

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA FAYDALI FRENLEME ENERJİSİNİN DEPOLANMASI

Umutcan DOĞAN¹ Tarık ERFİDAN² Mehmet Zeki BİLGİN³

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli, TÜRKİYE

² Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli, TÜRKİYE

³ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli, TÜRKİYE

umutcan.dogan@gmail.com

Özet- Günümüzde kullanılan içten yanmalı motora sahip araçlar, gelişen teknoloji ile birlikte yerini elektrikli araçlara bırakmaya başlamıştır. Elektrikli araçların dünya pazarında yaygınlaşmasının en önemli sebepleri, ekonomik ve çevreci olmalarıdır. Elektrikli araçlarda kat edilen mesafe(menzil) önemli bir parametredir. Menzili arttırmak için de elektrik motorunun belirli şartlarda, aynı zamanda generatör olarak çalıştırılması ile mümkündür. Frenleme periyodunda elektrik motoru generatör olarak çalıştırılmalı frenlemeden açığa çıkacak enerji (rejeneratif frenleme enerjisi) geri kazanılmalıdır. Faydalı frenleme enerjisini verimli bir şekilde kullanabilmek için uygun şekilde depolanması çok önemlidir. Bu çalışmada bir elektrikli araç için yol durumuna bağlı olarak faydalı frenleme enerjisi hesabı ve depolanması incelenmiştir. Matlab programı ile benzetimi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Elektrikli araç, rejeneratif frenleme enerjisi, süperkapasitör, depolama

STORAGE OF REGENERATIVE ENERGY IN ELECTRICAL VEHICLES

Abstract- Today, the location of vehicles with internal combustion engines to electric vehicles began to leave. The most important causes of the spread of electric vehicles in the world market is economic and environmentalist. The distance is very important parameter for electric vehicle. To increase the range, electric motor is also possible to work as generator. In the case of braking, the electric motor as a generator, braking energy to useful work is obtained. The proper way to be able to use to store regenerative braking energy efficiently is very important. In this work, regenerative braking energy is calculated and designed storage of the regenerative braking energy. Simulation was performed with Matlab.

Key Words- Electrical vehicle, regenerative braking energy, supercapacitor, storage

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde geleneksel içten yanmalı motora sahip, petrol ürünleriyle çalışan araçlar zehirli gaz salınımına sahiptirler. Geleneksel araçlar yaydıkları zehirli gazlar ile hava kirliliğini arttırmaktadır. İçten yanmalı motora sahip araçlardan çıkan gazlar, atmosfere salınan karbondioksitin %31'ini, karbonmonoksitin %82'sini oluşturmaktadır. Ayrıca çoğu ülke için petrol ürünleri dışa bağımlılığı arttırmaktadır. Ülkelerin yakıtta dışa bağımlı olması, petrol ürünleri fiyatlarında arttırmıştır. Bu noktada elektrikli araçlar teknolojisine önem verilmekte elektrik motoruna sahip karbondioksit salınımı olmayan çevreci araçlar yapılmakta hem de ekonomik olarak ucuz elektrik enerjisiyle çalışan elektrikli araçlar geliştirme noktasında üreticiler çalışmalarını devam ettirmektedirler.

Elektrik motoruna sahip olmayan araçlarda frenleme yapıldığında sürtünmeyle birlikte açığa çıkan enerji, ısı olarak atmosfere atılmaktadır. Elektrikli araçlarda ise faydalı frenleme sistemi kullanılarak motor generatör olarak kullanılır. Fren pedalına verilen komut ile motor generatör moduna geçmekte ve elektrik enerjisi üretilmektedir. Önemli olan nokta, yavaşlamayı yüksek ivme ile yapmamak motorun generatör modunda dönüşüne izin vermektir. Çünkü yapılan yüksek ivmeli bir frenlemenin çok küçük bir kısmı rejeneratif frenleme enerjisine dönüşürken, büyük kısmı sürtünme ile ısı enerjisine dönüşerek atmosfere atılır.

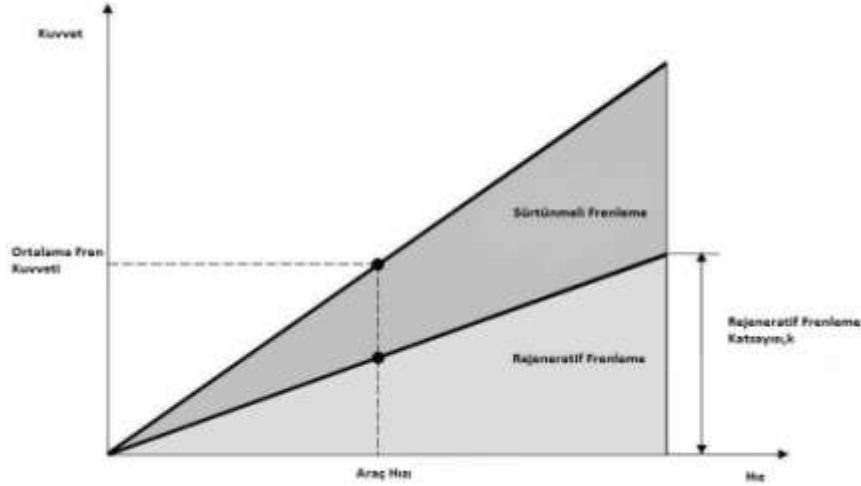
Faydalı frenleme ile kazanılan elektrik enerjisini depo etmek için batarya yerine öncelikli olarak süperkapasitör tercih edilir. Çünkü bataryayı her faydalı frenlemede sarj deşarj olarak kullanmak bataryanın hücrelerinin yıpranmasına sebep olur. Süperkapasitör yüksek akım verme gücüne sahip, yüksek çevrim sayısı olan iç direnci düşük bir elemandır. Bu sebeple aracın ilk kalkış ivmelenmesi sırasında çekilen yüksek akımın süperkapasitör tarafından sağlanması büyük avantaj sağlamaktadır. Bu doğrultuda birbirine paralel bağlı süperkapasitör ve batarya grubu, faydalı frenleme sistemindeki kazanımı en iyi şekilde depo etmektedir. Faydalı frenleme enerjisi Matlab/Simulink programı ile elektrikli araç değerlerinin simüle edilmesiyle bulunur. Teknik veriler dahilinde batarya ve süperkapasitör simülasyonu yapıldığında faydalı frenleme ile elde edilen kazanç ve sarj oranları görülebilmektedir.

2. FAYDALI FRENLEME KONTROLÜ (CONTROL OF REGENERATIVE BRAKING)

Geleneksel içten yanmalı motora sahip araçlarda frenleme durumunda frenleme enerjisi sürtünme ile ısı enerjisine dönüşerek kullanılamaz hale gelir, yok olur. Elektrik motoruna sahip araçlarda ise faydalı frenleme teknolojisi kullanılırsa frenlemenin faydalı kısmından yararlanılır. Gerekli fren gücü maksimum faydalı frenleme gücünü aşmıyorsa faydalı frenleme kuvvetinden faydalanabilir. Eğer gerekli fren gücü maksimum faydalı frenleme gücünü aşıyorsa belirli bir kısma kadar faydalı frenleme yapılabilir, artan kısım geleneksel frenleme nedeniyle ısı enerjisine dönüşerek atılır. Sonuç olarak araç küçük bir ivme ile yavaşlıyorsa, faydalı frenleme etkin bir şekilde kullanılarak aracın faydalı fren gücünü kullanmasını sağlamaktadır.

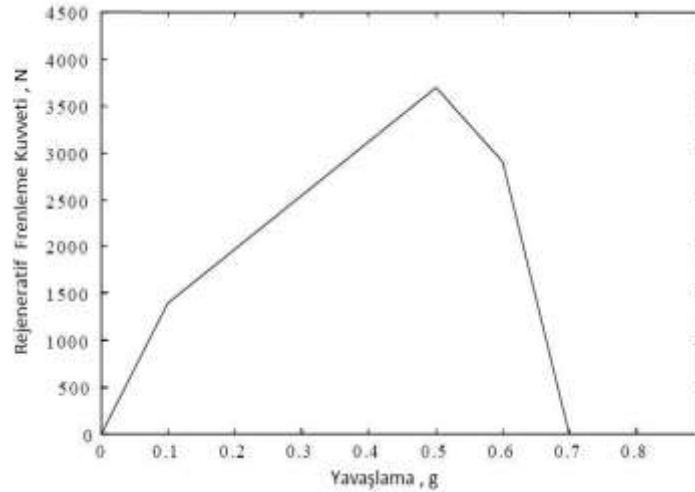
Araç hızındaki artış faydalı frenlemeden alınacak enerji kapasitesini arttırmaktadır. Hız değeri şekil 1 de örnek olması amacı ile 0'dan başlatılmıştır. Elektrikli araçlarda faydalı frenleme moduna geçilebilecek alt hız limit değeri vardır. Motor bu hız değerinin altında generatör

moduna geçemez. Motor sürücüsü ile alt hız limit değeri ayarlanır. Ne kadar yüksek hıza çıkılırsa minimum hıza iniş süresi o kadar uzayacağından depolanabilecek enerji miktarı da artmaktadır. Şekil 1 den de anlaşılacağı üzere frenlemenin yaklaşık %50 - %60 kısmı faydalı olabilmektedir [1].



Şekil 1. Ortalama Fren Kuvveti ve Araç Hızına Göre Rejeneratif Frenleme Katsayısı
(According to Vehicle Speed, Average Break Force and Regenerative Braking Parameter)

Yavaşlama ivmesinin artmasıyla faydalı frenleme kuvveti artmaktadır. Kuvvetteki bu artış daha fazla güç elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak faydalı frenleme kuvvetinin maksimum olduğu nokta, motor/generatör dönüşümündeki maksimum generatör torku kadardır. Bu durumu sağlayan en önemli unsur motor/generatör tork değeridir. Aracın yavaşlaması nedeniyle oluşan faydalı fren kuvveti şekil 2 deki gibidir [2].



Şekil 2. Faydalı Frenleme Kuvveti ve Yavaşlama İvmesi Arasındaki Bağntı (Relation Between Regenerative Braking Force and Slowing Acceleration)

3. FAYDALI FRENLEME BAĞINTILARI (REGENERATIVE BRAKING EQUATIONS)

Aşağıda denklem 1 de faydalı frenleme sonucu birbirine paralel bağlı olan batarya ve süperkapasitöre aktarılan güç $P_{b,in}$ ile ifade edilmektedir. $P_{b,in}$ ifadesinin hesaplanabilmesi için öncelikle 2. 3. ve 4. Denklemlerin sonuçlarının bulunması gerekmektedir. Denklem 2 de tekerlek grubunun atalet momenti, denlem 3 de aerodinamik sürüklenme direnci kuvveti, denklem 4 te ise yuvarlanma direnci kuvveti hesaplanmıştır.

$$P_{b,in} = n_{M/G} V \left[n_t n_f \left(k f_b \left(F_{aero} + F_{rr} + \left(m_v + 4 \frac{I_{w/t}}{r_r^2} \right) a_x \right) + I_{ariveline} \frac{N_t^2 N_f^2}{r_r^2 a_x} \right) + I_{M/G} \frac{N_t^2 N_f^2}{r_r^2 a_x} \right] \quad (1)$$

$$I_{w/t} = m_w r_w^2 + m_t r_t^2 \quad (2)$$

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 \quad (3)$$

$$F_{rr} = [C_{rr,front} m_f + C_{rr,rear} (1 - m_f)] m_v g \cos a \quad (4)$$

1-4 Denklemlerinde,

$n_{M/G}$ = Motor Generatör Verim Oranı

V = Hız (km/h)

r_r = Lastik Yarıçapı (m)

n_t = Aktarma Verimi

a = İvme (m/s^2)

k = Faydalı Frenleme Katsayısı

f_b = Frenleme(Sürtünme) Katsayısı

m_v = Toplam Ağırlık (kg)

r_t = Lastik Yanak Kalınlığı (m)

r_w = Jant Yarıçap Uzunluğu (m)

m_w = Jant Ağırlığı (kg)

m_t = Lastik Ağırlığı (kg)

$I_{M/G}$ = Motor Generatör Atalet Momenti ($kg.m^2$)

C_D = Sürüklenme Katsayısı

A = Araç Ön Yüzey Alanı (m^2)

C_{rr} = Yuvarlanma Katsayısı

m_f = Ön Aks Üzerindeki Ağırlık Katsayısı

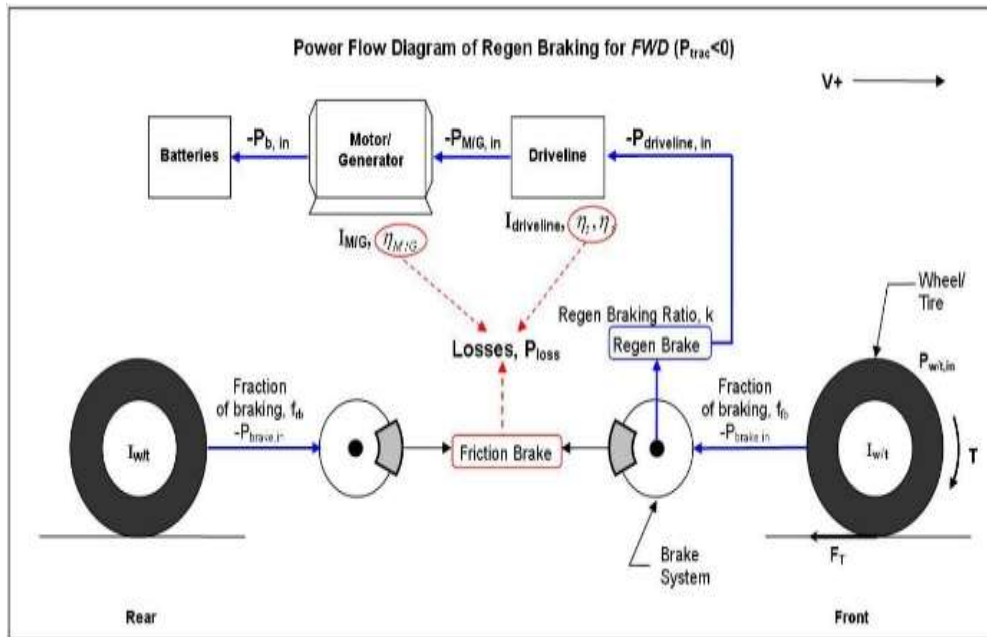
g = Yerçekimi İvmesi (m/s^2)

p = Hava Yoğunluğu (kg/m^3)

$P_{b,in}$ = Batarya ve Süperkapasitöre Aktarılan Güç (kW)

3.1. Faydalı Frenleme Güç Akış Diyagramı (Regenerative Braking Power Flow Diagram)

V(km/h) hızla giden, önden çekişli hareket halindeki aracın güç akış diyagramı şekil 3 deki gibidir. Bu diyagram hareket halindeki bir aracın frenleme sonrası güç akışını ifade etmektedir. Diyagram ön ve arka tekerlekteki frenleme sonucu ortaya çıkan sürtünme kuvvetlerini ifade etmektedir. Frenleme enerjisinin yavaşlama hareketi sırasında belirli bir kısmı faydalı frenleme sayesinde generatör olarak çalışmakta olan motora iletilmekte, generatördeki güç bataryaya aktarılmaktadır. Bu aktarımlar esnasında kayıplar söz konusudur [3].



Şekil 3. Faydalı Frenleme Güç Akış Diyagramı (Regenerative Braking Power Flow Diagram)

3.2. Benzetim Parametreleri (Simulation Parameters)

Elektrikli Araçta Kullanılan Batarya:

Türü = Lithium-ion

$V(\text{Gerilim}) = 400 \text{ V}$

50 Ah

12 Modül

192 Hücre

$m(\text{Ağırlık}) = 290 \text{ kg}$

Süperkapasitör:

(150 adet seri bağlantılı 350F lık süperkapasitör kullanılmıştır.)

Marka – Model: Maxwell BCAP0350

$V(\text{Gerilim}) = 2,5 \times 150 = 400 \text{ (V)}$

$m(\text{Ağırlık}) = 60 \times 150 = 9 \text{ (kg)}$

$R(\text{İç direnç}) = 0,0032 \times 150 = 0,48 \text{ } \Omega$

$C(\text{Kapasite}) = 350/150 = 2,33 \text{ (F)}$

$E(\text{Toplam Enerji}) = 186400 \text{ (J)}$

Parametreler:

$n_{M/G} = 0,85$

$V = \text{Değişken hız (km/h)}$

$n_t = 0,95$

$n_f = 0,95$

$a_x = \text{Değişken ivme (m/s}^2\text{)}$

$m_w = 7 \text{ (kg)}$

$m_t = 9 \text{ (kg)}$

$r_r = 0,32 \text{ (m)}$

$r_t = 0,13 \text{ (m)}$

$$r_w = 0,19 \text{ (m)}$$

$$I_{M/G} = 5,34 \text{ (kg.m}^2\text{)}$$

$$k = 0,5$$

$$f_b = 0,6$$

$$m_w = 1550 \text{ (kg)}$$

$$p = 0,5$$

$$C_D = 0,55$$

$$A = 1,85 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$C_{rr,front} = 0,96$$

$$C_{rr,rear} = 0,96$$

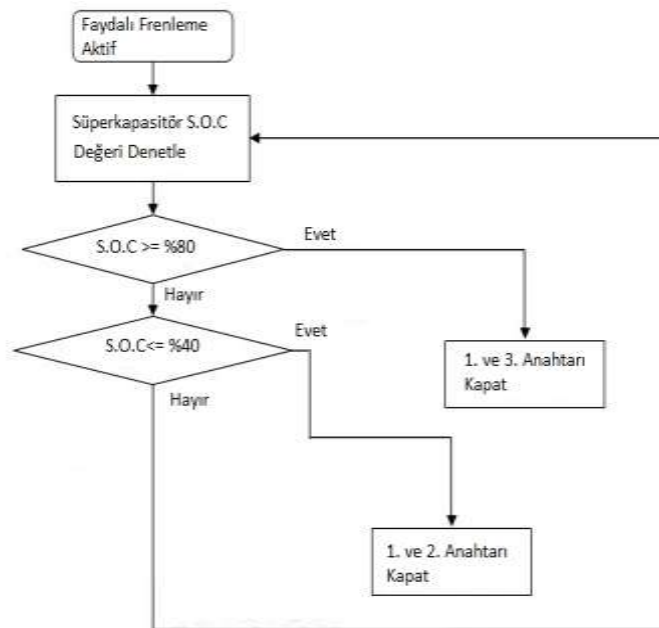
$$m_f = 0,6$$

$$\cos a = \text{Değişken açı (rad)}$$

$$g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

3.3. Batarya ve Süperkapasitör Şarj Kontrolü (Battery and Supercapacitor Charge Control)

Batarya, süperkapasitör hibrit sisteminde düşünülen algoritma şarj kontrolü için Matlab Script dilinde yazılmıştır. Bu algoritma ile akım kaynağına paralel olarak bağlı olan batarya ve süperkapasitör arasında şarj kontrol yapılması amaçlanmıştır.



Şekil 4. Kontrol Algoritması (Control Algorithm)

1. Anahtar = Charge anahtarını ,
2. Anahtar = Load anahtarını ,
3. Anahtar = Sccharge anahtarını ifade etmektedir.

Faydalı frenleme enerjisi Load ve Charge anahtarları kapalı olduğunda süperkapasitörü, Sccharge ve Charge anahtarları kapandığında bataryayı şarj etmektedir.

```
function [Load, Charge, SCcharge] = fcn(SOC
    Load=1;
    Charge=1;
    SCcharge=0;
    if (SOC >=80)
        Load=0;
        Charge=1;
        SCcharge=1;
    end
    if (SOC<40)
        Load=1;
        Charge=1;
        SCcharge=0;
    end
end

function [Load, Charge, SCcharge] = fcn(SOC
    Load=1;
    Charge=1;
    SCcharge=0;
    if (SOC >=80)
        Load=0;
        Charge=1;
        SCcharge=1;
    end
    if (SOC<40)
        Load=1;
        Charge=1;
        SCcharge=0;
    end
end
```

Şekil 5. Kontrol Kodu (Control Code)

Şekil 4 te kontrol algoritması görülmektedir. Şekil 5 te ise batarya ve süperkapasitör şarjdeşarj durumlarına göre anahtarların konumunun nasıl olması gerektiği ve anahtarların ilk konumları yazılmıştır [5].

Durum – 1:

Batarya devrede değil, faydalı enerji süperkapasitörü şarj etmektedir. Süperkapasitör S.O.C(State of Charge:Şarj Durumu) değeri %80 olduğunda durum 2 ye geçilir.

Durum – 2:

Süperkapasitör S.O.C değeri denetlenmektedir ve bu değer %80 olduğu anda akım kaynağı ile süperkapasitör bağlantısı kesilir, akım kaynağı ile batarya bağlantısı anahtarlar vasıtasıyla kurulur. Süperkapasitör şarj durumu %80 olduğunda, geriye kalan enerji bataryayı şarj etmektedir.

Durum – 3:

Deşarj durumunda ise süperkapasitör %40 doluluk oranı altında bir değere düştüğü an kaynak süperkapasitör arasındaki anahtar kapanır ve tekrar süperkapasitör şarj olur. Süperkapasitörün en büyük avantajı iç direncinin bataryaya göre çok düşük olması, çok hızlı şarj olması ve çevrim sayısı(cycle) ömrünün uzun olmasıdır.

Süperkapasitör ve batarya bağlantısında 3.anahtar kullanılmasının nedeni, süperkapasitör dolduğunda, tam olarak %80 değerine kadar şarj olduğunda artık 3.anahtar açılacak ve iç direnci çok düşük olan süperkapasitör ile batarya arasındaki iletim kesilecektir. Bu iletimi kesmekteki amaç iç direnci düşük olan süperkapasitör, bataryadaki yükü kendi üzerine çekebilmektedir ve bu durum istenen bir durum değildir. Kaynaktan beslenen ilk şarj elemanı olarak süperkapasitör tercih edilmiştir çünkü bataryalar elektrikli aracın kalbi gibidir ve çok dikkatli kullanılması gereken bir elemandır. Sürekli olarak devreye girip devreden çıkacak eleman olarak bu anlamda süperkapasitörlerin seçilmesi daha uygundur [4],[5].

3.4. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

Faydalı Frenlemede Simüle Edilen Senaryo:

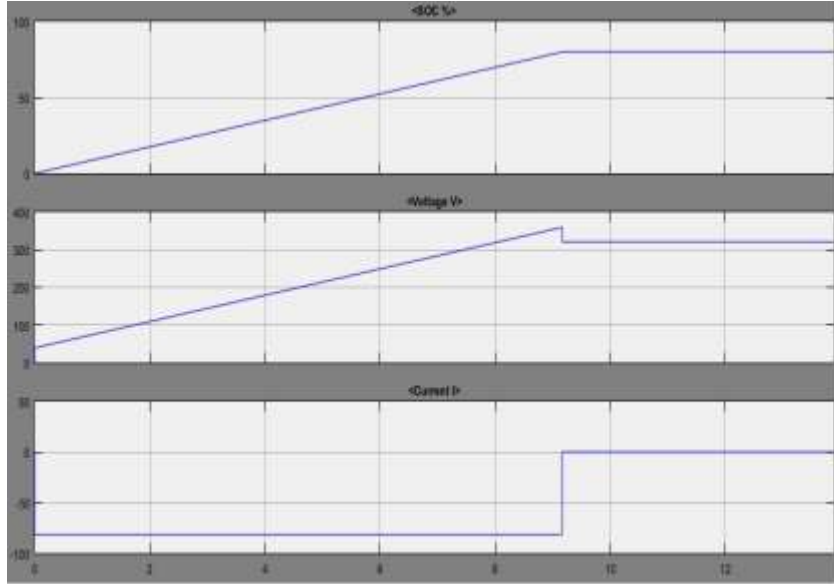
Araç 100km/h hızla 0 km/h hızla $2m/s^2$ lik bir ivmeyle yavaşlayarak faydalı frenleme yapmıştır ve bu durumu 3 kez tekrarlamıştır. Üretilen güç değeri, enerjiye dönüştürülmüştür. Enerji dönüşümüyle birlikte 50km/h hızla aracı hareket ettirmek için gerekli olan güç değeri hesaplanmış, enerjiye dönüştürülmüştür. Değerler oranlandığında yaklaşık 1,7km lik bir mesafe kompanze edilmiştir.Sonuç olarak faydalı frenleme sonrası araç 50 km/h hızla 1,7 km menzile sahip olmuştur.

Senaryo Sonucu:

Yukarıda verilen değerler ile sistemin benzetimi yapıldığında, Şekil 6 ve Şekil 7 elde edilmiştir. Simüle edilen senaryoya ait değerler girildiğinde süperkapasitör %80 şarj olmuş ve faydalı frenleme ayrıca bir miktar bataryayı şarj etmiştir. Batarya ilk konumda %20 şarj değerine sahiptir. Son durumda ise batarya %20,21 şarj değerine sahiptir. Şekil 6 da batarya şarj durumu, akım ve gerilim değerleri görülmektedir. Şekil 7 de ise test edilen senaryoya ait değerler girildiğindeki süperkapasitör şarj durumundaki doluluk oranı, akım ve gerilim eğrileri görülmektedir [6],[7].



Şekil 6. Batarya Şarj Durumu (Battery Charge State)



Şekil 7. Süperkapasitör Şarj Durumu (Supercapacitor Charge State)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Faydalı frenleme sistemi elektrikli araçlar için çok önemlidir. Elektrikli araçlarda, elektrik motorunun sürücü vasıtasıyla uygun hızda generatör modunda çalışması sonucu faydalı frenleme enerjisi üretilir ve bu enerji elektrikli araç ile katedilebilecek mesafeyi arttırmak için süperkapasitör ve bataryada depolanır. Faydalı frenleme sistemini etkin bir şekilde kullanabilmek için ani yavaşlamalardan kaçınılmalıdır. Faydalı frenlemenin geçici süre depo edilmesinde süperkapasitörler kullanılmaktadır. Süperkapasitörler sayesinde sistem tarafından ihtiyaç duyulan yüksek akım gereksinimleri sağlanmış, sürekli şarjdeşarjın bataryaya zarar verme riski minimuma indirilmiştir. Benzetim sonuçlarından görüldüğü üzere, faydalı frenleme sistemini ve süperkapasitörleri elektrikli araçlarda kullanmak önemli kazançlar sağlamaktadır.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Jeongwoo Lee , 'Rotating Inertia Impact on Propulsion and Regenerative Braking for Electric Motor Driven Vehicles' , Blacksburg, Virginia, December 9, 2005.
- [2]. B. J. Varocky , 'Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car ' , Report No. D&C 2011.002 , January , 2011.
- [3]. Saharat Chanthanumataporn , ' Design of Regenerative Braking System for an Electric Vehicle (EV) Modified from Used Car ' , Krabi , 19-21 October , 2011.

[4]. Nick Papanikolaou , ' *Theoretical and Experimental Investigation of Brake Energy Recovery in Industrial Loads* ', August 24, 2013.

[5]. Haoming Zhang, ' *Application of Super Capacitor in HEV Regenerative Braking System* ', China, 2014 , 8.

[6]. Noshin Omar, ' *Effectiveness evaluation of a Supercapacitor-battery parallel combination for Hybrid Heavy Lift Trucks* ', Norway , May 13-16 , 2009.

[7]. Renault Zoe Technical Specifications.