

Akü Bileşenlerinin Akü Performansına Etkilerinin İncelenmesi

İbrahim ÜLKE¹, Muhammed Ferhat ÖZTÜRK¹, Mustafa YURDAKUL¹, Yusuf Tansel İÇ^{2*}

¹ Gazi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara

¹ Başkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/09/2023
Düzeltilme: 15/11/2023
Kabul: 27/11/2023

Anahtar Kelimeler

Deney Tasarımı
Enerji
Üretim Teknolojileri
MOORA

Article Info

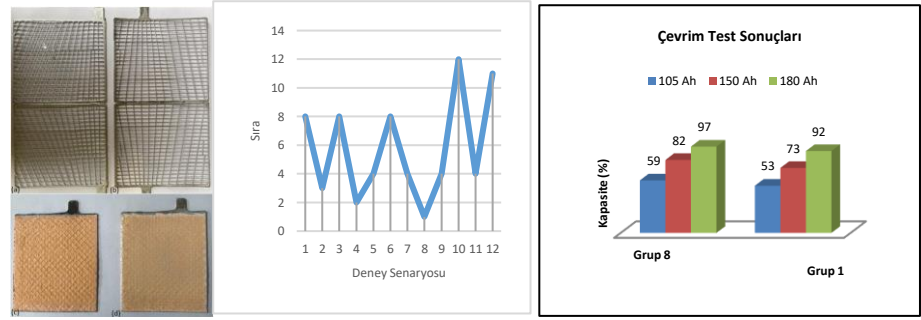
Research article
Received: 18/09/2023
Revision: 15/11/2023
Accepted: 27/11/2023

Keywords

Design of Experiment
Energy
Production Technologies
MOORA

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu makalede çok ölçütlü karar verme yöntemi olan MOORA yöntemi kullanılarak kurşun asit akü bileşenlerinde yapılacak değişikliklerle akü performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Başlangıç grubuna ve en iyi sonuçları veren gruba ait çevrim test sonuçlarına göre 105 Ah değerinde %11,3, 150 Ah değerinde %12,3 ve 180 Ah değerinde %5,4 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir. Kalsiyumlu ve uygun kalınlıkta bir ızgara ile birlikte süylenli, kostikli ve 4BS türü bir plaka kullanılarak üretilen akülerde voltaj kaybının azaldığı ve akü ömrünün uzadığı görülmüştür.



Şekil A: Ana yapı, sıralama ve performans testi sonuçları /Figure A: Main frame, ranking and performance test results

Önemli noktalar (Highlights)

- MOORA yöntemi ile akü tasarımı iyileştirilmiştir/ Battery design has been improved with the MOORA method.
- Arzu edilen performansı sağlayan parametre seti belirlenmiştir/ The parameter set that provides the desired performance has been determined.
- Çevrim testlerinde %5,4 ila %12,3 oranlarında iyileşme elde edilebilmiştir/ In cycle tests, an improvement of 5.4% to 12.3% could be achieved.

Amaç (Aim): Bu çalışmada MOORA (multi-objective optimisation on the basis of ratio analysis) yöntemi kullanılarak birden fazla akü bileşeni aynı anda incelenip en iyi akü tasarımı seçenekler arasında belirleyebilecek bir model önerilmiştir.

Originality (Özgünlük): 12 ay sonunda iç direnç ve voltaj ölçümleri yapıldıktan sonra en iyi sonucu veren parametre seti ilk uygulama olarak MOORA yöntemiyle belirlenmiş, seçilen set için XRD analizleri yapılmış ve SEM görüntüleri yorumlanmıştır. Bu sayede bütünlük bir en iyileme yaklaşımı geliştirilmiştir.

Bulgular (Results): MOORA yöntemi ile tespit edilecek en iyi sete ait SEM analizlerinde 3BS faz içeriğinin ağırlıkça %53 olduğu ve bazik sülfat taneciklerine ait boyut dağılımının 0,6 µm ile 2,27 µm aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Başlangıç grubuna ve en iyi sonuçları veren gruba ait çevrim test sonuçlarına göre 105 Ah değerinde %11,3, 150 Ah değerinde %12,3 ve 180 Ah değerinde %5,4 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir.

Sonuç (Conclusion): Bu çalışmada akü bileşenlerindeki değişikliklerin performansa etkilerinin incelenmesi hedeflenmiş olup, tribazik kurşun sülfatın, 1-4 mm uzunluğunda ve 0,2-0,8 mm çapında prizmatik kristaller oluşturduğu yapılan deney sonuçlarından görülmüştür. Tetrabazik kurşun sülfat ise 10-100 mm uzunluğunda ve 3-15 mm çapında prizmatik kristaller içermektedir. Çalışma sonucunda, kalsiyumlu ve uygun kalınlıkta bir ızgara ile birlikte süylenli, kostikli ve 4BS türü bir plaka kullanılarak üretilen akülerde voltaj kaybının azaldığı ve akü ömrünün uzadığı görülmüştür.



Akü Bileşenlerinin Akü Performansına Etkilerinin İncelenmesi

İbrahim ÜLKE¹, Muhammed Ferhat ÖZTÜRK¹, Mustafa YURDAKUL¹, Yusuf Tansel İÇ^{2*}

¹ Gazi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara

² Baskent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/09/2023
Düzeltilme: 15/11/2023
Kabul: 27/11/2023

Anahtar Kelimeler

Deney Tasarımı
Enerji
Üretim Teknolojileri
MOORA

Öz

Kurşun asit akülerde çevrim ömrü ızgara kalınlığı, ızgara malzemesi, plaka hamur kimyasalı gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörlerin akü performansına olan etkileri önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada plaka yapısında sülyen ve/veya kostikli asit kullanımının, tanecik yapısının, plaka kalınlığının, ızgara yapısında kullanılan antimuanın ve kalsiyumun etkileri açıklanmaya çalışılmıştır. Birçok değişkenin etkisinin incelendiği bu makalede çok ölçütlü karar verme yöntemi olan MOORA yöntemi kullanılarak kurşun asit akü bileşenlerinde yapılacak değişikliklerle akü performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonuçları daha yüksek oranlı 4BS tanecikli iç yapıya sahip plakaların 3BS tanecik yoğunluklu iç yapıya sahip plakalara kıyasla akü performansında artış sağladığını göstermiştir. Ayrıca ızgara yapısında katkı maddesi olarak Kalsiyum (Ca) yerine Antimuan (Sb) kullanımının kurşun asit akülerin iç direncinde düşüşe sebep olduğu ve bu sayede çevrim ömrünün artmasını sağladığı belirlenmiştir. Çalışma sonunda en iyi performans değerlerini veren kombinasyonun iç yapı analizleri yapılmış ve geleneksel kurşun asit akülerle kıyaslanmış, iç yapıda yapılacak değişiklikler ile akü iç direncinin azaltılabileceği ortaya konulmuştur. En iyilenen gruba ait SEM analizlerinde 3BS faz içeriğinin ağırlıkça %53 olduğu ve bazik sülfat taneciklerine ait boyut dağılımının 0,6 µm ile 2,27 µm aralığında bulunduğu tespit edilmiştir. Başlangıç grubuna ve en iyi sonuçları veren gruba ait çevrim test sonuçlarına göre 105 Ah değerinde %11,3, 150 Ah değerinde %12,3 ve 180 Ah değerinde %5,4 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir.

Investigation of the Effects of Battery Components on Battery Performance

Article Info

Research article
Received: 18/09/2023
Revision: 15/11/2023
Accepted: 27/11/2023

Keywords

Design of Experiment
Energy
Production Technologies
MOORA

Abstract

The cycle life of lead-acid batteries varies depending on various factors such as grid thickness, grid material, and plate paste chemicals. The effects of these factors on battery performance is an important research subject. In this study, the effects of the use of lead and/or caustic acid in the plate structure, grain structure, plate thickness, antimony, and calcium used in the grid structure were to be explained. This research article, where the effects of many variables are examined, aims to improve battery performance by making changes to lead acid battery components using the MOORA, a multi-criteria decision-making method. The study results showed that plates with an internal structure with a higher ratio of 4BS grains increase battery performance compared to plates with an internal structure with 3BS grain density. In addition, it has been determined that the use of Antimony (Sb) instead of Calcium (Ca) as an additive in the grid structure causes a decrease in the internal resistance of lead acid batteries and thus increases the cycle life. At the end of the study, internal structure analyses of the combination that gave the best performance values were made and compared with traditional lead acid batteries, and it was revealed that the internal resistance of the battery could be reduced with changes to the internal structure. The SEM analysis of the most improved group determined that the 3BS phase content was 53% by weight, and the size distribution of basic sulfate particles was between 0.6 µm and 2.27 µm. According to the cycle test results of the initial group and the group with the best results, an improvement of 11.3% at 105 Ah, 12.3% at 150 Ah, and 5.4% at 180 Ah was achieved.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Aküler kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine ya da elektrik enerjisini kimyasal enerjiye birçok sefer dönüştürebilen cihazlar olarak tanımlanır [1]. Akü özellikle otomobillerde temelde ateşleme, yetersiz

durumda alternatörün elektrik gereksinimini karşılama ve dalgalanmalara karşı elektrik donanımının korunması gibi hayati işlemleri gerçekleştiren cihazdır. Elektrolit tiplerine göre aküler; kuru ve sulu olarak sınıflandırılır. Elektrolit

bir pasta haline getirilerek sabitlenmiş ise akü kuru akü, sıvı halde bulunuyorsa sulu akü adını alır. Şarj olmuş bir aküde (+) artı plakada kurşun dioksit (PbO_2), (-) eksi plakada ise süngerimsi gözenekli yapıya sahip kurşun (Pb) bulunur [2]. Deşarj işlemi sırasında kurşun dioksit ve kurşun, kurşun sülfata dönüşür. Geleneksel bir akümülatörün parçaları ve kritik bileşenleri plakalar, ayıraç, kutu ve kapak, kutup başları, gaz kapakları (buşonlar) ve elektrolittir [3, 4].

Kurşun asit aküler en eski akü çeşitlerinden biridir. Güvenilirlik, düşük maliyet gibi nedenlerden dolayı günümüzde hala en yaygın olarak kullanılan akü tipi olmasına rağmen lityum-iyon aküler gibi yeni nesil akülerle kıyaslandıkları zaman çeşitli eksikliklere sahiptirler. Bu eksikliklerin en önemlilerinden biri pratik enerji yoğunluklarının (123 Wh/kg) teorik enerji yoğunluklarına ($30-40 \text{ Wh/kg}$) kıyasla çok düşük olmasıdır [5]. Son yıllarda kurşun-asit akülerin enerji yoğunluğunu artırma üzerine yapılan çalışmalarda en sık tercih edilen yöntemlerden biri kurşun plakaları daha hafif malzemelerden imal edilmiş plakalarla değiştirmektir. Liu vd. [5] bu amaçla yüksek korozyon dayanımını da dikkate alarak titanyum alaşımlarını kullanırken Yang vd. [6] kalay-bronz alaşımını tercih ederek 7 Wh/kg 'lık bir artış elde etmişlerdir. Ancak, karşı plakada daha hızlı aşınma ve akü ömründe azalma gibi çeşitli olumsuzluklarla karşılaşmışlardır. Bunların yanında kurşun asit akülere korozyon direnci kazandırmak, aşınma dayanımı sağlamak veya hafifletmek amacıyla grafit oksit [7], monosodyum glutamat [8], borik asit [9], karbon [10] veya alüminyum sülfat [11] gibi çeşitli takviye malzemelerinin kullanılarak etkilerinin incelendiği çalışmalarda literatürde mevcuttur. Özellikle grafit oksit katkısı sayesinde pek çok iyileştirmeler yapılmış olsa da bu iyileştirmeler pozitif elektrotta aşırı aşınma gibi olumsuzlukları da beraberinde getirmiştir. Literatür incelendiğinde kurşun asit akü bileşenlerinin bazılarında katkı maddeleri kullanarak çeşitli iyileştirmeler yapmaya yönelik pek çok çalışma mevcut olmasına rağmen birden fazla akü bileşenini dikkate alarak eniyilemeyi hedefleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin bu çalışmalardan birinde Göçmen [12] pil paketinde dağıtıcı kanalın şeklinin akış homojenliğini nasıl etkilediği araştırmıştır. Çalışmada önerilen tasarım, kanallarda en fazla %0,81 hava debi sapsması sağlayarak, homojen bir hava dağılımı sunabilmiştir. Celen ve Kaba [13] ise, hava akış yönlendirici kanatların kullanımının prizmatik lityum-iyon batarya sıcaklığı üzerine etkisinin farklı çalışma şartlarında deneysel ve sayısal olarak

incelemişlerdir. Çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan 20 Ah kapasiteye sahip torba tipi bir prizmatik lityum-iyon bataryanın termal yönetimi için akışkan olarak havanın kullanılması durumunda; akışkan giriş hızının ($0,5 \text{ m/s}$, 1 m/s , $1,5 \text{ m/s}$), deşarj hızının (2C, 3C, 4C) ve giriş sıcaklığının (15°C , 25°C , 35°C) batarya yüzey sıcaklığı ve farkına, ısı transfer hızına etkisi araştırılmıştır. Çetin vd. [14] ise 18 adet silindirik lityum iyon pilin oluşturduğu bir batarya donanımını, 1,5 mm cidar kalınlığındaki bakır plakalardan üretilmiş olan S tipi bir sıvı soğutma kanalı içerisine yerleştirerek sıvı soğutmalı sistemin soğutma performansını analiz etmiştir. Wu vd. [15] PV akü sistemlerinde yaşam döngüsü maliyetini en aza indirmek için bir optimizasyon modeli geliştirerek en iyi batarya kapasitesini tespit etmeye çalışmıştır. Chen vd. [16] akış düzeninin yeniden tasarlayarak hava soğutmalı sistemin soğutma verimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sezici vd [17] Chen vd [16] çalışmasından farklı olarak silindirik yapıdaki 18 adet lityum iyon pil hücrelerinden oluşan pil takımı için hava soğutmalı batarya kutusu tasarlayarak soğutma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Ye vd. [18], iki soğutma plakası içeren bir lityum demir fosfat pil modülünün ana parametrelerini optimize etmek için ortogonal deneysel tasarım yöntemini uygulamışlardır. Dong vd. [19], ısı değişim kapasitesini korumak için doğal hava soğutmasını kullanan basit bir soğutma modunu kullanarak, metal levha güç akü kutusu yapısını daha hafif bir çerçeve yapısına optimize etmek için akü paketinin koruma seviyesini geliştiren bir çalışma sunmuşlardır. Akinlabi ve Solyalı [20], kapsamlı tarama makalelerinde çok az sayıda araştırmacının, pil tasarımı optimizasyonuna birden fazla işlevsel kısıtlama içeren çok amaçlı optimizasyon modellerini uyguladığını belirterek bu aradaki araştırma boşluğuna dikkat çekmişlerdir. Bunun yanında Tajik vd. [21] çalışmalarında çeşitli katot malzemeleri ekonomiklik, çevrecilik ve taktiksellik alt başlıklarında birden fazla (SAW-AHP, SAW-CILOS, SAW-AHP-CILOS, TOPSIS-AHP, TOPSIS-CILOS, TOPSIS-AHP-CILOS, CoCoSo-AHP, CoCoSo-CILOS, CoCoSo-AHPCILOS, MARCOS-AHP, MARCOS-CILOS ve MARCOS-AHP-CILOS) çok kriterli karar verme yöntemi ile incelenmiş ve yöntemler birbirleriyle karşılaştırılmış, akü bileşenleri için herhangi bir en iyileme çalışması yapılmamıştır.

Bu çalışmada MOORA (multi-objective optimisation on the basis of ratio analysis) yöntemi kullanılarak birden fazla akü bileşeni aynı anda incelenip en iyi akü tasarımını seçenekler arasından

belirleyebilecek bir model önerilmiştir. Bunun için öncelikle yaygın olarak kullanılmakta olan kurşun-asit akü bileşenleri belirli alternatifler (Tablo 1) dikkate alınarak tek tek karşılaştırılmış ve bu alternatifleri de içeren 12 farklı inceleme grubu oluşturulmuştur. Bu grupların 12 ay sonunda iç direnç ve voltaj ölçümleri yapıldıktan sonra en iyi sonucu veren grup belirlenmiş ve bu sonuç MOORA yönteminde elde edilen analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Çalışma sonunda en iyi değerleri veren gruba ait XRD analizleri yapılmış ve SEM görüntüleri yorumlanmıştır.

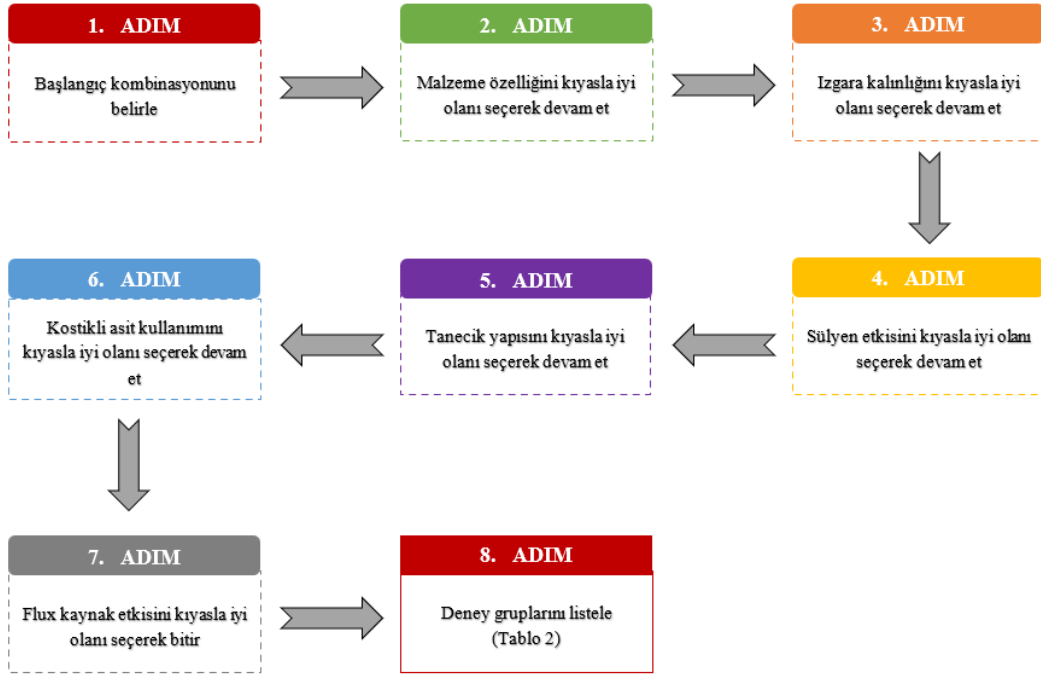
2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERYAL VE METOD)

Kurşun-Kalsiyum alaşımlı akümülatörlerde oluşması beklenen korozyon pozitif ızgaralarda gelişir ve negatif ızgaralar korozyonun temel nedeni olmamaktadır. Korozyon direncinin artırılması için kalay, gümüş gibi elementler alaşıma eklenebilmektedir. Ancak bu durum negatif ızgara alaşım içeriklerinde Hidrojen oluşumuna neden olarak akümülatörde su kaybını artırmaktadır. Su kaybı yüksek olan ve korozyon direnci düşük olan akümülatörlerde çevrim ömürleri tamamlanamamaktadır.

Tablo 1. Bağımsız değişkenler (Independent variables)

Katkı Madde Özelliği	Malzemenin Özelliği	Izgara Kalınlığı
I.Sülyenli plaka	1.Kurşun-Antimuan alaşımlı ızgara	a)0,8 mm
II.Sülyensiz plaka	2.Kurşun-Kalsiyum alaşımlı ızgara	b)1,1 mm
III.3BS tanecik yapılı		
IV.4BS tanecik yapılı		
V.Kostikli asit kullanımı		
VI.Flux kaynak		

Bu nedenle tasarımı iyileştirilecek ızgaranın su kaybı düşük, direnci yüksek ve dolayısıyla akümülatör ömrü uzun olmalıdır. Bu çalışmada Tablo 1’de verilen bağımsız değişkenlerin akü performansına etkileri çok ölçütlü bir karar verme yöntemi olan MOORA yöntemi kullanılarak incelenmektedir.



Şekil 1. Deney gruplarının oluşturulması süreci akış şeması (Flow chart of the process of creating experimental groups)

Tablo 2. Deney grupları (Experimental groups)

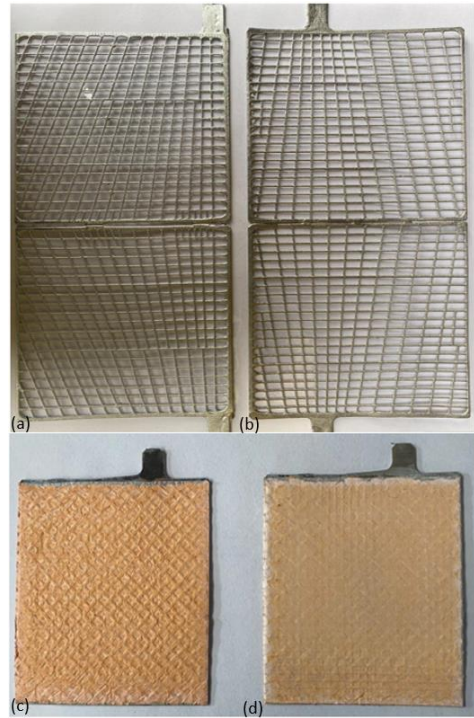
1. Karşılaştırma		2. Karşılaştırma		3. Karşılaştırma		4. Karşılaştırma		5. Karşılaştırma		6. Karşılaştırma	
Grup 1	Grup 2	Grup 3	Grup 4	Grup 5	Grup 6	Grup 7	Grup 8	Grup 9	Grup 10	Grup 11	Grup 12
1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a
II	II	II	II	I	II	I	I	I	I	I	I
III	III	III	III	III	III	III	IV	III	III	III	III
V	V	V	V	V	V	V	V	V	-	V	V
VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	-

Çalışma kapsamında öncelikle birer aylık bekleme periyotlarında ikişerli kıyaslamalar yapılarak Tablo 1’de verilen her bir bağımsız değişken ayrı ayrı ele alınmış ve incelenen değişkenlerden hangisinin Kurşun-Asit aküler açısından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Çalışma başlangıcında Grup 1 olarak sıklıkla kullanılan Kurşun-Asit akülerdeki kombinasyon seçilmiştir. İlk karşılaştırmada değişken olarak malzeme özelliği ele alınmış ve Grup 1 ile Grup 2 kendi arasında kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonunda antimuanlı ızgaraya sahip olan Grup 1’den daha iyi sonuçlar elde edildiği için bir sonraki karşılaştırmalarda hep antimuanlı malzeme kullanılmıştır. Diğer karşılaştırmalarda da Şekil 1’de verilen işlem basamakları uygulanarak Tablo 2’de görülen 12 farklı deney grubu elde edilmiştir. Deney gruplarının elde edilmesinden sonra çeşitli çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak en iyi deney grubu belirlenmiştir.

Tablo 2’de sunulan kombinasyonların kıyaslanmasında her kombinasyona ait akünün üçer adet üretimi yapıldıktan sonra aküler 12 ay boyunca herhangi bir şarj/deşarj işlemine tabi tutulmadan aynı ortamda bekletilmiş ve bu süre sonunda voltaj ve iç direnç değerlerinin ortalamaları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda en iyi değerleri veren grubun iç yapı özellikleri incelenmeye çalışılmış ve hangi deney grubunun iki farklı performans ölçütünde en iyi sonucu sunduğu MOORA yöntemi ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Deney gruplarının oda sıcaklığında 12 aylık bekleme süresinden sonra test edilebilmesi için her gruba ait üretimler gerçekleştirilmiş, katkı maddesi ve alaşım elementine bağlı olarak çeşitli renk farklılıkları gözlemlenmiştir (Şekil 2). Kurşun-antimuan alaşımli ızgara üretimlerinde %1,8 oranında antimuan kullanılırken, kurşun-kalsiyum

alaşımli ızgaralarda kalsiyum oranı %0,09 olarak belirlenmiştir. Bütün ızgara dökümleri 470 °C’de yapılmış ve soğutma işlemleri 150 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Çekirdekleme katkısı ile (4BS) üretimi gerçekleştirilen pozitif plakalarda elde edilen morfolojinin kür prosesinde de oluşumunu sağlamak ve taneciklerin kontrolsüz büyümesini engellemek amacı ile düşük sıcaklıkta kürlenme (soft curing) işlemi gerçekleştirilmiştir. Çevrim testleri ise TS EN 50342-1 standardına uygun olarak 16 saat süreyle şarj edilmiş aküler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Tablo 5).



Şekil 2. (a) Kurşun-Antimuan alaşımli ızgara, (b) Kurşun-Kalsiyum alaşımli ızgara, (c) Sülyenli plaka, (d) Sülyensiz plaka (a)Lead-Antimony alloy grid, (b) Lead-Calcium alloy grid, (c) Plate with lead, (d) Plate without lead)

3. BULGULAR (RESULTS)

12 ay sonunda elde edilen voltaj ve iç direnç performans sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3 incelendiğinde en iyi sonucun 8. Deneyde elde edildiği görülebilmektedir.

Tablo 3. 12 ay sonunda voltaj ve iç direnç değerleri (Voltage and internal resistance values after 12 months)

DENEY GRUPLARI	VOLTAJ (V)	İÇ DİRENÇ (mohm)
1	12,345	3,48
2	12,501	3,46
3	12,345	3,48
4	12,516	3,42
5	12,357	3,47
6	12,345	3,48
7	12,357	3,47
8	12,601	3,39
9	12,357	3,47
10	12,21	3,54
11	12,357	3,47
12	12,301	3,49

Diğer taraftan Tablo 3'te verilen deney sonuçları için MOORA yöntemi uygulanarak hangi deneyde en iyi yanıtların alındığı analiz edilmiştir (Tablo 4). MOORA yönteminin uygulama adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1: Karar matrisi oluşturulur.

Karar matrisinde satırlarda derecelendirilecek alternatifler ($i=1, \dots, m$, deneyler), sütunlarında ise değerlendirme kriteri ($j=1, \dots, n$) yer alır. Matriste, a_{ij} ise alternatifin ilgili ölçütteki değerini gösterir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2: Normalize karar matrisi oluşturulur.

Normalize matris, Eş. (2) ile oluşturulur.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (2)$$

Ardından, R normalize karar matrisi elde edilir:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Adım 3: Ölçütlerin ağırlıkları 1-10 ölçeği ile belirlenir. 1, en düşük, 10 ise en yüksek değeri gösterir.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Adım 4. MOORA sıralama indeksi hesaplanır [22-23]:

$$Y_{ij}^* = \sum_{j=1}^t V_{ij} - \sum_{j=t+1}^n V_{ij} \quad (5)$$

Eşitlikte t , değerinin maksimum olması istenen kriter sayısıdır, $(n-t)$ ise değerinin minimum olması istenen kriter sayısıdır, Y_{ij}^* ise deney senaryonun sıralama puanıdır.

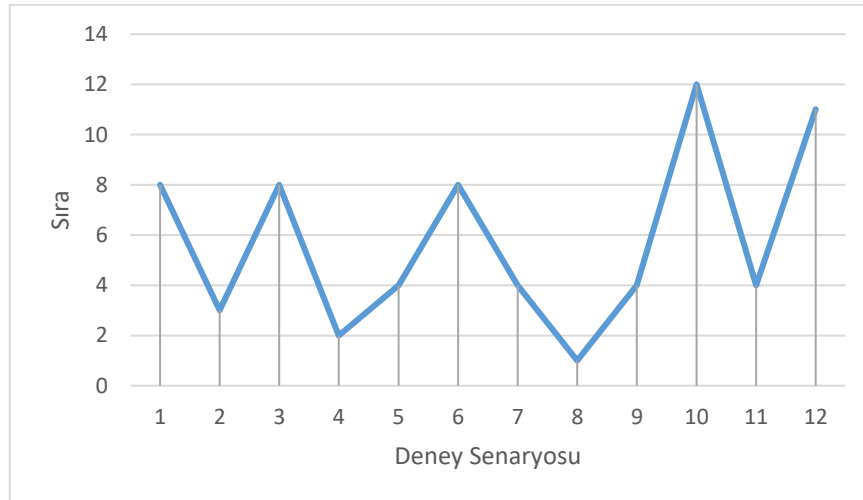
Tablo 4'te voltaj kriterinin ağırlığı 10, iç direnç kriterinin ağırlığı 1 olarak alınıp bir sıralama gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Sıralama sonuçlarında 8 numaralı deneyin ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Ağırlıklar voltaj kriterinin ağırlığı 1, iç direnç kriterinin ağırlığı 10 olarak ve her iki kriterin eşit ağırlıklı alındığı senaryolarla tekrar sıralandığında sıralama sonuçlarının değişmediği görülmektedir. Bu durum bize öncelikler değişse de yine 8. Deney grubun ilk sırada yer alabildiğini göstermektedir.

Tablo 4. MOORA uygulama Sonucu (Application result of the MOORA)

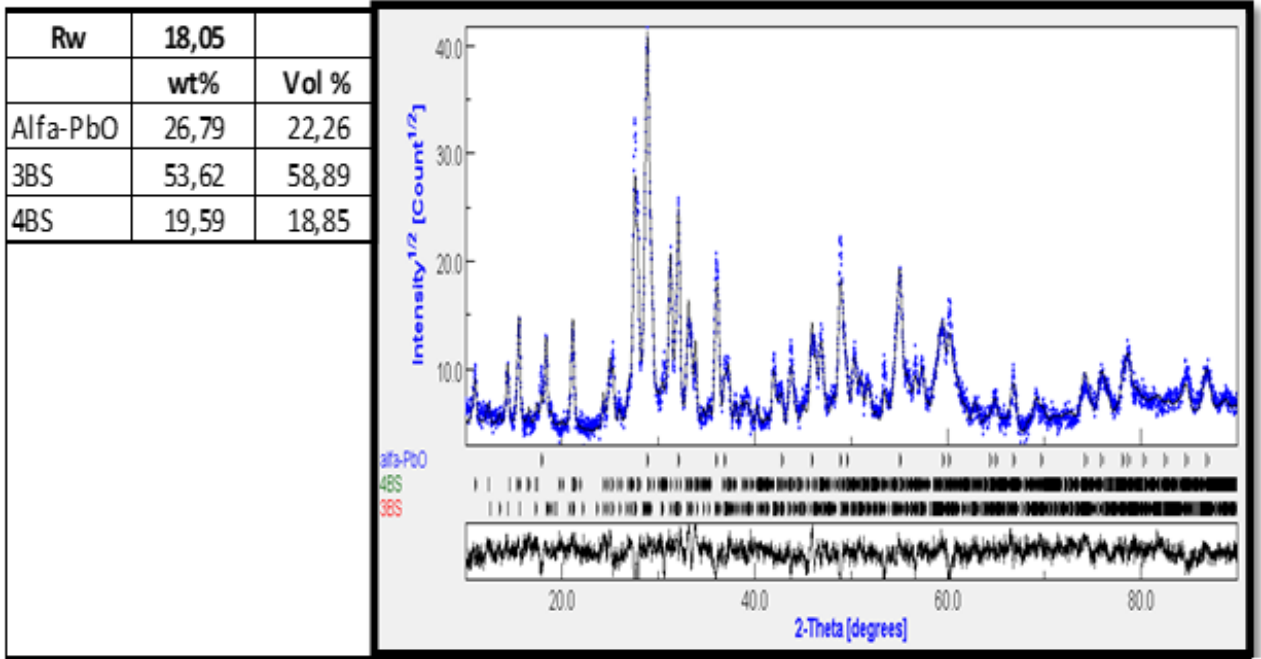
DENEY GRUPLARI	VOLTAJ (V)	İÇ DİRENÇ (mohm)	Normalize Matris		Ağırlıklı Normalize Matris		Y _{ij} *	Sıra
1	12,345	3,48	0,2878	0,2895	0,2616	0,0263	0,2353	8
2	12,501	3,46	0,2914	0,2878	0,2649	0,0262	0,2388	3
3	12,345	3,48	0,2878	0,2895	0,2616	0,0263	0,2353	8
4	12,516	3,42	0,2918	0,2845	0,2652	0,0259	0,2394	2
5	12,357	3,476	0,2881	0,2891	0,2619	0,0263	0,2356	4
6	12,345	3,48	0,2878	0,2895	0,2616	0,0263	0,2353	8
7	12,357	3,476	0,2881	0,2891	0,2619	0,0263	0,2356	4
8	12,601	3,39	0,2938	0,2820	0,2671	0,0256	0,2414	1
9	12,357	3,476	0,2881	0,2891	0,2619	0,0263	0,2356	4
10	12,21	3,54	0,2846	0,2945	0,2588	0,0268	0,2320	12
11	12,357	3,476	0,2881	0,2891	0,2619	0,0263	0,2356	4
12	12,301	3,49	0,2868	0,2903	0,2607	0,0264	0,2343	11
		Ağırlık	10	1	11			
		Normalize Ağırlık	0,909091	0,090909				

Tablo 5. X grubu (3BS) ve Y grubu (4BS) akülere ait fonksiyonel test sonuçları (Functional test results of group X (3BS) and group Y (4BS) batteries)

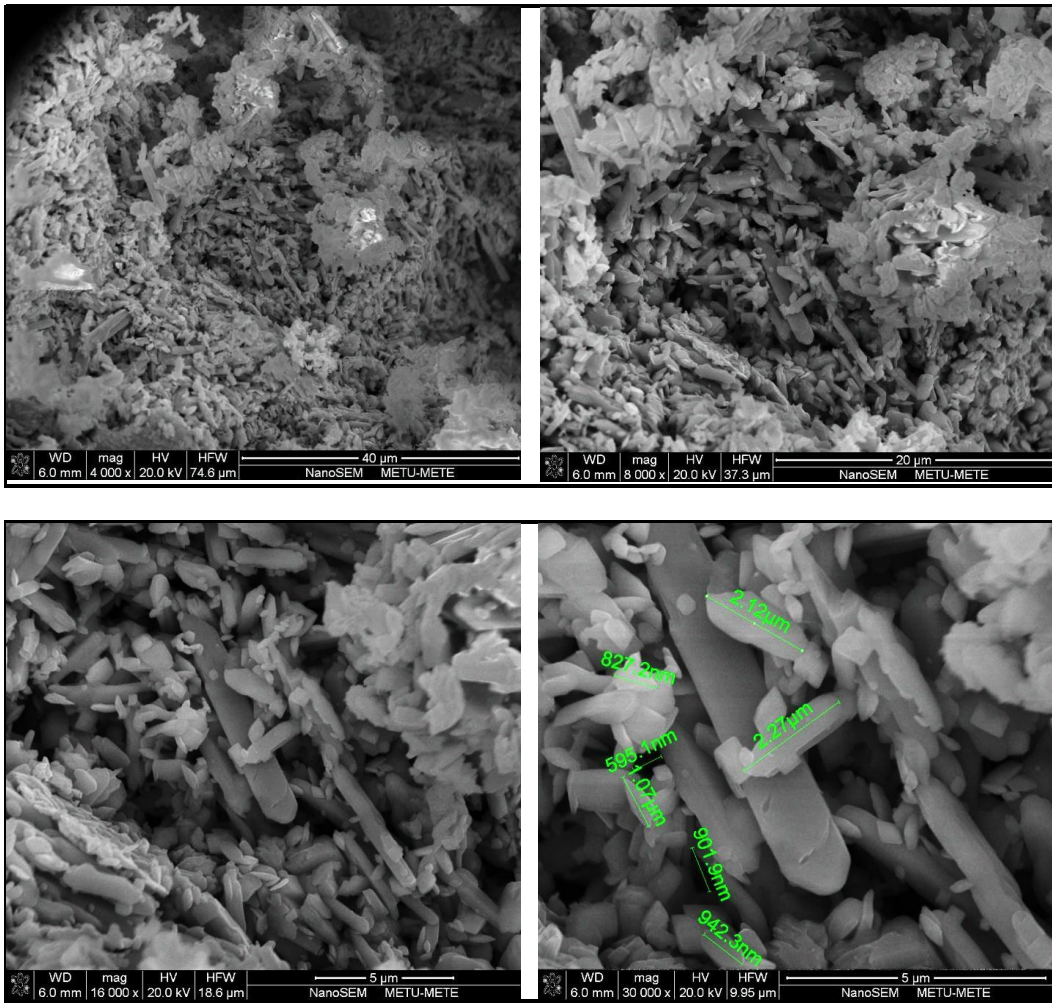
Plaka tipi	Katalog Kapasitesi (Ah/CCA)	Kod	Akü Grubu	Tasarım Ağırlığı	Ağırlık	1.C20 (Ah) Kapasite	CCA1		2.C20 (Ah) Kapasite	CCA2		3. C20 (Ah) Kapasite	CCA3	
							In 10 s, V> 7,5	6V, t> 90s		In 10 s, V> 7,5	6V, t> 90s		In 10 s, V> 7,5	6V, t> 90s
5x5/ 115	50/420	B	Y	12.4	13,184	52,57	8.33	198	49,87	8,43	185	48,22	7,84	126
		B	Y		13,184	55,968	8.08	171	52,217	8,41	178	51,887	Çevrim testi tamamlanmadı	
		A	X		13,184	54,59	7.92	218	56,75	7,77	183	52,49		8,14



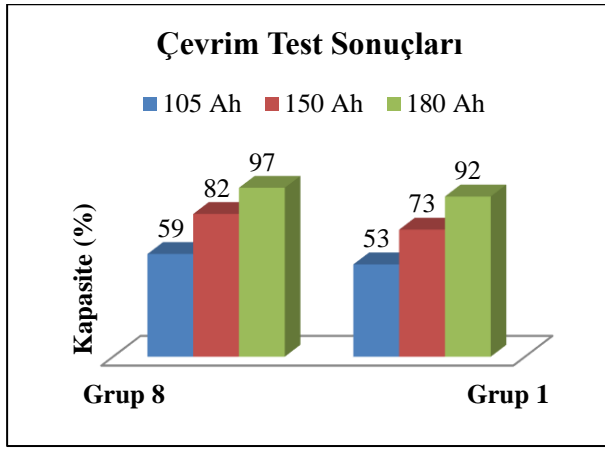
Şekil 3. Sıralama sonuçlarının grafik gösterimi (Graphical representation of ranking results)



Şekil 4. En yüksek verimi veren gruba ait XRD sonuçları (XRD results of the group with the highest efficiency)



Şekil 5. 8. Gruba ait SEM görüntüleri (SEM images of the group 8)



Şekil 6. Başlangıç grubu ve en iyilenen aküye ait çevrim test sonuçları (Cycle test results of the starting group and the optimized battery)

Düşük sıcaklıkta kürlenmiş ve çekirdekleştirme ajanı ile üretilen 4BS Plakaların kür programı etkisini incelemek için kürlenmiş 4BS Standart Plakalardan ve standart 3BS yapıları Plakalardan oluşan fazları tespit etmek için XRD (Şekil 4), mikro yapıyı incelemek için SEM (Şekil 5) ve gözeneklilik oranını incelemek için civalı porozimetre analizleri yapılmıştır.

Standart (3BS) kür programı ile kürlenme sonucunda 4BS faz oranının %72 civarında olduğu gözlemlenmiştir. SEM analizi sonucunda bazik sülfat taneciklerine ait boyut dağılımının 3,76 µm ile 8,65 µm aralığında olduğu görülmüştür. Tanecik boyutlarının B grubu Plakalara göre daha büyük olması, kür sıcaklığının tanecik büyümesi üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Standart plakaların 3BS faz içeriğinin ağırlıkça %53 olduğu (Şekil 4), hamur karma operasyonu esnasında gözlenebilecek bölgesel sıcaklık artışına dayalı olarak %19 oranında 4BS fazı içerdiği görülmüştür. SEM analizi incelendiğinde oluşan bazik sülfat taneciklerine ait boyut dağılımının 0,6 µm ile 2,27 µm aralığında bulunduğu ve bu durumun literatürde 1 ile 4 µm aralığında değişen boyutlara sahip 3BS morfolojisi özelliğine sahip üretimin gerçekleştirildiğini göstermektedir. Cıva porozimetresi ile analiz edilen parçacıklar arası gözeneklilik oranı ise küçük tanecik yapısına bağlı olarak %32,12 olarak gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

Başlangıç grubu olan Grup 1 ve en iyi sonuçları veren Grup 8'e ait çevrim test sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Test sonuçlarına göre 105 Ah değerinde yaklaşık olarak %11,3 150 Ah değerinde %12,3 ve 180 Ah değerinde yaklaşık olarak %5,4'lük bir iyileştirme elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre üretilecek akülerde gözlenen çevrim test sonuçları

bazlı kapasite artışları akü ömrünün uzamasına bağlı olarak ömür bazlı maliyet kazançları elde edilmesine de aynı oranda katkı sağlayabilecektir. Burada ürün bazlı bir maliyet hesaplaması ticari ürün odaklı nedenlerle detaylı olarak gösterilememekle birlikte; elde edilen kapasite artışları baz alınarak birim fiyatlar bazında önemli bir iyileşmenin gerçekleştirilebildiği söylenebilir.

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada akü bileşenlerindeki değişikliklerin performansa etkilerinin incelenmesi hedeflenmiş olup, tribazik kurşun sülfatın, 1-4 mm uzunluğunda ve 0,2-0,8 mm çapında prizmatik kristaller oluşturduğu yapılan deney sonuçlarından görülmüştür. Tetrabazik kurşun sülfat ise 10-100 mm uzunluğunda ve 3-15 mm çapında prizmatik kristaller içermektedir. Çalışma sonucunda, kalsiyumlu ve uygun kalınlıkta bir ızgara ile birlikte sülyenli, kostikli ve 4BS türü bir plaka kullanılarak üretilen akülerde voltaj kaybının azaldığı ve akü ömrünün uzadığı görülmüştür.

Çalışmada oluşturulan 12 adet deney setinden elde edilen sonuçlar MOORA yöntemi ile değerlendirilmiş olup, 8 numaralı deney birinci sırada çıkmıştır. Bu sayede çok ölçütlü karar verme yöntemi ile elde edilen sonuç doğrulanarak, 8 numaralı deney grubunun seçenekler içerisinde en iyi sonucu veren grup olduğu görülmüştür.

Çalışmamızda yapılan testlerin maliyet durumu gözetilerek bir deney tasarımı metodolojisine dayalı analiz gerçekleştirilmemiştir. Deney gerçekleştirilebilme sayısı sınırlı bir sayıda olduğu için oldukça az deneyle bir en iyileme çalışması gerçekleştirme gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu nedenle deney sonuçları MOORA yöntemi ile analiz edilerek en iyi parametre değerleri bulunmaya çalışılmıştır. İleriki çalışmalarda deney tasarımı metodolojisi kullanılarak faktöriyel tasarım, yanıt yüzeyi metodu, Taguchi Yöntemleri gibi deney tasarım metodlarıyla çalışmalar yapılarak bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

İbrahim Ülke: Deney planı ile sonuçların analizi ve makalenin yazım işlemleri.

Experimental plan, analysis of the experimental results, and performing of the writing process.

Muhammed Ferhat Öztürk: Deneylerin yapılması, sonuçların analizi ve makalenin ilk halinin oluşturulması.

Conducting the experiments, analyzing the results, and performing the writing of the draft.

Mustafa Yurdakul: Sürecin yönetimi, konsept tasarımı, sonuçların analiz ve yorumlanması, yazım kontrolü.

Supervising the process, conceptual design, analysis and interpreting of the results, and editing.

Yusuf Tansel İç: Sürecin yönetimi, konsept tasarımı, sonuçların analiz ve yorumlanması, makalenin yazımı ve MOORA yönteminin uygulanması

Supervising the process, conceptual design, analysis, and interpretation of the results, performing the writing process, and the application of the MOORA method.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cho, J., Jeong, S., & Kim, Y. Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015; 48, 84-101.
- [2] Jafari, H., & Rahimpour, M. R. Pb acid batteries. *Rechargeable Batteries: History, Progress, and Applications*. 2020; 17-39.
- [3] Czerwiński, A., Wróbel, J., Lach, J., Wróbel, K., & Podsadni, P. The charging-discharging behavior of the lead-acid cell with electrodes based on carbon matrix. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018; 22: 2703-2714.
- [4] Akar, A. Oomobiller için yenilikçi bir akü koruma cihazı tasarımı, Yüksek Lisans tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, 2020.
- [5] Liu, D., Lin, N., Zhang, W., Wang, Y., You, Q., Liu, Z., ... & Lin, H. Development of titanium-based positive grids for lead acid batteries with enhanced lightweight, corrosion resistance and lifetime. *Journal of Energy Storage*. 2023; 73:108880.
- [6] Yang, T., Qian, S., Luo, Y., Wang, X., & Wang, Z. Direct re-usability of lead-plated tin bronze as negative plate for lightweight lead-acid battery. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*. 2021; 18(3): 030906.
- [7] Zhang, Y., Zhou, C. G., Yan, X. H., Gao, H. L., Gao, K. Z., & Cao, Y. Synthesis of Nafion-reduced graphene oxide/polyaniline as novel positive electrode additives for high performance lead-acid batteries. *Electrochimica Acta*. 2023;466: 143045.
- [8] Chen, Z., Cao, J., Rao, Y., An, L., Yang, Y., Zhou, S., & Wu, L. Monosodium glutamate as an effective electrolyte additive in lead acid battery. *Electrochimica Acta*. 2023; 458: 142492.
- [9] Romero, A. F., Tomey, R., Ocón, P., Valenciano, J., & Fricke, H. Improvement of positive plate grid corrosion resistance through two methods of boric acid addition to lead-acid battery electrolyte. *Journal of Energy Storage* 2023; 72: 108302.
- [10] Yanamandra, K., Pinisetty, D., & Gupta, N. Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 173: 113078.
- [11] Chen, Z., Li, J., Yu, J., Wu, L., Zhou, S., Rao, Y., & Cao, J. The critical role of aluminum sulfate as electrolyte additive on the electrochemical performance of lead-acid battery. *Electrochimica Acta*. 2022; 407: 139877.
- [12] Göçmen, S. Numerical and experimental investigations of an air-cooled battery thermal management system, Yüksek Lisans tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2021.
- [13] Celen, A., Kaba, M. Y. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2021; 33(1): 49-61.

- [14] Çetin, İ., Sezici, E., Karabulut, M., Avci, E., & Polat, F. A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023; 237(3): 989-1004.
- [15] Wu, Y., Liu, Z., Liu, J., Xiao, H., Liu, R., & Zhang, L. Optimal battery capacity of grid-connected PV-battery systems considering battery degradation. *Renewable Energy*. 2022; 181: 10-23.
- [16] Chen, K., Wu, W., Yuan, F., Chen, L., & Wang, S. Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern. *Energy*. 2019; 167: 781-790.
- [17] Sezici, E., Cetin, I., & Polat, F. Design and Experimental Investigation of Air-Cooled Battery Thermal Management System for Electric Vehicles. *Journal of Engineering Research and Applied Science*. 2022; 11(2): 2062-2077.
- [18] Ye, B., Rubel, M. R. H., & Li, H. Design and optimization of cooling plate for battery module of an electric vehicle. *Applied sciences*. 2019; 9(4): 754.
- [19] Dong, S., Lv, J., Wang, K., Li, W., & Tian, Y. Design and optimization for a new locomotive power battery box. *Sustainability*. 2022; 14(19): 12810.
- [20] Akinlabi, A. H., & Solyali, D. Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; 125: 109815.
- [21] Tajik, M., Makui, A., & Tosarkani, B. M. Sustainable cathode material selection in lithium-ion batteries using a novel hybrid multi-criteria decision-making. *Journal of Energy Storage*. 2023; 66:, 107089.
- [22] Brauers, W. K. M., E. K. Zavadskas, Z. Turskis, and T. Vilutiene. Multi Objective Contractor's Ranking by Applying the Moora Method. *Journal of Business Economics and Management*. 2008; 9 (4): 245–255.
- [23] İç, Y. T., and S. Yıldırım. Improvement of a Product Design Using Multi Criteria Decision Making Methods with Taguchi Method.” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2012; 27 (2): 447–458.