
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	Geliş/Received 05-09-2017 Kabul/Accepted 25-10-2017	Doi 10.16984/saufenbilder.336863	

Kinetik enerji geri kazanım sistemlerinin elektrikli araçlarda kullanımının incelenmesi

Bilgehan Demirkale¹, Fatih Güven^{2*}

ÖZ

Elektrikli araçlar çevreci özellikleri ve enerji etkinliği açısından alternatif ulaşım yöntemi olarak sunulmaktadır. Tek şarj ile gidilebilecek mesafenin kısa olması bu araçların yaygınlaşmasının önündeki önemli engellerden biridir. Elektrikli araçların menzilinı uzatmak için depolama ve araç teknolojisi üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalardan bir kısmı mevcut enerji kayıplarının azaltılarak aynı batarya kapasitesi ile daha uzun mesafe gidilmesini amaçlamaktadır. Araçlara uygulanan enerji geri kazanım sistemleri ile enerji tasarrufu sağlayan çalışmalar mevcuttur. Frenlemede kaybolan enerjinin geri kazanımı için kullanılan rejeneratif sistemler buna örnektir. Bu çalışma kapsamında frenleme esnasından kaybolan kinetik enerjinin geri kazanımı için bir elektrikli araçta simülasyon yapılmıştır. Simülasyon sonucunda şehir içi kullanım için KERS ile %25 civarında enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Enerji yönetimi, KERS, rejeneratif frenleme, ekonomik sürüş, batarya, yakıt tüketimi

Investigation of kinetic energy recovery systems usage in electric vehicles

ABSTRACT

Electric cars are seen alternative in transport from the viewpoint of environment and energy efficiency. Short range is one of the challenges facing prevent widespreading of these vehicles. Researches on storage systems and vehicle technology are carried in order to increase the range of electric vehicles. Some researches aim more distance to go with the same battery capacity by decreasing energy losses. Some researchers showed that energy conservation systems applicable to automobile could recover kinetic energy. One of the energy recovery systems is regenerative braking. In this study, a simulation was conducted to investigate recovered energy in an electric vehicle with kinetic energy recovery system. As a result, a 25% of energy saving for model electric vehicle was gathered by using kinetic energy recovery system under driving circumstances in a sample city cycle.

Keywords: Energy management, KERS, regenerative braking, economic driving, battery, fuel consumption

¹ Technische Universität Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik, Chemnitz, Almanya, bilgehan.demirkale@s2013.tu-chemnitz.de

² Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye, fatihguven@akdeniz.edu.tr

*Corresponding Author

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrikli araçlar, fosil yakıtlarla çalışan araçlara alternatif olması ve aynı zamanda çevreci özellikleri ile dikkat çekmektedir. Fosil yakıtlı araçların yaygın istasyon ağı, uzun menzilleri ve başlangıç maliyetinin elektrikli araçlara göre düşük olması [1], [2], elektrikli araçların yaygınlaşmasındaki engeller olarak sıralanabilir. Ülkeler yasal düzenlemelerle ve elektrikli araçlara verilen teşviklerle, elektrikli araç üreticileri de teknoloji araştırmaları ile bu eksiklikleri gidermeye çalışmaktadırlar. Uluslararası Enerji Ajansı tarafından hazırlanan rapora göre elektrikli araç satışı 2014 ve 2015 yılları arasında 550 binden fazla araçla dünya genelinde %70 oranında artmıştır [3].

Elektrikli araçların menzilini uzatmak için batarya ve şarj sistemleri geliştirilmekle birlikte [4] elektrikli araçların enerji tüketimini ve enerji kayıplarını azaltmak, bu araçların mevcut batarya ile daha uzun süre çalışabilmesi açısından önemlidir. Diğer ulaşım araçlarında olduğu gibi elektrikli araçlarda da enerji kayıplarının önemli bir sebebi hareket halindeki aracın yavaşlatılması veya durdurulması esnasında kinetik enerjisinin azaltılmasından kaynaklanmaktadır. Günümüzde enerjiye duyulan ihtiyaç ve maliyeti düşürme çabaları göz önüne alındığında, enerji kayıplarının azaltılması ve geri kazanım yöntemleri büyük önem kazanmaktadır.

Araçlarda, frenlemede kaybolan kinetik enerjinin kazanımı için geliştirilen ve genel olarak KERS (ing. Kinetic Energy Recovery Systems) adı verilen sistemlerin kullanılmasıyla araçlar enerji açısından daha etkin hale gelmektedir. KERS kullanımında temel amaç kayıp olarak görülen enerjinin kazanılarak daha sonra kullanılmak üzere saklanmasıdır [5], [6].

Kinetik enerji geri kazanım sistemlerinin farklı türleri bulunmaktadır. Genel olarak kinetik enerji geri kazanım sistemleri üç ana kısımdan oluşur. Bunlar frenleme esnasında kaybolan enerjiyi saklanabilir bir forma dönüştüren enerji kazanım kısmı, kontrol ünitesi ve kazanılan enerjiyi saklayan depolama ünitesidir. Bu sistemler frenleme esnasında kinetik enerjiyi mekanik enerji olarak saklayabildiği gibi, elektrik enerjisine de çevirebilmektedir [5].

Kinetik enerji kazanım sistemleri Formula 1 araçlarında kullanılmıştır. Bunun yanı sıra

lokomotif [7], kamyon [8], otobüs [9] ve binek otomobillerde [10] kullanılması üzerine araştırmalar yapılmıştır. Elektrikli araçlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar ise devam etmektedir [11]. Wicks ve Donnelly toplu taşıma amaçlı kullanılan bir otobüs için yaptıkları çalışmada motor tarafından üretilen enerjinin %59'unun frenleme kaybolduğunu, yani ideal durum için %59'a kadar enerji tasarrufunun mümkün olduğunu belirtmişlerdir [12]. Yang vd. elektrikli scooter üzerine yaptıkları çalışmada, bir elektrikli araçta bulunan mevcut sistemlere rejeneratif enerji kazanımının daha uygun olduğunu belirtmiştir. Bu sistemde motor aynı zamanda jeneratör görevi görmektedir [13].

Bu çalışma kapsamında örnek mesafeler için model elektrikli aracın enerji kazanımı simülasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyonda farklı özelliklere sahip güzergâhlarda KERS kullanılan bir elektrikli araçta geri kazanım oranları belirlenmiş ve bu kazanım oranlarından hareketle KERS kullanımının elektrikli araçların menziline olan etkisi değerlendirilmiştir.

2. KİNETİK ENERJİ KAZANIM SİSTEMLERİ (KINETIC ENERGY RECOVERY SYSTEMS)

Kinetik enerji kazanım sistemleri aracın yavaşlaması ve durdurulması esnasında harcanan kinetik enerjiyi, yeniden kullanılmak üzere elektrik enerjisi veya mekanik enerji olarak depolamak üzerine kuruludur. Genel olarak bir KERS güç, kontrol ve depolama sisteminden oluşmaktadır.

KERS yapı itibarıyla “mekanik” ve “elektrik” olarak iki çeşittir. Frenleme esnasında kaybolan enerji, mekanik KERS ile bir volan ve bir değişken tahrikli aktarım organı aracılığıyla geri kazanılırken elektrik KERS, motorun jeneratör olarak kullanılması sonucunda geri kazanım sağlar.

KERS kullanımında depolama önemli bir yer tutmaktadır. Mekanik depolama sistemlerinde enerji yay, volan veya bir akışkanda saklanabilirken elektrik depolamalı sistemlerde enerji akülerde, yakıt hücrelerinde veya ultra-kapasitörlerde saklanmaktadır. Elektrik depolama sistemlerinde enerji daha uzun süre saklanabilirken mekanik sistemlerde depolanan enerjinin kısa süre içerisinde yeniden kullanımı (depolanan enerji aracın dur-kalk yaptığı zamanlarda kalkış desteği olarak kullanımı gibi)

gerekir. Bu dezavantajlarına karşın mekanik sistemler kısa süre içerisinde yüksek miktardaki enerjiyi üzerinde biriktirebilmektedir [14]. Ancak kazanılan enerjinin daha etkin kullanımı açısından depolanan enerjinin uzun süre saklanabilmesi istenmektedir. Bu durum için daha uygun bir saklama şekli olan bataryalarda ise kazanılan enerjinin depolanması için şarj süresi engel oluşturmaktadır. Bu durum KERS geliştiricilerini kombine sistemler kullanmaya yöneltmiştir [15]. Mekanik olarak kazanılan enerjinin elektrik olarak saklanması ideal bir çözüm olarak görülmektedir.

Aracın yavaşlaması ve durdurulması esnasında frenleme süresine bağlı olarak elde edilen enerji değişmektedir [16]. Kısa sürede elde edilen farklı karakteristikteki enerjinin yüksek verimle saklanabilmesi için depolama sisteminin uygun olması gerekir. Depolama sisteminin düşük maliyetli ve taşınabilir olmasının yanında uzun süreli depolama imkânı sunması istenmektedir. Van Mierlo vd. enerji depolama sistemleri üzerine yaptıkları incelemede bataryaların bir depolama sisteminde aranan özellikler açısından en uygun kaynak olduğunu belirtmişlerdir [17]. Ancak bataryalarda enerjinin depolanabilmesi için kazanılan mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bataryaların şarj/deşarj oranlarının sınırlı olmasından dolayı başka bir deyişle kazanılan tüm enerjinin kısa sürede bataryalara aktarılamamasından dolayı batarya verimli bir depolama sistemi olarak kullanılamamaktadır [18].

Ultra kapasitör ve volanlar bataryalara göre hızlı şarj edilebilme ve yeniden yükleme sağladıklarından dolayı yüksek enerjili sistemlerde kullanımı daha uygundur. Volanlı kinetik enerji sistemi, enerjinin mekanik olarak biriktirildiği bir disk ve bu enerjiyi elektrik enerjisine çevirebilen bir jeneratöre sahiptir. Volanlı kinetik enerji kazanım sistemlerinde enerji kinetik olarak saklanmaktadır ve daha sonra elektrik enerjisine çevrilebilmektedir [14]. Hâlihazırda uygulama maliyetinin yüksek olmasına karşın ultra kapasitörlere göre yüksek enerji depolama kabiliyetinden dolayı giderek yaygınlaşmaktadırlar [17]. Yukarı bahsedilen

özellikler dikkate alındığında elektrikli araçların mevcut bataryalarının yanı sıra enerji rejenerasyonu için volanlar da kullanılmaktadır. Volan ve bataryanın depolama sistemi olarak birlikte kullanılmasının, enerji etkinliği açısından uygun olduğu düşünülmektedir [15]. Yüksek akım durumunda enerji mekanik olarak volanda depolanıp bu enerji aracın yeniden hızlanmasında kullanılacak; akımın bataryada depolanabilir seviyede gelmesi durumunda da menzili artırmak üzere uzun süreli saklanıp daha sonra kullanımı sağlanabilecektir. Böylece enerji tasarrufu maksimum seviyeye ulaşacaktır.

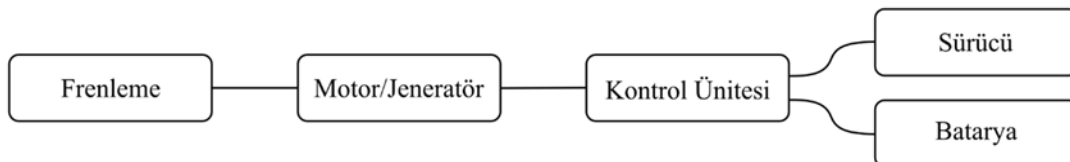
Motorun jeneratör olarak kullanıldığı rejeneratif frenlemede klasik mekanik fren yerine bir elektriksel kuvvet ile aracın yavaşlaması sağlanır [16]. Tekerleklerde oluşan hareket aktarma elemanları vasıtasıyla belirli çevrim oranlarında elektrik motoruna/jeneratöre aktarılır. Dönüştürülen elektrik enerjisi invertör üzerinden bataryada depolanmak üzere sevk edilir. Şekil 1'de bir elektrik KERS yapısı görülmektedir. Elektrikli araçların yavaşlatılması esnasında kazanılan enerjinin saklanması ve yeniden kullanılması açısından, bu araçların hâlihazırda yapıları ile olan uyumu nedeniyle elektrik depolamalı KERS kullanımı daha uygundur. Elektrikli araçlara KERS kullanılması durumunda motor aynı zamanda jeneratör görevi görmektedir [1].

2.1. Kinetik enerji kazanım sistemlerinin matematiksel modeli (Mathematical Model of Kinetic Energy Recovery Systems)

Frenleme sırasında ortaya çıkan enerji (W_{fren}), aracın sürüş sırasında sahip olduğu tekerleklerdeki tahrik enerjisinden (W_{tahrik}) yola çıkılarak hesaplanabilir.

$$W_{tahrik} = \int_0^t P_{araç}(t) \cdot dt \quad (1)$$

Yukarıdaki formülde araçtaki tahrik gücü, $P_{araç}$, aracın ivmelenmesi için gereken kuvvet (F_i) ile aracın hareketi esnasında yenmesi gereken hava



Şekil 1. Elektrik KERS yapısı (Structure of electric KERS)

direnci (F_{hd}) ve yuvarlanma direncinden (F_{yd}) dolayı oluşan kuvvetlerin toplamıdır.

$$P_{araç} = 1/t \int_0^t (F_i + F_{hd} + F_{yd})v dt \quad (2)$$

Bu formüldeki kuvvet terimleri açık bir şekilde yazılacak olursa Denklem (3) elde edilir.

$$P_{araç} = 1/t \int_0^t (0,5 \cdot c_d \cdot A_f \cdot \rho_{hava} \cdot v^2 + m \cdot g \cdot (\tau_w + \sin \alpha) + m' \cdot a) v dt \quad (3)$$

Bu formülde; v aracın hızı, c_d hava sürtünme katsayısı, A_f aracın ön cephe alanı, ρ_{hava} havanın yoğunluğu, m araç kütlesi, g yerçekimi ivmesi, τ_w yuvarlanma sürtünme katsayısı, α eğim açısı, m' dönen parçaların ataletinin dahil olduğu kütle ve a aracın ivmesidir.

Frenlemeden dolayı ortaya çıkan enerji (W_{fren}), aracın hareketi esnasından oluşan hava direnci (aerodinamik) ve tekerleklerdeki yuvarlanma sürtünmesinin olmadığı varsayılan ideal durum için aracın frenleme başlangıcından duruş anına kadar sahip olduğu tahrik enerjisinin tamamına eşittir.

$$W_{fren} = -W_{tahrik} = \int_0^t -P_{araç}(t) \cdot dt \quad (4)$$

Pratikte ise bunun mümkün olmayacağı aşikârdır. Yani aracın herhangi bir zamanda yavaşlaması sırasında enerjinin bir kısmı sürtünme kayıplarına gitmektedir. Kayıplar dışında kalan net fren enerjisinin ne kadarlık bir kısmının KERS dahilinde bataryada depolanacağı ise aracın tahrik ve güç aktarma organlarının konfigürasyonu ile ilintilidir. Önden çekişli düzenin haricinde, arkadan itişli, hub motor veya her bir aks için birden fazla elektrikli tahrik seçenekleri de mümkündür. Elektrikli aracın konfigürasyonundaki değişiklik aracın dinamik parametrelerini, kütle, kütle merkezi, ön ve arka aksın kütle merkezine olan mesafesi vb. değiştireceği için frenleme sırasında ön ve arka frenlerde ortaya çıkan enerjiyi de doğrudan etkilemektedir. Günümüzde araçlar, frenleme esnasında aracın güvenli ve stabil bir şekilde yavaşlaması veya durması için frenler arası kuvvet dağılımını sağlayan elektronik sistemler ve yazılımlar ile donatılmıştır. Frenler arası kuvvet dağılımını sağlayan bu sistemler, yavaşlama ivmesine bağlı olarak ön ve arka frenlerde yavaşlama için oluşturulması gereken gerekli

kuvvet dağılımını ayarlayarak aracın güvenli bir şekilde, yoldan çıkmadan frenlemesini sağlar. Aracın frenleme esnasında güvenli yol tutuşu için önerilen, ön ve arka fren sistemlerinin frenleme oranı United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) tarafından düzenlemiştir [19]. Özetle KERS ile, frenleme sırasında ortaya çıkan toplam enerjinin sadece belli bir kısmı depolama için kullanılabilir ve bu da aracın konfigürasyonuna ve frenleme oranına bağlı olarak değişmektedir.

KERS vasıtasıyla frenleme sırasında kazanılamayan enerjinin (P_{fk}) yanı sıra elde edilen enerjinin bir kısmı da,

- Aerodinamik etkenlerden dolayı oluşan kayıplar (P_{adk})
- Geri kazanılan enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi, aktarımı ve regülasyonu sırasında ortaya çıkan kayıplar (P_{sk}),
- Elektrik motorunun kayıpları (P_{ek}),
- Mekanik aksam kayıpları (P_{mk}),
- Depolama ünitesinde kullanılan bataryanın çeşidine bağlı olarak (kursun-asit, lityum-iyon, nikel-kadmiyum, ultra kapasitörler vb.) şarj ve deşarj işlemleri sırasındaki kayıpları (P_{bk}),

gibi sebeplerden kaybedilmektedir. Tüm bu kayıplardan sonra bataryada depolanmak üzere KERS ile geri kazanılan net enerji (W_{KERS}) aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$W_{KERS} = \int_0^t (-P_{araç}(t) + P_{fk}(t) + P_{adk}(t) + P_{sk}(t) + P_{ek}(t) + P_{mk}(t) + P_{bk}(t)) \cdot dt \quad (5)$$

3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KERS KULLANIMI (KERS USAGE IN ELECTRIC VEHICLES)

Elektrikli araçlarda KERS kullanımı için bir model aracın parametreleri kullanılarak, şehir içi, şehirlerarası ve karışık kullanım için oluşturulmuş senaryolara göre enerji kazanım miktarları değerlendirilmiştir. KERS ile kazanılan enerjinin incelemesinin yapılması için ADVISOR programı ile bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Geleneksel, elektrikli ve hibrit araçların performansını ve yakıt ekonomisini hızlı bir şekilde analiz etmek için tasarlanan ADVISOR, MATLAB/SIMULINK program altyapısında çalışan bir programdır [20]. Programın içerisinde

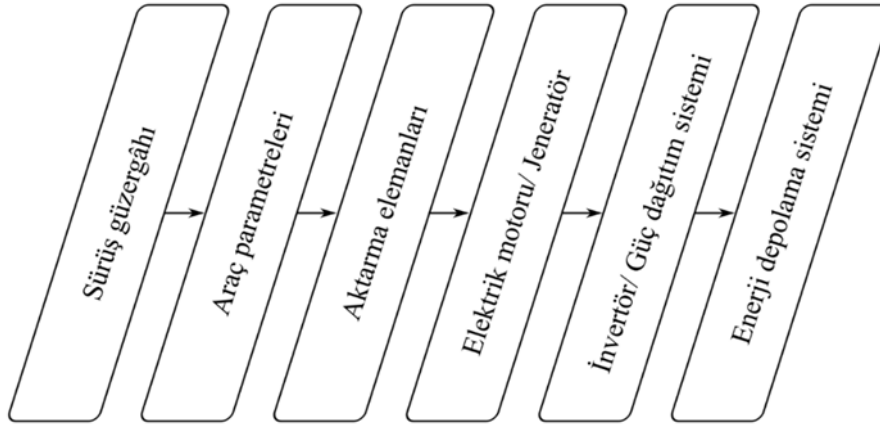
simülasyonların yapılabilmesi için çeşitli tahrik konfigürasyonları, araçların dinamik özellikleri, vites çeşitleri vb. gibi birçok değişken program dahilinde sunulmuştur ancak test edilmek istenen değişkenler kullanıcı tarafından belirlenerek simülasyona dahil edilebilmektedir. Şekil 2’de KERS ile kazanılan enerjinin incelenmesi için oluşturulan simülasyon akış şeması ve Tablo 1’de simülasyon kapsamında kullanılan aracın teknik özellikleri ve diğer parametreler görülmektedir.

Sürüş güzergâhı, belirlenen başlangıç ve bitiş noktaları arasında gerçekleştirilen ve sürüşler sırasında yapılan ölçümlerle elde edilmiş hız-zaman ilişkisini ve yolun durumunu (düz, eğimli vs.) gösteren istatistiki olarak elde edilmiş verilerdir. Sürüş güzergâhından gelen hız ve ivme verileri doğrultusunda aracın dinamik özellikleri ve geometrik ölçüleri esas alınarak ihtiyaç duyulan ve kaybedilen enerji hesaplanmaktadır. KERS ile frenleme sırasında ortaya çıkan enerji ilk olarak aktarma organları vasıtasıyla elektrik motoruna

iletilmekte buradan da güç dağıtım sistemi üzerinden bataryalarda depolanmaktadır. Simülasyon ve sürüş güzergâhı ile alakalı dikkat edilmesi gereken bir husus, sürüş güzergâhında görülen her yavaşlamanın enerji kazanımı anlamına gelmediğidir. Şekil 3’te aracın sürüş güzergâhı boyunca yaptığı hızlanma ve yavaşlama ivmesi görülmektedir. Bu durumda KERS ile geri kazanımı sağlanan enerji, Şekil 3’te kesik çizgi ile gösterilen alanın altındaki frenleme sırasında oluşan ivmeler baz alınarak hesaplanmaktadır.

KERS vasıtasıyla kazanılan enerji miktarının sağlıklı bir biçimde incelenebilmesi ve fikir verebilmesi için ADVISOR programı içerisinde kayıtlı olan üç farklı sürüş güzergâhı başka bir deyişle üç farklı senaryo seçilmiştir.

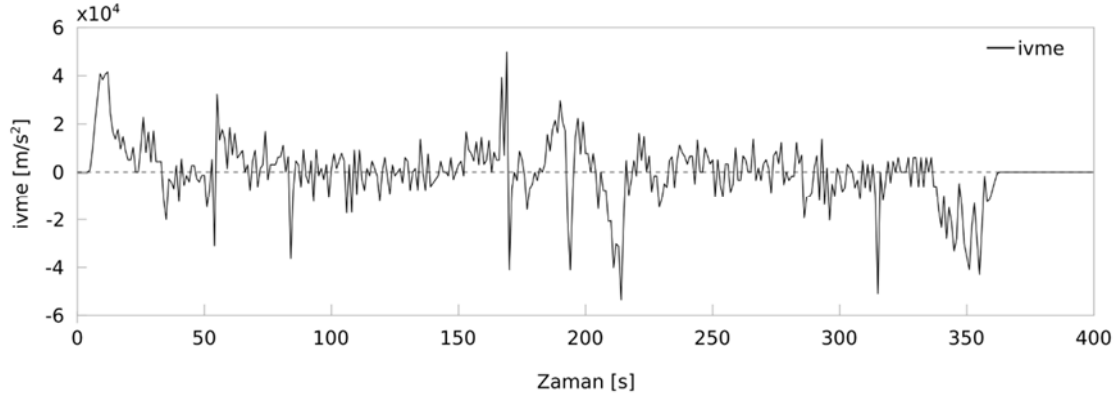
CYC_OCC sürüş güzergâhı dur kalkın çok olduğu şehir içi, CYC_US06_HWY kısa mesafeli bir ana bağlantı yolunda örneğin bir çevre yolunu ve son olarak CYC_VAIL2NREL güzergâhı ise şehirlerarası sürüş karakteristiğini yansıtmaktadır.



Şekil 2. Simülasyon akış şeması (Simulation flow diagram)

Tablo 1. Simülasyonda kullanılan teknik veriler (Technical parameters of simulation)

Parametre	Birimi	Veri
Araç ağırlığı	kg	1200
Lastik tipi		SAE J2452, P225/55R16
Rüzgâr direnç katsayısı	-	0,33
Yuvarlanma sürtünme katsayısı	-	0,009
Araç ağırlık merkezinin yerden yüksekliği	m	0,5
Hava yoğunluğu,	kg/m ³	1,2
Motor Tipi		AC sürekli indüksiyon
Motor Gücü (maksimum)	kW	49
Batarya tipi		NiMH
Toplam batarya modül sayısı		65
1 Batarya modülü için,		
Nominal Gerilim	V	6
Nominal Kapasite	Ah	28
Maksimum güç	kW	1,6
Ağırlık	kg	3,6
Vites Kutusu		Tek kademeli Otomatik
Donanım kaynaklı harcanan enerji miktarı (sabit)	W	600



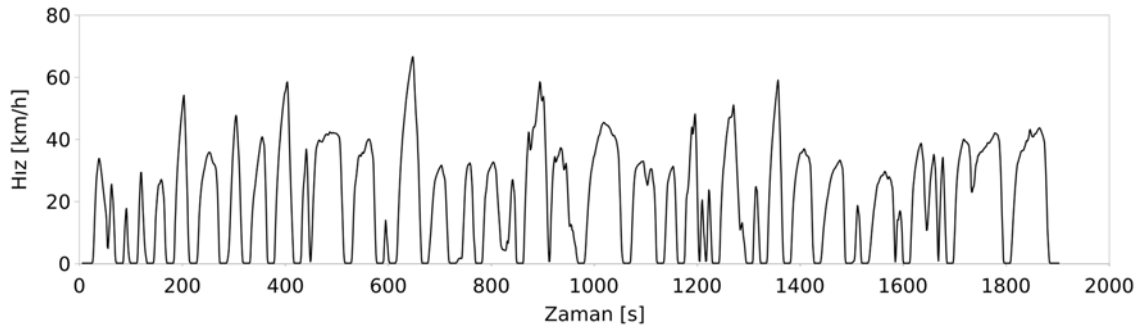
Şekil 3. Simülasyonda kullanılan aracın sürüş güzergâhı boyunca yaptığı hızlanma ve yavaşlama ivmesi (Acceleration and deceleration of model car throughout driving cycle)

Tablo 2’de bahsedilen güzergâhlara ait detaylı bilgiler paylaşılmıştır. Bu güzergâhlara ilişkin hız-zaman grafikleri Şekil 4-6’da görülmektedir.

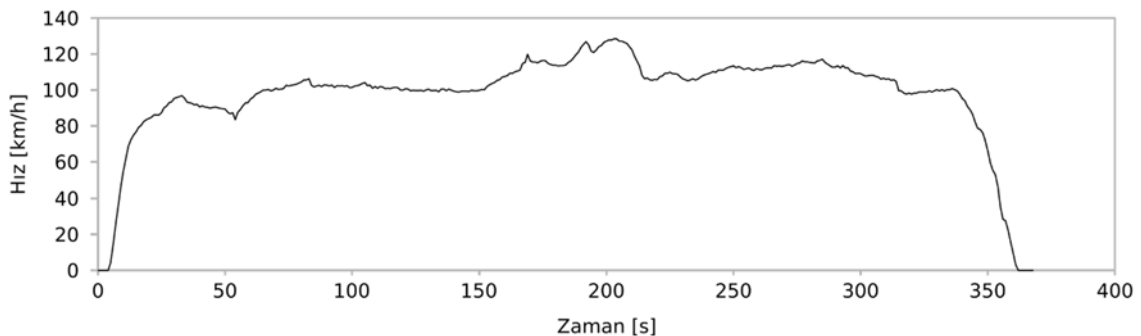
Bunlardan CYC_OCC ve CYC_US06HWY güzergâhlarında yükseklik yol boyunca değişmemektedir. Şekil 6’da görüldüğü gibi

Tablo 2. Sürüş güzergâhlarının özellikleri (The characteristics of driving cycles)

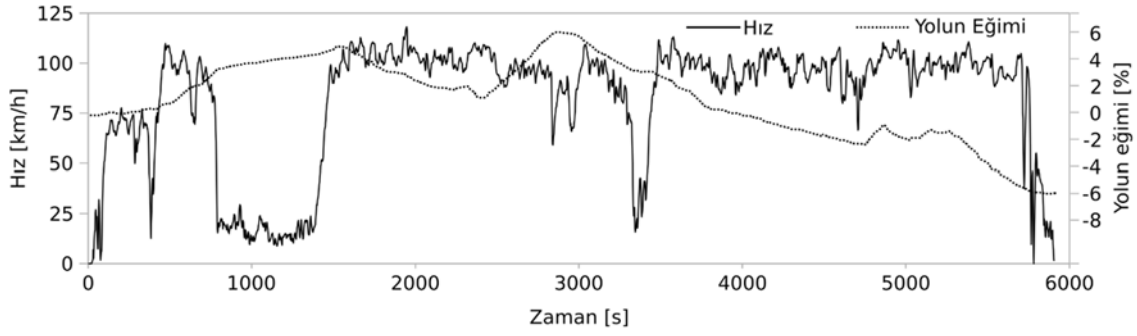
Parametre ve Birimi	CYC_OCC	CYC_US06_HWY	CYC_VAIL2NREL
Zaman (s)	1909	368	5914
Mesafe (km)	10.53	10.04	139.29
Maksimum hız (km/h)	65.39	129.23	121.72
Ortalama hız (km/h)	19.84	97.91	84.78
Maksimum ivmelenme (m/s ²)	1.81	3.08	2.24
Maksimum yavaşlama ivmesi (m/s ²)	-2.29	-3.08	-3.2
Ortalama ivme (m/s ²)	0.45	0.34	0.18
Ortalama yavaşlama ivmesi (m/s ²)	-0.64	-0.41	-0.21
Durma sayısı	31	1	0
Durma süresi (s)	407	12	27



Şekil 4. Şehir içi sürüş güzergâhı boyunca araçtaki hız değişimi (The velocity of the car throughout city cycle)



Şekil 5. Çevreyolu/Otoyol sürüş güzergâhı boyunca araçtaki hız değişimi (The velocity of the car throughout highway driving cycle)



Şekil 6. Şehirlerarası sürüş güzergâhı boyunca araçtaki hız değişimi ve yolun eğimi (The velocity of the car throughout intercity driving cycle and slope of route)

CYC_VAIL2NREL güzergâhında ise yol boyunca %-6 ile %6 arasında değişen bir eğim mevcuttur.

Simülasyon sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Burada, aracın güzergâh boyunca tükettiği enerji, frenlemeden dolayı ortaya çıkan enerji, kayıplar ve kayıplardan sonra geri kazanılan net enerji miktarının yanı sıra geri kazanılan enerji miktarının ortaya çıkan fren enerjisine ve aracın tükettiği toplam enerjiye olan oranları paylaşılmıştır.

Enerji geri kazanım miktarları ve toplam fren enerjisine oranları güzergâhtan güzergâha farklı olmaktadır. Bu durum frenleme sayısı ve karakteristiklerinin yani yavaşlama ivmelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. KERS ile en yüksek ve verimli şekilde enerji kazanımı beklenildiği gibi dur kalkın çok olduğu şehir içi güzergâhı olan CYC_OCC'de gerçekleşmiştir.

Elde edilen dikkat çekici sonuçlardan biri de geri kazanımı sağlanan enerjinin yol boyunca tüketilen enerjiye olan orandır. Sürüş durumunun daha sabit olduğu şehir dışı yollarda aracın, KERS vasıtasıyla geri kazanılan enerji miktarı aracın yol boyunca ihtiyaç duyduğu enerjiye kıyasla çok az bir miktardır. Bunun aksine şehir içi kullanımda ise geri kazanım enerjisi aracın toplam tükettiği enerjinin dörtte birine tekabül etmektedir. Yani şehir içi sürüşü temsil eden CYC_OCC güzergâhı için geri kazanımı sağlanmış enerji aracın menziline azımsanamayacak şekilde bir artış sağlarken, şehirlerarası yol güzergâhında KERS kullanımının aracın menziline olan etkisi çok

düşük bir seviyede kalmaktadır. Bu güzergâh için yukarıda bahsedilen kabullerden bir veya birkaçının enerji kazanımını olumsuz etkileyecek şekilde değişmesi durumunda enerji kazanımı sağlanamayacaktır. Ayrıca KERS aracın ağırlığında bir artışa neden olmaktadır. Elektrikli araçların ağırlaşması ise menzilin kısalmasına neden olmaktadır. Bunun yanında KERS bakım maliyetleri de göz önüne alındığında %2,48 gibi bir geri kazanım oranının sistemin maliyetlerini karşılamak açısından yeterli olduğu söylenemez.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Kinetik enerji geri kazanım sistemleri elektrikli araçlarda kullanımı açısından değerlendirilmiş olup örnek mesafeler için enerji kazanım miktarlarının simülasyonu yapılmıştır. KERS ile kazanılan enerjinin elektrikli araçlarda hâlihazırda bulunan bataryalarda depolanması, enerjinin uzun süre saklanabilmesi açısından önemlidir. Ancak yüksek miktarlarda enerjinin geri kazanılabilmesi için mekanik bir KERS ile enerjinin tutulup bataryalara gönderilmesi yüksek geri kazanım oranları sunmaktadır. Yapılan güzergâh simülasyonlarında görüldüğü üzere sıkça dur-kalk yapılan şehir içi trafiğinde KERS ile enerji kazanımı uzun süre sabit hızla gidilen şehirlerarası yollara göre daha etkili olmaktadır. KERS ile şehir içi yollarda %25 gibi bir oranda enerji kazanımı sağlanırken şehirlerarası yollarda %5'in altında kalmaktadır. KERS kullanılması durumunda sistemin ağırlığı ve bakım maliyetleri de dikkate

Tablo 3. Her bir güzergâh için elde edilen sonuçlar (Results gathered for each route)

Parametre ve Birimi	CYC OCC	CYC US06 HWY	CYC VAIL2NREL
Toplam enerji tüketimi (kJ)	6004	6726	45073
Fren enerjisi (kJ)	2418.50	670.85	2113.50
Kaybedilen enerji (kJ)	726.40	187.66	961.8
Geri kazanılan net fren enerjisi (kJ)	1483	483.19	1119.5
Enerji geri kazanım oranı	%61.30	%72	%53
Geri kazanılan enerjinin toplam enerjiye oranı	%24.70	%7.10	%2.48

alındığında şehirlerarası yollarda verimli bir enerji tasarrufundan söz edilememektedir. KERS frenleme sayı ve süresinin yüksek olduğu şehir içi trafğinde enerji kazanımı sağladığı ve bunun elektrikli araçların menzili artırma da etkili olduğu yapılan simülasyonda görülmüştür.

Semboller

v	Aracın hızı
c_d	Hava sürtünme katsayısı
A_f	Aracın ön cephe alanı
ρ_{hava}	Havanın yoğunluğu
m	Araç kütlesi
g	Yerçekimi ivmesi
r_w	Yuvarlanma sürtünme katsayısı
α	Eğim açısı
m'	Dönen parçaların ataletinin dahil olduğu kütle
a	İvme
P_{fk}	Frenleme sırasında kazanılamayan enerji
P_{adk}	Aerodinamik kayıplar
P_{sk}	Sürtünme kayıpları
P_{ek}	Elektrik motorundaki enerji kayıpları
P_{mk}	Mekanik enerji kayıpları
P_{bk}	Bataryadaki enerji kayıpları
W_{KERS}	KERS işi

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C.-H. Cheng and J.-X. Ye, "GA-based neural network for energy recovery system of the electric motorcycle," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 4, pp. 3034–3039, 2011.
- [2] C. C. Chan, *Modern Electric Vehicle Technology*. Oxford University Press, 2001.
- [3] P. Cazzorla, M. Gerner, J. Teter, and W. Yi, "Global EV Outlook 2016, Beyond one million electric cars," Paris, France, 2016.
- [4] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*. 2003.
- [5] J. Cibulka, "Kinetic Energy Recovery system by means of Flywheel Energy storage device," *Adv. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 27–38, 2009.
- [6] R. Kapoor and C. M. Parveen, "Comparative study on various KERS," in *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2013, vol. 3, pp. 3–5.
- [7] J. M. W. Whiting, "A regenerative braking system for d . c . railway traction," p. 100710, 1979.
- [8] L. Pugi, M. Pagliai, A. Nocentini, G. Lutzemberger, and A. Pretto, "Design of a hydraulic servo-actuation fed by a regenerative braking," *Appl. Energy*, vol. 187, pp. 96–115, 2017.
- [9] Y. Chen, L. Zhou, X. Ning, and C. Zhao, "Design of Hybrid Electric Bus on Regenerative Braking System," vol. 301, pp. 333–337, 2013.
- [10] J. Walsh, T. Muneer, and A. N. Celik, "Design and analysis of kinetic energy recovery system for automobiles : Case study for commuters in Edinburgh," pp. 1–12, 2013.
- [11] G. Yanan, "Research on Electric Vehicle Regenerative Braking System and Energy Recovery," *Int. J. Hybrid Inf. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 81–90, 2016.
- [12] F. Wicks and K. Donnelly, "Modeling regenerative braking and storage for vehicles," in *Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97., Proceedings of the 32nd Intersociety*, 1997, vol. 3, pp. 2030–2035.
- [13] Y.-P. Yang, J.-J. Liu, and T.-H. Hu, "An energy management system for a directly-driven electric scooter," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 621–629, 2011.
- [14] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, 2008.
- [15] L. Hua, Z. Jian, X. Da, and M. Xiaojun, "Design for hybrid electric drive system of armored vehicle with two energy storage devices," in *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on*, 2009, pp. 1–5.
- [16] K. Inoue, K. Ogata, and T. Kato, "Efficient power regeneration and drive of an induction motor by means of optimal torque derived by the variational method," *Electr. Eng. Japan*, vol. 173, no. 1, pp. 41–50, 2010.
- [17] J. Van Mierlo, P. den Bossche, and G. Maggetto, "Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators," *J. Power Sources*, vol. 128, no. 1, pp. 76–89, 2004.
- [18] A. Boretti, "Comparison of fuel economies of high efficiency diesel and hydrogen engines powering a compact car with a flywheel based kinetic energy recovery systems," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 16, pp. 8417–8424, 2010.
- [19] UNECE, "UN Vehicle Regulations - 1958 Agreement," 1992. [Online]. Available: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs1-20.html>. [Accessed: 06-Jun-2017].
- [20] A. Brooker, K. Haraldsson, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, T. Markel, M. O'Keefe, S. Sprik, K. Wipke, and M. Zolot, "National Renewable Energy Laboratory: ADVISOR Advanced Vehicle Simulator Documentation," 2013. .