

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PİL HÜCRESİNİN ELEKTRİKSEL VE TERMAL MODELİ

Gürsel ŞEFKAT*^{ID}
Mert Ali ÖZEL*^{ID}

Alınma: 18.03.2019; düzeltme: 09.12.2019; kabul: 17.02.2020

Öz: Elektrikli araç sayılarının hızla arttığı günümüzde yapılan bilimsel çalışmalar da, aynı oranda bir ivme kazanmıştır. Elektrikli araç teknolojisinin yaygınlaşması için en kritik alt sistemlerden biri olan batarya paketinin doğru analiz edilmesi, sürüş performansından menzile kadar kullanıcıyı doğrudan ilgilendiren önemli performans ölçütlerine etki etmektedir. Çalışma kapsamında, elektrikli aracın batarya paketinde kullanılacak lityum iyon pil hücresinin 1. dereceden elektriksel ve termal matematik modelleri MATLAB&SIMULINK programında oluşturulmuştur. Simülasyon çıktıları, pil hücresi üzerinde yapılan deşarj (boşaltma) testleri sonucunda elde edilen değerler sonucunda yaklaşık %0.4 hata ile doğrulanmıştır. Pilin termal modeli ise ANSYS programında yapılan termal analizler ve termal kamera ile yapılan ölçümlerle yaklaşık %2 hata değeri ile doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda doğrulanmış pil hücresinin matematik modeli, elektrikli araç modellerine kolayca uyarlanarak teorik simülasyonların ve operasyonel koşullar altında çalışacak algoritmalara uyarlanmasına olanak sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Lityum-İyon batarya, Matematiksel Modelleme

Electrical and Thermal Modelling of Electric Vehicle's Battery Package

Summary: Nowadays, the number of electric vehicles has increased rapidly, and scientific studies have gained momentum at the same rate. Accurate analysis of the battery pack, which is one of the most critical subsystems for the electric vehicle technology, affects vital performance criteria that directly concern the user from driving performance to the range. Within the scope of this study, first degree electrical and thermal mathematical models of the lithium-ion battery cell to be used in the battery pack of the electric vehicle were created in MATLAB & SIMULINK program. The simulation outputs were verified with an approximately 0.4% error as a result of the discharge tests performed on the battery cell. The thermal model of the battery was confirmed by the thermal analysis performed in the ANSYS program, and the measurements performed with the thermal imager with a 2% error value. As a result, the mathematical model of the verified battery cell can be easily adapted to electric vehicle models, allowing theoretical simulations and algorithms to operate under operational conditions.

Keywords: Lithium-Ion Battery, Mathematical Modelling

1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründe, zararlı gaz salınımı olmadan ulaşımı sağlayacak araçların geliştirilmesi günümüz ve geleceğin en çok uğraş verdiği konuların başında gelmektedir. Bu anlamda ön plana çıkan elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

*Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, TR-16059, Bursa, TÜRKİYE
İletişim yazarı: Mert Ali ÖZEL (mertaliozel@uludag.edu.tr)

Elektrikli aracın geliştirilmesinde en önemli alt sistem olan bataryanın doğru bir şekilde analiz edilip kurgulanması, aracın performansı açısından bir hayli önem arz etmektedir. Bu sebeple, pil hücresinin matematiksel modelleri tasarım aşamasında aracın performansı, ömrü vb. kritik bilgileri sunması nedeniyle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Pil hücrelerine ait matematiksel model, çalışma koşullarında batarya yönetim sistemi ile işbirliği halinde çalışması, bataryaların ömrü açısından oldukça önem arz etmektedir. (Hu ve ark., 2011)

Yüksek özgül enerjileri, uzun ömürleri ve kendi kendine düşük deşarj oranı gibi özelliklere sahip lityum-iyon bataryalar, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum-iyon pilleri bu tarz teknolojilerde uygun bir şekilde kullanılabilmesi adına düzgün tanımlanmış modeller kullanılmalıdır. Doğru lityum-iyon pil modeli, yalnızca şarj durumunun (SOC) ve sağlık durumunun (SOH) tahminin yapılması, aracın gerçek testlerindeki sonuçlarına yaklaşmasını arttırmaktadır. Lityum-iyon batarya modellemesi, tasarım öncesi analizde çok önemli bir rol oynamaktadır. Doğruluğunu geliştirmek, lityum-iyon pil modellerinin kararlılığı ve hızlılığı, çoğu araştırmacı tarafından halen daha çalışılmakta olan bir konudur. (Muratori, 2009)

İncelenen tez çalışmasında (Sayın, 2011), lityum-iyon bataryanın modellenmesi ve özellikle batarya yönetim sistemi ve özel olarak da dengeleme sistemi tasarım değerlerinin oluşturulması sağlanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle var olan farklı elektrikli araç iç mimarileri ve alt sistemleri için incelemeler yapılmıştır. Bu alt sistemler arasında en önemlisi ve modellenmesi en zor olan bataryaların, karakteristikleri ile ilgili bilgileri içermektedir. Lityum-iyon bataryayı denetleyecek sistemin dinamik davranışının belirlenebilmesi için gerekli olan matematiksel model oluşturulmuştur. Bu model kullanılarak benzetimler yapılmış, elde edilen çıktılar ile batarya hücresi dengeleme stratejisi geliştirilmiştir.

Literatürde, çok sayıda lityum iyon pillerinin yaşlanmasına bağlı model bulunmaktadır. Ancak, genel olarak bu çalışmalar genelde tek ölçekli modellere odaklanmıştır. Bu durumda, pillerin mühendislik uygulamalarında gerçek verilerle olan hata paylarına neden olmaktadır. Araştırmacı bu çalışmasına malzemenin paket seviyesine kadar pil hücrelerini çok ölçekli olarak inceleyerek bu sorun üzerinde çalışmıştır. Oluşturulan her ölçek sonucunda, ana yaşlanma modeli sürekli olarak gerçek verilerle tartışmaya sunulmuştur. Çalışmanın sonunda, her bir ölçeğe ait çıktılar tablolar halinde sunularak tartışılmaya olanak sağlanmıştır. (Sayın ve Yüksel, 2011)

Çalışma kapsamında eşdeğer devre modeli üzerinde durulacak olup, gerçek lityum iyon pil verilerine ulaşılma adına; akım yoğunluğu, sıcaklık, pilin yaşlanması gibi önemli parametrelerin etkisi göz önüne alınarak, MATLAB (Matlab&Simulink, 2019) yazılımında model geliştirilecektir. Geliştirilen matematiksel modelin doğrulanmasında üretici firmanın paylaşmış olduğu pil karakteristikleri ile karşılaştırılacak aynı zamanda pil numunesi üzerinde yapılan akım yoğunluğu test sonuçlarıyla model çıktıları mukayese edilecektir. Sıcaklık dağılımlarının doğruluğu ve termal yönetim sistemi modelinin doğrulanması için ANSYS (Ansys, 2019) yazılımı ve termal kamera ile yapılan test sonuçları kullanılacaktır.

Çalışma sonucunda doğrulanmış pil hücresinin matematiksel modeli, elektrikli araç modellerine kolayca uyarlanarak teorik simülasyonlara uyarlanabilmesi sağlanmıştır. Bunun yanında, araç üzerinde doğrudan çalışacak gerçek zamanlı algoritmalara uyarlanmasına olanak sağlamaktadır.

2. LİTYUM İYON PİL HÜCRESİNİN ELEKTRİKSEL MODELİ

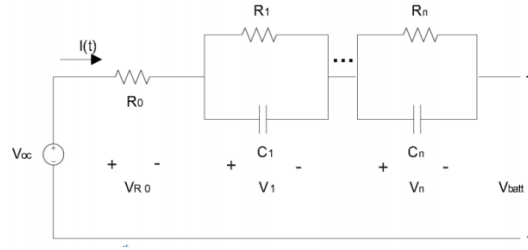
“Fenomenolojik” kelimesi, bir sistemin girdi-çıkışı ilişkisinin sisteme ait temel fiziksel/kimyasal denklemlerine ihtiyaç duyulmadan modellenmesi olarak tanımlanabilir.

Fenomenolojik modeller, düşük dereceli dinamik modellerdir. Lityum iyon pilin davranışını, kimyasal denklemleri kullanmaya gerek kalmadan, gerçek modelle benzer sonuçlar vermesi hedeflenmektedir. Fenomenolojik modellerin örneklerinden biri eşdeğer devre modelleridir.

Eşdeğer devre modeli basit bir yapıya sahiptir. Bu durum çözüm hızının arttırmakta ve cevap süresinin önemli olduğu otomotiv uygulamalarına kolayca adapte edilebilmektedir. Modelin gerçeğe yaklaşması için matematiksel modele sıcaklık ve yaşlanma gibi faktörlerinde eklenmesi gerekmektedir. Pilin davranışının, bu değişken parametreler altında incelemek önem teşkil etmektedir. (Tremblay ve ark., 2007)

Birinci dereceden eşdeğer devre modelinde, sıcaklık ve yaşlanmanın etkisinde SOC değerinin hesabı mümkündür. Birinci dereceden model, kullanılarak karmaşıklıktan uzak bir modelleme geliştirilebilmektedir. (Zhang ve Chow, 2010)

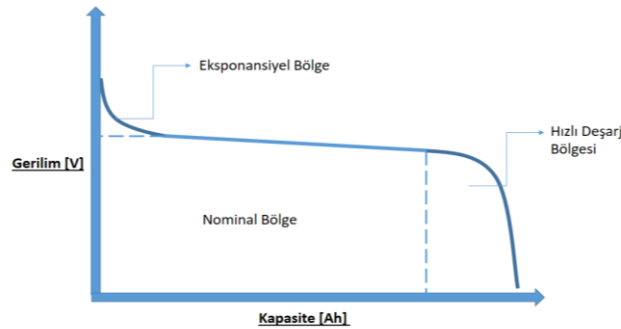
Şekil 1, elektrik eşdeğer devresini göstermektedir. Basit birinci dereceden model bataryanın, gerilim-akım ilişkisini kolayca hesaplayabilmektedir. Bunun yanında, daha yüksek dereceden modeller daha yakın sonuç vermesinin yanında, model karmaşıklığının ve çözüm süresinin artması nedeniyle tercih edilmemiştir. (Tremblay ve ark., 2007) Burada, V_{OC} ; açık devre gerilimini, R_n ; dahili direnci, R_0 iç direnci, V_{R0} iç direnç üzerinde oluşan gerilim düşümü ve C_n ise kapasitansı temsil etmektedir.



Şekil 1:

n. Dereceden bataryanın eşdeğer devre modeli (Muratori, 2009)

Pil hücresi modeli oluşturulurken, Şekil 2’de görülen lityum pile ait bir deşarj eğrisi referans alınarak, modelleme; eksponansiyel ve nominal bölge için oluşturulmuştur. Bunun sebebi, özellikle otomotiv uygulamaları için batarya ömrünün arttırabilmek için hızlı deşarj bölgesini kullanmadan bataryanın şarj edilmesi gerektiğidir. Böylece, model daha basit yapıya sahip olarak çözüm süresi düşürülebilmekte ve bu da otomotiv sektörüne uygulanabilirliğini sağlamaktadır.



Şekil 2:

Bir lityum iyon pile ait kapasite-gerilim eğrisi üzerindeki eksponansiyel ve nominal bölge.

$$V_{bat} = E_0 - K.SOC_{deşarj}^{-1}.it + A. \exp(-B.it) - C.it - R.I \quad (1)$$

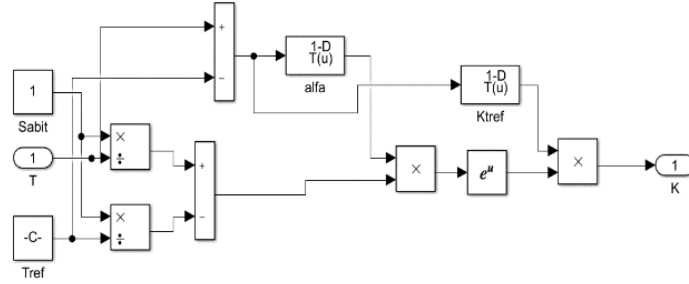
$$V_{bat} = E_0 - K.SOC_{şarj}^{-1}.it + A. \exp(-B.it) - C.it - R.I \quad (2)$$

Denklem 1 ve Denklem 2, bir pil hücresine ait gerilim değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Burada hücre gerilimi V_{bat} ; sıcaklık T , çevrim süresi N ve I akıma bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. (Tremblay ve ark., 2007)

- Bataryanın sabit gerilimi E_0 , V biriminde tanımlanmaktadır. Sabit gerilim değeri, sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ara değerler, enterpolasyon ile hesaplanacak ve testler ile doğrulanması sağlanacaktır.
- Polarizasyon sabiti K, birimi V/Ah olarak tanımlanmaktadır ve polarizasyon kayıplarını temsil etmektedir.

$$K(T) = K_{Tref} e^{\alpha(T^{-1}-T_{ref}^{-1})} \quad (3)$$

Burada, α sıcaklığa bağlı Arhenius sabiti, T_{ref} referans sıcaklık değeri olan 25°C olmaktadır. Şekil 3'de oluşturulan Simulink model görülmektedir.



Şekil 3:
Polarizasyon sabitinin Simulink Modeli.

- Eksponansiyel Kapasite B, birimi Ah⁻¹ olarak tanımlanmaktadır ve kapasite-gerilim eğrisi, başlangıcındaki eksponansiyel düşüşün kapasitesini temsil etmektedir. Değeri hesaplamak için, Denklem 4 kullanılabilir.

$$B = \frac{\beta(T)}{Q_{eksp(T,N)}} \quad (4)$$

Burada, Q_{eksp} değeri, referans eğrinin (Şekil 2) başlangıcında meydana gelen eksponansiyel düşüşün bittiği andaki kapasite değeri, β ise sıcaklığa bağlı Arhenius sabitidir. Eksponansiyel gerilim değeri Q_{eksp} , sıcaklığa ve çevrim süresine (N) bağlıdır. Bu değerler, yapılan testler sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar yardımıyla hesaplanmıştır.

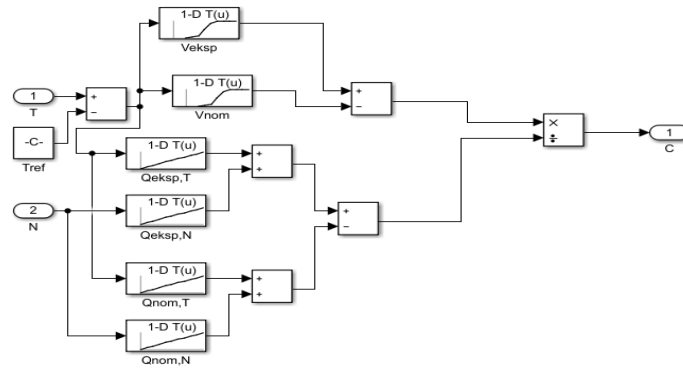
- Ekspansiyonel gerilim A, birimi V olarak tanımlanmaktadır ve kapasite-gerilim eğrisindeki, başlangıçtaki ekspansiyonel düşüşün gerilim değerini temsil etmektedir. Değerin hesaplanması için Denklem 5 kullanılabilir.

$$A = V_{\text{şarj}}(T) - V_{\text{eksp}}(T) \quad (5)$$

Burada $V_{\text{şarj}}$, tam dolu batarya gerilimini, V_{eksp} ise referans eğrinin (Şekil 2) başlangıcında meydana gelen ekspansiyonel düşüşün bittiği andaki gerilim değeridir. Bu değerler, yapılan testler sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar yardımıyla hesaplanmıştır.

- Eğim sabiti C, birimi V/Ah olarak tanımlanmakta ve deşarj anındaki lineer düşüşün modellenmesini sağlamaktadır. Burada, ekspansiyonel kapasite ve nominal kapasite değerleri sıcaklık ve çevrim sayısına bağlıyken, ekspansiyonel gerilim ve nominal gerilim değerleri ise sıcaklık faktörüne bağlıdır.

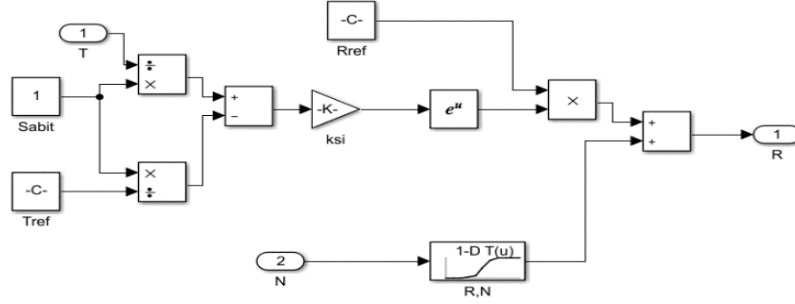
$$C = \frac{V_{\text{eksp}}(T) - V_{\text{nom}}(T)}{Q_{\text{eksp}}(T,N) - Q_{\text{nom}}(T,N)} \quad (6)$$



Şekil 4:
Eğim Sabiti Simulink Modeli

İç direnç R, ohm biriminde tanımlanmaktadır. Sıcaklık ve yaşlanma faktörüyle değişkenlik gösteren direnç değerinin hesaplanmasında, sıcaklık ile olan değişiminin modellenmesinde matematiksel yaklaşım, yaşlanmaya bağlı değişim ise yapılan testler ve üretici firmanın paylaşmış olduğu değerler kullanılarak eğri şeklinde oluşturulmuştur.

$$R(T, N) = R_{T_{ref}} e^{\alpha(T^{-1} - T_{ref}^{-1})} + R(N) \quad (7)$$



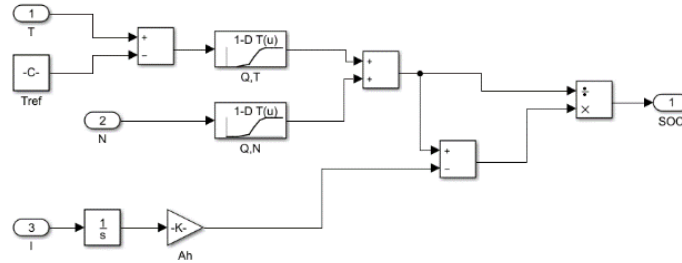
Şekil 5:
Bataryanın iç direncine ait Simulink modeli

Batarya karakteristiğini ve dinamik modeli en iyi tanımlayan, SOC deşarj modelinin oluşturulmasında, Denklem 8 kullanılacaktır.

$$SOC_{deşarj} = \frac{Q(T,N) - it}{Q(T,N)} \quad (8)$$

Burada $Q(T,N)$, bataryanın sıcaklığa ve çevrim sayısına bağlı kapasite değeridir. it ise, bataryanın deşarj anında kapasite değeri olup bu değerin hesaplanmasında akımın I , zamana bağlı entegralini temsil eden Denklem 9 kullanılmaktadır.

$$it = \int I dt \quad [Ah] \quad (9)$$



Şekil 6:
Bataryanın Deşarj Şarj Durumu Simulink Modeli

Şarj anı için SOC hesabında, Denklem 10 kullanılmaktadır.

$$SOC_{şarj} = \frac{0.1Q(T,N) + |it|}{Q(T,N)} \quad (10)$$

3. PİL HÜCRESİNİN TERMAL MODELİ

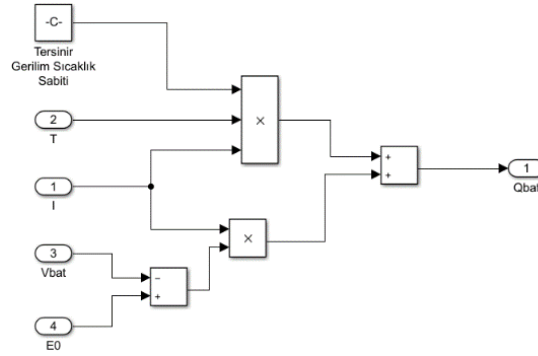
Çalışmanın bu kısmında, pil hücresinin termal modeli oluşturularak pilin sıcaklık değerleri hesaplanacaktır. Katot ile anot arasında oluşan tepkime sonucunda ortaya çıkan ısıyı modellemek için Denklem 11 kullanılacaktır. Bu matematik eşitliğinden de görüleceği üzere,

pilin akım ve gerilim değerine bağlı olarak üretilen ısı değeriyle, entropi değişiminden kaynaklı ısı değerinin toplamı, pilin toplam ısı değerini vermektedir.

$$Q_{bat} = I(E_0 - V_{bat}) + \frac{\partial E}{\partial T} IT \quad (11)$$

Burada, E_0 değeri açık devre voltajı, T pilin sıcaklığı, $\frac{\partial E}{\partial T}$ ise tersinir gerilim-sıcaklık sabitini temsil etmektedir.

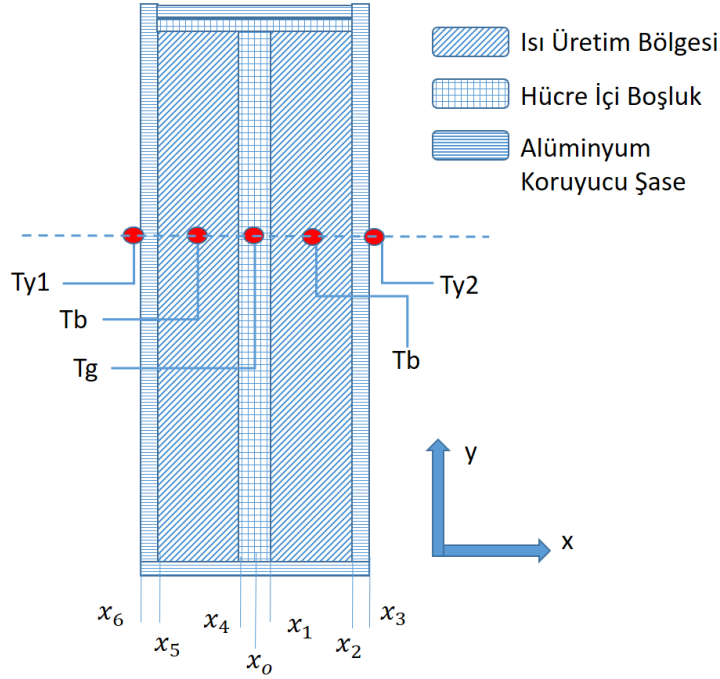
Denklem 12 yardımıyla, pil hücresi tarafından üretilen ısı değeri hesaplanabilmektedir. Bu ısı değeri, termal yönetim sistemi ve ısı kaçaklardan kaynaklı dışarıya atılan ısı değerinin çıkartılmasıyla, pil hücresinin soğutma veya ısıtma etkisi altındaki sıcaklık değeri hesaplanabilmektedir.



Şekil 7:
Bataryanın Ürettiği Isının Simulink Modeli

Bu kısımda, pil ile termal yönetim modeli arasındaki ilişkinin tanımlanacağı model için, pil yüzeyinin sahip olduğu sıcaklık değerinin hesabı yapılacaktır. Şekil 8’de görüleceği üzere, pilin ısı üretim bölgesindeki sıcaklık değeri alüminyum koruyucu kılıfından iletilerek, yüzey sıcaklığını oluşturmaktadır. Bu yüzey sıcaklığı, doğrudan termal yönetime sistemine temas ettirilecektir.

Şekil 8’de ısı üretim bölgelerindeki sıcaklık doğrudan batarya sıcaklığını vermekte ve bataryanın bu sıcaklığının kılıflara iletilmesinin ardından oluşan yüzey sıcaklığının hesabı için bu model oluşturulacaktır.



Şekil 8:
Pil İç Sıcaklık Dağılımının Referans Alındığı Pil Hücresi Kesiti

Burada, pilin sadece x yönündeki ısı transferi incelenecektir ve T_{y2} noktasından termal yönetim sistemine, T_{y1} noktasında ise batarya paketi içerisindeki termal sınırın olmadığı alüminyum parçaya bağlandığı noktayı temsil etmektedir. (Kılıç ve Yiğit, 2010)

$$T(x) = \begin{cases} Q_b = kA_{pil} \frac{(T_b - T_{y2})}{\Delta X}, & x_2 < x < x_3 \\ Q_b = hA_{pil}(T_b - T_g), & x_0 < x < x_1 \end{cases} \quad (12)$$

Denklemler 12’de, batarya iç boşluğu sıcaklığı T_g ile bataryanın termal yönetim sisteminin akışkan olduğu tarafa bağlandığı nokta T_{y2} arasındaki ısı iletim denklemi yazılmıştır. Burada h taşınım katsayısı [W/m^2K], A_{pil} [m^2] ısı transferindeki yüzey alanıdır.

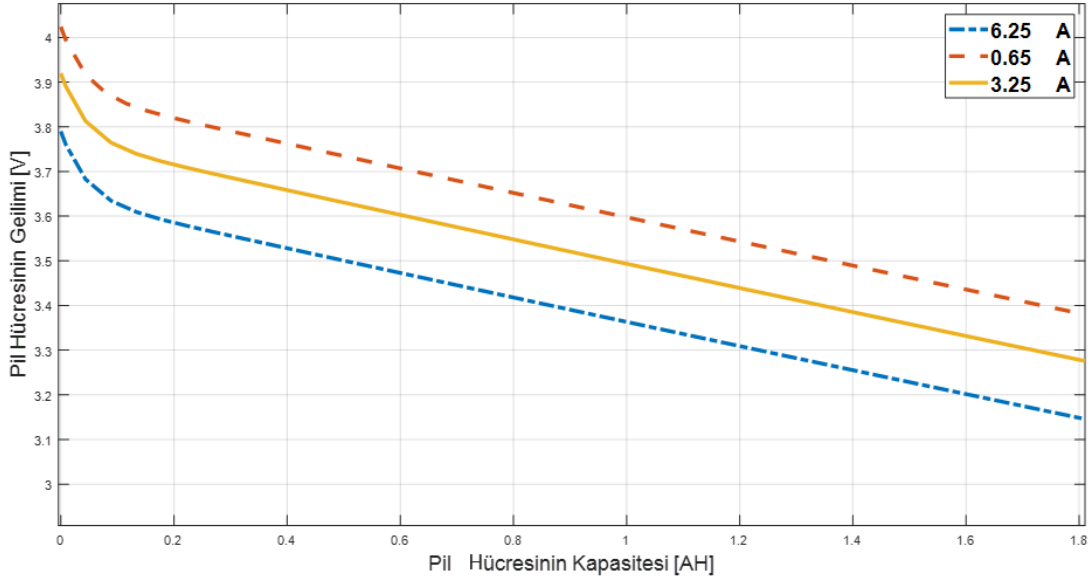
$$T(x) = \begin{cases} Q_b = kA_{pil} \frac{(T_b - T_{y1})}{\Delta X}, & x_5 < x < x_6 \\ Q_b = hA_{pil}(T_b - T_g), & x_0 < x < x_4 \end{cases} \quad (13)$$

Denklemler 13’de ise, batarya iç boşluğu sıcaklığı T_g ile pil hücresinin batarya paketi içerisindeki termal yönetim sisteminin akışkan olmayan kısma bağlandığı nokta T_{y1} arasındaki ısı iletim denklemi yazılmıştır.

4. SİMÜLASYON ÇIKTILARI

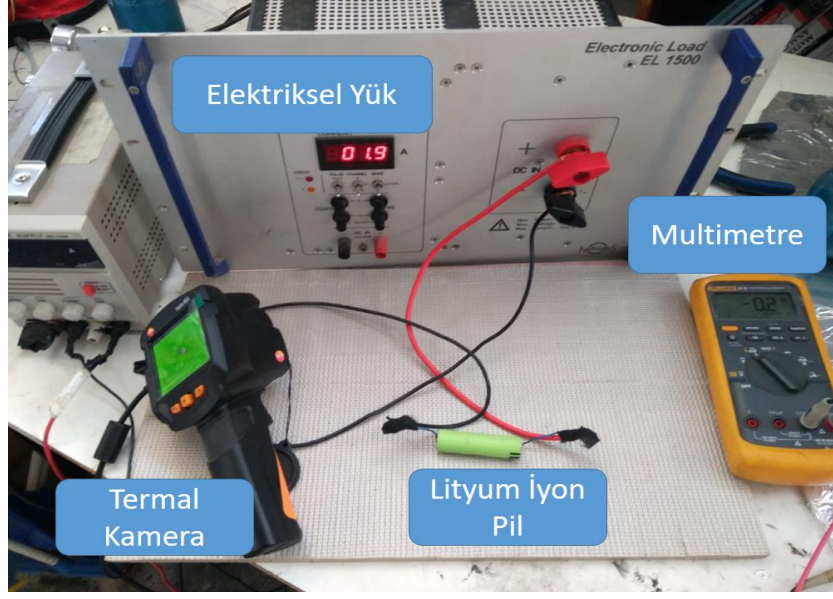
Bu alt başlık içerisinde, modeli oluşturulan Panasonic NCR18650B lityum iyon pilinin simülasyon çıktıları yapılan testlerin ve analizlerin çıktılarıyla karşılaştırılarak doğrulanması yapılacaktır.

Deşarj anındaki kapasite gerilim grafiği için ilk olarak sıcaklık değeri 25°C de sabit tutulacaktır. Deşarj akım değerleri, üretici firmanın katalog değerleriyle karşılaştırmak için sırasıyla 650mA, 3250mA ve 6500mA değerlerinde pilin boşaltılması sağlanacaktır. Şekil 9’da görüldüğü gibi, farklı deşarj akım değerlerine sahip akım girdilerine karşı pil hücrelerine ait kapasite-gerilim grafiği verilmiştir.



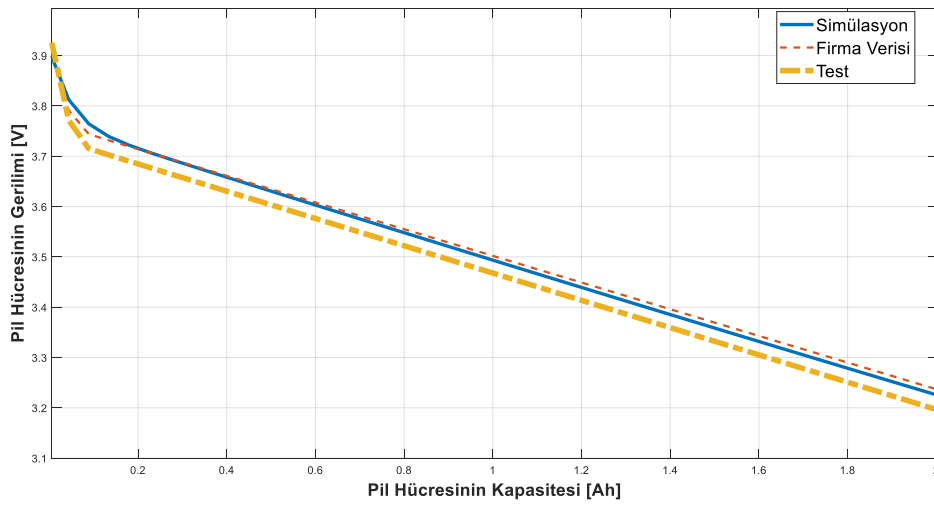
Şekil 9:
Farklı deşarj akım değerleri altında, pil hücrelerinin kapasite-gerilim eğrisi

Şekil 10’da görülen test düzeneği içerisinde, test edilecek Panasonic NCR18650B pil hücresi, sıcaklığı sabit tutmak için peltier eleman üzerine konumlandırılmıştır. Pil hücrelerinin sıcaklığının kontrolü için, Arduino işlemci karta bağlı sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Pil hücrelerinin deşarj anının testi için ise elektriksel yük kullanılacaktır. Şarj ve deşarj anında, akım ve gerilim değerleri güç kaynağı ve elektriksel yük üzerinden okunabilir olup, değerlerin doğrulanması adına test düzeneğine, pens ampermetre ve multimetre de eklenmiştir.



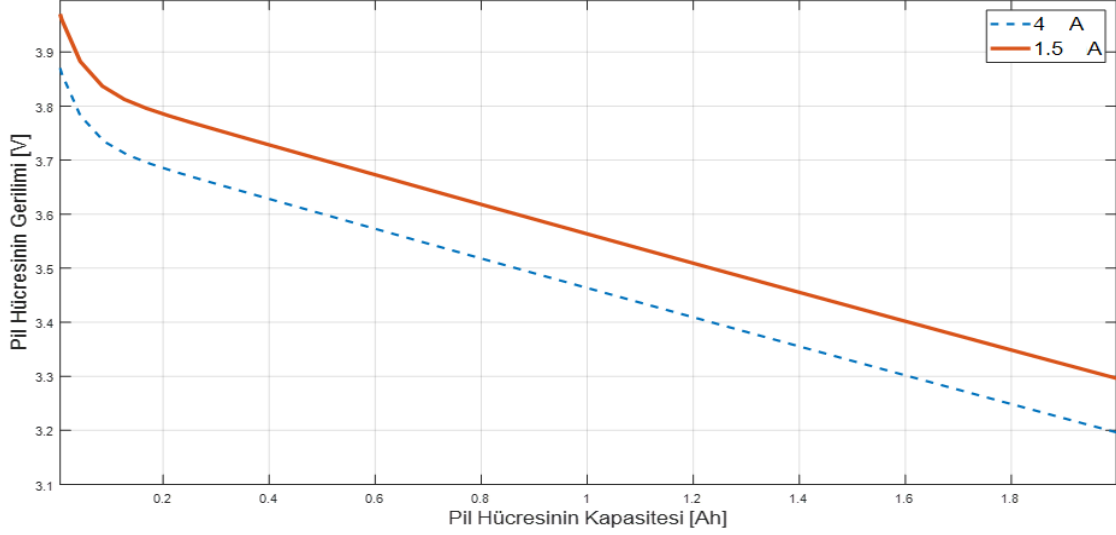
Şekil 10:
Panasonic pil hücresi üzerindeki çalışma için oluşturulan test düzeneği

Panasonic NCR18650B pil hücresi üzerinde yapılan test sonucunda oluşturulan sonuçların, hem simülasyon verileriyle hem de firma verileriyle karşılaştırılması için Şekil 11 oluşturulmuştur. İlk olarak test düzeneğinde, deşarj akım değeri üretici firmanın da verdiği eğrilerde bulunan 3250 mA seçilerek, yapılan testin üretici firma verileriyle kıyaslanarak doğruluğu (%0.4 hata ile) görülebilecektir. Kapasite hesabı, test süresince yapılan zaman ölçümüne bağlı olarak hesaplanmıştır. Zaman ölçümü, simülasyon süresine göre senkronize edilmiş ve simülasyon çıktısının firma verisine yakın olması sebebiyle ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğu görülmüştür.



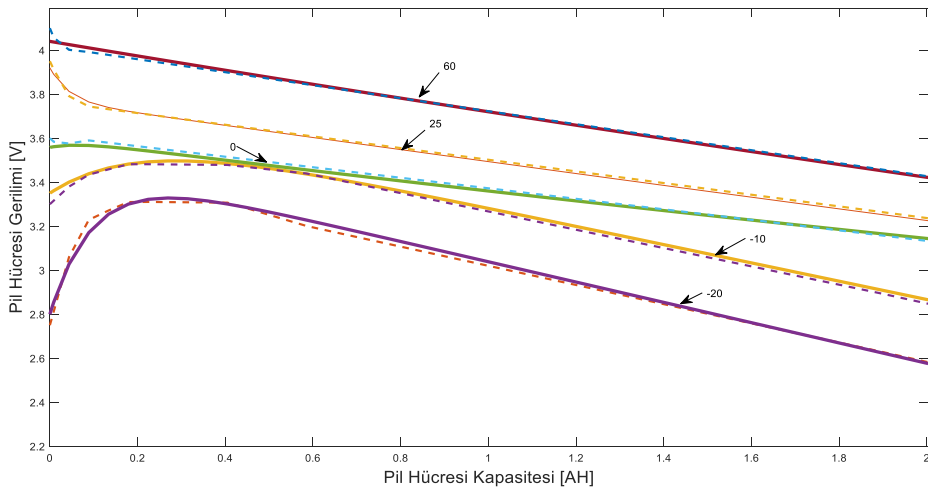
Şekil 11:
3250 mA deşarj akımı altında test verilerinin, üretici firma ve simülasyon değerleriyle karşılaştırılması (Panasonic,2019)

Şekil 11’de çizilen eğri, test sonuçlarının simülasyon ve üretici firma değerleriyle yakın olduğunu göstermektedir. Test sonucunun yakın sonuçlar vermesiyle, üretici firma değerlerinde bulunmayan 1500 mA ve 4000 mA değerlerine ait simülasyon sonuçlarının çıktılarını paylaşmıştır. (Şekil 12)



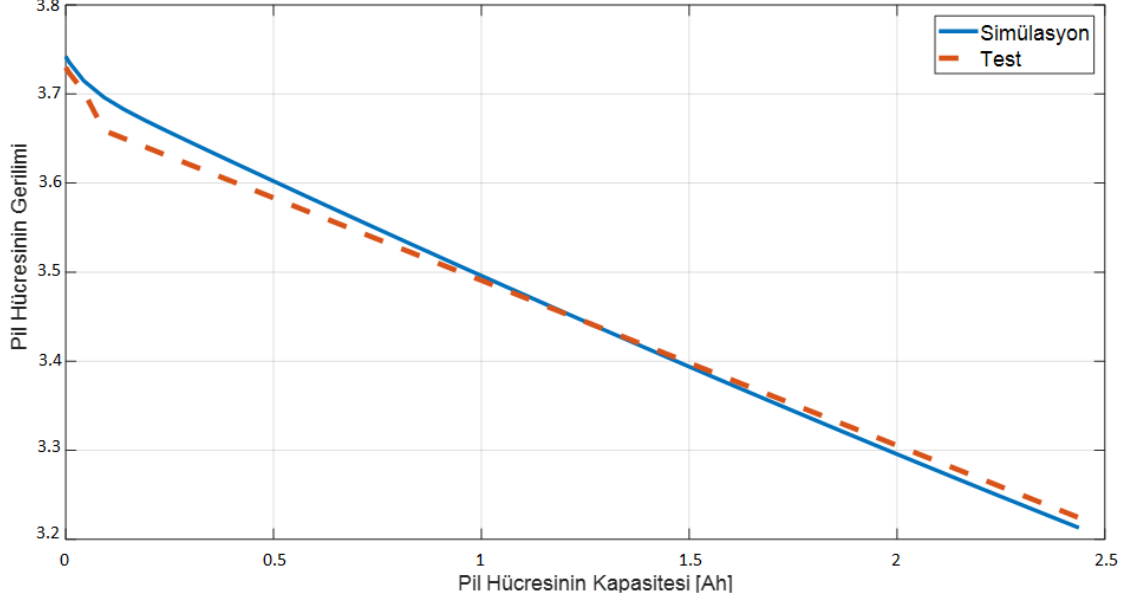
Şekil 12:
1500mA ve 4000 mA deşarj akımı altında simülasyon sonuçları

Testlerde hataya zorlayan değerler, ölçüm aletlerinden kaynaklı ölçüm hataları ve deşarj anında pilin ısınmasından kaynaklı olarak sıcaklık değerinin 25°C de sabit kalmamasıdır. Akım değişimine bağlı, modelin doğruluğu yapıldıktan sonra bu sefer sıcaklık değerleri değiştirilecek ve deşarj akım değeri sabit tutulacaktır. 3250 mA deşarj akımı altında -10°C, 0°C, 10°C, 25°C, 45°C ve 60°C sıcaklıklarındaki simülasyon sonuçları üretici firma değerleriyle karşılaştırılacaktır. (Şekil 13)



Şekil 13:
Farklı sıcaklık değerlerinde simülasyon sonuçlarının üretici firma değerleriyle kıyaslanması
(Panasonic, 2019)

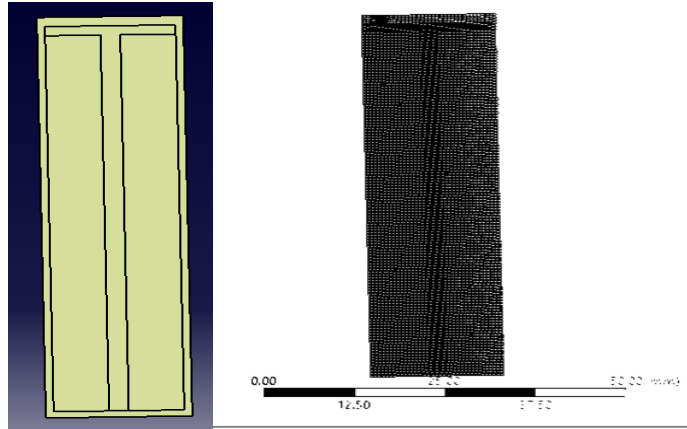
Deşarj akımı değiştirilerek yapılan testlerde olduğu gibi, test düzeneğinde 15°C için yapılan testler, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. (Şekil 14)



Şekil 14:

15°C sıcaklık değerinde simülasyon sonuçlarının test değerleriyle kıyaslanması

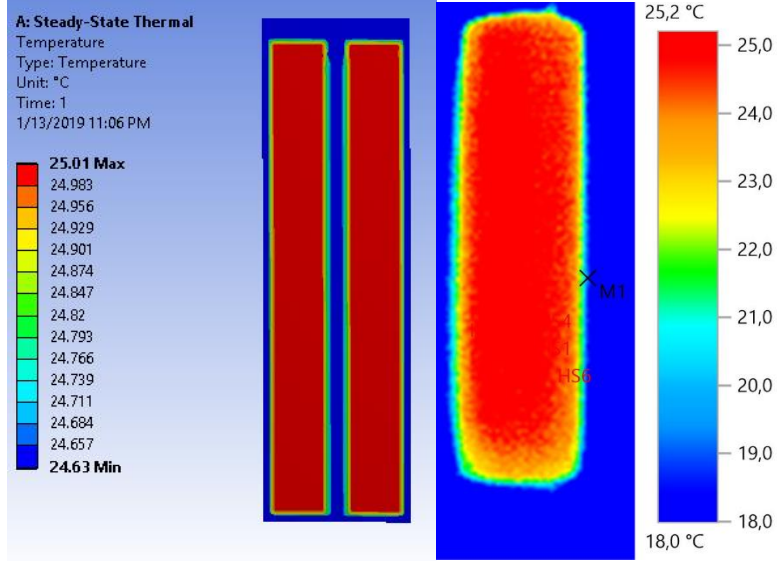
Bataryanın iç sıcaklık dağılımı ANSYS programında analizi yapılarak, oluşturulan modelin doğruluğu incelenecektir. Şekil 15’de bataryanın kesit modeli ve ağ yapısı görülmektedir. Pil hücresi, 18°C ortam sıcaklığında 1 A deşarj akımı altında sonlu elemanlar analizi ve testi yapılmıştır.



Şekil 15:

Pil hücresinin kesitinin modeli ve ağ yapısı

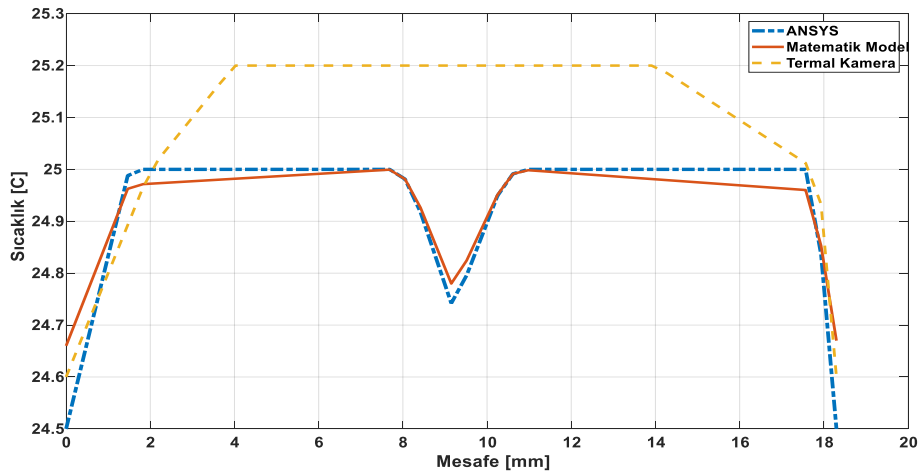
Şekil 16’da görüldüğü gibi sınır şartları, Simulink modelle aynı olacak şekilde analizi yapılarak belirtilen kesitteki sıcaklık değerleri Simulink değerleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 16 yardımıyla, pil hücrelerine ait ısı bölgeleri ve bu ısının pil yüzeyine dağılımı açıkça görülmektedir.



Şekil 16:

Pil hücrelerinin iç sıcaklık dağılımının sonlu elemanlar analizi ve termal kamera sonucu

Şekil 8’de gösterilen kesit üzerindeki sıcaklık dağılımının, simülasyon sonucuyla karşılaştırılması adına, Şekil 17’de gösterilen eğri oluşturulmuş ve simülasyon sonuçlarının ANSYS programı çıktısı ve termal kamera sonuçlarına göre yaklaşık %2 hata ile yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir. 9 milimetrelük mesafede, bataryanın iç yapısındaki boşluktan ötürü oluşan sıcaklıktaki azalma, termal kamera ile yapılan teste sadece yüzey sıcaklığı ölçümü yapıldığından açık bir şekilde görülemez.



Şekil 17:

Pil hücrelerinin iç sıcaklık dağılımının analiz ve termal kamera sonucunu simülasyon ile karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, öncelikle Panasonic NCR18650B markalı lityum iyon pilin dinamik ve termal matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu matematiksel model, akım yoğunluğu, sıcaklık ve yaşlanma gibi önemli değişkenlere göre doğru sonuçlar verdiği dördüncü bölümde yapılan test ve analizler sonucunda doğrulanmıştır.

Mevcut pil hücresi eş değer devre modellerine göre, sıcaklık, yaşlanma ve akım yoğunluğu değişimlerine göre daha hassas halde tasarlanması sebebiyle, gerçek sonuçlara yakınlığı daha az bir hatayla (en fazla hatanın gözlemlendiği yerdeki hata değeri yaklaşık %0.4) sağlanmıştır.

Oluşturulan matematiksel modelin avantajı, otomotiv uygulamalarına daha kolay uygulanabilmesi için pil hücresinin eksponasiyel ve nominal bölge için modellenmesidir. Bunun neticesinde, daha sade bir model oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Ansys, (2019). Main Page. Access address: <https://www.ansys.com/> (Accessed in: 06.12.2019)
2. Hu Y., Yurkovich S., Guezennec Y., Yurkovich B.J. (2011) Electro-thermal battery model identification for automotive applications. J. Power Sources. 449-457. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.06.037
3. Kılıç M., Yiğit A., (2010). Isı transferi. Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bursa, Türkiye, 489 s.
4. Matlab&Simulink, (2019). Main Page. Access address: <https://www.mathworks.com/> (Accessed in: 06.12.2019)
5. Matteo Muratori, (2009). Thermal characterization of lithium-ion battery cell. Master's Thesis. Politecnico Di Milano.
6. Panasonic datasheet, (2019). Main Page. Access address: <https://www.shoptronica.com/files/Panasonic-NCR18650.pdf> (Accessed in: 06.12.2019)
7. Sayın, A.A.(2011) Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Bursa, Türkiye.
8. Sayın, A.A., Yüksel, İ. (2011). Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi, Mühendis ve Makine, 52(616):75-82.
9. Tremblay O., Dessaint L.-A., Dekkiche A.-I., (2007) A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference. doi: 10.1109/VPPC.2007.4544139
10. Zhang H., Chow M.-Y., (2010) Comprehensive dynamic battery modeling for phev applications. IEEE Power and Energy Society General Meeting. doi:10.1109/PES.2010.5590108