

# Yakıt Hücreli Bir Hibrit Aracın Büyük-Patlama Büyük-Çöküş Algoritması ile Optimal Enerji Yönetimi

## Optimal Energy Management for a Fuel Cell Hybrid Vehicle via Big-Bang Big-Crunch Algorithm

Ali Kerem Yalçın<sup>1</sup>, Metehan Vural<sup>2</sup>, Sabri Yılmaz<sup>3</sup>, Cansu Emron<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>AVL Araştırma ve Mühendislik, İstanbul, Türkiye

alikerem.yalcin@avl.com  
metehan.vural@avl.com  
sabri.yilmaz@avl.com  
cansu.emron@avl.com

### Özetçe

Bu çalışma, bir yakıt hücreli elektrikli aracın (YHEA) modellenmesi ve Büyük-Patlama Büyük-Çöküş (BPBÇ) optimizasyon algoritması temelli enerji yönetim sisteminin geliştirilmesi üzerine yapılmıştır. YHEA'larda bulunan yakıt hücresi ve bataryanın farklı dinamiklere sahip olması, birlikte uyum içinde çalışmalarını mümkün kılacak bir enerji yönetim sisteminin ihtiyacını doğurmaktadır. Bu maksatla çalışmada, Toyota Mirai model bir aracın güç aktarım sistemi, aracın enerji tüketim analizi için gerekli çıktıları verecek şekilde modellenmiştir. Ardından, Büyük-Patlama Büyük-Çöküş algoritması kullanılarak farklı sürüş koşullarında minimum enerjiyi tüketmeyi ve güç kaynaklarını daha az yaşlandırmayı hedefleyen bir enerji yönetim sistemi geliştirilmiştir. Çalışma sonunda ise simülasyon sonuçlarıyla BPBÇ optimizasyon algoritmasının bir YHEA'nın enerji yönetiminde global optimuma yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Yöntem gerçek zamanlı bir çözüm sunmamaktadır; fakat global optimuma yakın sonuçlara yakınsayabilmesi açısından, gerçek zamanlı çözümlerin tasarımında bir kıyas yöntemi (benchmark) olma potansiyeline sahip olduğu anlaşılmıştır.

### Abstract

This study is conducted on the modeling of a fuel cell electric vehicle (FCEV) and the development of an energy management system based on the Big-Bang Big-Crunch (BBBC) optimization algorithm. The different dynamics of the fuel cell and battery in FCEVs necessitate the need for an energy management system that allows them to work together in harmony. To achieve this purpose, the powertrain system of a Toyota Mirai model vehicle has been modeled to provide the necessary outputs for the analysis of the vehicle's energy consumption. Subsequently, an energy management system aiming to minimize energy consumption and power source degradation under different driving conditions has been developed using the Big-Bang Big-Crunch algorithm. At the end of the study, simulation results demonstrate that the BBBC optimization algorithm provides results close to the global optimum for energy management in an FCEV. Although the method does not offer real-time solutions, its ability to successfully find results close to the global optimum with a high

convergence speed suggests its potential as a benchmark method in the design of real-time energy management strategies.

### 1. Giriş

Yakıt hücreli elektrikli araçlar, sahip oldukları çeşitli avantajlar nedeniyle sürdürülebilir ve çevre dostu ulaşımın geleceğinde önemli rol oynamaktadır. Bu araçlar, elektrik enerjisi üretmek için hidrojeni yakıt olarak kullanır ve yalnızca su buharı ve ısı gibi çevreye zararsız yan ürünler ortaya çıkarır [1]. Bu sebeple YHEA teknolojisinin geliştirilmesi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve karbon emisyonlarını düşürmek için kritik bir adım olup, gelecek açısından önemini artırarak devam ettirmektedir [2].

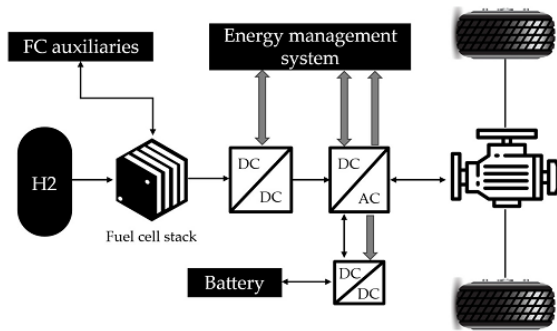
Yakıt hücresi, kimyasal olarak depolanmış enerjiyi elektrokimyasal bir proses sonucunda elektrik enerjisine dönüştürür. Bu kimyasal proses, reaktantların oksijen ve hidrojen olduğu bir redoks tepkimesidir. Tepkime sonucunda ise elektron, su ve ısı açığa çıkmaktadır. Reaktantlar yakıt hücresine beslendiği sürece ve reaksiyon için şartlar (sıcaklık, beslenen reaktant miktarı, vb.) uygun olduğu takdirde yakıt hücresi elektrik enerjisi üretmeye devam etmektedir. Batarya ise yakıt hücresine benzer şekilde bir elektrokimyasal tepkime sonucunda kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür, fakat yakıt hücresinden farklı olarak kimyasal enerjiyi kendi üzerinde depolamaktadır. Kompakt yapısı nedeniyle yakıt hücresine göre daha hızlı bir dinamiğe sahip olan batarya, özellikle güç talebinin anlık arttığı durumlarda yakıt hücresini destekleyici ikincil bir kaynak olarak yakıt hücreli hibrit araçlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat enerji yoğunluğunun yakıt hücresine göre düşük olması nedeniyle batarya, kesintisiz olarak güç üretmekte yakıt hücresi kadar başarılı değildir. Bu gibi farklar, yakıt hücresi ve bataryanın dengeli ve uyumlu kullanılması için çeşitli enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Literatüre bakıldığında kural tabanlı, optimizasyon tabanlı ve öğrenme tabanlı olmak üzere enerji yönetim sistemlerinin üç ana başlıkta toplandığı görülmektedir. Optimizasyon temelli yöntemlerin içerisinde, diğerlerinden farklı olarak gerçek zamanlı çözüm üretmeyen fakat global optimum çözümü arayan çevrimdışı yöntemler vardır. Örneğin dinamik programlama (DP), global optimum

noktayı bulmayı garanti eder; fakat çözüm süresi çok uzundur [3]. Son yıllara bakıldığında; Genetik Algoritma [4,5], Parçacık Sürü Optimizasyonu [6,7] ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu [8,9] gibi popülasyon bazlı algoritmaların hibrit enerji sistemlerinin yönetiminde kullanıldığı görülmüştür. Literatüre bakıldığında bir diğer popülasyon bazlı optimizasyon algoritması olan Büyük-Patlama Büyük-Çöküş algoritmasının, sürekli çözüm uzayında çözüm bulma konusunda rekabetçi bir algoritma olmasına rağmen YHEA'nın enerji yönetiminde henüz denenmemiş olduğu görülmüştür. Ayrıca BPBÇ, enerji yönetimi uygulamalarında kabul görmüş ve yaygın kullanılan klasik GA'ya karşı çeşitli uygulamalarda birçok kez daha üstün sonuçlar vermiştir [10].

Makalenin ikinci bölümünde aracın alt sistemlerinin enerji verimliliğine yönelik matematiksel ifadeleri ortaya konmuş ve model simülasyonda çalışır hale getirilmiştir. Üçüncü bölümde ise Büyük-Patlama Büyük-Çöküş algoritması kullanılarak optimizasyon bazlı enerji yönetim sisteminin geliştirilmesi anlatılmıştır. Dördüncü bölümde simülasyon sonuçları verilmiş, beşinci bölümde ise sonuçlara dair çıkarımlar paylaşılmış ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

## 2. Araç Modeli

Bu çalışmada, Toyota Mirai parametrelerine dayalı bir araç modellemesi için geriye dönük modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Gerçekte sürücünün gaz pedalı komutuyla güç kaynaklarında açığa çıkardığı tahrik sonucunda araç hız kazanmaktadır; ancak geriye dönük modelleme yaklaşımında, araç hızı esas alınarak güç kaynaklarının operasyon çıktıları hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım kuasi-statik kabule dayanır, yani referans araç hızı noktası için hesaplanan değerler (örn: tork, motor hızı vb.), sistemin sürekli hal yanıtı olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzden sistemin geçici hal yanıtı tamamen simüle edilememektedir, fakat bu durumun yakıt tüketimi hesabında önemli bir sapmaya neden olmadığı ve model karmaşıklığını düşürdüğü bilinmektedir [11]. Toyota Mirai'de, yakıt hücresi sistemi birincil güç kaynağı olarak çalışırken; batarya, yakıt hücresinin güç talebini karşılayamadığı durumlarda, örneğin anlık artan güç gereksinimleri ve rejeneratif frenleme sırasında talebi karşılamaktadır [12]. Çalışmada, aracın güç aktarma sistemi; tek vitesli şanzıman, elektrik makinesi, enerji yönetim kontrol ünitesi, DCDC dönüştürücüler, batarya ve yakıt hücresi sistemi olmak üzere birden fazla alt sisteme ayrılarak incelenmiştir. Aracın topolojisine ilişkin şema, Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. YHEA Güç Aktarma Sisteminin Şeması [13]

## 2.1. Araç Dinamiği

Bu bölümde, Şekil 1'de gösterilen güç aktarma sistemi sadece araç dinamiği kapsamında sunulmuştur. Modelde aracın boyolanasına dinamiklerini temsil etmek amacıyla, aracın hareketi için gerekli güç, yol aracının direnç kuvvetlerine dayalı olarak Eşitlik (1), (2), (3)'te hesaplanmıştır.

$$F_r = 0.01 \cdot \left(1 + \frac{v}{160}\right) \quad (1)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot v^2 \quad (2)$$

$$F_a = M \cdot g \cdot \sin\theta \quad (3)$$

Bu denklemlerde,  $F_r$  yol ve lastikler arasındaki etkileşimden kaynaklanan yuvarlanma direncini [N],  $F_d$  aerodinamik etkiden kaynaklanan hava direncini [N] ve  $F_g$  ise araç yokuşlu bir yolda seyir halindeyken yerçekimi ivmesinden kaynaklanan direnci [N] temsil etmektedir. Direnç hesabında kullanılan parametreler ve sayısal değerleri Tablo 1'de yer almaktadır. Aracın modellenmesinde yanal dinamiklerin etkisi dikkate alınmamıştır.

Tablo 1. Toyota Mirai (1. Nesil) Araç Parametreleri [12]

Parametreler	Sembol	Birim	Değer
Araç hızı	v	m/s	[0,48]
Hava yoğunluğu	$\rho$	kg / m <sup>3</sup>	0.29
Aerodinamik sürütme katsayısı	$C_d$	-	1.19
Aracın ön yüz alanı	$A_f$	m <sup>2</sup>	2.23
Aracın brüt kütlesi	M	kg	1927
Yerçekimi ivmesi	g	m / s <sup>2</sup>	9.81
Yol eğimi	$\theta$	rad	[0,0.38]
Şanzıman verimliliği	$\eta_{sz}$	-	0.98
Elektrik Makinesi verimliliği	$\eta_{em}$	-	0.95
DCDC dönüştürücü verimliliği	$\eta_{dcdc}$	-	0.98

Ayrıca, ivmelenme veya yavaşlama durumlarında aracın eylemsizliğinden doğan etki de denklemlere dahil edilerek tekerleklerdeki güç Eşitlik (4)'teki gibi hesaplanmıştır.

$$P_{tekerlek}(t) = v(t) \cdot \left(m \cdot \frac{d}{dt}v(t) + F_r + F_d + F_g\right) \quad (4)$$

Burada  $P_{tekerlek}$  aracın seyir halindeyken anlık olarak tekerleklerdeki karşılanması gereken gücü [W] temsil etmektedir.

## 2.2. Şanzıman Sistemi

Elektrikli araçların çoğunda olduğu gibi Toyota Mirai'de de tek dişli oranına sahip bir şanzıman bulunmaktadır [12]. Şanzıman sisteminde tekerleklerdeki güç ile elektrik motorunda karşılanması gereken güç arasındaki ilişki verilmiştir. Bu çalışmada yalnızca aracın hareket dinamiği göz önünde bulundurulurken, şanzıman ve elektrik motoru gibi organların dinamikleri incelenmeyip bu organların yalnızca enerji

tüketimine olan etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak şanzımanda oluşacak kayıp düşünüldüğünde; şanzımanın tekerleklerle aktarmak üzere taşıması gereken güç Eşitlik (5)'te verilen ifade kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{sz}(t) = \frac{P_{tekerlek}(t)}{\eta_s} \quad (5)$$

Burada  $P_{tekerlek}$  tekerleklerdeki gücü [W],  $P_{sz}$  şanzımandaki kayıp göz önünde bulundurulduğunda şanzımanın sağlaması gereken gücü [W],  $\eta_s$  ise şanzıman verimliliğini temsil etmektedir.

### 2.3. Elektrik Makinesi

Çoğu modern elektrikli araç, çekiş sırasında motor olarak çalışabilecek veya frenleme sırasında jeneratör olarak çalışabilecek tek bir elektrik makinesi ile donatılmıştır [14]. Şanzımanın giriş şaftında tekerleklerle aktarılmak üzere bulunması gereken güç elektrik makinesi tarafından sağlanmaktadır. Dolayısıyla elektrik makinesindeki kayıp da düşünüldüğünde elektrik makinesinin üretmesi gereken güç Eşitlik (6) kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{em}(t) = \frac{P_{sz}(t)}{\eta_{em}} \quad (6)$$

Eşitlik (6)'ya göre,  $P_{em}$  yakıt hücresi sistemi ve batarya tarafından karşılanacak olan veya rejeneratif frenleme esnasında kazanılıp bataryaya sağlanan gücü [W] temsil etmektedir.

### 2.4. DC/DC Dönüştürücü

Bir YHEA'da, farklı gerilim seviyelerinde çalışan güç organlarının enerji dengesini ve kontrolünü sağlamak için bir DCDC dönüştürücü gereklidir. Toyota Mirai'de de, yakıt hücresi sistemi-elektrik makinesi ve batarya-elektrik makinesi arasında sırasıyla tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere toplamda iki adet DCDC dönüştürücü bulunmaktadır [12]. Yakıt hücresi ve batarya arasında güç kontrolünü sağlamak için bir güç oranı "K" tanımlanmış ve güç kaynaklarının operasyon ağırlığı belirlenmiştir. Bu oran enerji yönetim sistemi tarafından belirlenmektedir. Güç oranına bağlı olarak herhangi bir güç kaynağından talep edilen güç  $P_{dcdc}$ ; DCDC dönüştürücü verimliliği de göz önünde bulundurulduğunda Eşitlik (7) ile hesaplanabilir.

$$P_{dcdc}(t) = \frac{K(t) \cdot P_{em}(t)}{\eta_{dcdc}} \quad (7)$$

Tekerlekler tarafından talep edilen güç daima karşılanmak zorundadır. Bu nedenle aşağıdaki verilen güç denklemi daima sağlanacaktır:

$$P_{yh_{def}}(t) = \begin{cases} \frac{K(t) \cdot P_{em}(t)}{\eta_{dcdc}}, & P_{em} \geq 0 \\ 0, & P_{em} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{bat_{def}}(t) = \begin{cases} P_{em} - P_{yh_{def}}(t), & P_{em} \geq 0 \\ P_{em}, & P_{em} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Burada K güç oranı olup 0 ile 2 arasında değer almaktadır. Örneğin K'nın 1 olduğu durumda yakıt hücresi talep edilen gücün tamamını karşılamakta, 0 olduğu durumda yakıt hücresi kapalı olup gücün tamamını batarya sağlamakta, 1'den büyük olduğu her durumda ise yakıt hücresi bataryayı şarj etmektedir.

Elektrik motor gücünün negatif olduğu durumlar rejeneratif frenleme olup geri kazanılan güç bataryaya beslenmektedir.

### 2.5. Yakıt Hücresi Sistemi

Toyota Mirai, otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir proton değişim membranlı yakıt hücresi (PDMYH) taşımaktadır. Yakıt hücresi sistemi, sistemin kalbi olan membranlı yakıt hücresinin yanında hidrojen, hava, su, soğutucu ve elektriksel destek devreleri gibi birtakım destekleyici dış ünitelerden meydana gelmektedir. Bir PDMYH yakıt hücresi sisteminin davranışı; akım yoğunluğu ve gerilime ilişkisini ifade eden bir polarizasyon eğrisi, destek ünitelerinde harcanan enerjiyle ilişkili olarak sistem verimliliği ve yakıt olarak enjekte edilen hidrojenin akış hızı olmak üzere üç ana denklemle açıklanabilir. Yaptığı çalışmada Usmanov, doğrulanmış bir yakıt hücresi modeli oluşturmak amacıyla Argonne Ulusal Laboratuvarı'nın Toyota Mirai için yapılan dinamometre test sonuçlarından elde edilen polinom tabanlı bir model öne sürmüştür [15]. Çalışmada FC gerilimi [V] akıma [A] bağlı olarak ikinci dereceden bir polinomla, FC sistem verimliliği [%] güce [W] bağlı olarak altıncı dereceden bir polinomla ve hidrojen debisi [g/s] ise yine güce [W] bağlı olarak ikinci dereceden bir polinomla sırasıyla (10), (11) ve (12) numaralı eşitliklerde ifade edilmiştir. Yakıt hücresi model parametreleri Tablo 2'de verilmiştir [14].

$$V_{FC} = c_1 \cdot I_{FC}^5 + c_2 \cdot I_{FC}^4 + c_3 \cdot I_{FC}^3 + c_4 \cdot I_{FC}^2 + c_5 \cdot I_{FC} + c_6 \quad (10)$$

$$\eta_{FC} = k_1 \cdot P_{FC}^6 + k_2 \cdot P_{FC}^5 + k_3 \cdot P_{FC}^4 + k_4 \cdot P_{FC}^3 + k_5 \cdot P_{FC}^2 + k_6 \cdot P_{FC} + k_7 \quad (11)$$

$$\dot{m}_{H_2} = b_1 \cdot P_{FC}^2 + b_2 \cdot P_{FC} + b_3 \quad (12)$$

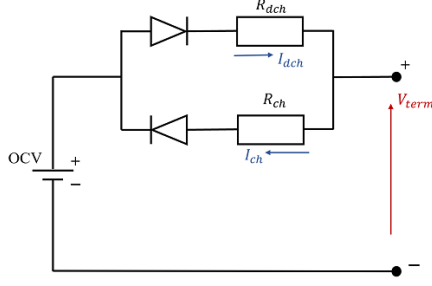
Tablo 2. Yakıt Hücresi Model Parametreleri

$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$-4.587 \cdot 10^{-11}$	$6.67 \cdot 10^{-8}$	$-3.553 \cdot 10^{-5}$	0.0085
$c_5$	$c_6$	$k_1$	$k_2$
-1.028	332.2	$-3.322 \cdot 10^{-11}$	$1.08 \cdot 10^{-8}$
$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
$-1.343 \cdot 10^{-6}$	$7.986 \cdot 10^{-5}$	$-2.3 \cdot 10^{-3}$	$2.69 \cdot 10^{-2}$
$k_7$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
0.56	$8.5 \cdot 10^{-5}$	$9.1 \cdot 10^{-3}$	0.0064

### 2.6. Batarya

Toyota Mirai, frenleme sırasında kaybedilen enerjiyi geri kazanmak ve itki için güç sağlamak amacıyla 6.5 [Ah] kapasiteli bir nikel-metal hidrit (NiMH) bataryaya sahiptir [12]. Yakıt hücreli hibrit güç sistemlerinde yakıt hücresi, kompresörün yavaş dinamiği nedeniyle anlık artan yüksek güç taleplerini karşılamada yeterli olmadığından, genellikle bir batarya veya süperkapasitör güç kaynağı olarak güç aktarma sistemine entegre edilir. Bu çalışmada da model üzerindeki batarya paketinin modeli, üretici tarafından paylaşılan batarya parametrelerine göre düzenlenmiş ve sisteme entegre edilmiştir [12]. Model için Thevenin teoremine dayanan bir eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur. Batarya modeli, açık devre gerilimini

temsil eden bir terminal gerilim kaynağı ve şarj-deşarj için iki ayrı iç direnç olmak üzere üç ana bileşenden meydana gelmektedir. Kullanılan eşdeğer devrenin yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Batarya için kullanılan eşdeğer devre modeli [14]

Sıcaklık etkisi ihmal edilirse, açık devre gerilimi ve iç direnç değerleri ile batarya şarj durumu arasında doğrudan bir ilişki vardır. Usmanov bu ilişkiyi, Argonne Laboratuvarı tarafından Toyota Mirai üzerinden toplanan deneysel verilerden elde ettiği polinomlarla ifade etmiştir [15]. Çalışmada önerdiği polinom modellerinin deneysel sonuçlarla uyumluluk gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle önerilen model, çalışmada kullanılan güç aktarma organlarına entegre edilmiştir. Bu durumda batarya modeli, açık devre gerilimini temsil eden beşinci dereceden bir polinom;deşarj ve şarj dirençlerini temsil eden dördüncü dereceden iki polinom olmak üzere üç temel polinomdan meydana gelmektedir. Bu polinomlar Eşitlik (13), (14), (15)'te sırasıyla verilmiştir.

$$V_{OCV} = m_1 \cdot SOC^5 + m_2 \cdot SOC^4 + m_3 \cdot SOC^3 + m_4 \cdot SOC^2 + m_5 \cdot SOC + m_6 \quad (13)$$

$$R_s = n_1 \cdot SOC^4 + n_2 \cdot SOC^3 + n_3 \cdot SOC^2 + n_4 \cdot SOC + n_5 \quad (14)$$

$$R_d = q_1 \cdot SOC^4 + q_2 \cdot SOC^3 + q_3 \cdot SOC^2 + q_4 \cdot SOC + q_5 \quad (15)$$

Denklemden  $V_{OCV}$  açık devre gerilimi [V],  $R_s$  ve  $R_d$  sırasıyla şarj vedeşarj durumları esnasında kullanılacak iç direnç değişkenleridir [Ω]. Batarya modeline ilişkin katsayılar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Batarya Model Parametreleri [14]

$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$
1722.4	-4747.5	4891.9	-2312.1
$m_5$	$m_6$	$n_1$	$n_2$
525.72	200.06	0.0056	-0.0254
$n_3$	$n_4$	$n_5$	$q_1$
0.0372	-0.0203	0.0223	0.0188
$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$
-0.0547	0.0765	-0.0457	0.0349

Batarya paketinden gelen güç talebi,  $V_{OCV}$ ,  $R_{ch}$  ve  $R_{dch}$  kullanılarak batarya paketinin doluluk durumu (SOC) [%], şarj vedeşarj akımları [A] sırasıyla Eşitlik (16), (17) ve (18)'de formüle edilmiştir.

$$SOC(t) = SOC_0(t) + \int_0^t \frac{I_{bat}(t)dt}{Q_{bat}} \quad (16)$$

$$I_{BAT_s} = \frac{V_{OCV}^2 - \sqrt{V_{OCV}^2 + 4 \cdot R_s \cdot P_{bat}}}{2 \cdot R_s}, \quad i < 0 \quad (17)$$

$$I_{BAT_d} = \frac{V_{OCV}^2 - \sqrt{V_{OCV}^2 - 4 \cdot R_d \cdot P_{bat}}}{2 \cdot R_d}, \quad i > 0 \quad (18)$$

### 3. Büyük-Patlama Büyük-Çöküş algoritması ile Enerji Yönetim Stratejisi

#### 3.1. Problem Formülasyonu ve Maliyet Fonksiyonu

Hibrit güç sistemlerinde toplam hidrojen tüketimi azaltılırken batarya ve yakıt hücresinin yaşlanmasını geciktirmek amaçlanmaktadır. Ani güç değişimlerinin yakıt hücresinde yaşlanmaya neden olduğu bilinmektedir [16]. Bir diğer yandan batarya şarj seviyesindeki dalgalanmaların, batarya ömrünün kısalması ile doğrudan bir ilişkisi olduğu bilinmektedir [17]. Tüm bunlar gözetildiğinde tasarlanan optimal kontrolörün maliyet fonksiyonunda; yakıt hücresi gücü, batarya şarj dalgalanması ve yakıt hücresi güç değişimi minimize edilmeye çalışılmaktadır. Çok değişkenli maliyet fonksiyonu global çözümü bulmayı zorlaştırır, ancak böylece sistemin güvenli ve verimli bir performans göstermesi sağlanabilecektir. Sonuç olarak çalışmada kullanılan maliyet fonksiyonu Eşitlik (19)'daki gibidir.

$$J = \min \sum k_1 \cdot (SOC - SOC_{ref})^2 + k_2 \cdot (P_{yh})^2 + k_3 \cdot (\dot{P}_{yh})^2 \quad (19)$$

Burada  $SOC$  bataryanın şarj seviyesi,  $P_{yh}$  yakıt hücresinin gücü [W] ve  $\dot{P}_{yh}$  yakıt hücresinin gücünün değişimidir [W/s].  $SOC_{ref}$ , 60 [%] olarak tanımlanmıştır. Ardından her bir vektör normalize edilerek tüm bileşenlerin aynı genliğe sahip olmaları sağlanmıştır. Burada  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$ ; sırasıyla 80, 10 ve 75 olarak alınmıştır.

#### 3.2. Büyük-Patlama Büyük-Çöküş Algoritması

2006 yılında Erol ve Eksin tarafından geliştirilen BPBÇ algoritması, hızlı yakınsayabilme kabiliyeti ve düşük hesaplama karmaşıklığı ile global optimale yakın çözümleri bulmayı amaçlayan sezgisel bir optimizasyon yöntemidir [18]. Büyük Patlama Teorisi'nden esinlenerek oluşturulan yöntem, iki aşamalı bir yaklaşımı takip eder: Büyük Patlama aşaması ve Büyük Çöküş aşaması. Genetik Algoritma ile benzer şekilde ilk olarak bir popülasyon rastgele olarak üretilir ve arama uzayında popülasyonu oluşturan parçacıklar tekdüze olarak dağıtılır. Bu aşamaya Büyük Patlama aşaması denmektedir. Büyük Patlama'nın ardından, parçacıkların aday çözümlere doğru yakınsadığı Büyük Çöküş fazı gerçekleşir. Yakınsama, aday çözümlerin konumlarının ağırlık merkezine doğru gerçekleşir.

$$x^c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} x^i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i}} \quad (20)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $x^i$ ,  $f^i$  ve  $N$  sırasıyla: n-boyutlu arama uzayında üretilen nokta (parçacık), maliyet fonksiyonunun değeri ve Büyük Patlama aşamasındaki popülasyon

büyükklüğüdür. Aday çözümlerin ağırlık merkezi yerine en küçük maliyeti veren noktanın seçilebileceği unutulmamalıdır.

Büyük Çöküş fazının ardından bir sonraki iterasyonda Büyük Patlama ile birlikte yeni parçacıklar oluşturulur. Bu parçacıklar bir önceki iterasyonda yakınsanan çözüm kümesinin etrafında saçılırlar. Lokal minimuma takılmamak için parçacıklar çözüm kümesinin uzağına da konumlandırılır, böylece global optimumu aramak mümkün kılınır [19]. İterasyon sayısı arttıkça optimum noktadan uzaktaki parçacıkların sayısı azalacaktır ve çözüme doğru yakınsanacaktır. Bu durumda her iterasyonda yeni ağırlık merkezi

$$x^{c_{yeni}} = x^c + \frac{L\gamma}{k} \quad (21)$$

olarak hesaplanır. Burada  $x^c$ ,  $\gamma$ ,  $L$  ve  $k$  sırasıyla; ağırlık merkezini, normal dağılımlı rastgele sayıyı, optimize edilecek değişkenin üst sınırını ve iterasyon adımını temsil etmektedir. Büyük-Patlama Büyük-Çöküş metodunun çalışma algoritması Şekil 3'te verilmiştir.

### BP-BÇ algoritması

#### Adım 1:

Başlangıç parametreleri seçilir

$x^i$ : Normal rastgele değer

$N$ : Popülasyon büyüklüğü

$iter_{maks}$ : Maksimum iterasyon sayısı

#### Adım 2:

$N$  elemanlı  $x^i$  popülasyonu tanımlanmış limite göre üretilir

#### Adım 3:

Her aday için maliyet fonksiyonunu hesaplanır

#### Adım 4:

Eşitlik (20) ile ağırlık merkezi hesaplanır

#### Adım 5:

Eşitlik (21) ile ağırlık merkezi etrafında yeni çözümler üretilir

#### Adım 6:

$iter \leftarrow iter + 1$

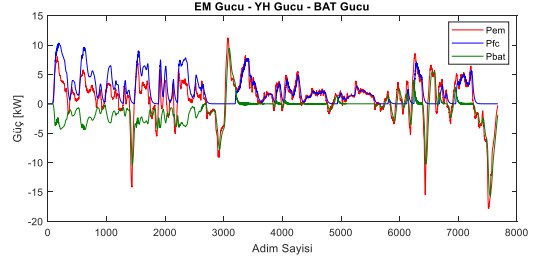
#### Adım 7:

Adım 3'e dön, durdurma şartı sağlanana kadar tekrar edilir

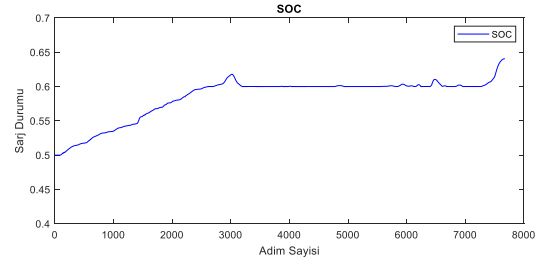
Şekil 3. Büyük-Patlama Büyük-Çöküş algoritması

## 4. Simülasyon Sonuçları

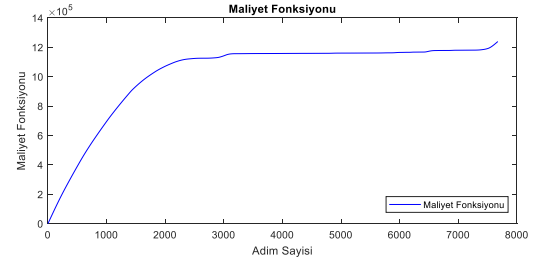
Tasarlanan enerji yönetim sistemi NEDC, UDDS, HWFET, US06 ve HIGHWAY olmak üzere beş farklı sürüş döngüsüyle test edilmiştir, böylece farklı sürüş koşullarında göre başarıları değerlendirilmiştir. NEDC ve HIGHWAY'e ilişkin sonuçlar Şekil 4, 5, 6, 7 ve 8'de verilmiştir. Bütün çevrimlerde şarj durumunun başlangıç değeri %50 olup, hedef olarak tanımlanan %60 seviyesine çıkması beklenmektedir. Maliyet fonksiyonunda tanımlanan hidrojen tüketimi, şarj dalgalanması ve yakıt hücresi güç çıkışı değişimi arasında bir ödünleşim olduğu gözlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında enerji yönetim stratejisinin amacı olan tüketimi minimize etme; batarya şarj seviyesi ve yakıt hücresi güç çıkışındaki değişimin kabul edilebilir seviyede minimize edilebildiği anlaşılmıştır. Şarj seviyesinin hedeflenen değere (%60) yakın tutulabildiği görülmüştür. Sürüş çevrimlerinin sonundaki rejeneratif frenleme bölgesi nedeniyle şarj seviyesinde belirgin artışlar olmuşsa da hedef değerden fazla uzaklaşmadığı görülmüştür. Şekil-6'da maliyet fonksiyonunun değerinin bazı bölgeler için artmadığı, yani optimum çözümün bulunabildiği görülmüştür.



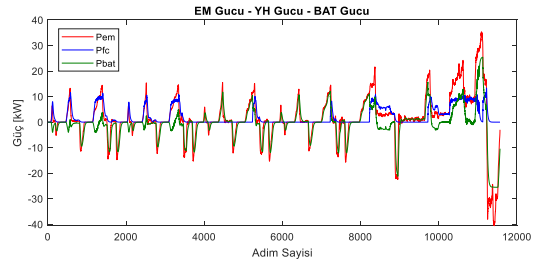
Şekil 4. HIGHWAY için güç kaynaklarının çıkışı



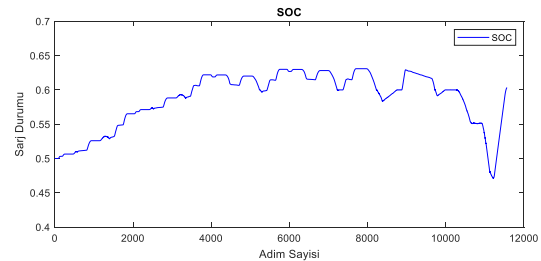
Şekil 5. HIGHWAY için batarya şarj değişimi



Şekil 6. HIGHWAY için maliyet fonksiyonu



Şekil 7. NEDC için güç kaynaklarının çıkışı



Şekil 8. NEDC için batarya şarj değişimi

Sonuç olarak tasarlanan kontrol yönteminin bütün sürüş çevrimleri için optimuma yakın çözümlere yakınsayabildiği görülmüştür.

## 5. Sonuçlar ve Geleceğe Yönelik Çalışmalar

Yapılan çalışmada YHEA'nın enerji yönetiminde BPBÇ algoritmasının uygulanabilirliği literatürde ilk kez gösterilmiştir. Tanımlanan maliyet fonksiyonu sayesinde hem

toplam hidrojen tüketimi minimize edilmiş, hem de şarj seviyesi ve yakıt hücresi gücünün değişim hızı minimize edilerek batarya ve yakıt hücresinin yaşlanması yavaşlatılmıştır. BPBÇ çevrimdışı bir optimizasyon yöntemi olması nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması da, gerçek zamanlı enerji yönetim sistemlerinin tasarımında ve kıyas çalışmalarında bir global optimum arama yöntemi olarak öne çıkma potansiyeline sahiptir.

İlerleyen çalışmalarda, bir diğer sezgisel arama yöntemi olan Genetik Algoritma ile enerji yönetimi gerçekleştirilip Büyük-Patlama Büyük-Çöküş algoritması ile performansları kıyaslanacaktır. Ayrıca BPBÇ optimizasyonu temelli Bulanık Mantık kullanılarak bir çevrimiçi enerji yönetim sistemi geliştirilip yakıt hücreli hibrit sistemlerin kontrolünde kullanılacaktır. Sonuçlar GA ile eğitilen çevrimiçi kontrol yöntemleri ile kıyaslanacaktır. Daha karmaşık ve kapsamlı bir model kullanılarak sonuçların daha gerçekçi olması sağlanacaktır.

### Kaynakça

- [1] Fayaz, H., Saidur, R., Razali, N., Anuar, F. S., Saleman, A. R., & Islam, M. R. (2012). An overview of hydrogen as a vehicle fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5511–5528. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.012>
- [2] Panday, A., ve Bansal, H. O. (2014). “A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle.” *International Journal of Vehicular Technology*, 2014.
- [3] Liu, C., Wang, Y., Wang, L., & Chen, Z. (2019). Load-adaptive real-time Energy Management Strategy for Battery/ultracapacitor hybrid energy storage system using dynamic programming optimization. *Journal of Power Sources*, 438, 227024. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227024>.
- [4] Odeim, F., Roes, J., & Heinzl, A. (2015). Power Management Optimization of an Experimental Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid System. *Energies*, 8(7), 6302–6327. <https://doi.org/10.3390/en8076302>
- [5] Ryu, J., Park, Y., & Sunwoo, M. (2010). Electric powertrain modeling of a fuel cell hybrid electric vehicle and development of a power distribution algorithm based on driving mode recognition. *Journal of Power Sources*, 195(17), 5735-5748.
- [6] Chen, S., Wu, C., Hung, Y., & Chung, C. (2018). Optimal strategies of energy management integrated with transmission control for a hybrid electric vehicle using dynamic particle swarm optimization. *Energy (Oxford)*, 160, 154-170.
- [7] Trovão, J., Pereira, P., Jorge, H., & Antunes, C. (2013). A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles – An integrated rule-based meta-heuristic approach. *Applied Energy*, 105, 304-318.
- [8] Koubaa, R., & Krichen, L. (2016). Ant colony optimization based Optimal Energy Management for an FC/UC Electric Vehicle. *2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*. <https://doi.org/10.1109/sta.2016.7952027>
- [9] Pourhashemi, A., & Ansarey M, S. (2012). Ant colony optimization applied to optimal energy management of fuel cell hybrid electric vehicle. *2012 IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*, 497-503.
- [10] KOC, I. (2016). Big bang-big crunch optimization algorithm for solving the UNCAPACITATED facility location problem. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 4(Special Issue-1), 185–189. <https://doi.org/10.18201/ijisae.2016specialissue-146971>
- [11] Lee, H., & Choi, H. (2017). Comparison of fuel efficiency and economical speed for internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using backward-looking simulation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(9), 4499-4509.
- [12] Outline of the Mirai. 2017. Available online: [www.toyota-europe.com](http://www.toyota-europe.com) (accessed on 10 March 2023).
- [13] Luciani, S., & Tonoli, A. (2022). Control Strategy Assessment for Improving PEM Fuel Cell System Efficiency in Fuel Cell Hybrid Vehicles. *Energies (Basel)*, 15(6), 2004.
- [14] Doppelbauer, M., & Winzer, P. (2017). A lighter motor for tomorrow's electric car. *IEEE Spectrum*, 54(7), 26-31.
- [15] Usmanov, U., Ruzimov, S., Tonoli, A., & Mukhitdinov, A. (2023). Modeling, simulation and control strategy optimization of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle. *Vehicles*, 5(2), 464–481. <https://doi.org/10.3390/vehicles5020026>
- [16] Ren, P., Pei, P., Li, Y., Wu, Z., Chen, D., & Huang, S. (2020). Degradation mechanisms of proton exchange membrane fuel cell under typical automotive operating conditions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 80, 100859.
- [17] Yuksel, T., Litster, S., Viswanathan, V., & Michalek, J. (2017). Plug-in hybrid electric vehicle LiFePO4 battery life implications of thermal management, driving conditions, and regional climate. *Journal of Power Sources*, 338, 49-64.
- [18] Erol, O., & Eksin, I. (2006). A new optimization method: Big Bang–Big Crunch. *Advances in Engineering Software (1992)*, 37(2), 106-111.
- [19] Yilmaz, S., & Gokasan, M. (2014). Optimal trajectory planning by Big Bang-Big Crunch algorithm. *2014 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. <https://doi.org/10.1109/codit.2014.6996955>