

*Araştırma Makalesi – Research Article*

## Hafif Raylı Sistem Aracına Hibrit Bir Sistem Entegre Edilmesinin Sistem Parametreleri Üzerine Etkileri

Gülşah ELDEN<sup>1\*</sup>, Abdurrahim TANŞU<sup>2</sup>

*Geliş / Received: 25/10/2019*

*Revize / Revised: 25/11/2019*

*Kabul / Accepted: 27/11/2019*

### ÖZ

Bu çalışmanın amacı, hafif raylı hibrit sistem aracında araç tarafından talep edilen akımın, yakıt hücresi modülü çıkış geriliminin, anlık hidrojen tüketim miktarının, batarya çıkış geriliminin ve batarya şarj durumunun zamanla değişimini incelemektir. Hibrit sistem Proton Elektrolit Membranlı yakıt hücresi modülü ve Lityum-İyon batarya modülünden oluşmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek için, Kayseri ilinde bulunan hafif raylı sistem hattının sadece beş istasyonluk güzergahı pilot bölge olarak seçilip iki ayrı durumun incelendiği hibrit sistemler tasarlandı. Durum 1, raylı sistem aracının yakıt hücresi modülü ile tahrik edildiği, frenleme esnasında çıkan rejeneratif akımın batarya modülünde depolandığı ve bu depolanan enerjinin yardımcı sistemlerde kullanıldığı durumdur. Durum 2 ise aracın Lityum-İyon batarya modülü ile tahrik edildiği ve yakıt hücresi modülünün sadece batarya modülünü şarj etmek için kullanıldığı durumdur. Bu iki durum için matematiksel modeller oluşturuldu ve bu modeller MATLAB/Simulink programında kodlanarak çözümler gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçlara göre, Durum 2'nin Durum 1'e göre anlık talep edilen akıma hızlı cevap verdiği ve hidrojen tüketimi açısından daha tercih edilebilir olduğu görüldü.

**Anahtar Kelimeler-** Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi, Lityum-iyon Batarya, Hafif Raylı Sistemler.

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişim: gulsah@erciyes.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2756-8483>)

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Erciyes Üniversitesi, 38059 Melikgazi KAYSERİ/TÜRKİYE

<sup>2</sup>İletişim: abdtansu@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-2959-9892>)

Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, 38059 Melikgazi KAYSERİ/TÜRKİYE

## The Effects of Integration of a Hybrid System on System Parameters in a Light Rail System Vehicle

### ABSTRACT

The aim of this study is to examine the changing of current demanded by the vehicle, fuel cell output voltage, instantaneous hydrogen consumption, battery output voltage and battery charge status with time in the light rail hybrid vehicle. The hybrid vehicle consists of a Proton Exchange Membrane fuel cell module and a Lithium-Ion battery module. In order to realize this aim, only five stations route of the light rail line in Kayseri was chosen as pilot region and hybrid systems designed to examine two different cases. Case 1 is where the rail vehicle is driven by the fuel cell module, the regenerative current generated during braking is stored in the battery module and this stored energy is used in auxiliary systems. Case 2 is where the vehicle is driven by a Lithium-Ion battery module and the fuel cell module is only used to charge the battery module. Mathematical models were derived for these two cases and these models were coded in MATLAB / Simulink program and solutions were realized. According to the results, it is seen that Case 2 is more preferable in terms of responding to the instantaneous demand current according to Case 1 and in terms of hydrogen consumption.

**Keywords-** *Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Lithium-Ion Battery, Light Rail Vehicle.*

## I. GİRİŞ

19. yüzyılda gerçekleşen sanayi devrimi sonrası kentlerde meydana gelen nüfus artışı ile birlikte bir çok sorun ortaya çıkmakta ve bu sorunların en önemlilerinden biri de kent içi ulaşım olarak görülmektedir. Kent içi ulaşım ihtiyacını karşılamak için toplu taşımacılık yapan sistemler geliştirilmiş olup günümüzde de sıkça kullanılan raylı sistem uygulamaları dünyada ve Türkiye'de gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde raylı sistemlerin enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil kökenli yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu sistemleri daha çevreci yapmak ve çağımızın sorunu olan sera gazı emisyonlarını azaltmak için yenilenebilir enerji teknolojilerinin yada hibrit uygulamaların kullanıldığı sistemler tasarlanmakta ve geliştirilmektedir. Literatürde raylı sistem, mobil ve statik uygulamalar için yakıt hücresi, batarya ve ultrakapasitör kullanımı üzerine birçok çalışma mevcuttur. Polimer Elektrolit Membranlı (PEM) yakıt hücrelerinin hidrojeni doğrudan elektriğe dönüştürmesi, temiz ve verimli olması sebebi ile mobil uygulamalarda, farklı araç tiplerinde ve harici güç kaynaklarında kullanıldığı görülmektedir. Yakıt hücresi tarafından sisteme sağlanan enerjinin düzenli olduğu fakat ani yük değişimlerine hızlı cevap veremediği, ani yükler altında yakıt hücresinde bozulmalar olduğu ve ömrünün azaldığı ifade edildi [1]. Bu yüzden yakıt hücresinin özel bir enerji yönetimi ile kullanılması gerektiği vurgulandı. Elektrikli araçların, hibrit elektrikli araçların ve yakıt hücresel hibrit araçların enerji ve çevresel sorunlar karşısında iyi birer çözüm olduğu görülmektedir. Bu araçlarda kullanılan batarya, ultrakapasitör ve yakıt hücrelerinin tek başına araçların enerji gereksinimlerini karşılayamayacağı Khaling ve Li tarafından öngörüldü [2]. Bubna ve arkadaşları [3] çalışmalarında yakıt hücrelerinin ani yüklerde yetersiz olmasının önüne geçmek, rejeneratif enerjinin kazanımını sağlamak amacı ile batarya ve ultrakapasitör modüllerini kullanarak altı farklı kombinasyondan oluşan hibrit modeller geliştirdiler. Modelleme sonucunda ultrakapasitör modülünün batarya modülü ile kullanılması durumunda yakıt hücresinde meydana gelen sıcaklık artışının önüne geçildiği ve yakıt hücresinin daha efektif çalıştığı görüldü. Literatürdeki mevcut yakıt hücresi, batarya ve ultrakapasitörden meydana gelen hibrit sistemler irdelenerek maliyet, verimlilik ve batarya çalışma süresinin uzunluğu açısından bu sistemler detaylı olarak Bauman ve Kazerani [4] tarafından incelendi. Ayrıca, çalışmalarında düşük güçlü bir konvektör kullanılmasıyla batarya ömrünün uzatılabileceği ve batarya boyutunun minimize edilebileceği böylelikle sistemin toplam yükünün azaltılabileceği ifade edildi. Fernandez ve arkadaşları [5] ele aldıkları tramvay için birincil enerji kaynağının PEM tipi yakıt hücresi modülü ikincil enerji kaynağı olarak da Ni-MH batarya modülünün olduğu hibrit bir mimari geliştirdiler. Çalışmanın sonucunda, tramvay hatlarında kullanılan görsel kirliliğe sebep olan havai hattın bu hibrit sistemin kullanılması ile ortadan kalkacağı ve atmosfere bırakılan CO<sub>2</sub> emisyonunun azalacağı vurgulandı. Yakıt hücresi, batarya ve ultrakapasitörden oluşan bir başka hibrit mimarinin modeli ise Bauman ve Kazerani [6] tarafından geliştirildi. Geliştirilen model, literatürde mevcut olan hibrit modellere göre daha verimli, maliyet ve kütle yönünden ise daha başarılıdır. Vural ve arkadaşları [7] araç üstü uygulamalar için geliştirilen yakıt hücresi ve ultrakapasitör içeren hibrit bir sistemin prototipini yaptılar. Kurdukları test düzeneği ile prototip üzerinde farklı enerji yönetim yaklaşımlarını kullanarak her bir yaklaşım için sistemin enerji karakteristiklerini incelediler. Ayrıca yakıt hücresinde oluşan dirençlerden dolayı meydana gelen bozulmaları bertaraf ederek yakıt hücresi yığınının ömrünün uzamasını sağladılar. Yaptıkları bir başka çalışmada [8] ise yine PEM tipi yakıt hücresi ve ultrakapasitör kullanarak hibrit bir model geliştirdiler. Geliştirilen modelde yakıt hücresi modülü aracın enerji talebini karşılarken, ultrakapasitör ise aracın ani yük değişimlerine cevap veriyordu. Gao [9] yakıt hücresi-ultrakapasitör hibrit mimarisi ile yakıt hücresi-batarya hibrit mimarisi olmak üzere iki ayrı model oluşturdu. Her iki modeli aynı şartlarda altında çalıştırarak karşılaştırdığında, yakıt hücresi-ultrakapasitör hibrit mimarisinin sistemin anlık yük gereksinimi durumunda daha iyi cevap verdiği görüldü [4]. Bulanık mantık algoritması esaslı enerji yönetimine sahip yakıt hücresi ve ultrakapasitörden oluşan bir hibrit model, MATLAB/Simulink yardımıyla Kısacıklıoğlu ve arkadaşları [10] tarafından geliştirildi. Geliştirilen model farklı yük koşulları altında çalıştırılarak modelin davranışı incelendi. Ayrıca, bulanık mantık yöntemi ile enerji yönetiminin istenilen şekilde sağlandığı görüldü. Li ve arkadaşları [11] bulanık mantık algoritması esaslı enerji yönetimi ile yakıt hücresi, batarya ve ultrakapasitör modüllerini farklı kombinasyonlarda ADVISOR programı kullanarak modellediler. Bu kombinasyonları verim açısından kıyaslayarak yakıt hücresi-batarya-ultrakapasitör içeren hibrit modelin diğer hibrit modellere göre yakıt ekonomisi açısından daha verimli olduğu belirlendi. Lie ve Zheng [12] geliştirdikleri adaptif kontrol sistemi ile enerji yönetimini sağladıkları, PEM tipi yakıt hücresi ve ultrakapasitörden oluşan hibrit bir model oluşturdu. Modelde, yakıt hücresi sistemin taban yükünü karşılarken, ultrakapasitör sistemin ani yük değişimlerini karşılamaktadır. Takizawa ve Kondo [13] çalışmalarında yakıt hücresi ve ultrakapasitörün çıkış geriliminin aracın maksimum hızını sınırladığını belirledikten sonra, yakıt hücresinin sistemin taban yükünü karşılayıp ultrakapasitörün de ani yüklerde devreye girmesi ile bu sınırlamanın ortadan kalkacağını tespit ettiler. Yoneyama

ve arkadaşları [14] 100kW gücünde yakıt hücresi yığını ile çalışan raylı sistem üzerinde hidrojen deposunu boyutlandırmak, tahrik zincirinin tasarımını belirlemek ve yakıt hücresinin gereksinimlerini belirlemek amacı ile bir takım testler gerçekleştirdiler. Testler sonucunda, sistemin maksimum hızının 104 km/h, maksimum gücünün 90 kW, yakıt hücresinin çıkış geriliminin 850 V ile 630 V aralığında değiştiği görüldü. Xiong ve arkadaşları [15] çalışmalarında PEM yakıt hücresi ve Lityum-İyon bataryadan oluşan hibrit bir sistemin harici yükler karşısında çalışma ömrünü uzatmak ve sistemi bu yüklerle karşı korumak üzerine bir araştırma yaptılar. Andaloro ve arkadaşları [16] hibrit elektrikli aracın tahrik sisteminin performansını farklı çalışma koşulları için incelediler. Hibrit elektrikli aracın verimliliğini optimize etmek, enerji kayıplarını azaltmak ve aracın menzilin artırmak için tahrik sistemini yapılandırdılar. Sarma ve Ganguly [17] yolcu trenleri için PEM yakıt hücreli hibrit bir sistem geliştirip bileşenlerin optimum boyutlandırmasını ve ayrıca, aracın anlık güç talebini karşılamak için enerji yönetimi yaptılar. Çalışmanın sonucunda, hibrit sistemin boyutlarının ortalama tren hızına, tren yolunun eğimine ve enerji yönetim sisteminin seçimine bağlı olduğunu ortaya koydular. Fathabadi [18] çalışmasında, hibrit elektrikli araçlar için yeni bir yakıt hücresi ve lityum-iyon bataryadan oluşan güç kaynağı önerdi. Bu güç kaynağı araca 155 km/s maksimum hız ve 530 km toplam seyir mesafesi sağladı.

Yapılan çalışmalar derinlemesine incelendiğinde, ele alınan sistemlere ait gerçek veriler kullanılarak hibrit modeller oluşturulmadığı görülmektedir. Bu çalışmada ise Kayseri şehrinde faaliyet gösteren hafif raylı sistem aracına ait gerçek veriler kullanılarak güç tahrik sistemini sayısal olarak modellemek için iki farklı durumu inceleyen iki ayrı hibrit sistem tasarlandı. Hibrit sistemler temiz enerji teknolojilerinden PEM yakıt hücresi ve Lityum-İyon batarya modüllerinden oluşmaktadır. Bu iki farklı hibrit sistem için araç tarafından talep edilen akımın, yakıt hücresi modülü çıkış geriliminin, anlık hidrojen tüketim miktarının, batarya çıkış geriliminin ve batarya şarj durumunun zamana bağlı nasıl değiştiği ayrı ayrı incelendi.

## II. HAFİF RAYLI SİSTEM ARACI TEKNİK ÖZELLİKLERİ

PEM yakıt hücresi modülü ve Lityum-İyon batarya teknolojilerinin birlikte kullanılacağı araç üstü hibrit sistemin enerji analizini yapmak için Kayseri Büyükşehir Belediyesi tarafından Kayseri ili kent içi yolcu taşımacılığı yapan hafif raylı sistem, uygulama aracı olarak seçildi. Hafif raylı sistem aracı, 35 km uzunluğunda 52 istasyon bulunan güzergah üzerinde sefer yapmaktadır. Güzergah üzerinde bulunan bu istasyonların birbirleri ile olan mesafesi 400-800 m arasında olup asgari sefer süresi dört dakikadır. Hafif raylı sistemin kent içerisindeki konumu Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu hat üzerinde çalışan aracın teknik özellikleri ise Tablo 1'de gösterilmektedir.

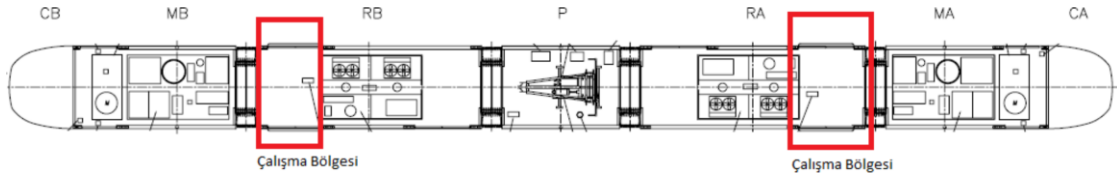


Şekil 1. Hafif raylı sistem hattının kent içerisindeki konumu

**Tablo 1.** Hafif raylı sistem aracının teknik özellikleri

Tip	İki yönlü, Mafsallı ve 5 Bölmeden oluşuyor
Ray Açıklığı	1453 mm
Voltaj	750 V DC
Maksimum Hız	80 km/h
Maksimum İvmelenme	1.1 m/s <sup>2</sup>
Maksimum Servis Freni	1.2 m/s <sup>2</sup>
Maksimum Acil Fren	2.8 m/s <sup>2</sup>
Araç Uzunluğu	32.250 m
Boş Ağırlık	43.068 kg
Kataner Seyir Seviyesi	3.85 - 5.80 m

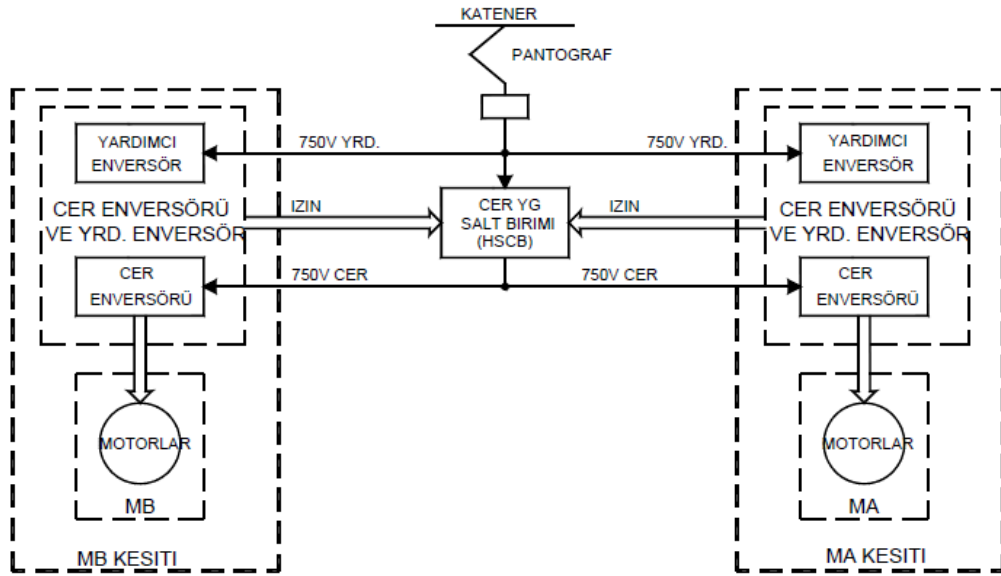
Hafif raylı sistemde kullanılan aracın düşük tabanlı olması ve araç altında kalan bölgenin sınırlı olmasından dolayı aracın güç tahrik sistemi ile ilgili ekipmanları araç üzerine simetrik bir şekilde yerleştirildi. Ekipmanların tamamı öncelikli olarak kendi buldukları taraf ile ilgili çalışırken ancak bir kısmı yedekli çalışma yada arıza durumunda aracın tamamını kapsayacak şekilde çalışmaktadır. Bu sebepten dolayı yakıt hücresi ve batarya modülleri araç üzerine simetrik ve doğrudan buldukları tahrik sistemi ünitesine bağlanacak şekilde yerleştirildi. Şekil 2’de araç üstü ekipman yerleşimi ve yakıt hücresi-batarya hibrit modülü için belirlenen çalışma bölgeleri görülmektedir.



**Şekil 2.** Hafif raylı sistem aracının araç üstü ekipman yerleşimi ve hibrit modül için belirlenen çalışma bölgesi

#### A. Hafif Raylı Sistem Aracının Tahrik Sistemi

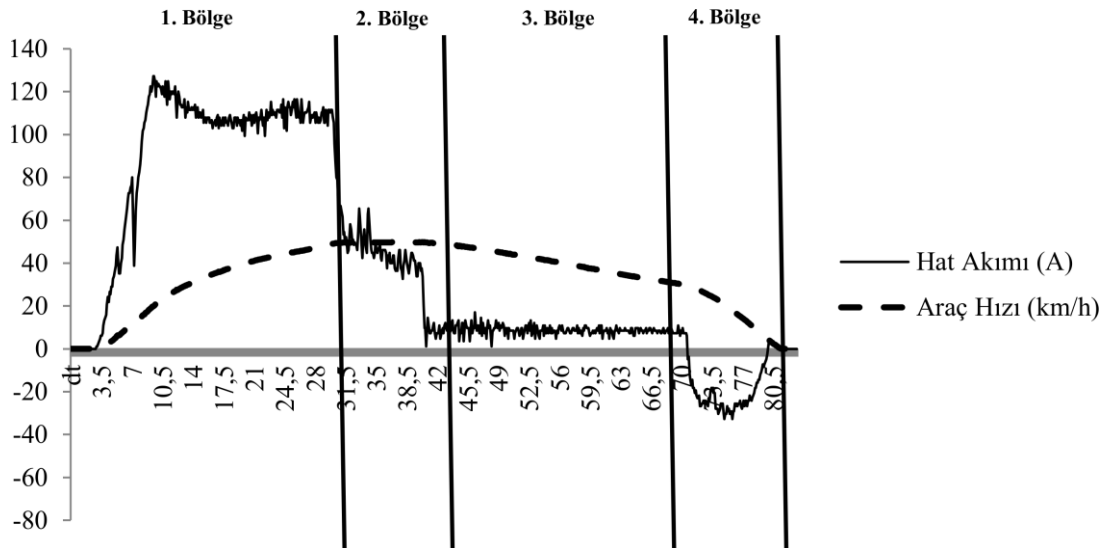
750 VDC gerilimde çalışan hafif raylı sistem aracının enerji beslemesi, havai hatta bulunan gerilimin pantograf vasıtası ile araca, araçtan raylara ve oradan trafo merkezine aktarılması sonucu devrenin tamamlanması ile sağlanmaktadır. Aracın güç tahrik sistemi bir önceki bölümde bahsedildiği üzere aracın üzerine simetrik olarak yerleştirildi. Araç üzerindeki güç tahrik sisteminin genel mimarisi Şekil 3’de gösterilmektedir. Bu tahrik sistemi belirlenen azami şartlar altında sistemde herhangi bir aksamının olmaması için yedekli olarak çalıştırılmaktadır.



Şekil 3. Hafif raylı sistem aracına ait güç tahrik sisteminin genel mimarisi

#### B. Hafif Raylı Sistem Aracının Enerji Profili

Hafif raylı sistem aracının iki istasyon arasındaki hareketini dört bölgeye ayırabiliriz. Birinci bölge aracın harekete başlayıp hızlandığı ve enerji tüketiminin en fazla olduğu bölgedir. İkinci bölge aracın sabit hızla ilerlediği ve enerji tüketiminin araç güzergahına bağlı olarak sabit kaldığı bölgedir. Üçüncü bölge araç hızının yavaş yavaş azaltıldığı, dördüncü bölge ise aracın hızla yavaşlatıldığı frenleme bölgesidir. Şekil 4'de bu dört bölge ve ele alınan aracın iki istasyon arasındaki enerji profili gösterilmektedir.



Şekil 4. İki istasyon arasında hafif raylı sistem aracının enerji profili

Ele alınan aracın enerji profili incelendiğinde raylı sistem araçlarında enerjinin verimli kullanılması, açığa çıkan rejeneratif enerjinin depolanması ve bu enerjinin tekrar kullanılmasının önemli bir

husus olduğu görülmektedir. Birinci bölgede araç hızının optimize edilmesi, ikinci ve üçüncü bölgede ise iki istasyon arasındaki işletme süresinin müsadde edilen ölçülerde uzun tutulması ile enerji tüketimi belirli ölçekte azaltılabilir. Dördüncü bölgede ise frenleme esnasında açığa çıkan enerjinin batarya ve ultrakapasitör gibi sistemlerde depolanıp tekrar kullanılması sonucu yine enerji tüketiminin kayda değer oranda azalacağı düşünülmektedir.

### III. MATEMATİKSEL MODEL

Kayseri il merkezinde bulunan hafif raylı toplu taşıma sisteminin sadece beş istasyonluk güzergahı pilot bölge olarak seçilip aracın havai hat olmadan yani katanersiz şekilde tahrik edildiği varsayıldı. Katanersiz olarak hareket eden aracın güç tahrik sistemi için hibrit bir sistem geliştirildi ve bu hibrit sistem için iki ayrı durum incelendi. Durum 1, raylı sistem aracının yakıt hücresi modülü ile tahrik edildiği, frenleme esnasında çıkan rejeneratif akımın batarya modülünde depolandığı ve bu depolanan enerjinin yardımcı sistemlerde kullanıldığı

durumdur. Durum 2 ise aracın Lityum-İyon batarya modülü ile tahrik edildiği ve yakıt hücresi modülünün sadece batarya modülünü şarj etmek için kullanıldığı durumdur. Bu iki durumu analiz etmek için yakıt hücresi modülü ile batarya modülünün matematiksel modelleri ayrı ayrı oluşturuldu.

#### A. Yakıt Hücresi Modülünün Matematiksel Modeli

Yakıt hücresi modülünün dinamik modeli oluşturulurken hidrojenin molar debisi ( $q_{H_2}$ ) ile kısmi basıncı ( $P_{H_2}$ ) arasındaki ilişki referans nokta olarak alındı. Buna göre bu iki parametre arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$\frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = K_{H_2} \cdot \sqrt{M_{H_2}} \quad (1)$$

Burada,  $K_{H_2}$  valf sabiti ve  $M_{H_2}$  ise hidrojenin mol kütesidir. Hidrojenin molar debisi hidrojenin yakıt hücresine giriş debisi ( $q_{H_{2i}}$ ), çıkış debisi ( $q_{H_{2o}}$ ) ve reaksiyon debisi ( $q_{H_{2r}}$ ) olmak üzere üç değişkenle ilişkilidir. Bu ilişki 2 nolu eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{R \cdot T_{H_2}}{V_a} \cdot (q_{H_{2i}} + q_{H_{2o}} + q_{H_{2r}}) \quad (2)$$

Bu eşitlikte,  $T_{H_2}$  hidrojen gazının sıcaklığı ve  $V_a$  ise anot hacmidir. Hidrojenin reaksiyon debisi ( $q_{H_{2r}}$ ) ise şu şekildedir:

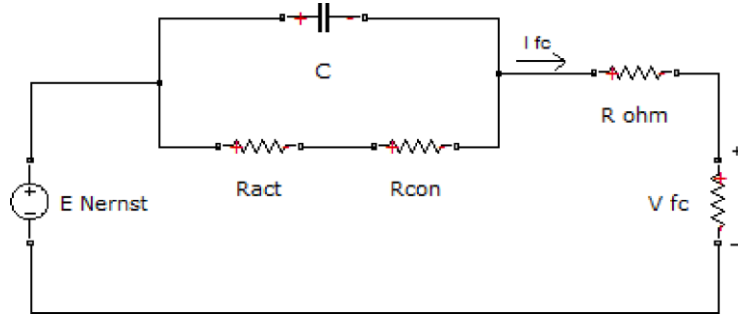
$$q_{H_{2r}} = \frac{N_0 \cdot I}{2 \cdot F} = 2 \cdot K_r \cdot I \quad (3)$$

Burada,  $N_0$  stak içerisinde olan yakıt hücresi sayısı olup hücrelerin seri bağlı olduğu varsayıldı.  $I$  yakıt hücresi çıkış akımını,  $F$  Faraday sabitini ve  $K_r$  model sabitini ifade etmektedir. Eşitlikler 1, 2 ve 3'e Laplace dönüşümü uygulandığında hidrojen gazının sıcaklığı ve kısmi basıncı Eş. 4 ve 5 ile hesaplanmaktadır.

$$T_{H_2} = \frac{V_a}{K_{H_2} \cdot R \cdot T} \cdot s \quad (4)$$

$$P_{H_2} = \frac{1}{1 + T_{H_2} \cdot s} \cdot \frac{K_{H_2}}{K_{H_2}} \cdot (q_{H_{2i}} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad (5)$$

Benzer şekilde 1 ve 4 nolu eşitlikleri kullanarak yakıt hücresi modülüne giren oksijenin kısmi basıncı ve reaksiyon sonucu oluşan suyun kısmi basıncı da elde edilmektedir. Tek bir yakıt hücresi için çıkış gerilimini hesaplamak için oluşturulan elektriksel model Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 5. Tek bir yakıt hücresi için elektriksel model diyagramı

Şekil 5'den görüldüğü üzere çıkış gerilimi, Nernst gerilimine ( $E_{Nerst}$ ), aktivasyon ( $R_{act}$ ), ohmik ( $R_{ohm}$ ) ve konsantrasyon ( $R_{con}$ ) kayıplarına bağlıdır. Nernst gerilimi Eş. 6 ile ifade edilmektedir:

$$E_{Nerst} = -\frac{\Delta G}{2 \cdot F} + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \log\left[\frac{P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}}\right] \quad (6)$$

Yakıt hücresi modülünün çıkış gerilimi ( $E_{cell}$ ) ise şu şekilde hesaplanmaktadır.

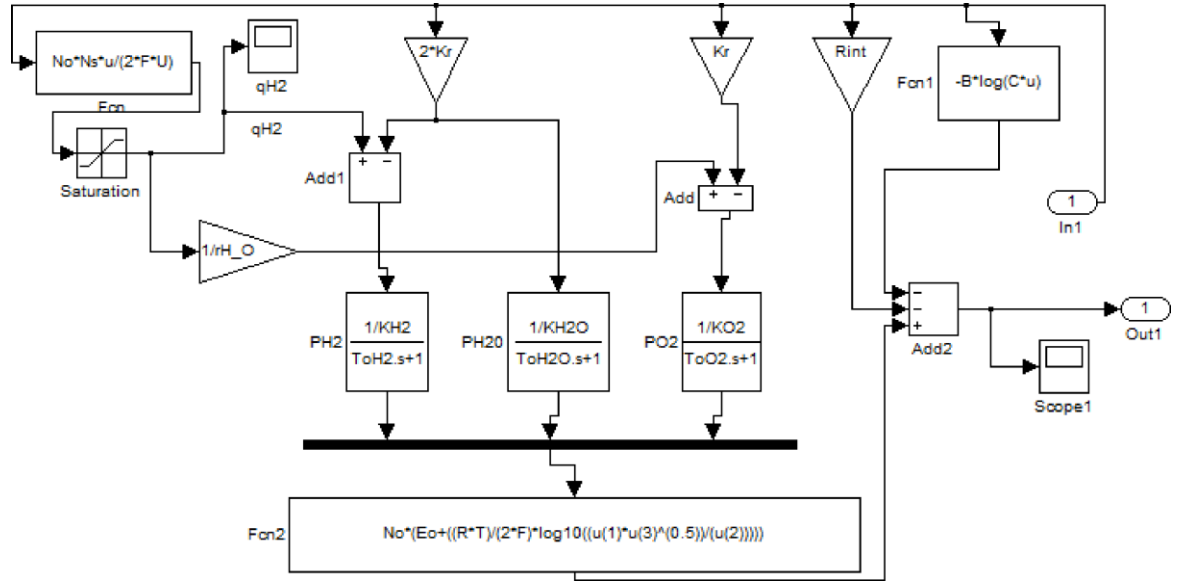
$$E_{cell} = E_{Nerst} - R_{act} - R_{ohm} - R_{con} \quad (7)$$

Yakıt hücresi modülü talep edilen güç ile doğru orantılı olarak hidrojen yakıtına ihtiyaç duymaktadır. Sistem için talep edilen hidrojen miktarı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$q_{H_2r} = \frac{N_0 \cdot I \cdot C}{2 \cdot F \cdot U} \quad (8)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak yakıt hücresi modülünün dinamik modeli Matlab/SIMULINK ortamında oluşturuldu. Oluşturulan dinamik model Şekil 6'da, kullanılan parametreler ise Tablo 2'de verilmektedir. Şekil 6'da verilen dinamik model oluşturulurken yakıt hücresi modülünün çalışma sıcaklığı ve oksijenin kısmi basıncı sabit alındı. Ayrıca, yakıt hücresi yığınlarının ve hidrojen depolama tanklarının kullanımı ile ağırlık artışından kaynaklı enerji tüketimindeki değişim ihmal edildi.





Şekil 6. Yakıt hücresi modülünün dinamik modeli

Tablo 2. Yakıt hücresi modülünün dinamik modelinde kullanılan parametreler

Parametre	Sayısal değer
Aktivasyon voltaj sabiti (B)	0.04777 [1/A] [19]
Aktivasyon voltaj sabiti (C)	0.0136 [V] [19]
Faraday Sabiti (F)	96485 [C/mol]
Hidrojen zaman sabiti ( $T_{H_2}$ )	3.37 [s] [19]
Hidrojen valf sabiti ( $K_{H_2}$ )	$4.22 \times 10^{-5}$ [kmol/atm·s] [19]
Hidrojen – Oksijen akış oranı ( $r_{H_2O}$ )	1.168 [19]
$K_r$ sabiti	$8.3951 \cdot 10^{-7}$ [kmol/s A] [19]
Boş yükteki gerilim ( $\Delta G$ )	0.6 [V] [19]
Seri hücre sayısı ( $N_0$ )	332
Oksijen zaman sabiti ( $T_{O_2}$ )	6.74 [s] [19]
Oksijen valf sabiti [ $K_{O_2}$ ]	$2.1 \cdot 10^{-5}$ [kmol/ s atm] [19]
PI kazanç sabiti ( $k_1, k_2$ )	10 [19]
Yakıt hücresi hücre başına iç direnç ( $R_{int}$ )	0.00303 [ $\Omega$ ] [19]
Yakıt hücresi mutlak sıcaklığı (T)	343 [K]
Evrensel gaz sabiti (R)	8.314 [J/ mol K]
Gerçekleşme faktörü (U)	0.8 [19]
Voltaj referans sinyali ( $V_r$ )	188 [V] [19]
Su zaman sabiti ( $T_{H_2O}$ )	18.418 [s] [19]
Su valf sabiti ( $K_{H_2O}$ )	$7.716 \cdot 10^{-6}$ [kmol/s atm][19]

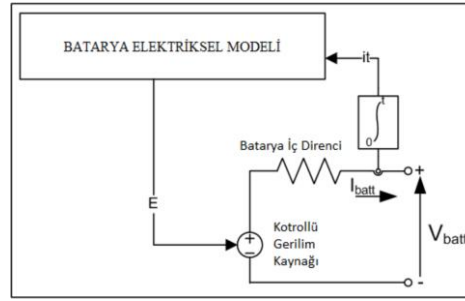
### B. Lityum İyon Batarya Matematiksel Modeli

Yüksek enerji yoğunluğu, hızlı tepkime süresi ve uzun ömürlü olması sebebiyle diğer batarya türlerine göre oldukça avantajlı olmasından dolayı Lityum-İyon batarya elektrikli araçlarda ve mobil uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bundan dolayı, bu çalışmada hibrit sistemde batarya olarak Lityum-

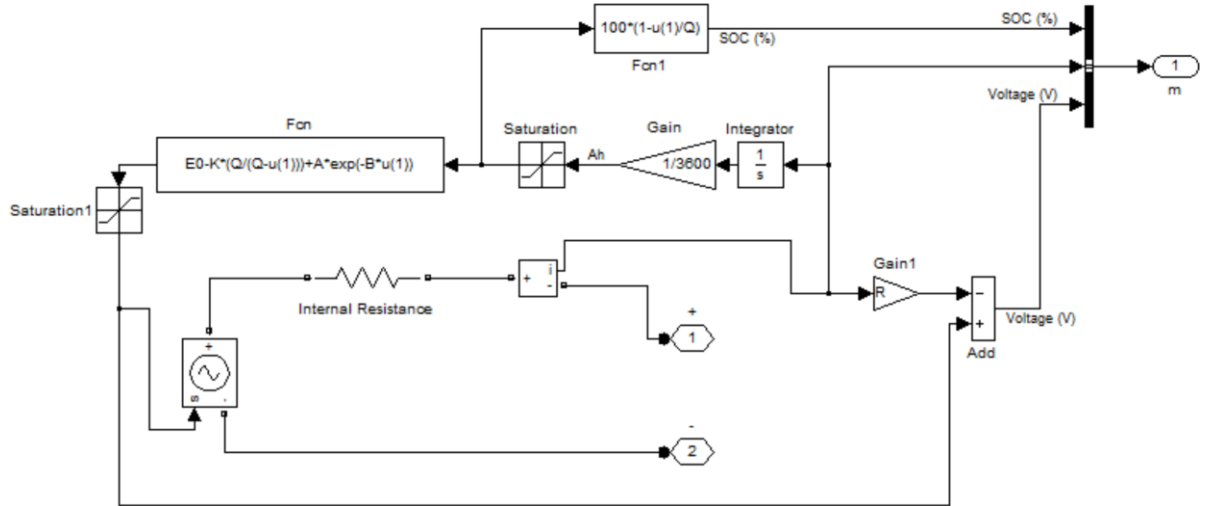
İyon batarya kullanıldı. Lityum-İyon batarya sisteminin modeli Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulup şu varsayımlar altında model çalıştırıldı. Batarya iç direncinin şarj/deşarj çevrimleri boyunca ve ayrıca akımın yüksekliği ile değişmediği, Batarya kapasitesinin akımın genliği ile değişmediği, Çalışma sıcaklığının sabit kaldığı, Batarya hafıza etkisinin ihmal edildiği kabul edildi. Batarya çıkış gerilimi 9 nolu eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$E = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i \cdot t} + A \cdot e^{-B \cdot i \cdot t} \quad (9)$$

Burada, E yüksüz durumdaki potansiyel farkı,  $E_0$  sürekli durumdaki potansiyel farkı, K polarizasyon voltajı, Q batarya kapasitesi, A üssel voltajı ve B üssel kapasiteyi ifade etmektedir. Lityum-İyon bataryanın elektriksel model diyagramı Şekil 7'de, batarya modülünün dinamik modeli ise Şekil 8'de gösterilmektedir.



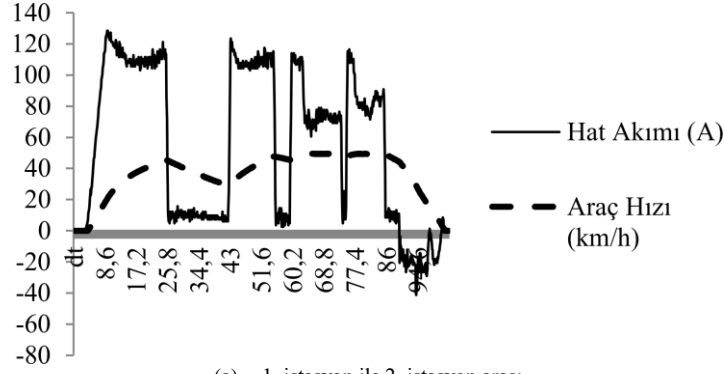
Şekil 7. Lityum-İyon bataryanın elektriksel model diyagramı



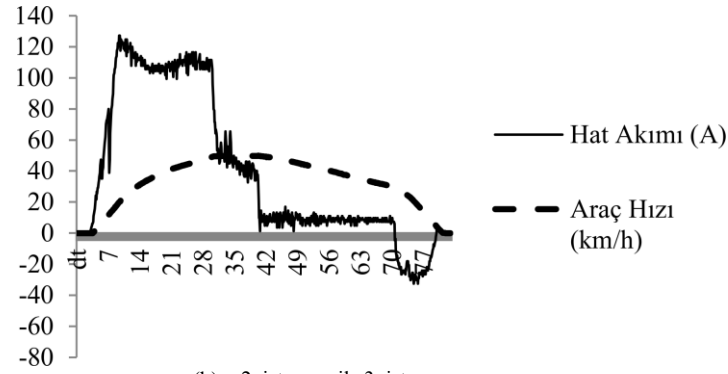
Şekil 8. Lityum-İyon batarya modülünün dinamik modeli

### C. Hafif Raylı Sistem Aracının Enerji Talep Verileri

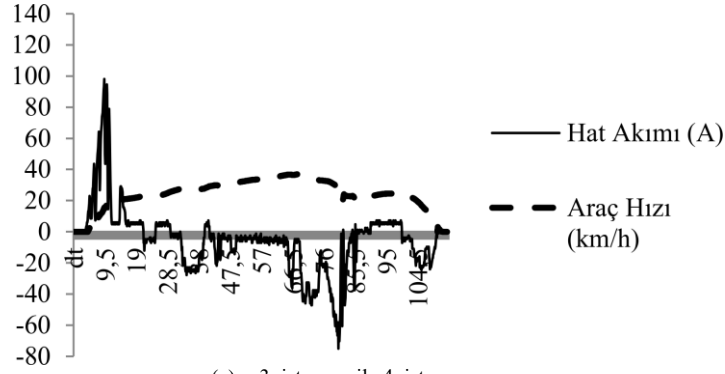
Ele alınan 5 istasyonluk pilot bölge için, aracın enerji tüketim verilerine göre araç tarafından talep edilen akım bilgilerinin zamana göre değişimi her bir istasyon için ayrı ayrı Şekil 9'da verilmektedir.



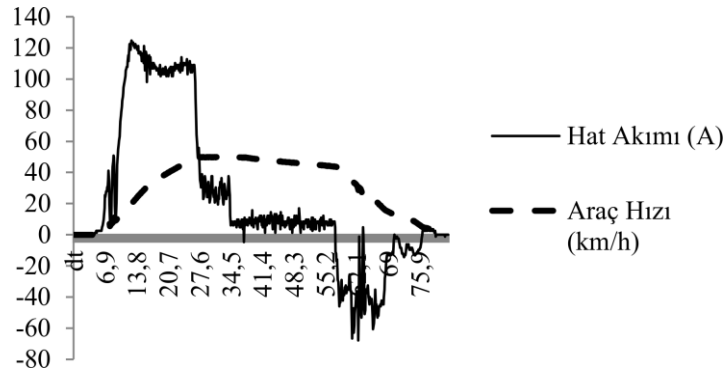
(a) 1. istasyon ile 2. istasyon arası



(b) 2. istasyon ile 3. istasyon arası



(c) 3. istasyon ile 4. istasyon arası.



(d) 4. istasyon ile 5. istasyon arası.

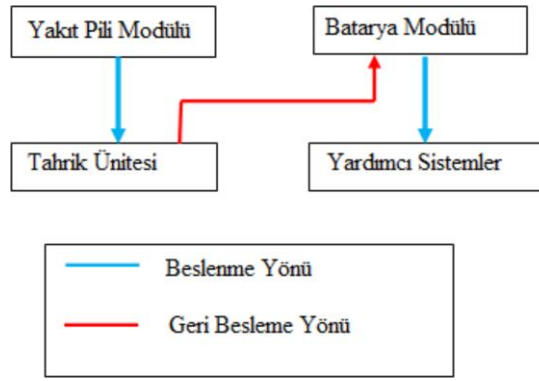
Şekil 9. Hafif raylı sistem aracı tarafından talep edilen akımın zamana göre değişimi

#### IV. MODELLEME SONUÇLARI

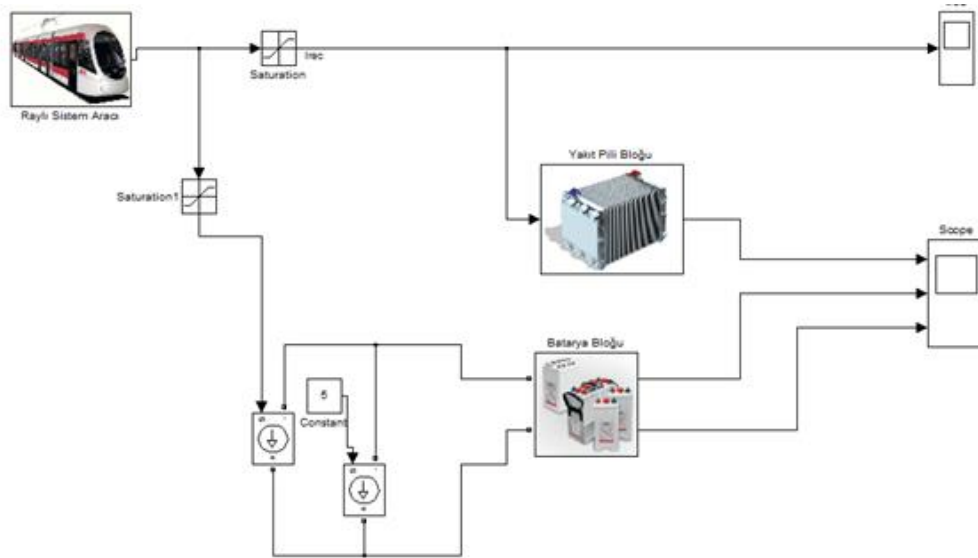
Bu çalışmada ele alınan raylı sistem aracı için yakıt hücresi modülü ve Lityum-İyon batarya modülünden oluşan iki ayrı hibrit mimari Matlab/SIMULINK ortamında oluşturuldu. Oluşturulan her iki hibrit mimari katanersiz bölgede aracın enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlandı. Bu iki hibrit mimari ayrı ayrı iki durum olarak incelendi. Her iki durum içinde istasyonlardaki duraklama süreleri göz ardı edilerek aracın 5 istasyonluk güzergâhı 400 s’de tamamladığı kabul edildi.

##### A. Durum 1

Durum 1, seçilen pilot bölgede raylı sistem aracının katanersiz olarak çalıştırıldığı yakıt hücresi modülünün aracı tahrik ettiği, frenleme esnasında çıkan rejeneratif enerjinin batarya modülünde depolandığı ve bu depolanan enerjinin yardımcı sistemlerde kullanıldığı durumdur. Durum 1’deki sistemin enerji akış yönleri Şekil 10’da, tasarlanan hibrit mimari ise Şekil 11’de gösterilmektedir.



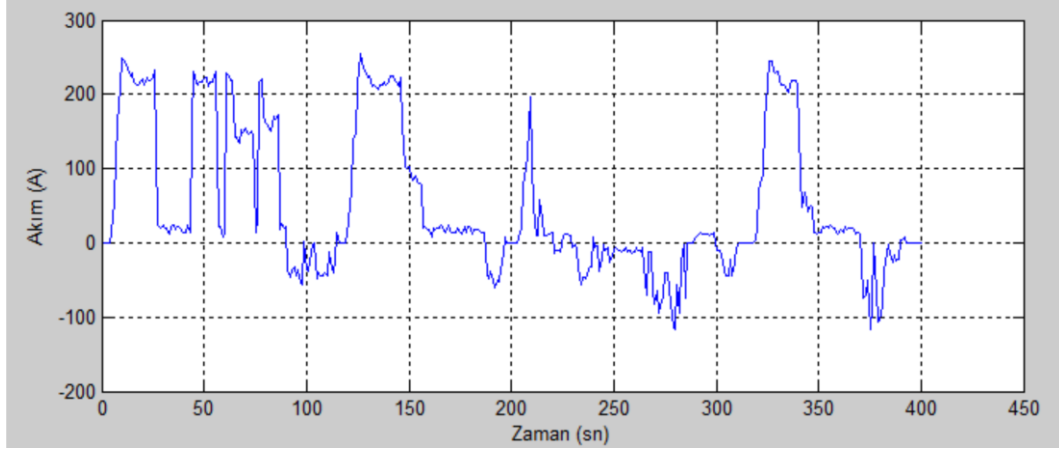
Şekil 10. Araç üzerindeki enerji akış yönleri



Şekil 11. Durum 1'in genel mimarisi

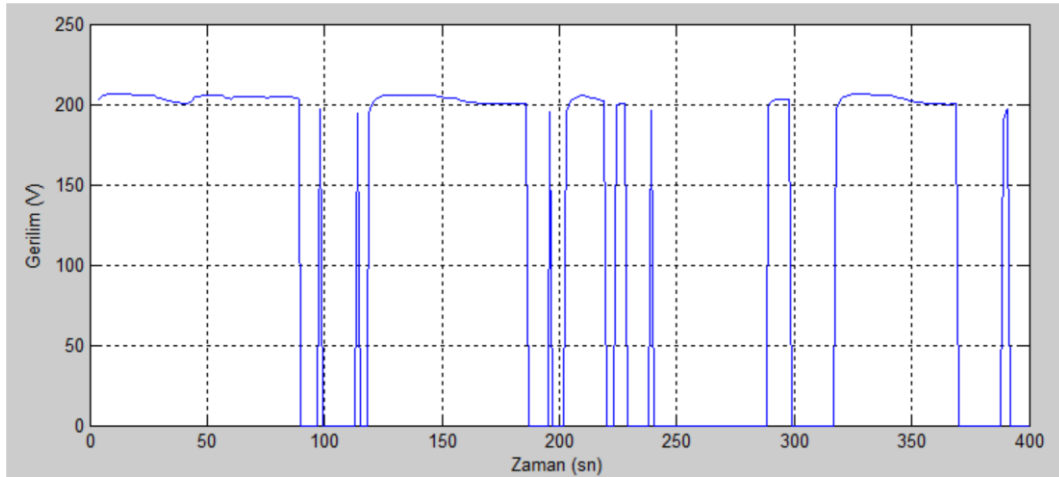
Oluşturulan bu hibrit model için araç üzerinde bulunan yardımcı sistemlerin yükü sabit 5A olarak alındı. Seçilen güzergâh için raylı sistem aracı tarafından talep edilen akımın zamanla değişimi Şekil 12’de gösterilmektedir. Araç tarafından talep edilen akımın maksimum değeri 250 A civarındadır. Ayrıca şekilden

görüldüğü üzere negatif bölgede de akım değerleri mevcuttur. Bu negatif akım aracın frenlemesi esnasında üretilen akım olup bu akıma rejeneratif akım denmektedir. Üretilen bu rejeneratif akım, batarya modülünde yardımcı sistemlerde kullanılmak üzere depolanmaktadır.



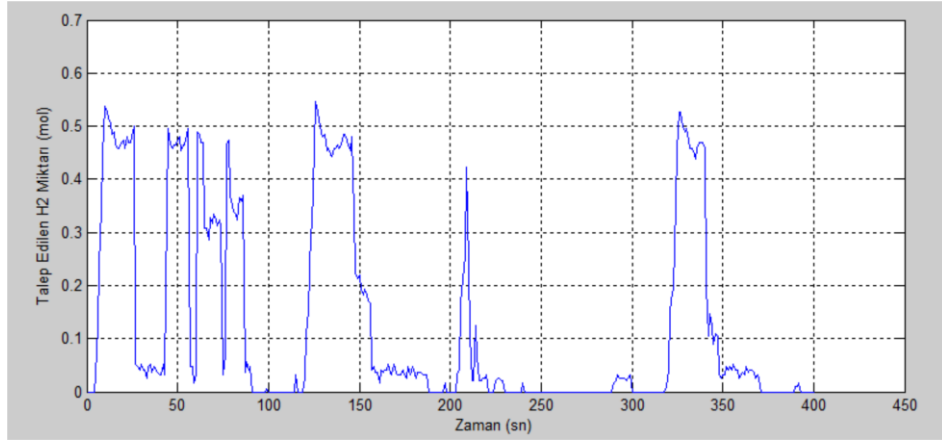
Şekil 12. Durum 1 için araç tarafından talep edilen akımın zamana göre değişimi

Şekil 13'de yakıt hücresi modülüne ait çıkış geriliminin zamana göre değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere araç talep akımının pozitif olduğu zamanlarda çıkış gerilimi devrede olup modülün çıkış gerilimi maksimum 200 V civarındadır.



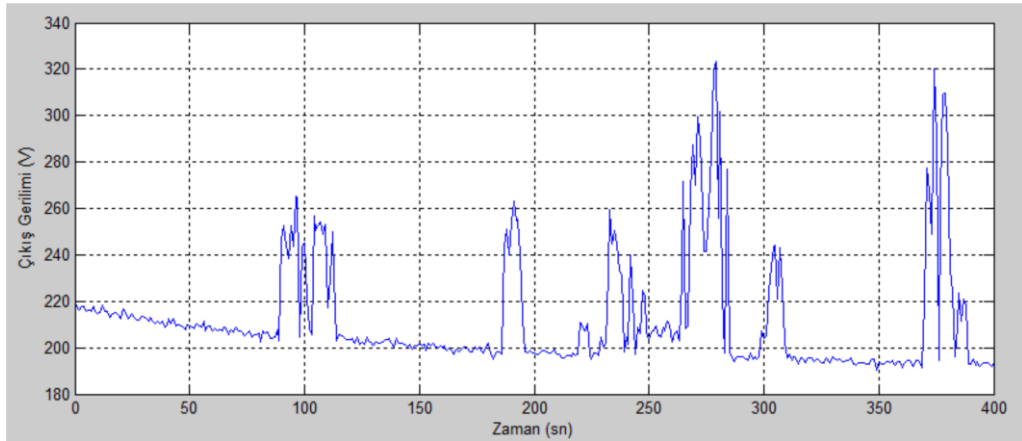
Şekil 13. Durum 1 için yakıt hücresi modülüne ait çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Yakıt hücresi modülü tarafından talep edilen  $H_2$  miktarının zamana göre değişimi Şekil 14'de gösterilmektedir. Hafif raylı sistem aracının akım talep ettiği zamanlarda talep akımı ile ilişkili olarak hidrojen tüketimi artmaktadır. Seçilen pilot bölgeden hafif raylı sistem aracının bir sefer geçmesi durumunda yakıt hücresi modülü tarafından talep edilen  $H_2$  miktarı 52.5 mol'dür.



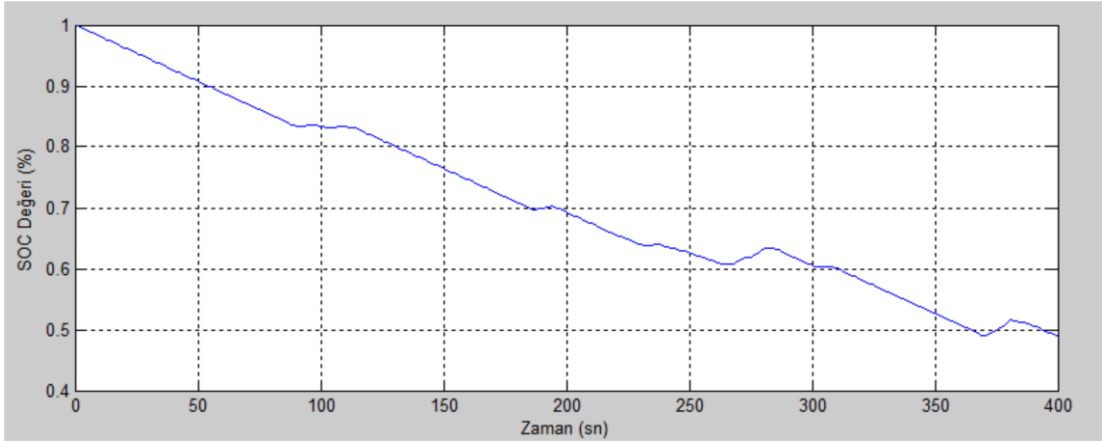
Şekil 14. Durum 1 için talep edilen H<sub>2</sub> miktarının zamana göre değişimi

Hafif raylı sistem aracının frenlemesi esnasında meydana gelen rejeneratif enerjinin depolanması ve bu enerjinin yardımcı ekipmanlarda kullanılması için kullanılan Lityum-İyon batarya modülünün çıkış geriliminin zamana göre değişimi Şekil 15’de gösterilmektedir. Batarya modülünün çıkış geriliminin yaklaşık olarak 190 V ile 320 V arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 15. Durum 1 için Lityum-İyon batarya modülünün çıkış geriliminin zamana göre değişimi

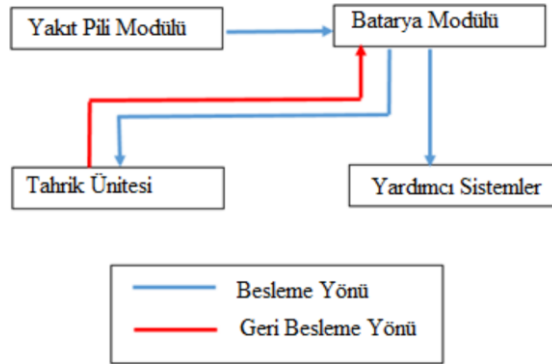
Şekil 16’da Lityum-İyon batarya modülüne ait batarya şarj durumunun (SOC) zamanla değişimi gösterilmektedir. Rejeneratif akımın batarya modülünde depolanma yüzdesine bakıldığında zamanla depolanan akımın %50 oranlarında azaldığı görülmektedir. Fakat, başlangıçta aracın katınerli bölgede olması durumunda, havai hattın şebekeden beslenmesinden dolayı batarya modülünün şarj durumunun %100 olduğu görülmektedir.



Şekil 16. Durum 1 için Lityum-İyon batarya modülünde batarya şarj durumunun zamana göre değişimi

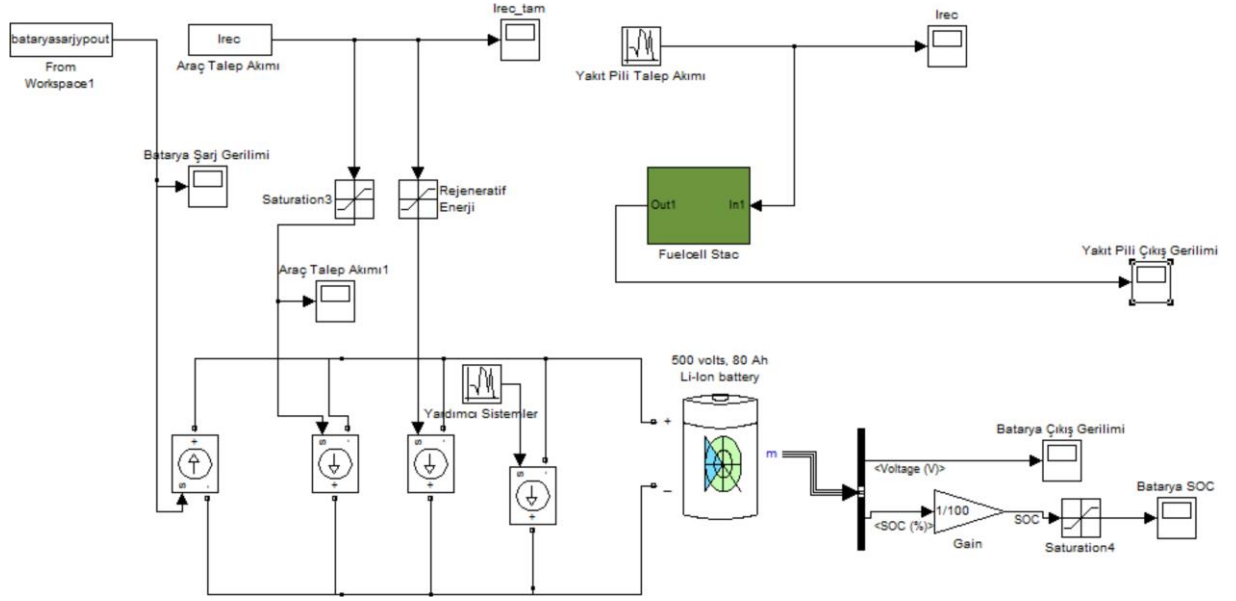
### B. Durum 2

Durum 2, seçilen pilot bölgede raylı sistem aracının katanersiz olarak çalıştırıldığı, aracın Lityum-İyon batarya modülü ile tahrik edildiği ve yakıt hücresi modülünün batarya modülünü şarj etmede kullanıldığı durumdur. Ayrıca Durum 2'de de rejeneratif enerji batarya modülünde depolanmaktadır. Şekil 17 araç üzerindeki güç tahrik sisteminin enerji akış yönlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi yakıt hücresi modülü sadece batarya modülünü beslemektedir.



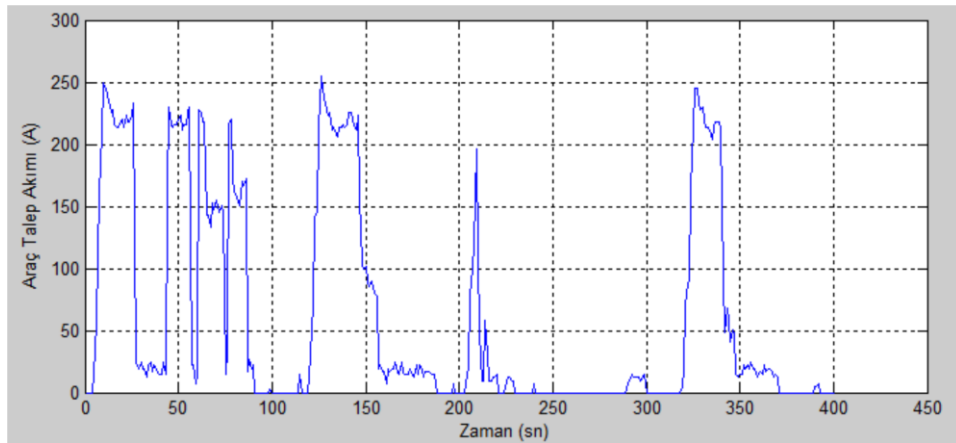
Şekil 17. Araç üzerindeki enerji akış yönleri

Durum 2 için tasarlanan hibrit sistemin genel mimarisi ise Şekil 18'de detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 18. Durum 2 için hibrit sistemin genel mimarisi

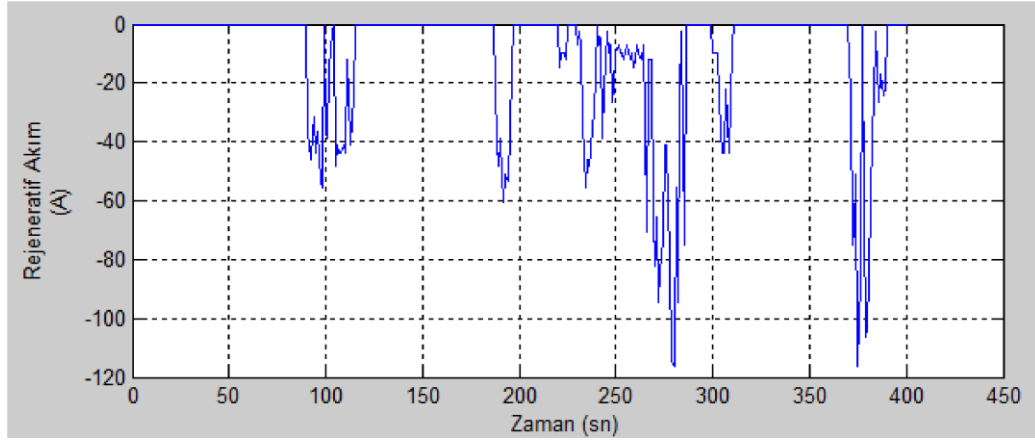
Lityum-İyon batarya modülü ile tahrik edilen raylı sistem aracı tarafından talep edilen akımın zaman göre değişimi Şekil 19'da sunulmaktadır. Araç tarafından batarya modülünden talep ettiği akımın 250 A seviyelerine kadar çıktığı görülmektedir. Talep edilen akım aracın ilk harekete geçtiği anda ve izlediği güzergahın eğimine göre maksimum değerleri ulaşmaktadır.



Şekil 19. Durumu 2 için araç tarafından talep edilen akımın zamana göre değişimi

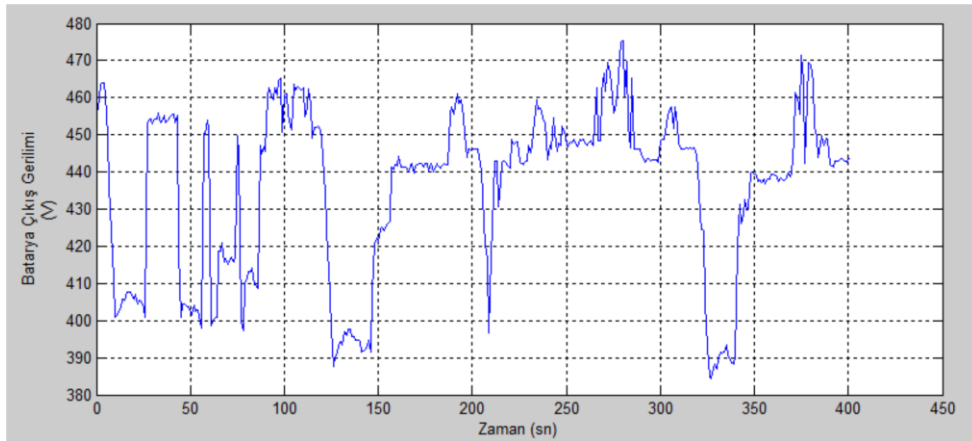
Şekil 20'de batarya modülünde depolanmak üzere raylı sistem aracı tarafından geri basılan rejeneratif akımın zamanla değişimi gösterilmektedir. Frenleme esnasında açığa çıkan bu rejeneratif akım 120 A değerine kadar çıkmaktadır.





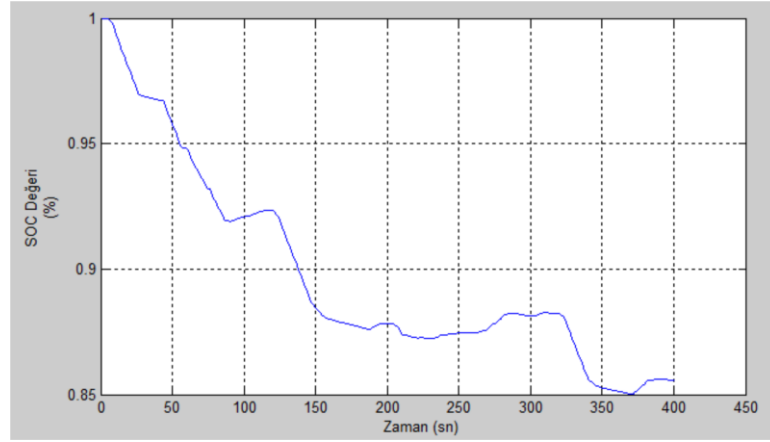
Şekil 20. Durum 2 için araç tarafından sisteme geri basılan rejeneratif akımın zamana göre değişimi

Lityum-İyon batarya modülü çıkış geriliminin zamana göre değişimi Şekil 21'de gösterilmektedir. Durum 2'de tasarlanan hibrit sistemde başlangıçta tam dolu olarak kabul edilen batarya modülünden çekilen akım ile batarya çıkış geriliminin 385 V ile 480 V değerleri arasında değişim gösterdiği tespit edildi.



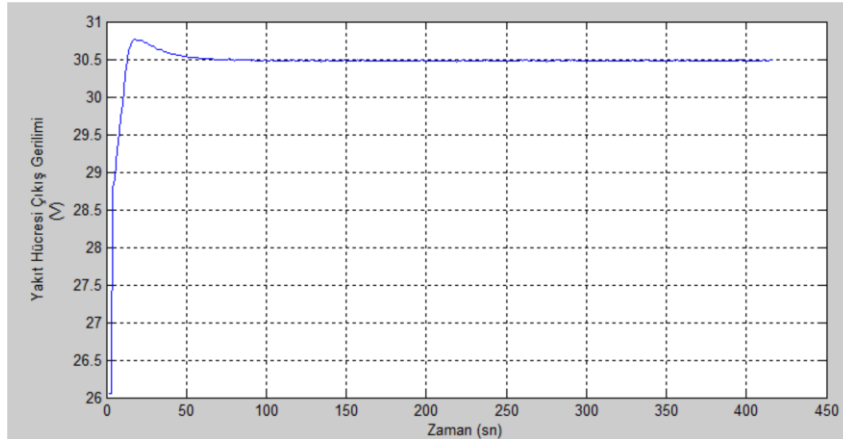
Şekil 21. Durum 2 için Lityum-İyon batarya modülü çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Şekil 22'de batarya modülü SOC'un zamana göre değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere modül başlangıçta %100 dolu iken aracın katenersiz bölgeden tek bir seferde geçmesi durumunda batarya modülü şarj durumunun zamanla %85'lere kadar düştüğü görülmektedir. Durum 2 için batarya modülü şarj durumu Durum 1 ile karşılaştırıldığında Durum 2'de batarya modülünün şarj seviyesi daha yüksektir. Bunun sebebi Durum 2'de batarya modülü hem rejeneratif akımdan hem de yakıt hücresi modülünden beslenmektedir.



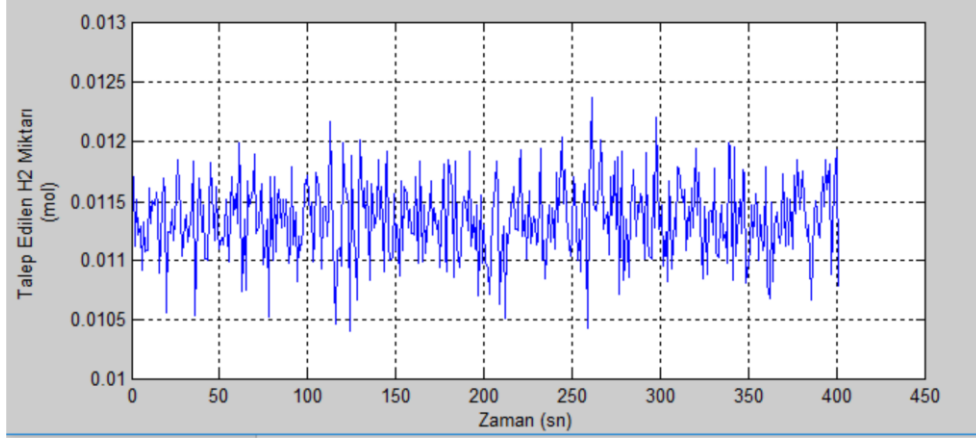
Şekil 22. Durum 2 için batarya modülü şarj durumunun zamana göre değişimi

Yakıt hücresi modülünün çıkış geriliminin zamana göre değişimi Şekil 23'de gösterilmektedir. Durum 2'de yakıt hücresi modülü sadece bataryayı şarj ettiği için çıkış gerilimi aracın seyri esnasında 50. saniyeden sonra gerilimin değişmediği ve 30.5 V civarında sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 23. Durum 2 için yakıt hücresi çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Şekil 24'te yakıt hücresi modülü tarafından talep edilen  $H_2$  miktarının zamana göre değişimini gösterilmektedir. Hafif raylı sistem aracının seçilen güzergahtan bir sefer geçmesi durumunda yakıt hücresi modülü tarafından harcanacak  $H_2$  miktarı yaklaşık olarak 4.6 mol'dür.



Şekil 24. Durum 2 için talep edilen hidrojen miktarının zamana göre değişimi

## V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, hafif raylı sistem aracının güç tahrik sistemi için temiz enerji teknolojilerinden PEM yakıt hücresi ve Lityum-İyon batarya modüllerinin kullanıldığı iki ayrı hibrit sistem tasarlandı. Bu iki hibrit sistem için ayrı ayrı araç tarafından talep edilen akımın, yakıt hücresi modülü çıkış geriliminin, anlık hidrojen tüketim miktarının, batarya çıkış geriliminin ve batarya şarj durumunun zamanla değişimi incelendi. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar kısaca şu şekildedir:

✓ Aracın yakıt hücresi modülü ile tahrik edildiği Durum 1 için aracın enerji profilindeki anlık pikler karşısında yakıt hücresi modülünde enerji yönetiminin zor olacağı görülmektedir. Yakıt hücresi modülünün anlık akım değişimlerinden etkilenmediği aracın Lityum-İyon batarya modülü ile tahrik edildiği Durum 2'deki hibrit sistem uygulaması seçilen güzergah ve araç için daha uygun olduğu görüldü.

✓ Raylı sistem aracının seçilen güzergahta gün içerisinde 10 sefer yapması durumunda Durum 1'de tüketilen hidrojen miktarı 526 mol/gün iken Durum 2'de ise 46 mol/gün'dür. Durum 2 yakıt maliyeti açısından da daha uygundur.

✓ Frenleme esnasında açığa çıkan rejeneratif akımın depolandığı batarya modülünün şarj durumu Durum 1'de %50 iken Durum 2'de %85'dir. Durum 2 de rejeneratif akımın daha verimli bir şekilde depolandığı tespit edildi.

## TEŞEKKÜRLER

Çalışma için gerekli olan gerçek verileri paylaştığı için Kayseri Büyükşehir Belediyesine teşekkür ederiz. Ayrıca 2017 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde sunulan “Yakıt Pili Teknolojisinin Raylı Sistemlere Entegre Edilmesinin Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışmasına da katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- [1] Chen, Q., Gao, L., Dougal, R., & Quan, S. (2009). Multiple model predictive control for a hybrid proton exchange membrane fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 191 (2), 473–482.
- [2] Khaligh, A., Li, Z. (2010). Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59, 6, 2806 - 2814.
- [3] Bubna, P., Advani, S., Prasad, A. (2012). Integration of batteries with ultracapacitors for a fuel cell hybrid transit bus. *Journal of Power Sources*, 199, 360–366.

- [4] Bauman, J., & Kazerani, M. (2009). An Analytical Optimization Method for Improved Fuel Cell–Battery–Ultracapacitor Powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58 (7), 3186 - 3197.
- [5] Fernandez, L., Garcia, P., Garcia, C. A., Jurado, F. (2011). Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway. *Energy Conversion and Management*, 52 (5), 2183–2192.
- [6] Bauman, J., Kazerani, M. (2008). An improved powertrain topology for fuel cell-battery-ultracapacitor vehicles. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Cambridge, UK: IEEE.
- [7] Vural, B., Erdinc, O., Uzunoglu, M. (2010). Parallel combination of FC and UC for vehicular power systems using a multi-input converter-based power interface. *Energy Conversion and Management*, 51, (12), 2613–2622.
- [8] Vural, B., Boynuegri, A., Nakir, I., Erdinc, O., Balicki, A., Uzunoglu, M., Dusmez, S. (2010). Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 20, 11161–11171.
- [9] Gao, W. (2005). Performance comparison of a fuel cell-battery hybrid powertrain and a fuel cell-ultracapacitor hybrid powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (3), 846 - 855.
- [10] Kisacikoglu, M., Uzunoglu, M., Alam, M. (2009). Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (3), 1497–1507.
- [11] Lia, Q., Chena, W., Lia, Y., & Liub, S. (2012). Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 514–525.
- [12] Lin, W.-S., Zheng, C.-H. (2011). Energy management of a fuel cell/ ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method. *Journal of Power Sources*, 196, (6), 3280–3289.
- [13] Takizawa, K., Kondo, K. (2010). A designing method of the power source specifications for hybrid powered traction systems with fuel cells and EDLCs. *International Conference on Electrical Machines and Systems*. IEEE.
- [14] Yoneyama, T., Yamamoto, T., Kondo, K. (2007). Fuel cell powered railway vehicle and experimental test results. *European Conference on Power Electronics and Applications*. Aalborg, Denmark: IEEE.
- [15] Wang, Y.-X., Ou K., Kim Y.-B. (2017). Power source protection method for hybrid polymer electrolyte membrane fuel cell/lithium-ion battery system. *Renewable Energy*. 111, 381-391.
- [16] Arista ,A.A., Agnello, G., Napoli, G., V. (2017). Antonucci Study and design of a hybrid electric vehicle (Lithium Batteries-PEM FC) *International Journal of Hydrogen Energy*. 42(5), 3166-3184.