

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN LİTYUM-İYON BATARYALAR İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ

Murat CEYLAN

mceylan@gyte.edu.tr

Türev SARIKURT

turev@gyte.edu.tr

Abdulkadir BALIKÇI

a.balikci@gyte.edu.tr

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Lityum-İyon temelli bataryalar yüksek enerji yoğunlukları ve uzun çevrim ömürleriyle özellikle elektrikli araçlarda diğer batarya tiplerine nazaran yoğunlukla tercih edilen batarya çeşitleridir. Araçlarda kullanımda bataryaların parametrelerinin sağlıklı olarak görüntülenmesi, batarya durum parametreleri olarak tanımlanan şarj durumu ve sağlık durumu gibi büyüklüklerin isabetli olarak belirlenebilmesi önemlidir. Bu nedenle bataryaların modellenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada hibrid bir batarya modeli oluşturulmuş laboratuvar ortamında yapılan ölçümlerle modelin tutarlılığı gösterilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Elektrikli araçlar, Lityum-İyon bataryalar, Batarya modelleme

1.GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfusa bağlı olarak tüketilen enerji miktarı artarken, fosil yakıt rezervlerinin miktarı azalmaktadır. Özellikle fosil yakıt kullanılan araçlar için alternatif kaynaklara yönelmek kaçınılmazdır. Bunun yanında içten yanmalı motor kullanan taşıtların karbondioksit salınım miktarının fazla olması ve bu konuda getirilmeye çalışılan yasal kısıtlamalar nedeniyle elektrik tahrikli araçların kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir. Bu konuda da enerji depolanması amacıyla bataryalar ilgi görmektedir. Hem yenilenebilir enerji sistemlerinde hem de elektrikli taşıtlarda yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle lityum-iyon polimer tip batarya hücrelerinin kullanımı artmaktadır. Batarya sistemlerinde çalışmaların en önemli bölümlerinden birisi bataryaların tutarlı bir şekilde modellenebilmesidir. Sağlıklı bir batarya modeli sistem parametrelerinin tespiti ve incelenmesinde ayrıca batarya durum parametreleri olarak da adlandırılan bataryaların şarj ve sağlık durumlarının kestiriminde kolaylık ve isabet sağlayacaktır. Bataryaları modellemek oldukça karmaşık ve zordur. Bunun nedeni bataryaların deşarj olurken sergiledikleri doğrusal olmayan davranıştır. 19. Yüzyılın sonunda kurşun-asit bataryalar tanıtılmış Peukert kanununa göre bataryadan ne kadar yüksek akım çekilirse bataryanın enerjisinin tükenme oranı daha fazla azalmaktadır. Bu kanun oransal kapasite etkisi olarak da adlandırılmaktadır [1, 2].

Bir batarya modeli tasarlanırken ve tasarlanmış bir modelin diğer modellerle karşılaştırılması için kullanılan ölçütler şunlardır [3]:

- **İsabet:** Model yoluyla belirlenen verilerin deney sonuçlarıyla uyumluluğu
- **Hesaplama karmaşıklığı:** Modelde kullanılan işlemlerin uzunluğu, benzetim süresi.
- **Kurulum için harcanan çaba:** Modelin gerektirdiği parametre sayısı ve başka bilim dallarından beklediği katkı.
- **Analitik içyapı:** Modeli tanımlayan eşitliklerin kullanılabilirliği, ömür süresi ve performans kestiriminde fayda sağlayabilmesi.

Bu çalışmada hem elektriksel eşdeğer devre, hem de analitik model bileşenleri içeren hibrid bir model tasarlanmış ve benzetimleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen modelin benzetim sonuçları laboratuvarda Kokam KD07-RE12-02 model batarya ile yapılan deneylerle karşılaştırılmış ve geliştirilmiş modelin tutarlılığı gösterilmiştir.

2. BATARYA MODELLERİ

Literatürdeki çalışmalarda batarya modelleri ağırlıklı dört başlık altında toplanmaktadır. Bunlar fiziksel (elektrokimyasal), istatistiksel, analitik ve elektriksel eşdeğer devre modelleridir [2-4]. Bunların dışında istatistiksel modellemeye benzeyen fakat istatistiksel olarak elde edilen sayısal verilerin doğrudan ilenmesi yerine olasılıksal metotlarla kullanılması şeklinde tanıtılmış olasılıksal-stokastik modelleme yöntemi de ayrı bir başlık altında gösterilmektedir [4].

2.1. Fiziksel (Elektrokimyasal) batarya modelleri

Fiziksel modeller bataryaların iç kimyasal işlemlerini temel almaktadır. Bu modellerde bataryanın içindeki bu işlemler detaylıca verilmektedir. Bu modeller en hassas batarya modelleri olmakla birlikte detaylı olduğu için çok karmaşık ve yapılandırması oldukça zordur. [5]'de lityum iyon hücreler için elektrokimyasal bir model geliştirilmiştir. Bu model altı çift doğrusal olmayan diferansiyel denklem içermektedir. Bu denklemlerin çözümü zamana bağlı gerilim ve akımın fonksiyonunu vermektedir ve elektrolit ve elektrot fazlarındaki potansiyelleri, elektrolit içindeki tuz yoğunluğunu, reaksiyon oranı ve akım yoğunluğunu zaman ve konuma bağlı fonksiyonlar olarak vermektedir. Dualfoil adındaki bir Fortran programı bu modeli kullanarak lityum bataryayı simule etmektedir[6]. Program kullanıcının verdiği yük profiline bağlı olarak bataryanın tüm

özelliklerinin zamana bağlı nasıl değiştiğini vermektedir. Ayrıca yük profili ile birlikte kullanıcı modelleyeceği bataryanın elektrot kalınlığı, elektrolitin mevcut tuz yoğunluğu ve sıcaklık kapasitesi gibi 50'nin üzerinde parametreyi de belirlemesi gerekmektedir. Diğer yandan programın isabeti oldukça yüksektir. Bu nedenle program sıklıkla, deneysel sonuçlar yerine, diğer modeller ile karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır [4, 7]. Bu modellerin avantajları çok isabetli ve gürbüz olmalarıdır. Dezavantajları ise batarya hakkında detaylı bilgiler gerektirdiği için yapılandırılmasının zorluğu ve çok sayıdaki diferansiyel denklemlerin çözümünü gerektirdiği için hesapların uzun zaman almasıdır.

2.2. İstatistiksel ve olasılıksal batarya modelleri

İstatistiksel modellerde model oluşturulurken kullanılacak parametreleri temel fiziksel veriler ve kanunlardan türetmek yerine veri örnek setlerinden anlamlı yapılar çıkarmak temeline dayanır [8]. Bu modeller kompakt ve hızlıdır ancak fiziksel modeller kadar isabetli değildir.

Olasılıksal modelleme de İstatistiksel modellemeye benzer bir şekilde veri yorumlama temellidir. Bu yöntemde bataryanın davranışları özel bir fiziksel işlem değil parametreleri istatistiksel sonuçlara dayanan olasılıksal bir işlem olarak tanımlanır [9]. Bu modeller istatistiksel modellere göre daha isabetlidir ancak yöntemin temeli ileri benzetim tekniklerine dayanır ve karmaşıktır.

2.3. Elektriksel eşdeğer devre batarya modelleri

Bataryaları eşdeğer devreler olarak modellemek oldukça başarılı sonuçlar verir. Bu tip modellerde model üzerinden matematiksel hesaplamalar yapma imkânı bulunmaktadır. Bu nedenle şarj-deşarj veya empedans eğrileri için eşdeğer devreler modellenmiş ve analiz edilmiştir. Eşdeğer devre modelleri elektrik araçlarında parametre kestirimi yapmak için kullanılmıştır [10-12]. Bu metotlarda genelde istatistiksel veriler kullanılarak parametreler basit bir devrenin değişkenleri olarak sisteme oturtulur. Bu konuda yaygın olarak kullanılan iki yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda bataryanın iç direnci gibi direnç olarak modellenmiş bazı parametreler empedans spektrometresi kullanılarak belirlenir [13], diğesinde ise farklı bir modelleme yapıp bu parametreler Ohm kanunu kullanılarak çekilir [14]. Bataryaların iç direncini etkileyen en önemli faktörün sıcaklık olduğu göz önünde bulundurularak iç direnci sıcaklığa ait bir fonksiyon olarak tanımlayan bir batarya modeli de açıklanmıştır [11]. Ayrıca bataryaların nasıl ısındığı modellenmiş, soğutulduğu zaman nasıl davranacağını benzetimleri yapılmıştır [10]. . Bu metotla elde edilecek olan model modüller olarak

farklı sistem bileşenleri ile birlikte benzetimi yapılabilir. Modelin isabetli olması için elde edilen şemanın detaylı olması gerekmektedir. Bu da modelin karmaşılaşmasına neden olur. Bu durumda sayısal çözüm için bir devre analizi yazılımına ihtiyaç duyulur.

2.4. Analitik batarya modelleri

Eğer sistemi batarya performansından faydalanarak optimize etmek istersek devre benzetimlerini iteratif bir optimizasyon sistemiyle birlikte kullanmamız gerekir. Bu tip benzetimler zaman alır ve anlık-online cevap veremez. Bu durumun önüne geçmek için analitik eşdeğer batarya modelleri kullanılır. Bu tip modellemede fiziksel ve istatistiksel yaklaşımlar bir araya getirilmiştir. Yapı oldukça basitleştirilmiş bir fiziksel batarya modelinde daha az sayıda parametrenin deney sonuçlarıyla elde edilmesine dayanır. Başka bir deyişle sistemin matematiksel formu fiziksel eşitsizliklerden elde edilirken parametreler “kara kutu” deneyleri sonucunda elde edilir [15]. Basitleştirilmiş fiziksel yapıdan dolayı göreceli olarak isabetli ve gürbüz, parametrelerin istatistiksel olarak belirlenmesinden dolayı hızlı ve kompakttır.

[16]'de ise iki analitik model sunulmuştur. Bunlardan birisi yayılma (diffusion) temelli bir modeldir. Diğeri ise ayrı bir başlık altında da tanıtılabilecek ilk olarak [17]'de ortaya atılmış olan Kinetik Batarya Modelidir. Bu model batarya parametrelerini belirlemektense doğrudan kalan şarjı belirlemek üzerine kurulmuştur. Batarya Hazır Şarj Kuyusu (Available Charge Well) ve Sınır Şarj Kuyusu (Bound Charge Well) olarak iki kuyu şeklinde modellenmiştir. Buna göre sistemde yük varsa Hazır Şarj Kuyusu boşalmakta yük devreden çıkarıldığında Sınır Şarj Kuyusu, Hazır Şarj kuyusunu doldurmaktadır. Böylece Kurtarma etkisi (recovery effect) de modellenmiş olmaktadır [17, 18]. Kurtarma etkisideşarj işlemi durdurulan bir bataryanın enerji seviyesinin kendiliğinden bir miktar artmasıdır [2].

Bu çalışmada bir elektriksel eşdeğer devre batarya modeli tasarlanmış, modelde ihtiyaç duyulan açık devre gerilimi V_{OC} değeri bataryanın şarj durumundan da faydalanılarak matematiksel bir fonksiyon olarak belirlenmiştir. Bu nedenle model hibrid batarya modeli olarak adlandırılmaktadır.

3. ÖNERİLEN MODEL

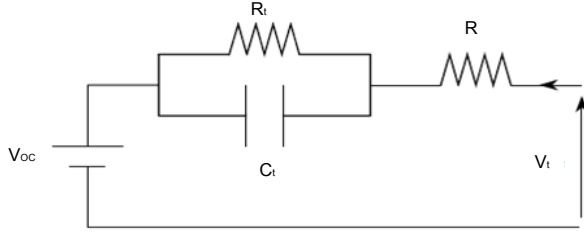
Önerilen model açık devre gerilimi V_{OC} 'den faydalanarak terminal gerilimi V_t 'nin belirlenmesine dayanmaktadır. V_{OC} bataryanın herhangi bir yüke bağlı olmadığı durumdaki gerilimi, V_t ise bataryanın terminallerinden ölçülen gerilimi tanımlanmaktadır. Önerilen modelde V_{OC} bataryanın şarj durumu (state of charge), SoC'ye bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır. SoC bataryada kullanılabilecek durumdaki yük miktarının (Q) bataryadaki maksimum

sayıdaki yük miktarına (C) oranı şeklinde tanımlanmaktadır [19].

$$SoC = \frac{Q}{C} \%100 = \frac{C - Q_d}{C} \%100 \quad (1)$$

SoC (1)'de verilen formülüyle belirlenebilir. Burada Q_d kullanılan yük miktarını göstermektedir.

Simülasyon programlarında kullanabilmek üzere seçilmesi düşünülen ilk model bataryanın elektrokimyasal iç yapısını tek bir iç direnç ile gösteren basit doğrusal devre modelidir. Fakat yapılan literatür çalışmasında doğrusal modelin geçici rejim durumlarında iyi sonuç vermediği görüldüğü için, daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek amacıyla [20]'de tanıtilan, iç dirence seri bağlı R, C yapısı eklenerek oluşturan Thevenin modeli benimsenmiştir. Kullanılan eşdeğer devre şeması Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1: Benzetimde kullanılan eşdeğer devre.

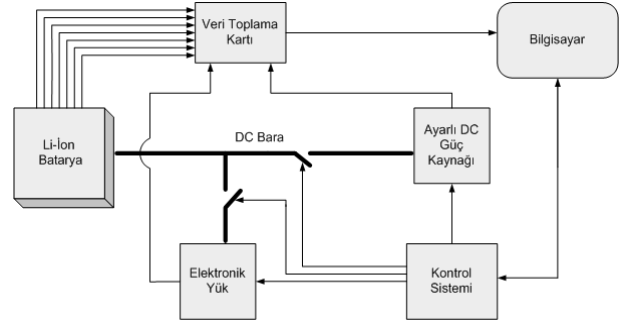
3.1. Deney düzeneği

Bu çalışmada Kokam KD07-RE12-02 modelinde bir Lityum Polimer batarya kullanılmıştır. Kullanılan bataryanın parametreleri Tablo 1'de görülmektedir [21].

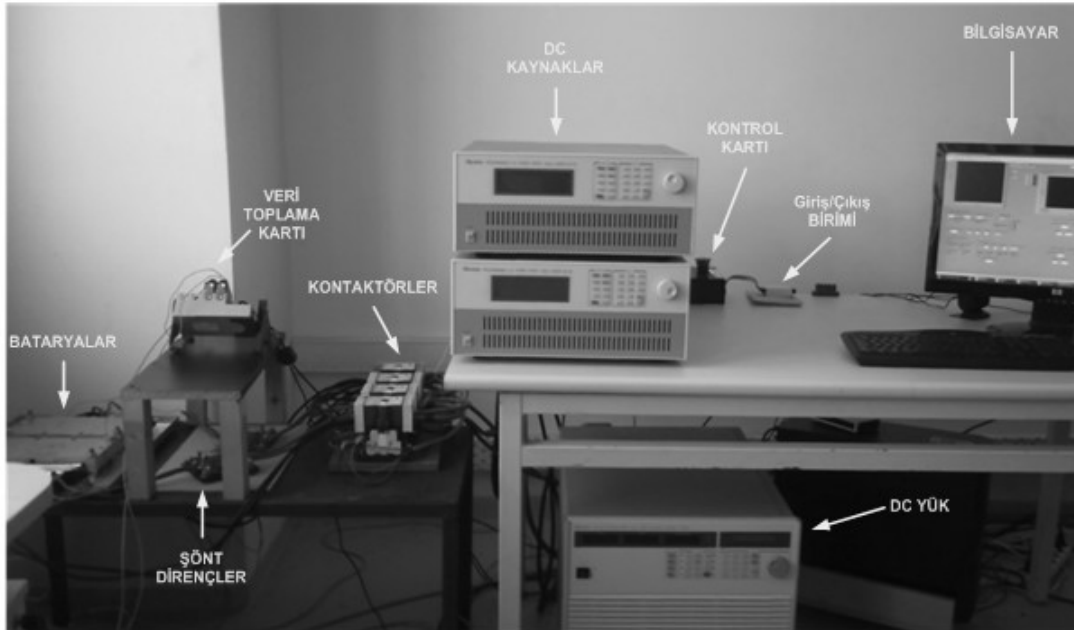
Tablo 1: Deneyde kullanılan bataryanın parametreleri.

Parametre	Değer
Kapasite	11 Ah
Anma Gerilimi	3.7 V
Şarj üst sınır gerilimi	4.2 V
Deşarj alt sınır gerilimi	2.7 V
En yüksek sürekli şarj akımı	33 A
En yüksek sürekli deşarj akımı	88 A
Başlangıçtaki empedans(iç direnç)	1.6 mOhm
Ömür	1400 çevrim

Seçtiğimiz eşdeğer batarya modelinin oluşturulabilmesi için parametrelerin belirlenmesi amacıyla ilk önce batarya sabit akım-sabit voltaj yöntemiyle tam olarak şarj edilmiş, daha sonra DC yük içeren test-ölçüm sistemi kullanılarak sabit anma akımı (11 A) altında deşarj yapılmıştır. Test-ölçüm sisteminin blok diyagramı Şekil 2'de, kurulan deney düzeneği ise Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 2: Deney düzeneğinin blok şeması



Şekil 3. Kurulan deney düzeneği

Yükün devreye ilk girdiği anda oluşan anlık gerilim düşümü Ri iç direncinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle Ri iç direnci yükün devreye girdiği anda oluşan gerilim düşümünün akıma oranıyla (2) eşitliğindeki gibi bulunabilir.

$$Ri = \frac{V_0 - V_1}{I} \quad (2)$$

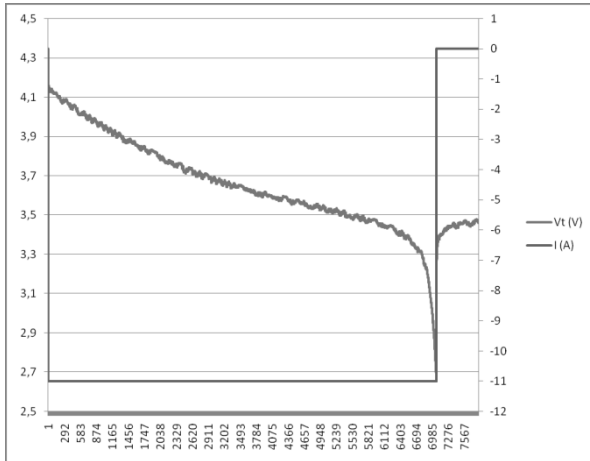
Burada V_0 , t_0 anındaki pil tamamen dolu durumdayken ölçülen terminal gerilimini, V_1 , t_1 anındaki, yük devreye girdikten hemen sonra yani gerilim düşümü gerçekleştiği ilk anda ölçülen gerilim, I ise çekilen sabit deşarj akımıdır. Bu değerin belirlenmesi için deneysel olarak elde edilen deşarj grafiğinden yararlanılabilmektedir.

R_t ve C_t değerleri ise batarya dengeye ulaşınca kadar geçen süre göz önünde tutularak belirlenen bir zaman sabiti yardımıyla bulunabilir. Yük devreden çıktıktan sonra bataryanın dengeye ulaştığı sürecin modellenmesi ile R_t ve C_t değerleri, dolayısıyla elektrot ve elektrolit arasında oluşan difüzyon süreci ve yük transferi de modele eklenmiş olmaktadır. τ zaman sabitinden faydalanarak R_t ve C_t şu eşitlikler kullanılarak elde edilebilir.

$$\tau = R_t C_t, \quad (3)$$

$$R_t = \frac{V_{OC} - V_t'}{I} \quad (4)$$

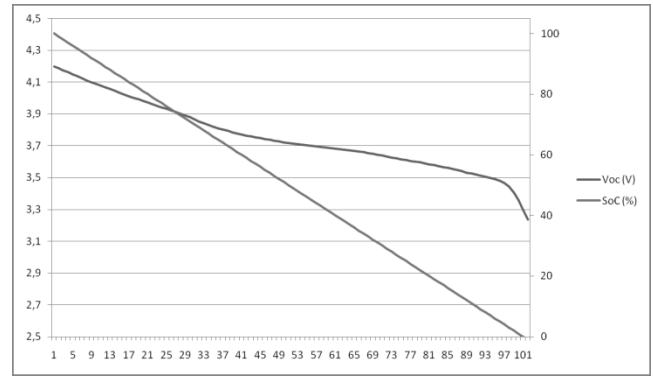
Burada V_t' deşarj işlemi bittikten sonra, kurtarma etkisi başlamadan önceki terminal gerilimidir. V_{OC} ise kurtarma etkisi geçip sistem dengeye ulaştığı andaki açık devre gerilimidir [22].



Şekil 4 Bataryaya ait deşarj grafiği

Şekil 4'ten, (2), (3) ve (4) eşitliklerinden faydalanarak parametreler şöyle elde edilmiştir: $R = 0.0033 \Omega$, $R_t = 0.015 \Omega$ ve $C_t = 555 F$ olarak belirlenmiştir.

Li-Ion bataryalarda $SoC-V_{OC}$ bağıntısı doğrusal değildir. Bu bağıntıyı belirlemek için zaman kontrollü deşarj testi gerçekleştirilmiştir. Batarya ilk önce sabit akım-sabit voltaj yöntemiyle tamamen şarj edilmiştir. Daha sonra %1 kapasite kullanımına karşılık gelen 36 saniye boyunca sabit anma akımı (11A) değerinde darbe uygulanmış, ardından batarya gerilimi dengeye ulaşınca kadar beklenilerek V_{OC} değeri ölçülüp kaydedilmiş ve bu işlem batarya tamamen deşarj olana kadar aynı sıra takip edilerek tekrar edilmiştir. Buradan elde edilen ölçüm verileri üzerinde eğri uydurma algoritması kullanılarak V_{OC} tek değişkenli bir üstel fonksiyon şeklinde oluşturulmuştur. Şekil 5'te $SoC - V_{OC}$ 'nin bu süreçteki değişimlerini gösteren grafik görülmektedir.



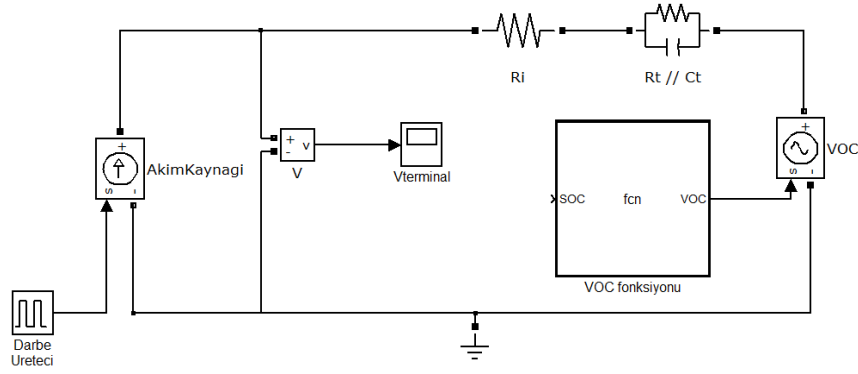
Şekil 5 Voc-SoC grafiği

Bu şekilde elde edilen V_{OC} formülü ise şöyledir:

$$V_{OC}(SoC) = -1.035e^{(-35SoC)} + 0.315SoC^3 - 0.075SoC^2 + 0.495SoC + 3.575 \quad (4)$$

3.2. Benzetim

Son aşama olarak oluşturulan eşdeğer modelin gerçek bataryadan elde edilen sonuçlarla ne kadar örtüştüğünü belirlemek için Simulink ortamında benzetim gerçekleştirilmiştir(4) eşitliği kullanılarak azalan şarj durumuna bağlı V_{OC} değerleri elde edilmiş ve böylece modeldeki bağımlı kaynağın kontrol edilmesi sağlanmıştır. Simulink ortamında hazırlanan model Şekil 6'da gösterilmiştir.



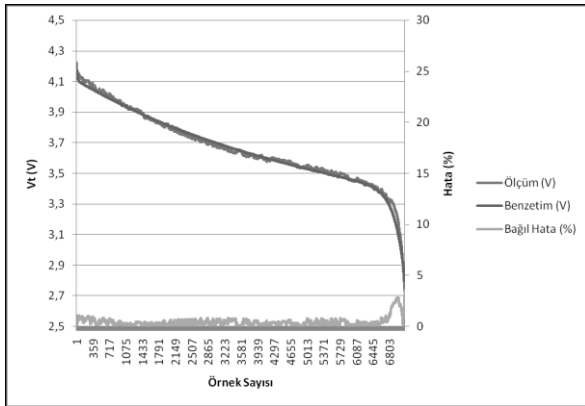
Şekil 6 Benzetim için kurulan sistem

4. SONUÇLAR

Elektrikli araçlar geleceğin ulaşım araçları olarak görülmektedirler ancak bataryalardan kaynaklı bazı kısıtlamalar bu alandaki teknolojik gelişimin hızını yavaşlatmaktadır.

Elektrikli araç çalışmalarında benzetim çok önemli olduğu gibi benzetimlerde kullanılmak üzere bataryaların isabetli olarak modellenmesi de oldukça önemlidir.

Bu çalışmada literatürde var olan batarya modelleri incelenmiş, elektrikli bir araçta kullanılmak üzere elektriksel ve analitik modeller kullanılarak hibrit bir batarya modeli geliştirilmiştir. Bu modelin Matlab/Simulink programı yardımıyla benzetimi yapılmıştır. Eş zamanlı olarak gerçek bataryalarla da bir grup deney yapılmış, benzetim çıktıları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 7’de karşılaştırma sonuçları görülmektedir.



Şekil 7. Benzetim çıktıları ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Benzetim çıktıları ve deney sonuçları birbirleriyle tamamen örtüşmüştür. Ortalama hata %0.422 seviyesinde kalırken görülen maksimum hata % 3’tür. Çalışmanın sonucunda oldukça başarılı bir model tamamlanmış olmaktadır.

Gelecek çalışmalarda yaşlanmanın ve sıcaklığın etkileri de modele parametrik olarak eklenebilmesi için çalışılacaktır.

5. TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma TÜBİTAK 110E209 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- [1] D. Doerffel and S. A. Sharkh, "A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 155, pp. 395-400, 2006.
- [2] M. Jongerden and B. Haverkort, "Battery modeling," 2008.
- [3] R. Rao, S. Vrudhula, and D. N. Rakhmatov, "Battery modeling for energy aware system design," *Computer*, vol. 36, pp. 77-87, 2003.
- [4] D. Rakhmatov, "Battery voltage modeling for portable systems," *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES)*, vol. 14, p. 29, 2009.
- [5] M. Doyle, T. F. Fuller, and J. Newman, "Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 140, pp. 1526-1533, 1993.
- [6] J. Newman, "FORTRAN programs for simulation of electrochemical systems," *Dualfoil. f Program for Lithium Battery Simulation*, 1999.
- [7] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D. A. Wallach, "A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer," *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 1019-1030, 2003.
- [8] C. Krintz, Y. Wen, and R. Wolski, "Application-level prediction of battery dissipation," in *Low Power Electronics and Design, 2004. ISLPED'04. Proceedings of the 2004 International Symposium on*, 2004, pp. 224-229.
- [9] V. Rao, G. Singhal, A. Kumar, and N. Navet, "Battery model for embedded systems," in *VLSI Design, 2005. 18th International Conference on*, 2005, pp. 105-110.
- [10] C. Mi, B. Li, D. Buck, and N. Ota, "Advanced electro-thermal modeling of lithium-ion battery system for hybrid electric vehicle applications," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*, 2007, pp. 107-111.
- [11] C. Sen and N. C. Kar, "Battery pack modeling for the analysis of battery management system of a hybrid electric vehicle,"

- in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE*, 2009, pp. 207-212.
- [12] M. W. Verbrugge and R. S. Conell, "Electrochemical and thermal characterization of battery modules commensurate with electric vehicle integration," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 149, pp. A45-A53, 2002.
- [13] S. Chen, K. Tseng, and S. Choi, "Modeling of lithium-ion battery for energy storage system simulation," in *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, 2009, pp. 1-4.
- [14] M. Dubarry and B. Y. Liaw, "Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 174, pp. 856-860, 2007.
- [15] P. Rong and M. Pedram, "An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries," *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 441-451, 2006.
- [16] M. R. Jongerden and B. R. Haverkort, "Which battery model to use?," *Software, IET*, vol. 3, pp. 445-457, 2009.
- [17] J. F. Manwell and J. G. McGowan, "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems," *Solar Energy*, vol. 50, pp. 399-405, 1993.
- [18] J. Manwell and J. McGowan, "Extension of the kinetic battery model for wind/hybrid power systems," in *Proceedings of EWE*, 1994, pp. 284-289.
- [19] W. Waag, S. Kabitz, and D. U. Sauer, "State of Charge/Health," in *Encyclopedia of electrochemical power sources*, J. Garche, Ed., ed: Elsevier, 2009.
- [20] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance," *Energy conversion, IEEE transactions on*, vol. 21, pp. 504-511, 2006.
- [21] "KOKAM Co. Ltd. SLPB (Superior Lithium Polymer Battery) Technical Specification, SLPB55205130H," ed, 2009.
- [22] H. Miyamoto, M. Morimoto, and K. Morita, "On-line SOC Estimation of Battery for Wireless Tram Car," in *Power Electronics and Drive Systems, 2007. PEDS'07. 7th International Conference on*, 2007, pp. 1624-1627.