



HİBRİT YAKIT HÜCRESİ-PV DESTEKLİ BİR TRAMVAYIN EKONOMİK İŞLETİMİ

İbrahim ŞENGÖR^{1,2,3*}, Alper ÇİÇEK⁴

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² University College Cork, Environmental Research Institute, MaREI Centre, Cork, Ireland

³ University College Cork, School of Engineering, Cork, Ireland

⁴ Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

*Yakıt Hücresi,
Hidrojen Enerji
Sistemi,
Optimum Enerji
Yöntemi,
Raylı Sistemler.*

Raylı sistemler büyük nüfusa sahip şehirlerde ulaşım sorununun çözülmesi için önemli bir çözüm aracı olarak görülmektedir. Fakat bu sistemlerde kullanılan tramvaylar küçümsenmeyecek kadar büyük güç tüketimine sahiptirler. Ayrıca bu araçların güç tüketimleri tramvay sayısı ve yolcu sayısı gibi çeşitli etmenlerden dolayı değişkenlik gösterdiği için raylı sistemin ekonomik işletiminin sağlanması ve güç sisteminin güvenilir bir şekilde idare edilmesi çok kolay olmayabilir. Bu bağlamda bu çalışmada çatısına fotovoltaik (PV) sistem dahil edilen ve ayrıca elektrolizör, hidrojen tankı, kompresör ve yakıt hücresinden oluşan hidrojen enerji sistemi ile entegre edilen bir tramvayın optimum enerji yönetim modeli açıklanmaktadır. Çalışmada tramvay ve hidrojen enerji sistemi için elektrik şebekesinden dinamik elektrik fiyatları ile enerji satın alınmaktadır. Önerilen modelin etkinliğini göstermek amacıyla gerçekleştirilen çeşitli durum çalışmalarında İstanbul'da bir tramvay hattının gerçek işletimi dikkate alınarak elde edilen güç profili kullanılmaktadır. Durum çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre önerilen yapı toplam elektrik satın alma maliyetini önemli miktarda düşürebilmektedir. Maliyetleri düşürmede sırasıyla dinamik elektrik fiyatları, PV sistem ve hidrojen enerji sisteminin etkin olduğu görülmektedir. Dinamik elektrik fiyatları elektrik satın alma maliyetinde yaklaşık olarak %13'lük iyileşme sağlarken, tramvay üzerine yerleştirilen PV sistem ile toplam maliyet yaklaşık olarak %3 oranında azaltılabilmektedir.

ECONOMIC OPERATION OF A HYBRID FUEL CELL-PV-SUPPORTED TRAM

Keywords

*Fuel Cell,
Hydrogen Energy
System,
Optimal Energy
Management,
Railway Systems.*

Abstract

Rail systems are accepted as promising solutions to transportation problems in metropolitan cities. However, trams, one of the most common vehicles availed of, have a power consumption that can not be underestimated. In addition, since the power consumption of these vehicles varies due to various factors such as the number of trams and the number of passengers, it may not be very easy to ensure the economical operation of the rail system and to operate the power system in a reliable manner. In this context, this study presents an optimum energy management model of a tram, which is integrated with a photovoltaic (PV) system on its roof and also integrated with a hydrogen energy system consisting of an electrolyzer, hydrogen tank, compressor, and fuel cell. In the study, energy is assumed to be purchased from the power grid with a dynamic pricing scheme for the tram and hydrogen energy system. To demonstrate the effectiveness of the proposed model, the power profile obtained by considering an operated tram line is used in various case studies carried out. According to the results obtained from the case studies, the proposed structure can significantly reduce the total electricity purchase cost. It is seen that, in order, the dynamic pricing scheme, PV system, and hydrogen energy system are effective in reducing costs. While the dynamic pricing scheme provides an improvement of approximately 13% in the cost of purchasing electricity, the total cost can be reduced by approximately 3% with the PV system placed on the tram.

* İlgili yazar / Corresponding author: ibrahim.sengor@ikcu.edu.tr, +90-232-329-3758

Alıntı / Cite

Şengör, İ., Çiçek, A., (2022). Hibrit Yakıt Hücresi-PV Destekli Bir Tramvayın Ekonomik İşletimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1290-1302.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. Şengör, 0000-0002-9451-4218
A. Çiçek, 0000-0003-4540-2276

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	23.05.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	29.07.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.08.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

Adlar Dizini

Çalışmada kullanılan kümeler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıda detaylı bir şekilde belirtilmiştir.

Kümeler

t Zaman periyotları kümesi [saniye].

Parametreler

A Hidrojen enerji sistemi için kilogramdan kW'a dönüşüm için kullanılan dönüştürme sabiti.
 a_{komp}/b_{komp} Kompresör modeline ait regresyon parametreleri.
 AR_{EL} Elektrolizörün güç tüketimini azaltma oranı [kW/saat].
 AR_{YH} Yakıt hücresinin güç üretimini azaltma oranı [kW/saat].
 M_C Oldukça büyük pozitif bir sayı.
 $m_{hidr-maks}$ Hidrojen tankının maksimum hidrojen molar kapasitesi [kg].
 n Adım sayısı.
 P_{EL-nom} Elektrolizörün nominal güç tüketimi [kW].
 P_{YH-nom} Yakıt hücresinin üretebileceği nominal güç değeri [kW].
 YR_{EL} Elektrolizörün güç tüketimini artırma oranı [kW/saat].
 YR_{YH} Yakıt hücresinin güç üretimini arttırma oranı [kW/saat].
 $\lambda_{fiyat,t}$ t periyodunda elektrik birim fiyatı [TL/kWh].
 ΔT Zaman çözünürlüğü [saniye].
 η_{EL} Elektrolizörün verimi [%].
 η_{YH} Yakıt hücresinin verimi [%].
 $\eta_{YH-dön}$ Yakıt hücresine ait dönüştürücünün verimi [%].

Değişkenler

$m_{hidr,t}$ t periyodunda hidrojen tankındaki hidrojen molar miktarı [kg].
 $P_{EL,t}$ t periyodunda elektrolizörün hidrojen üretmek için kullandığı güç miktarı [kW].
 $P_{EL,giriş,t}$ t periyodunda elektrolizörün tükettiği güç miktarı [kW].
 $P_{komp,t}$ t periyodunda kompresör tarafından tüketilen güç miktarı [kW].
 $P_{şebeke-tram,t}$ t periyodunda tramvayın hareketi için şebekeden satın alınan güç miktarı [kW].
 $P_{YH,t}$ t periyodunda yakıt hücresinin ürettiği potansiyel güç miktarı [kW].
 $P_{YH-çıkış,t}$ t periyodunda yakıt hücresinin ürettiği güç [kW].
 $u_{EL,t}$ t periyodunda elektrolizörün çalışmasına ait ikili karar değişkeni. Eğer 1 ise elektrolizör idorjen üretmektedir, 0 ise hidrojen üretimi gerçekleştirilmemektedir [0,1].
 $u_{YH,t}$ t periyodunda yakıt hücresinin çalışmasına ait ikili karar değişkeni. Eğer 1 ise yakıt hücresi enerji üretmektedir, 0 ise enerji üretimi gerçekleştirilmemektedir [0,1].

1. Giriş (Introduction)**1.1. Motivasyon (Motivation)**

Trafik sorunu günümüzde büyük nüfusa sahip kentlerde en büyük problemlerden biri olarak görülmektedir. Bu açıdan dünyada ulaşımın kolay bir şekilde gerçekleştirilmesi için raylı sistem yatırımlarına önem verilerek raylı sistem ağının her geçen gün giderek büyüdüğü görülmektedir. Fakat şehir içi ulaşımında kullanılan tramvaylar nispeten büyük güç tüketimine sahiptirler ve ayrıca raylı sistemde güç tüketimi zaman, işletilen tramvay sayısı ve yolcu sayısı gibi birçok değişkene bağlı olarak değişebilmektedir. Bu sebeple dalgalı ve yüksek orandaki güç tüketimi güç sisteminde güvenilirliği azaltarak arz ve talep dengesinin sağlanmamasına sebep olabileceği için sistem frekansının korunamaması ve enerji kesintisi gibi birçok işletimsel problemin ortaya çıkmasına sebep olabilir. Bu açıdan raylı sistemin optimum ekonomik işletimi ele alınması gereken önemli konulardan birisi olarak görülmektedir. Bu sebeple optimum enerji yönetimi ile birlikte raylı sistem ile entegre edilen yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri ve dinamik elektrik fiyatlarının uygulanması da ekonomik işletim konusunda fayda sağlayacaktır. Raylı sisteme entegre edilecek yenilenebilir enerji kaynakları şebekeden çekilen elektrik enerjisi miktarını azaltırken diğer yandan da karbon emisyonlarının azaltılmasını sağlayacaktır. Ayrıca bir

başka sıfır karbon enerji kaynağı olan hidrojen enerji sistemi raylı sistemde esnekliği sağlayarak optimum ekonomik işletim konusunda önemli faydalar sağlayabilir. Güç sisteminin güvenilir şekilde idare edilmesi açısından tüketicilere sunulan dinamik elektrik fiyatları da güç sisteminin işletimi konusunda fayda sağlarken raylı sistem işletmecisine de sistemini ekonomik şekilde işleterek toplam maliyetlerini azaltma fırsatı sunabilmektedir.

1.2. Literatür Taraması (Literature Review)

Literatürde raylı sistem araçlarının optimum enerji yönetimi üzerine bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Han ve ark. hafif raylı tramvay için çoklu proton değişim membranlı yakıt hücresi, batarya ve süper kapasitör içeren hibrit bir sistem tasarlamışlardır (Han vd., 2018). Yazarlar çalışmadan elde ettikleri sonuçların önerilen stratejinin birden fazla enerji kaynağını koordine etme ve genel tramvay verimliliğini artırma konusunda fayda sağladığını belirtmişlerdir. Li ve ark. yakıt hücresi, batarya ve süper kapasitörden oluşan hibrit kaynakların yüksek güçlü bir tramvayı desteklemesi ve tramvayın güç talebindeki geçici ve hızlı değişimlerden kaçınılabilmesi için tüketim minimizasyonu tabanlı bir stratejisi sunmuşlardır (Li vd., 2018). Yazarlar çalışmada önerilen stratejinin birden fazla güç kaynağını yönetebildiğini ve koordine edebildiğini, DC bara gerilim stabilizasyonunu sürdürdüğünü, genel tramvay verimliliğini artırdığını ve hibrit güç sistemi üzerindeki stresi azaltabildiğini belirtmişlerdir. Ciccarella ve ark. tramvay hattı üzerinde yol kenarına kurulan süper kapasitörün enerji yönetimi için bir kontrol stratejisi açıklamışlardır (Ciccarella vd., 2016). Kontrol stratejisinde tramvaylar ve trafo merkezleri arasındaki enerji akışını gerçek zamanlı olarak optimize etmişlerdir. Zhang ve ark. yakıt hücreli hibrit bir tramvayın hız ayarlamasını gerçekleştirmek, adaptif güç tahsisini sağlamak ve işletim güvenliğini artırmak için sentetik bir strateji önermişlerdir (Zhang vd., 2021). Torreglosa ve ark. İspanya'nın Zaragoza şehrinde yer alan ve süper kapasitörle işletilen Urbos 3 tramvayı için yakıt hücresi, batarya ve süper kapasitöre dayalı yeni bir hibrit güç aktarma sistemini değerlendirmişlerdir (Torreglosa vd., 2014).

Arévalo ve ark. Cuenca-Ekvador'da yer alan bir tramvaya cer gücü sağlanması için iki alternatif sistemi karşılaştırmışlardır. İlk sistemde yenilenebilir enerji, şebeke gücü, süper kapasitör, lityum iyon batarya ve yakıt hücresine yer verirken ikinci sistemde yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmemişlerdir (Arevalo vd., 2020). Han ve ark. Hafif raylı metro hattı için yakıt hücresi ve kurşun asit batarya destekli bir güç modeli sunmuşlardır. Ayrıca Türkiye'de yer alan bir tramvay ile test çalışması gerçekleştirmişlerdir (Han vd. 2016). Zhang ve ark. gerçek bir tramvayın parametrelerini kullanarak iki yakıt hücresi, iki batarya ve iki süper kapasitörden oluşan bir hibrit tramvay modeli sunmuşlardır (Zhang vd., 2019). Cano ve ark. yenilenebilir enerji kaynakları, süper kapasitörler ve lityum iyon bataryaların desteklediği gerçek bir tramvay için rejeneratif frenleme enerjisini de dikkate alarak yeni bir enerji kontrolü modeli önerilmişlerdir (Cano vd., 2021). Yang ve ark. iki yakıt hücresi, iki lityum iyon batarya ve iki süper kapasitörden oluşan bir yapı sunmuşlardır (Yang vd., 2016). Zhang ve ark. bir pantograf/katener tramvay, bir raydan beslemeli tramvay ve üç yakıt hücreli hibrit tramvayın maliyet analizini gerçekleştirdiler (Zhang vd., 2016).

Garcia ve ark. İspanya'nın Sevilla kentindeki Metro Centro tramvayı için bir yakıt hücresi ve batarya hibrit sisteminin konfigürasyonunu, modellenmesini ve kontrolünü gerçekleştirmek için bir yapı sunmuşlardır (Garcia vd., 2010). Önerilen hibrit sistemde birincil enerji kaynağı olarak polimer elektrolit membran yakıt hücresini ve ikincil enerji kaynağı olarak nikel-metal hidrit hücre bataryayı değerlendirmişlerdir. Noia ve ark. bir tramvayın optimum enerji yönetimi açısından süper kapasitör tabanlı enerji depolama sistemi ve endüktif güç aktarım sisteminin optimum entegrasyonunu değerlendirmişlerdir (Noia vd., 2019). Herrera ve ark. bataryaları ve süper kapasitörleri içeren yerleşik bir enerji depolama sistemine sahip hafif raylı bir tramvay için optimum enerji yönetimi stratejisi sunmuşlardır (Herrera vd., 2016). Khayyam ve ark. bir tramvaya ait rejeneratif enerji, yük, enerji depolama sistemi ve dağıtık enerji kaynaklarının koordineli işletimi için yeni bir strateji sunmuşlardır (Khayyam vd., 2016). Loy-Benitez ve ark. Güney Kore'de yer alan bir demiryolu transformator merkezindeki dinamik hidrojen, soğutma ve ısıtma talebinin karşılanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği yeni bir strateji geliştirmişlerdir (Loy-Benitez vd., 2021). Fakat yukarıda incelenen çalışmaların hiçbirinde tramvayın çatısında fotovoltaik (PV) güç üretim seçeneği ele alınmamış ve dinamik elektrik fiyatları uygulanmamıştır. Ayrıca hidrojen enerji sisteminin sadece bir çalışmada dikkate alındığı belirtilmelidir fakat bu çalışmada dinamik elektrik fiyatları ve tramvayın çatısında PV yapısı dikkate alınmamıştır. Çalışmanın literatürde hangi boşluğu doldurduğunun daha iyi görülebilmesi açısından Tablo 1'de sınıflandırmaya yer verilmiştir.

Tablo 1. Burada sunulan ve literatürde yer alan çalışmaların karşılaştırıldığı sınıflandırma tablosu (Taxonomy table comparing presented study and papers in the literature)

Referans	Yakıt hücresi	Hidrojen tankı	Elektrolizör	Kompresör	Dinamik elektrik fiyatları	Tramvayın çatısında PV sistem
(Han vd., 2018)	✓	–	–	–	–	–
(Li vd., 2018)	✓	–	–	–	–	–
(Ciccarelli vd., 2016)	–	–	–	–	–	–
(Zhang vd., 2021).	✓	–	–	–	–	–
(Torreglosa vd., 2014)	✓	–	–	–	–	–
(Arévalo vd. 2020)	✓	✓	✓	✓	–	–
(Han vd. 2016)	✓	–	–	–	–	–
(Zhang vd. 2019)	✓	–	–	–	–	–
(Cano vd. 2021)	–	–	–	–	–	–
(Yang vd. 2016)	✓	–	–	–	–	–
(Zhang vd. 2016)	✓	–	–	–	–	–
(Garcia vd., 2010)	✓	–	–	–	–	–
(Noia vd., 2019)	–	–	–	–	–	–
(Herrera vd., 2016)	–	–	–	–	–	–
(Khayyam vd., 2016)	–	–	–	–	–	–
(Loy-Benitez vd., 2021)	✓	–	✓	–	–	–
Bu çalışma	✓	✓	✓	✓	✓	✓

1.3. Çalışmanın Katkıları ve Organizasyonu (Contributions and Organisation of Studies)

Bu çalışmada raylı sistem araçlarından tramvayın enerji yönetiminin ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi açısından hibrit yenilenebilir kaynak-enerji depolama sisteminin dahil edildiği optimum enerji yönetimine ait karışık tamsayı doğrusal programlama (mixed-integer linear programming – MILP) modeli sunulmaktadır. Dinamik elektrik fiyatlarının da dikkate alındığı çalışmada amaç raylı sisteme ait toplam maliyetinin minimizasyonu olarak belirlenmiştir. Çalışmanın literatüre katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

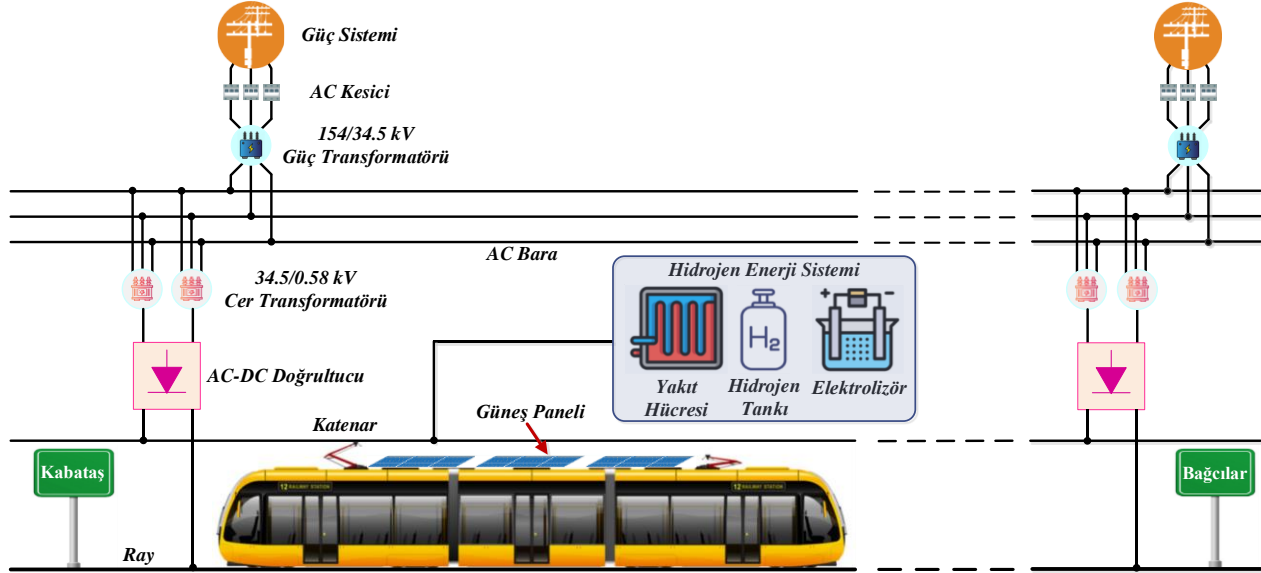
1. Tramvay hareketi için şebekeden satın alınan toplam enerji satın alma maliyetini düşürülmesi açısından tramvayın çatısında PV güç üretim sistemi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca raylı sistem işletimine esneklik kazandırmak açısından raylı sisteme ait yol üzerinde bir hidrojen enerji sistemi yer almaktadır. Hidrojen enerji sistemi hidrojen üreten elektrolizör, hidrojen tankı, kompresör ve hidrojenden enerji üreten yakıt hücresinden oluşmaktadır.
2. Tramvayın hareket etmesi için şebekeden çekilen enerjinin dinamik elektrik fiyatları ile satın alındığı varsayılmaktadır. Böylelikle dinamik elektrik fiyatları aracılığı ile hidrojen enerji sistemine hidrojen depolama için elektriğin nispeten pahalı olduğu periyotlarda kullanılmak üzere nispeten ucuz olduğu periyotlarda enerji satın alma fırsatı yakalanabilmektedir.
3. Önerilen raylı sistem enerji yönetim modelinin değerlendirilmesi açısından İstanbul Kabataş-Bağcılar tramvay hattına ait gerçek işletim durumu dikkate alınarak oluşturulan güç tüketim profili test çalışmalarında değerlendirilmektedir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: 2. Bölümde önerilen modele ait matematiksel modellemeye yer verilmektedir. 3. Bölüm durum çalışmaları ve elde edilen sonuçların detaylı olarak karşılaştırmalı analizlerini içermektedir. Son olarak, Bölüm 4'te önemli sonuçlar vurgulanmakta ve gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada hidrojen enerji sistemi ile desteklenen ve üzerinde PV güç sistemi yerleştirilen bir tramvayın ekonomik şekilde optimum işletim problemi ele alınmaktadır. Önerilen yapıya ait genel bir görünüm Şekil 1'de verilmektedir. Burada şebekeden tahsis edilen enerji AC-DC dönüştürücü aracılığı ile tramvayın hareketi için kullanılmaktadır. Ayrıca tramvayın katenar hattına tramvayın optimum işletimini sağlamak için bir hidrojen enerji sistemi entegre edilmiştir. Burada katenar üzerinden sağlanan enerji ile elektrolizör aracılığı ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen hidrojen yüksek basınçlı hidrojen tankı içerisinde depolanabilmektedir. Tankta depo edilen hidrojen yakıt hücresinde kullanılarak elektrik enerjisi olarak tramvaya hizmet edebilmektedir. Ayrıca

tramvay üzerinde yer alan PV panelleri tramvayın enerji talebinin karşılanmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada rejeneratif frenleme enerjisi konseptinin değerlendirilmediğinin altı çizilmelidir.



Şekil 1. Hibrit yakıt hücresi-PV sistem destekli tramvayın optimum enerji yönetim modeline ait genel bir yapı. (Overview of the hybrid FC-PV assisted tram)

Çalışmada amaç fonksiyonu şebekeden satın alınan toplam elektrik enerjisi maliyetinin minimizasyonu olarak belirlenmiştir ki bu (1) denklemi ile ifade edilmektedir. Burada şebekeden tramvayın hareketi için, elektrolizörün hidrojen üretmesi için ve hidrojen enerji sistemi içerisinde yer alan kompresörde kullanılmak üzere enerji satın alındığı ifade edilmelidir.

$$\text{Minimum Tüketim} = \sum_t (P_{\text{şebeke-tram},t} + P_{EL,giris,t} + P_{komp,t}) \cdot \lambda_{fiyat,t} \cdot \Delta T \quad (1)$$

Önerilen sistem için her bir t periyodundaki güç dengesi (2) eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada PV sistemde üretilen güç, yakıt hücresinden elde edilen güç ve şebekeden satın alınan güç tramvayın tükettiği güç ve hidrojen enerji sistemi içerisinde yer alan elektrolizör ve kompresörde tüketilen gücün toplamına eşittir. Yakıt hücresinin üretim artırma oranı (3) ile sınırlandırılırken, üretim azaltma oranına ait limit (4) ile belirlenmektedir. Yakıt hücresinin üretebileceği maksimum güç limiti ise (5) ile ifade edilmektedir. Yakıt hücresine ait çıkış gücü ise DC-DC dönüştürücünün verimi ve yakıt hücresinin de verimine bağlı olacak şekilde (6) denklemi ile hesaplanmaktadır. Ayrıca yakıt hücresinin düzgün çalışabilmesi için sistemde bir basınçlı oksijene ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple devreye bir kompresör dahil edilmiştir. Kompresöre ait güç talebi (7) ile ifade edilmektedir.

$$P_{PV,t} + P_{YH-çıkış,t} + P_{\text{şebeke-tram},t} = P_{yük-tram,t} + P_{EL-giris,t} + P_{komp,t}, \quad \forall t \quad (2)$$

$$P_{YH,t} - P_{YH,t-1} \leq YR_{YH} \cdot P_{YH-nom} \cdot \Delta T, \quad t > 1 \quad (3)$$

$$P_{YH,t-1} - P_{YH,t} \leq AR_{YH} \cdot P_{YH-nom} \cdot \Delta T, \quad t > 1 \quad (4)$$

$$P_{YH,t} \leq P_{YH-nom}, \quad \forall t \quad (5)$$

$$P_{YH-çıkış,t} = P_{YH,t} \cdot \eta_{YH} \cdot \eta_{YH-dön}, \quad \forall t \quad (6)$$

$$P_{komp,t} = a_{komp} \cdot P_{YH,t} + b_{komp} \cdot u_{YH,t}, \quad \forall t \quad (7)$$

Hidrojen tankındaki hidrojen miktarının her bir t periyodunda yakıt hücresi ve elektrolizörün çalışmasına bağlı değişimi (8) eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada elektrolizör tarafından üretilen ve yakıt hücresi tarafından tüketilen hidrojen miktarları denge denkleminde yer almaktadır. Hidrojen enerji sisteminden kullanılacak hidrojen miktarının üst sınırı ise (9) eşitsizliği ile belirlenmektedir. Elektrolizörün hidrojen üretmek için güç tüketimini artırma oranı (10) ile sınırlandırılırken, güç tüketimini azaltma oranı sınırı ise (11) ile ifade

edilmektedir. Eşitlik (12)'de elektrolizörün maksimum güç limitinin elektrolizörün nominal gücü kadar olabileceği belirtilmektedir. Ayrıca elektrolizör ve yakıt hücresinin aynı periyotta çalışmaması durumu $u_{EL,t}$ ve $u_{YH,t}$ ikili karar değişkenlerinden de yararlanılarak (13)-(15) eşitsizlikleri ile garanti edilmektedir. Son olarak, elektrolizör tarafından tüketilen güç değeri elektrolizörün giriş gücü ve elektrolizörün verimlilik değerinin çarpımı ile değişmektedir ki bu durum (16) eşitliği ile tanımlanmaktadır.

$$m_{hidr,t} \cdot n - m_{hidr,t-1} \cdot n - P_{el,gir,t} \cdot (1/A) + P_{YH,t} \cdot (1/A) = 0, \quad t > 1 \quad (8)$$

$$m_{hidr,t} \leq m_{hidr-maks}, \quad \forall t \quad (9)$$

$$P_{EL,t} - P_{EL,t-1} \leq YR_{EL} \cdot P_{EL-nom} \cdot \Delta T, \quad t > 1 \quad (10)$$

$$P_{EL,t-1} - P_{EL,t} \leq AR_{EL} \cdot P_{EL-nom} \cdot \Delta T, \quad t > 1 \quad (11)$$

$$P_{EL,t} \leq P_{EL-nom}, \quad \forall t \quad (12)$$

$$P_{EL,t} \leq M_C \cdot u_{EL,t}, \quad \forall t \quad (13)$$

$$P_{YH,t} \leq M_C \cdot u_{YH,t}, \quad \forall t \quad (14)$$

$$u_{EL,t} + u_{YH,t} \leq 1, \quad \forall t \quad (15)$$

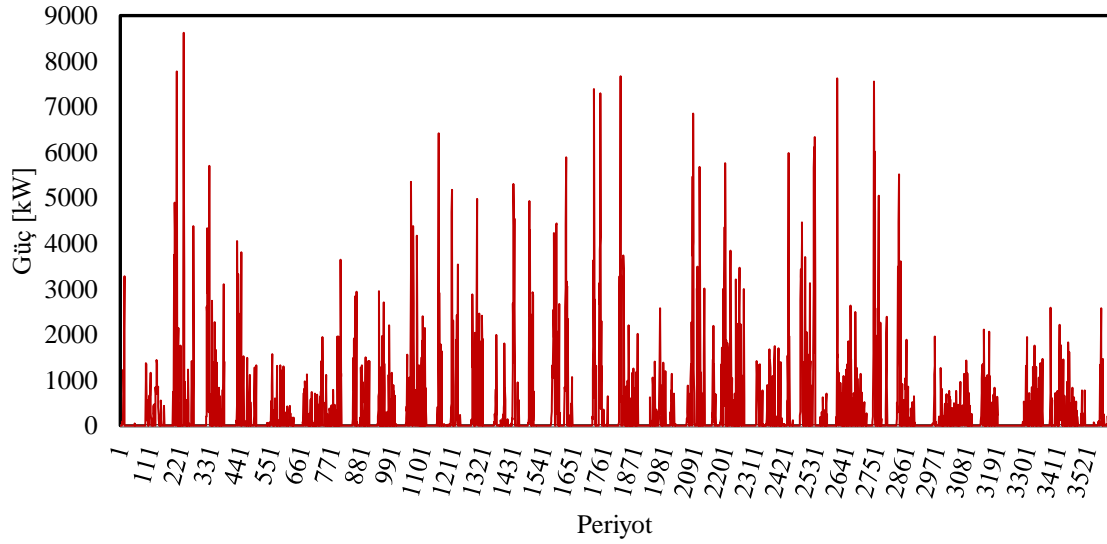
$$P_{EL,t} = P_{EL-giris,t} \cdot \eta_{EL}, \quad \forall t \quad (16)$$

3. Test ve Sonuçlar (Test and Results)

Yakıt hücresi ve PV sistem tarafından desteklenen tramvayın optimum enerji yönetim modeli karışık tamsayılı doğrusal programlama yöntemi kullanılarak sunulmaktadır. Önerilen optimizasyon stratejisi GAMS v.24.1.3 yazılımı ve CPLEX v.12 çözücüsü aracılığı ile test edilmektedir. Problem, 8 Çekirdekli 1065G7 1.5 GHz CPU ve 32 GB RAM'e sahip bir laptop ile en uzun durum çalışmasında bile 2.77 saniyede çözülebilmektedir. Bu bölümün geri kalanında sırasıyla test çalışmalarına ait giriş verileri ve elde edilen sonuçların karşılaştırması yer almaktadır.

3.1. Giriş Verileri (Input Data)

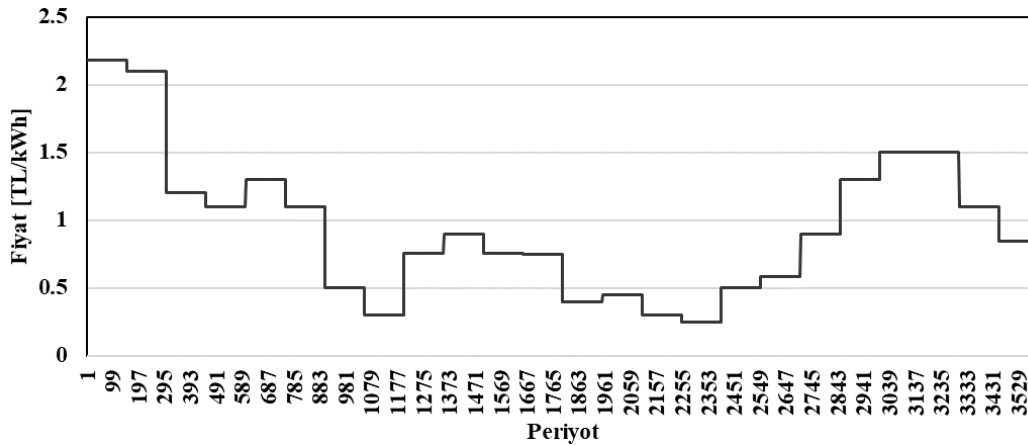
Test çalışmasında Kabataş-Bağcılar hattında çalıştığı kabul edilen bir tramvayın bir saatlik işletimi dikkate alınmaktadır. Gerçek çalışma durumu simüle edilerek oluşturulan tramvaya ait güç tüketim profili Şekil 2'de verilmektedir. Ayrıca modelde yer aldığı düşünülen hidrojen enerji sistemine ait veriler referans (Eren, 2022)'de yer alan verilerin çalışmaya uygun şekilde revize edilmesi ile oluşturulmuştur ki ilgili veri Tablo 2'de verilmektedir. Tramvay hareketi için ve hidrojen enerji sisteminde hidrojene dönüştürülerek depolanmak üzere şebekeden satın alınan enerjiye ait dinamik elektrik fiyatları Şekil 3'te verilirken, sabit elektrik fiyatının olduğu durumda ise fiyatın 2.04 TL/kWh olduğu kabul edilmektedir. Çalışmada ilgili çalışma saati için her bir periyotta PV sistemin 30 kW'lık güç ürettiği düşünülmektedir. Ayrıca zaman çözünürlüğü 1 saniye olarak alınmıştır.



Şekil 2. Gerçek çalışma durumu dikkate alınarak oluşturulan tramvaya ait güç tüketimi. (Power consumption profile of the tram throughout the journey)

Tablo 2. Test çalışmalarında kullanılan hidrojen enerji sistemine ait giriş verileri (Input parameters of the hydrogen energy system)

Parametre	Değer [Birim]	Parametre	Değer [Birim]
A	33.5	P_{YH-nom}	100 [kW]
a_{komp}	0.0104	η_{YH}	0.6
b_{komp}	0.437	$\eta_{YH-dön}$	0.95
$m_{hidr,bşlncç}$	40 [kg]	η_{EL}	0.7
$m_{hidr,maks}$	100 [kg]	YR_{EL}	12 [kW/saat]
n	10	AR_{EL}	12 [kW/saat]
YR_{YH}	12 [kW/saat]	P_{EL-nom}	100 [kW]
AR_{YH}	12 [kW/saat]	M_C	10000



Şekil 3. Dinamik elektrik fiyatları (Dynamic pricing scheme)

3.2. Simülasyon Sonuçları (Simulation Results)

Çalışmada önerilen modelin etkinliğini göstermek açısından 6 farklı durum çalışması gerçekleştirilmiştir. Dinamik ve sabit elektrik fiyatları, hidrojen enerji sistemi ile PV sistemin varlığı dikkate alınarak oluşturulan durum çalışmalarına ait detaylı bilgi Tablo 3'te verilmiştir. Burada hidrojen enerji sistemi ile PV sistemin olmadığı ve sabit elektrik fiyatının uygulandığı Durum-1 temel durum olarak kabul edilmektedir.

Tablo 3. Durum çalışmalarına ilişkin detaylar (The details of the evaluated case studies)

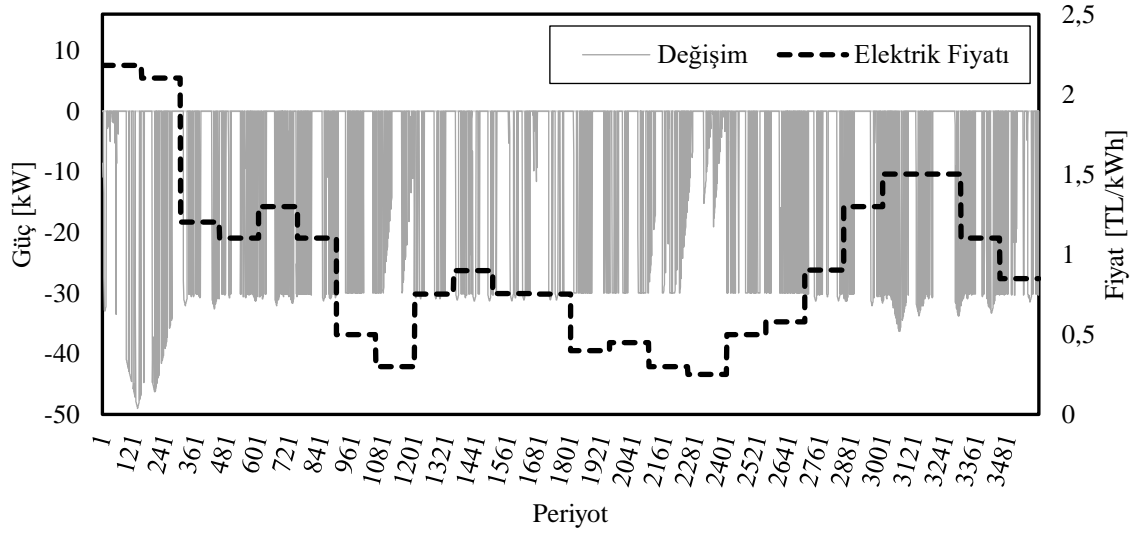
Durum çalışması	Hidrojen enerji sistemi	PV sistem	Dinamik / Sabit elektrik fiyatı
Durum-1 (Temel Durum)	–	–	– / ✓
Durum-2	–	–	✓ / –
Durum-3	✓	–	✓ / –
Durum-4	–	✓	✓ / –
Durum-5	✓	✓	– / ✓
Durum-6	✓	✓	✓ / –

Elde edilen sonuçlara göre her bir durum çalışmasında meydana gelen toplam maliyet Tablo 4'te verilmiştir. Toplam işletme maliyeti temel durumda 367.483 TL olarak gerçekleşmiştir ki bu durum çalışmaları arasındaki en yüksek maliyeti ifade etmektedir. Durum-6 olarak isimlendirilen (hidrojen enerji ve PV güç üretim sisteminin dahil olduğu) durumda toplam maliyet 58.61 TL (yaklaşık olarak %15.89 azalma) azalma göstererek 309.101 TL olarak gerçekleşmiştir. Yine temel duruma göre PV sistem yaklaşık %2.88 maliyetin azaltılmasını sağlamıştır. Durum çalışmaları karşılaştırıldığında toplam maliyet üzerinde en fazla dinamik elektrik fiyatlarının, daha sonra ise PV sistemin etkili olduğu söylenmelidir. Durum-1 ve Durum-2 karşılaştırıldığında sadece dinamik elektrik fiyatının sistem maliyetini azaltma konusunda yaklaşık olarak %13 etkisi söz konusudur. Dinamik fiyatlarının uygulandığı Durum-4 ve Durum-6'yı karşılaştırdığımızda ise hidrojen enerji sisteminin toplam maliyet üzerinde 0.318 TL etki gösterdiği görülmektedir. Hidrojen enerji depolama sisteminin maliyet üzerinde büyük etki göstermese de dinamik elektrik fiyatının uygulandığı durumda büyük fiyat değişimleri durumunda daha fazla kâr elde edebilme konusunda faydalı olabileceği belirtilmelidir. Burada yer alan hidrojen enerji sisteminin kapasitesinin nispeten çok büyük olmadığı da ifade edilmelidir. Bunun dışında hidrojen enerji sistemi kısa süreli elektrik kesintileri konusunda tramvayın desteklenmesi konusunda da fayda sağlayabilir. Ayrıca önerilen sistem sıfır karbon emisyonu sağlayan PV ve hidrojen enerji sistemini içerdiği için çevre için de oldukça fayda sağlayacaktır. Ayrıca önerilen model toplam işletme maliyetini %15,89 oranında azaltabilmektedir ki bu oran hiç de küçümsenmeyecek düzeydedir. Bu açıdan sunulan yaklaşık raylı sistem işletmecilerinin kârlarını arttırmaları konusunda önemli bir avantaj sunabilmektedir. Günümüzde hidrojen tabanlı enerji sistemlerinin yatırım maliyetleri yüksek olsa da gelecekte bu maliyetlerinin giderek daha da azalacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda çevreci özelliği, raylı sisteme esneklik ve kazanç sağlaması ile hidrojen enerji sistemlerinin gelecekte önemli bir yer bulacağı ifade edilebilir.

Tablo 4. Durum çalışmalarında elde edilen toplam işletme maliyetleri (Simulation results of each case studies)

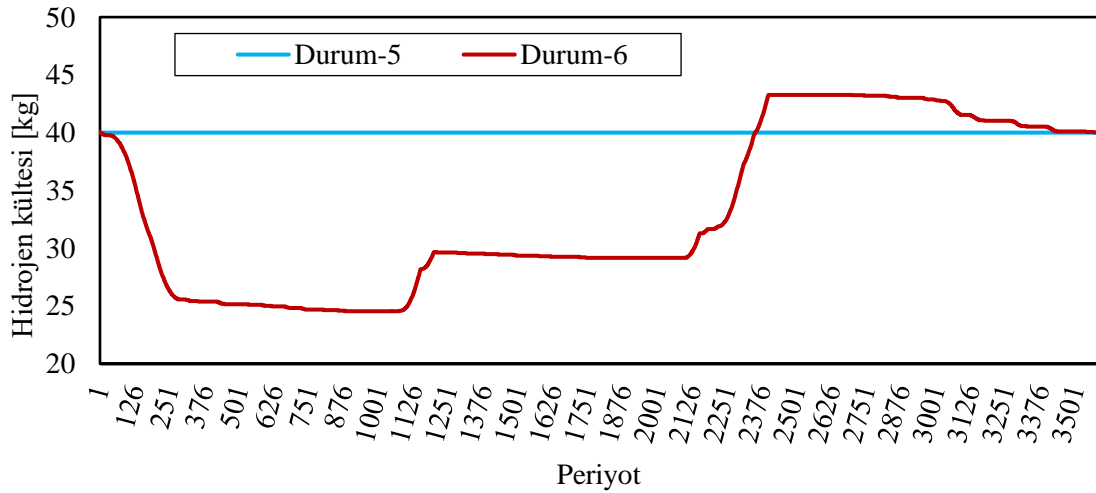
Durum çalışması	Maliyet [TL]	Temel Duruma göre değişim
Durum-1 (Temel Durum)	367,483	–
Durum-2	319,276	-%13,12
Durum-3	319,161	-%13,15
Durum-4	309,419	-%15,80
Durum-5	356,915	-%2,88
Durum-6	309,101	-%15,89

Durum-6'da her bir periyotta şebekeden satın alınan gücün temel durum ile karşılaştırması Şekil 4'te verilmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere elektrik fiyatının en yüksek olduğu saatlerde şebekeden çekilen güçlerde azalma söz konusudur. 2275-2400 periyot aralığında elektrik fiyatı en düşük seviyede olduğu için bu aralıktaki değişim diğer zamanlara göre daha az olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca bir saatte şebekeden 356.9 kWh enerji satın alındığı ifade edilmelidir. Durum-6'da Durum-1'e göre şebekeden satın alınan enerjide 10.67 kWh'lik bir azalma söz konusudur.



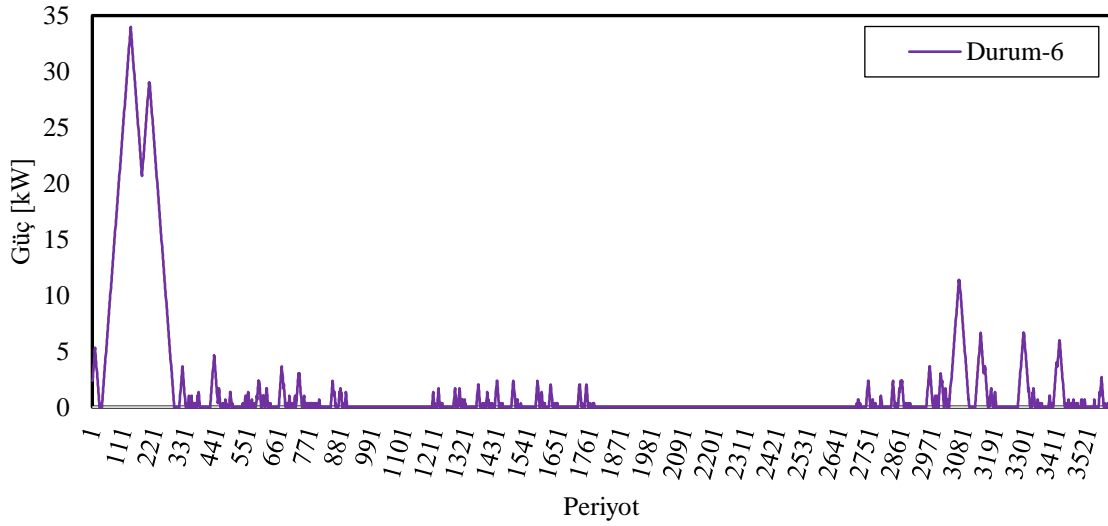
Şekil 4. Durum-6 için Durum-1'e göre şebekeden satın alınan güçlerin değişimi (Change of the purchased power from the grid for Case-6 with respect to Case-1)

Durum-5 ve Durum-6'da hidrojen tankındaki hidrojen molar değişimleri Şekil 5'te verilmektedir. Hidrojen enerji sistemi ve PV sistemin yer aldığı fakat farklı fiyat uygulamalarının düşünüldüğü Durum-5 ve Durum-6 karşılaştırıldığında, Durum-5'te elektrik fiyatı sabit olduğu için bir arbitraj yapma fırsatı söz konusu değildir. Bu açıdan hidrojen enerji sistemi mevcut olmasına rağmen hiç değerlendirilmediği ifade edilmelidir. Dinamik elektrik fiyatlarının uygulandığı ve ayrıca önerilen yapı olan Durum-6'da ise hidrojen enerji sistemi de değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik fiyatının yüksek olduğu ilk periyotlarda hidrojen molar miktarında bir azalma gerçekleşmektedir. Daha sonra elektrik fiyatının nispeten daha düşük olduğu periyotlarda ise hidrojen molar miktarı giderek artmaktadır hatta fiyatın düşük olması sebebiyle başlangıçtaki seviyeden bile daha fazla hidrojen molar depolanmaktadır. İlgili saatin son periyodunda ise hidrojen tankındaki hidrojen molar miktarı çalışmada belirtildiği gibi başlangıçtaki seviye olan 40 kg değerine ulaşmaktadır.



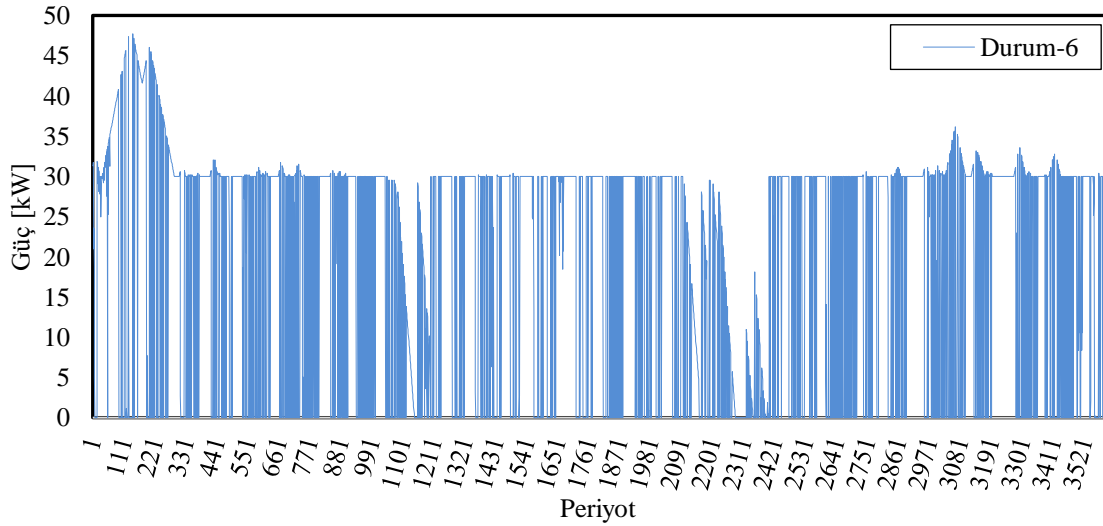
Şekil 5. Hidrojen enerji sistemine ait hidrojen tankındaki hidrojen miktarının değişimi (Change of the amount of hydrogen in the hydrogen tank)

Durum-6'da yakıt hücresi tarafından üretilen güce ait veri Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 5'te yer alan hidrojen molar değişiminden de görülebileceği gibi ilk periyotlarda, ki burada elektrik fiyatı en yüksek seviyelerdedir, yakıt hücresi en fazla güç üretimini gerçekleştirmektedir. İlgili saatin sonunda ise hidrojen miktarının istenen seviyeye gelmesi açısından bir miktar daha güç üretildiği belirtilmelidir.



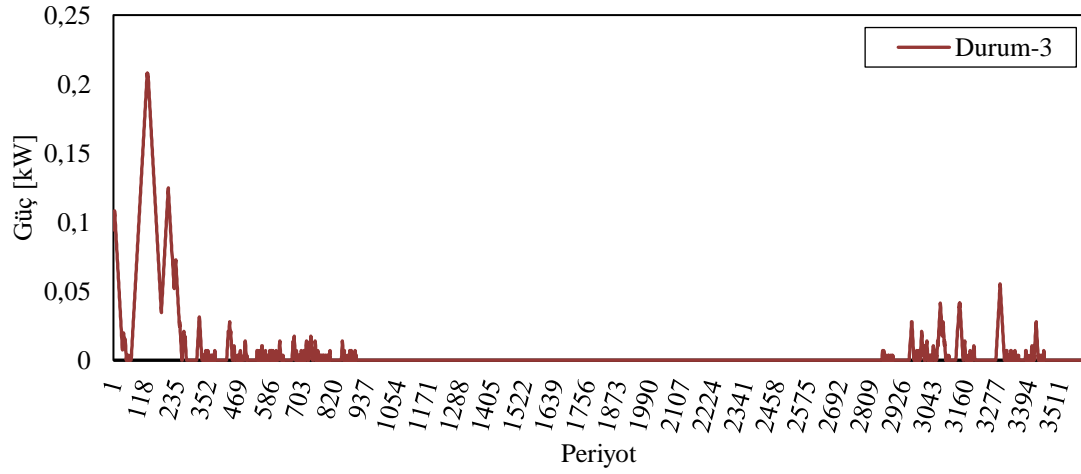
Şekil 6. Durum-6'da yakıt hücresinin ürettiği güç (The produced power by Fuel-cell in Case-6)

Tramvay seyahat rotası boyunca sürekli olarak hareket etmemektedir ve yolcuların inmeleri ve binmeleri için duraklarda bir süre beklemektedir ki rota üzerinde 31 durak yer aldığı belirtilmelidir. Bu bağlamda ilgili saat için sürekli güç üretimi gerçekleştirdiği kabul edilen PV sistemde üretilen fazla güç tramvaya ait fren dirençleri üzerinde harcanmaktadır. Durum-6'da tramvay tarafından tüketilmeyen bu güce ait veri Şekil 7'de verilmektedir. Burada 1 saatlik süre boyunca toplam 18,53 kWh enerjinin tüketilmediği ifade edilmelidir. Bu çalışmada PV sistemden hidrojen enerji sistemine enerji seçeneğinin düşünülmediği ve bu sebeple bu durumun ortaya çıktığını hatırlatmakta fayda vardır.

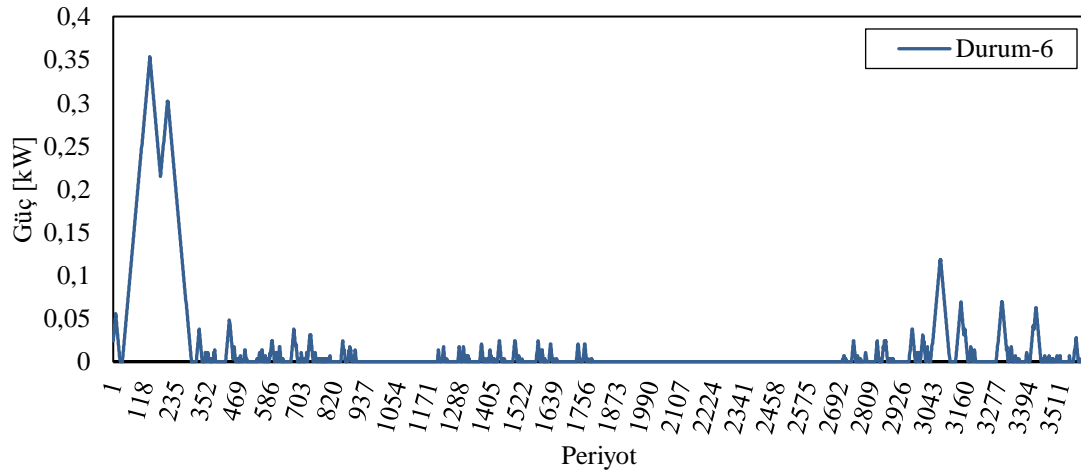


Şekil 7. Tramvay tarafından fren dirençleri üzerinde harcanan fazla yenilenebilir enerji (Excess renewable energy wasted on the braking resistors of the tram)

Durum-3 ve Durum-6'da hidrojen enerji sisteminin içerisinde yer alan kompresör tarafından tüketilen güçler sırasıyla Şekil 8-a ve Şekil 8-b'de verilmektedir. Burada yakıt hücresinin çalıştığı periyotlarda kompresörün de çalıştığı belirtilmelidir. Durum-6 ve Durum-3'te 1 saat boyunca sırasıyla kompresör tarafından 0,019 kWh ve 0,0071 kWh enerji tüketilmektedir.



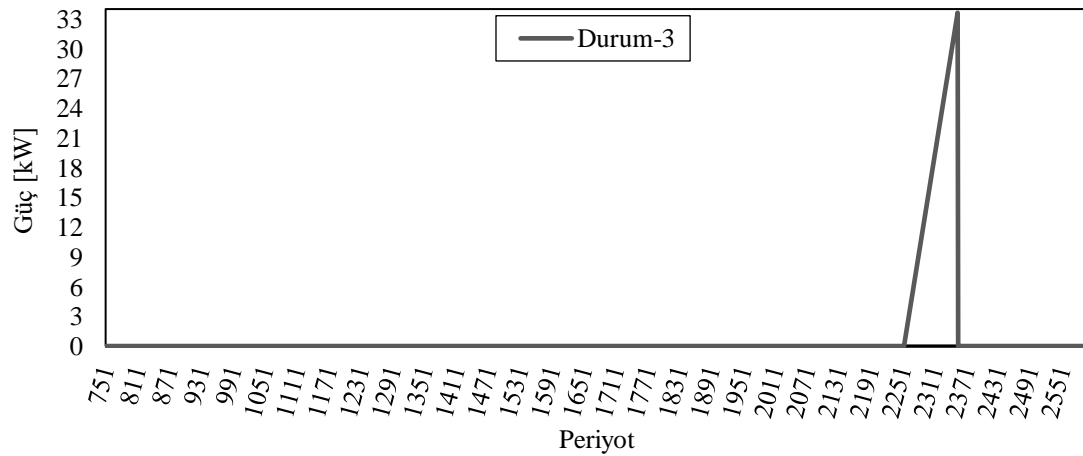
a)



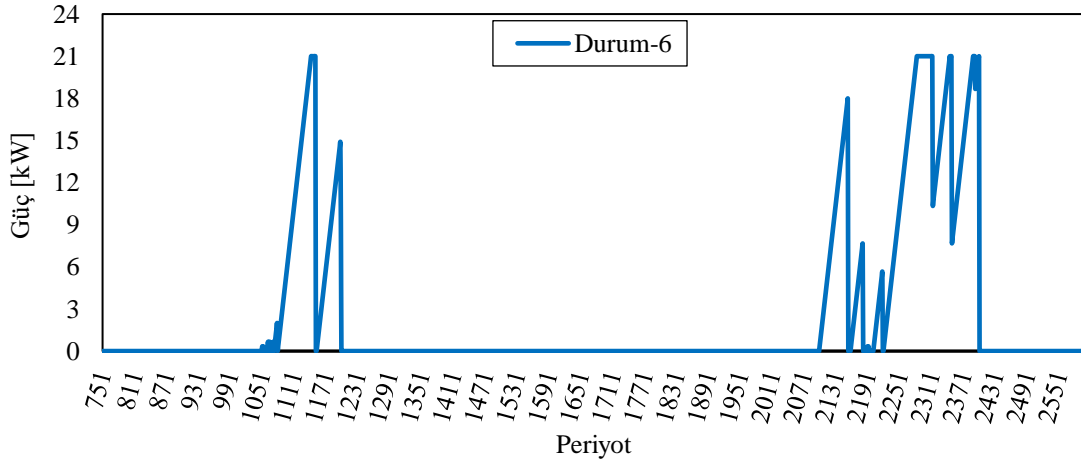
b)

Şekil 8. Kompresör tarafından tüketilen güç a) Durum-3, b) Durum-6 (The power consumed by compressor in Case-3 and Case-6).

Şekil 9-a ve Şekil 9-b'de Durum-3 ve Durum-6 için elektrolizör tarafından hidrojen üretmek için tüketilen güce ait veri yer almaktadır. Durum-3 ve Durum-6'da sırasıyla 0.48 kWh ve 1.25 kWh enerji tüketilmektedir. Burada enerji tüketiminin elektrik fiyatının en ucuz olduğu periyotlarda gerçekleştirildiğinin altı çizilmelidir.



a)



b)

Şekil 9. Durum-3 ve Durum-6'da elektrolizör tarafından tüketilen güç (The power consumed by the electrolyzer in Case-3 and Case-6)

4. Sonuç ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Günümüzde büyük nüfuslu kentlerde ulaşımın önemli bir problem olması sebebiyle konvansiyonel taşıtlardan raylı sisteme doğru bir geçiş söz konusudur. Fakat raylı sistemler nispeten büyük güç tüketimine sahiptirler ve bunların enerji tüketimlerinde zaman, tramvay sayısı ve yolcu sayısı gibi çeşitli değişkenlere bağlı olarak büyük değişimler görülebilmektedir. Bu bağlamda raylı sistemin ekonomik şekilde işletimi ele alınması gereken önemli konulardan biridir.

Bu çalışmada çatısına PV sistem dahil edilen ve ayrıca hidrojen enerji sistemi entegre edilen bir tramvayın dinamik elektrik fiyatları da düşünülerek optimum enerji yönetim modeli sunulmuştur. Gerçekleştirilen test çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre önerilen sistemin toplam elektrik satın alma maliyetini önemli derecede düşürebildiği görülmüştür. Maliyetleri düşürmede sırasıyla dinamik elektrik fiyatları, PV sistem ve hidrojen enerji sisteminin etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fakat daha büyük kapasiteli bir hidrojen enerji sistemi ile maliyet daha fazla azaltılabileceği gibi işletimsel esneklik ve elektrik kesintilerine karşı güvenilirlik sağlama konusunda daha fazla fayda elde edilebilir. Ayrıca şebekeden çekilen enerji miktarı azaltıldığı için hat kapasitesi genişlemeleri ve şebeke yatırımları geciktirilebilir. Dinamik elektrik fiyatları toplam işletme maliyetini %13 oranında azaltabilirken, tramvayın çatısına yerleştirilen PV sistem toplam giderlerin azaltılması konusunda %3'lük bir fayda sağlayabilmektedir. Ayrıca hidrojen enerji sistemi, PV sistem ve dinamik elektrik fiyatının yer aldığı önerilen model ile toplam maliyet %15,89 oranında düşürülebilmektedir. %15,89 oranındaki maliyet azaltımı raylı sistem işletmecisine önemli kazanç sunabilmektedir. Ayrıca sıfır karbon PV sistem ve hidrojen enerji sistemi karbon emisyonlarının azaltılması konusunda da fayda sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda PV sistemden hidrojen enerji sistemine enerji depolama seçeneği ve tramvaya ait rejeneratif frenleme enerjisi optimum çalışma kapsamında değerlendirilebilir. Ayrıca farklı türdeki enerji depolama sistemleri de modele dahil edilebilir. Bunun dışında raylı sistemde belirsizlikleri oluşturan tramvaya ait güç tüketimi ve şebekeden satın alınan enerjiye ait elektrik fiyatları için stokastik yaklaşım ele alınabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Arévalo, P., Cano, A., Jurado, F. (2020). Comparative study of two new energy control systems based on PEMFC for a hybrid tramway in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 25357-25377.
- Cano, A., Arévalo, P., Benavides, D., Jurado, F. (2021). Sustainable tramway, techno-economic analysis and environmental effects in an urban public transport. A comparative study, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26, 100462, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100462>.
- Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., Kondo, K., & Fratelli, L. (2015). Line-voltage control based on wayside energy storage systems for tramway networks. *IEEE Transactions on power electronics*, 31(1), 884-899.
- Di Noia, L. P., Genduso, F., Miceli, R., & Rizzo, R. (2018). Optimal integration of hybrid supercapacitor and IPT system for a free-catenary tramway. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 794-801.

- Eren, Y. (2022). Uncertainty-aware non-supplied load minimization oriented demand response program for PV/FC power system with electrolyzer back-up. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(19), 10715-10735.
- Garcia, P., Fernandez, L. M., Garcia, C. A., & Jurado, F. (2009). Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 4013-4023.
- Han, Y., Cao, N., Hong, Z., Li Q., Chen, W. (2016). Experimental Study on Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Tramway, *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 17-20 October 2016, Hangzhou, China, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791686.
- Han, Y., Li, Q., Wang, T., Chen, W., & Ma, L. (2018). Multisource coordination energy management strategy based on SOC consensus for a PEMFC–battery–supercapacitor hybrid tramway. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 296-305.
- Herrera, V. I., Gaztañaga, H., Milo, A., Saez-de-Ibarra, A., Etxeberria-Otadui, I., & Nieva, T. (2016). Optimal energy management and sizing of a battery--supercapacitor-based light rail vehicle with a multiobjective approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3367-3377.
- Khayyam, S., Ponci, F., Goikoetxea, J., Recagno, V., Bagliano, V., & Monti, A. (2016). Railway energy management system: Centralized–decentralized automation architecture. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 1164-1175.
- Li, Q., Wang, T., Dai, C., Chen, W., & Ma, L. (2018). Power management strategy based on adaptive droop control for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(7), 5658-5670.
- Loy-Benitez, J., Safder, U., Nguyen, H. T., Li, Q., Woo, T., & Yoo, C. (2021). Techno-economic assessment and smart management of an integrated fuel cell-based energy system with absorption chiller for power, hydrogen, heating, and cooling in an electrified railway network. *Energy*, 233, 121099.
- Torreglosa, J. P., Garcia, P., Fernández, L. M., & Jurado, F. (2013). Predictive control for the energy management of a fuel-cell-battery–supercapacitor tramway. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1), 276-285.
- Yang, H., Zhang, G., Wang, T., Li Q., Chen, W. (2016). Coordination Control for a PEMFC-Battery-Supercapacitor Hybrid Tramway," *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 17-20 October 2016, Hangzhou, China, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791640.
- Zhang, G., Li, Q., Chen, W., & Meng, X. (2020). Synthetic strategy combining speed self-adjusting operation control and adaptive power allocation for fuel cell hybrid tramway. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(2), 1454-1465.
- Zhang, G., Li, Q., Chen, W., Meng, X., Deng, H. (2019). A coupled power-voltage equilibrium strategy based on droop control for fuel cell/battery/supercapacitor hybrid tramway, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(35), 19370-19383, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.070>.
- Zhang, W., Li, J., Xu, L., Ouyang, M., Liu, Y., Han, Q., Li, K. (2016). Comparison study on life-cycle costs of different trams powered by fuel cell systems and others, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(38), 16577-16591, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.032>.