artışına rağmen, metanol geçiş yoğunluğunun artması ve KAD'nin düşmesine bağlı olarak DMYP ortalama hücre voltajı azalmaktadır. Bu sebeple DMYP ortalama hücre voltajında gerçekleşen azalma miktarı, düşük akım yoğunluklarında daha yüksek değerde olmaktadır.
- DMYP'den talep edilen akım yoğunluğunun sağlanabilmesi için gerekli metanol miktarını içeren metanol konsantrasyonuna sahip metanol-su karışımının sisteme beslenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, belirli metanol konsantrasyonunun altındaki yakıt beslemelerinde yakıt pili çalışması başarısız olmaktadır. Yakıt pilinin sorunsuz çalışması durumunda, metanol konsantrasyonunun hücre voltajına etkisi çok az olmakla birlikte, yüksek akım yoğunluğunda yüksek metanol konsantrasyonu ile daha fazla DMYP hücre voltajı elde edildiği gözlemlenmiştir.

Yukarıda elde edilen bulgulara göre doğrudan metanollü yakıt piline dayalı hibrit taşıt tahrikinde çalışma parametrelerinin yüksek değerlerde (KAD için  $15 \text{ ml}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dk}^{-1}$  ve  $C_{\text{MeOH}}$  için 1 M) sabit bir şekilde kullanılması (Yarı-Teorik modelleme ile ifade edilen çalışma durumu) sonucunda belirli bir akım yoğunluğu talebi için simülasyon başlangıcında düşük DMYP voltajı ve buna bağlı olarak düşük DMYP çıkış gücü ile yüksek batarya güç sarfiyatı elde edilmektedir. Akım yoğunluğu talebine göre değişken KAD ve  $C_{\text{MeOH}}$  ile DMYP'nin işletilmesi durumunda (Geliştirilmiş Yarı-Teorik) ise simülasyon başlangıcında aynı akım yoğunluğu için daha yüksek DMYP voltajı ve buna bağlı olarak yüksek DMYP çıkış gücü ile düşük batarya güç sarfiyatı elde edilmektedir. Fakat simülasyonun ilerleyen zamanlarında Yarı-Teorik modelde belirtilen çalışma durumunda, SOC değerinin hızlı düşüşüne bağlı olarak yakıt pilinden daha yüksek çalışma akımı talep edilmekte ve aynı EM akım ihtiyacı için bataryada düşük güç çıkışı meydana gelmektedir. Bu sebeple, Geliştirilmiş Yarı-Teorik modelde verilen çalışma durumu için simülasyon boyunca tahrik verimi yüksek ve simülasyon sonunda bataryada mevcut SOC değeri daha yüksek olmaktadır.

DMYP'nin her iki işletme durumu (sabit ve değişken çalışma parametreleri) için batarya ve DMYP'den alınan güç değerlerinin farklılık göstermesi, bu iki alternatif kullanımın, tasarımı yapılan aracın batarya kapasitesi, yakıt tankı hacmi, yakıt pili hücre sayısı ve sistem maliyeti gibi kriterlere göre maksimum taşıt menzili için tercih edilebileceğini göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre,

- DMYP'nin sabit işletme parametrelerinde çalıştırılması, batarya kapasitesinin düşük seçilebilmesine olanak sağlamakla birlikte DMYP yakıt tankının daha büyük seçilmesini gerektirmektedir.
- Değişken işletme parametrelerinde çalışmada ise DMYP boyutları düşük tutulabilmekte, buna karşın tahrik sisteminde daha yüksek batarya kapasitesi gerekmektedir.

Seçilecek batarya için hesaplanan kapasite değeri kadar batarya tipinin belirlenmesi ve çalışma koşuluna göre batarya tipinin, batarya performansına etkisinin de tetkik edilmesi gerekmektedir. DMYP yığnında ise deneysel olarak bulunan sonuçlara göre çalışma sıcaklığının etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışma kapsamında, DMYP için gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçlar kullanılarak geliştirilen modelleme ve simülasyon çalışmaları ile yakıt pilli hibrit bir taşıt tahrikine ait yukarıdaki genel sonuç ve yargılar ortaya konmuştur. Bu çalışma kapsamında geliştirilen model ile daha yüksek kapasiteli iş istasyonları kullanılarak, her kategorideki hibrit taşıt için tam zamanlı tahrik simülasyonlarının yapılabilmesi mümkündür. Bu sayede, geliştirilecek ve üretilecek yakıt pilli hibrit taşıtlar için tasarım, modelleme, Ar-Ge ve simülasyon çalışmaları için örnek teşkil edecek ve/veya kullanılabilir bir çalışma sunulmuştur.



## KAYNAKLAR

AA Portable Power Corp., [AAPPC] (b.t.). *Battery packs/chargers/accessories*. 20 Ocak 2019, <https://www.batteryspace.com/>

Akpınar, E. (2011). *Elektrik makinalarının temel ilkeleri* (3. Basım). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Argyropoulos, P., Scott, K., Shukla, A.K. ve Jackson, C. (2002). Empirical model equations for the direct methanol fuel cell. *Fuel Cells*, 2, 78-82.

Badin, F. (2013). *Hybrid vehicles from components to system* (1. Baskı). Paris: Editions TECHNIP.

Bassam, A.M., Phillips, A.B., Turnock, S.R. ve Wilson, P.A. (2016). An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 22453-22464.

Bresciani, F., Rabissi, C., Casalegno, A., Zago, M. ve Marchesi, R. (2014). Experimental investigation on DMFC temporary degradation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 21647-21656.

Carignano, M.G., Castello, R.C., Roda, V., Nigro, N.M., Junco, S. ve Feroldi, D. (2017). Energy management strategy for fuel cell-supercapacitor hybrid vehicles based on prediction of energy demand. *Journal of Power Sources*, 360, 419-433.

Casalegno, A., ve Marchesi, R. (2008). DMFC anode polarization: Experimental analysis and model validation. *Journal of Power Sources*, 175, 372-382.

Casolari, B.L., Ellington, M.A., Oros, J.M., Schuttinger, P., Radley, C.J., Kiley, K.A. ve Klebanoff, L.E. (2014). Model study of a fuel cell range extender for a

neighborhood electric vehicle (NEV). *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 10757-10787.

Chambon, P., Curran, S., Huff, S., Love, L., Post, B., Wagner, R., Jackson, R. ve Green, J. (2017). Development of a range-extended electric vehicle powertrain for an integrated energy systems research printed utility vehicle. *Applied Energy*, 191, 99-110.

Chau, K.T. (2015). *Electric vehicle machines and drives design, analysis and application* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

Chen, C.Y., Shiu, J.Y., ve Lee., Y.S. (2006). Development of a small DMFC bipolar plate stack for portable applications. *Journal of Power Sources*, 159, 1042-1047.

Colpan, C.O., Cruickshank, C.A., Matida, E. ve Hamdullahpur, F. (2011). 1D modeling of a flowing electrolyte-direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources*, 196, 3572-3582.

Colpan, C.O., Fung, A., ve Hamdullahpur, F. (2012). 2D modeling of a flowing-electrolyte direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources*, 209, 301-311.

Çolpan, C.Ö. (2013). Akan elektrolitli doğrudan metanol yakıt pilinin modellenmesi. *Mühendis ve Makina*, 54 (642), 30-40.

Das, H.S., Tan, C.W. ve Yatim, A.H.M. (2017). Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 268-291.

Du, J., Chen, J., Song, Z., Gao, M. ve Ouyang, M. (2017). Design method of a power management strategy for variable battery capacities range-extended electric vehicles to improve energy efficiency and cost-effectiveness. *Energy*, 121, 32-42.

- Ehsani, M., Gao, Y. ve Emadi, A. (2010). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles fundamentals, theory, and design* (2. Baskı). Boca Raton: CRC Press.
- Falcao, D.S., Oliveira, V.B., Rangel, C.M. ve Pinto, A.M.F.R. (2015). Experimental and modeling studies of a micro direct methanol fuel cell. *Renewable Energy*, 74, 464-470.
- Fernandez, R.A., Cilleruelo, F.B., ve Martinez, I.V. (2016). A new approach to battery powered electric vehicles: A hydrogen fuel-cell-based range extender system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 4808-4819.
- Feroldi, D. ve Carignano, M. (2016). Sizing for fuel cell/supercapacitor hybrid vehicles based on stochastic driving cycles. *Applied Energy*, 183, 645-658.
- Fletcher, T. (2017). *Optimal energy management strategy for a fuel cell hybrid electric vehicle*. Doktora Tezi, Loughborough University, Loughborough.
- Fontela, P., Soria, A., Mielgo, J., Sierra, J.F., Blas, J., Gauchia, L. ve Martinez, J.M. (2007). Airport electric vehicle powered by fuel cell. *Journal of Power Sources*, 169, 184-193.
- Garcia, B.L., Sethuraman, V.A., Weidner, J.W., White, R.E. ve Dougal, R. (2004). Mathematical model of a direct methanol fuel cell. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 1, 43-48.
- Ge, J. ve Liu, H. (2005). Experimental studies of a direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources*, 142, 56-69.
- Gou, B., Na, W.K., ve Diong, B. (2010). *Fuel cells modeling, control, and applications* (1. Baskı). Boca Raton: CRC Press.

- Guenther, M.B. (2001). *Modelling and design optimization of low speed fuel cell hybrid electric vehicles*. Yüksek Lisans Tezi, University of Victoria, Victoria.
- Guzzella, L. ve Sciarretta, A. (2005). *Vehicle propulsion systems introduction to modeling and optimization* (1. Baskı). Berlin: Springer.
- Hacquard, A. (2005). *Improving and understanding direct methanol fuel cell (DMFC) performance*. Yüksek Lisans Tezi, Worcester Polytechnic Institute, Worcester.
- Hayes, J.G. ve Goodarzi, G.A. (2018). *Electric powertrain energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Hofmann, P. (2014). *Hybridfahrzeuge ein alternatives antriebssystem für die zukunft* (2. Baskı). Viyana: Springer.
- Huang, P.H., Kuo, J.K. ve Han, C.Y. (2017). Numerical investigation into slope-climbing capability of fuel cell hybrid scooter. *Applied Thermal Engineering*, 110, 921-930.
- Huang, M., Wen, P., Zhang, Z., Wang, B., Mao, W., Deng, J. ve Ni, H. (2016). Research on hybrid ratio of fuel cell hybrid vehicle based on ADVISOR. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 16282-16286.
- Hwang, J.J., Chen, Y.J. ve Kuo, J.K. (2012). The study on the power management system in a fuel cell hybrid vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 4476-4489.
- Hwang, J.J. ve Chang, W.R. (2012). Characteristic study on fuel cell/battery hybrid power system on a light electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 207, 111-119.

- Jager, B., Keulen, T. ve Kessels, J. (2013). *Optimal control of hybrid vehicles* (1. Baskı). Viyana: Springer.
- Jiang, J. ve Zhang, C. (2015). *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Joh, H.I., Hwang, S.Y., Cho, J.H., Ha, T.J., Kim, S.K., Moon, S.H. ve Ha, H.Y. (2008). Development and characteristics of a 400 W-class directmethanol fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 7153-7162.
- Joseph, A.J., Abdulkareem, A.S., Jimoh, A. ve Afolabi, A.S. (2015). Theoretical energy and exergy analyses of direct methanol fuel cell. *Advances in Materials Science and Applications*, 4 (3), 63-75.
- Karaoğlan, M.U. (2014). *Elektrik tahrikli bir binek otomobilin tahrik sisteminin matematiksel modellenmesi ve simülasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Karaoğlan, M.U., Kuralay, N.S. ve Colpan, C.O. (2019). Investigation of the effects of battery types and power management algorithms on drive cycle simulation for a range-extended electric vehicle powertrain. *International Journal of Green Energy*, 16 (1), 1-11.
- Khajepour, A., Fallah, S. ve Goodarzi, A. (2014). *Electric and hybrid vehicles technologies, modeling and control: a mechatronic approach* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Kim, D., Lee, J., Lim, T.H., Oh, I.H. ve Ha, H.Y. (2006). Operational characteristics of a 50W DMFC stack. *Journal of Power Sources*, 155, 203-212.
- Kuralay, N.S. (2008). *Motorlu taşıtlar temel ve tasarım esasları, yapı elemanları Cilt I tahrik ve sürüş sistemleri* (1. Baskı). İzmir: Makina Mühendisleri Odası.

- Kuralay, N.S. (2013). *Motorlu taşıtlarda hibrit tahrik temel ve tasarım esasları, yapı elemanları, çözümlü tasarım problemleri* (1. Baskı). İzmir: Makina Mühendisleri Odası.
- Kurzweil, P. (2013). *Brennstoffzellentechnik grundlagen, komponenten, systeme, anwendungen* (2. Baskı). Viyana: Springer.
- Larminie, J. ve Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained* (2. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Larminie, J. ve Lowry, J. (2003). *Electric vehicle technology explained* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Lee, J., Lee, S., Han, D., Gwak, G. ve Ju, H. (2017). Numerical modeling and simulations of active direct methanol fuel cell (DMFC) systems under various ambient temperatures and operating conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 1736-1750.
- Li, J., Wang, Y., Chen, J. ve Zhang, X. (2017). Study on energy management strategy and dynamic modeling for auxiliary power units in range-extended electric vehicles. *Applied Energy*, 194, 363-375.
- Li, T., Liu, H., Zhao, D. ve Wang, L. (2016). Design and analysis of a fuel cell supercapacitor hybrid construction vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 12307-12319.
- Linden, D. ve Reddy, T.B. (Ed.). (2001). *Handbook of batteries* (3. Baskı). New York: McGraw-Hill.
- Mashadi, B. ve Crolla, D. (2012). *Vehicle powertrain systems* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

- Marx, N., Hissel, D., Gustin, F., Boulon, L. ve Agbossou, K. (2017). On the sizing and energy management of an hybrid multistack fuel cell e Battery system for automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 1518-1526.
- Marzougui, H., Amari, M., Kadri, A., Bacha, F. ve Ghouili, J. (2017). Energy management of fuel cell/ battery/ ultracapacitor in electrical hybrid vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 8857-8869.
- Mench, M.M. (2008). *Fuel cell engines* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Mergel, J., Jansen, H., Müller, M., Wilhelm, J. ve Stolten, D. (2012). Development of direct methanol fuel cell systems for material handling applications. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 9, 031011-031011-10.
- Mi, C., Masrur, M.A. ve Gao, D.W. (2011). *Hybrid electric vehicles principles and applications with practical perspectives* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Miranda, P.E.V., Carreira, E.S., Icardi, U.A. ve Nunes, G.S. (2017). Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 13949-13959.
- Mokrani, Z., Rekioua, D., Mebarki, N., Rekioua, T. ve Bacha, S. (2017). Proposed energy management strategy in electric vehicle for recovering power excess produced by fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 19556-19575.
- Neubauer, J., Brooker, A. ve Wood, E. (2013). Sensitivity of plug-in hybrid electric vehicle economics to drive patterns, electric range, energy management, and charge strategies. *Journal of Power Sources*, 236, 357-364.

- Odeim, F., Roes, J., Wülbeck, L. ve Heinzl, A. (2014). Power management optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles with experimental validation. *Journal of Power Sources*, 252, 333-343.
- Ogburn, M.J. (2000). *Systems integration, modeling, and validation of a fuel cell hybrid electric vehicle*. Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Petinrin, M.O., Adebayo, M.B., Adelowokan, A.T. (2014). A review on hydrogen as a fuel for automotive application. *International Journal of Energy Engineering*, 4 (4), 75-80.
- Premkumar, S., Prabhakar, S., Lingeswaran, K. ve Ramnathan, P. (2014). Development of direct methanol fuel cell and improving the efficiency. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 20 (10), 1277-1280.
- Rahn, C.D. ve Wang, C.Y. (2013). *Battery management engineering* (1. Baskı). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Reif, K., Noreikat, K.E. ve Borgeest, K. (Ed.). (2012). *Kraftfahrzeug-hybridantriebe grundlagen, komponenten, systeme, anwendungen* (1. Baskı). Viyana: Springer.
- Revankar, S. ve Majumdar, P. (2014). *Fuel cells principles design and analysis* (1. Baskı). Boca Raton: CRC Press.
- Same, A., Stipe, A., Grossman, D. ve Park, J.W. (2010). A study on optimization of hybrid drive train using Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR). *Journal of Power Sources*, 195, 6954-6963.
- Siebke, A., Schnurnberger, W., Meier, F. ve Eigenberger, G. (2003). Investigation of the limiting processes of a DMFC by mathematical modeling. *Fuel Cells*, 3, 37-47.



- Szumanowski, A. (2013). *Hybrid electric power train engineering and technology: modeling, control, and simulation* (1. Baskı). USA: Engineering Science Reference.
- Tejwani, V. ve Suthar, B. (2017). Power management in fuel cell based hybrid systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 14980-14989.
- Tolj, I., Lototskyy, M.V., Davids, M.W., Pasupathi, S., Swart, G. ve Pollet, B.G. (2013). Fuel cell-battery hybrid powered light electric vehicle (golf cart): Influence of fuel cell on the driving performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 10630-10639.
- Turkmen, A.C., Solmaz, S. ve Celik, C. (2017). Analysis of fuel cell vehicles with advisor software. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1066-1071.
- Wang, Z.H. ve Wang, C.Y. (2003). Mathematical modeling of liquid-feed direct methanol fuel cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 150 (4), 508-519.
- Wilhelm, J., Jansen, H., Mergel, J. ve Stolten, D. (2011). Energy storage characterization for a direct methanol fuel cell hybrid system. *Journal of Power Sources*, 196, 5299-5308.
- Wilhelm, J.C. (2010). *Hybridisierung und regelung eines mobilen direktmethanol-brennstoffzellen-systems* (73. Cilt). Jülich: Forschungszentrums Jülich / Reihe Energie & Umwelt: Reihe Energie & Umwelt.
- Williamson, S.S. (2013). *Energy management strategies for electric and plug-in hybrid electric vehicles* (1. Baskı). Viyana: Springer.
- Wu, B. (2010). *Fuel cell hybrid electric vehicle powertrain modelling and testing*. Doktora Tezi, Imperial College London, Londra.

Xi, J., Li, M. ve Xu, M. (2014). Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles. *Applied Energy*, 134, 332-341.

Xie, S., Xiong, R., Zhang, Y. ve He, H. (2017). The estimation of state of charge for power battery packs used in hybrid electric vehicle. *Energy Procedia*, 105, 2678-2683.

Varnhagen, S., Same, A., Remillard, J. ve Park, J.W. (2011). A numerical investigation on the efficiency of range extending systems using Advanced Vehicle Simulator. *Journal of Power Sources*, 196, 3360-3370.

Zhang, X. ve Mi, C. (2011). *Vehicle power management modeling, control and optimization* (1. Baskı). Viyana: Springer.