

FARKLI GÜÇ AKTARMA SİSTEMLERİNE SAHİP HİDROJEN ENERJİLİ ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ENERJİ TÜKETİMİ VE GERİ KAZANIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

*Ahmet YILDIZ**
*Mert Ali ÖZEL***
*Osman KOPMAZ****

Alınma: 26.04.2018 ; düzeltme:17.05.2019 ; kabul: 29.05.2019

Öz: Otomotiv endüstrisinde elektrikli araçlara geçişin hızla arttığı günümüzde, yüksek enerji verimliliği sağlayan araç mimarilerinin tasarımı konuları oldukça önem kazanmıştır. Nitekim farklı araç mimarileri ile elde edilecek enerji tüketim ve geri kazanım değerleri bu güç ünitesinin yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, farklı güç aktarma sistemlerine sahip hidrojen enerjili elektrikli araçların enerji tüketimi ve rejeneratif frenleme yardımıyla geri kazanımı farklı mimariler için matematiksel model yardımıyla sayısal olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Öncelikle elektrikli aracın verilen farklı iki sürüş çevrimi için güç hesabı yapılmış ve tekerlek içi, tek kademeli ve iki kademeli vites durumları için aynı elektrik motorundan çekilen ve frenlemeden kazanılan akım değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan akım değerlerine göre tüm güç mimarilerine ait yakıt pili hidrojen tüketimi ve süper-kapasitör şarj durumu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en düşük hidrojen tüketimi sırasıyla iki kademeli vites, tek kademeli vites ve tekerlek içi motor durumlarında elde edilmiştir. Bununla birlikte, en iyi şarj durumu bu sıranın tam tersi durumunda elde edilmiştir. Son olarak farklı yol eğimleri için de enerji tüketimleri ve geri kazanımları karşılaştırılmış ve yine aynı sıralamayı yansıtan sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araç, Güç Aktarma, Enerji Tüketimi, Geri Kazanımı, Hidrojen Enerjisi

COMPARISON OF ENERGY CONSUMPTION AND RECOVERY OF HYDROGEN POWERED ELECTRIC VEHICLES WITH DIFFERENT POWER TRANSMISSION SYSTEMS

Abstract: Nowadays, the shifting to electric vehicles in automotive industry is increasing rapidly, and the design of high-energy efficient vehicle architectures has gained importance. The energy consumption and recovery values to be obtained with different vehicle architectures vary depending on the structure of this power unit. In this study, the energy consumption of hydrogen electric vehicles equipped with different power transmission systems and regeneration with the help of regenerative braking were investigated and compared with the mathematical model for different architectures. Firstly, the power calculation was made for the two different driving cycles of the electric vehicle, and the current values that were drawn from the same electric motor and braking were calculated for the wheel, single stage and two-step gear situations. According to the calculated current values, fuel cell hydrogen consumption and super capacitor charge status of all power architectures were determined. According to the results obtained, the lowest hydrogen consumption are obtained in two-stage gears, single-stage gears, and in-wheel motor conditions,

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü (ahmetyildiz@uludag.edu.tr)

** Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (mertaliozel@uludag.edu.tr)

*** Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (okopmaz@uludag.edu.tr)

İletişim yazarı: ahmetyildiz@uludag.edu.tr

respectively. However, the best charging state is obtained in the reverse order. Finally, energy consumptions and recoveries are compared for different road slopes, and results were obtained reflecting the same order.

Keywords: Electric Vehicle, Power Transmission, Energy Consumption, Recovery, Hydrogen Energy

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlara geçişin hızla arttığı günümüzde, yüksek enerji verimliliği sağlayan araç mimarilerinin tasarımı konuları gittikçe önem kazanmıştır. Nitekim farklı araç mimarileri ile elde edilecek enerji tüketim ve geri kazanım değerleri ile araç performansı, taşıtın matematiksel modelleri yardımıyla farklı şartlar altında en iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bununla birlikte CVT sistemli elektrikli araçlar üzerine de çalışmalar mevcuttur. (Bottiglione ve ark, 2014a), (Bottiglione ve ark, 2014b), (Yıldız ve Kopmaz, 2017). Farklı elektrikli araç mimarilerinin taşıt performansına etkisi Bayar (2018) tarafından değişik parametreler altında incelenmiştir. Çalışmada teker içi ve merkezi aks motor mimarisine sahip elektrikli araçların elektronik kararlılık kontrolü ve ABS performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca tüm araç mimarileri göz önüne alınarak ihtiyaç duyulan net teker fren torkunun hidrolik fren ve elektrik motorlarına dağıtım stratejisine odaklanılmıştır. Elektrikli araçlar için vites değiştirme stratejileri üzerine yapılan çalışmalar da mevcuttur. Özellikle enerji tüketimi ve geri kazanımının iyileştirilmesi ve vites değiştirme esnasındaki konforun iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalara ek olarak, aktarma elemanları içerisinde çift kavramaların da kullanılması hedeflenmektedir. Çift kavrama kullanarak vites değiştirme esnasında motor ile güç aktarma ünitesi arasındaki güç iletiminin sürekliliğinin artırılmasını sağlanabilecektir. Bu sebeple, farklı güç ünitesi elemanları ile elektrikli aracın teorik modellemeler yardımıyla, en verimli çalışma bölgesinde kalması incelenmektedir. (Liang ve ark. 2019), (Mo ve ark., 2019), (Mo ve ark., 2018).

Elektrikli araçlarda frenleme durumunda motorun jeneratör olarak çalıştırılması ve böylece enerji geri kazanım performansı da araştırmacılar tarafından incelenen güncel konulardandır. Xu ve ark., (2019) dört adet tekerlek içi elektrik motoruna sahip elektrikli bir aracın, rejeneratif frenleme performansını ve enerji geri kazanımlarını oluşturdukları model yardımıyla incelemişlerdir. Ayrıca çalışmada, ön ve arka tekerlekler için rejeneratif frenleme performansı ve enerji geri kazanımına etkisi de araştırılmıştır. Elektrikli araçların önemli bir konusu olan geri kazanımlı frenlemede bir diğer önemli konu ise, sisteminin kontrolüdür. Daha verimli bir frenleme performansı ve enerji geri kazanımının optimizasyonu için rejeneratif frenleme kontrolü bir hayli önem arz etmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar, geleneksel kontrol yöntemleriyle birlikte bulanık mantık yardımıyla oluşturulan kontrol teknikleri araştırmalara ilham veren konulardır. (Zhang ve Chai, 2018),(Wen ve ark., 2018).

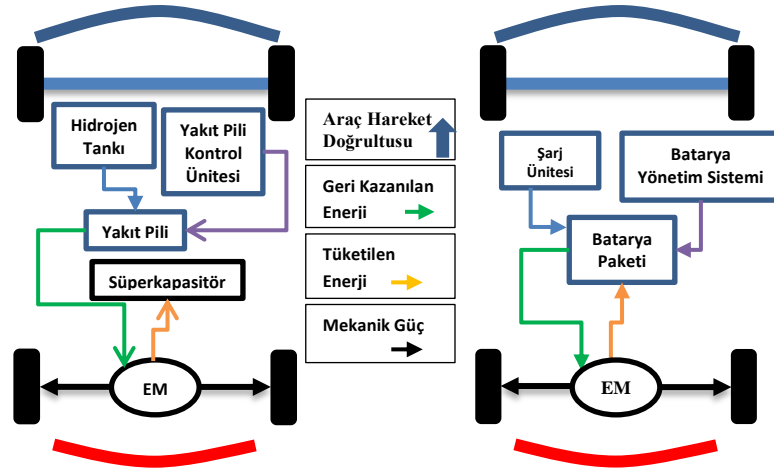
Elektrikli araçlar için enerji kaynağı olarak lityum iyon batarya, süper-kapasitör ve hidrojen yakıt pilinin kullanılması üzerine yapılan çalışmalar da devam etmektedir. Bu anlamda, her bir enerji kaynağı ayrı ayrı incelendiği gibi bu enerji kaynaklarını aynı anda içeren hibrit sistemler üzerine de çalışmalar mevcuttur. Bu hibrit sistemlerinin kullanılmasının en büyük nedeni, her bir enerji sisteminin sahip olduğu dezavantajların giderilmesini sağlamaktır. (Xiong ve ark., 2019),(Chang ve ark., 2018).(Tie ve Tan, 2019). Hidrojen enerjili elektrikli araçlarda, enerji geri kazanım sırasında araç üzerinde enerji depolama sistemine gerek duyulmaktadır. Bu nedenle, hidrojen yakıt piline sahip elektrikli araçlarda ek olarak batarya ya da süper-kapasitör bulundurulması gerekmektedir. Süper-kapasitör, ani şarj akımlarına karşı daha performanslı davranması nedeniyle bataryalara göre geri kazanıma sahip araçlarda kullanılması daha cazip olmaktadır. (Kaya ve ark., 2018),(Capasso ve ark., 2017).

Bu çalışmada yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak üç değişik güç aktarma mimarisine sahip hidrojen enerjili elektrikli araçların aynı şartlar altında enerji tüketimi ve geri kazanımları incelenmiştir. Motor içi, tek kademeli ve iki kademeli güç aktarma sistemine sahip elektrikli araçların farklı iki sürüş çevrimi için ihtiyaç duydukları güç hesaplanmıştır. Bu gücü sağlamak için gerekli motor torku ve açılma hızını sağlayacak akım değerleri bulunarak tüm güç

mimarilerine ait yakıt pili hidrojen tüketimi ve süperkapasitör şarj durumu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en düşük hidrojen tüketimi sırasıyla iki kademeli vites, tek kademeli vites ve tekerlek içi motor durumlarında elde edilmiştir. En iyi şarj durumu ise bunun tersi şeklindedir. Ayrıca analizler farklı yol eğimleri için de tekrarlanmış ve yine aynı sıralamalarda en yüksek verimli sonuçlar elde edilmiştir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARA AİT FARKLI GÜÇ MİMARİLERİ

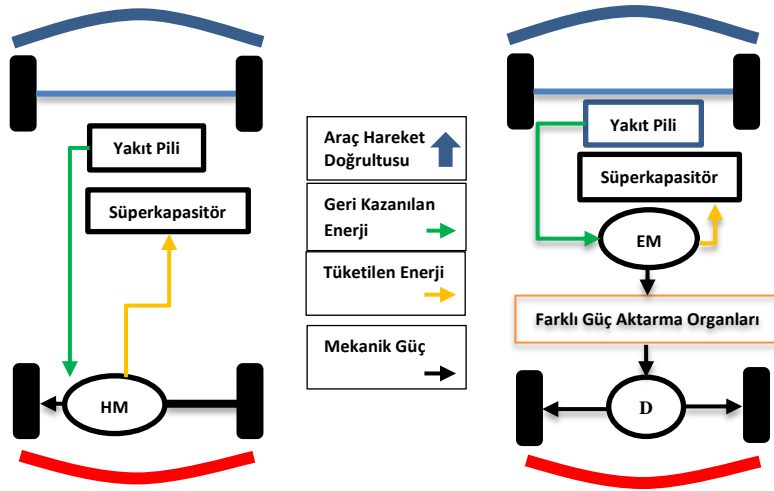
Elektrikli araçlarda birçok farklı güç ünitesi yapısı mevcuttur. Elektrik motorunun güç kaynağını hidrojen enerjili ve bataryalı güç sistemleri oluşturmakta ve hidrojenli elektrikli araçlarda enerji ihtiyacı hidrojen yakıtı kullanarak sağlanmaktadır. Bununla birlikte rejeneratif frenleme esnasında kazanılan elektrik enerjisinin depolanmasında batarya paketi ya da süperkapasitöre ihtiyaç duymaktadır, Şekil 1.



Şekil 1:

Hidrojen Enerjili ve Bataryalı Elektrikli Araçlara Ait Araç Mimarileri

Batarya paketine sahip elektrikli araçlar, uzun şarj süresi ve menzillerin düşük olması gibi bazı dezavantajlara sahip olmasının yanında gelişen teknoloji ile birlikte yaygınlaşma oranı artmaktadır. Özellikle rejeneratif frenleme özelliğine sahip araçlarda, şarj/deşarj sayısına bağlı olarak performansındaki değişimin incelenmesi, batarya ömrü açısından önem arz etmektedir.



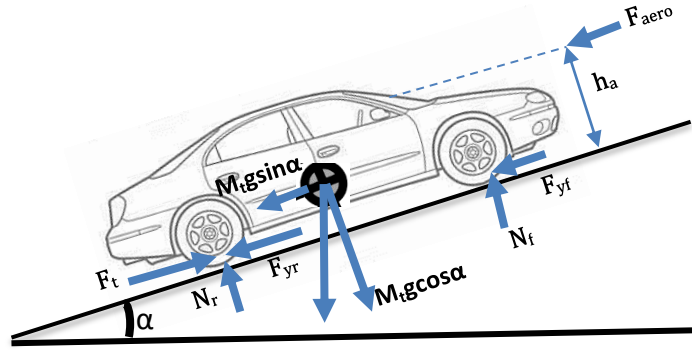
Şekil 2:

İki Farklı Güç Aktarma Sistemine Sahip Araç Mimarileri

Elektrikli araçlarda elektrik motorunun daha yüksek verimli bölgelerde çalışabilmesini sağlamak için güç aktarma organına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2’de farklı güç aktarma mimarilerine sahip elektrikli araçlar görülmektedir. Bunlar temel olarak; tekerlek içi elektrik motoruna sahip araçlar, dişli kutusuna sahip araçlar ya da CVT şanzımanına sahip araçlardır.

3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MATEMATİKSEL MODELİ

Farklı güç ünitesi mimarilerine sahip elektrikli araçların sayısal olarak karşılaştırılabilmesi adına, taşıtın dinamik modeli, güç aktarım sisteminin modeli, enerji sistemleri modeli, elektrik motoru ve geri kazanım (rejeneratif) frenleme modeli matematiksel olarak aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3:
Elektrikli araca etkiyen kuvvetler

Bu kısımda, elektrikli aracın ihtiyaç duyduğu toplam direnç kuvveti olan F_l 'ye ait denklemler çıkarılacaktır. Toplam direnç kuvvetinin hesabında Şekil 3’de görülen aerodinamik kuvvetler (F_{aero}), eğim direnci ($M_t g \sin \alpha$), yuvarlanma direnci (F_{yr}) ve ivmelenme direnci göz önüne alınacaktır.

$$F_l = \rho \cdot c_d \cdot A \cdot \frac{V^2}{2} + M_t \cdot g \cdot \sin \alpha + M_t \cdot g \cdot k_y + M_t \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Burada, ρ hava yoğunluğu, c_d sürüklenme katsayısı, A aerodinamik yüzey alanı, V ise aracın hızıdır. M_t aracın toplam kütlesi, g yerçekimi ivmesi ve α yolun eğim açısıdır. Burada k_y , lastiğin yuvarlanma direnç katsayısı olmakla birlikte Denklem 2’deki gibi bulunabilir (Bottiglione ve ark, 2014a):

$$k_y = f_0 + f_1 V + f_2 V^2 \quad (2)$$

Denklem 1’de bulunan yük kuvveti değeri tekerlek etkin yarıçapı R_t ile çarpılarak hedeflenen direnç momenti hesaplanmıştır. Tekerlek içi elektrik motoru kullanılan araç mimarisinin ihtiyaç duyduğu tahrik momenti hesabı Denklem 3 yardımıyla elde edilir.

$$T = F_l \cdot R_t + I_\omega \frac{d\omega_{HM}}{dt} + I_{HM} \frac{d\omega_{HM}}{dt} + \beta_1 \cdot \omega_{HM} \quad (3)$$

Burada, I_ω tekerleğin ataleti, I_{HM} tekerlek içi motorun dönen kütlelerinin ataleti, β_1 yatak sürtünmesi ve ω_{HM} ise elektrik motorunun açısal hızıdır. Benzer hesaplama, güç aktarma sistemine sahip elektrikli araç mimarisi için de yapılması gerekmektedir. Güç aktarmalı elektrikli aracın tork ihtiyacı, Denklem 4’de görüldüğü gibi vites sisteminin atalet ve sürtünme değerleri de hesaba katılarak hesaplanır.

$$T = \tau_D \cdot \tau_G \cdot F_l \cdot R_t \mu_t + I_w \frac{d\omega_1}{dt} + I_D \frac{d\omega_1}{dt} + I_G \frac{d\omega_G}{dt} + I_{EM} \frac{d\omega_{EM}}{dt} + \beta_2 \cdot \omega_1 + \beta_3 \cdot \omega_G + \beta_4 \cdot \omega_{EM} \quad (4)$$

Burada, I_D diferansiyelin ataleti, I_G dişli kutusu ataleti, I_{EM} elektrik motorunun ataleti, β_2 tekerler ve diferansiyele ait yatak sürtünmeleri, β_3 dişli kutusuna ait yatak sürtünmeleri, β_4 ise elektrik motoruna ait sürtünme katsayısıdır. τ_D ve τ_G sırasıyla diferansiyel ve dişli kutusuna ait çevrim oranlarıdır. ω_1 , ω_G ve ω_{EM} ise sırasıyla diferansiyel, dişli kutusu ve elektrik motoruna ait açısal hız değerleridir. İhtiyaç duyulan motor akım değeri I , aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I = \frac{T * \omega_{EM} + T * \omega_{EM} * (1 \mp \mu(T, \omega_{EM}))}{V_{yp}} \quad (5)$$

Burada $\mu(T, \omega_{EM})$ motorun tork ve açısal hıza bağlı olan verimlilik katsayısı olup Şekil 5'deki motor karakteristiği kullanılarak hesaplanabilmektedir. V_{yp} ise yakıt piline ait gerilim değeridir ve ilerleyen kısımda nasıl hesaplandığı verilmiştir.

Elektrikli aracın rejeneratif frenleme ile geri kazanılan elektrik enerjisi, süper-kapasitör yardımıyla depolanabilmektedir. Geri kazanım enerjisinin zamana bağlı gerilim değerini hesaplamak için Denklem 6'daki diferansiyel denklemin kullanılması gerekmektedir (Cultura II ve Salameh, 2015):

$$\frac{dV_{sp}(t)}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I \quad (6)$$

Burada Q elektrik yükü, V_{sp} ise süper-kapasitörün gerilimidir. Geri kazanım enerjisinin performansını kıyaslama adına kullanılacak parametre olan süper kapasitöre ait şarj durumunun hesaplanması aşağıdaki denklem yardımıyla gerçekleştirilmiştir. (Cultura II ve Salameh, 2015):

$$SoC = \frac{W}{W_{maks}} = \frac{V_{sp}^2}{V_{sp,maks}^2} \cdot 100 \quad (7)$$

Burada W süper-kapasitörün elektriksel gücü olmakla birlikte $0.5CV_{sp}^2$ formülü ile hesaplanır. Ayrıca $V_{sp,maks}$ süper kapasitöre ait maksimum gerilim değerini göstermektedir. Gerekli sadeleştirmeler yapılarak Denklem 7 görüldüğü gibi elektriksel güç gerilim cinsinden yazılmıştır.

Elektrikli araçların ihtiyaç duydukları elektriksel gücü hidrojen yakıt pilinden temin edilmektedir. Gerekli hidrojen yakıt tüketimi (HT) aşağıdaki denklem ile bulunabilir:

$$HT = (V_{yp} * I) * k \quad (8)$$

Burada k , güç ile hidrojen tüketimi arasındaki oran olarak tanımlanmakta ve yakıt piline ait kimyasal parametrelere bağlı olarak 0.025 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların ayrıntısı burada verilmemiştir. Başlangıçta yakıt pili gerilimi 48 Volt alınmış ve buna göre akım değerinin başlangıç değeri hesaplanmıştır. Yakıt piline ait gerilim değeri aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunur (Sudarshan ve Dhananjay, 2017):

$$V_{YP} = E_{Nernst} - V_{akt} - V_{kons} - V_{omik} \quad (9)$$

Burada açık devre hücre gerilimi E_{Nernst} , hücre sıcaklığının T_{YP} ve reaktant kısmi basınçlarının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi verilebilir:

$$E_{Nernst} = E_0 - 0,85 * 10^{-3} * (T_{YP} - 298,15) + \frac{R * T_{YP}}{2 * F} * \ln \left(\frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (10)$$

Bu eşitlikte; E_0 , referans gerilimi, R universal gaz sabiti ve F 'de Faraday sabitidir. P_{H_2} , P_{O_2} ve P_{H_2O} ; hidrojen, oksijen ve su buharı basınçları, P ise yığın içindeki toplam basınçtır.

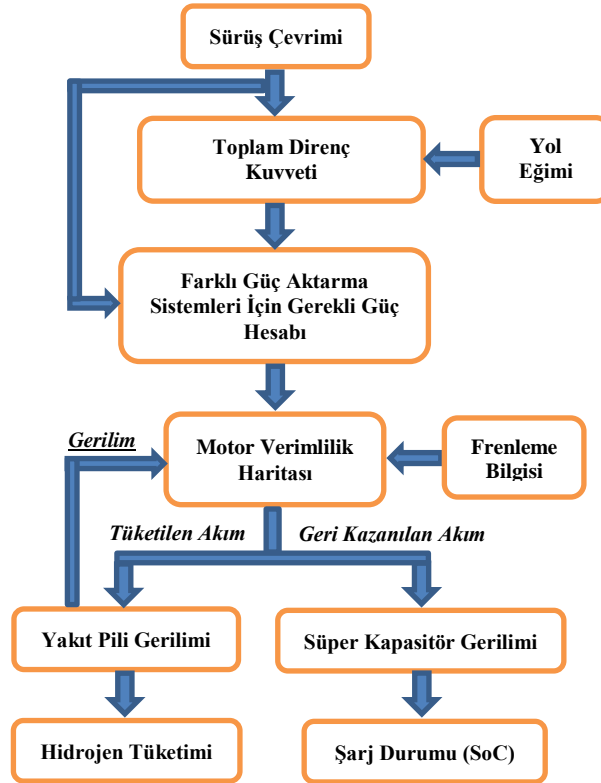
$$V_{akt} = \frac{R * T_{YP}}{n * \alpha * F} * \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (11)$$

Daha yüksek akım yoğunluklarında, hücre potansiyeli kütle-geçiş sınırlamalarından dolayı hızla azalır. Bu doğrusal olmayan konsantrasyon aşırı gerilimi olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$V_{kons} = 1,1 * 10^{-4} - 12 * 10^{-6} * (T_{YP} - 273) * e^{(0,008)I} \quad (12)$$

Ortalama akım yoğunluğunda gerilim düşümü yaklaşık olarak doğrusaldır ve bunun hesabında omik direnç (V_{omik}) kullanılır. Membran direnci, membran kalınlığının (t_m) iletkenliğe (σ) bölümüyle bulunur.

$$V_{omik} = I * \frac{t_m}{\sigma} \quad (13)$$



Şekil 4:
Oluşturulan Matematiksel Modelin Akış Şeması

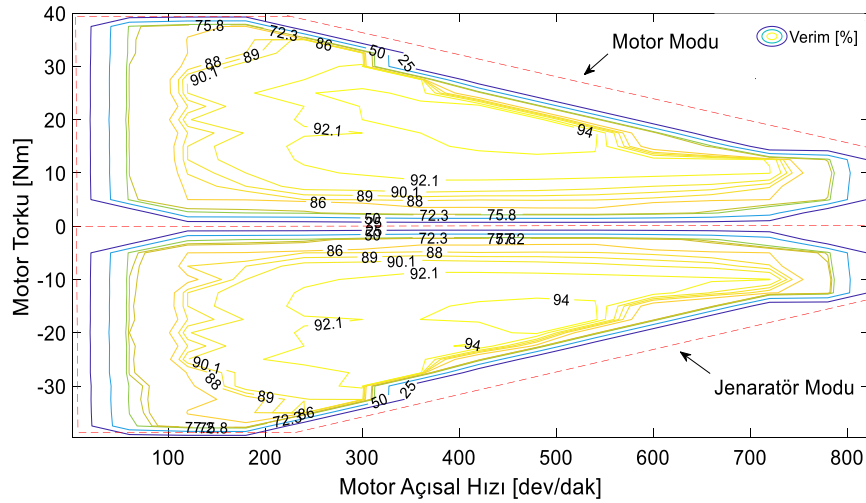
Elektrikli araçların hidrojen tüketimi ve süper-kapasitör dolum oranlarının hesaplanması yukarıda verilen matematiksel denklemler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bunlara ait akış

şeması Şekil 4’te verilmiştir. Burada görüldüğü üzere, taşıtın belirlenen bir sürüş çevrimine göre yol eğimi dikkate alınarak toplam direnç kuvveti hesaplanır (Denklem 1-2). Sürüş çevrimindeki hız göz önüne alınarak aracın gerekli güç hesabı yapılır (Denklem 3-4). Bu güç durumunda motor verimlilik haritasından fren bilgisine bağlı olarak tüketilen ve geri kazanılan akım hesabı yapılır (Denklem 5). Bu değerlerden yakıt pili ve süper kapasitör denklemleri yardımıyla hidrojen yakıt tüketimi ve şarj durumu hesaplanır (Denklem 6-13). Geliştirilen algoritma seçilen sayısal değerler için Matlab/Simulink ortamında dördüncü mertebe Runge-Kutta yaklaşımı ile çözdürülmüştür. Bunlardan elde edilen sonuçlar Şekil 6 ile Şekil 12 arasındaki grafiklerde sunulmuştur. Ayrıca aracın, güç aktarma sistemlerinin ve diğer güç ünitesi elemanlarının sayısal değerleri de Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Aracın, güç aktarma sistemlerinin ve diğer güç ünitesi elemanlarının değerleri

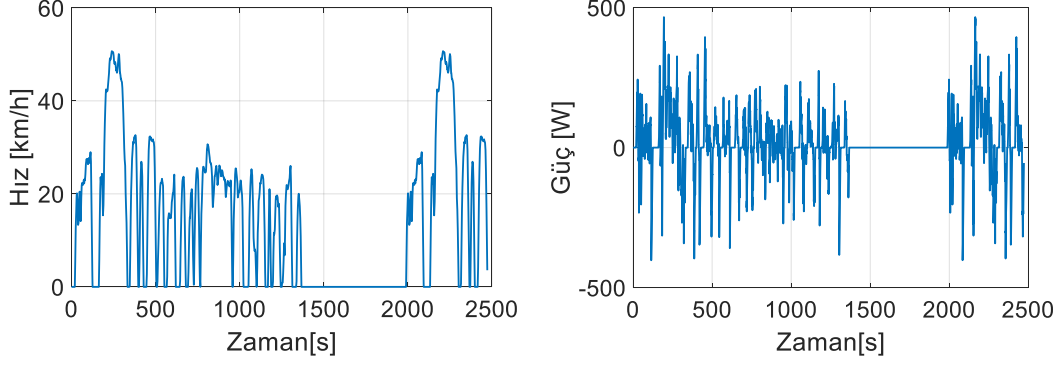
Parametreler	Açıklaması	Değerler	Parametreler	Açıklaması	Değerler
M_v [kg]	Araç ağırlığı	110	c_d [-]	Sürüklenme Katsayısı	0.15
I_w [kgm ²]	Tekerlek ataleti	0.2087	A [m ²]	Ön Yüzey Alanı	0.98
I_M [kgm ²]	Elektrik motoru ataleti	0.0137	V_{yp} [V]	Yakıt Pili Gerilimi	48
I_{GA} [kgm ²]	Güç Aktarma Sistemi Toplam Ataleti	0.02	V_{sp} [V]	Süper Kapasitör Gerilimi	48
R_r [m]	Tekerlek Yarıçapı	0,278	C [F]	Süper kapasitör kapasitesi	60
P_{yp} [W]	Yakıt Pili Nominal Gücü	1000	V_m [V]	Motor Nominal Gerilimi	48

Çalışmada incelenen prototip araçta kullanılacak 1 kW nominal güce sahip fırçasız doğru akım motoruna ait hem motor modu hem de jeneratör modu verim karakteristiği Şekil 5’te verilmiştir. Matematiksel modelde, elektrik motoruna ait verim katsayısı değeri bu şekil referans alınarak hesaplanmıştır. Tüm araç mimarileri için aynı motor karakteristiği kullanılmıştır.



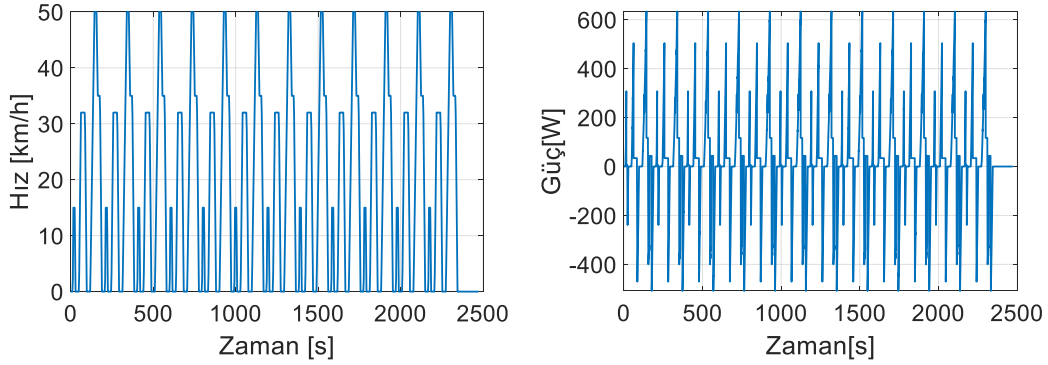
Şekil 5:
Seçilen Elektrik Motoruna Ait Karakteristik [Mitsuba M1048]

Matematiksel modelin giriş verilerinden biri olan aracın hız karakteristiği için iki farklı sürüş çevrimi kullanılmıştır. Sürüş çevrimleri oluşturulurken, FTP-75 ve NEDC Avrupa çevrimlerinin bir kısmı referans alınmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7'deki gibi hız ve güç profiline sahiptirler.



Şekil 6:

a. FTP75 Sürüş Çevrimleri (Matlab/Simulink, R2018a) **b.** FTP75 Referans Alınarak Hesaplanan Güç Değeri



Şekil 7:

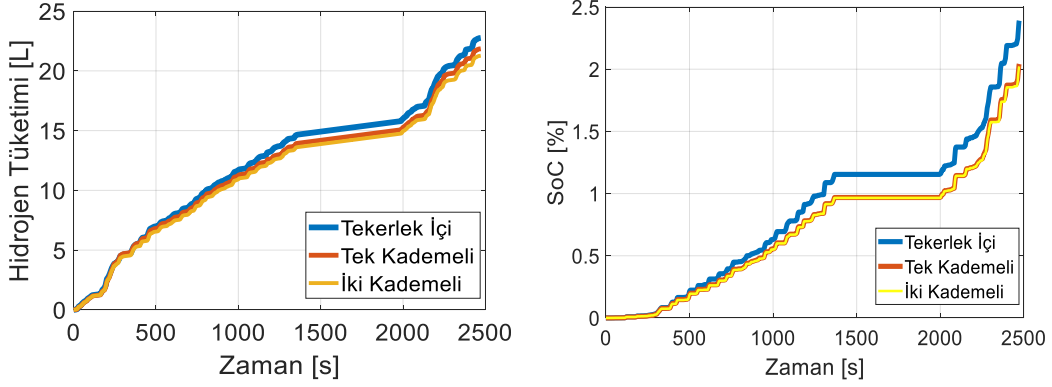
a. NEDC Sürüş Çevrimi (Bottiglione ve ark, 2014a) **b.** NEDC Referans Alınarak Hesaplanan Güç Değeri

4. ENERJİ TÜKETİM VE KAZANIM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde farklı güç aktarma sistemine sahip elektrikli araçların hidrojen yakıtı tüketimi ve rejeneratif frenleme yardımıyla süper-kapasitörün dolum oranına ait sayısal sonuçlar iki farklı sürüş çevrimi için karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu sonuçlara ait elektrik motorunun motor modu ve jeneratör moduna ait çalışma bölgesi sonuçları verilmiştir. Son olarak analizler farklı eğim açılarında tekrarlanmış ve üç farklı araç mimarisinin yakıt tüketimi ve şarj durumları karşılaştırılmıştır.

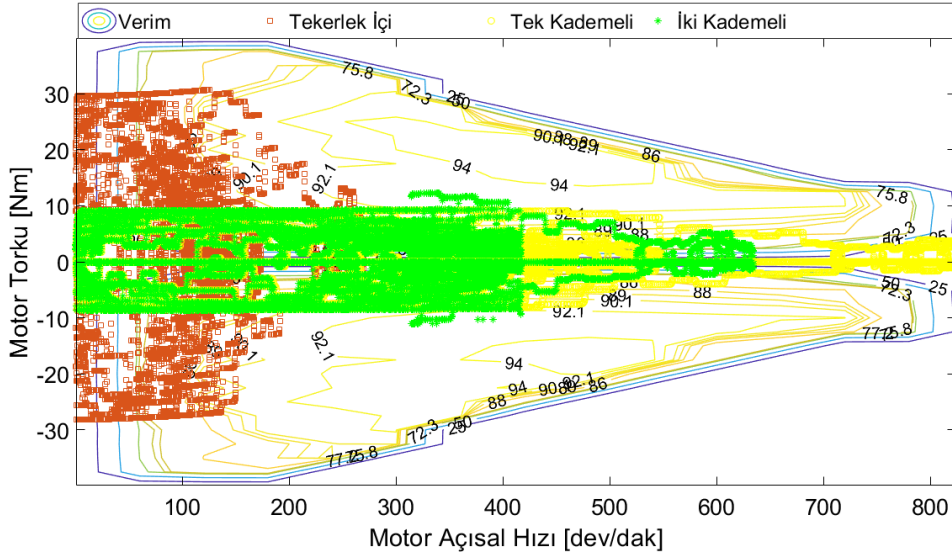
NEDC sürüş çevriminin bir kısmını için tekerlek içi elektrik motoruna sahip, tek kademeli ve çift kademeli vites oranına sahip elektrikli bir aracın enerji tüketimi Şekil 8a'da verilmiştir. Burada görüldüğü üzere hidrojen tüketimi en az iki kademeli vitese sahip araçlarda olmakla birlikte tek kademeli ve tekerlek içi motora sahip araçlar şeklinde enerji sarfiyatı iyiden kötüye doğru sıralanmaktadır. Şekil 8 b'de ise motorun frenleme sırasında jeneratör şeklinde çalıştırılarak buradan geri kazanılan akımın süper-kapasitörü şarj etme oranı farklı araç mimarileri için verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi tekerlek içi motor en iyi şarj yüzdesi verirken, bunu tek kademeli ve iki kademeli vitese sahip araçlar takip etmektedir. Yapılan

sürüş çevrimi için de NEDC sürüş çevrimi ile aynı sonuçta sıralama bulunmuş ve hidrojen tüketimi en az sırasıyla iki kademeli, tek kademeli, tekerlek içi motorlu elektrikli araçlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 10 b'de ise rejeneratif frenleme ile geri kazanılan enerjinin süper-kapasitörü şarj etme oranı farklı araç mimarileri için verilmiştir. Bu durumda da tekerlek içi motor en iyi şarj yüzdesi verirken, bunu tek kademeli ve iki kademeli vitese sahip araçlar takip etmektedir.



Şekil 10:

a. FTP75 Sürüş Çevrimine Ait Hidrojen Yakıtı Tüketimi **b.** Rejeneratif Frenleme Yardımıyla Süper kapasitörün Dolum Oranı

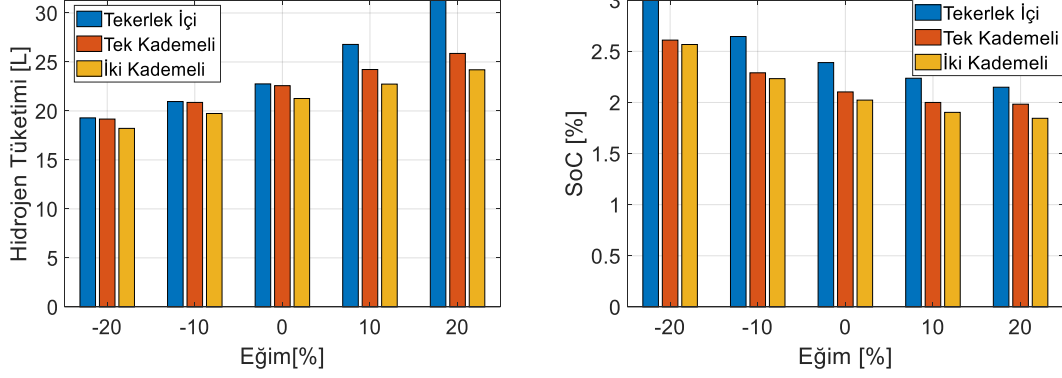


Şekil 11:

FTP75 Sürüş Çevrimine Ait Motorun Çalışma Karakteristiği

FTP75 sürüş çevrimi için elektrikli aracın motorunun hem motor modunda hem de jeneratör modunda çalışma bölgeleri gözükmemektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere tekerlek içi motor yapısına sahip elektrikli aracın motoru daha düşük verimli bölgede çalışırken, tek kademeli güç aktarma sistemine sahip aracın motor karakteristiği daha yüksek verimli bölgede kalmaktadır. Motorun en verimli bölge çalışmasına ise çift kademeli vites oranı imkan sağlamaktadır. Ortalama motor verimi yüzde olarak FTP75 çevrimi için sırasıyla şöyledir: Tekerlek içi motor için 71.54, tek kademeli vites için 75.24 , çift kademeli vites için 78.51'dir.

Farklı güç aktarma ünitesine sahip elektrikli araçların farklı yol eğimlerdeki hidrojen tüketimi ve geri kazanımları da incelenmiştir. Yapılan bu analizlere ait sonuçlar Şekil 12a ve Şekil 12b'de grafikler halinde sunulmuştur. Bu şekillerden de görüleceği üzere tüm eğim durumlarında iki kademeli aracın hidrojen tüketimi diğerlerine göre en azdır. Onu tek kademeli ve tekerlek içi araç mimarisi takip etmektedir. Bununla birlikte şarj durumunda en yüksek verimin sırasıyla tekerlek içi, tek kademe ve iki kademeli vites durumunda elde edildiği görülmektedir.



Şekil 12:

a. Farklı yol eğimleri için elektrikli araçların enerji tüketimi **b.** sağladıkları geri kazanım enerjileri

5. SONUÇ

Farklı güç aktarma mimarilerine sahip elektrikli araçların farklı sürüş çevrimi altında enerji tüketimleri ve frenleme ile geri kazanımları incelenmiştir. Kurulan matematiksel model yardımıyla elektrikli aracın verilen farklı iki sürüş çevrimi için güç hesabı yapılmış ve tekerlek içi, tek kademeli ve iki kademeli vites durumlarında hidrojen tüketimi hesaplanmıştır. Yakıt pili hidrojen tüketiminin en düşük seviyede olduğu yapının iki kademeli vites oranında elde edildiği ve bu tek kademeli vites ile tekerlek içi motorun takip ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, süper kapasitör şarj durumu matematiksel model yardımıyla tüm araç mimarileri için belirlenmiş ve en iyi şarj durumu sırasıyla tekerlek içi, tek kademeli ve iki kademeli vites durumunda elde edilmiştir. Yapılan analizler son olarak farklı yol eğimleri için tekrarlanmış ve enerji tüketimleri ve geri kazanımları karşılaştırılmıştır. Burada da yine aynı sıralamalarda sonuçlar elde edilmiştir ve grafikler halinde sunulmuştur. Neticede şunun vurgulanması gerekir: Uzun mesafe şehirlerarası kullanımlarda yakıt tüketimi daha iyi olan araç mimarilerinin tercih edilmesi, şehir içi sıkça rejeneratif frenlemenin devreye gireceği durumlarda ise şarj verimi daha yüksek olan güç mimarilerinin kullanılması daha manidardır, ancak araç mimarisinin seçiminde sadece bu kriterler değil; ağırlık, ömür, kolay kontrol edilebilmesi vs. gibi birçok parametre göz önüne alınarak seçim yapıldığını belirtmek de gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Bayar K., 2018. Farklı Elektrikli Araç Mimarilerinin Taşıt Dinamiği Performansı Açısından Karşılaştırılması. OTEKON 2018, Bursa, Turkey.
2. Bottiglione F., De Pinto S., Mantriota G., Sorniotti A., 2014a. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission. *Energies*, 7 (12), 8317-8337.
3. Bottiglione F., Contursi T., Gentile A., Mantriota G. 2014b. The Fuel Economy of Hybrid Buses: The Role of Ancillaries in Real Urban Driving. *Energies*, 7 (7), 4202-4220.

4. Capasso C., Veneri O., 2017. Integration between super-capacitors and ZEBRA batteries as high performance hybrid storage system for electric vehicles. *Energy Procedia*, 105(5) 2539-2544.
5. Chang X., Ma T., Wu R., 2018. Impact of urban development on residents' public transportation travel energy consumption in China: An analysis of hydrogen fuel cell vehicles alternatives. *International Journal of Hydrogen Energy*, doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.099
6. Cultura II A.B., Salameh Z.M., 2015. "Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application", *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*.
7. Kaya K., Hames Y., 2018. Two new control strategies: For hydrogen fuel saving and extend the life cycle in the hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, In press.
8. Liang J., Walker P.D., Ruan J., Yang H. Wu J., Zhang N., 2019. Gearshift and brake distribution control for regenerative braking in electric vehicles with dual clutch transmission. *Mechanism and Machine Theory*, 133(2019) 1-22.
9. Mo W., Walker P.D., Zhang N., 2019. Dynamic analysis and control for an electric vehicle with harpoon-shift synchronizer. *Mechanism and Machine Theory*, 133(2019) 750-756.
10. Mo W., Walker P.D., Fang Y. Wu J., Ruan J., Zhang N., 2018. A novel shift control concept for multi-speed electric vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 112(2018) 171-193.
11. Sudarshan L., Dhananjay B., 2017. "Modeling and performance evaluation of PEM fuel cell by controlling its input parameters", *Elsevier Energy* 138 437-445 doi: 10.1016/j.energy.2017.07.070
12. Tie S.F., Tan C.W., 2013. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(2013), 82-102.
13. Wen H.H., Chen W., Hui J., 2018. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm. *Energy Procedia*, 152 (2018) 624-629.
14. Xiong H., Liu H., Zhang R., Yu L., Zong Z., Zhang M., Li Z., 2019. An energy matching method for battery electric vehicle and hydrogen fuel cell vehicle based on source energy consumption rate. *International Journal of Hydrogen Energy*, In press.
15. Xu W., Chen H., Zhao H., Ren B. Torque optimization control for electric vehicles with four in-wheel motors equipped with regenerative braking system. *Mechatronics* 57 (2019) 95-108.
16. Yildiz A., Kopmaz O., 2017. A study on the basic control of speed ratio of the CVT system used for electric vehicles. *International Journal of Advances in Engineering & Technology* 10 (2), 201-209.
17. Zhang L., Cai X., 2018. Control strategy of regenerative braking system in electric vehicles. *Energy Procedia*, 152(2018) 496-501.