





# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## IoT Tabanlı Enstrümantasyon Sistemi ile Farklı Frekansların Kurşun Asit Akülerin Desülfasyonu Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

 Murat KÖSEOĞLU <sup>a,\*</sup>,  Özgür Fırat AYDIN <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Elektrik-Elektronik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: murat.koseoglu@inonu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.900181

### ÖZ

Bu çalışmada, Kurşun asit (KA) akülerde sıklıkla rastlanan sülfatlanma sorununun çözümüne odaklanılmış, nesnelerin interneti (IoT) tabanlı enstrümantasyon devreleri kullanılarak, farklı frekanslardaki gerilim darbelerinin KA akülerin desülfasyonu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, eşit koşullarda sülfatlandırılmış dört özdeş akü, farklı frekanslarda gerilim darbeleri ve DC gerilim uygulanarak şarj edilmiş, akü parametrelerindeki değişimler analiz edilmiştir. Analiz sonucunda akülerin yüke akım aktarabilme kapasitelerindeki düşüşün, DC gerilim ile şarj edilen aküde yüksek oranda, farklı frekanstaki gerilim darbeleriyle şarj edilen akülerde ise nispeten daha düşük oranda olduğu görülmüştür. Buna göre, yüksek frekanslı gerilim darbeleriyle desülfasyon işleminin, sülfatlanmış bir aküyü olumlu şekilde etkilediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Kurşun asit aküler, Desülfasyon, Nesnelerin interneti (IoT)

## Investigation of the Effect of Different Frequencies on Desulphation of Lead Acid Batteries by IoT Based Instrumentation System

### ABSTRACT

In this study, the solution of sulphation problem, which is often seen in Lead acid (LA) batteries, was focused on, and the effects of voltage pulses of different frequencies on the desulphation of LA batteries were experimentally investigated by using Internet of Things (IoT) based instrumentation circuits. To this end, four identical batteries, which were artificially sulphated under equal conditions, were charged by applying voltage pulses at different frequencies and DC voltage, and the changes in battery parameters were analysed. As a result of the analysis, it was seen that the decrease in the capacity of the batteries to transfer current to the load was high in the battery charged with DC voltage and relatively low in the batteries charged with voltage pulses of different frequencies. Thus, it is seen that desulphation process with high frequency voltage pulses affects a sulphated battery positively.

**Keywords:** Lead acid batteries, Desulphation, Internet of things

# I. GİRİŞ

Elektriğin insan hayatına girişinin hemen ardından, bu yeni enerji türünü depolamayı sağlayan çeşitli batarya türleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında en önemlisi Kurşun asit akülerdir. Kurşun asit aküler, endüstride büyük ilerlemeler sağlanmasında önemli rol oynamış ve insanların günlük hayatına önemli katkılarda bulunmuştur [1]. Kurşun asit akü, Gaston Planté tarafından 1859 yılında bulunmuş ve modern batarya teknolojisinin temelleri bu yıllarda atılmıştır. Elektrokimyasal temelli bataryalar içinde en sık kullanılan akü türü Kurşun asit akülerdir [2]. Aküler; Uluslararası Batarya Konseyi tarafından, kimyasal enerji depolayan ve ihtiyaç halinde bu enerjiyi tüketiciye aktarabilen elektrokimyasal araçlar olarak tanımlanmaktadır [3]. Yaklaşık yüz elli yıl boyunca teknolojinin ilerlemesine paralel olarak akü ve batarya teknolojileri de gelişme göstermiştir. Kurşun asit akü teknolojisi en güvenilir ve uygun maliyetli güç kaynağı haline gelmiştir. Bugüne kadar üretilen batarya teknolojilerinden hiç biri Kurşun asit akülerin satış başarısına ulaşamamıştır [4]. Son yıllarda bataryalarda enerji depolanması konusunda giderek artan ve yeniliklere öncülük eden çalışmaların ortaya çıkması ile akülerin mobil cihazlarda, otonom araçlarda, güneş enerjisi sistemlerinde, uzay ekipmanlarında, dizüstü bilgisayarlarda ve endüstriyel alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır [5]. İçten yanmalı motorlarda ve mobil baz istasyonlarında bulunan güç destek sistemlerinde halen yüksek akımlı Kurşun asit akülerin tercih edildiği belirtilmiştir [6]. Son yıllarda pek çok yeni enerji depolama yöntemi ve batarya teknolojisi geliştirilse de Kurşun Asit aküler hala yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kurşun asit akü teknolojileri, akülerin verimliliğini arttırmaya ve ömürlerini uzatmaya yönelik olarak günden güne gelişmektedir.

Kurşun asit aküler uygun şekilde kullanılmadığı takdirde, beklenenden daha kısa sürede kullanım dışı kalarak atıl hale gelebilirler. Kullanım dışı kalarak hurdaya ayrılan akülerin maksimum verimle geri dönüşümü çok önemlidir, zira atık Kurşun asit aküler uygun şekilde bertaraf edilmezse, içerdiği ağır metaller nedeniyle doğada çok önemli tahribatlara neden olabilirler. Kurşun asit akülerin geri dönüşüm süreçleri; akünün bileşenlerine ayrılması ve değerli metallerin eritme yöntemi ile geri kazanımı olmak üzere iki temel aşamadan oluşur [7].

Uygun şartlar altında kullanılmadıklarında, akülerde kapasite düşer ve akü ömrünün kısalmasına neden olacak bazı geri döndürülemez arızalar meydana gelir. Dolayısı ile kötü kullanımdan kaynaklanan arızalar doğrudan akünün kullanım ömrünü etkiler. Akülerin arıza sebepleri arasında; akülerin uzun süre kullanılmadan bekletilmesi, derin deşarj, aşırı şarj, ani sıcaklık değişimleri gibi nedenler sayılabilir. Akünün bu şekilde kullanımı, akülerde en sık karşılaşılan arıza türü olan sülfatlanmanın ortaya çıkmasına neden olur. Sülfatlanma sorunu, Kurşun asit akülerde gerçekleşen arızaların %80'ini oluşturmaktadır [8]. Sülfatlanma, elektrolit olarak kullanılan sülfürik asit çözeltisinde bulunan Sülfat moleküllerinin, deşarj sırasında Kurşundan yapılmış eksi elektrot plakalarına ve Kurşun dioksitten yapılmış artı elektrot plakalarına bağlanıp orada uzun süre kalarak kristalik yapıda sert ve iletkenliği çok düşük bir Kurşun Sülfat tabaka oluşturması şeklinde açıklanabilir. Eğer akü uygun koşullar altında kullanılırsa ve standartlara uygun şekilde şarj edilirse, plakalarla bağ oluşturan Sülfat molekülleri, kristalize olmadan büyük oranda tekrar elektrolit içerisine geri dönebilmektedir. Ancak kötü kullanım koşulları altında, oluşan Kurşun Sülfat tabakaya bağlı olarak, akünün şarj ve deşarj kapasitesinde önemli derecede düşüş gözlemlenir. Bununla birlikte akünün iç direnci artar ve elektrolit içerisindeki Sülfat molekülleri büyük oranda azaldığından, elektrolit yoğunluğunda düşüş gözlemlenir. Kurşun asit akülerde sülfatlanma temel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır ve bu soruna karşı desülfasyon işlemi uygulanması akülerin geri kazanımı için uygun bir çözümdür [9]. Akü iç direncinin ölçülmesi ile akünün plakalarında sülfatlanma nedeni ile ortaya çıkan korozyonun tespitini yapmak mümkündür [10].

Yukarıda da belirtildiği gibi Sülfatlanma, Kurşun asit akülerin kullanım sürelerini kısaltan en belirgin arıza türüdür ve bu arıza akülerin kullanılamaz hale gelmelerine neden olur. Sülfatlanmış Kurşun asit aküler geri kazanılabilir durumda değilse hurdaya ayrılırlar. Bu da çevresel açıdan zararları olan bir süreçtir. Bu nedenle, Kurşun asit akülerin yeniden kazanımı ve Sülfatlanmanın olumsuz etkilerinin en aza indirgenerek kullanım ömürlerinin uzatılması çok kritik bir öneme sahiptir. Bu konuda yeni yöntemler geliştirilmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [11]. Kurşun asit akülerde desülfasyon sorununa yönelik olarak iki temel çözüm yöntemi vardır. Bunlar kimyasal ve elektriksel çözüm

yöntemleridir. Elektriksel yöntemler içinde ise en yaygın kullanılan ve güvenilir yöntem ise akü kutuplarına elektriksel darbeler (palsler) uygulanarak gerçekleştirilen desülfasyon işlemidir. Pals uygulayarak şarj tekniği, akü kapasitesinin erken kaybını önlemek, şarj işlemini hızlandırmak ve sabit akım kullanan geleneksel şarj yöntemlerine kıyasla Kurşun asit akü ömrünü 3 ila 4 kat uzatmak için kullanılır. Kurşun asit akülerin gerilim darbeleri ile şarj edilmesinin, Sülfatlanmanın temel nedeni olan elektrotlarda birikmiş Sülfatın çözülmesini sağladığı düşünülmektedir [5]. Akü kullanım ömrünü uzatmak için pals uygulama yöntemini temel alan farklı akü desülfasyon teknolojileri geliştirilmiştir [12]. Pals uygulama yönteminde akülerin geleneksel sabit akım- sabit gerilim uygulama yöntemine göre yaklaşık bir saat daha önce tam şarja ulaştıkları ve iç dirençlerinin de kademeli olarak düştüğü bilinmektedir [13].

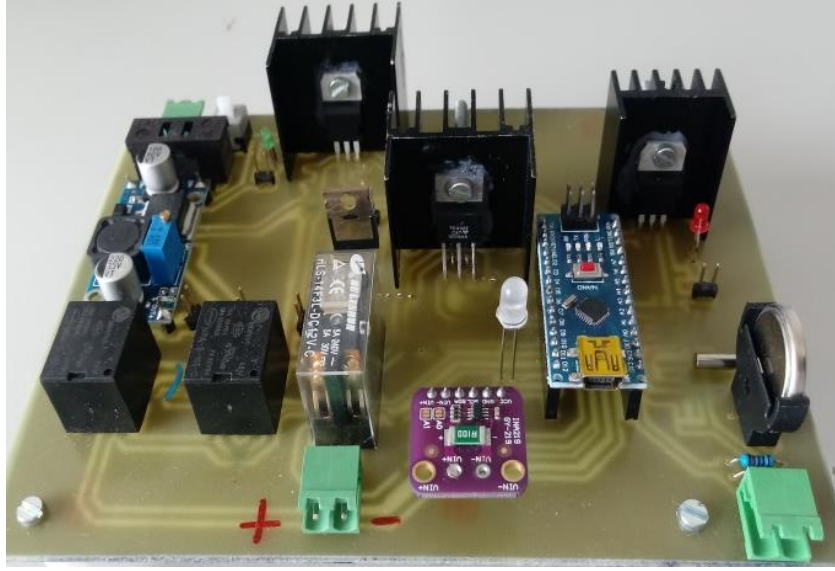
Yapılan literatür taramalarından da görüldüğü üzere Kurşun asit akülerin kullanım ömürlerini kısıtlayan başlıca etkenin plakalarda Sülfat kristallerinin birikimi olduğu anlaşılmaktadır. Kurşun asit akülerde sülfat tabakasını elektrot plakalardan çözültüye yeniden kazandıracak bir batarya yönetim sistemi kullanılmasının, akü performansına olumlu katkı sağladığı bildirilmiştir [14]. Bu soruna karşı geliştirilmiş olan, akü kutuplarına elektriksel darbe uygulanarak gerçekleştirilen desülfasyon işlemi, etkin ve pratik bir çözüm yöntemi olarak görünmektedir. Çalışmalarda desülfasyon için en uygun frekans aralığının 2 MHz ile 6 MHz olduğu belirtilmesine rağmen [5], bu frekans aralığında akülere gerilim darbeleri uygulayarak desülfasyon işlemi gerçekleştiren bir tasarıma veya araştırma bulgusuna rastlanmamıştır. Yapılan bu çalışmanın amacı, yüksek frekanslı darbeler ile şarjın Kurşun asit akülerin desülfasyonu üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırmak ve bu konu ile ilgili literatüre katkı sağlamaktır. Bu kapsamda nesnelere interneti tabanlı bir deneysel ölçüm sistemi tasarlanmış ve farklı frekanslardaki elektriksel darbelerin Kurşun asit akülerin desülfasyonu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

## **II. MATERYAL ve YÖNTEM**

Çalışmada, deneyde kullanılan akülerin şarj edilmesi, yüke bağlanması, akülere desülfasyon uygulanması gibi süreçlerin uzaktan kontrolünün sağlanması için IoT tabanlı bir sistem tasarlanmıştır [15]. Kablosuz ağ teknolojisi, son yıllarda veri takibi, ulaşırma, otomasyon ve sınırlı kaynakların yönetimi gibi alanlarda sıklıkla kullanılır hale gelmiştir [16]. IoT kavramı, sağlık durumu izleyen cihazları, sensorlerden oluşan kablosuz ağları ve benzeri sistemleri içerir [17]. Belirtilen nedenlerden dolayı akü parametrelerinin ölçümü, kayıt altına alınması ve verilerin analiz edilmek üzere internet üzerinden kullanıcı bilgisayarına aktarılması işlemleri için enstrümantasyon sisteminin IoT tabanlı olması tercih edilmiştir. Sistemde veri haberleşmesi için, sensör ağlarında veya IoT tabanlı sistemlerde kullanılmak üzere geliştirilmiş olan MQTT protokolü kullanılmıştır. Mosquito Sunucusu, yayınlama ve abone olma işlemleri ve MQTT kütüphanesi, MQTT yapısında bulunan üç temel başlık olarak sıralanabilir [18]. MQTT ayrıca çevreirimlerden gelen verilerin takibi için kullanılabilen bir haberleşme protokolü olma özelliği de taşır [19]. Bu nedenle enstrümantasyon devrelerinin bilgisayara veri aktarım protokolü olarak MQTT tercih edilmiştir. Deney kapsamında tasarlanan bu sistem, temel bir batarya yönetim sistemi olma özelliği taşır. Bu sistem ile akülere uzaktan müdahale edilebilmesi için özgün şekilde ölçüm kartları tasarlanmış, bu kartlara uzaktan erişime imkân veren birimlerin yazılımları da yine özgün şekilde geliştirilmiştir. Sistem tasarlanırken, akülerin istenilen şarj veya deşarj rejimi dışına çıkmasının önüne geçilmiş, böylece akülerin zarar görmesi engellenmiştir. Geliştirilen özgün yazılım, akülere ait kritik parametreleri kısa zaman aralıklarıyla ölçüp kaydederek, düşük performanslı akülerin kolayca tespit edilebilmesini sağlar. Böylece deneysel süreç boyunca, akünün yanına gidip, manuel olarak aküyü denetlemeye ve ölçüm yapmaya gerek kalmaz.

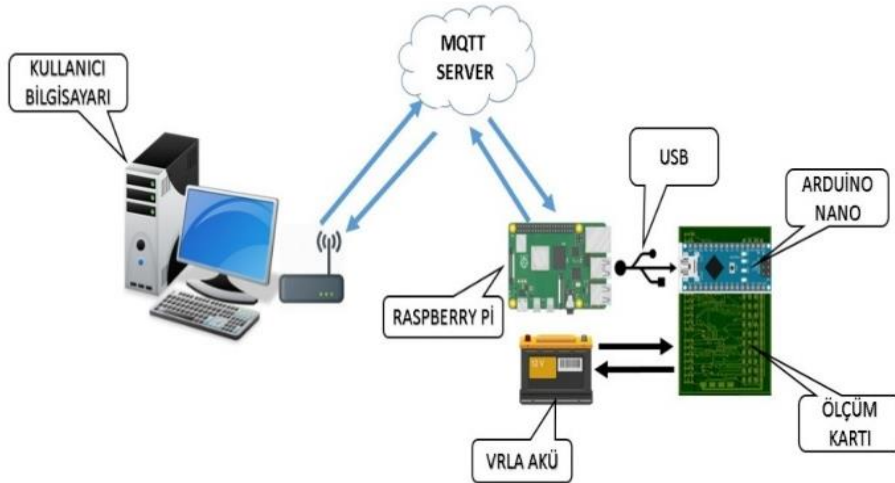
Deney sürecinin gerçekleştirilmesi ve sağlıklı olarak yürütülebilmesi için deneysel sürece uygun şekilde tasarlanan bir enstrümantasyon kartı kullanılmıştır. Bu kartın görevleri; akü parametrelerinin ölçülmesi ve kayıt altına alınması, akünün yüke ve boşa, alınması, akünün DC ile veya darbe gerilimiyle şarj edilmesi, akü geriliminin ve akımının belirlenen güvenli sınırlar içinde tutulmasının sağlanması, sensorların ve RTC, INA219 gibi birimlerinin denetlenmesi ile bu birimlerle haberleşerek gerekli

verilerin alınması, yapılan ölçümler sonrasında elde edilen verilerin kayıpsız ve doğru şekilde Raspberry Pi 3B+ IoT modülüne seri iletişim (USART) kullanılarak aktarılması şeklinde sıralanabilir. Bu çalışmada her bir akü grubu için birer adet olmak üzere toplam 4 adet enstrümantasyon kartı kullanılmıştır. Enstrümantasyon devre kartı Şekil 1’de gösterilmiştir. Tasarlanan enstrümantasyon kartı, güç birimi, komütasyon röleleri, INA219 akım gerilim ve güç ölçüm birimi, EEPROM, mikrodenetleyici birimi, RTC birimlerinden oluşmaktadır. Darbe gerilimi üretilmesi için, Arduino nano, TC4422 Mosfet sürücü, IRF530 Mosfet ve snubber diyotlar kullanılmıştır.



Şekil 1. Enstrümantasyon devre kartının görüntüsü

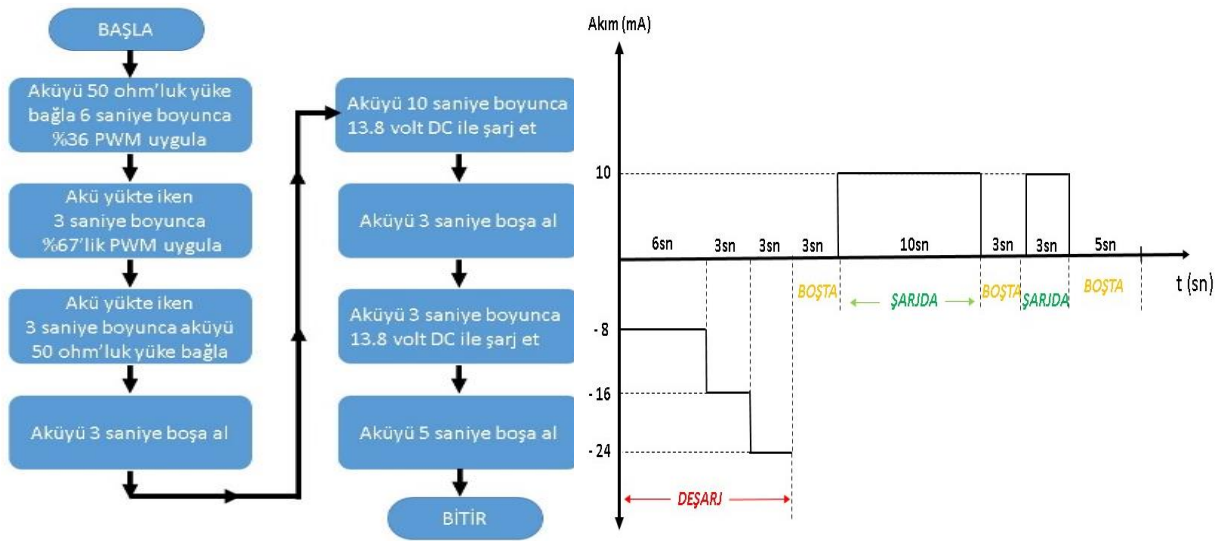
Farklı frekansların, Kurşun asit akülerin desülfasyonu üzerindeki etkilerinin incelenmesi için tasarlanmış olan bu sistemin temel çalışma prensibi şu şekildedir: Kullanıcı komutları, internet üzerinden MQTT sunucusuna iletilir. MQTT sunucusu kendisine gelen komutları Raspberry Pi modülüne iletir. Raspberry Pi modülü kullanıcıdan gelen komutu USB aracılığı ile ölçüm kartına iletir. Ölçüm kartı Raspberry Pi biriminden gelen komuta göre uygun işlemi yapar. Kullanıcı veri talep etmiş ise veri akışı tersine olacak şekilde ölçüm verileri kullanıcıya iletilir. Tüm sistemin bileşenlerinin yer aldığı, temel çalışma prensibini ifade eden prensip şeması Şekil 2’de yer almaktadır. Ayrıca PYTHON dili kullanılarak, kullanıcının akü ölçüm kartına internet üzerinden erişimine imkân veren ve aküyü şarj/deşarj etme, aküye pals uygulama, aküye sülfasyon işlemi uygulama gibi süreçlerin kontrolünü uzaktan sağlayan bir bilgisayar ara yüz programı geliştirilmiştir.



Şekil 2. Deney sisteminin prensip şeması

Deney sırasında 12V'luk nominal gerilim değerine sahip, 7Ah akım kapasiteli, dört adet VRLA akü kullanılmıştır. Deney sürecinde önce dört adet kuru tip VRLA akü, gerilim değerleri 13.2 volt olana kadar 13.8 voltluk sabit DC gerilim ile şarj edilmiştir. Ardından, deney öncesindeki ve sonrasındaki akım verebilme kapasitelerinin karşılaştırılabilmesi için akü gerilimleri 10.8 volta ulaşana kadar 50 ohm'luk dirençlere bağlanarak yüke alınmıştır. Deşarj işleminin ardından aküler tekrar 13.2 volt gerilim değerine ulaşana kadar 13.8 voltluk DC gerilim ile şarj edilmişlerdir.

Bu sürecin ardından akülerin sülfatlandırma süreçleri başlatılmıştır. Bu süreç akülere belirli aralıklarla şarj/deşarj işlemi uygulayarak akülerin sülfatlanmasını ve iç dirençlerinin artmasını sağlamak için uygulanmıştır. Bu işlem, 2004 yılında yayınlanan bir çalışma (Lam vd., 2004) referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Kurşun asit akülerin sülfatlanması için aküler belirli aralıklar ile şarj/deşarj işlemi uygulayan bir sürece tabi tutulmuşlardır. Süreç sonunda akülerde sülfat kristallerinin oluşumunun belirtisi olan akü iç direncinde artış ve akım kapasitesinde azalma gözlenmiştir. Sülfatlandırma sürecinde akülere uygulanan işlemlerin akış diyagramı ve parçalı şarj/deşarj döngüsünün işleyişini gösteren akımın zamana göre değişim grafiği Şekil 3'te verilmiştir.

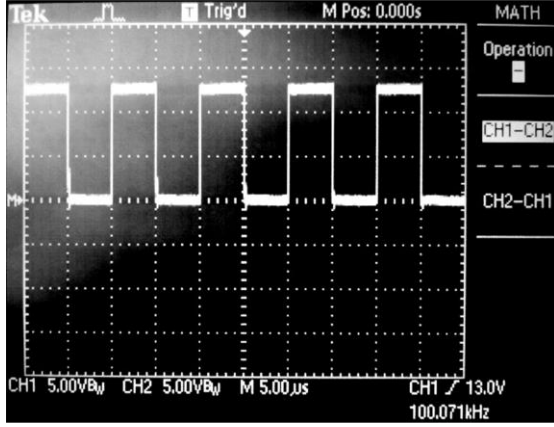


Şekil 3. Sülfatlandırma sürecinde akülere uygulanan işlemler ve akü akımının zamana göre değişimi

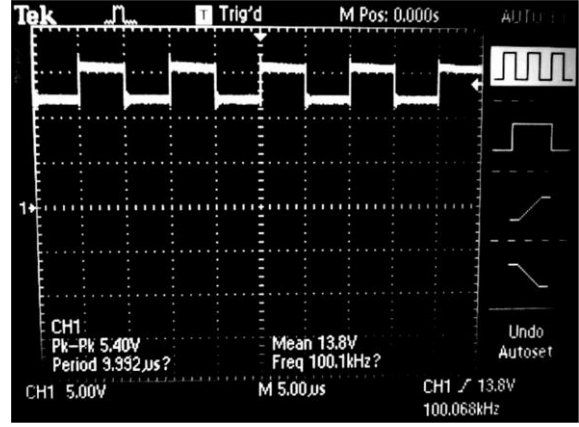
Sülfasyon süreci tamamlandıktan sonra, desülfasyon süreci başlatılmıştır. Desülfasyon; akülerin plakalarında birikmiş olan Sülfat kristallerinin, plakalardan sökülerek akü çözeltisine yeniden kazandırılması işlemidir. Deney sürecinde, farklı frekans değerlerine sahip gerilim darbelerinin Kurşun asit akülerin desülfasyonu üzerindeki etkilerinin araştırılması için, referans aküsü dışındaki akülere sırası ile 100KHz, 1 MHz ve 2 MHz'lik gerilim darbeleri uygulanarak desülfasyon işlemi uygulanmıştır. Farklı frekanslarda üretilen darbe gerilimlerinin ve akülerin kutupları arasında ölçülen gerilimlerin osiloskop görüntülerine Şekil 4'te yer verilmiştir.

Desülfasyon sürecinde gerilim darbeleri ile desülfasyon işlemi uygulanan akülere, önce beş dakika boyunca gerilim darbeleri uygulanmış ardından sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Daha sonra üç saniye boyunca akü boşa alınmış ve ardından gerilim ölçülmüş ve bu işlem desülfasyon sürecinin sonuna kadar devam ettirilmiştir. Pals uygulanan akülerin iç direnç ölçümleri on dakikalık zaman aralıklarında yapılmıştır. İç direnç ölçümünün ardından aküler beş saniye boşa tutulmuş, gerekli ölçümler yapılmış ve ardından desülfasyon işlemine devam edilmiştir.

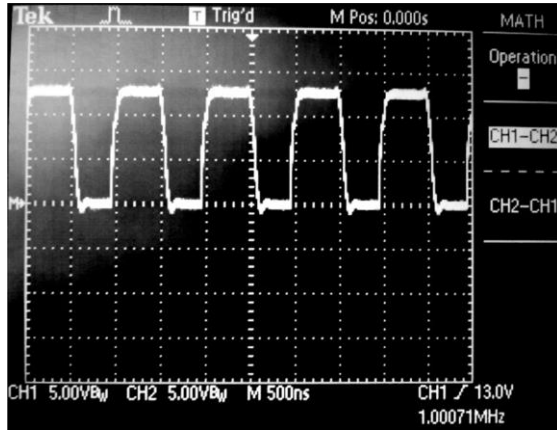
Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonunda akülerin şarj ve deşarj gerilimleri, iç direnç değişimleri, deşarj akımları akü sıcaklıkları gibi parametreler kayıt altına alınmış ve analiz edilmek üzere internet üzerinden kullanıcı bilgisayarına aktarılmıştır. Kayıt altına alınan veriler doğrultusunda elde edilen parametrelere ve bu parametrelerin zamana göre değişim grafiklerine bulgular ve tartışma bölümünde yer verilmiştir.



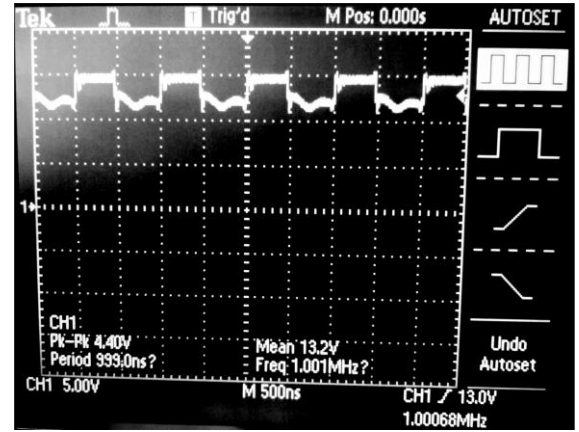
(a)



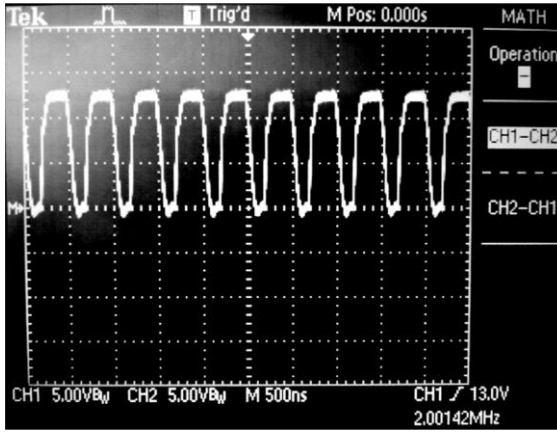
(a)



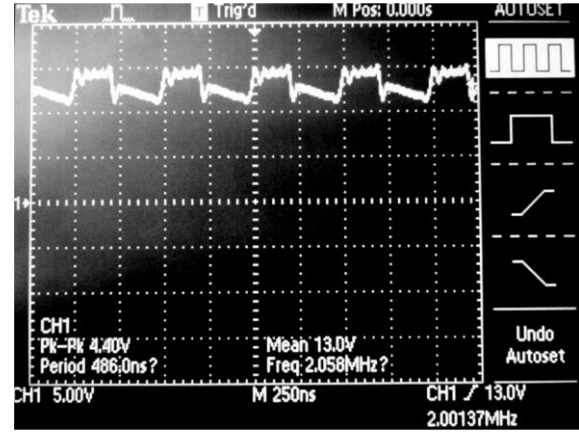
(b)



(b)



(c)



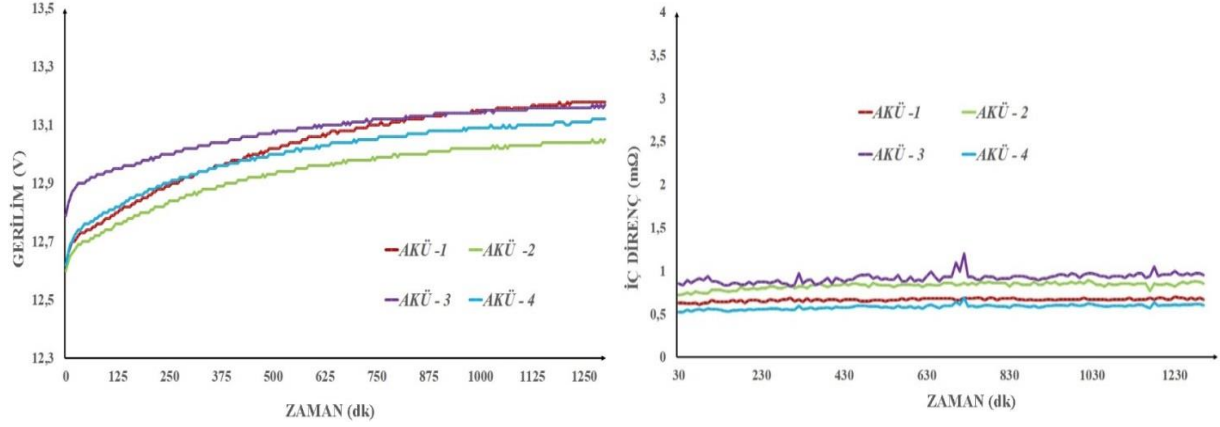
(c)

**Şekil 4.** Farklı frekans değerleri için üretilen darbe gerilimi değerleri (sol) ve buna karşılık akü kutuplarında ölçülen gerilim değerleri (sağ) (a) 100 kHz ; (b) 1 MHz ; (c) 2 MHz

### III. BULGULAR ve TARTIŞMA

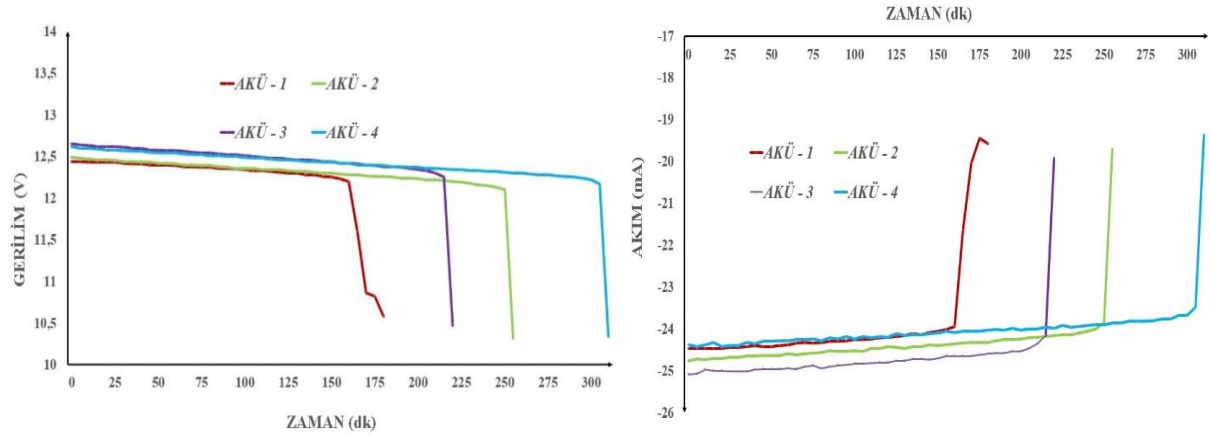
Çalışmada sülfatlanma sorununa daha etkin çözümler üretmek amacıyla gerilim palsleri ile desülfasyon işleminde farklı frekansların etkileri araştırılmıştır. Bu deneysel çalışma kapsamında Literatürde yer alan Kurşun asit akülerin gerilim palsleri ile desülfasyonu işlemi için daha önce denenmemiş olan 1MHz ve 2MHz frekansında ve 13.8 V genliğe sahip gerilim palsleri ile desülfasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Suni yöntemlerle yaklaşık özdeş olarak sülfatlandırılan aküler, dört farklı gruba ayrılarak şarj edilmiştir.

1 nolu akü sabit DC gerilimle şarj edilirken 2, 3 ve 4 nolu aküler sırasıyla 100 KHz, 1 MHz ve 2 MHz'lik gerilim darbeleriyle şarj edilmişlerdir. Bu işlemten sonra her bir akü tekrar özdeş yüklerle bağlanarak akım verebilme kapasiteleri ölçülmüş, desülfasyon işleminde hangi frekansın daha etkin olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyin ilk aşaması olan, tüm akülerin 13.8 V'luk DC gerilimle şarj sürecinde, ölçüm devrelerinden elde edilen, şarj gerilimi ve iç direncin zamana göre değişimi sırasıyla Şekil 5'te verilmiştir. Burada akülerin hemen hemen benzer şekilde şarj olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.** Akülerin 13.8 V'luk DC ile şarj sırasında, şarj gerilimi ve iç direncin zamana göre değişimi

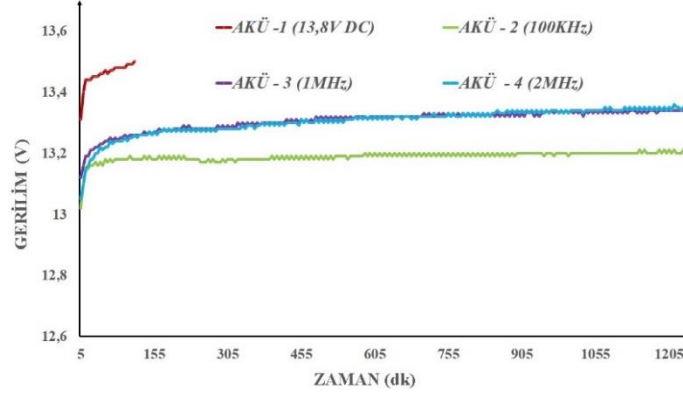
Aküler DC 13.8 V ile tamamen şarj edildikten sonra, standart yük üzerinden ( $50\Omega$  direnç) deşarj işlemine tabi tutulmuş ve akü kapasiteleri her bir akü için ayrı ayrı ölçülerek Şekil 6'da gösterilmiştir. Buna göre, yüke en uzun süre akım sağlayabilen akünün, yaklaşık 300 dk ile 4 nolu akü ve yüke en kısa süre kapasitesini aktarabilen akünün, yaklaşık 160 dk ile 1 nolu akü olduğu görülmüştür.



**Şekil 6.** İlk deşarj sırasında akülere ait gerilim-zaman ve akım-zaman grafiği

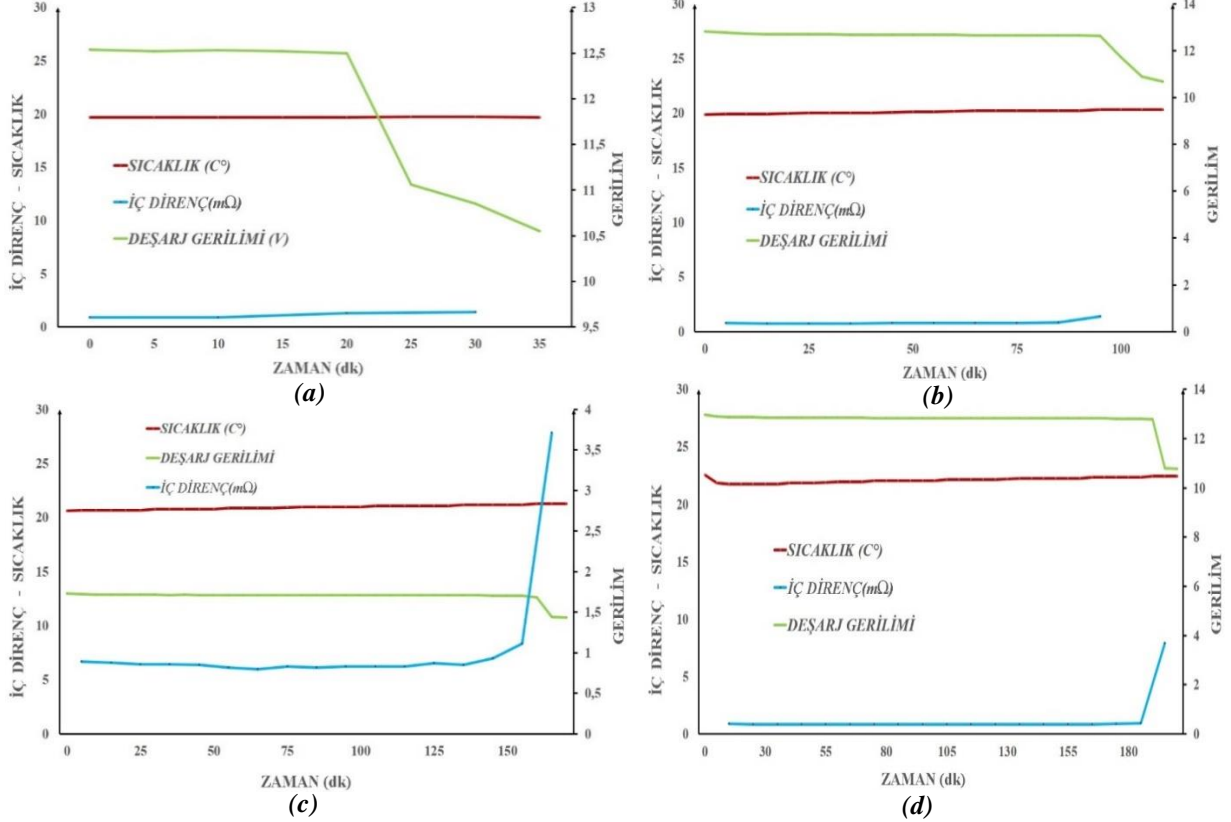
Bir sonraki aşama, Sülfatlandırma sürecidir. Bu süreç bir önceki bölümde açıklanmış ve Şekil 3'te sürecin adımları gösterilmiştir. Bu süreçte aküleri suni olarak sülfatlandırmak amacıyla akülere, kötü kullanım koşullarına eşdeğer sayılabilecek, farklı sürelerde deşarj ve şarj döngüleri içeren işlemler defalarca uygulanmıştır. Sülfatlandırma sürecinde tüm aküler için, deşarj akımının ve deşarj geriliminin düşmesi ile iç dirençte hızlı bir artış olduğu gözlenmiştir. Ancak sülfatlandırma süreci, akü iç direncindeki artışın geri dönülemez noktaya ulaşmaması için sınırlandırılmıştır. Sülfatlandırma süreci sonucunda akü gerilimleri başlangıç durumlarına göre %10 civarında düşmüştür. Tüm akülere hemen hemen eşit koşullarda sülfatlandırma işlemi uygulandıktan sonra, birinci akü 13.8 voltluk DC gerilim ile ikinci, üçüncü ve dördüncü akü ise sırası ile 100 KHz, 1 MHz ve 2 MHz'lik frekans değerine sahip gerilim darbeleri uygulanarak şarj edilmişlerdir. Bu üç aküye uygulanan gerilim darbelerinin görev periyodu %50, genlikleri ise 13.8 voltur. Şarj veya desülfasyon işlemine başlamadan önce, akülerin

üzerindeki gerilim 13 V civarında ölçülmüştür. Ancak bu değer yanıltıcıdır; zira akülere uygulanan uzun süreli sülfatlandırma döngüsü sonucunda, akü bir süre bekletildikten sonra ölçülen gerilim değeridir. Bu durumda akü yüke bağlandığında, iç direnci yüksek olduğundan, çok düşük kapasite ile çalıştığı görülmüştür. Akülere şarj için uygulanan gerilim darbelerine ait osiloskop görüntüleri ikinci bölümde Şekil 4’te verilmiştir. DC ile ve farklı frekandaki darbeleriyle şarj sürecinde birinci, ikinci üçüncü ve dördüncü aküye ait şarj geriliminin zamana göre değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Desülfasyon sürecinde akülerde ölçülen şarj geriliminin zamana göre değişimi

Karşılaştırmalı grafikten görüldüğü üzere en çabuk şarj olan akü, büyük farkla DC 13.8 V ile şarj edilen birinci aküdür. Farklı frekans değerlerine sahip gerilim darbeleriyle şarj edilen aküler, nispeten daha uzun sürede şarj olmaktadır. Farklı frekans değeri ile desülfasyon işlemi uygulanan aküler arasında bir kıyaslama yapıldığında ise, 2 MHz’lik gerilim darbesinin, daha düşük frekanslı gerilim darbelerine oranla, aküyü daha çabuk şarj ettiği görülmektedir. Burada aküler, 100 KHz’lik gerilim darbelerinin uygulandığı durumda en yavaş şekilde şarj olmuştur.



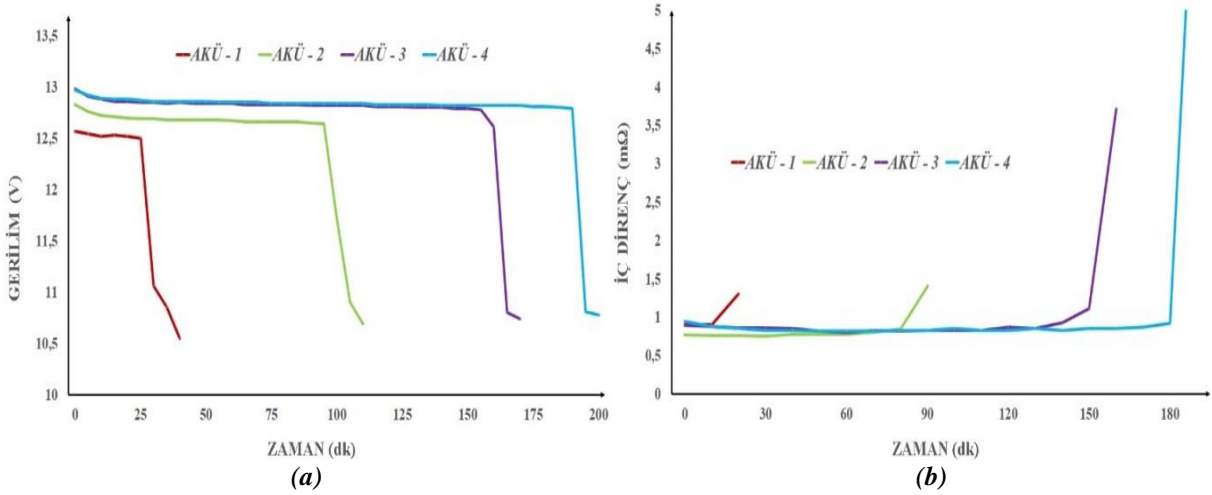
Şekil 8. DA ve farklı frekanslar ile şarj edilen akülerin, özdeş yükler üzerinden deşarj sürecine ait ölçülen gerilim, iç direnç ve sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi. Şarj yöntemleri sırasıyla: (a) DA ile, (b) 100 KHz’lik gerilim darbeleriyle, (c) 1 KHz’lik gerilim darbeleriyle, (d) 1 MHz’lik gerilim darbeleriyle.



Desülfasyon sürecini takiben, akülerin akım verebilme kapasitelerinin ölçüldüğü çalışmanın son deneysel aşaması olan özdeş yükler üzerinden deşarj sürecine geçilmiştir. Burada amaç akülerin sahip oldukları başlangıç gerilimine göre, kapasitelerini ne kadar uzun süre yüke aktarabildiklerini gözlemlemektir. Deşarj sürecinde birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü aküden elde edilen ölçüm parametrelerinin grafikleri Şekil 8’de verilmiştir.

Gerilim darbeleriyle şarj işleminin, akü sıcaklığında yaklaşık 1-2°C’lik bir farka neden olduğu gözlemlenmiştir, ancak bu durum herhangi bir olumsuzluk teşkil etmemektedir. Şarj işlemi sonrasında uygulanan deşarj sürecinde aküler, 50  $\Omega$ ’luk yüklere bağlanmış ve akım verebilme kapasiteleri ölçülmüştür. Akülerin sülfatlandırma süreci sonrası gerçekleştirilen şarj sürecinde, 13.8 V DC gerilim ile diğerlerine göre daha kısa sürede şarj olan birinci akünün, deşarj sürecinde akım verebilme kapasitesi en düşük akü olduğu görülmüştür. Bu da DC gerilim ile hızlı şarj olmasına rağmen akünün tam anlamıyla yük depolayamadığına gösterir. Diğer akülere bakıldığında, uygulanan gerilim darbelerinin frekansı arttıkça, akünün akım verebilme kapasitesinin diğer akülere göre arttığı söylenebilir. Bu durum Şekil 9a’da gösterilen karşılaştırmalı grafikte daha açık bir şekilde görülmektedir. Buna göre 2 MHz’lik, 1 MHz’lik ve 100 KHz’lik gerilim darbeleriyle desülfasyon sürecine tabi tutulan 4., 3. ve 2. aküler, sırasıyla 190 dk, 160 dk ve 100 dk’lık sürelerle kapasitelerini yüke düzgün bir şekilde aktarabilirken, DC ile şarj edilen 1. Akü ise sadece 25 dakika boyunca kapasitesini yüke aktarabilmiştir. Bu da desülfasyon amaçlı şarj sonrasında, akım verebilme kapasitelerinin, akülere uygulanan gerilim darbelerinin frekansı ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Her ne kadar sülfatlandırma sürecinden sonra DC gerilimle şarj olan 1. akünün, gerilim darbeleriyle şarj edilen diğer akülere göre daha hızlı şarj olduğu görülsede kapasitesini yüke uzun süre aktarabilme özelliği açısından diğer akülerin gerisinde kaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, elektrot plakalarında biriken sülfat moleküllerinin, elektrolit içerisine yeterince geri dönememeleri olduğu düşünülmektedir. Zira akü iç direncinin kısa sürede yükselerek akünün deşarj olması, buna bir göstergedir. Bu durum, desülfasyon sonrası deşarj sürecinde iç direnç değerlerinin karşılaştırıldığı Şekil 9b’de görülmektedir.



**Şekil 9.** Sülfatlandırma sonrasında desülfasyon amacıyla farklı şekillerde şarj edilen aküler için (a) deşarj geriliminin ve (b) akü iç direncinin zamana göre değişimi. Akü şarj yöntemleri, Akü 1: DC ile, Akü 2: 100 KHz’lik gerilim darbeleriyle, Akü 3: 1 KHz’lik gerilim darbeleriyle, Akü 4: 2 MHz’lik gerilim darbeleriyle.

Sülfatlandırma sonrası farklı şekillerde şarj edilen her bir akü için elde edilen deşarj sürelerinin, sülfatlandırma öncesi durumda bütün akülerin DC ile şarjı sonrası elde edilen ilk deşarj sürelerine (Şekil 6) göre nispeten daha düşük olduğu görülmektedir. Mesela, sülfatlandırma süreci öncesi ilk deşarjda, 4. akünün deşarj süresi yaklaşık 300 dk iken, sülfatlandırma sonrası 2 MHz’lik gerilim darbeleriyle desülfasyon uygulandıktan sonra bu değer 190 dk olmuştur. Tüm akülerde bu süre doğal olarak azalmıştır. Bunun nedeni sülfatlandırma prosesinin tüm akülerin iç dirençlerini arttırarak yüke akım verebilme kapasitelerini olumsuz yönde etkilemesidir. Ancak, deşarj süresindeki bu düşüş, hem sülfatlandırma prosesinden önceki hem de sonraki durum dikkate alınarak her bir akü için oransal olarak

incelendiğinde, 2 MHz, 1 MHz, 100 KHz'lik gerilim darbeleriyle ve DC gerilimle şarj edilen akülerde sırasıyla, %38, %24, %61 ve %82 olarak görülmektedir. Buna göre; her ne kadar sülfatlandırma sürecinden sonra, en uzun süre (190 dk) deşarj akımı verebilen akü, 2 MHz'lik gerilim darbeleriyle desülfasyona tabi tutulan 4. akü olarak görünse de, son deşarj sürecindeki akım verme süreleri, sülfatlandırma öncesindeki deşarj kapasiteleriyle oransal olarak karşılaştırıldığında, aslında en uzun süre deşarj akımı verebilen akünün, desülfasyon sürecinin 1 MHz'lik gerilim darbeleriyle gerçekleştirildiği ve son deşarj süresinde %24 azalma görülen 3. akü olduğu gözlemlenmiştir. Buradan görüldüğü üzere, sülfatlanmış aküleri şarj amacıyla 2 MHz, 1 MHz ve 100 KHz'lik frekanslarda uygulanan gerilim darbeleri ve DC gerilim arasında, aküye kapasite yönünden en olumlu katkıda bulunan 1 MHz'lik gerilim darbeleriyle işlemidir. Bunun sebebinin, akülerde, bu şekilde yüksek frekans darbeleriyle şarj olarak, küçük miktarlarda da olsa meydana gelen desülfasyon olduğu düşünülmektedir.

## **IV. SONUÇ ve ÖNERİLER**

Çalışmada, özdeş yöntemlerle suni olarak sülfatlandırma prosesine tabi tutulan aküler, doğru akım ile ve farklı frekanslardaki gerilim darbeleriyle şarj edilmiş, uygulanan farklı şarj yöntemlerinin sülfatlanmış akülerin şarj süreci üzerine etkisi, çalışmaya özgü olarak geliştirilen nesnelere interneti tabanlı bir batarya yönetim ve izleme sistemi kullanılarak incelenmiştir. Buna göre, sülfatlanmış aküleri, sabit DA gerilimle şarj etmenin, her ne kadar hızlı şarj olsalar bile, aküdeki sülfatlanma problemini çözemeyeceği ve aküdeki kapasite kaybına engel olamayacağı görülmüştür. Aküye farklı frekanslarda gerilim darbeleri uygulamanın, akü şarj süresini uzatsa bile, sülfatlanma probleminin çözümüne büyük oranda katkıda bulunabileceği görülmüştür. Yapılan deneylerde, uygulanan frekanslar arasında, desülfasyon için en uygun frekansın 1 MHz olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra deneyde uygulanmayan farklı frekanslarda yapılacak yeni çalışmalar, daha farklı sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir. Elde edilen 1 MHz değerinin, bütün sülfatlanma arızası görülen akülerde de geçerli olup olmadığının belirlenmesi için, farklı tip ve kapasiteye sahip akülerde de benzer deneylerin tekrarlanması gerekir. Çünkü plakalarda biriken kristal Sülfat yapının kalınlığı, elektrotların ne derece korozyona uğradıkları, elektrotlar arası plakanın durumu ve elektrolit yoğunluğu doğrudan iç direnci etkileyen faktörlerdir. Buna göre, farklı desülfasyon prosesi uygulanan akülerde, farklı gerilim darbeleri için daha etkin frekans değerleri elde edilebilir. Yani bu etkin frekans değeri, akü parametrelerinin bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkmakta olup, akünün sülfatlanma ve kapasite durumuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Sonuç olarak, sülfatlanma problemi görülen akülerde, doğru akım yerine yüksek frekanslı gerilim darbeleriyle aküyü şarj etmenin, akünün kapasite kaybını minimize etmek adına daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yöntemin daha geniş deney imkânları sağlanarak, sulu tip Kurşun asit, Li-Po, Ni-Cd ve Li-İyon bataryalara da uygulanması planlanmaktadır. Bu şekilde farklı deney setlerinden elde edilecek sonuçlarla, önümüzdeki süreçte arızalı bir aküye ait parametreler ölçülerek, akü için en uygun şarj veya iyileştirme yöntemi belirlenebilecektir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] K. L. Man, E. G. Lim, M. Leach, J. K. Lee, ve K. K. Kim, "Simulation and analysis of desulfator for smart battery system," in *2014 Int. SoC Design Conf. (ISOCC)*, 2014, ss. 173–174.
- [2] A. M. Cao-Paz vd., "A multi-point sensor based on optical fiber for the measurement of electrolyte density in lead-acid batteries," *Sensors*, c. 10, s. 4, ss. 2587–2608, 2010.
- [3] S. Schilling, "Ensuring lead-acid battery performance with pulse technology," in *Proc. 14th Ann. Battery Conf. on Applications and Advances*, USA, 1999, ss. 247-252.
- [4] H. Karami ve R. Asadi, "Recovery of discarded sulfated lead-acid batteries," *J. Power Sources*, c. 191, s. 1, ss. 165–175, 2009.

- [5] E. M. Laadissi, A. E. Filali, ve M. Zazi, "Impact of Pulse Voltage as Desulfator to Improve Automotive Lead Acid Battery Capacity," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, c. 8, s. 7, ss. 522–526, 2017.
- [6] I. Mizumoto, Y. Yoshii, K. Yamamoto, ve H. Oguma, "Lead-acid storage battery recovery system using on–off constant current charge and short–large discharge pulses," *Electron. Lett.*, c. 54, s. 12, ss. 777–779, 2018.
- [7] R. Jolly ve C. Rhin, "The recycling of lead-acid batteries: production of lead and polypropylene," *Resour. Conserv. Recycl.*, c. 10, s. 1–2, ss. 137–143, 1994.
- [8] T. Jiramoree, P. Paisuwanna, ve S. Khomfoi, "A multilevel converter charger utilizing superimposed pulse frequency method for prolonging lead-acid battery lifetime," in *8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technol. (ECTI) Association of Thailand - Conf. 2011*, Khon Kaen, Thailand, 2011, ss. 768-771
- [9] A. Singh, P. B. Karandikar, ve N. R. Kulkarni, "Mitigation of sulfation in lead acid battery towards life time extension using ultra capacitor in hybrid electric vehicle," *J. Energy Storage*, c. 34, s. 102219, 2021.
- [10] W. Jamratnaw, "Desulfation of lead - acid battery by high frequency pulse," in *14th Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technol. (ECTI-CON)*, Phuket, Thailand, 2017, pp. 676-679.
- [11] H. Karami, B. Masoomi, ve R. Asadi, "Recovery of discarded sulfated lead-acid batteries by inverse charge," *Energy Convers. Manag.*, c. 50, s. 4, ss. 893–898, 2009.
- [12] Y. Gang, Z. Dao-Wei, ve Z. S. S. Yan, "Experiment study on effect of different parameters pulses on the battery plate sulfuration," *Int. J. Electrochem. Sci.*, c. 9, s. 11, ss. 6431–6437, 2014.
- [13] X. D. G. Gumeru, A. B. Caberos, S. C. Huang, W. R. Liou, ve J. C. Lin, "A variable duty cycle pulse train charger for improving lead-acid battery performance," in *2017 Asian Conf. on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, Singapore, 2017, pp. 1-4,
- [14] Y. Shi, C. D. Rahn, ve C. A. Ferone, "Capacity Recovery Of A Sulfated Lead-Acid Battery Using Pressure Feedback Charging Control," in *ASME 2012 5th Ann. Dynamic Syst. and Cont. Conf. joint with the JSME 2012 11th Motion and Vib. Conf. (DSCC2012-MOVIC2012)*, Florida, USA, 2012, pp. 287–291.
- [15] M. Köseoğlu ve Ö. F. Aydın, "Nesnelerin interneti tabanlı batarya yönetim sistemi tasarımı ve uygulaması," in *III. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kong.*, Malatya, 2019, ss. 778–787.
- [16] U. Hunkeler, H. L. Truong, ve A. Stanford-Clark, "MQTT-S – A publish / subscribe protocol for wireless sensor networks," in *2008 3rd Int. Conf. on Commun. Syst. Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08)*, Bangalore, India, 2008, ss. 791–798.
- [17] P. Fremantle, B. Aziz, J. Kopecky, ve P. Scott, "Federated identity and access management for the internet of things," in *Proc. Int. Work. Secur. Internet Things (SIoT 2014)*, Wroclaw, Poland, 2014, ss. 10–17.
- [18] R. A Light, "Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol," *J. Open Source Softw.*, c. 2, s. 13, 265, 2017.
- [19] P. Bellavista, C. Giannelli, ve R. Zamagna, "The PeRvasive environment sensing and sharing solution," *Sustainability*, c. 9, s. 4, 585, 2017.