

## Otomotiv akülerinde problem tespitine yönelik hücresel ölçüm ve hata teşhis sistemi

### Battery cell measurement and fault diagnosis system for detection of problem in automotive batteries

Osman DEMİRCİ<sup>1</sup>, Burcu Acar DEMİRCİ<sup>2\*</sup>, Sezai TAŞKIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İnci GS Yuasa Akü Sanayi ve Ticaret AŞ, Manisa, Türkiye.  
odemirci@inigsyuasa.com

<sup>2,3</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye.  
burcu.acar@cbu.edu.tr, sezai.taskin@cbu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.07.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 10.12.2018

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.98105  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Üretim adetlerindeki artışlar ve bununla birlikte daha yüksek kaliteli ürün talebi, doğrudan insana bağımlı olmayan ve sürekli tekrarlayan işler için otomatik sistem ihtiyacını oluşturmuştur. Bu çalışma binek, hafif ve ağır ticari araçlarda kullanılan aküler için geliştirilen test sonrası hücresel hata tespiti ile ilgilidir. Araçlarda kullanılan aküler genellikle 12 V'luk bir terminal gerilimine sahiptir. Birbirlerine seri bağlı 6 hücreden oluşurlar. Üretim sahasında aynı hat grubunda üretilen akülerin hücreleri arasında dahi üretim süreci parametrelerinden dolayı zaman zaman elektriksel ve mekanik farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Hücreler arasındaki bu farklılıklar; farklı iç dirençlere, kapasite ve çevrim ömrü gibi performans sorunlarına neden olmaktadır. Üstelik bu farklılıklar tahribatlı akü problem analizlerinde de zaman alıcı bir süreci gerektirmektedir. Bu gibi problemleri gidermek amacıyla akünün her bir hücresinin performans durumunu tespit eden bir hücresel ölçüm sistemi gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, aküler EN 50342-1 Akü Elektrik Test Standardına göre test edilmiştir. Geliştirilen sistem için LabVIEW™ programı kullanılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Akü, Veri toplama, EN 50342-1 standart

#### Abstract

Increases in production volumes and higher quality product demands have led to the need of automated systems for continuously recurring tasks that are not directly dependent on people. This study is related to battery cell fault diagnosis system which is developed for passenger cars, light and heavy commercial vehicles. The battery used in vehicles commonly has a terminal voltage of 12 V. The battery consists of 6 cells connected to each other in series. Electrical and mechanical differences can be observed from time to time due to the production process parameters. These differences between cells cause performance problems including different internal resistances, capacity and cycle life. Moreover, these differences also require a time-consuming process in destructive battery problem analysis. So as to overcome such problems, a battery cell measurement and fault diagnosis system are required. In this study, batteries are tested according to the EN 50342-1 Battery Electrical Test Standard. The developed system user interface is designed with the LabVIEW™ program.

**Keywords:** Battery, Data acquisition, EN 50342-1 standard

## 1 Giriş

Otomotiv sanayi, yan sanayisi ile birlikte teknolojisinin hızla geliştiği sanayi kollarından biridir. Otomotiv yan sanayi ürünleri arasında yer alan aküler, üretim ve test süreçleri bakımından zorlu saha koşullarında daha iyi bir performans beklentisi ile sürekli iyileştirme sınıfında yer alan ürün kategorisindedir.

Aküler elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştüren ve ihtiyaç durumunda depoladığı kimyasal enerjiyi tekrar elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Akülerin birçok farklı çeşidi vardır. Bunlardan en bilineni kurşun-asit akülerdir. Kurşun-asit akülerin temeli Carl Wilhelm Siemens ve Wilhelm Josef Sinsteden'in 1852 ve 1854 yıllarındaki çalışmalarına dayanır [1]. Ancak pratikte kullanılabilecek ilk akü 1856 yılında Fransız Fizikçi Gaston Plante tarafından keşfedilmiş ve üretimi hızla yaygınlaşmıştır [2].

Kurşun-asit aküler araçlarda, motosikletlerde, teknelerde ve çeşitli endüstriyel araçlarda ilk çalıştırma, aydınlatma gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Kurşun-asit aküler düşük maliyet, yüksek güç yoğunluğu, düşük ve yüksek sıcaklıklarda yüksek performans, servis ağının geniş ve bakımının kolay olması gibi etkenlerden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar [3].

Aküler; plaka, ayırıcı ve sülfürik asitten oluşmaktadır. Akü hücrelerinde meydana gelen kimyasal reaksiyonların temeli, sülfürik asit yoğunluğu ile ilişkilidir. Akünün bir hücresinin toplam gerilimi, (+) işaretli pozitif elektrot geriliminden (-) işaretli negatif elektrot geriliminin çıkarılması ile elde edilir. Elektrotların cinsine, elektrolit olarak kullanılan maddeye ve kullanılan elektrolit maddenin yoğunluğuna göre gerilim değerleri değişmektedir. Kurşun-asit akü hücresinin açık devre gerilimi;

$$V_t = V_p - V_n \quad (1)$$

olarak kabul edilmektedir. Burada  $V_p$  akü hücrelerine ait pozitif (+) elektrot gerilimi,  $V_n$  ise negatif (-) elektrot gerilimidir. Örneğin  $V_t = 1.74 - (-0.27) \approx 2 \text{ Volt}$  olarak hesaplanır. Araçlarda kullanılan aküler 6 veya 12 V'luk aküler olup 3 veya 6 hücrenin seri bağlanması ile oluşmuşlardır. Akünün hücre gerilimi 1.75 Volt'a düştüğünde ise boşaldığı kabul edilmektedir. Deşarj için sınır gerilim değeri ise çekilen akımın oranına göre değişmektedir [2].

Günümüzde otomotiv sektöründeki gelişmeler yeni nesil akülere ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Söz konusu yeni nesil aküler aracın elektriksel ihtiyaçlarını

karşılayabilecek nitelikte olup çevrim ömürleri uzundur. Özellikle akülere uygulanan elektriksel testler ve saha testleri yeni nesil akü tasarımına referans teşkil etmektedir.

Akülerin mekaniksel veya kimyasal kaynaklı problemlerinin tespiti oldukça zordur. Akü hücrelerinde meydana gelebilecek üretim kaynaklı farklar akü ömrünün beklenenden daha az olmasına neden olabilmektedir. Akülerde meydana gelen elektriksel veya kimyasal problemlerin tespiti için birçok çalışma yapılmıştır. Salamah ve diğ. çalışmalarında akünün kendinden deşarj, depolama kapasitesi, dahili direnç, aşırı gerilim ve çevre sıcaklığının dikkate alındığı bir matematiksel model önermişlerdir. Bu model ile akünün performansı değerlendirilmektedir [4]. Blanke ve diğ. kurşun-asit akülerin uygulamalı analizinde ve teorik modellemesinde empedans ölçümlerini kullanmaktadır [5]. Akünün şarj durumunu, sağlık durumunu ve marş basma gücünü değerlendirmek için empedans ölçüm metodunu kullanmışlardır. Ceraolo, kurşun-asit akülerin şarj ve deşarj durumlarındaki davranışlarını analiz etmek için üçüncü dereceden bir matematiksel model geliştirmiştir. Geliştirilen modelin çeşitli çalışma ortamı koşullarındaki akülerin benzetimi ve akü içeren sistemlerin çevrimiçi yönetimi gibi farklı amaçlarla kullanılabilceği öngörülmüştür [6]. Hua ve diğ. ait çalışmada DSP tabanlı bir şarj ve deşarj izleme sistemi kurulmuştur. Sistemde, farklı şarj kontrol yöntemleri için hızlı şarj özelliklerinin analizi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Şarj süresi, şarj akımı, sıcaklık, anahtarlama frekansı ve darbe periyodu gibi akü özellikleri farklı şarj yöntemleri için değerlendirilmiştir. Aküye ait gerilim, akım ve sıcaklık değerlerini kaydetmek için ise LabVIEW™ tabanlı bir izleme sistemi kurulmuştur [7]. Kutluay ve diğ. telekomünikasyon güç sistemlerinde kullanılan kurşun-asit akülerin şarj durumunu tahmin etmek ve çevrimiçi şarj-deşarj durumunu izlemek için bir sistem oluşturmuştur. Aküler sabit-dinamik yük koşullarında, farklı kapasiteler ve farklı sıcaklıklar için test edilmiştir. Sistem çeşitli şarj-deşarj stratejileri için yüksek doğruluk ile sonuçlanmıştır [8]. Rakhmatov ve diğ. tarafından yapılan çalışmada ise sistemin çevrimiçi kullanım süresini en yüksek yapmak için akü ömrü hesaplanmaktadır [9]. Steger ve diğ. akü depolama sistemlerini öğrencilere öğretmek ve uygulamalı laboratuvar eğitimi ile gelecekte bu alanda çalışacak kalifiye eleman istihdamını sağlamak için güvenli ve kolay yönetilebilir bir akü test sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Test sistemi ile farklı tiplerdeki akü hücreleri ile çeşitli deneylerin yapılmasına imkân sağlanmıştır [10]. Lin ve diğ. dizel motorlarda kullanılan aküler için AC empedans ve gerilim arasındaki korelasyon analizini yaparak akünün sağlık durumunu (State of Health- SOH) tahmin etmektedir. HUASU H3G-TA akü izleme sistemi ile %100-%50 aralığında deşarj anındaki sağlık durumu kullanılarak kurşun asit aküye ait AC empedans ve gerilim verileri elde edilmektedir. Veri tabanı ile dizel motor aküsünün sağlık durumunu tahmin etmek için doğrusal regresyon metodu kullanılmıştır. Sonuç olarak ölçülen SOH verileri ile tahmin edilen veriler arasında %3.17 ile %3.36 aralığında sapma bulunmaktadır [11].

Kurşun-asit aküler için hücresel problem tespitine yönelik özelleşmiş bir ölçüm sistemine literatürde rastlanılmamıştır. Hâlihazırda, aküdeki hatanın tespiti için test altındaki akünün her bir hücresinin gerilim verileri kayıt altına alınmakta ve daha sonra bu veriler Excel ortamında teknik personel tarafından analiz edilmektedir. Dolayısı ile durumu raporlayan teknik personelin yorumuna bağlı bir değerlendirme söz konusu olabilmektedir. Bu çalışma, garanti kapsamında olmasına rağmen kullanıcı şikâyetiyle geri gönderilmiş ve

elektriksel performans testlerinden de başarısız olmuş akülerdeki hatanın tespitinin kolaylaştırılması için bir yöntem sunmaktadır. Bu amaçla aküye ait her bir hücrenin gerilim ve sıcaklık değerleri ölçülerek kayıt altına alınmakta ve oluşturulan arayüz programı aracılığıyla tespit edilen problemlili hücre ve/veya hücreler belirlenmektedir.

## 2 Materyal ve metot

Aküler %100 şarjlı durumda iken 12.7 V gerilime sahiptirler. Depolanan enerjinin kullanılması ile terminal gerilimi azalmaktadır. Aküler için minimum gerilim alt limiti 10.5 V olarak belirlenmiştir ve bu değer aküler için %0 şarjlılık durumunu ifade etmektedir. Hücre başına düşen minimum gerilim limiti bu değer 1/6'sıdır.

Akü üretiminde kimyasal, elektriksel veya mekaniksel problemler yaşanabilmektedir. Sıklıkla gözlemlenen problemlere akü hücreleri arasındaki mekanik bağlantı kaynaklı kısa devreler, akü plaka üretiminden kaynaklı problemler ve akü ilk şarjından kaynaklı problemler örnek verilebilir. Aküleri EN 50342-1:2015 standardına göre elektriksel performans testleri yapılmaktadır. Özellikle akülerin etkin kapasitelerinin ve marş basma akımlarının tespitinde standartta yer alan testler uygulanmaktadır. Ayrıca akünün saha koşullarında maruz kalacağı durumlar için benzetim ile birçok çevrim (şarj-deşarj) testi yapılmaktadır. Bu çevrim testleri akü tasarımlarının uygunluğunun kontrol edilmesinde önemli bir yere sahiptir.

Aküler sahada veya elektriksel performans testleri esnasında kullanım dışı kalabilmektedirler. Aküdeki problemlerin tespiti için görsel kontrollerin yetersiz kaldığı durumlarda bu çalışmada sunulan sistem daha detaylı analiz ve inceleme için kullanılabilir. Geliştirilen yöntem ve ölçüm sistemi, saha koşullarında çalışarak kullanım ömrünü tamamlamış, garanti kapsamında olmasına rağmen kullanıcı şikâyetiyle geri gönderilmiş ve elektriksel performans testlerinden başarısız olmuş akülerdeki hatanın tespitine yöneliktir. Ölçüm sisteminden elde edilen veriler tahribatlı akü analizlerinde (mekanik analiz) problemlili hücrelere odaklanarak hatalı hücrenin kısa sürede saptanmasına yardımcı olmaktadır.

Akü, elektriksel test standardında (EN 50342-1:2015) yer alan 6.1 No.lu kapasite kontrol testine uygun olarak deşarj edilmektedir. Standartta belirtilen deşarj işlemi  $I_n$  (akü kapasitesinin 1/20'si olan nominal akım) sabit akımı ile akü gerilimi 10.5 V değerine ulaşıncaya kadar olan deşarj süresini kapsamaktadır. %100 doluluk oranına sahip bir aküde bu süre 20 sa.'tir. Deşarj anında elde edilecek gerilim ölçüm verilerinden hareketle problemlili hücre veya hücrelerde deşarj sonu gerilim farkı diğer hücrelere göre yüksektir.

Akü, elektriksel test standardında (EN 50342-1:2015) yer alan 5.2 No.lu şarj kurallarına uygun olarak şarj edilmektedir. Standartta yer alan şarj işlemi gerilim üst limiti 16 V, akım üst limiti  $5 \times I_n$  ile 24 sa.'lik bir şarj işlemini ifade etmektedir. Sıcaklık verileri şarj esnasında kayıt altına alınmaktadır. Problemlili hücre veya hücreler diğer hücrelere göre şarj anında daha yüksek sıcaklığa ulaşmaktadır. Sıcaklık ölçüm problemlili hücreler arasında gezdirilerek yüksek sıcaklığa ulaşmış hücrelerde sabit bırakılmaktadır. Çünkü şarj anında problemlili hücre veya hücreler aşırı şarja gitmekte ve sıcaklıklar yükselmektedir. Bu bakımdan bu çalışmada kullanılan sıcaklık ölçüm modülünün 4 kanallı olması nedeniyle de 6 hücreden değil 4 hücreden anlık sıcaklık verisi toplanmıştır.

## 2.1 Donanım

Aküye ait her bir hücre geriliminin takip edilmesi problemleri hücrenin tespitinde önem arz etmektedir. Akü hücre gerilimi 1.75 V ile 2.15 V aralığında değişim göstermektedir. Hücre gerilimi ölçümleri için  $\pm 10$  V, 500 kS/s, 12-Bit, 8 Analog girişli NI-9201 veri toplama kartı tercih edilmiştir. Akım ölçümü için şönt direnç kullanılmış olup akım bilgisi de bu analog giriş modülü ile okunmuştur. Ayrıca akü hücre sıcaklıklarının anlık takibi için 4 kanallı 24 bit çözünürlüğe sahip NI-9211 veri toplama kartı ile yalıtımlı, asite dayanıklı J tipi termokupullar sıcaklık ölçümü için kullanılmıştır.

## 2.2 Yazılım

Akünün her bir hücresine ilişkin gerilim ve sıcaklık verileri yukarıda özellikleri verilen veri toplama cihazları vasıtasıyla ölçülmüş ve anlık veriler tasarlanan görsel kullanıcı arayüzüne aktarılmıştır. Görsel kullanıcı arayüzü için LabVIEW™ programı kullanılmıştır. Geliştirilen program arayüzü 3 kısımdan oluşmaktadır:

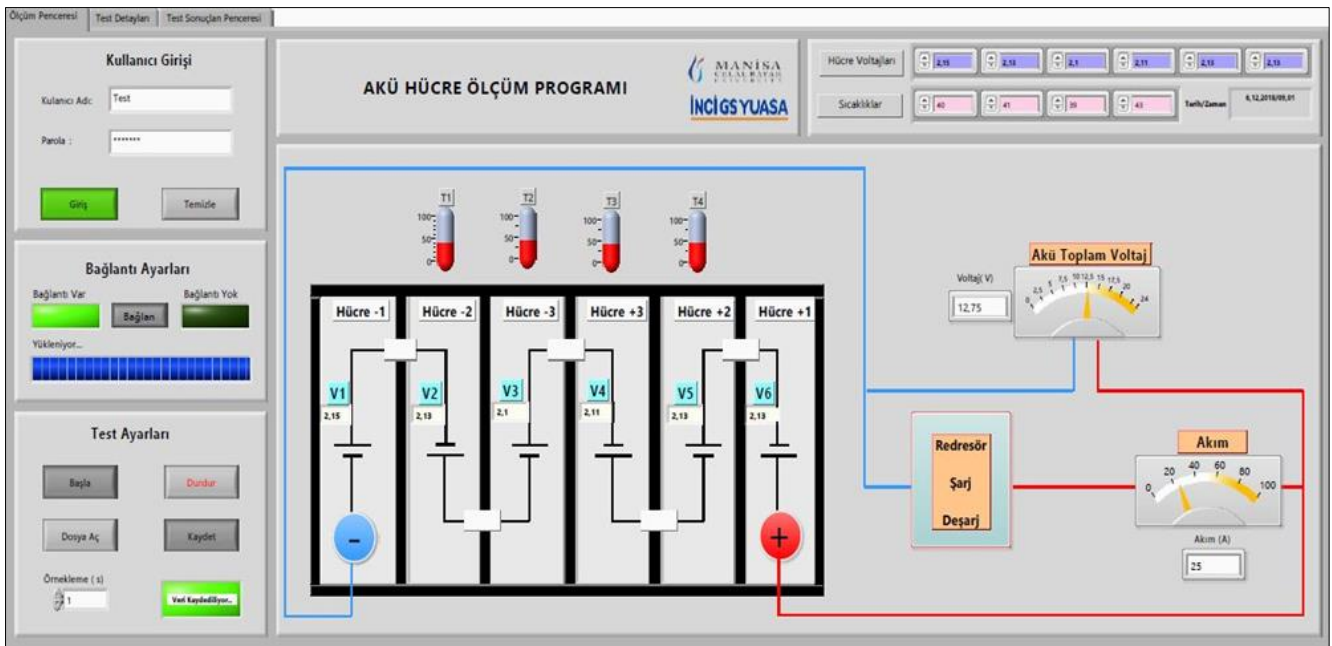
- Ölçüm Penceresi. LabVIEW ortamında geliştirilen veri takip penceresine ait detaylı bir görüntü Şekil 1'de verilmiştir. Bu ölçüm penceresi 4 bölümden oluşmaktadır;
  - Kullanıcı girişi,
  - Bağlantı ayarları,
  - Test başlatma ayarları,
  - Ölçüm verilerinin görüntülenmesi.
- Test Detay Penceresi. Bu bölümde testin uygulama adımları ve elektriksel bağlantıları yer almaktadır. LabVIEW ortamında geliştirilen test detay penceresine ait detaylı bir görüntü Şekil 2'de verilmiştir. Testin amacı, blok diyagramı ve sisteme ait bağlantı görselleri yer almaktadır,
- Test Sonuçları Analiz Penceresi. Bu bölümde test sonuçları grafiksel olarak değerlendirilir ve hatalı

hücrenin tespiti yapılır. Geliştirilen test sonuçları analiz penceresinin detaylı görünümü Şekil 3'te verilmiştir. Test sonuçları analiz penceresinde görüldüğü üzere her bir hücreye ilişkin sıcaklık, akım ve gerilim değerleri anlık olarak grafiğe aktarılmakta ve aynı zamanda veriler prosesin kimyasal yapısı gereği 1 S/s olarak kaydedilmektedir. Test 25 °C'de şartlandırılmış ortam ve 25 °C'lik akü test havuzunda yapılmaktadır. Test süresi akünün yüzde doluluk oranına (state of charge) bağlı olarak 0-20 saat arasında değişebilmektedir. Test sonuçlarında deşarj anındaki hücreler arası gerilim farkı ve şarj anındaki hücreler arası sıcaklık farkı bu çalışmada sunulan sistem ile otomatik olarak yorumlanarak problemleri hücre veya hücreler görsel arayüzde gösterilmektedir.

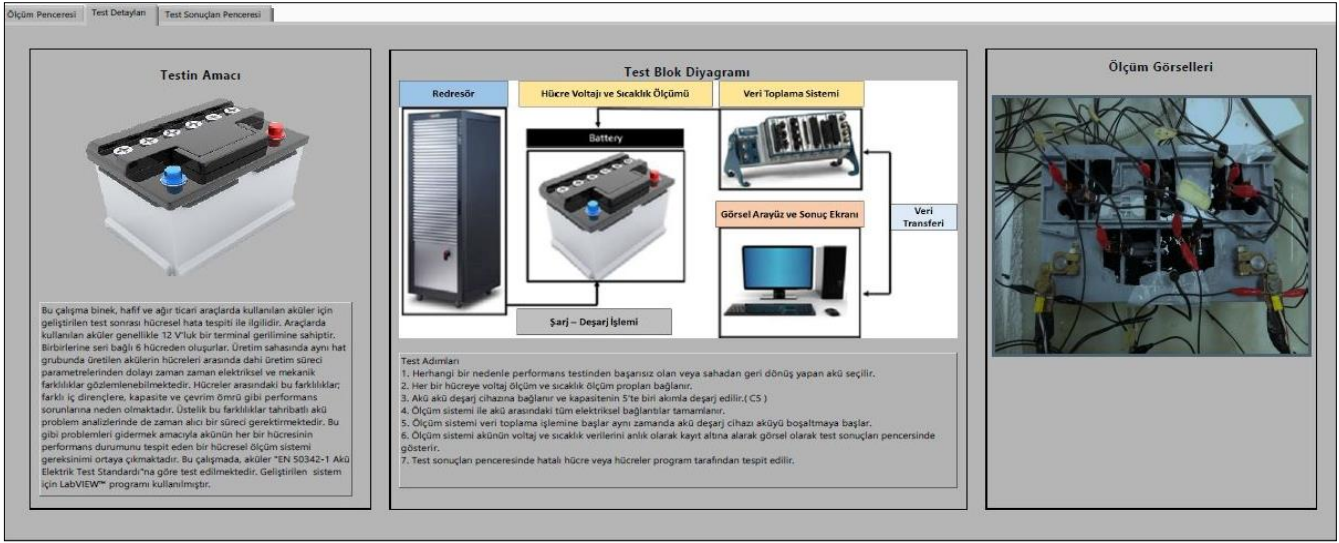
## 3 Bulgular

Saha koşullarında çalışarak kullanım ömrünü tamamlamış, garanti kapsamında olmasına rağmen kullanıcı şikâyetiyle geri gönderilmiş ve elektriksel performans testlerinden başarısız olmuş akülerdeki hatanın tespiti için Şekil 4'teki test akış diyagramı uygulanmaktadır.

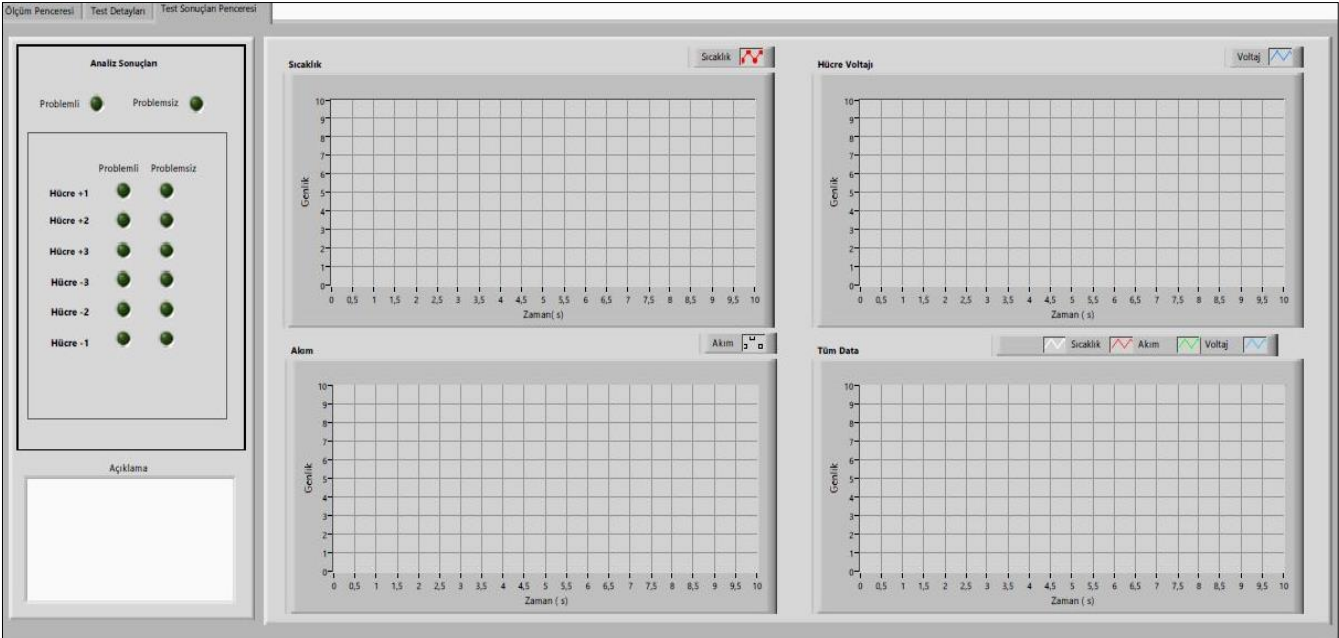
Şekil 4'te verilen test akış diyagramında belirtildiği üzere hücrelerin yoğunluk, asit seviyesi ve iç dirençleri manuel olarak ölçüldükten sonra aküye elektriksel bağlantı gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen test sistemi, hücrelerin sıcaklık ve voltaj değerlerine bakarak problemleri hücre ve/veya hücreleri tespit etmektedir. Elde edilen veriler akünün tahribatlı analizinde kullanılmak üzere girdi oluşturmaktadır. Örneğin, bir hücresinin yoğunluğu düşük, iç direnci yüksek olduğu durumda hatalı hücre tespit sisteminden elde edilecek deşarj anındaki gerilim düşük bilgisi ve şarj anındaki sıcaklık yüksek bilgisi birbiri ile örtüşmelidir.



Şekil 1: Veri takip penceresi.



Şekil 2: Test detay penceresi.



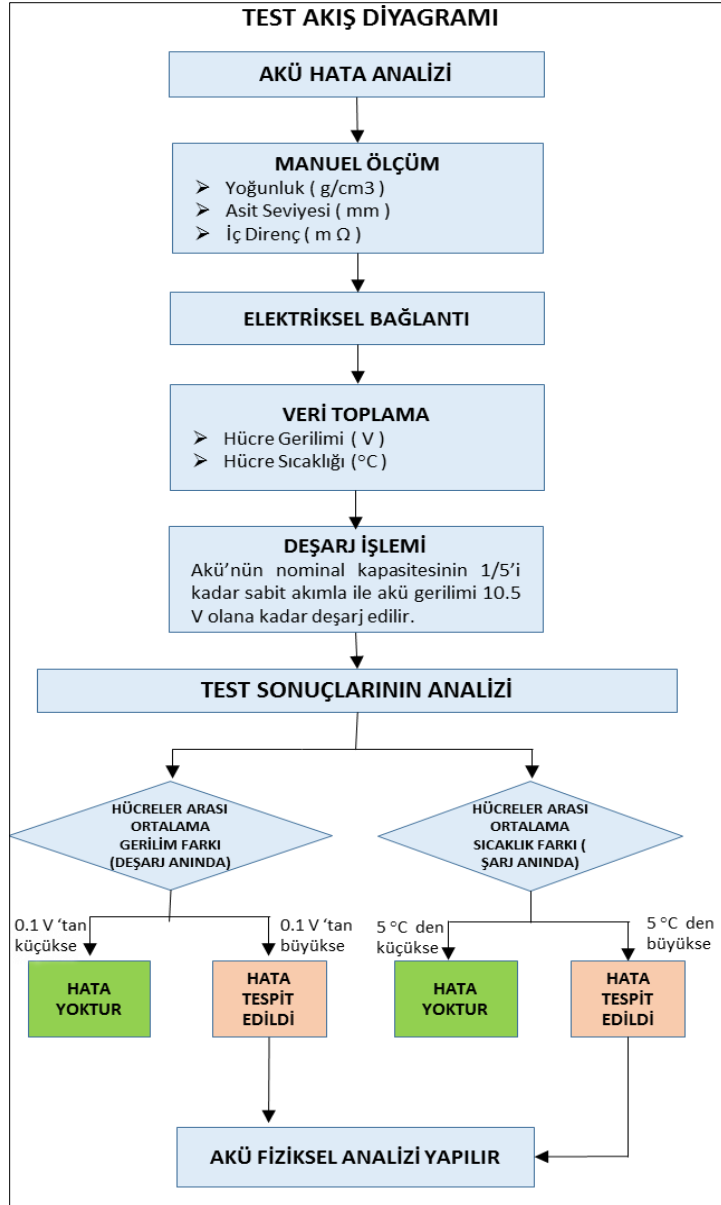
Şekil 3: Test sonuçları analiz penceresi.

Akünün problemlili hüresinin tespitinde deşarj esnasında hücre gerilimlerinin değışimleri oldukça önemlidir. Problemlili hücrelerde gerilim hızla düşmektedir. Akü hücre gerilim bilgileri test sonucunda değerlendirilerek hatanın mekaniksel veya tasarım kaynaklı problemleri tespit edilebilmektedir. Şekil 5'te örnek bir aküde yapılan hata analiz testinin sonuçları yer almaktadır. Örnek çalışma incelendiğinde +3 olarak adlandırılan hücrenin gerilimi diğer hücelere göre hızla azalmıştır. Hücre gerilimindeki bu ani düşüş bu aküde mekaniksel kaynaklı bir problemin olduğunu göstermektedir. Hata analizi yapılan akü daha sonra kesilerek incelenmiş ve kısa devre problemi tespit edilmiştir.

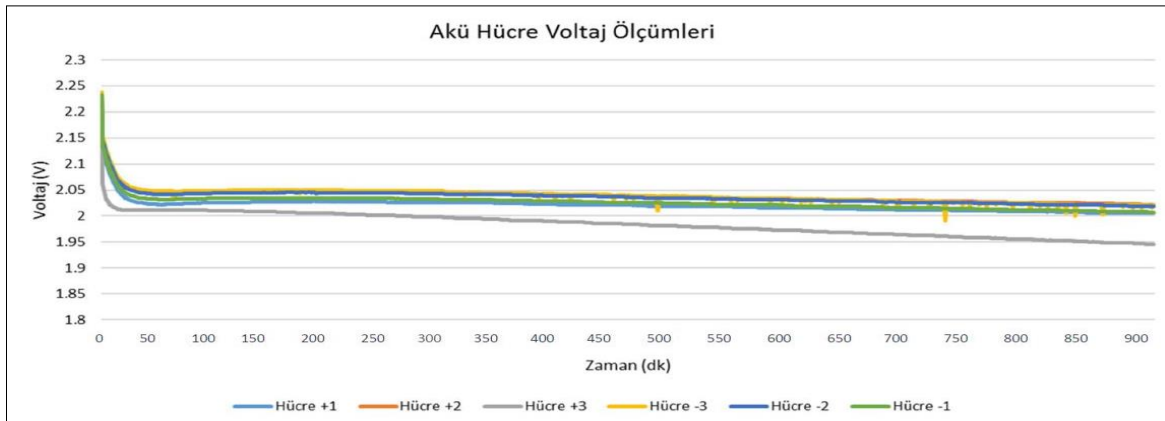
Geliştiren test sistemi ile ayrıca akünün hücrelerinin sıcaklıkları da takip edilmektedir. Sıcaklık takibi akü şarjı esnasında yapılmaktadır. Şekil 6'daki örnekte +3 No.lu hücre

sıcaklığı şarj anında en yüksek olarak görülmektedir. Sıcaklıktaki bu yükseliş hücrede kısa devre kaynaklı bir problem olduğunu göstermektedir. Şekil 5'te test edilen hücelere ait gerilim genlik grafiği, Şekil 6'te ise hücelere ait sıcaklık verileri gösterilmiştir.

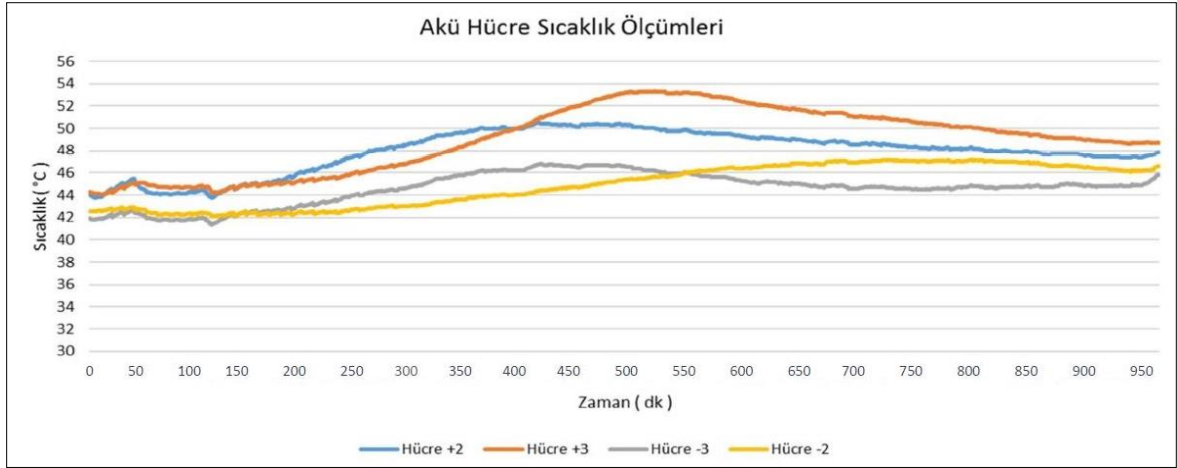
Şekil 7'de bu çalışmada sunulan veri toplama sistemi ile yapılan bir analize ait gerçek sistem grafikleri verilmiştir. Akü, 100 A deşarj akımı ile test edilmiş ve 5. çevrim sonunda hücre-3 No.lu hücrenin problemlili olduğu görülmüştür. Bu grafiksel veri hücre-3'te kısa devre olduğuna işaret etmektedir. Bu durumu doğrulamak için tahribatlı akü analizine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla ilgili görseller Şekil 8'de verilmiştir.



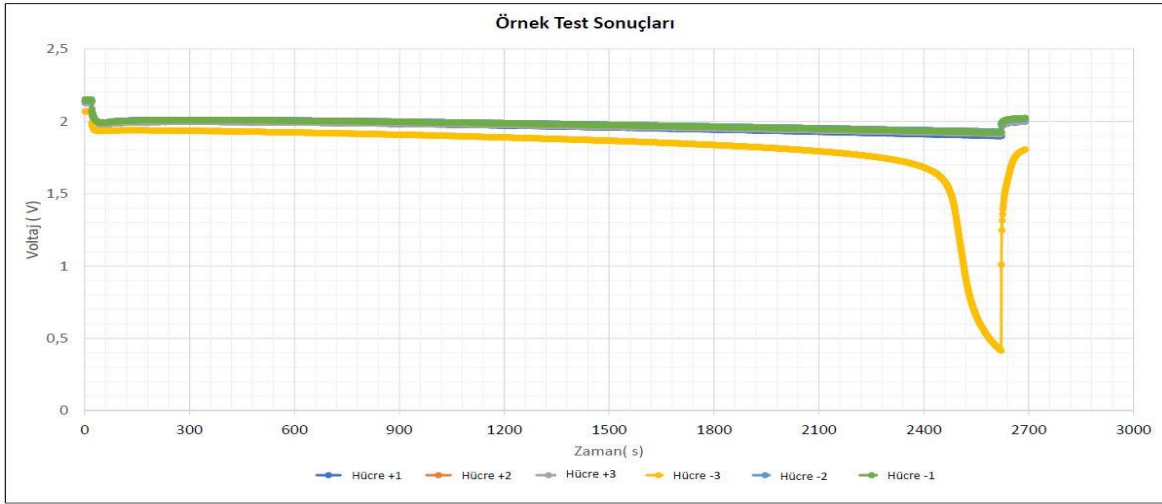
Şekil 4: Test akış diyagramı.



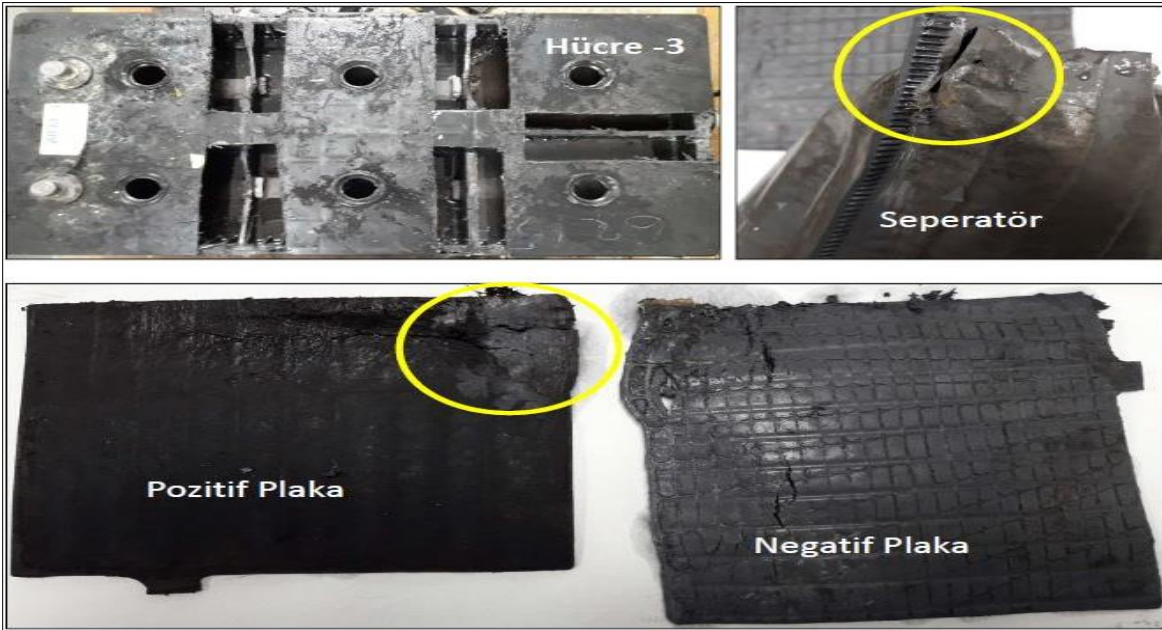
Şekil 5: Hücre gerilim(voltaj) ölçümü örnek test sonuçları.



Şekil 6: Hücre sıcaklık ölçümü örnek test sonuçları.



Şekil 7: Teste tabi tutulan aküye ait hücre gerilimleri verileri.



Şekil 8: Analiz sonucu tahribat tespit edilen 3 No.lu hücreye arıza görselleri.

#### 4 Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada sunulan otomotiv akülerine yönelik olarak geliştirilen veri toplama ve hata teşhis sistemi ile akü hücre gerilimleri ve sıcaklıkları ölçülerek problemlili hücre ve/veya hücreler ile hatanın nedenine yönelik tahribatlı analiz öncesi bir durum kestirimi yapılabilmektedir. Hücre gerilimleri esas alınarak yapılan hata analizinde, akü deşarjı esnasındaki hücre gerilimleri takibi ile hata tespit edilmektedir. Sıcaklık ölçümü kullanılarak yapılan hata analizinde ise akü şarjı boyunca hücrelerin sıcaklık değişimleri takip edilmekte ve normalden daha yüksek sıcaklık seviyesine çıkanlar hatalı olarak tespit edilmektedir. Her iki yöntem kullanılarak aküdeki problemin tespiti doğrulanabilmektedir. Aynı zamanda, veri toplama sisteminden elde edilen grafiklerin yorumlanması sonucu yapılan kestirimler tahribatlı akü analizi ile de doğrulanmaktadır. Dolayısı ile bu sistem tahribatlı akü analizi için harcanan zamanı önemli ölçüde azaltmakta ve çift yönlü doğrulamayı da sağlamaktadır. Özellikle birbirine seri bağlı gruplar halinde kullanılan bataryalarda problemlili bataryanın tespiti ve değiştirilmesi için de bu çalışmada sunulan yöntem kullanılabilir.

#### 5 Teşekkür

Bu çalışmanın deneysel alt yapısının hazırlanmasına imkân sağlayan İnci GS Yuasa Akü San. ve Tic. AŞ Ar-Ge Merkezine teşekkür ederiz.

#### 6 Kaynaklar

- [1] Baker J. "New technology and possible advances in energy storage". *Energy Policy*, 36(12), 4368-4373, 2008.
- [2] Tombul B. Akülerin Çevreye Zararları ve Geri Kazanılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [3] Yağcıtekin B. Rüzgâr Enerjisi Üretiminde Depolama Tekniği ve Tahmin Sistemleri Kullanılarak Enerji Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.

- [4] Salameh ZM, Casacca MA, Lynch WA. "A mathematical model for lead-acid batteries". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(1), 93-98, 1992.
- [5] Blanke H, Bohlen O, Buller S, Doncker RWD, Fricke B, Hammouche A, Linzen D, Thele M, Sauer DU. "Impedance measurements on lead-acid batteries for state-of-charge, state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicles". *Journal of Power Sources*, 144(2), 418-425, 2005.
- [6] Ceraolo M. "New dynamical models of lead-acid batteries". *IEEE Transaction on Power Systems*, 15(4), 1184-1190, 2000.
- [7] Hua CC, Lin MY. "A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles". *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Choula, Mexico, 4-8 December 2000.
- [8] Kutluay K, Çadirci Y, Özkazanç YS, Çadirci I. "A new online state-of-charge estimation and monitoring system for sealed lead-acid batteries in telecommunication power supplies". *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 52(5), 1315-1327, 2005.
- [9] Rakhmatov D, Vruthula S, Wallach DA. "A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer". *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 11(6), 1019-1030, 2003.
- [10] Steger F, Brade K, Schweiger HG, Nitsche A, Belski I. "Teaching energy storages by means of a student battery cell test system". *Proceedings of the 45<sup>th</sup> SEFI Annual Conference 2017*, Angra do Heroísmo, Portugal, 18-21 September 2017.
- [11] Lin TC, Chen LR. "Research on the prediction of state-of-health (SOH) of starting-up battery of diesel engine". *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Information, Communication and Engineering*, Fujian, China, 17-20 November, 2017.