

# JOURNAL OF SCIENCE

PART A: ENGINEERING AND INNOVATION



Year | Yıl: 2021

Volume | Cilt: 8

Issue | Sayı: 2

e-ISSN 2147-9542



## **Owner | Sahibi**

**on behalf of Gazi University | Gazi Üniversitesi adına**  
**Rector | Rektör**  
**Prof. Dr. Musa YILDIZ**

## **Publishing Manager**

**Prof. Dr. | Prof. Dr.**  
**Cevriye GENCER**  
**Gazi University | Gazi Üniversitesi**

## **Chief Editor**

**Prof. Dr. | Prof. Dr.**  
**Sema Bilge OCAK**  
**Gazi University | Gazi Üniversitesi**

## **Managing Editors**

**Prof. Dr. | Prof. Dr.**  
**Mustafa Gürhan YALÇIN**  
**Akdeniz University | Akdeniz Üniversitesi**

**Prof. Dr. | Prof. Dr.**  
**Selim ACAR**  
**Gazi University | Gazi Üniversitesi**

**Assoc. Prof. Dr. | Doç. Dr.**  
**Uğur GÖKMEN**  
**Gazi University | Gazi Üniversitesi**



## Editorial Board | Editörler Kurulu

Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Adnan SÖZEN</b>	Gazi University - Energy Systems Engineering Gazi Üniversitesi - Enerji Sistemleri Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Ali KESKİN</b>	Çukurova University - Automotive Engineering Çukurova Üniversitesi - Otomotiv Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Ali Osman SOLAK</b>	Ankara University - Chemistry Ankara Üniversitesi - Kimya
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Atila BIYIKOĞLU</b>	Gazi University - Mechanical Engineering Gazi Üniversitesi - Makine Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Burçin BAYRAM</b>	Miami University - Physics Miami Üniversitesi - Fizik
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Çağlayan AÇIKGÖZ</b>	Bilecik Şeyh Edebali University - Chemical Engineering Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi - Kimya Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Elif ORHAN</b>	Gazi University - Physics Gazi Üniversitesi - Fizik
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Erdal IRMAK</b>	Gazi University - Electrical-Electronic Engineering Gazi Üniversitesi - Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Hakan ATEŞ</b>	Gazi University - Metallurgical and Materials Engineering Gazi Üniversitesi - Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Homer RAHNEJAT</b>	Loughborough University - Electrical and Manufacturing Engineering Loughborough Üniversitesi - Elektrik ve İmalat Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Hüseyin Serdar YÜCESU</b>	Gazi University - Automotive Engineering Gazi Üniversitesi - Otomotiv Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Meltem DOĞAN</b>	Gazi University - Chemical Engineering Gazi Üniversitesi - Kimya Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Metin GÜRÜ</b>	Gazi University - Chemical Engineering Gazi Üniversitesi - Kimya Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Murat KAYA</b>	Aksaray University - Biotechnology Aksaray Üniversitesi - Biyoteknoloji
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Nalan KABAY</b>	Ege University - Chemical Engineering Ege Üniversitesi - Kimya Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Nuran AY</b>	Eskişehir Technical University - Materials Science and Engineering Eskişehir Teknik Üniversitesi - Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

## Editorial Board | Editörler Kurulu

Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Nursel AKÇAM</b>	Gazi University - Electrical-Electronic Engineering Gazi Üniversitesi - Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Ömer ŞAHİN</b>	Siirt University - Chemical Engineering Siirt Üniversitesi - Kimya Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Rob DWYER-JOYCE</b>	The University of Sheffield - Mechanical Engineering Sheffield Üniversitesi - Makine Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Şükrü DURSUN</b>	Konya Technical University - Environmental Engineering Konya Teknik Üniversitesi - Çevre Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Veli ÇELİK</b>	Ankara Yıldırım Beyazıt University - Mechanical Engineering Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi - Makine Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Yücel ERCAN</b>	TOBB University of Economics and Technology - Mechanical Engineering TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi - Makine Mühendisliği
Prof. Dr.   Prof. Dr. <b>Zafer EVİS</b>	Middle East Technical University - Engineering Sciences Orta Doğu Teknik Üniversitesi - Mühendislik Bilimleri
Assoc. Prof. Dr.   Doç. Dr. <b>Alper BÜYÜKKARAGÖZ</b>	Gazi University - Civil Engineering Gazi Üniversitesi - İnşaat Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr.   Doç. Dr. <b>Çetin ÇAKANYILDIRIM</b>	Hitit University - Chemical Engineering Hitit Üniversitesi - Kimya Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr.   Doç. Dr. <b>Demet CANSARAN DUMAN</b>	Ankara University - The Institute of Biotechnology Ankara Üniversitesi - Biyoteknoloji Enstitüsü
Assoc. Prof. Dr.   Doç. Dr. <b>Hacer KARACAN</b>	Gazi University - Computer Engineering Gazi Üniversitesi - Bilgisayar Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr.   Doç. Dr. <b>Mine TÜRKTAŞ ERKEN</b>	Gazi University - Biology Gazi Üniversitesi - Biyoloji
Assist. Prof. Dr.   Dr. Öğr. Üyesi <b>Füsun YALÇIN</b>	Akdeniz University - Mathematics Akdeniz Üniversitesi - Matematik
Assist. Prof. Dr.   Dr. Öğr. Üyesi <b>Senai YALÇINKAYA</b>	Marmara University - Mechanical Engineering Marmara Üniversitesi - Makine Mühendisliği
Dr.   Dr. <b>Defne AKAY</b>	Ankara University - Physics Ankara Üniversitesi - Fizik



## Technical Editors | Teknik Editörler

**Dr. Fatih UÇAR**

**Akdeniz University | Akdeniz Üniversitesi**

**Dr. Silver GÜNEŞ**

**Gazi University | Gazi Üniversitesi**

**Murat AKIN**

**Gazi University | Gazi Üniversitesi**

## Correspondence Address

Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Emniyet Neighborhood, Bandırma Avenue, No:6/20B, 06560, Yenimahalle - ANKARA  
B Block, Auxiliary Building

## Yazışma Adresi

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Emniyet Mahallesi, Bandırma Caddesi, No:6/20B, 06560, Yenimahalle - ANKARA  
B Blok, Ek Bina

**e-mail | e-posta**

**gujsa06@gmail.com**

**web page | web sayfası**

**<https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsa>**

**Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation  
is a peer-reviewed journal.**

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Bölüm A: Mühendislik ve İnovasyon  
hakemli bir dergidir.



## INDEXING | DİZİNLENME



## ACCESSIBILITY | ERİŞİLEBİLİRLİK



This work are licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Bu eser Creative Commons Atıf-AynıLisanslaPaylaş 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.

## CONTENTS | İÇİNDEKİLER

### Page | Sayfa Articles | Makaleler

189-196	<b>Practical Equations for Calculating the Root Diameter of Bolts</b> <i>Eray ÖZBEK, Bengi AYKAÇ, Sebahattin AYKAÇ</i> <i>Research Article / Civil Engineering</i>
197-207	<b>Resolvent Operator of the Matrix Schrödinger Equation on the Half-Line with Quasi-selfadjoint Potential</b> <i>Gökhan MUTLU</i> <i>Research Article / Mathematics</i>
208-217	<b>Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)/Pinna Nobilis Polimer Karışımının Özelliklerinin İncelenmesi</b> <i>Münir TAŞDEMİR</i> <i>Research Article / Metallurgical and Materials Engineering</i>
218-233	<b>Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması ve Enerji Şebekesi Üzerine Etkisi Konulu Derleme Çalışması</b> <i>Mustafa NURMUHAMMED, Teoman KARADAĞ</i> <i>Review Article / Electrical &amp; Electronics Engineering</i>
234-275	<b>Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması</b> <i>Ramazan MENAK, Teoman KARADAĞ, Mehmet ALTUĞ, Nusret TAN</i> <i>Review Article / Electrical &amp; Electronics Engineering</i>
276-298	<b>Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması</b> <i>Ömer Faruk ÖZCAN, Teoman KARADAĞ, Mehmet ALTUĞ, Ömerül Faruk ÖZGÜVEN</i> <i>Review Article / Electrical &amp; Electronics Engineering</i>
299-307	<b>Effect of Post-Annealing Treatment on the Structural, Optical, and Electrical Properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Thin Films</b> <i>Semih INCECAM, Adem SARAÇ, Evren ERDİL, Ali ÇAĞIRTEKİN, Selim ACAR</i> <i>Research Article / Micro-Nano Fabrication</i>
308-317	<b>Analysis of the Effect of Tool Nose Radius, Feed Rate, and Cutting Depth Parameters on Surface Roughness and Cutting Force in CNC Lathe Machining of 36CrNiMo4 Alloy Steel</b> <i>Mustafa ÖZDEMİR, Kazım ERCAN, Burak BÜYÜKER, Hamza Kemal AKYILDIZ</i> <i>Research Article / Mechanical Engineering</i>



## Practical Equations for Calculating the Root Diameter of Bolts

Eray ÖZBEK<sup>1\*</sup> , Bengi AYKAÇ<sup>1</sup> , Sabahattin AYKAÇ<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, 06570 Ankara, Turkey

Keywords	Abstract
Bolt	Since bolts can be removed and reassembled, they are often preferred by civil engineers in steel structures. Bolt root (minor) diameter, in other words, the least diameter of the bolt should be considered for most of the bolted connection design. In this case, the designer either takes the root diameter from the tables or calculates it using complex equations. Therefore, practical linear equations for both Standard Metric and Inch Based American bolts with sufficient accuracy were derived. It is claimed that these equations can save the designer from being dependent on the tables or memorizing complex equations.
Root Diameter	
Minor Diameter	
Thread	
Steel Structure	

### Cite

Özbek, E., Aykaç, B., Aykaç, S. (2021). Practical Equations for Calculating the Root Diameter of Bolts. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 189-196.

Author ID (ORCID Number)	Article Process	
E. Özbek, 0000-0001-6738-7789	<b>Submission Date</b>	08.07.2020
B. Aykaç, 0000-0002-6285-5667	<b>Revision Date</b>	25.03.2021
S. Aykaç, 0000-0001-6269-8430	<b>Accepted Date</b>	26.03.2021
	<b>Published Date</b>	06.04.2021

## 1. INTRODUCTION

Bolting of steel structures is a very rapid field erection process that requires less skilled labor than does riveting or welding. Moreover, bolts can be removed and reassembled. They are produced by spirally threading a cylindrical steel bar and terminology is shown in Figure 1. During the threading, the cross section of the cylindrical rod inevitably narrows and reaches the smallest value at the root. However, screw thread features may vary depending on the location on the world. Most well-known and widely accepted ones are the ISO Standard Metric (ISO 68-1, 1998) and Inch Based American (ASME, 2011) screw threads. Both screw threads have the same 60° profile, but the characteristic dimensions of the Inch Based thread, major diameter and the pitch, are selected as an inch fraction rather than a millimeter (Figure 1).

Bolt root (minor) diameter, in other words, the least diameter of the bolt, should be considered for the bolts in tension and bolts in which threaded part is on the shear plane. In this case, although the designer can find the root diameter ( $d_3$ ) with the help of a chart as in Table 1 or Table 2, it is not practical. On the other hand, while Eq.1 can be used for Standard Metric (TS 61-2, 2016), Eq.2 can be used for Inch Based American bolts (AISC, 2016).

$$d_3 = d - 1.2269 P \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

$$d_3 = d - \frac{0,9743}{n} \quad (\text{in}) \quad (2)$$

where  $d$  is the nominal diameter of the bolt,  $P$  is the pitch distance, and  $n$  is the threads per inch. As seen, these equations depend on the  $P$  and  $n$  value. However,  $P$  and  $n$  values are specific to each bolt and there is no strong correlation according to nominal bolt diameter. In other words,  $P$  and  $n$  values for each bolt should be memorized.

\*Corresponding Author, e-mail: [erayozbek@gazi.edu.tr](mailto:erayozbek@gazi.edu.tr)



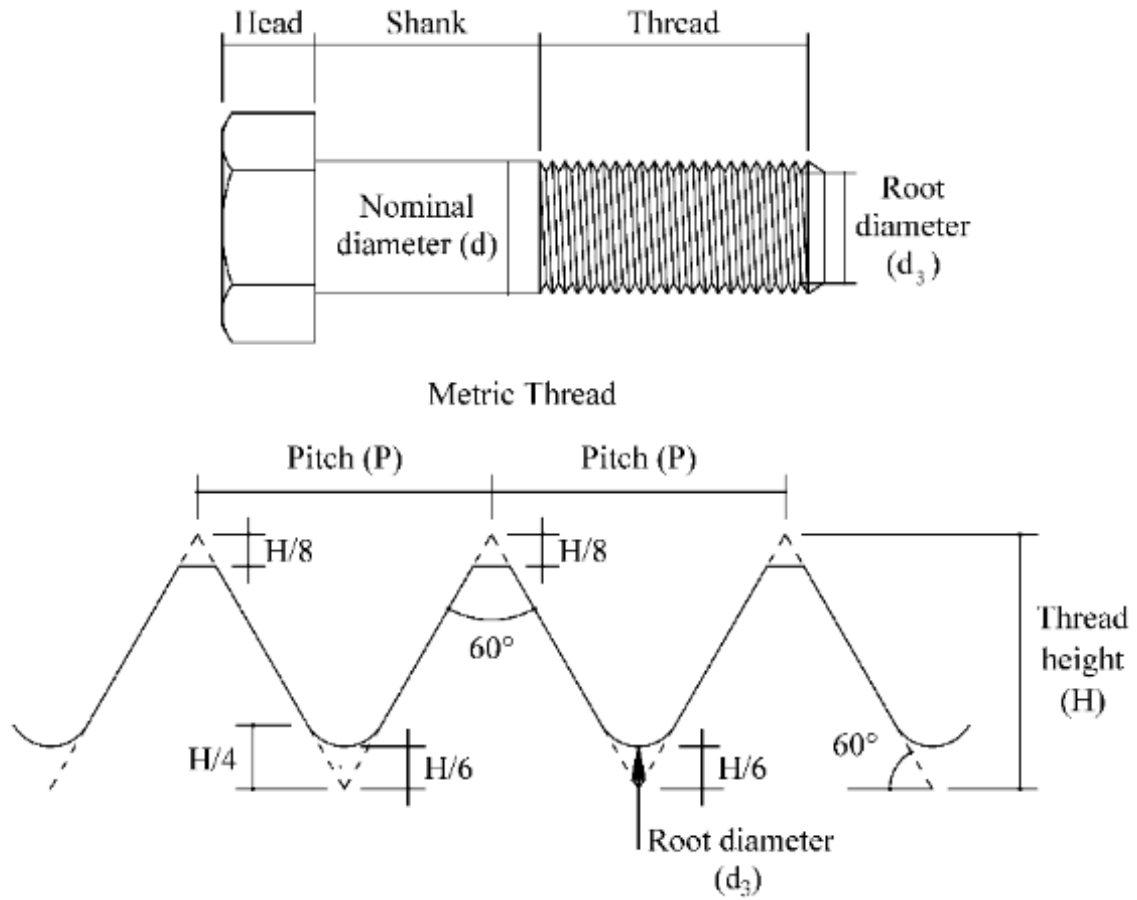


Figure 1. Bolt Terminology and Standard Metric Bolt Profile

Table 1. ISO General Purpose Metric Screw Threads (TS 61-2, 2016)

Nominal Diameter $d$ (mm)	Pitch Length $P$ (mm)	Root Diameter $d_3$ (mm)	Nominal Diameter $d$ (mm)	Pitch Length $P$ (mm)	Root Diameter $d_3$ (mm)
<b>6</b>	1.00	4.773	<b>27</b>	3.00	23.319
<b>7</b>	1.00	5.773	<b>30</b>	3.50	25.706
<b>8</b>	1.25	6.466	<b>33</b>	3.50	28.706
<b>9</b>	1.25	7.466	<b>36</b>	4.00	31.093
<b>10</b>	1.50	8.160	<b>39</b>	4.00	34.093
<b>11</b>	1.50	9.160	<b>42</b>	4.50	36.479
<b>12</b>	1.75	9.853	<b>45</b>	4.50	39.479
<b>14</b>	2.00	11.546	<b>48</b>	5.00	41.866
<b>16</b>	2.00	13.546	<b>52</b>	5.00	45.866
<b>18</b>	2.50	14.933	<b>56</b>	5.50	49.252
<b>20</b>	2.50	16.933	<b>60</b>	5.50	53.252
<b>22</b>	2.50	18.933	<b>64</b>	6.00	56.639
<b>24</b>	3.00	20.319	<b>68</b>	6.00	60.639

**Table 2.** Inch Based American Screw Threads (AISC, 2016)

Nominal Diameter $d$ (in)	Threads per inch $n$	Root Diameter $d_3$ (in)	Nominal Diameter $d$ (in)	Threads per inch $n$	Root Diameter, $d_3$ (in)
<b>1/4</b>	20	0.196	<b>1-3/4</b>	5	1.530
<b>3/8</b>	16	0.307	<b>2</b>	4.5	1.760
<b>1/2</b>	13	0.417	<b>2-1/4</b>	4.5	2.010
<b>5/8</b>	11	0.527	<b>2-1/2</b>	4	2.230
<b>3/4</b>	10	0.642	<b>2-3/4</b>	4	2.480
<b>7/8</b>	9	0.755	<b>3</b>	4	2.730
<b>1</b>	8	0.865	<b>3-1/4</b>	4	2.980
<b>1-1/8</b>	7	0.970	<b>3-1/2</b>	4	3.230
<b>1-1/4</b>	7	1.100	<b>3-3/4</b>	4	3.480
<b>1-3/8</b>	6	1.190	<b>4</b>	4	3.730
<b>1-1/2</b>	6	1.320			

note: 1 in = 25.4 mm

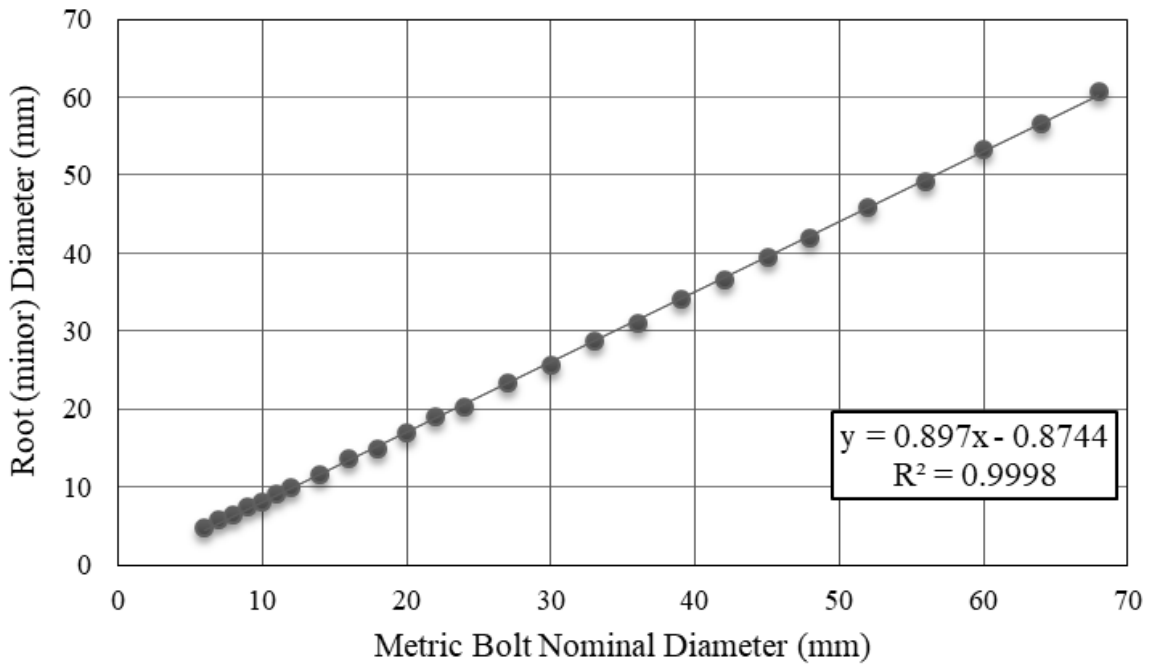
Thus, latest AISC (2016) manual recommends working with the nominal diameter instead of the root diameter for convenience. Additionally, effect of the root diameter is taken into account as reduced rupture strength ( $F_u$ ) of the bolt material. Accordingly,  $0.75 F_u$  taken as the nominal tensile strength of fasteners subjected to tension and  $0.45 F_u$  taken as the nominal shear strength of fasteners when threads are not excluded from shear plane. Indeed, tensile strength of material is multiplied by 0.6 for shear strength according to Von Mises yield criterion. On the other hand, Turkish Specification ÇYHY (2016) adopted also the same approach with the same equations. However, it is thought that such an approach does not represent the actual behavior even if give safe results. Moreover, while AISC (2016) deals with the Unified Thread Standard (ASME, 2011), ÇYHY (2016) deals with the ISO Standard Metric screw thread (TS 61-2, 2016). Screw thread features of these standards are different as mentioned before. Compatibility of AISC (2016) approach is questionable for Standard Metric bolts.

Consequently, in order to use the material more efficiently and to recommend a practical and memorable equation, a numerical study was conducted. Equations were proposed for both Standard Metric and Inch Based American screw threads. Additionally, the accuracy of the equation was discussed and compared with the existing rule of thumb. This rule of thumb basically says to multiply nominal diameter by 0.86 to obtain root diameter ( $d_3 = 0.86 d$ ) for each case (Odabaşı, 2000; Salmon et al., 2008).

## 2. MATERIAL AND METHOD

Metric bolt nominal diameters and their corresponding actual root diameters were plotted together as shown in Figure 2. Nominal diameters include bolts from M6 to M68 and values were taken from Table 1. It was seen that increasing trend is in a steady rate. Best-fit straight line (linear trend line) was drawn to resemble the data. The equation of this line was calculated ( $y=0.897x-0.8744$ ) and illustrated in Figure 2. A trend line is most reliable when its R-squared value is at or close to one. Accordingly, R-squared value calculated for this equation was 0.9998 (Figure 2). However, obtained equation was not easy to memorize. On the other hand, such precise equation is not required for the design of steel structures. Thus, obtained equation was rounded and simplified as in Eq. 3.

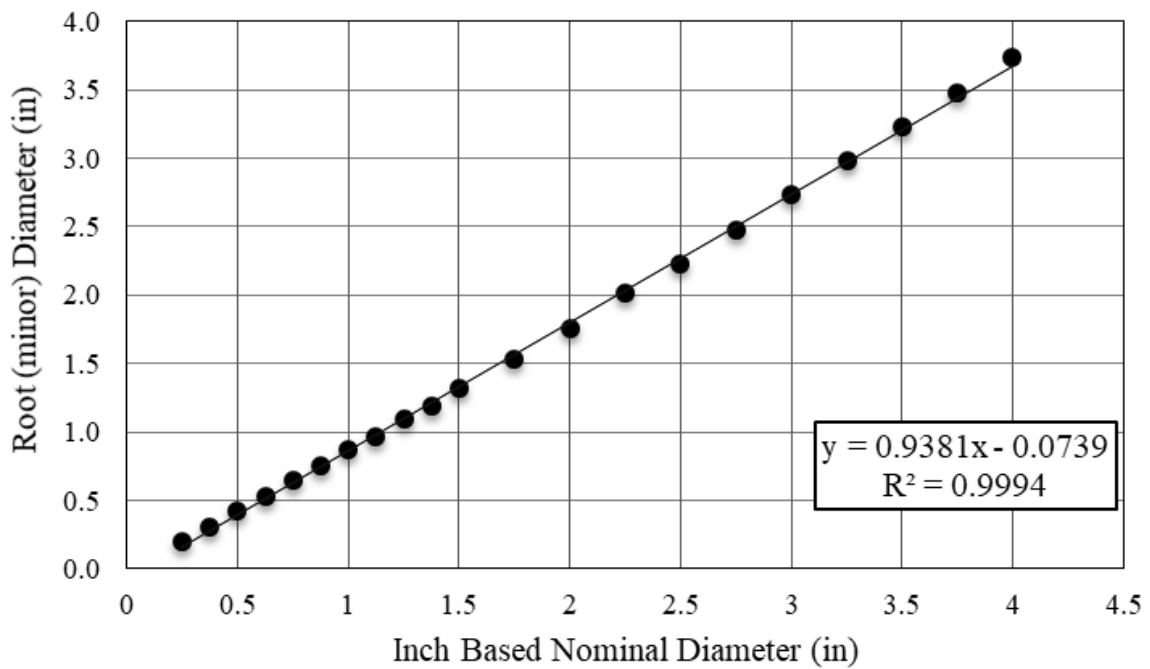
$$d_3 = 0.9 (d - 1) \quad (\text{mm}) \quad (3)$$



**Figure 2.** Linear Trend Line of Metric Bolts

Afore mentioned same procedure was applied to available Inch Based American bolts which were summarized in Table 2. The equation of the trend line was calculated as  $y=0.9381x-0.0739$  with an R-squared value of 0.9994 and illustrated in Figure 3. Derived equation was again rounded and simplified as in Eq. 4.

$$d_3 = 0.94 \left( d - \frac{1}{12} \right) \quad (\text{in}) \tag{4}$$



**Figure 3.** Linear Trend Line of Inch Based American Bolts

### 3. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Initially, root diameters were calculated by the proposed equations (Eq.3 and Eq.4) and the rule of thumb ( $d_3=0.86 d$ ). Thus, diagrams for both Standard Metric (Figure 4) and Inch Based American (Figure 5) screw threads were plotted and indicated together with the actual root diameters to make explicit comparisons. Additionally, results were summarized in Table 3 and Table 4. Percent error was computed as the actual root diameter minus the calculated root diameter, divided by the actual root diameter and multiplied by 100%. In other words, absolute value was not applied to be able to assess from an engineering point of view.

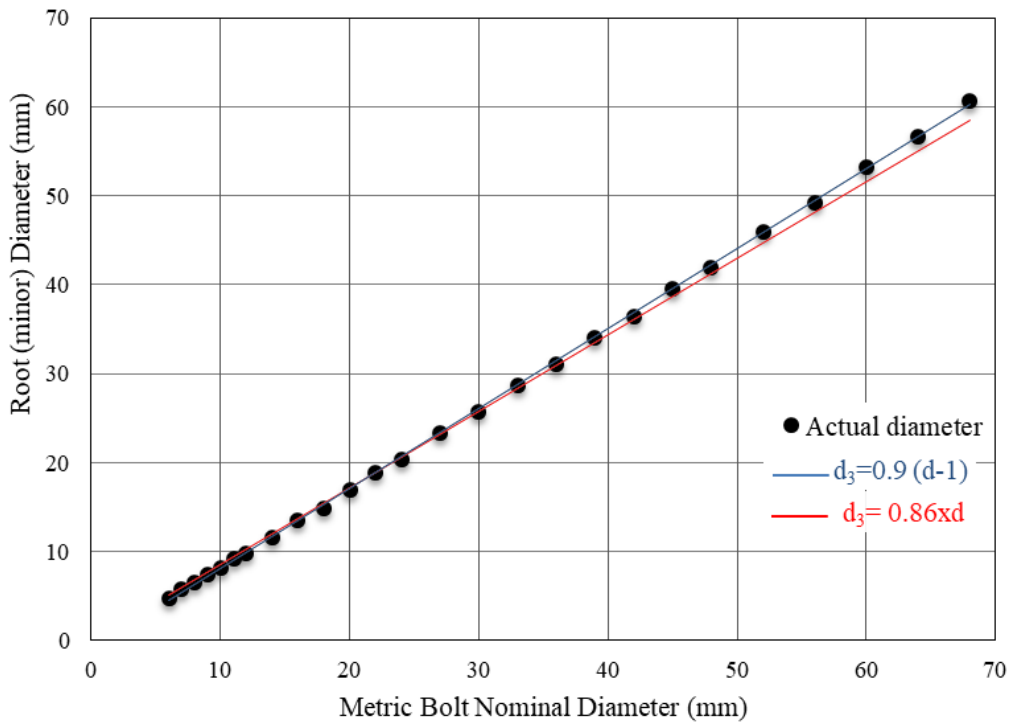


Figure 4. Comparison Diagram for Metric Bolts

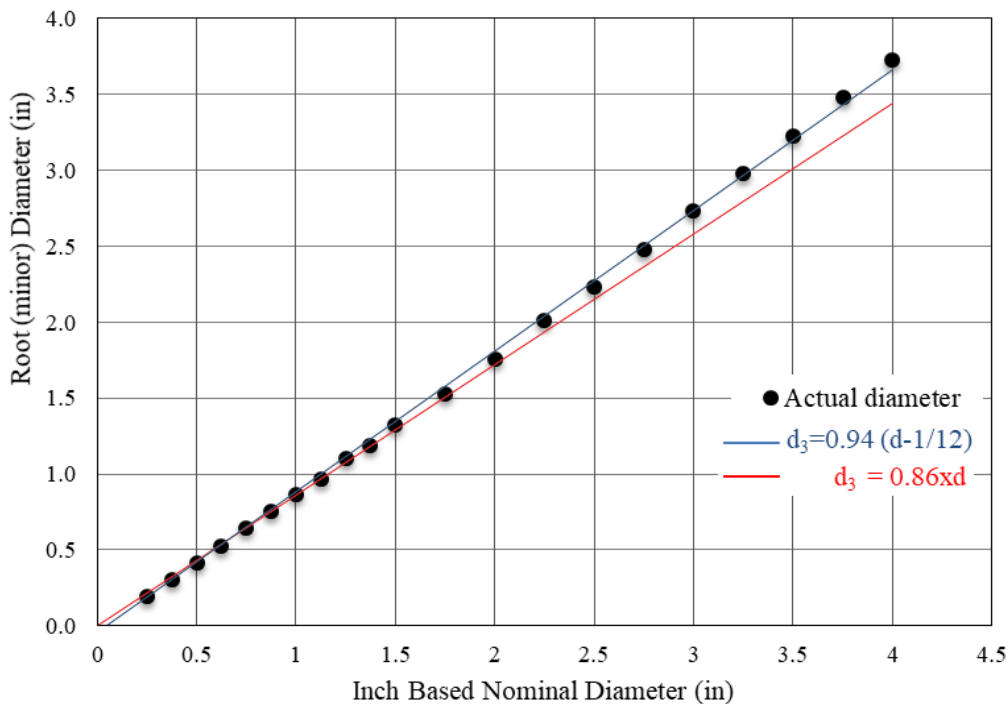


Figure 5. Comparison Diagram for Inch Based American Bolts

For Standard Metric screw threads, while proposed equation error varied between the values of +6.5% and -2.5%, the rule of thumb equation varied between +3.6% and -8.6%. Accordingly, proposed equation varied in more closer and smaller range. On the other hand, ÇYHY (2016) permits minimum of M12 bolts for structural steel connections. If diameters smaller than the M12 were excluded from the evaluation, error varied between +0.6% and -2.5% for the proposed equation. These values are +3.6% and -4.7% for the rule of thumb approach (Table 3). In addition, superiority of the proposed equation is more obvious for bolts larger than M36 (Figure 4). Error mean value, standard deviation, and coefficient of variation were calculated as -1.0, 3.2, and 311.4% for the rule of thumb, respectively. Estimation power of the Eq.3 was better and the same statistical values were 0.3, 2.1, and 683.1%.

**Table 3. Results of the Proposed Equation for Metric Bolts**

Nominal diameter (mm)	Actual $d_3$ (mm)	$d_3$ with proposed equation (mm)	Error in proposed equation (%)	$d_3=0.86d$ (mm)	Error in $d_3=0.86d$ equation (%)
6	4.773	4.5	5.7	5.2	-8.1
7	5.773	5.4	6.5	6.0	-4.3
8	6.466	6.3	2.6	6.9	-6.4
9	7.466	7.2	3.6	7.7	-3.7
10	8.160	8.1	0.7	8.6	-5.4
11	9.160	9.0	1.7	9.5	-3.3
12	9.853	9.9	-0.5	10.3	-4.7
14	11.546	11.7	-1.3	12.0	-4.3
16	13.546	13.5	0.3	13.8	-1.6
18	14.933	15.3	-2.5	15.5	-3.7
20	16.933	17.1	-1.0	17.2	-1.6
22	18.933	18.9	0.2	18.9	0.1
24	20.319	20.7	-1.9	20.6	-1.6
27	23.319	23.4	-0.3	23.2	0.4
30	25.706	26.1	-1.5	25.8	-0.4
33	28.706	28.8	-0.3	28.4	1.1
36	31.093	31.5	-1.3	31.0	0.4
39	34.093	34.2	-0.3	33.5	1.6
42	36.479	36.9	-1.2	36.1	1.0
45	39.479	39.6	-0.3	38.7	2.0
48	41.866	42.3	-1.0	41.3	1.4
52	45.866	45.9	-0.1	44.7	2.5
56	49.252	49.5	-0.5	48.2	2.2
60	53.252	53.1	0.3	51.6	3.1
64	56.639	56.7	-0.1	55.0	2.8
68	60.639	60.3	0.6	58.5	3.6

**Table 4.** Results of the proposed equation for Inch Based American Bolts

Nominal diameter (in)	Actual $d_3$ (in)	$d_3$ with proposed equation (in)	Error in proposed equation (%)	$d_3 = 0.86d$ (in)	Error in $d_3 = 0.86d$ equation (%)
1/4	0.196	0.157	20.1	0.215	-9.7
3/8	0.307	0.274	10.7	0.323	-5.0
1/2	0.417	0.392	6.1	0.430	-3.1
5/8	0.527	0.509	3.4	0.538	-2.0
3/4	0.642	0.627	2.4	0.645	-0.5
7/8	0.755	0.744	1.4	0.753	0.3
1	0.865	0.862	0.4	0.860	0.6
1-1/8	0.970	0.979	-0.9	0.968	0.3
1-1/4	1.100	1.097	0.3	1.075	2.3
1-3/8	1.190	1.214	-2.0	1.183	0.6
1-1/2	1.320	1.332	-0.9	1.290	2.3
1-3/4	1.530	1.567	-2.4	1.505	1.6
2	1.760	1.802	-2.4	1.720	2.3
2-1/4	2.010	2.037	-1.3	1.935	3.7
2-1/2	2.230	2.272	-1.9	2.150	3.6
2-3/4	2.480	2.507	-1.1	2.365	4.6
3	2.730	2.742	-0.4	2.580	5.5
3-1/4	2.980	2.977	0.1	2.795	6.2
3-1/2	3.230	3.212	0.6	3.010	6.8
3-3/4	3.480	3.447	1.0	3.225	7.3
4	3.730	3.682	1.3	3.440	7.8

note: 1 in = 25.4 mm

For Inch Based American screw threads, while proposed equation error varied between +20.1% and -2.4%, the rule of thumb equation varied between +7.8% and -9.7%. At first, a deviation of +20.1% can be considered to be quite high. However, AISC (2016) does not take into account bolt diameters smaller than the 1/2 in (12.7 mm). If bolts smaller than the 1/2 in (12.7 mm) were excluded from the discussion, error varied between +6.1% and -2.4% for the proposed equation. These values are +7.8% and -3.1% for the rule of thumb approach (Table 4). Superiority of the proposed equation was more obvious in terms of statistical variations. Error mean value, standard deviation, and coefficient of variation were calculated as 2.6, 4.3, and 162.6% for the rule of thumb, respectively. Estimation power of the Eq.4 was better and the same statistical values were 0.2, 5.2, and 2766%. It should be noted that coefficient of variation is 17 times higher for the proposed equation.

Consequently, it is claimed that both practical and memorable linear equations could be proposed with a sufficient accuracy for the root dimensions of Standard Metric and Inch Based American bolts. Here, sufficient accuracy refers to the design of structural steel connections and in this case error percentage can be considered negligible. However, if the design of special structures or devices needs more precise data, actual values should be taken from the tables.

Proposed equations resulted much better than the well-known rule thumb. Latest specifications, AISC (2016) and ÇYHY (2016), consider available least ratio of the root diameter to nominal diameter for convenience. The proposed equations can be easily adapted to specifications in order to use the material more efficiently. Since the cross section is proportional to the square of the diameter, the cost can be reduced significantly.

**CONFLICT OF INTEREST**

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.

**REFERENCES**

- AISC (2016). 15th Ed. Steel Construction Manual. American Institute of Steel Construction, USA.
- ASME (2011). ASME B1.1-1989. Unified Inch Screw Threads (UN, UNR, and UNJ Thread Forms). The American Society of Mechanical Engineers, New York, USA.
- ÇYHY (2016). Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar. Ministry of Environment and Urbanization, Ankara, Turkey.
- ISO (1998). ISO 68-1. ISO General Purpose Screw Threads, Basic Profile Part 1: Metric Screw Threads. The International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Odabaşı, Y. (2000). Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları (3rd ed.). Beta Press & Publications, İstanbul, Turkey.
- Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2008). Steel Structures: Design and Behavior (5th ed.). Pearson Education, New Jersey, USA.
- TSE (2016). TS 61-2. Vida Dişleri- ISO Genel Amaçlı. Metrik- Bölüm 2, Normal Adımlı- Anma Çapı 1 mm - 68 mm Olan Vida Dişleri için Anma Ölçüleri. Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey.



## Resolvent Operator of the Matrix Schrödinger Equation on the Half-Line with Quasi-selfadjoint Potential

Gökhan MUTLU<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Faculty of Science, Gazi University, Ankara-Turkey

Keywords	Abstract
Matrix Schrödinger Equation	We obtain the resolvent operator of the matrix Schrödinger equation on the half-line with a quasi-selfadjoint matrix potential $Q$ . We also assume each entry of $Q$ is Lebesgue measurable on $(0, \infty)$ and $Q$ has a finite first moment. We impose the general boundary condition at $x = 0$ . This boundary value problem is not selfadjoint which makes it valuable and difficult in terms of the spectral analysis. Moreover, considering the most general boundary conditions generalizes many studies in the literature. We introduce the Jost matrix of this boundary value problem. We examine asymptotical and analytical properties of the Jost matrix in order to derive the resolvent operator and point spectrum. We use the quasi-selfadjointness of the matrix potential $Q$ to obtain these properties. We show that the resolvent set consists of squares of the non-singular points of the Jost matrix in the upper complex plane. Moreover, we obtain the Green's function of this boundary value problem with the help of the Jost matrix. In the light of this main result, we show that the continuous spectrum is $[0, \infty)$ and the point spectrum consist of squares of the singular points of the Jost matrix in the upper complex plane. We also show that the set of spectral singularities is empty.
Jost Matrix	
Resolvent Operator	
Continuous Spectrum	
Eigenvalues	
Spectral Singularities	

### Cite

Mutlu, G. (2021). Resolvent Operator of the Matrix Schrödinger Equation on the Half-Line with Quasi-selfadjoint Potential. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 197-207.

### Author ID (ORCID Number)

G. Mutlu, 0000-0002-0674-2908

### Article Process

<b>Submission Date</b>	11.01.2021
<b>Revision Date</b>	17.04.2021
<b>Accepted Date</b>	19.04.2021
<b>Published Date</b>	20.04.2021

## 1. INTRODUCTION

Self-adjoint operators defined on a Hilbert space correspond to physical observables in quantum mechanics. For this reason, one-dimensional Schrödinger equation

$$-y'' + q(x)y = k^2y, \quad x \in (0, \infty) \quad (1)$$

where  $q$  is a potential and  $k^2$  is a spectral parameter has been studied in detail (Levitan & Sargsyan, 1975; Birman & Solomjak, 1987; Schmüdgen, 2012). It is well-known that if the potential  $q$  in Eq. (1) is real-valued and the boundary condition at  $x = 0$  is given

$$\cos(t)y(0) + \sin(t)y'(0) = 0, \quad t \in (0, \pi] \quad (2)$$

then the operator generated by the boundary value problem (1)-(2) is selfadjoint. On the other hand, if the potential  $q$  in Eq. (1) is complex-valued then the operator is not symmetric and hence not selfadjoint. There is a vast literature on the spectral properties of non-selfadjoint differential operators in the last decades. This is because, non-selfadjoint differential operators have many applications in quantum physics. In particular, non-

\*Corresponding Author, e-mail: [gmutlu@gazi.edu.tr](mailto:gmutlu@gazi.edu.tr)



selfadjoint operators are observed in physical systems which do not involve the conservation of energy law. Some selfadjoint problems also yields non-selfadjoint operators after separation of variables. One can consult for the first results about non-selfadjoint differential operators to Naimark (1968) and for recent results and applications in quantum physics to Bagarello et. al., (2015) and Sjöstrand (2019).

There have been many attempts for the generalizations of the quantum mechanics. A recent attempt is to consider Hamiltonians which have an exact PT-symmetry instead of Hermitian Hamiltonians (Bender et. al., 2002; 2003; Bender, 2007). Later, Mostafazadeh (2010) replaced these Hamiltonians with pseudo-Hermitian Hamiltonians which are more general. Scholtz et al. (1992) introduced quasi-Hermitian Hamiltonians which constitute an important class of pseudo-Hermitian Hamiltonians. A quasi-Hermitian operator is a non-selfadjoint operator  $H$  in a Hilbert space such that  $H^* = THT^{-1}$  where  $T$  is a positive, bounded operator which has a bounded inverse. A consistent quantum theory awaits to be built for quasi-selfadjoint Hamiltonians.

The matrix Schrödinger equation on the half-line is given by

$$-y'' + Q(x)y = k^2y, \quad x \in (0, \infty) \quad (3)$$

where  $k^2$  is a spectral parameter and  $Q$  is an  $n \times n$  matrix potential. Equation (3) has several applications in scattering problems in quantum mechanics and especially in quantum graphs (Berkolaiko & Kuchment, 2013). To be more precise, Equation (3) corresponds to a quantum star graph with  $n$  edges of infinite length and describes the behavior of  $n$  connected very thin quantum wires forming a one-vertex graph with open ends. This model can be useful in designing elementary gates in quantum computing and nanotubes for microscopic electronic devices, where, for example, strings of atoms may form a star-shaped graph. There is a substantial interest on quantum graphs recently. In particular, Kottos & Smilansky (1997) revealed that quantum graphs enable us to model quantum chaos. After that, there has been a burst of interest in quantum graphs. In the study of quantum graphs, general boundary conditions are encountered most. That's the reason we consider the most general boundary conditions on the contrary to previous studies (Olgun & Coskun, 2010; Arpat & Mutlu, 2015).

In the selfadjoint case, Aktosun et al. (2011); Weder (2017); Aktosun & Weder (2013; 2018; 2020) studied Equation (3) together with general selfadjoint boundary conditions at  $x = 0$  where  $Q$  is selfadjoint, Lebesgue measurable on  $(0, \infty)$  and

$$\int_0^\infty (1+t)\|Q(t)\|dt < \infty \quad (4)$$

holds for any matrix norm  $\|\cdot\|$ . Note that general selfadjoint boundary condition at the origin has been given in several equivalent forms (Aktosun et al., 2011; Aktosun & Weder, 2013; 2018; 2020; Weder, 2017). One of these forms is

$$My(0) + Ny'(0) = 0 \quad (5)$$

where  $M$  and  $N$  are  $n \times n$  constant matrices (not dependent on  $k$ ) which satisfy

$$MN^* = NM^* \quad (6)$$

$$\text{rank}(M|N) = n$$

where “\*” denotes the adjoint of a matrix (Aktosun et al., 2011). Aktosun et al. (2011) investigated the small-energy analysis and later, Aktosun & Weder (2013) studied the high-energy analysis for the above boundary value problem (3)-(5). Equation (3) where  $Q(x)$  is a non-selfadjoint, completely continuous operator in an infinite dimensional separable Hilbert space for each  $x \in (0, \infty)$  is called Schrödinger's operator equation. This equation is the generalization of the Equation (3) to the infinite dimension. Gasyimov et al. (1967) studied

the point spectrum of Schrödinger's operator equation with selfadjoint, completely continuous operator coefficients.

For the non-selfadjoint case, Equation (3) where  $Q \neq Q^*$  together with the Dirichlet boundary condition was studied in Olgun & Coskun (2010) and conditions involving spectral parameter was studied in Yokus & Coskun (2018; 2019). Eigenvalues and spectral singularities correspond to the singular points of the Jost matrix (Olgun & Coskun, 2010). Furthermore, these results are generalized to infinite dimensional case by considering Schrödinger's operator equation, namely, Equation (3) with  $Q(x)$  is a non-selfadjoint, completely continuous operator in an infinite dimensional separable Hilbert space for each  $x \in (0, \infty)$  (Bairamov et al., 2017). In this infinite dimensional case, eigenvalues and spectral singularities correspond to the singular points of the Jost operator which is an operator-valued function. Hence new methods are used from operator theory. Recently, Mutlu & Kır Arpat (2020) considered Schrödinger's operator equation on the real line and examined its spectral properties.

In this study, we consider Equation (3) where

- $n \times n$  matrix potential  $Q(x)$  is Lebesgue measurable on  $(0, \infty)$  for every  $x \in (0, \infty)$ ,
- $Q$  satisfies the condition (4),
- $Q$  is quasi-selfadjoint i.e.  $Q^*(x) = PQ(x)P^{-1}$  for each  $x \in (0, \infty)$  where  $P$  is a Hermitian positive-definite  $n \times n$  matrix.

We consider general boundary conditions at the origin which can be stated

$$-B^*y(0) + A^*y'(0) = 0 \quad (7)$$

where  $A$  and  $B$  are  $n \times n$  constant matrices (not dependent on  $k$ ) such that

$$B^*P^{-1}A = A^*P^{-1}B \quad (8)$$

$$\text{rank}(A|B) = n \quad (9)$$

Note that the condition (9) can be exchanged with (Aktosun et al., 2011)

$$A^*A + B^*B > 0 \quad (10)$$

The equation (9) is required to ensure that there are correct number of independent boundary conditions, and the equation (7) reduces to (6) when  $P = I_n$ . Therefore, this paper generalizes the studies Aktosun et al. (2011); Aktosun & Weder (2013; 2018; 2020); Weder (2017). Moreover, this study complements the study Olgun & Coskun (2010) in which only the Dirichlet condition at origin is considered. Note that the introduction of the general boundary condition (7) completely changes the structure of the Jost matrix. Clearly the boundary value problem under consideration is not selfadjoint. Let us denote this non-selfadjoint operator by  $L$  hereafter.

This paper consists of 5 sections. In section 2 we present the methods applied in the spectral analysis of  $L$ . We state certain auxiliary results related to the spectral properties of  $L$  in Section 3. We present our results in Section 4. In particular, we obtain the Jost matrix and investigate its properties. Then, we derive the resolvent of  $L$  and obtain the point spectrum, continuous spectrum and spectral singularities of  $L$ . Finally, we present some concluding remarks in Section 5.

Here we introduce the notations used throughout this paper. We will write  $M > 0$  to indicate that the matrix  $M$  is positive-definite. Let us denote the upper-half complex plane by  $H$ , its closure by  $\bar{H} = H \cup \mathbb{R}$ , the complex conjugate of a complex number  $z$  by  $\bar{z}$  and  $n \times n$  unit matrix by  $I_n$ . Let  $L_2(\mathbb{R}_+, \mathbb{C}^n)$  denote the Hilbert space of complex-valued vector functions  $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))$  ( $0 < x < \infty$ ) such that each component of  $f$  lies in  $L_2(0, \infty)$ .

## 2. MATERIAL AND METHOD

In scattering theory, the Jost function of equation (1) is the Wronskian of the regular solution (a solution of equation (1) which satisfies  $y(0, k) = 0$ ,  $y'(0, k) = 1$ ) and the Jost solution (a solution of equation (1) which satisfies the asymptotic relation  $f(x, k) = e^{ikx}[1 + o(1)]$ ,  $x \rightarrow \infty$ ). The eigenvalues of the operator can be obtained as zeros of the Jost function (called the dispersion relation). Jost function is also used in the construction of the Green's function of the operator. Analogously, we can define the Jost function which is now an  $n \times n$  matrix  $J(k)$  and call it the Jost matrix of the matrix Schrödinger equation. In this case the dispersion relation becomes  $\det J(k) = 0$  (Agranovic & Marchenko, 1965).

It is well known that the Jost matrix is very fundamental for spectral analysis of matrix Schrödinger equations (Agranovic & Marchenko, 1965). The Jost matrix provides the dispersion relation of matrix Schrödinger operators. For this reason, we define the Jost matrix of the boundary value problem generated by (3) and (7)-(9). In order to guarantee the existence of Jost matrix we use the quasi-selfadjointness of the potential  $Q$ . Then, we investigate the analytic and asymptotic behaviors of the Jost matrix. Subsequently, we use these properties in order to construct the Green's function and the resolvent operator of  $L$ . Using the structure of the Green's function, we deduce that the continuous spectrum is filling the positive half axis and the eigenvalues correspond to the squares of the singular points in the upper complex plane of the Jost matrix. We also prove that there are not any spectral singularities.

## 3. PRELIMINARIES

In this section, we outline relevant properties of certain solutions of Equation (3) including the Jost solution. For the proofs of the very well-known results presented in these sections we refer the interested reader to Agranovic & Marchenko (1965); Aktosun et al. (2011).

The domain of  $L$  consists of vector functions  $f$  from  $L_2(\mathbb{R}_+, \mathbb{C}^n)$  such that

- $f$  has absolutely continuous derivative  $f'$  on every interval  $[0, a]$ , ( $0 < a < \infty$ ),
- $Lf := -f'' + Qf \in L_2(\mathbb{R}_+, \mathbb{C}^n)$ ,
- The boundary condition (7) holds.

The Jost solution  $F(x, k)$  of Equation (3) is  $n \times n$  matrix function which satisfies the asymptotic relations

$$F(x, k) = e^{ikx}[I_n + o(1)], \quad F_x(x, k) = ike^{ikx}[I_n + o(1)], \quad x \rightarrow \infty, \quad k \in \bar{H} \setminus \{0\}$$

The Jost solution has the representation

$$F(x, k) = e^{ikx}I_n + \int_x^\infty e^{ikt}K(x, t)dt, \quad k \in \bar{H} \setminus \{0\}$$

where

$$\|K(x, t)\| \leq c \int_{\frac{x+t}{2}}^\infty \|Q(u)\|du, \quad k \in \bar{H} \setminus \{0\}$$

where  $c > 0$  is a constant (Agranovic & Marchenko, 1965).  $F(x, k)$  and  $F_x(x, k)$  are analytic functions of  $k$  in  $H$  and continuous in  $\bar{H}$  for every fixed  $x$ . (Agranovic & Marchenko, 1965).

There exists a matrix solution  $G(x, k)$  of Equation (3) which satisfies the asymptotic relations

$$G(x, k) = e^{-ikx}[I_n + o(1)], \quad G_x(x, k) = -ike^{-ikx}[I_n + o(1)], \quad x \rightarrow \infty, \quad k \in \bar{H} \setminus \{0\}$$

Similarly,  $G(x, k)$  and  $G_x(x, k)$  are analytic functions of  $k$  in  $H$  and continuous in  $\bar{H}$  for every  $x$ . (Agranovic & Marchenko, 1965). It is also well-known that for  $k \in \bar{H} \setminus \{0\}$ , every vector solution to Equation (3) can be expressed

$$u(x, k) = F(x, k)\alpha + G(x, k)\beta$$

where  $\alpha, \beta \in \mathbb{C}^n$  are constant vectors (Agranovic & Marchenko, 1965).

It is well-known that there exist  $n \times n$  matrix solutions which satisfy given specific initial conditions at a finite number. Therefore, there exists a matrix solution  $R(x, k)$  of Equation (3) which satisfies the initial conditions

$$R(0, k) = P^{-1}A, \quad R'(0, k) = P^{-1}B \quad (11)$$

where  $P$  is the Hermitian, positive-definite  $n \times n$  matrix appearing in Equation (8) and  $A$  and  $B$  are  $n \times n$  matrices appearing in Equation (7) (Aktosun et al., 2011). For each fixed  $x$ ,  $R(x, k)$  is entire and for these reason  $R(x, k)$  is called the regular solution of Equation (3) (Aktosun et al., 2011).

## 4. RESULTS

### 4.1 The Jost Matrix

In this subsection we present the Jost matrix of the Equation (3) where quasi-selfadjoint matrix potential  $Q$  is Lebesgue measurable on  $(0, \infty)$  and satisfies condition (4) and then examine some of its properties.

Let  $U$  and  $V$  be  $n \times n$  matrix solutions of Equation (3). Let the Wronskian of  $U$  and  $V$  is defined by

$$[U, V] := UV' - U'V$$

Taking the matrix adjoint of Equation (3) and using the fact that  $Q$  is quasi-selfadjoint we obtain the adjoint equation

$$-z'' + zPQ(x)P^{-1} = (\bar{k})^2 z, \quad x \in (0, \infty) \quad (12)$$

For a real value of  $k$ , it is obvious that if  $y(x, k)$  is a matrix solution of (3), then  $y(x, k)^*$  and  $y(x, -k)^*$  are solutions of (12). Moreover if  $y(x, k)$  has an analytic extension for each fixed  $x$  as a function of  $k$  from the real line to the upper-half complex plane, then  $y(x, -k)^*$  also has an analytic extension from the real line to the upper-half complex plane and that extension coincides with  $y(x, -\bar{k})^*$  for  $k \in H$ . Therefore,  $F(x, -k)^*$  and  $F_x(x, -k)^*$  have analytic extensions from the real line to the upper-half complex plane which are  $F(x, -\bar{k})^*$  and  $F_x(x, -\bar{k})^*$  for  $k \in H$  respectively.

Let  $U(x, k)$  and  $V(x, k)$  be  $n \times n$  matrix solutions of Equation (3). It easily follows by a direct computation that the Wronskians  $[V(x, k)^*, PU(x, k)] = [V(x, k)^*P, U(x, k)]$  and  $[U(x, k)^*, PV(x, k)] = [U(x, k)^*P, V(x, k)]$  are independent of  $x$  for real values of  $k$ . Furthermore if  $U(x, k)$  and  $V(x, k)$  have analytic extensions from the real line to the upper-half complex plane, then the Wronskians  $[V(x, -\bar{k})^*, PU(x, k)]$  and  $[V(x, \bar{k})^*, PU(x, k)]$  are independent of  $x$  for  $k \in \bar{H}$ . As a result, we can obtain various equalities by evaluating the Wronskian at  $x = 0$  or  $x \rightarrow \infty$ . For example

$$[F(x, \pm k)^*, PF(x, \pm k)] = \pm 2ikP, \quad k \in \mathbb{R} \quad (13)$$

$$[F(x, -\bar{k})^*, PF(x, k)] = 0, \quad k \in \bar{H} \quad (14)$$

The Jost matrix is defined by

$$J(k) := [F(x, -\bar{k})^*, PR(x, k)], \quad k \in \bar{H} \quad (15)$$

where  $R(x, k)$  is the regular solution described by (11) and  $F(x, k)$  is the Jost solution. Note that the Wronskian (15) is independent of  $x$ . Evaluating the Wronskian at  $x = 0$  and imposing the initial value conditions (11) we have

$$J(k) = F(0, -\bar{k})^* B - F'(0, -\bar{k})^* A, \quad k \in \bar{H} \quad (16)$$

It easily follows from (16) and the fact that  $F(0, -\bar{k})^*$  and  $F'_x(0, -\bar{k})^*$  are analytic in  $H$  that the Jost matrix is analytic in  $H$  and continuous in  $\bar{H}$ .

**Theorem 1** The Jost matrix  $J(k)$  has an inverse for each real nonzero  $k$ .

**Proof.** The condition (10) and  $P > 0$  yields

$$B^*P^{-2}B + A^*A > 0$$

and hence there exists a unique matrix  $M > 0$  given by

$$M := (B^*P^{-2}B + A^*A)^{1/2}$$

Since  $M > 0$  it follows  $M^* = M$ ,  $M$  is invertible and thus

$$M^{*-1}(B^*P^{-2}B + A^*A)M^{-1} = I_n$$

Let us define

$$C = \begin{pmatrix} P^{-1}B & A \\ A & -P^{-1}B \end{pmatrix}, \quad H = C \begin{pmatrix} M^{-1} & 0 \\ 0 & M^{-1} \end{pmatrix}$$

Using (8) we have  $H^*H = I_{2n}$  and  $H$  is unitary. Therefore  $HH^* = I_{2n}$  yielding

$$P^{-1}BM^{-2}B^*P^{-1} + AM^{-2}A^* = I_n \quad (17)$$

$$AM^{-2}B^*P^{-1} - P^{-1}BM^{-2}A^* = 0 \quad (18)$$

Let

$$S(k) := F'(0, -k)^*P^{-1}BM^{-2} + F(0, -k)^*PAM^{-2}, \quad k \in \mathbb{R} \quad (19)$$

Using (13), (16), (17) and (19) we get

$$J(k)S(k)^* - S(k)J(k)^* = [F(x, -k)^*, PF(x, -k)] = -2ikP \quad (20)$$

Suppose that  $J(k)$  does not have an inverse for a real nonzero  $k_0$ . There exists a nonzero vector  $w \in \mathbb{C}^n$  such that  $w^*J(k_0) = J(k_0)w = 0$ . This implies together with (20) and  $P > 0$  that

$$0 = w^*J(k_0)S(k_0)^*w - w^*S(k_0)J(k_0)^*w = -2ik_0w^*Pw \neq 0$$

which gives a contradiction. Therefore,  $J(k)$  is invertible for each real nonzero  $k$ .

## 4.2 Resolvent Operator

In this subsection we derive the resolvent operator  $R_k(L) := (L - k^2I)$  of  $L$  where  $I$  denotes the identity operator. Later, we obtain the point spectrum, continuous spectrum and the set of spectral singularities of  $L$ .

**Theorem 2** The resolvent set  $\rho(L)$  of  $L$  is

$$\rho(L) = \{k^2: k \in H, \quad \det J(k) \neq 0\}$$

and the resolvent operator  $R_k(L) = (L - k^2I)$  is defined by

$$R_k(L)g(x) = \int_0^\infty K(x, t; k)g(t)dt$$

where  $g \in L_2(\mathbb{R}_+, \mathbb{C}^n)$  and

$$K(x, t; k) = \begin{cases} F(x, k)J(k)^{-1}R(t, \bar{k})^*P, & 0 \leq t \leq x, \\ R(x, k)J(k)^{-1}F(t, -\bar{k})^*P, & x < t < \infty. \end{cases}$$

**Proof.** We must solve

$$-y'' + Q(x)y - k^2y = g(x), \quad x \in (0, \infty) \quad (21)$$

where  $y, g \in L_2(\mathbb{R}_+, \mathbb{C}^n)$  and the vector-valued function  $y(x, k)$  satisfies (7). Note that a vector solution of the homogeneous part of (21) can be expressed

$$y(x, k) = R(x, k)\alpha + F(x, k)\beta$$

where  $\alpha$  and  $\beta$  are constant vectors in  $\mathbb{C}^n$  and  $k \in H$ . Suppose that  $\det J(k) \neq 0$  for  $k \in H$ . Using variation of parameters method we try to find the general solution of (21) in the following form

$$y(x, k) = R(x, k)a(x) + F(x, k)b(x) \quad (22)$$

such that  $a(x)$  and  $b(x)$  are vector functions taking values in  $\mathbb{C}^n$ . Differentiating (22) with respect to  $x$  we get

$$y'(x, k) = R'(x, k)a(x) + R(x, k)a'(x) + F'(x, k)b(x) + F(x, k)b'(x) \quad (23)$$

Suppose that

$$R(x, k)a'(x) + F(x, k)b'(x) = 0 \quad (24)$$

Differentiating (23) with respect to  $x$  we have

$$y''(x, k) = R''(x, k)a(x) + R'(x, k)a'(x) + F''(x, k)b(x) + F'(x, k)b'(x) \quad (25)$$

Plugging (25) and (22) in (21) yields

$$R'(x, k)a'(x) + F'(x, k)b'(x) = -g(x) \quad (26)$$

Multiplying (24) with  $R'(x, \bar{k})^* P$  and (26) with  $R(x, \bar{k})^* P$  from left and subtracting two equalities yields

$$[R(x, \bar{k})^*, PR(x, k)]a'(x) + [R(x, \bar{k})^*, PF(x, k)]b'(x) = -R(x, \bar{k})^* Pg(x) \quad (27)$$

Since the Wronskian  $[R(x, \bar{k})^*, PR(x, k)]$  is independent of  $x$  evaluating at  $x = 0$  and using (8) we have

$$\begin{aligned} [R(x, \bar{k})^*, PR(x, k)] &= R(0, \bar{k})^* PR'(0, k) - R'(0, \bar{k})^* PR(0, k) \\ &= (P^{-1}A)^* PP^{-1}B - (P^{-1}B)^* PP^{-1}A = 0 \end{aligned}$$

Furthermore, the Wronskian  $[R(x, \bar{k})^*, PF(x, k)]$  is independent of  $x$  and using (11)

$$\begin{aligned} [R(x, \bar{k})^*, PF(x, k)] &= R(0, \bar{k})^* PF'(0, k) - R'(0, \bar{k})^* PF(0, k) \\ &= (P^{-1}A)^* PF'(0, k) - (P^{-1}B)^* PF(0, k) = A^* F'(0, k) - B^* F(0, k) \end{aligned} \quad (28)$$

and also

$$(A^* F'(0, k) - B^* F(0, k))^* = F'(0, k)^* A - F(0, k)^* B = F'(0, -\bar{k})^* A - F(0, -\bar{k})^* B = -J(k) \quad (29)$$

From (28) and (29) we have

$$[R(x, \bar{k})^*, PF(x, k)] = -J(k)^*$$

Since  $J(k)$  is invertible,  $J(k)^*$  is also invertible and from (27) we have

$$b'(x) = (J(k)^*)^{-1} R(x, \bar{k})^* Pg(x)$$

and hence

$$b(x) = \int_0^x (J(k)^*)^{-1} R(t, \bar{k})^* Pg(t) dt + \beta \quad (30)$$

for some constant vector  $\beta$ .

If we multiply equation (24) with  $F'(x, -\bar{k})^* P$  from left and equation (26) with  $F(x, -\bar{k})^* P$  from left and then subtract two resulting equalities we have

$$[F(x, -\bar{k})^*, PR(x, k)]a'(x) + [F(x, -\bar{k})^*, PF(x, k)]b'(x) = -F(x, \bar{k})^* Pg(x)$$

From (14) and (15) it follows

$$J(k)a'(x) = -F(x, -\bar{k})^* Pg(x) \quad (31)$$

Since  $J(k)$  is invertible we have from (31) that

$$a'(x) = -(J(k))^{-1} F(x, -\bar{k})^* Pg(x)$$

and hence

$$a(x) = \alpha + \int_x^\infty (J(k))^{-1} F(t, -\bar{k})^* P g(t) dt \quad (32)$$

for some constant vector  $\alpha$ .

Plugging (30) and (32) in (22)

$$y(x, k) = R(x, k)\alpha + R(x, k) \int_x^\infty (J(k))^{-1} F(t, -\bar{k})^* P g(t) dt + F(x, k) \int_0^x (J(k)^*)^{-1} R(t, \bar{k})^* P g(t) dt + F(x, k)\beta$$

Since the vector function  $y(x, k)$  should lie in  $L_2(\mathbb{R}_+, \mathbb{C}^n)$  it follows that  $\alpha = 0$ . We have

$$y'(x, k) = R'(x, k)a(x) + F'(x, k)b(x) \quad (33)$$

Evaluating (33) at  $x = 0$  yields

$$y'(0, k) = P^{-1}B \int_0^\infty (J(k))^{-1} F(t, -\bar{k})^* P g(t) dt + F'(0, k)\beta$$

Imposing the boundary condition (7)

$$\begin{aligned} & -B^* \left[ P^{-1}A \int_0^\infty (J(k))^{-1} F(t, -\bar{k})^* P g(t) dt + F(0, k)\beta \right] \\ & + A^* \left[ P^{-1}B \int_0^\infty (J(k))^{-1} F(t, -\bar{k})^* P g(t) dt + F'(0, k)\beta \right] = 0 \end{aligned}$$

Using (8) the last equation simplifies to

$$[A^*F'(0, k) - B^*F(0, k)]\beta = 0$$

and using (29) we have  $J(k)^*\beta = 0$ . Since  $J(k)$  is invertible this gives  $\beta = 0$ . Finally, we find

$$y(x, k) = R(x, k) \int_x^\infty (J(k))^{-1} F(t, -\bar{k})^* P g(t) dt + F(x, k) \int_0^x (J(k)^*)^{-1} R(t, \bar{k})^* P g(t) dt$$

**Corollary 1** Let us denote the continuous spectrum, point spectrum and the set of spectral singularities of  $L$  by  $\sigma_c(L)$ ,  $\sigma_d(L)$  and  $\sigma_{ss}(L)$  respectively. Then, it follows

$$\sigma_c(L) = [0, \infty)$$

$$\sigma_d(L) = \{k^2: k \in H, \quad \det J(k) = 0\}$$

$$\sigma_{ss}(L) = \emptyset$$

**Proof.** It follows from Theorem 2 that  $k^2$  is an eigenvalue of  $L$  iff  $\det J(k) = 0$  for  $k \in H$  i.e. the resolvent operator doesn't exist. It is easy to show similarly to the scalar case that  $\sigma_c(L) = [0, \infty)$  (Naimark, 1968). Spectral singularities are the poles of the kernel of the resolvent and are also in the continuous spectrum. Therefore, Theorem 1 and Theorem 2 implies that  $\sigma_{ss}(L) = \emptyset$ .



## 5. CONCLUSIONS

The present paper is aimed at complementing the studies Olgun & Coskun (2010); Bairamov et al. (2017) regarding the matrix Schrödinger equation with non-selfadjoint operator coefficients on the half-line together with Dirichlet boundary condition at  $x = 0$  and generalizing the studies Aktosun et al. (2011); Weder (2017); Aktosun & Weder (2013; 2018; 2020) regarding the selfadjoint matrix Schrödinger operator generated by (3)-(5). We consider the matrix Schrödinger equation on the half-line with the quasi-selfadjoint matrix potential together with (7)-(9) which will contribute to the understanding of recently introduced pseudo-Hermitian quantum mechanics by Mostafazadeh (2010).

Even though the matrix Schrödinger operator  $L$  with quasi-selfadjoint potential is non-selfadjoint, there aren't any spectral singularities, and the structure of the spectrum is the same as the selfadjoint matrix Schrödinger operator i.e.  $Q = Q^*$ . However, there may be complex eigenvalues of  $L$ .

The particular case  $A = 0$  implies that  $B$  is invertible from (9) and thus yielding the Dirichlet boundary condition at  $x = 0$ . Therefore, the boundary value problem under investigation generalizes Olgun & Coskun (2010). On the other hand, the particular case  $P = I$  in the quasi-selfadjointness relation  $Q^*(x) = PQ(x)P^{-1}$  implies that  $Q^* = Q$  and thus one obtains the selfadjoint matrix Schrödinger operator studied in Agranovic & Marchenko (1965); Aktosun et al. (2011); Weder (2017); Aktosun & Weder (2013; 2018; 2020). Therefore, our study also generalizes these studies.

The boundary value problem investigated in this paper is intimately related to non-compact quantum star graphs which have many applications in scattering problems in quantum mechanics. As for quantum graphs, consideration of most general boundary conditions rather than just Dirichlet boundary conditions is more relevant. For this reason, most general boundary conditions are imposed in our study. As a result, the results obtained in this paper will be useful for studying spectral properties of such quantum graphs.

## CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest in this research article.

## REFERENCES

- Agranovic, Z. S., & Marchenko, V. A. (1965). *The Inverse Problem of Scattering Theory*, Gordon and Breach.
- Aktosun, T., Klaus, M., & Weder, R. (2011). Small-energy analysis for the self-adjoint matrix Schrödinger equation on the half line. *Journal of Mathematical Physics*, 52, 102101. doi:[10.1063/1.3640029](https://doi.org/10.1063/1.3640029)
- Aktosun, T., & Weder, R. (2013). High-energy analysis and Levinson's theorem for the selfadjoint matrix Schrödinger operator on the half line. *Journal of Mathematical Physics*, 54, 012108. doi:[10.1063/1.4773904](https://doi.org/10.1063/1.4773904)
- Aktosun, T., & Weder, R. (2018). Inverse scattering on the half line for the matrix Schrödinger equation, arXiv:1806.01644.
- Aktosun, T., & Weder, R. (2020). *Direct and Inverse Scattering for the Matrix Schrödinger Equation*, Applied Mathematical Sciences, 203, Cham: Springer.
- Arpat, E. K. & Mutlu, G. (2015). Spectral properties of Sturm-Liouville system with eigenvalue-dependent boundary conditions. *International Journal of Mathematics*, 26(10), 1550080-1550088. doi:[10.1142/S0129167X15500809](https://doi.org/10.1142/S0129167X15500809)
- Bagarello, F., Gazeau, J. P., Szafraniec, F. H., & Znojil, M. (2015). *Non-Selfadjoint Operators in Quantum Physics: Mathematical Aspects*, John Wiley & Sons.
- Birman, M. S., & Solomjak, M. Z. (1987). *Spectral Theory of Self-Adjoint Operators in Hilbert Space*, Mathematics and its Applications, vol 5, Netherlands: Springer.
- Bairamov, E., Arpat, E. K., & Mutlu, G. (2017). Spectral properties of non-selfadjoint Sturm-Liouville operator with operator coefficient. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 456(1), 293-306. doi:[10.1016/j.jmaa.2017.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2017.07.001)

- Bender, C. M., Brody, D. C., & Jones, H. F. (2002). Complex extension of quantum mechanics. *Physical Review Letters*, 89, 270401. doi:[10.1103/PhysRevLett.89.270401](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.270401)
- Bender, C. M., Brody, D. C., & Jones, H. F. (2003). Must a Hamiltonian be Hermitian? *American Journal of Physics*, 71, 1095. doi:[10.1119/1.1574043](https://doi.org/10.1119/1.1574043)
- Bender, C. M. (2007). Making sense of non-Hermitian Hamiltonians. *Reports on Progress in Physics*, 70, 947-1018. doi:[10.1088/0034-4885/70/6/R03](https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/6/R03)
- Berkolaiko, G., & Kuchment, P. (2013). *Introduction to Quantum Graphs (Mathematical Surveys and Monographs vol 186)*, Rhode Island: American Mathematical Society.
- Gasymov, M. G., Zikov, V. V., & Levitan, B. M. (1967). Conditions for the negative spectrum of the Schrödinger equation operator to be discrete and finite. *Mathematical notes of the Academy of Sciences of the USSR*, 2, 813-817. doi:[10.1007/BF01093944](https://doi.org/10.1007/BF01093944)
- Kottos, T., & Smilansky, U. (1997). Quantum chaos on graphs. *Physical Review Letters*, 79, 4794-4797. doi:[10.1103/PhysRevLett.79.4794](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.4794)
- Levitan, B. M., & Sargsyan, I. S. (1975). *Introduction to Spectral Theory: Selfadjoint Ordinary Differential Operators*, American Mathematical Society.
- Mostafazadeh, A. (2010). Pseudo-Hermitian representation of quantum mechanics. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 7(7), 1191-1306. doi:[10.1142/S0219887810004816](https://doi.org/10.1142/S0219887810004816)
- Mutlu, G., & Kır Arpat, E. (2020). Spectral properties of non-selfadjoint Sturm-Liouville operator equation on the real axis. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 49(5), 1686-1694. doi:[10.15672/hujms.577991](https://doi.org/10.15672/hujms.577991)
- Naimark, M. A. (1968). *Linear Differential Operators, II*, New York: Ungar.
- Olgun, M., & Coskun, C. (2010). Non-selfadjoint matrix Sturm-Liouville operators with spectral singularities. *Applied Mathematics and Computation*, 216, 2271-2275. doi:[10.1016/j.amc.2010.03.062](https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.03.062)
- Scholtz, F. G., Geyer, H. B. & Hahne, F. J. W. (1992). Quasi-Hermitian operators in quantum mechanics and the variational principle. *Annals of Physics*, 21, 74-101. doi:[10.1016/0003-4916\(92\)90284-S](https://doi.org/10.1016/0003-4916(92)90284-S)
- Schmüdgen, K. (2012). *Unbounded Self-adjoint Operators on Hilbert Space*, Graduate Texts in Mathematics, vol 265, Netherlands: Springer.
- Sjöstrand, J. (2019). *Non-Self-Adjoint Differential Operators, Spectral Asymptotics and Random Perturbations*, Pseudo-Differential Operators, vol 14, Basel: Birkhäuser.
- Weder, R. (2017). The number of eigenvalues of the matrix Schrödinger operator on the half line with general boundary conditions. *Journal of Mathematical Physics*, 58, 102107. doi:[10.1063/1.5008655](https://doi.org/10.1063/1.5008655)
- Yokus, N., & Coskun, N. (2018). The spectrum of quadratic eigenparameter-dependent non-selfadjoint matrix sturm-liouville operators. *Advances in Differential Equations and Control Processes*, 19(2), 139-152. doi:[10.17654/DE019020139](https://doi.org/10.17654/DE019020139)
- Yokus, N., & Coskun, N. (2019). A note on the matrix Sturm-Liouville operators with principal functions. *Mathematical Methods in Applied Sciences*, 42, 5362-5370. doi:[10.1002/mma.5383](https://doi.org/10.1002/mma.5383)



## Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)/Pinna Nobilis Polimer Karışımının Özelliklerinin İncelenmesi

### Investigation of Properties of High Density Polyethylene (HDPE)/Pinna Nobilis Polymer Composites

Münir TAŞDEMİR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, İstanbul, 34722, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Özet
Polietilen Pinna Nobilis UL 94 Limit Oksijen İndisi Mekanik Özellikler	Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen içerisine %10-20-30 ve 40 oranlarında istiridye veya midye gibi kabuklu bir deniz ürünü olan pinna nobilis ilave edilerek ekstrüzyonda karışımları yapılmış ve bir polimer kompoziti elde edilmiştir. Elde edilen polimer kompozitlerinden enjeksiyon makinesinde standartlara uygun olarak çeşitli test numuneleri basılmıştır. UL 94, oksijen indeksi ve kızgın tel deneyleri yapılarak polimer kompozitinin yanma davranışları belirlenmiştir. Ayrıca elastiklik modülü, akma mukavemeti, kopma mukavemeti, % uzama değeri, Izod darbe mukavemet değeri, sertlik ve yoğunluk değerlerinin pinna nobilis oranının artmasıyla nasıl değiştiği rapor edilmiştir. Bunlara ek olarak taramalı elektron mikroskopisi ile kırık yüzey fotoğrafları çekilerek polietilen ile pinna nobilis partiküllerinin yapışması ve dağılımları belirlenmiştir.

Keywords	Abstract
Polyethylene Pinna Nobilis UL 94 Limit Oxygen Index Mechanical Properties	In this study, pinna nobilis, a shellfish such as oyster or mussel, was added into high density polyethylene in the ratio of 10-20-30 and 40%, and blends were made in extrusion and a polymer composite was obtained. Various test samples were molded from the obtained polymer composites in accordance with the standards in the injection molding machine. The burning behavior of the polymer composite was determined by conducting UL 94, limit oxygen index and glow wire tests. In addition, it has been reported how elastic modulus, yield strength, tensile strength, % elongation value, Izod impact strength value, hardness and density values change with the increase of pinna nobilis ratio. In addition to these, the adhesion and distribution of polyethylene and pinna nobilis particles were determined by taking fracture surface photographs with scanning electron microscopy.

#### Alıntı / Cite

Taşdemir, M. (2021). Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)/Pinna Nobilis Polimer Karışımının Özelliklerinin İncelenmesi. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 208-217.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
M. Taşdemir, 0000-0001-8635-7251	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b> 20.12.2020 <b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b> 14.04.2021 <b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b> 20.04.2021 <b>Yayın Tarihi / Published Date</b> 21.04.2021

## 1. GİRİŞ

Polimerlere, maliyetini düşürmek, sertlik değerlerini iyileştirmek, boyutsal kararlılığını sağlamak ve tokluk değerlerini iyileştirmek için çeşitli organik dolgu maddeleri katılması fikri son yıllarda büyük önem arz etmektedir (Wang et al., 2010). Büyük bir miktarda midye ve istiridye kabukları insanların kullandıkları su alanlarına atılmakta olduğundan bu kabuklara yapışan organik maddelerin ayrışması sonucu suların kötü kokmalarına sebebiyet vermektedir. Bunun dışında bu atıklar deniz kirliliğine ve deniz ürünleri sektörüne ciddi sorunlar açmaktadır (Jung et al., 2012). Midye ve istiridye gibi deniz ürünü kabuklarının uygun şekilde imha edilmesi gerekmektedir. Kabuklu deniz ürünü yetiştiricileri bu tip kabukları denize atıldıklarında suyun oksijen

seviyesinin düşmesine ve suda yaşayan mikroalglerin azalmasına sebebiyet vermektedirler. Aynı zamanda balıkların büyümesini de etkilemektedirler (Folke et al., 1989, Ward et al., 2019). Bu tip kabukların yaklaşık %95'ini kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) oluşturmaktadır. Diğer kısım ise kitin, glikoprotein, glikozaminoglikan, polisakarit ve diğer proteinlerden oluşur. *Pinna nobilis* kabuklarında kalsit ile kimyasal yapıdan benzer olan aragonit yapıda sedefli parlak bir kısım vardır. Fakat bu kısmın kristal şekli farklıdır ve kalsite nazaran daha sert olmasını sağlar (Wang et al., 2013). Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) sertlik değerinin yüksek oluşu ve çözücülere karşı olan direnci gibi özellikleri nedenleriyle evsel ve endüstriyel uygulamalarda çok kullanılan bir polimer türüdür. HDPE içerisine kalsiyum karbonat ilavesi hem polimerin maliyetini düşürmekte hem de sertlik gibi bazı değerlerin artmasına yol açmaktadır (Huang et al., 2008).

Kalsiyum karbonat talktan sonra en çok kullanılan mineral dolgu maddesidir. Uygun sertlik değerindeki kalsiyum karbonat polimer işleme makinelerinde kısa süreli arızalara neden olmamaktadır (Morales et al., 1998) Polimer kompozitlerde polimerik matris ile kalsiyum karbonat gibi dolgu maddesi arasında iyi bir yapışmanın olması çok önemlidir. Arayüzeyde yapışma kuvvetli ise elde edilen polimer kompozitinin elastiklik modül değeri, rijitliği, çekme mukavemeti ve tokluk değerleri artar. Kalsiyum karbonat gibi bir çok mineral organik dolgu maddesi inorganik matrise çok iyi yapışmazlar. Bu yüzden bu tip organik dolgu maddelerinin yüzeyleri uyumluluk maddeleri ile kaplanarak matrise olan yapışmanın artması sağlanır (Tjong et al., 2004). Bir çok türü olan polietilen kendine has mekanik ve fiziksel özellikleri ile dünyada yüksek tonajlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mühendislik polimerleri ile kıyaslandığında tokluk, hava koşullarına dayanım ve çatlama dirençlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu da kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla bu tip dezavantajları iyileştirmek için yüksek yoğunluklu polietilen içerisine dolgu maddeleri katarak özellikleri iyileştirilmektedir (Rothon, 1995; 1999, Tjong et al., 2004, Wang et al., 2009, Elleithy et al., 2011).

Literatürde polietilene nano boyutta kalsiyum karbonat eklenmesi ve dolayısıyla çekme mukavemeti, akışkanlığı ve boyutsal kararlılığı gibi özelliklerin iyileştirilmesi üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Lazzeria ve arkadaşlarının (Lazzeria et al., 2005) yapmış oldukları bir çalışmada polietilen içerisine nano boyutta kalsiyum karbonat eklenmesiyle polimer kompozitinin elastiklik modül değerinde %70'e varan bir artış sağlamışlardır. M.H. Chong ve arkadaşlarının (Chong et al., 2006) yapmış oldukları bir çalışmada ise kabuklu deniz ürünü olan istiridye tozlarını polietilen içerisine katarak elde ettikleri polimer kompozitinin alev geçiktirici özelliklerinin iyileştiğini ortaya koymuşlardır. İstiridye kabuğu tozlarının  $800^\circ\text{C}$ 'den yüksek sıcaklıklarda kalsiyum oksit ve karbondioksit ayrıldığı ve böylece üretilen karbondioksitin yangının oksijene erişimini engelleyerek yangının geçiktirilmesini sağlamaktadır. Bu geçiktirme mekanizması aynı zamanda çevre dostu bir mekanizmadır. Bir diğer çalışmada Funabashi ve arkadaşları (Funabashi et al., 2010) polibütilen süksinat (PBS) içerisine istiridye bio bazlı kalsiyum karbonat ilave etmişler ve elde ettikleri polimer kompozitinin özelliklerini incelemişlerdir.

Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen içerisine %10-20-30 ve 40 oranlarında istiridye veya midye gibi kabuklu bir deniz ürünü olan *pinna nobilis* ilave edilerek ekstürüzyonda karışımları yapılmış ve bir polimer kompoziti elde edilmiştir. Elde edilen polimer kompozitlerinden enjeksiyon makinesinde standartlara uygun olarak çeşitli test numuneleri basılmıştır. UL 94, oksijen indeksi ve kızgın tel deneyleri yapılarak polimer kompozitinin yanma davranışları belirlenmiştir. Ayrıca elastiklik modülü, akma mukavemeti, kopma mukavemeti, % uzama değeri, Izod darbe mukavemet değeri, sertlik ve yoğunluk değerlerinin *pinna nobilis* oranının artmasıyla nasıl değiştiği rapor edilmiştir. Bunlara ek olarak taramalı elektron mikroskopisi ile kırık yüzey fotoğrafları çekilerek polietilen ile *pinna nobilis* partiküllerinin yapışması ve dağılımları belirlenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kompozisyon ve Malzemeler

Yüksek yoğunluklu polietilen içerisinde değişik oranlarda *pinna nobilis* ilavesiyle beş farklı grup hazırlanmıştır. Hazırlanan polimer karışımının oranları Tablo 1'de verilmiştir. I-668 UV kodlu yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) Petkim'den (İzmir-Türkiye) temin edilmiştir. Yoğunluğu  $0,970 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Erime akış indeksi  $5,2 \text{ g/10 dak. (190}^\circ\text{C-2,16 kg)}$ 'dir. Akma mukavemeti 28 MPa ve oda sıcaklığındaki Izod darbe mukavemeti ise  $12 \text{ kJ/m}^2$ 'dir. *Pinna nobilis* Ayvalık sahillerinden (Ayvalık-Türkiye) toplanmıştır.

**Tablo 1.** HDPE/PN Polimer Karışımının Oranları

Gruplar	HDPE (%)	Pinna Nobilis (PN) (%)
1	100	-
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40

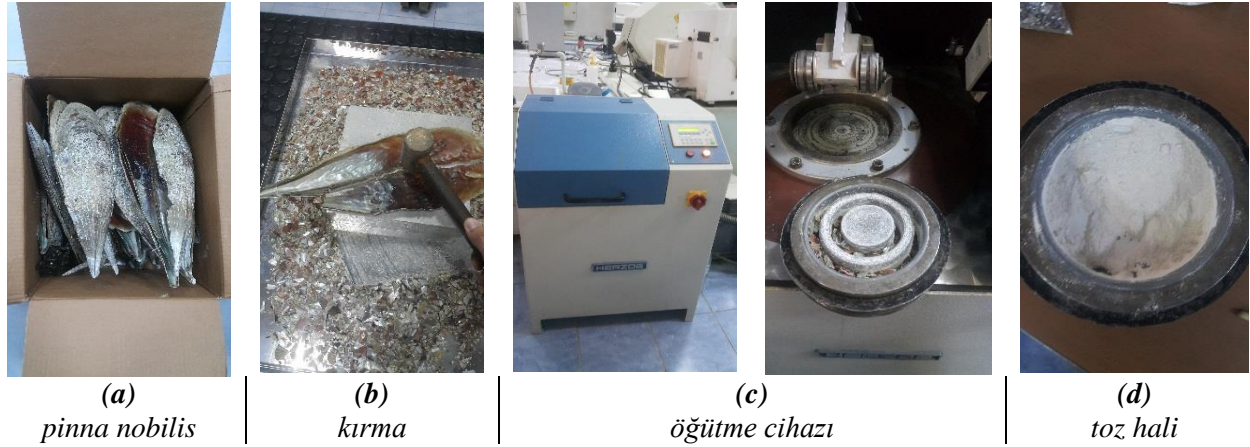
## 2.2. Numune Hazırlama

Denizden toplanan pinna nobilislerin yüzeyleri bıçak ile temizlenerek bir gün boyunca üzerindeki yağlardan arındırmak için tiner içerisinde bekletildi ve su ile yıkandı. Yamato vakum fırınında ADP-31 (Yamato/VWR Scientific Products, Japan) 105°C’de 6 saat boyunca kurutuldu. Daha sonra çekiç ile küçük parçalara ayrıldı ve Siemens simatic C7-621 öğütme cihazında parçacık büyüklükleri 1 mm - 38 µm aralığında olacak şekilde toz haline getirildi. Pinna nobilis fotoğrafı Şekil 1’de ve toz formuna getirilme aşamaları ise Şekil 2’de verilmiştir. Daha sonra bu tozlar HDPE ile ekstrüzyonda karışım öncesinde yine aynı kurutma fırınında bu sefer 105°C’de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutulma aşamasından sonra tozlar Patterson LB-5601 (Patterson-Kelley Co., USA) marka karıştırıcıda HDPE ile 15 dakika boyunca fiziksel olarak karıştırılmıştır. Daha sonra HDPE/PN polimer kompozitinin eriyik olarak karışımları Mikrosan marka (Mikrosan A.Ş. Türkiye) ters yönlere dönen çift vidalı bir ekstrüderde gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde kullanılan sıcaklık aralığı 190-220°C, basınç 32-37 bar ve vida dönme hızı ise 25-35 dev/dak’dır. Buradan çıkan granüller enjeksiyonla kalıplama öncesinde tekrar kurutma fırınında 24 saat boyunca 105°C’de kurutulmuşlardır. Son olarak enjeksiyon makinesinde standart test numuneleri basılmıştır. Tablo 2’de ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama parametreleri verilmiştir.

**Tablo 2.** HDPE/PN Polimer Kompozitinin Ekstrüzyon ve Enjeksiyon Kalıplama Parametreleri

İşlem	Ekstrüzyon	Enjeksiyon
Sıcaklık (°C)	190-220	190-220
Basınç (bar)	32-37	130-150
Kalıpta bekleme süresi (sn)	-	20
Vida hızı (dev/dak)	25-35	25
Kalıp sıcaklığı (°C)	-	30-40

**Şekil 1.** Pinna Nobilis (Axiosdelta, 2020)



Şekil 2. Pinna Nobilis'in Toz Haline Getirilme Aşamaları

### 2.3. Karakterizasyon

HDPE/PN polimer karışımlarının elastiklik modülü, akma mukavemeti, kopma mukavemeti ve % uzama değerlerini belirlemek için çekme testleri ASTM D638 standardına göre Zwick Z010 marka çekme test cihazında (Almanya) çekme hızı 50 mm/dak olacak şekilde yapıldı. Test oda sıcaklığında gerçekleştirildi ve her grup için 5 numune test edilerek ortalamaları verildi. Durometre sertlik değerleri ASTM D2240'a göre Zwick marka test cihazında gerçekleştirildi. Burada on adet ölçüm yapılarak ortalamaları verildi. Kırılma davranışlarını belirlemek için çentikli Izod darbe testleri ASTM D256 standardına göre Zwick B5113 marka darbe test cihazında gerçekleştirildi. Bu testte 6 adet numune test edilerek ortalamaları verildi. Polimer karışımının yoğunlukları ise ISO 2781 test standardına göre yapıldı. Üç numune test edilerek ortalamaları verildi. Limit oksijen indeksi testleri ISO 4589 test standardına göre Devotrans limit oksijen indeksi belirleme cihazında gerçekleştirildi. Bu testte her grup için beş adet numune kullanıldı. UL-94 yanma testleri ASTM D3801 standardına göre üç numune ortalaması alınarak yapıldı. Kızgın tel deneyi ise IEC 60695-2-11 metoduna göre üç numune ortalaması alınarak yapıldı. Mikro yapı incelemeleri için kırık yüzeyler elektriksel sarji önlemek için 10 nm kalınlığında altın (Au) (%80)/Paladyum (Pd) (%20) alaşımı ile Polaron SC 7620 cihazında (Gala Instrumente GmbH, Almanya) kaplandı. Son olarak kırık yüzey fotoğrafları JEOL-JSM 5910 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı ile (JEOL Ltd., Japan) 2,5-5 ve 10 kV altında incelendi.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 3.1. HDPE/PN polimer kompozitinin fiziksel ve mekanik test deney sonuçları

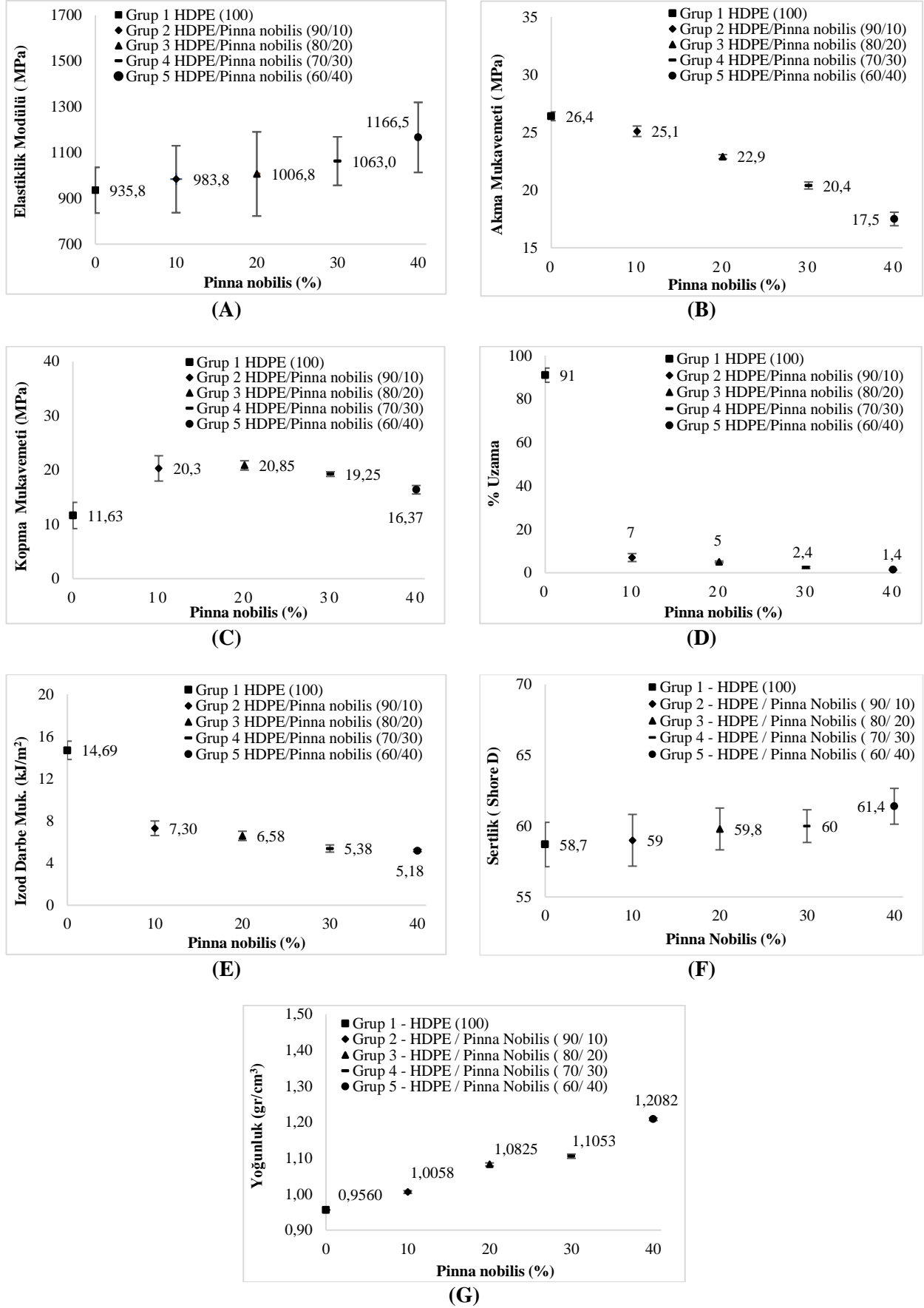
Yüksek yoğunluklu polietilene pinna nobilis ilevesiyle oluşturulan polimer kompozitinin elastiklik modül değerleri Şekil 3-A'da verilmiştir. Şekilden Pinna nobilis oranının artışıyla birlikte elastiklik modül değerinin de arttığı görülmektedir. Pinna nobilis %10-20-30 ve 40 oranlarında katıldıklarında sırasıyla elastiklik modül değerlerinin 984-1007-1063-1167 MPa oldukları görülmektedir. Saf HDPE'nin elastiklik modül değeri ise 936 MPa'dır. Maksimum elastiklik modül değerini %40 Pinna nobilis ilaveli grup vermiştir. Saf HDPE ie bu değer kıyaslandığında %25 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir. Hai-Yan Li ve arkadaşları (Li et al., 2016) bir tür kabuklu deniz ürünü olan Mytilus edulis'i polipropilen içerisine katmışlar ve mekanik özelliklerini inceledikleri zaman elastiklik modül değerinin arttığını belirlemişlerdir. Bu sonuç buradaki çalışmadan elde edilen sonuç ile paralellik göstermektedir. Şekil 3-B'ye baktığımızda pinna nobilis ilavesinin akma mukavemeti değerlerini nasıl etkilediği görülmektedir. Burada ise yüksek yoğunluklu polietilen matris içerisinde pinna nobilis oranının artışıyla kompozitin akma mukavemet değerlerinin düştüğü görülmektedir. Pinna nobilis %10-20-30 ve 40 oranlarında katıldıklarında sırasıyla akma mukavemeti değerleri 25-23-20 ve 18 MPa oldukları grafikten görülmektedir. En düşük akma mukavemet değerini %40 pinna nobilis ilaveli grup vermiştir. Saf HDPE'nin akma mukavemet değeri ise 26 MPa'dır. Bu iki değeri birbiri ile kıyasladığımızda akma mukavemeti değerinin %31 oranında düştüğü anlaşılmaktadır. Hai-Yan Li ve arkadaşları (Li et al., 2016) Polipropilen/Mytilus edulis polimer kompozitinin akma mukavemet değerinin ve akma uzama miktarının artan Mytilus edulis ile düştüğünü belirlemişlerdir. Yao ve arkadaşlarının (Yao et al., 2013) yapmış oldukları bir çalışmada ise istiridye kabuklarının polipropilen içerisine katıldığında polimer kompozitinde istiridye kabuk oranının artmasıyla çekme mukavemet değerinin düştüğünü belirlemişlerdir. Dolayısıyla bu iki çalışmadan

elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen değerler arasında bir paralellik vardır. Şekil 3-C'ye baktığımızda pinna nobilis ilavesinin çekme mukavemeti değerlerini nasıl etkilediği görülmektedir. Yüksek yoğunluklu polietilen matris içerisinde pinna nobilis oranının artışıyla kompozitin kopma mukavemet değerlerinin önce bir miktar yükseldiği sonra ise düştüğü görülmektedir. Pinna nobilis %10-20-30 ve 40 oranlarında katıldıklarında sırasıyla kopma mukavemeti değerleri 20-21-19 ve 16 MPa oldukları grafikten görülmektedir. Saf HDPE'nin kopma mukavemet değeri yaklaşık 12 MPa'dır. En yüksek kopma mukavemeti değerini %20 pinna ilaveli grup vermiştir. Bu iki değeri birbiri ile kıyasladığımızda kopma mukavemet değerinin %75 oranında arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 3-D'ye baktığımızda pinna nobilis ilavesinin % uzama değerlerini nasıl etkilediği görülmektedir. Yüksek yoğunluklu polietilen içerisinde pinna nobilis oranının artmasıyla % uzama değerlerinin düştüğü görülmektedir. Pinna nobilis %10-20-30 ve 40 oranlarında katıldıklarında sırasıyla % uzama değerleri 7-5-2 ve 1 olarak ölçülmüştür. Saf yüksek yoğunluklu polietilenin % uzama değeri ise %91'dir. En düşük uzama mikrarını %40 oranında pinna nobilis ilaveli grupta olduğu grafikten görülmektedir. Bu iki değeri birbiri ile kıyasladığımızda uzama değerinin %98 oranında düşmüş olduğu tespit edilmiştir. Hai-Yan Li ve arkadaşları [16] Polipropilen/Mytilus edulis polimer kompozitinin % uzama değerinin artan Mytilus edulis ile düştüğünü belirlemişlerdir. Yao ve arkadaşlarının (Yao et al., 2013) yapmış oldukları bir çalışmada ise istiridye kabuklarının polipropilen içerisine katmışlar ve elde ettikleri polimer kompozitinde istiridye kabuk oranının artmasıyla % uzama değerinin düştüğünü belirlemişlerdir. Dolayısıyla bu iki çalışmadan elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen değerler arasında bir paralellik vardır. Şekil 3-E'ye baktığımızda pinna nobilis oranının artışıyla polimer karışımının Izod darbe değerlerinin nasıl değiştiği görülmektedir. Grafikten karışımdaki pinna nobilis oranının artışıyla kompozitin Izod darbe mukavemet değerlerinde bir düşüşün olduğu anlaşılmaktadır. Pinna nobilis %10-20-30 ve 40 oranlarında katıldıklarında sırasıyla Izod darbe mukavemeti değerleri 7,3-6,6-5,4 ve 5,1 kJ/m<sup>2</sup> olduğu görülmekte. En fazla düşüş %40 pinna nobilis ilaveli grupta olmuştur. Saf HDPE'nin Izod darbe değeri ise 14,7 kJ/m<sup>2</sup>'dir. Bu iki değeri birbiri ile kıyasladığımızda Izod darbe mukavemet değerinde %65 oranında bir düşüş tespit edilmiştir. Şekil 3-F'de ise pinna nobilis ilavesinin artışıyla polimer kompozitinin sertlik değerlerinin nasıl değiştiği görülmektedir.

Burada ise pinna nobilis ilavesi sertlik değerlerinin artmasına sebebiyet vermiştir. Pinna nobilis %10-20-30 ve 40 oranlarında katıldıklarında sırasıyla sertlik değerleri 59-59,8-60 ve 61,4 Shore D'dir. En yüksek sertlik değeri %40 pinna ilaveli gruba aittir. Saf HDPE'nin sertlik değeri ise 58,7 Shore D'dir. Bu iki değeri birbiriyle kıyasladığımızda pinna ilavesiyle sertlik değerinin %5 oranında arttığı belirlenmiştir. Şekil 3-G'de pinna nobilis ilavesinin karışımın yoğunluğunu nasıl değiştirdiğini gösteren grafik verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi karışımda pinna nobilis oranının artmasıyla yoğunlukta arttığı görülmektedir. Pinna nobilis %10-20-30 ve 40 oranlarında katıldıklarında sırasıyla yoğunluk değerlerinin 1,0058-1,082-1,1053 ve 1,2082 g/cm<sup>3</sup> olduğu görülmekte. En yüksek artış %40 pinna nobilis ilaveli gruba aittir. Saf HDPE'nin yoğunluğu ise 0,9560 g/cm<sup>3</sup>'tür. Bu iki değeri birbiri ile kıyasladığımızda yoğunluğun %26 oranında arttığı anlaşılmaktadır.

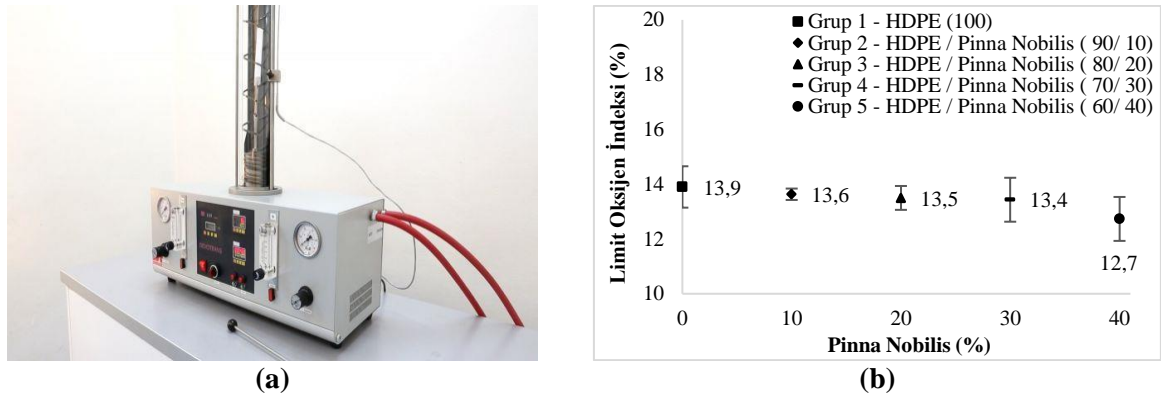
### 3.2. HDPE/PN polimer kompozitinin limit oksijen indeksi testi deney sonuçları

Limit oksijen indeksi testi bir polimerin yanmaya devam etmesi için ortamda bulunması gereken minimum oksijen oranının belirlemesi temeline dayanır. Yüksek yoğunluklu polietilen içerisinde pinna nobilis tozlarının oranının artışıyla limit oksijen indeksi değerlerinde bir düşüş olduğu Şekil 4'te görülmektedir. 1. Gruba ait (saf HDPE) limit oksijen indeksi değerinin %13,9 olduğu, buna karşılık %40 pinna nobilis ilaveli 5. grubun limit oksijen indeksi değerinin ise %12,7 olduğu görülmektedir. Bu iki değeri birbiri ile kıyasladığımızda limit oksijen indeksi değerinin %9 oranında azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3. HDPE/Pinna Nobilis Polimer Kompozitinin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri





Şekil 4. a) Limit Oksijen İndeksi Test Cihazı, b) Elde Edilen Değerlerin Grafikal Gösterimi

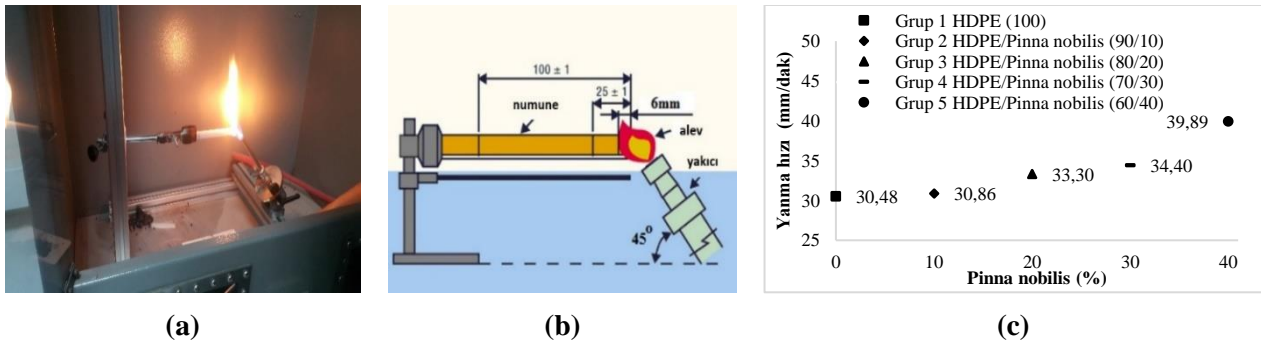
### 3.3. HDPE/PN polimer kompozitinin yatay yanma (HB) testi deney sonuçları

Yanma testinde numune cihaza yatay olarak yerleştirilir ve 30 saniye boyunca alev tutulur. Buradaki alev boyu ise 20 mm'dir. Herhangibir tutuşma veya yanma var ise not edilir. Eğer numune 100 mm'den önce söner ise veya 3-13 mm et kalınlığındaki numuneler 40 mm/dak'dan daha az yanarsa ve 3 mm'den küçük et kalınlığındaki numuneler 75 mm/dak'dan daha az yanar ise numune HB sınıfında sayılır. Bu en düşük (en düşük alev geciktiricilik) UL94 yanma seviyesidir. Bu çalışmada altı adet numune test edildi ve ortalamaları verildi. Yüksek yoğunluklu polietilen içerisine pinna nobilis tozlarının ilavesiyle oluşturulan karışımların yatay yanma kriterleri Tablo 3'te ve yanma hızı grafiği ise Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'ten de anlaşıldığı gibi matris içerisine pinna nobilis tozlarının oranlarının artışıyla yanma hızında bir artış olduğu görülmektedir. Grafikten saf HDPE'nin yanma hızının 30,48 mm/dak olduğu buna karşılık %40 pinna nobilis ilaveli grubun yanma hızı değerinin ise 39,89 mm/dak olduğu görülmektedir. Bu iki grubu kendi arasında kıyasladığımızda yanma hızının %31 oranında arttığı anlaşılmaktadır. Kalsiyum karbonat bazlı bir malzeme olan pinna nobilis ilavesi ile yanma hızının artması değil düşmesi bekleniyordu. Fakat burada yanma hızının arttığı tespit edildi. Bunun matris ve pinna nobilis arasında adezyonu sağlayacak bir uyumluluk maddesi kullanılmadığından olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 3. Yatay Yanma Kriterleri

Gruplar	Numune boyutları (mm) uzunluk x genişlik x kalınlık	Mesafe (mm)	Yanma zamanı (dak) (75 mm'lik mesafe)	Yanma oranı (mm/dak)	Sınıf
1	125 x 13 x 3	75	2.46	30.48	HB
2	125 x 13 x 3	75	2.43	30.86	HB
3	125 x 13 x 3	75	2.25	33.30	HB
4	125 x 13 x 3	75	2.18	34.40	HB
5	125 x 13 x 3	75	1.88	39.89	HB

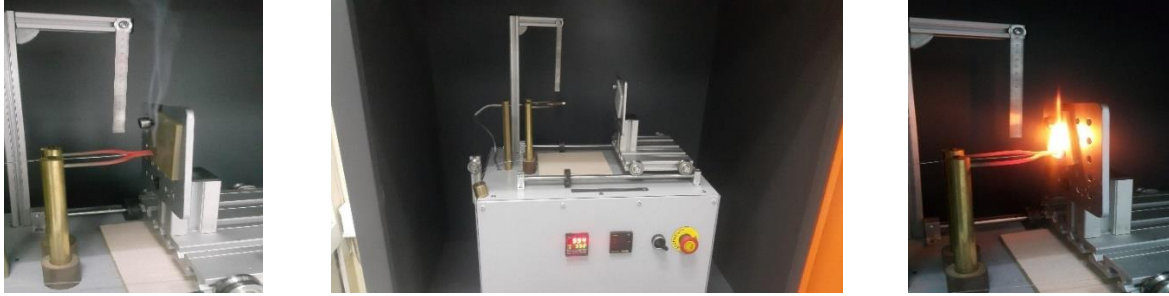
Alev yüksekliği: 20 mm. Alev uygulama süresi (25 mm'lik bölgeye uygulanır): 30 sn



Şekil 5. HDPE/Pinna Nobilis Polimer Kompozitinin a) Deney Esnasında Çekilen Fotoğrafı, b) Düşey Yanma Test Düzenliği, c) Yanma Hızı Grafiği

### 3.4. HDPE/PN polimer kompozitinin kızgın tel testi deney sonuçları

IEC 60695-2-11:2014(*Fire hazard testing - Part 2-11: Glowing/hot-wire based test methods - Glow-wire flammability test method for end-products*) test metoduna göre yapılan kızgın tel deneyi genellikle elektrik-elektronik sektöründe kullanılan plastik parçaların yanma davranışlarını belirlemek için uygulanan bir test yöntemidir. Yani elektriksel uygulamalarda tercih edilen bir test tekniğidir. Yüksek ısı veya endüksiyon ortamında plastik malzemenin dayanımı ölçülür. Değişik sıcaklıklardaki kızaran tel plastik numuneye 30 saniye boyunca 1 newton kuvvet ile değdirilir. Bu süre içerisinde alevin oluşup oluşmadığı, alevin boyu, alevin kaç saniyede söndüğü ve plastik parçada bir damlamanın olup olmadığı gibi durumlar not edilir. Eğer numune 30 saniye içerisinde alev almıyor veya alev alan numune 30 saniye içerisinde sönyorsa numune testi geçmiş kabul edilir. Tablo 4'te yüksek yoğunluklu polietilen içerisinde pinna nobilis ilavesiyle oluşturulan karışımın kızgın tel deney sonuçları verilmiştir. Tablodan da anlaşıldığı gibi 550 ve 600°C'de yapılan testlerde plastik parçalar alev almamış fakat 650°C'de yapılan testlerde ise plastik parçaların alev aldıkları görülmektedir. Yüksek yoğunluklu polietilen içerisinde pinna nobilis oranının artışıyla 650°C'de yapılan testlerde numunelerdeki alev boyunun artışı ve 30 saniye içerisinde sönmeyeceği tablodan anlaşılmaktadır. Şekil 6'da kızgın tel deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 6. Kızgın Tel Deney Düzeneği (fotoğraflar Münir Taşdemir tarafından çekilmiştir)

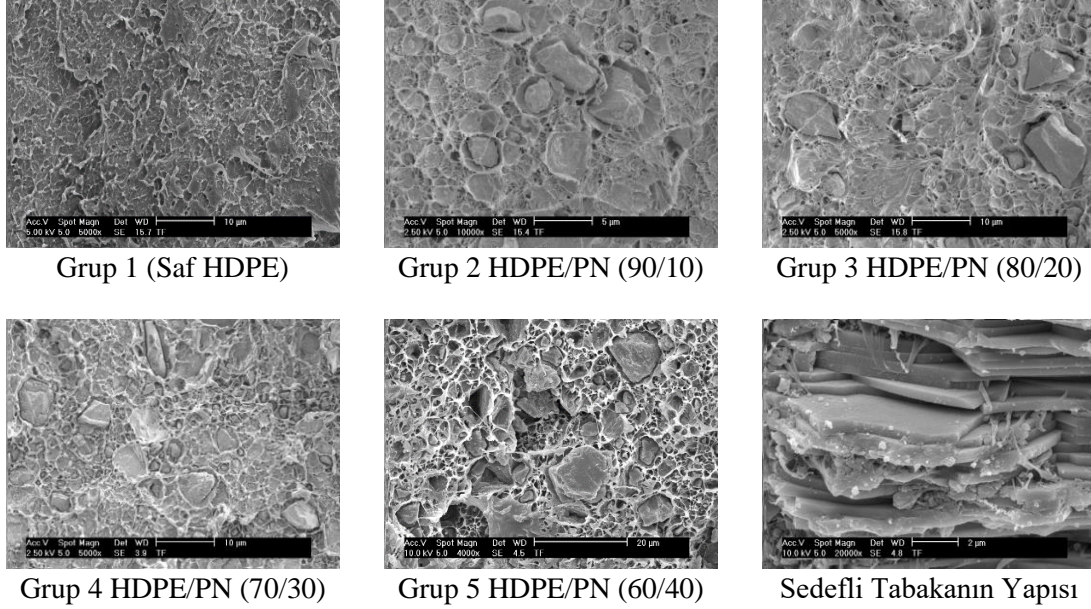
Tablo 4. Kızgın Tel Deney Sonuçları

Grup	Kızgın Telin Sıcaklığı (°C)	Alev Oluşturdu mu?	30 saniye içerisinde söndü mü? Damlama var mı?
1	550	Hayır	Hayır
	600	Hayır	Hayır
	650	Evet (1,5 cm alev boyu)	Sönmedi/Hayır
2	550	Hayır	Hayır
	600	Hayır	Hayır
	650	Evet (2,5 cm alev boyu)	Sönmedi/Hayır
3	550	Hayır	Hayır
	600	Hayır	Hayır
	650	Evet (3,5 cm alev boyu)	Sönmedi/Hayır
4	550	Hayır	Hayır
	600	Hayır	Hayır
	650	Evet (4 cm alev boyu)	Sönmedi/Hayır
5	550	Hayır	Hayır
	600	Hayır	Hayır
	650	Evet (8 cm alev boyu)	Sönmedi/Hayır

Baskı kuvveti: 1 N Maksimum penetrasyon derinliği: 7 mm  
Uygulama süresi: 30 sn Numune ölçüleri (mm): 70 x 70 x 10

### 3.5. HDPE/PN polimer kompozitinin mikroyapı analizleri

Şekil 7’de yüksek yoğunluklu polietilen içerisine pinna nobilis ilavesiyle oluşturulan polimer kompozitinin SEM ile çekilmiş mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflardan da anlaşıldığı gibi matris ve pinna nobilis partikülleri açıkça gözükmemektedir. Pinna nobilis partikülleri matris içerisinde homojen olarak dağılmışlardır.



Şekil 7. HDPE/PN Polimer Kompozitinin Mikroyapı Fotoğrafları

## 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilene değişik oranlarda pinna nobilis ilavesiyle oluşturulan polimer kompozitinin elastiklik modülü, akma mukavemeti, kopma mukavemeti, % uzama miktarı, Izod darbe direnci, sertlik değeri, yoğunluk değerindeki değişimler belirlenmiştir. Bunların dışında yanma davranışlarını belirlemek için limit oksijen indeksi, kızgın tel ve UL94 yanma deneyleri uygulanmış olup pinna nobilis partiküllerin dağılımları ise SEM mikroyapı analizleri ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; Yüksek yoğunluklu polietilen içerisinde pinna nobilis oranının artmasıyla akma mukavemeti, % uzama değeri ve Izod darbe mukavemeti değerleri düşmüştür. Kopma mukavemeti değeri ise bir miktar arttıktan sonra pinna nobilis oranının daha da artmasıyla birlikte düşüş göstermiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen içerisinde pinna nobilis oranının artmasıyla elastiklik modül, sertlik ve yoğunluk değerleri yükselmiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen içerisinde pinna nobilis oranının artmasıyla UL 94 testinde yanma hızı değeri artmıştır. Kızgın tel deneyinde elde edilen sonuçlara göre polimer kompozitine uygulanan sıcaklığın artışıyla yanabilirlik artmıştır. Pinna nobilis partikülleri matris içerisinde homojen olarak dağılmışlardır.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu araştırma makalesinde çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR

- Axiosdelta (2020). (Accessed:20/12/2020) [axiosdelta.gr/en/2020/01/24/pinna-nobilis-critically-endangered-2020](https://axiosdelta.gr/en/2020/01/24/pinna-nobilis-critically-endangered-2020)
- Chong, M. H., Chun, B. C., Chung, Y. C., & Cho, B.G. (2006). Fire-retardant plastic material from oyster-shell powder and recycled polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 99(4) 1583-1589. doi:[10.1002/app.22484](https://doi.org/10.1002/app.22484)
- Elleithy, R., Ali, I., Ali, M. A., & Al-Zahrani, S. M. (2011). Different factors affecting the mechanical and thermo-mechanical properties of HDPE reinforced with micro-CaCO<sub>3</sub>. *J. of Reinforced Plastics and Composites*, 30(9), 769-780. doi:[10.1177/0731684411400111](https://doi.org/10.1177/0731684411400111)

- Folke, C., & Kautsky, N. (1989). The role of ecosystems for a sustainable development of aquaculture. *Ambio*, 18, 234-243.
- Funabashi, M., Ninomiya, F., Flores E. D., & Kunioka, M. (2010). Biomass Carbon Ratio of Polymer Composites Measured by Accelerator Mass Spectrometry. *Journal Polymer Environmet*, 18, 85-93. doi:[10.1007/s10924-010-0166-3](https://doi.org/10.1007/s10924-010-0166-3)
- Huang, J. W. (2008). Isothermal crystallization of high density polyethylene and nanoscale calcium carbonate composites. *J. App. Poly.Sci.*, 107(5), 316-3172. doi:[10.1002/app.27503](https://doi.org/10.1002/app.27503)
- Jung, J. H., Lee, J. J., Lee, G. W., Yoo, K. S., & Shon, B. H. (2012). Reuse of Waste Shells as a SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Removal Sorbent. *Material Recycling - Trends and Perspectives*, 12, 301-322. doi:[10.5772/33887](https://doi.org/10.5772/33887)
- Lazzeria, A., Zebbarjadb, S.M., Pracellac, M., Cavalierd, K., & Rosam, R. (2005). Filler toughening of plastics. Part 1-The effect of surface interactions on physico-mechanical properties and rheological behaviour of ultrafine CaCO<sub>3</sub>/HDPE nanocomposites. *Polymer*, 46, 827-844. doi:[10.1016/j.polymer.2004.11.111](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.111)
- Li, H. Y., Tan, Y. Q., Zhang, L., Zhang, Y. X., Song, Y. H., Ye, Y., & Xia, M. S. (2012). Bio-filler from waste shellfish shell: preparation, characterization, and its effect on the mechanical properties on polypropylene composites. *Journal of Hazardous Materials*, 217-218, 256-262. doi:[10.1016/j.jhazmat.2012.03.028](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.028)
- Morales, E., & White, J. R. (1998). Residual streses and molrcular orientation in particulate-filled polypropylene. *J. Mater Sci*, 23, 3612. doi:[10.1007/BF00540503](https://doi.org/10.1007/BF00540503)
- Rothon, R. N., (1999). Mineral Fillers in Thermoplastics: Filler Manufacture and Characterisation. *Mineral Fillers in Thermoplastics I*, 139, 67-107. doi:[10.1007/3-540-69220-7\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-69220-7_2)
- Rothon, R. N. (1995). Particulate-Filled Polymer Composites, Longman Scientific and Technical: Harlow.
- Tjong, S. C., Li, R. K. Y., & Cheung, T. (2004). Mechanical behavior of CaCO<sub>3</sub> particulate-filled β-crystalline phase polypropylene composites. *Polym Eng Sci.*, 37, 166-172. doi:[10.1002/pen.11657](https://doi.org/10.1002/pen.11657)
- Wang, H. Y., Kuo, W. T., Lin, C. C., & Po-Yo, C. (2013). Study of the material properties of fly ash added to oyster cement mortar. *Construction and Building Materials*, 41, 532-537. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2012.11.021](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.021)
- Wang, Z., & Wang, X. (2010). Rheology and Dispersion Behavior of Highly Filled Propylene-Ethylene Copolymer/Calcium Carbonate Composites. *Polymer-Plastics Tech. and Eng.*, 49(7), 637-642. doi:[10.1080/03602551003664578](https://doi.org/10.1080/03602551003664578)
- Wang, Y., Shi, J., Han, L., & Xiang, F. (2009). Crystallization and mechanical properties of T ZnOw/ HDPE composites. *Mater Sci Eng A*, 220, 501-510. doi:[10.1016/j.msea.2008.09.061](https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.061)
- Ward, J. E., Zhao, S., Holohan, B. A., Mladinich, K. M., Griffin, T. W. Wozniak, J., & Shumway, S. E. (2019). Selective Ingestion and Egestion of Plastic Particles by the Blue Mussel (*Mytilus edulis*) and Eastern Oyster (*Crassostrea virginica*): Implications for Using Bivalves as Bioindicators of Microplastic Pollution. *Environ. Sci. Technol.*, 53(15), 8776-8784. doi:[10.1021/acs.est.9b02073](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02073)
- Yao, Z. T., Chen, T., Li, H. Y., Xia, M. S., Ye, Y., & Zheng, H. (2013). Mechanical and thermal properties of polypropylene (PP) composites filled with modified shell waste. *Journal of Hazardous Materials*, 262(15), 212-217. doi:[10.1016/j.jhazmat.2013.08.062](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.08.062)



## Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması ve Enerji Şebekesi Üzerine Etkisi Konulu Derleme Çalışması

### A Review on Locating the Electric Vehicle Charging Stations and Their Effect on the Energy Network

Mustafa NURMUHAMMED<sup>1\*</sup> , Teoman KARADAĞ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>İnönü Üniversitesi, Malatya OSB Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Malatya

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya

Anahtar Kelimeler	Özet
Elektrikli Araç Şarj İstasyonları Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması Şarj İstasyonlarının Enerji Şebekesine Etkileri	Dünyanın birçok ülkesinde satış rakamları hızla büyüyen elektrikli araçlar, son on yılda otomotiv sektöründe yükselen bir trende sahiptir. Elektrikli araçların yaygınlaşmasında önemli bir yere sahip olan hızlı şarj istasyonları çok kısa sürede elektrikli araçları hızlı bir şekilde şarj edebilmektedir. Günümüz elektrikli araçlarında daha büyük kapasitelerde bataryalar mevcut olup ilk çıkan elektrik araçlara nazaran şarj kapasitesi ciddi ölçüde artmıştır. Birçok elektrikli aracın aynı anda veya öngörülemeyen zaman dilimlerinde şarj olması elektrik arz ve talebinde çok büyük farklılara neden olmaktadır. Bu farklar dikkate alınmadan şarj istasyonlarının kurulumu gerçekleştirildiğinde yüksek hızlarda şarj olan araçlar şebekede gerilim dengesizliğine ve güç kayıplarına neden olup enerji şebekesini olumsuz etkileyebilmektedir. Hem şebekede alınacak önlemler ve yatırım kararları hem de hızlı şarj istasyonlarının şebekeye olası olumsuz etkisi nedeniyle doğru yerde konumlandırılmaları büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmayla, elektrikli araç şarj sistemleri ve bu sistemlerin enerji şebekesi üzerine etkileri ile ilgili son on yılda öne çıkan çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak şarj istasyonlarının enerji şebekesine etkisinin azaltılarak en uygun noktaya konumlandırılması ile ilgili veriler çalışmayla sunulmuştur.

Keywords	Abstract
Electric Vehicle Charging Stations Locating Charging Stations Impact of Charging Stations on the Energy Grid	Electric vehicles, whose sales figures are growing rapidly in many countries of the world, have had a rising trend in the automotive industry in the last decade. Having an important place in the widespread use of electric vehicles, fast charging stations can quickly recharge electric vehicles in a very short time. Today's electric vehicles have larger battery capacities and their charging capacities have increased significantly compared to the first electric vehicles. Charging many electric vehicles at the same time or in unforeseen time periods causes huge differences in electricity supply and demand. When the charging stations are installed without considering these differences, vehicles charging at high speeds can cause voltage imbalance and power losses and adversely affect the energy network. It is of great importance that both the precautions and investment decisions to be taken in the network and the fast-charging stations are located in the right place due to their possible adverse impact on the network. With this study, the prominent studies in the last decade on electric vehicle charging systems and the effects of these systems on the energy network have been examined in detail. As a result, data on the locating charging stations to the most appropriate point by reducing their effect on the energy network is presented.

#### Alıntı / Cite

Nurmuhammed, M., & Karadağ, T. (2021). Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması ve Enerji Şebekesi Üzerine Etkisi Konulu Derleme Çalışması. *GU J Sci, Part A*, 8(2), 218-233.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
M. Nurmuhammed, 0000-0002-5957-3255	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b> 07.12.2020
T. Karadağ, 0000-0002-7682-7771	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b> 27.04.2021
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b> 01.05.2021
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b> 03.05.2021

## 1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EA), 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında piyasaya çıkmış ve o dönemde olumlu bir trend yakalamıştır. İlerleyen yıllarda içten yanmalı motor teknolojisindeki gelişmeler ile seri üretimin artması ve petrolün yaygınlaşmasıyla, maliyetlerin düşmesi elektrikli araçlara olan ilgiyi azaltmıştır (Chan, 2013). 1970'li yılların başında ve sonrasında yaşanan enerji krizleri ile EA geçici olarak tekrar gündeme gelmiştir. Elektrikli araçlar 2000'li yıllara kadar çok az kullanıcı tarafından benimsenmiştir. 2008 yılı sonrasında batarya ve diğer EA parçalarında kaydedilen teknolojik gelişmeler elektrikli araçların kitlesel olarak pazara sunulmasının önünü açmıştır. 2014 yılı sonrasında satışlar ivme kazanmaya başlamıştır. Tüm dünyada elektrikli araç satışlarında 2014 - 2019 yılları arasında %46 ile %69 arasında değişen büyüme rakamları kaydedilmiştir (Irlle, 2020). Avrupa'daki araç satışları incelendiğinde tüm araç satışları 2020 yılının ilk üç çeyreğinde bir önceki yıla göre %29 azalırken, elektrikli araç satışları %65, şarj edilebilir hibrit satışları %179 artarak; toplamda şarj edilebilir araç satışlarında %103 artış olmuştur (Kane, 2020). Elektrikli araç satışlarındaki büyümeye paralel olarak elektrikli araç sektörü de büyümektedir. Yapılan bir derleme çalışmasında elektrikli araçların tercih sebepleri araştırılmış ve aşağıdaki faktörlerin etkili olduğu görülmüştür:

- Elektrikli araç satın alma maliyeti,
- Bakım-onarım maliyeti,
- Sürüş menzili,
- Şarj süresi,
- Araç performansı,
- Şarj istasyonları altyapısı,
- Marka çeşitliliği (Liao vd., 2017).

Hava kirliliğinin yaşandığı ülkelerden Çin'de yapılan bir çalışmada ise hava kirliliği ve fiyat uygunluğu kriterlerinin ön plana çıktığı, araç performansı ve devlet teşviklerinin de önemli rol oynadığı belirtilmiştir (Lin & Wu, 2018). Yukarıda sayılan maddelerden şarj istasyonları, uzun yol seyahatlerini mümkün kıldığı ve evde şarj imkânı olmayan kullanıcıların elektrikli araç kullanmasının önünü açtığı için bu sektördeki en önemli unsurlardan biridir.

## 2. ŞARJ İSTASYONLARI

Elektrikli araçların şarj işlemi Alternatif akım (Alternative Current - AC) ve doğru akım (Direct Current - DC) ile şarj olarak ikiye ayrılır.

### 2.1. AC Şarj İstasyonları

Şebeke üzerinden sunulan AC enerji ile çalışan şarj istasyonları şebeke ve elektrik tesisatının elverdiği ölçüde farklı hızlar sunmaktadır. Araç içerisinde bulunan çevirici (on-board charger) üreticinin sınırladığı enerji seviyesini geçmeyecek şekilde AC enerjiiyi bataryalara iletmek üzere DC enerjiye dönüştürür. Örneğin 7.4 kW'lık çeviriciye sahip bir araç 22 kW'lık bir AC şarj istasyonuna bağlandığında bataryalara en fazla 7.4 kW'lık enerji aktarılır.

Günümüzde genellikle 380 V trifaz ile beslenen 22 kW hızında AC şarj istasyonları fiyatının uygun olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem 22 kW şarj hızındaki istasyonlar hem de bazı araç üreticilerinin AC şarj ile 43 kW hızında şarjı desteklemeleri Otomotiv Mühendisleri Derneği'nin (Society of Automotive Engineers-SAE) aşağıdaki Tablo 1'de verilen aralığında yer almamaktadır.

**Tablo 1.** SAE'nin Tanımladığı AC Standartları (SAE International, 2017)

Şarj Yöntemi	Gerilim (AC - V)	Faz	Maksimum Akım (A)	Maksimum Güç (kW)
AC Seviye 1	120	1-faz	12	1.44
			16	1.92
AC Seviye 2	208 - 240	1-faz	≤ 80	<19.2

SAE tarafından daha önce AC Seviye 3 için 20 kW üzeri güç, 1-faz veya 3-faz olarak 2011 yılında standart önerilmiş fakat sonlandırılmamıştır (Herron, 2017).

## 2.2. DC Şarj İstasyonları

Elektrikli araçlardaki bataryalar yapıları gereği Doğru Akım (DC) ile şarj olurlar. Araç içinde bulunan AC-DC çevirici ile çevrilen güç, çok yüksek akımlarda oluşan ısınmadan dolayı üreticiler tarafından sınırlandırılır. Diğer bir yöntem ise AC-DC dönüşümünü aracın dışında yaparak araca doğrudan DC güç vermektir. Bu yöntem ile araç üzerindeki dönüştürücü kullanılmadığından, bu cihazın getirdiği güç sınırlaması yerine DC güç ile şarj olurken getirilen sınırlamalar geçerli olur. DC güç için şarj sınırlamaları AC güce göre çok daha yüksek hızları desteklediğinden elektrikli araçlar DC güç ile çok yüksek hızlarda, çok kısa sürelerde şarj olabilirler.

Elektrikli araç satışlarının her geçen yıl arttığı düşünüldüğünde, DC şarj istasyonları sayısının da zamanla artacağı öngörülmektedir. DC şarj istasyonları, kullanıcılara daha hızlı şarj imkânı sunarken, şarj istasyonunun yüksek güç talebi nedeniyle elektrik şebekesine ani yük getirme ve dolayısıyla trafo ömürlerinin kısılması, trafo kapasitelerinin yükseltilmesi gibi önemli miktarda maliyet potansiyeline sahiptir (Shao vd., 2011). Bu sebeple kurulacak olan şarj istasyonlarının kullanıcıların ortak yaşam alanlarında faaliyet göstermesi ve en uygun noktalara yerleştirilmesi yıllık oluşabilecek ekstra maliyetleri azaltmaya yardımcı olabilir (McPhail, 2014). Elektrikli araçların yaygınlaşmasındaki en önemli sebeplerden biri olarak, şarj altyapısının yaygınlaşması ve gelişmesi gösterilebilir (Ashique vd., 2017). Ayrıca elektrikli araç şarj işleminin standardizasyonu ve yasal altyapısının sağlanması için çalışan dünya çapında üç ana organizasyon vardır. Bunlar; Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission - IEC), CHAdeMO (Charge de Move) ve Otomotiv Mühendisleri Derneği (Society of Automotive Engineers – SAE)'dir. Tesla Motors ise kendi şarj standardını kullanmaktadır (Tan vd., 2016). Tablo 2'de SAE'nin şarj istasyonları için tanımladığı DC çıkış gerilimi, maksimum akım ve güç bilgileri verilmiştir.

**Tablo 2.** SAE'nin Şarj İstasyonları İçin Tanımladığı DC Standartları (SAE International, 2017)

Şarj Yöntemi	DC Çıkış Gerilimi (DC V)	Maksimum Akım (A)	Maksimum Güç (kW)
DC Seviye 1	50 - 1000	80	80
DC Seviye 2	50 - 1000	400	400

Elektrikli araçların şarj süreleri batarya grubunun kapasitesi ve şarj cihazının güç değeriyle birebir ilişkilidir. AC Seviye 1 ve Seviye 2 şarj işleminde şarj hızı düşük olduğundan genelde şarj süresi daha uzun sürmektedir. Elektrikli araç üreticileri ürettikleri araçların AC ve DC şarj alma hızlarını farklı nem ve sıcaklık ortamlarında sorunsuz çalışacak şekilde tasarlamaya çalışırlar. Bu yüzden her aracın AC ve DC şarj hızları üreticiler tarafından güvenli aralıklarda kalacak şekilde sınırlandırılmıştır. Çoğu araç üreticisi araçlarda hem AC hem de DC şarj soketi bulundurmaktadır fakat DC şarj özelliği bazı üreticiler tarafından opsiyonel olarak sunulmaktadır.

Günümüzde dünyada DC şarj istasyonlarına çok büyük yatırımlar yapılmaktadır. BMW, Ford, Mercedes Benz, Audi ve Porsche'yi barındıran Volkswagen Grubu ortaklığında IONITY adlı şarj firması kurulmuştur (URL-1, n.d.). IONITY Avrupa'nın muhtelif yerlerinde Eylül 2020 itibarıyla 247 adet DC şarj istasyonu işletmektedir

ve yakında devreye almayı planladığı birçok istasyonu mevcuttur (URL-2, n.d., URL-3, n.d.). Avrupa’da halen birçok noktada DC şarj istasyonu ihtiyacı devam etmektedir. Yapılan analizlere göre planlanan bu yatırım maliyetinin, önümüzdeki 11 yıl için 20 Milyar Euro’yu bulması öngörülmektedir. Bu rakam yıllık olarak yaklaşık 1.8 Milyar Euro’ya tekabül etmekte ve Avrupa Birliği’nin yol altyapısına harcadığı paranın sadece yüzde üçüne tekabül etmektedir (GCC, 2020).

Tesla, kendisine özgü şarj standardı ile elektrikli araçları için “Supercharger” olarak isimlendirdiği şarj ağına sahiptir. DC Seviye 1 ve Seviye 2 şarjı için aynı konektörü kullanmaktadır. Tesla araçları, Supercharger şarj istasyonuna bağlandığında tüketilen enerji aracın şarj kayıtlarına eklenmektedir (URL-4, n.d.). 2019 yılında yeni nesil Supercharger V3 ile şarj hızı 120 kW’tan 250 kW’a yükseltilmiştir. Ayrıca araçlara aktarılan enerji, diğer araçlarla paylaşılmadan, araç başına 250 kW düşecek şekilde tasarlanmıştır. Aralık 2020 itibarıyla dünya genelinde 20 bin’den fazla istasyon kullanıcıların hizmetine sunulmuştur (URL-5, n.d.).

Günümüzde AC ve DC şarj istasyonlarının geldiği nokta itibarıyla 64 kWh’lik bataryası olan bir elektrik aracın %0’dan %80’e kadar farklı hızlarla dolumu için gereken şarj süresi Tablo 3’te verilmiştir.

**Tablo 3. Şarj Hızı ve Süreleri (Speirs, 2020)**

Şarj Türü	Şarj Hızı	1 Saat Şarj ile Kazanılan Menzil	Süre
Şarj Cihazı (8 A)	1.8 kW	10 km	35 saat
1-faz AC Şarj	7.4 kW	40 km	9 saat
3-faz AC Şarj	22 kW	120 km	3 saat
DC Şarj	25 kW	150 km	1.5 saat (%80’e kadar)
Hızlı DC Şarj	50 kW	300 km	1 saat (%80’e kadar)
Ultra Hızlı DC Şarj	175 kW	1000 km	15 dakika (%80’e kadar)

Elektrikli araçların şarj olma hızları ve süreleri bataryaların ne kadar hızlı dolduğu ile alakalıdır. Bataryaların şarj hızını belirleyen faktör ise öncelikli olarak bataryada kullanılan kimyasallardır. Yüksek akıma daha dayanıklı kimyasallar sayesinde şarj hızını arttırmak ve dolayısıyla şarj süresini kısaltmak mümkündür.

### 2.3. Şarj İstasyonlarının Elektrik Şebekesine Entegrasyonu ve Karşılaşılan Sorunlar

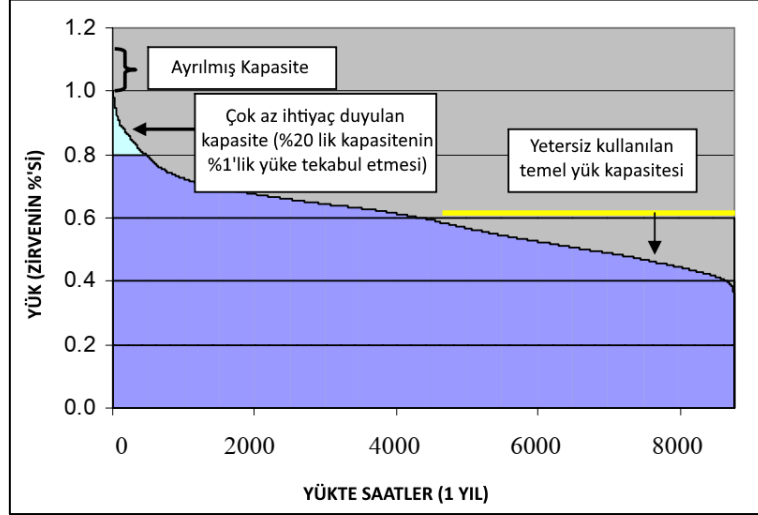
Bir elektrikli aracı şarj etmek için bahsedilen şarj yöntemleri arasında en hızlı yöntem, aracın DC olarak şarj edilmesidir. Dünya genelinde elektrikli araçların şarj sürelerini kısaltabilmek için, şarj istasyonlarının güçleri arttırılmaktadır. Bu sebepten günümüzde 350 kW ve üzeri güçteki istasyonların sayısı her geçen gün artmaktadır. Birçok şarj istasyonunda birden fazla şarj cihazı mevcuttur ve bazı cihazlarda ise aynı anda daha fazla aracı şarj edebilmek adına birden fazla şarj soketi bulunmaktadır. Onlarca aracın aynı anda şarj olması, elektrik şebekesi üzerinde ciddi sorunlar oluşturabilmektedir.

Sorunlardan biri şebeke üzerinde oluşan yük talebinin artmasıdır. Günümüzde dünya yollarında 250 kW ve üzeri şarj hızını destekleyen yüzbinlerce araç mevcuttur. Bu araçlardan sadece sekiz tanesinin aynı anda bir şarj alanında şarj olması anlık 1 MW’lık enerji ihtiyacı oluşacaktır. Bu enerji TEİAŞ’ın kişi başına düşen tüketim verilerine göre hesaplandığında yaklaşık 120 konutun bir ayda kullandığı enerjiye tekabül etmektedir (TEİAŞ, 2018). Orta çaplı 20 MW kurulu güce sahip bir hidroelektrik santralinin sadece 160 araca hizmet verebileceği görülmektedir. Elektrikli araç satışlarının her geçen yıl artmasıyla yakın gelecekte şarj işlemi şebekeye ek yükler getirecek ve trafolarla yoğunluğun artmasına sebep olacaktır (Lopes vd., 2011). Bu veriler elektrikli araç olarak otomobiller göz önüne alınarak oluşturulmuş olsa da elektrikli araç sektörünün çeşitlenmesi ile otobüs ve kamyon gibi araçların yaygın olarak kullanılması, oluşacak bu enerji ihtiyacının katlanarak artmasına sebep olacaktır. ABD’de 2009-2019 arasında enerji talebinde düşüş yaşanmış ve enerji üretim artışı çok düşük seviyelerde kalmıştır ancak elektrikli araç sektörü bu trendi değiştirebilir (ENERGY, 2019).

Kontrolsüz EA şarjı şebekedeki enerji tüketim yoğunluğunun yüksek olduğu saatlerde trafo başına düşen yükü arttırır, bu da enerji arzının dengelenmesinde büyük sorunlar oluşturabilir. Yapılan bir çalışmada aynı marka,

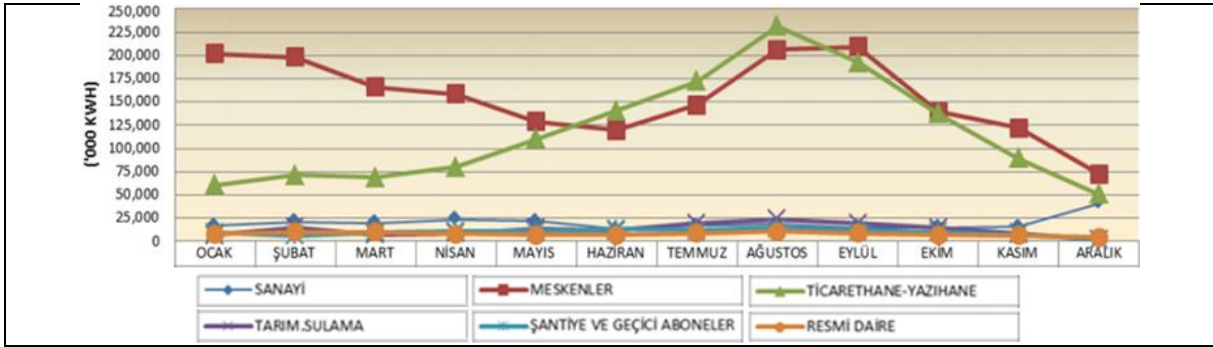


model iki araç ile beş evde saat 18:00'da ve yoğun olmayan saatlerde şarj işleminin etkisi incelenmiş ve trafodaki yük artışı gözlenmiştir. Çalışmanın kış mevsimindeki sonuçlarına göre ilk durumda trafoda %68, ikinci durumda ise %58'lik bir yük artışı gözlenmiştir (Shao vd., 2009). Yük artışı gün içerisinde olduğu gibi mevsimsel olarak da yaşanabilir. Bir enerji santralının yıl içerisinde kullanım grafiği Şekil 1'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 1. Enerji Santrali Güç Kullanım Eğrisi (Denholm & Short, 2006)

Şekilden de anlaşılacağı gibi kullanım zirvesi %5'ten daha az bir zamanda gerçekleşmekte ve bunun için %20'den daha fazla bir yük kapasitesi gerekmektedir (Denholm & Short, 2006). Mevsimsel kullanım göz önüne alındığında ise özellikle turizm bölgelerinde kışın ve yazın tüketilen enerji miktarı ciddi oranda farklılık göstermektedir. Şekil 2'de ülkemizin turizm merkezlerinden Antalya şehrine ait enerji tüketim grafiği bulunmaktadır.



Şekil 2. Antalya ili Elektrik Tüketiminin Kullanım Alanlarına Göre Dağılımı Ocak-Aralık (x1000 kWh) (ATSO, 2015)

Yukarıdaki grafikten de görüleceği gibi Ticarethane tüketimi nisan ayında artmaya başlayarak ağustos ayı itibarıyla en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Kültür ve Turizm Bakanlığının verilerine göre 2019 yılında ülkemize Rusya, Almanya ve İngiltere'den 12 milyonun üzerinde turist gelmiştir (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2019). Bu ülkelerden bazılarının elektrikli araç satış rakamları incelendiğinde, 2019 yılında Almanya'da 109 bin ve İngiltere'de 50 binin üzerinde elektrikli araç satışı gerçekleştiği görülmüştür (IEA, 2020). Türkiye'de ise bu rakam 2019 yılında 222 ve 2020 yılında 844 adet olmuştur (ODD, 2019, 2020). Ülkemizde elektrikli araç sayısının az olması sebebiyle şarj işleminin enerji şebekesine olumsuz etkisi görülmektedir. Fakat, genel olarak ülkemize gelen turistlerin ülkelerine bakıldığında, tüm dünyada olduğu gibi elektrikli araç kullanımının hızla arttığı ülkeler olduğu görülmektedir. Almanya'da elektrikli araç satışlarında 2019 yılında, bir önceki yıla göre %61'lik bir artış gerçekleşmiştir (IEA, 2020). Dolayısıyla ülkemizde elektrikli araçların yayılmaya başlamasıyla turistlerin kendi ülkelerinden getirecekleri veya ülkemizde kiralayacakları araçların elektrikli olma ihtimali her geçen yıl artmaktadır.

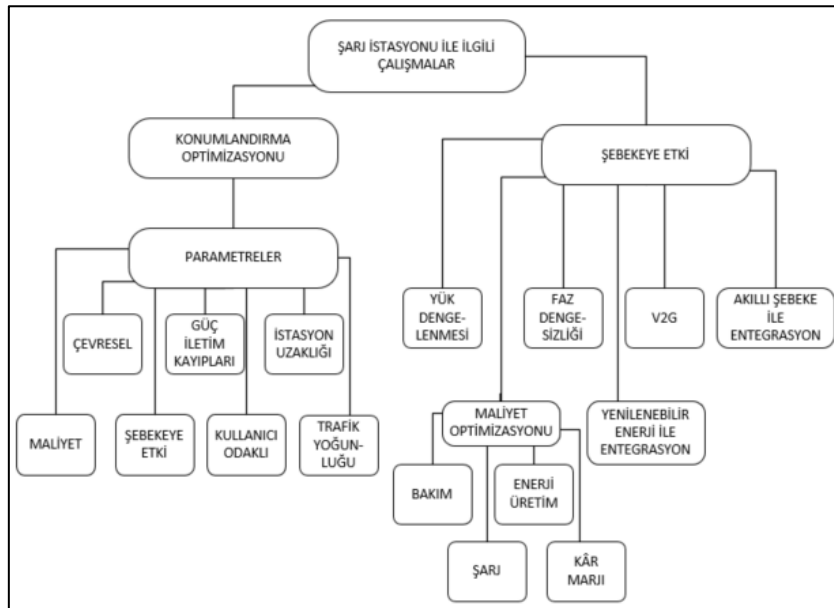
Elektrikli araçların, enerji şebekesinden yüksek miktarlarda enerji çekmesi, dolaylı da olsa turizm yolu ile enerji talep artışına sebep olacaktır. Kullanıcıların şarj etme alışkanlıklarına bağlı olarak, çok sayıda aracın eş zamanlı şarjı, yükte oluşacak mevsimsel talep değişkenliği ve şebekede enerji arz güvenliğinde problemlere neden olacaktır (Moslehi & Kumar, 2010). Mevcut güç sistemi bileşenleri, ekstra yükleri uzun süre kaldıracak şekilde tasarlanmamıştır. Bu durum bileşenlerin aşırı yüklenmesine neden olabilir veya mevcut trafolarla zarar verebilir. Bunun yanında enerji şebekesindeki faz ve voltaj dengesizliği de karşılaşılan önemli problemlerden biridir. Aynı faz kullanılarak çok sayıda elektrikli araç şarj edildiği takdirde, enerji şebekesinde faz dengesizliği oluşabilir. Elektrikli araçların plansızca şarj edilmesi dağıtım şebekelerinde ciddi problemlere sebep olur (Geth vd., 2012). Eş zamanlı olarak çok sayıda elektrikli araç şarjı, şarj cihazlarının bağlantı noktalarında gerilim düşümü ve sapsmalara neden olabilir (Singh vd., 2010; Ma vd., 2017; Ucer vd., 2018).

Elektrikli araçların şarjı, oluşacak aşırı harmoniklerle güç sistemlerinde potansiyel bir sorun teşkil eder (Staats vd., 1997). Aşırı harmonik akım bozulmasına sahip şarj sistemleri, ikincil dağıtım hattı ve trafo değerinin düşmesine veya hizmet kalitesi sorunlarına neden olabilir (Bass vd., 2001). Elektrikli araçların şarjı esnasında oluşan harmoniklerin araştırılması ve sorunun çözümü için literatürde birçok çalışma yapılmıştır (Orr vd., 1982; Staats vd., 1997; Lo vd., 1999; Bass vd., 2001; Huang vd., 2008; Balcells & García, 2010; Guo vd., 2018). Bazı çalışmalar harmoniklerin tahmini üzerineyken, bazıları ise harmoniklerin oluşumunun kanıtlanması üzerine yapılmış çalışmalardır.

Elektrikli araçlar şarj esnasında, şebekeden yüksek oranda güç talebiyle aktif güç tüketimine neden olur, bu da dağıtım sisteminde güç kaybına yol açar. Şarj istasyonlarının en uygun noktalara konumlandırılması ve güç kapasitesinin doğru seçilmesi şebekedeki güç kaybını en aza indirebilir. Güç kaybını araştıran ve azaltmak için öneri sunan çalışmalar yapılmıştır (Singh vd., 2010; Poursistani vd., 2015; Apostolaki-Iosifidou vd., 2017; Zhao & Yuan, 2018).

Tüm bu çalışmalar incelendiğinde elektrikli araçların şarj işleminin, elektrik şebekesine bahsedilen olumsuz etkilerinin azaltılması için şarj istasyonlarının doğru noktalara konumlandırılmasının gerekliliği ve önemi daha da artmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, şarj istasyonlarıyla ilgili araştırmalar genellikle şarj istasyonlarının en uygun yerleşimi ve istasyonların şebekeye etkileri olarak iki ana başlık altında yoğunlaştığı gözlenmiştir. Şarj istasyonunun yerleşimi ile ilgili yapılan çalışmalarda birçok parametre belirlenmiş ve bazı parametrelerin ağırlıkları belirlenerek konum önerisinde bulunulmuştur. Şekil 3'te şarj istasyonlarının konumlandırılması ve şebekeye etkisi üzerine yapılan çalışma alanları listelenmiştir.



Şekil 3. Şarj İstasyonu ile İlgili Çalışma Alanları

## 2.4. Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması

DC şarj istasyonlarının maliyetleri çok yüksek olduğundan maliyet birçok çalışmada parametre olarak alınmış ve şarj istasyonu yerleşimi, maliyet parametresi göz önüne alınarak yapılmıştır (Wang, 2007; Phonrattanasak & Leeprechanon, 2012; Liu vd., 2013; Tang vd., 2013; Yang vd., 2017). Örneğin yıllık güç iletim kayıpları, elektrikli araçların şarj istasyonuna ulaşım maliyeti, şarj istasyonunun yatırım maliyeti ve sistemin düzgün çalışabilmesi için harcanan bakım maliyetlerinin azaltılmasını amaçlayan en uygun istasyon yerleşimi hesaplamalara dâhil edilmiştir (Phonrattanasak & Leeprechanon, 2012).

Elektrikli araçların enerji tüketimi, coğrafi koşullardan etkilenmektedir. Örneğin rakım farkının bulunduğu iki nokta arasındaki tüketim, yolun eğimi nedeniyle gidiş ve geliş istikametlerinde farklılık gösterecektir. Bu nedenle bazı çalışmalarda coğrafi koşullar dikkate alınarak şarj istasyonlarının en uygun yerleşimi önerilmiştir (Tang vd., 2013; Raposo vd., 2015).

Parametre olarak çevresel faktörleri kullanan makaleler bulunmaktadır (Liu vd., 2013; Guo & Zhao, 2015; Wu vd., 2016; Zhao & Li, 2016; Harighi & Bayindir, 2019). İstasyon yerleşimi yaparken çevre bilinci ile kurulum yapılması ve elektrikli araçlar için şarj istasyonu yaparak dolaylı olarak çevreci araçların artmasına katkıda bulunduğu düşünülmektedir (Guo & Zhao, 2015). Çevreci olarak ön plana çıkan elektrikli araçların şarjında kullanılan elektriğin üretim yöntemi de aynı şekilde karbon ayak izinin takibinde büyük önem arz etmektedir. Şarj için kullanılan elektrik enerjisi bir termik santralden karşılanıyorsa bunun çevreci bir çözümün aksine karbon ayak izinin arttığı bir durum olduğu görülmektedir.

Elektrikli araçların enerji şebekesine olası etkileri gözetilerek şarj istasyonu yerleşimi ile ilgili literatürde daha birçok güncel çalışma vardır (Phonrattanasak & Leeprechanon, 2012, 2014; Tang vd., 2013; Zhao & Li, 2016; Suganya vd., 2017; Kong vd., 2019; Lin vd., 2019). Örneğin, Ankara ili için şebeke altyapısı özellikleri, trafoların kapasitelerinin kategorize edilmesi ve diğer parametreler ile istasyonun yeri belirlenmeye çalışılmıştır (Harighi vd., 2019).

Şarj istasyonlarının konumlandırılmasında araçları şarj etmek için aracın bulunduğu yerden şarj istasyonuna kadar sürülecek mesafe de hesaplanarak önerilerde bulunulmuştur (Phonrattanasak & Leeprechanon, 2012). Bu mesafe arttığında araçlar şarj olmak için daha fazla yol kat edecek ve dolaylı olarak şarj maliyetleri artacaktır. Tüm bunların yanında aracı şarj etmek için şarj istasyonuna kadar gidilmesi yerine araçlar park halindeyken şarj olmaları için çalışmalar da yapılmıştır (Frade vd., 2011; Chen vd., 2013).

Şarj istasyonu yerleşiminde, hem istasyon maliyeti hem de işletme maliyeti çok yüksek olduğu için bu cihazların kullanımlarının maksimuma çıkarılması hedeflenmektedir. Bu yüzden bu istasyonların yerleşimi, trafik yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde yapıldığında cihazların kullanım oranı yükselecek, istasyon operatörü yaptığı yatırımın karşılığını daha kısa vadede alacak ve kullanıcılar açısından şarj hizmeti alabilecekleri yeni bir nokta eklenmiş olacaktır. Bu nedenle şarj istasyonlarının yerleşiminde trafik yoğunluğunun göz önüne alınması büyük önem arz etmektedir (Tang vd., 2013; Jordán vd., 2018; Kong vd., 2019). Trafik yoğunluğunun yanı sıra nüfus yoğunluğu da elektrikli araçların yoğun kullanıldığı noktaları bulma açısından faydalı olabilmektedir. Bu sebeple şarj istasyonu yerleşim optimizasyonunda kullanılan parametrelerden biri olarak nüfus yoğunluğu da öne çıkan bir diğer önemli parametredir (Frade vd., 2011; Chen vd., 2013; Jordán vd., 2018).

Çalışmaların bir kısmı teorik olarak çalışıldıktan sonra gerçek hayata uygulanmıştır. Örneğin, Portekiz'in başkenti Lizbon kentinde yapılan bir çalışmada kullanıcı talepleri üzerine yerleştirme problemi uygulanmıştır (Frade vd., 2011). Penghu, Tayvan (Wang, 2007), Pekin, Çin (Guo & Zhao, 2015; Wu vd., 2016; Zhao & Li, 2016), Tientsin, Çin (Phonrattanasak & Leeprechanon, 2012), Shenzhen, Çin (Lin vd., 2019), Seattle, ABD (Chen vd., 2013), Hong Kong (Lam vd., 2014), Angra do Heroísmo, Portekiz (Raposo vd., 2015), Boston, ABD, Dublin, İrlanda (Gagarin & Corcoran, 2018), İspanya (Jordán vd., 2018) ve Ankara, Türkiye (Erbaş vd., 2018) şehirlerinde de uygulamalar yapılmış ve sonuçlar bilim dünyasıyla paylaşılmıştır.

Yapılan bazı çalışmalarda ise niceliğinin ölçülmesi zor olan parametreler veya bazı kriterlerin önem derecelerini ayırt etmek ve sistem içerisindeki ağırlıklarını belirlemek için uzmanlar tarafından görüşler alınmış

ya da belirlenen parametreler oylanarak değerlendirilmiştir. Böylece bu değerler parametre değerleri olarak kaydedilmiştir (Tang vd., 2013; Zhao & Li, 2016; Erbaş vd., 2018).

## 2.5. Şarj İstasyonlarının Şebekeye Etkisi

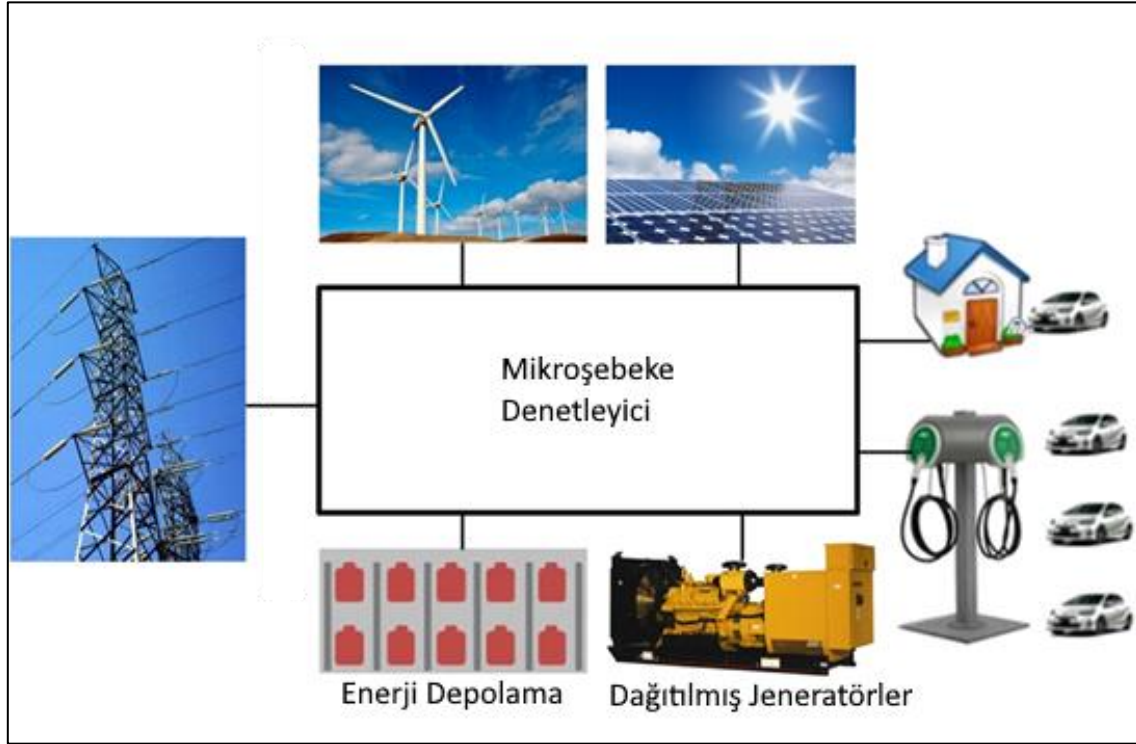
Şarj istasyonlarının elektrik şebekesine olası etkileri ve bunları azaltmayı öneren çalışmalar mevcuttur. Bir çalışmada elektrikli araçların DC hızlı şarj istasyonlarında şarj olmasının şebekeye güç akışı, kısa devre ve koruma açısından etkisi araştırılmıştır (Etezadi-Amoli vd., 2010). Elektrikli araçların şarj olmasının şebekeyi nasıl etkilediği araştırılmış ve tahmini olarak gelecek öngörüsünde bulunulmuştur (Tekdemir vd., 2017). Şarj istasyonlarının, elektrik şebekesinin yanı sıra binaları nasıl etkilediği üzerine de çalışma yapılmıştır (Sehar vd., 2017). Anlık yük artışları için bir çalışmada Volan enerji depolama (Flywheel energy storage) yöntemi önerilmiştir (Dragičević vd., 2014). Bir başka çalışmada ise elektrikli araçlar esnek yük olarak kabul edilip güç yönetimi için kullanıcının istediği zamanda hazır olacak şekilde şarj istasyonu üzerinden enerjiyi ayarlayarak şarj olması önerilmiştir (Diaz vd., 2018). Elektrikli araçların şarj ve deşarj işlemlerinde güç kayıpları da incelenmiştir (Apostolaki-Iosifidou vd., 2017). Yukarıda bahsedilen çalışmaların yanı sıra bu güç kaybının enerji şebekesine etkisi üzerine yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır (Lin vd., 2010; Clement-Nyns vd., 2009, 2011; Green vd., 2011; Bompard vd., 2012; Galiveeti vd., 2018).

Akıllı Şebeke (Smart Grid) kavramının farklı kurumlara göre birçok tanımı olsa da genel olarak gözlemlenebilir, sürdürülebilir, daha verimli, sistemle bütünleşmiş cihazları kullanan, ekonomik ve güvenli enerji sağlamak için teknolojik unsurların kullanıldığı elektrik şebekeleridir. Akıllı şebekelerin bir özelliği olan araçtan şebekeye (Vehicle to Grid – V2G) şarj edilebilir elektrikli araçların şebekeden elektrik aldığı gibi şebekeye elektriği geri ileterek veya şarj akımını kontrol ederek enerji şebekesine destek olan bir sistemdir. Bu sistem ile elektrikli araçların bataryaları aslında şebekenin yedek bataryası olarak düşünülebilir. Bu sistem ile iki yönlü enerji alışverişi mümkün olduğundan, şebeke açısından elektrikli araçlardaki bataryalar, şebekenin gerektiğinde kullanabileceği yedek batarya gibi davranabilir. Bu alanda yapılmış çalışmalarda V2G'nin sunduğu avantajlar belirtilmiştir (Lund & Kempton, 2008; Sortomme & El-Sharkawi, 2011; Mwasilu vd., 2014; Khalkhali vd., 2015; Harighi & Bayindir, 2019). Örneğin bir çalışmada şebeke operatörünün şarj istasyonlarına bağlı elektrikli araç sahiplerinden elektrik alarak şebekede kullanması için istasyon yerleşim optimizasyonu yaparak operatör için maksimum kâr oranı ile daha iyi gerilim profillerine ulaşabileceği önerilmiştir (Khalkhali vd., 2015). Başka bir çalışmada elektrikli araçların akıllı şebekede yapay zekâ kullanılarak yönetilmesi üzerine araştırma yapılmıştır (Rigas vd., 2015). Elektrikli araçların akıllı şebekelerde kullanılması ve şebekeye entegrasyonu alanlarında birçok çalışma yapılmıştır (Tomić & Kempton, 2007; Lund & Kempton, 2008; IEC, 2012; Li vd., 2012; Galus vd., 2013; Yang vd., 2014; Tan vd., 2016). V2G'nin bir parçası olan elektrikli araç kullanıcılarının araçlarını sisteme entegre etmeleri için de cazip bir senaryoya ihtiyaç vardır (Mwasilu vd., 2014). Aksi halde batarya yıpranmaları nedeniyle kullanıcılar bu sisteme entegre olmak istemeyebilirler.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında birçok çalışmanın parametreler ile hesaplamalar yaptıktan sonra bir karar verme algoritması kullandığı görülmektedir. En sık kullanılan algoritmalar: tamsayı programlama (Wang, 2007), karışık tamsayı programlama (Frade vd., 2011; Chen vd., 2013), genetik algoritma (You & Hsieh, 2014; Shi & Lee, 2015; Li vd., 2016; Awasthi vd., 2017; Mozafar vd., 2017; Jordán vd., 2018; Harighi vd., 2019; Hu vd., 2019; Vazifeh vd., 2019; Lin vd., 2020), parçacık sürü algoritması (Pashajavid & Golkar, 2013; Awasthi vd., 2017; Mozafar vd., 2017; Liu vd., 2018; Sultana vd., 2018; Hu vd., 2019) ve karınca kolonisi optimizasyonudur (Phonrattanasak & Leeprechanon, 2012, 2014).

Elektrikli araçların yüksek enerjiyi kısa zamanda alması sebebiyle şebekeye yük getirmesi birçok çalışmada incelenmiş ve yayınlar yapılmıştır (Etezadi-Amoli vd., 2010; Tekdemir vd., 2017; Diaz vd., 2018; Güneş vd., 2018; Harighi & Bayindir, 2019; Liu vd., 2019). Bu çalışmalardan bazıları şebekedeki yükün tahmini ile ilgilidir (Tekdemir vd., 2017; Diaz vd., 2018; Güneş vd., 2018; Liu vd., 2019). Bazı çalışmalarda şebekeye yansıyan yükün tahmin edilmesi yerine belli bir değer belirlenerek varsayım olarak hesaplanmıştır (Phonrattanasak & Leeprechanon, 2012, 2014). Bir çalışmada ise geleceğe dönük senaryolar oluşturulmuş ve şarj istasyonlarının elektrik dağıtım şebekelerinin güvenilirlik indislerine olan etkileri dağıtım sisteminde gösterilmiştir (Güneş vd., 2018).

Güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu enerji üretimi sağlamasının yanı sıra hava koşullarına bağlı olarak belli aralıklarla ve süreksiz enerji üretmeleri şebekede planlama, operasyon ve kontrol anlamında sorunlara sebebiyet verebilmektedir (Galus vd., 2013). Bu sorun ile mücadelede elektrikli araçların şarj edilmesi bir çözüm olarak ortaya çıkabilir. Örneğin Nissan, Leaf modelini SunPower firmasının sağladığı güneş enerjisi ile; Tesla ise SolarCity firmasının sağladığı güneş enerjisi ile şarj ederek bu modele örnek olmuşlardır (SUNPOWER, 2011; URL-6, 2016).



**Şekil 4.** Elektrikli Araçların Mikro Şebekeye Bağlı Yenilenebilir Enerji Kaynakları Üzerinden Şarj Olma İşlemi (Liu vd., 2015)

Elektrik dağıtım şebekesi üzerinde yapılacak yönetim ve sistem değişiklikleri ile üretim ve tüketim optimizasyonları yapılabilir. Şekil 4'te görüldüğü gibi yenilenebilir enerji kaynakları, konut elektrik tesisatı, enerji depolama, ihtiyaç halinde devreye giren jeneratör ile elektrikli araç şarj cihazlarının bağlı olduğu, mikro şebeke denetleyici bu enerji yönetimini üstlenmiştir. Diğer taraftan çok büyük kapasiteli yenilenebilir enerji santrallerinin sorunsuzca ve kademeli olarak elektrik şebekesine entegrasyonu için çok büyük kapasiteli enerji depolama kaynakları gerekmektedir (IEC, 2012). Bu bağlamda elektrikli araçlar şebekeye bağlı olduklarında bu enerjinin depolanmasında rol alabilir. Örneğin, rüzgâr enerjisi üretimindeki enerji dalgalanmalarına karşı elektrikli araçların bataryalarının dağıtık depolama birimi olarak kullanılması alanında çalışmalar yapılmış ve bu yöntemlerin getirdiği avantajlar sıralanmıştır (Li vd., 2012, 2013; Vaya & Andersson, 2013). Elektrikli araç şarj istasyonlarının iş merkezi binası elektrik tüketimine etkisi araştırılıp, güneş enerjisi ile etkilerinin azaltılması üzerine de çalışmalar yapılmıştır (Kempton & Tomić, 2005; Sehar vd., 2017).

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Literatürdeki çalışmalar tarandığında birçok çalışma elektrikli araçların şarj edilmesiyle elektrik dağıtım şebekesine etkisi veya şarj istasyonlarının konumlarının belli kriterler dâhilinde belirlenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır.

Şarj istasyonlarının konumlandırılması ihtiyaca göre belli parametreler (maliyet, trafik yoğunluğu, çevresel faktörler vb.) dâhilinde yapılan bir çalışmadır. Buradaki parametreler uygulamaya özel olup genelleme yapmak her koşulda optimal yerleşime uygun olmayabilir. Bu yüzden konumlandırma yaparken kullanıcılara parametreleri ayarlayabilme imkânı sağlayan uygulamalar daha uygun yerleşimler sağlayabilir.

Konulandırılmalarının daha doğru ve enerji şebekesine etkilerinin minimize edilebilmesi için V2G gibi akıllı şebeke uygulamalarını ve şebekedeki enerji talebinin düşük olduğu saatlerde kullanılmasına yönelik en uygun zamanlama yöntemlerini kullanmalıyız. Bu sayede trafoların üzerindeki aşırı yüklenme ve enerji şebekesine yapılacak yatırım maliyetleri azaltılabilir.

Şarj istasyonlarının şebekeye etkisi çoğu zaman olumsuz görünmesine rağmen bunu avantaja çevirmeyi öneren makaleler de yayınlanmıştır. Elektrik dağıtım şebekesinde ani enerji üretimine karşı ani yükler kullanılabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki tutarsız zamanlama iyi yönetildiği takdirde bu tutarsızlık elektrikli araçların şarjı ile dengelenebilir.

Bu derleme çalışmasında şarj istasyonlarının konumlandırılması ve şebekedeki etkileri ile ilgili çalışmalar derlenmiştir. Önümüzdeki yıllarda hızla gelişen bu sektör için şimdiden bilimsel çalışmaların yapılmasının ve takip edilmesinin gelecek çalışmalar ve pratik uygulamalar için bir kılavuz niteliğinde olacağı düşünülmektedir.

Tüm bu incelenen akademik çalışmalardaki belirlenen parametreler göz önüne alınarak oluşturulacak yeni yaklaşımlar ile şarj istasyonlarının en uygun noktalara konumlandırılması ve daha sorunsuz yönetimi mümkün olabilecektir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar tarafından potansiyel çıkar çatışması bildirilmedi.

## KISALTMALAR VE SEMBOLLER

EA	Elektrikli araç
IEC	Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
SAE	Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Derneği)
AC	Alternating Current (Alternatif Akım)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
CHAdemo	CHARGE de Move
V2G	Vehicle to Grid (Araçtan Şebekeye)

## KAYNAKLAR

- ATSO, Antalya Ticaret ve Sanayi Odası (2015). 2015 yılı Aylık Ekonomik Göstergeler. [www.atso.org.tr/icerik/3/66/aylik-ekonomik-gostergeler.html](http://www.atso.org.tr/icerik/3/66/aylik-ekonomik-gostergeler.html)
- Apostolaki-Iosifidou, E., Codani, P., & Kempton, W. (2017). Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. *Energy*, 127, 730-742. doi:[10.1016/j.energy.2017.03.015](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.015)
- Ashique, R. H., Salam, Z., Bin Abdul Aziz, M. J., & Bhatti, A. R. (2017). Integrated photovoltaic-grid dc fast charging system for electric vehicle: A review of the architecture and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1243-1257. doi:[10.1016/j.rser.2016.11.245](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.245)
- Awasthi, A., Venkitesamy, K., Padmanaban, S., Selvamuthukumar, R., Blaabjerg, F., & Singh, A. K. (2017). Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm. *Energy*, 133, 70-78. doi:[10.1016/j.energy.2017.05.094](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.094)
- Balcells, J., & García, J. (2010). Impact of plug-in electric vehicles on the supply grid. In: Proceedings of the 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 1-4. doi:[10.1109/VPPC.2010.5729217](https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729217)
- Bass, R., Harley, R., Lambert, F., Rajasekaran, V., & Pierce, J. (2001). Residential harmonic loads and EV charging. In: Proceedings of the 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Volume 3, 803-808. doi:[10.1109/PESW.2001.916965](https://doi.org/10.1109/PESW.2001.916965)

- Bompard, E., Ragazzi, E., & Tenconi, A. (2012). Electric Vehicles and Power Grids: Challenges and Opportunities. In: Calabrese, G. (Eds.) *The Greening of the Automotive Industry* (pp. 207-224). doi:[10.1057/9781137018908\\_12](https://doi.org/10.1057/9781137018908_12)
- Chan, C. C. (2013). The rise & Fall of electric vehicles in 1828-1930: Lessons learned. In: *Proceedings of the IEEE*, 101(1), 206-212. doi:[10.1109/JPROC.2012.2228370](https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2228370)
- Chen, T. D., Kockelman, K. M., & Khan, M. (2013). Locating Electric Vehicle Charging Stations: Parking-Based Assignment Method for Seattle, Washington. *Transportation Research Record*, 2385(1), 28-36. doi:[10.3141/2385-04](https://doi.org/10.3141/2385-04)
- Clement-Nyns, K., Haesen, E., & Driesen, J. (2009). Analysis of the Impact of Plug-In Hybrid Electric Vehicles on Residential Distribution Grids by using Quadratic and Dynamic Programming. *World Electric Vehicle Journal*, 3(2), 214-224. doi:[10.3390/wevj3020214](https://doi.org/10.3390/wevj3020214)
- Clement-Nyns, K., Haesen, E., & Driesen, J. (2011). The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid. *Electric Power Systems Research*, 81(1), 185-192. doi:[10.1016/j.epsr.2010.08.007](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.08.007)
- Denholm, P., & Short, W. (2006, October). An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-In Hybrid Electric Vehicles. Technical Report, NREL/TP-620-40293. [www.nrel.gov/docs/fy07osti/40293.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40293.pdf)
- Diaz, C., Ruiz, F., & Patino, D. (2018). Smart Charge of an Electric Vehicles Station: A Model Predictive Control Approach. In: *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, 54-59. doi:[10.1109/CCTA.2018.8511498](https://doi.org/10.1109/CCTA.2018.8511498)
- Dragičević, T., Sučić, S., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2014). Flywheel-based distributed bus signalling strategy for the public fast charging station. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6), 2825-2835. doi:[10.1109/TSG.2014.2325963](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2325963)
- Erbaş, M., Kabak, M., Özceylan, E., & Çetinkaya, C. (2018). Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis. *Energy*, 163, 1017-1031. doi:[10.1016/j.energy.2018.08.140](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.140)
- Etezadi-Amoli, M., Choma, K., & Stefani, J. (2010). Rapid-Charge Electric-Vehicle Stations. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 25(3), 1883-1887. doi:[10.1109/TPWRD.2010.2047874](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2047874)
- Frade, I., Ribeiro, A., Gonçalves, G., & Antunes, A. P. (2011). Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, 2252(1), 91-98. doi:[10.3141/2252-12](https://doi.org/10.3141/2252-12)
- Gagarin, A., & Corcoran, P. (2018). Multiple domination models for placement of electric vehicle charging stations in road networks. *Computers and Operations Research*, 96, 69-79. doi:[10.1016/j.cor.2018.03.014](https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.03.014)
- Galiveeti, H. R., Goswami, A. K., & Dev Choudhury, N. B. (2018). Impact of plug-in electric vehicles and distributed generation on reliability of distribution systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(1), 50-59. doi:[10.1016/j.jestch.2018.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.01.005)
- Galus, M. D., Vayá, M. G., Krause, T., & Andersson, G. (2013). The role of electric vehicles in smart grids. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(4), 384-400. doi:[10.1002/wene.56](https://doi.org/10.1002/wene.56)
- ODD, Otomotiv Distribütörleri Derneği (2019). Genel Değerlendirme Aralık 2019. [www.odd.org.tr/web\\_2837\\_1/neuralnetwork.aspx?type=35](http://www.odd.org.tr/web_2837_1/neuralnetwork.aspx?type=35)
- ODD, Otomotiv Distribütörleri Derneği (2020). Genel Değerlendirme Aralık 2020. [www.odd.org.tr/web\\_2837\\_1/neuralnetwork.aspx?type=35](http://www.odd.org.tr/web_2837_1/neuralnetwork.aspx?type=35)
- Geth, F., Leemput, N., Van Roy, J., Buscher, J., Ponnette, R., & Driesen, J. (2012). Voltage droop charging of electric vehicles in a residential distribution feeder. In: *Proceedings of the 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 1-8. doi:[10.1109/ISGTEurope.2012.6465692](https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465692)
- Green, R. C., Wang, L., & Alam, M. (2011). The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 544-553. doi:[10.1016/j.rser.2010.08.015](https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.015)

- IEC, International Electrotechnical Commission (2012) IEC White Paper: Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage by Market Strategy Board Project Team, 101p. [webstore.iec.ch/publication/22375](http://webstore.iec.ch/publication/22375)
- ENERGY, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2019). Summary Report on EVs at Scale and the U.S. Electric Power System. [www.energy.gov/eere/vehicles/downloads/summary-report-evs-scale-and-us-electric-power-system-2019](http://www.energy.gov/eere/vehicles/downloads/summary-report-evs-scale-and-us-electric-power-system-2019)
- Güneş, D., Tekdemir, İ. G., Karaarslan, M. Ş., & Alboyacı, B. (2018). Elektrikli araç şarj istasyonu yüklerinin güvenilirlik indisleri üzerine etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(3), 1073-1084. doi:[10.17341/gazimmfd.416408](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416408)
- Guo, J., Zhao, H., Shen, Z., Wang, A., Cao, L., Hu, E., Wang, Z., & Song, X. (2018). Research on Harmonic Characteristics and Harmonic Counteraction Problem of EV Charging Station. In: Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 1-5. doi:[10.1109/EI2.2018.8582095](https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582095)
- Guo, S., & Zhao, H. (2015). Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective. *Applied Energy*, 158, 390-402. doi:[10.1016/j.apenergy.2015.08.082](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.082)
- Harighi, T., & Bayindir, R. (2019). Load Estimation Use in Electric Vehicle Charge Station Coordination in Different Node and Definite Area. In: Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Smart Grid (ICSmartGrids), 264-271. doi:[10.1109/ISGWCP.2018.8634506](https://doi.org/10.1109/ISGWCP.2018.8634506)
- Harighi, T., Padmanaban, S., Bayindir, R., Hossain, E., & Holm-Nielsen, J. B. (2019). Electric vehicle charge stations location analysis and determination-Ankara (Turkey) case study. *Energies*, 12(18), 3472. doi:[10.3390/en12183472](https://doi.org/10.3390/en12183472)
- Herron, D. (2017). Charging levels - Level 1, Level 2, DC Fast Charging, etc. In: Range Confidence: Charge Fast, Drive Far, with your Electric Car (Ch. 11-1). [greentransportation.info/ev-charging/range-confidence/chap4-charging/4-charging-levels.html](http://greentransportation.info/ev-charging/range-confidence/chap4-charging/4-charging-levels.html)
- Hu, D., Zhang, J., & Zhang, Q. (2019). Optimization design of electric vehicle charging stations based on the forecasting data with service balance consideration. *Applied Soft Computing*, 75, 215-226. doi:[10.1016/j.asoc.2018.07.063](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.063)
- Huang, M., Huang, S., & Jiang, J. (2008). Harmonic study of electric vehicle chargers. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 32(5), 85-88. [jdx.bjtu.edu.cn/EN/Y2008/V32/I5/85](http://jdx.bjtu.edu.cn/EN/Y2008/V32/I5/85)
- IEA, International Energy Agency (2020, June). Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive? Technology report. [www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020](http://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020)
- GCC, Green Car Congress (2020). IONITY orders 324 350kW EV chargers from ABB for second phase of expansion. Retrieved August 31, 2020, [www.greencarcongress.com/2020/01/20200110-abb.html](http://www.greencarcongress.com/2020/01/20200110-abb.html)
- Irle, R. (2020). Global Plug-in Vehicle Sales Reached over 3,2 Million in 2020. [www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/](http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/)
- Jordán, J., Palanca, J., Del Val, E., Julian, V., & Botti, V. (2018). A multi-agent system for the dynamic emplacement of electric vehicle charging stations. *Applied Sciences*, 8(2), 313. doi:[10.3390/app8020313](https://doi.org/10.3390/app8020313)
- Kane, M. (2020, November n.d.-a). Passenger Plug-In Electric Car Sales In Europe In Q1-Q3 2020 By Country. [insideevs.com/news/452914/plugin-car-sales-europe-q1q3-2020-country/](http://insideevs.com/news/452914/plugin-car-sales-europe-q1q3-2020-country/)
- Kempton, W., & Tomić, J. (2005). Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, 144(1), 280-294. doi:[10.1016/j.jpowsour.2004.12.022](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.022)
- Khalkhali, K., Abapour, S., Moghaddas-Tafreshi, S. M., & Abapour, M. (2015). Application of data envelopment analysis theorem in plug-in hybrid electric vehicle charging station planning. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 9(7), 666-676. doi:[10.1049/iet-gtd.2014.0554](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0554)
- Kong, W., Luo, Y., Feng, G., Li, K., & Peng, H. (2019). Optimal location planning method of fast charging station for electric vehicles considering operators, drivers, vehicles, traffic flow and power grid. *Energy*, 186, 115826. doi:[10.1016/j.energy.2019.07.156](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.156)



- Lam, A. Y. S., Leung, Y. W., & Chu, X. (2014). Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6), 2846-2856. doi:[10.1109/TSG.2014.2344684](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2344684)
- Li, C. T., Ahn, C., Peng, H., & Sun, J. (2012). Integration of plug-in electric vehicle charging and wind energy scheduling on electricity grid. In: Proceedings of the 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 1-7. doi:[10.1109/ISGT.2012.6175617](https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175617)
- Li, C. T., Ahn, C., Peng, H., & Sun, J. (2013). Synergistic control of plug-in vehicle charging and wind power scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), 1113-1121. doi:[10.1109/TPWRS.2012.2211900](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2211900)
- Li, S., Huang, Y., & Mason, S. J. (2016). A multi-period optimization model for the deployment of public electric vehicle charging stations on network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 65, 128-143. doi:[10.1016/j.trc.2016.01.008](https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.008)
- Liao, F., Molin, E., & van Wee, B. (2017). Consumer preferences for electric vehicles: a literature review. *Transport Reviews*, 37(3), 252-275. doi:[10.1080/01441647.2016.1230794](https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1230794)
- Lin, B., & Wu, W. (2018). Why people want to buy electric vehicle: An empirical study in first-tier cities of China. *Energy Policy*, 112, 233-241. doi:[10.1016/j.enpol.2017.10.026](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.026)
- Lin, R., Ye, Z., Guo, Z., & Wu, B. (2020). Hydrogen station location optimization based on multiple data sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(17), 10270-10279. doi:[10.1016/j.ijhydene.2019.10.069](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.069)
- Lin, S., He, Z., Zang, T., & Qian, Q. (2010). Impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution systems. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Power System Technology: Technological Innovations Making Power Grid Smarter (POWERCON), 1-5. doi:[10.1109/POWERCON.2010.5666121](https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666121)
- Lin, Y., Zhang, K., Shen, Z. J. M., Ye, B., & Miao, L. (2019). Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107, 423-443. doi:[10.1016/j.trc.2019.08.009](https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009)
- Liu, J., Zhang, T., Zhu, J., & Ma, T. (2018). Allocation optimization of electric vehicle charging station (EVCS) considering with charging satisfaction and distributed renewables integration. *Energy*, 164, 560-574. doi:[10.1016/j.energy.2018.09.028](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.028)
- Liu, L., Kong, F., Liu, X., Peng, Y., & Wang, Q. (2015). A review on electric vehicles interacting with renewable energy in smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 648-661. doi:[10.1016/j.rser.2015.06.036](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.036)
- Liu, Z., Xie, Y., Feng, D., Zhou, Y., Shi, S., & Fang, C. (2019). Load forecasting model and day-ahead operation strategy for city-located EV quick charge stations. In: Proceedings of the 8th Renewable Power Generation Conference (RPG), IET Conference Publications (CP764), 1-6. doi:[10.1049/cp.2019.0492](https://doi.org/10.1049/cp.2019.0492)
- Liu, Z., Wen, F., & Ledwich, G. (2013). Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1), 102-110. doi:[10.1109/TPWRD.2012.2223489](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2223489)
- Lo, E. W. C., Sustanto, D., & Fok, C. C. (1999). Harmonic load flow study for electric vehicle chargers. In: Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Volume 2, 495-500. doi:[10.1109/peds.1999.794613](https://doi.org/10.1109/peds.1999.794613)
- Lopes, J. A. P., Soares, F. J., & Almeida, P. M. R. (2011). Integration of electric vehicles in the electric power system. In: Proceedings of the IEEE, 99(1), 168-183. doi:[10.1109/JPROC.2010.2066250](https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2066250)
- Lund, H., & Kempton, W. (2008). Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. *Energy Policy*, 36(9), 3578-3587. doi:[10.1016/j.enpol.2008.06.007](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.007)
- Ma, G., Jiang, L., Chen, Y., Dai, C., & Ju, R. (2017). Study on the impact of electric vehicle charging load on nodal voltage deviation. *Archives of Electrical Engineering*, 66(3), 495-505. doi:[10.1515/ae-2017-0037](https://doi.org/10.1515/ae-2017-0037)
- McPhail, D. (2014). Evaluation of ground energy storage assisted electric vehicle DC fast charger for demand charge reduction and providing demand response. *Renewable Energy*, 67, 103-108. doi:[10.1016/j.renene.2013.11.023](https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.023)

- Moslehi, K., & Kumar, R. (2010). A reliability perspective of the smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(1), 57-64. doi:[10.1109/TSG.2010.2046346](https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2046346)
- Mozafar, M. R., Moradi, M. H., & Amini, M. H. (2017). A simultaneous approach for optimal allocation of renewable energy sources and electric vehicle charging stations in smart grids based on improved GA-PSO algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 32, 627-637. doi:[10.1016/j.scs.2017.05.007](https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.007)
- Mwasilu, F., Justo, J. J., Kim, E. K., Do, T. D., & Jung, J. W. (2014). Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 501-516. doi:[10.1016/j.rser.2014.03.031](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031)
- SUNPOWER (2011). Nissan LEAF™ Charges up With SunPower. Retrieved November 10, 2020, [newsroom.sunpower.com/press-releases?item=122812](http://newsroom.sunpower.com/press-releases?item=122812)
- Orr, J. A., Emanuel, A. E., & Oberg, K. W. (1982). Current Harmonics Generated By a Cluster of Electric Vehicle Battery Chargers. *IEEE Power Engineering Review*, PER-2(3), 30-31. doi:[10.1109/mper.1982.5520328](https://doi.org/10.1109/mper.1982.5520328)
- Pashajavid, E., & Golkar, M. A. (2013). Optimal placement and sizing of plug in electric vehicles charging stations within distribution networks with high penetration of photovoltaic panels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(5). doi:[10.1063/1.4822257](https://doi.org/10.1063/1.4822257)
- Phonrattanasak, P., & Leeprechanon, N. (2012). Optimal Location of Fast Charging Station on Residential Distribution Grid. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 3(6), 675-681. [www.ijimt.org/show-40-537-1.html](http://www.ijimt.org/show-40-537-1.html)
- Phonrattanasak, P., & Leeprechanon, N. (2014). Optimal placement of EV fast charging stations considering the impact on electrical distribution and traffic condition. In: Proceedings of the 2014 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE), 1-6.
- Poursistani, M. R., Abedi, M., Hajilu, N., & Gharehpetian, G. B. (2015). Impacts of plug-in electric vehicles smart charging on distribution networks. In: Proceedings of the 2014 International Congress on Technology, Communication and Knowledge (ICTCK), 1-6. doi:[10.1109/ICTCK.2014.7033499](https://doi.org/10.1109/ICTCK.2014.7033499)
- Raposo, J., Rodrigues, A., Silva, C., & Dentinho, T. (2015). A multi-criteria decision aid methodology to design electric vehicles public charging networks. *AIP Advances*, 5(5), 057123. doi:[10.1063/1.4921087](https://doi.org/10.1063/1.4921087)
- Rigas, E. S., Ramchurn, S. D., & Bassiliades, N. (2015). Managing Electric Vehicles in the Smart Grid Using Artificial Intelligence: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), 1619-1635. doi:[10.1109/TITS.2014.2376873](https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2376873)
- SAE International (2017) SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler. Standard J1772\_201710. [www.sae.org/standards/content/j1772\\_201710/](http://www.sae.org/standards/content/j1772_201710/)
- Sehar, F., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2017). Demand management to mitigate impacts of plug-in electric vehicle fast charge in buildings with renewables. *Energy*, 120, 642-651. doi:[10.1016/j.energy.2016.11.118](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.118)
- Shao, S., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2009). Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network. In: Proceedings of the 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), 1-8. doi:[10.1109/PES.2009.5275806](https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275806)
- Shao, S., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2011). Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid With Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(4), 624-631. doi:[10.1109/TSG.2011.2164583](https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2164583)
- Shi, R., & Lee, K. Y. (2015). Multi-Objective Optimization of Electric Vehicle Fast Charging Stations with SPEA-II. *IFAC-PapersOnLine*, 48(30), 535-540. doi:[10.1016/j.ifacol.2015.12.435](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.435)
- Singh, M., Kar, I., & Kumar, P. (2010). Influence of EV on grid power quality and optimizing the charging schedule to mitigate voltage imbalance and reduce power loss. In: Proceedings of the 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), 196-203. doi:[10.1109/EPEPEMC.2010.5606657](https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606657)

- Sortomme, E., & El-Sharkawi, M. A. (2011). Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1), 131-138. doi:[10.1109/TSG.2010.2090910](https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2090910)
- Speirs, R. (2020). How Long Will It Take To Charge My EV? [www.evnex.com/articles/ev-charging-times](http://www.evnex.com/articles/ev-charging-times)
- Staats, P. T., Grady, W. M., Arapostathis, A., & Thallam, R. S. (1997). A statistical method for predicting the net harmonic currents generated by a concentration of electric vehicle battery chargers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(3), 1258-1266. doi:[10.1109/61.637002](https://doi.org/10.1109/61.637002)
- Suganya, S., Raja, S. C., & Venkatesh, P. (2017). Simultaneous coordination of distinct plug-in Hybrid Electric Vehicle charging stations: A modified Particle Swarm Optimization approach. *Energy*, 138, 92-102. doi:[10.1016/j.energy.2017.07.036](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.036)
- Sultana, U., Khairuddin, A. B., Sultana, B., Rasheed, N., Qazi, S. H., & Malik, N. R. (2018). Placement and sizing of multiple distributed generation and battery swapping stations using grasshopper optimizer algorithm. *Energy*, 165, 408-421. doi:[10.1016/j.energy.2018.09.083](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.083)
- T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Yatırım ve İşletmeler Genel Müdürlüğü. (2019). 2019 Ocak Eylül Turizm İstatistikleri. <https://yigm.ktb.gov.tr/Eklenti/67862,turizmistatistikleri2019-306112019pdf.pdf>
- Tan, K. M., Ramachandaramurthy, V. K., & Yong, J. Y. (2016). Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 720-732. doi:[10.1016/j.rser.2015.09.012](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012)
- Tang, Z., Guo, C., Hou, P., & Fan, Y. (2013). Optimal Siting of Electric Vehicle Charging Stations Based on Voronoi Diagram and FAHP Method. *Energy and Power Engineering*, 5, 1404-1409. doi:[10.4236/epe.2013.54b266](https://doi.org/10.4236/epe.2013.54b266)
- TEİAŞ, Türkiye Elektrik İletim AŞ (2018). Türkiye ve Kişi Başına Kurulu Güç - Brüt Üretim - Arz - Net Tüketiminin Yıllar İtibariyle Gelişimi. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- Tekdemir, I. G., Alboyaci, B., Gunes, D., & Sengul, M. (2017). A probabilistic approach for evaluation of electric vehicles' effects on distribution systems. In: Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 143-147. doi:[10.1109/ICEEE2.2017.7935809](https://doi.org/10.1109/ICEEE2.2017.7935809)
- Tomić, J., & Kempton, W. (2007). Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of Power Sources*, 168(2), 459-468. doi:[10.1016/j.jpowsour.2007.03.010](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.03.010)
- Ucer, E., Kisacikoglu, M. C., & Cafer Gurbuz, A. (2018). Learning EV Integration Impact on a Low Voltage Distribution Grid. In: Proceedings of the 2018 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 1-5. doi:[10.1109/PESGM.2018.8586208](https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586208)
- Vaya, M. G., & Andersson, G. (2013). Integrating renewable energy forecast uncertainty in smart-charging approaches for plug-in electric vehicles. In: Proceedings of the 2013 IEEE Grenoble Conference, 1-6. doi:[10.1109/PTC.2013.6652150](https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652150)
- Vazifeh, M. M., Zhang, H., Santi, P., & Ratti, C. (2019). Optimizing the deployment of electric vehicle charging stations using pervasive mobility data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 121, 75-91. doi:[10.1016/j.tra.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.002)
- Wang, Y. W. (2007). An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(3), 231-237. doi:[10.1016/j.trd.2007.02.002](https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.02.002)
- Wu, Y., Yang, M., Zhang, H., Chen, K., & Wang, Y. (2016). Optimal site selection of electric vehicle charging stations based on a cloud model and the PROMETHEE method. *Energies*, 9(3), 157. doi:[10.3390/en9030157](https://doi.org/10.3390/en9030157)
- Yang, J., Dong, J., & Hu, L. (2017). A data-driven optimization-based approach for siting and sizing of electric taxi charging stations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77(2), 462-477. doi:[10.1016/j.trc.2017.02.014](https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.014)
- Yang, Z., Li, K., Foley, A., & Zhang, C. (2014). Optimal scheduling methods to integrate plug-in electric vehicles with the power system: A review. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 8594-8603. doi:[10.3182/20140824-6-za-1003.01804](https://doi.org/10.3182/20140824-6-za-1003.01804)

You, P. S., & Hsieh, Y. C. (2014). A hybrid heuristic approach to the problem of the location of vehicle charging stations. *Computers & Industrial Engineering*, 70, 195-204. doi:[10.1016/j.cie.2014.02.001](https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.02.001)

Zhao, H., & Li, N. (2016). Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy Delphi and hybrid multi-criteria decision making approaches from an extended sustainability perspective. *Energies*, 9(4), 270. doi:[10.3390/en9040270](https://doi.org/10.3390/en9040270)

Zhao, L. S., & Yuan, H. M. (2018). The impact of quick charge on power quality of high-voltage grid. In: 3rd Asia Conference on Power and Electrical Engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 366, 012033. doi:[10.1088/1757-899X/366/1/012033](https://doi.org/10.1088/1757-899X/366/1/012033)

URL-1 (n.d.). IONITY. Our Background. Retrieved August 31, 2020, [ionity.eu/en/about.html](https://ionity.eu/en/about.html)

URL-2 (n.d.). EV Charging Station Map. Retrieved August 31, 2020, [www.plugshare.com/](http://www.plugshare.com/)

URL-3 (n.d.). IONITY. Our Network. Retrieved August 31, 2020, [ionity.eu/en/where-and-how.html](https://ionity.eu/en/where-and-how.html)

URL-4 (n.d.). Supercharging. Retrieved December 1, 2020, [www.tesla.com/support/supercharging](https://www.tesla.com/support/supercharging)

URL-5 (n.d.). Charge on the Road. Retrieved August 31, 2020, [www.tesla.com/en\\_EU/supercharger](https://www.tesla.com/en_EU/supercharger)

URL-6 (2016). Tesla and SolarCity. [www.tesla.com/blog/tesla-and-solarcity](https://www.tesla.com/blog/tesla-and-solarcity)



## Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması

### A Review Study on Battery Management Systems in Electric Vehicles

Ramazan MENAK<sup>1</sup>, Teoman KARADAĞ<sup>2\*</sup>, Mehmet ALTUĞ<sup>3</sup>, Nusret TAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siirt University, Department of Electrical Electronics Engineering

<sup>2</sup>Inonu University, Department of Electrical Electronics Engineering

<sup>3</sup>Inonu University, Malatya OSB MYO, Department of Machine and Metal Technologies

Anahtar Kelimeler	Özet
Elektrikli Araçlar Batarya Yönetim Sistemi Batarya Termal Yönetimi Batarya Durum Kestirimi Batarya Yönetim Sistemleri Türleri	Küresel ısınma, fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar ve sera gazı emisyonları ile ilgili endişeler nedeniyle elektrikli araçlar gün geçtikçe içten yanmalı motorlu araçların yerini almaktadır. Elektrikli araçlar için ana enerji kaynağı olan bataryaların, sürüş güvenliği için belirli bir çalışma sağlamak adına bazı sınırlamaları vardır. Batarya yönetim sistemleri (BYS'ler), bu sınırlamaların üstesinden gelmek, bataryayı korumak ve elektrikli araç için daha güvenilir sürüş sağlamak adına önemli bir rol oynamaktadır. Bu makalede BYB ve BYB'nin alt konuları olan bataryayı izleme, batarya güvenliği, araç iç-dış haberleşmesi, hücre dengelenmesi, durum kestirimleri, termal yönetimi ve topolojileri alanındaki çalışmalar derlenmiştir. Bu tür konularla ilgili yöntemlerin, avantaj-dezavantajları ve nitel faktörler açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. Elektrikli araçlar geleceğin ulaşım aracı olacağı ve ülkemizde yerli üretime geçildiği için, elektrikli araçlar konusunda Türkçe literatürünün geliştirilmesi ve akademik çalışmaların yapılması gerektiği yazarlar tarafından düşünülmektedir. Yazarlar, bu çalışmanın Türkçe literatürüne katkı sağlayacağını ve batarya yönetim sistemi alanında çalışan tasarımcılara, araştırmacılara, üreticilere ve şirketlere bakış açısı kazandıracağını düşünmektedir.

Keywords	Abstract
Electric Vehicles Battery Management System Battery Thermal Management Battery State Estimation Topology of the Battery Management Systems	Due to concerns about global warming, environmental damages from fossil fuels, and greenhouse gas emissions, electric vehicles have been taken place of internal combustion motor vehicles day by day. Being the main energy source for electric vehicles, the batteries have some limitations to give certain operations for safe driving. The battery management systems (BMSs) play a vital role in order to overcome these limitations, protect the battery and ensure more reliable driving for electric vehicles. This paper reviews the papers about the battery management system and its sub-issues including battery monitoring, battery safety, vehicle internal-external communication, cell balancing, state estimations, thermal management, and topologies. The methods about such issues have been compared in terms of merits-demerits and qualitative factors. Since electric vehicles will be the transportation vehicles for the future and domestic production has been started in our country, the authors consider that it is necessary to improve the Turkish literature on electric vehicles and conduct academic studies. The authors consider that this study will contribute to the Turkish literature and gaining some perspective to the designers, researchers, producers, and companies that work in the field of the battery management systems.

#### Alıntı / Cite

Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., & Tan, N. (2021). Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 234-275.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
R. Menak, 0000-0003-3223-4808	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b> 25.02.2021
T. Karadağ, 0000-0002-7682-7771	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b> 20.04.2021
M. Altuğ, 0000-0002-4745-9164	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b> 28.04.2021
N. Tan, 0000-0002-1285-1991	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b> 06.05.2021

## 1. GİRİŞ

Küreselleşen ve büyüyen dünyamızda enerjiye olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle sanayi devriminden sonra bu enerji ihtiyacını karşılamak için geleneksel fosil yakıt kaynaklı arayışları başlamış ve tüketimi günümüze kadar hızla artmıştır. Bununla beraber bu fosil yakıtlardan kaynaklanan olumsuz etkiler doğanın kirlenmesine ve canlıların sağlığına olumsuz etki yapmıştır. Buna sebep olan faktör ise enerji ihtiyacı için fosil yakıtların kullanımını sonucu çevreye yayılan sera gazlarıdır. Sera gazlarından kaynaklanan iklim değişiklikleri doğanın yapısını değiştirip küresel ısınmaya sebep olduğu gerçeği tüm insanlık tarafından ciddi bir konu haline gelmesi, sera gazlarını önlemek ve çevre dostu sistemlerin geliştirilmesi adına çalışmaları hızla artırmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi de ulaşımda kullanılan araçlardır. 2009 yılı içerisinde ulaşım sektöründe kullanılan araçların, sera gazı kaynaklı emisyonlara sebep olan faktörlerin dörtte birini oluşturduğu raporlanmıştır (Yong vd., 2015). Uluslararası enerji ajansı (IEA) 2015 yılı içerisinde ulaşım sektöründe kullanılan araçların, sera gazı kaynaklı emisyonlara sebep olan faktörlerin %24'ünü oluşturduğu ve bunun dörtte üçünün karayolu sektörü tarafından oluştuğu belirlenmiştir (Zhenhe Li vd., 2019). Geleneksel olarak kullanılan içten yanmalı motorlu (İYM) araçlar, motor hareketi için gerekli olan enerjiyi fosil yakıtları (benzin ya da dizel) kullanarak sağlar. Bunun sonucunda çevreye zarar veren karbon oksit, hidrokarbon ve nitrojen oksit gazlarını yayarlar. Bu durumun önüne geçmek adına hibrit elektrikli araçlar (HEA) kullanılmayı başlanmıştır. Böylelikle HEA'ların daha az emisyon yayılması sağlayacağı öngörülse de, yine de yukarıda bahsedilen olumsuz etkiler göz önüne alındığında tam bir katkı sağladığı söylenemez. Bundan dolayı çevre dostu, daha temiz, daha sessiz olan tamamen elektrikli araçlar (TEA) tasarlanmaya başlanmıştır. Aslında elektrikli araçların tarihi daha eski zamanlara dayanır. Petrol ile çalışan ilk içten yanmalı motorlu araç 1885 yılında yapılmasından yaklaşık 50 yıl önce, 1832-1836 yılları arasında ilk elektrikli araç Robert Anderson tarafından tekrar şarj edilemeyen batarya sistemiyle yapılmıştır (Chan, 2013). 1856-1881 yılında daha verimli doğru akım (DA) motorları ile şarj edilebilir batarya sistemleri ile ilgili gelişmeler yaşanmıştır. İlk şarj edilebilir batarya olan kurşun-asit batarya 1859'da Gaston Planté tarafından icat edilmiş ve Camille Alphonse Faure tarafından 1881 yılı civarında pazarlanabilir ürüne dönüştürülmüştür (Yong vd., 2015). Yaşanan gelişmeler ışığında elektrikli araçlar gün geçtikçe popülerlik kazanmış ve 1900 yılların başına kadar yaklaşık 70 yıl boyunca kesintisiz olarak kullanılmıştır. 1910 yılında Henry Ford tarafından, benzinle çalışan Ford Model T araçları piyasaya sürüldü. 1912'de de Charles Kettering tarafından elektrikli marş motorunun icat edilmesiyle beraber benzinle çalışan araçları çalıştırmak için el krank ihtiyacını ortadan kalkmıştır (Chan, 2013). Bu gelişmelerle beraber ucuz benzinin varlığı, benzinli araçların kullanım maliyetlerinin elektrikli araçlara kıyasla daha düşük olmasına neden olmuştur. Sonuç olarak elektrikli araçlar nispeten daha kısa mesafelere gidebiliyor ve sınırlı sayıda şarj istasyonu var olmasına karşın içten yanmalı motorlu araçlar daha uzun mesafe gidebildiği, karayollarının geliştiği ve petrol istasyonlarının artmasından dolayı elektrikli araçlara olan ilgi azalmıştır. Yıllar geçtikçe petrol fiyatlarının artması ve çevreye yayılan zararlı gaz salınımları konusu önem kazanarak yeniden elektrikli araçlara yönelme başlamıştır. Özellikle 1970'lerde Ford, GM ve Exxon Mobil gibi büyük Amerika Birleşik Devletleri (ABD) şirketlerinden bazılarının petrol krizinden dolayı Orta Doğu ülkelerinin petrolüne bağımlılığı azaltmak amacıyla elektrikli araçlar üzerine ciddi yatırımlar yapmışlardır. Ancak elektrikli araçlar ile ilgili teknolojik gelişmeler geleneksel araçlarla rekabet edecek boyuta ulaşamamıştır. Devam eden süreçte yeni kaynakların bulunması ve petrol fiyatlarının düşmesi ile beraber geleneksel ulaşım araçlarının kullanılmasına devam edilmiştir. 20 yy. sonlarına doğru çevre kirliliği ve küresel ısınma konusu ile alakalı uluslararası politikaların meydana çıkması ile beraber alternatif enerji kaynaklarına yönelim başlamış ve ulaşım sektöründe de temiz enerji kullanılması ilgili çalışmalarla beraber elektrikli araçlara olan ilgi yeniden canlılık kazanmıştır. Özellikle 2010 yılından itibaren, Nissan Leaf, Chevrolet Volt, Tesla Model S ve Mitsubishi i-MiEV gibi bataryalı elektrikli araçlar (BEA'lar) ve prize takılabilen hibrit elektrikli araçlar (PHEA'lar) otomotiv sektörüne girmeye başlamıştır (Yong vd., 2015). Geleneksel araçların kullanılmasıyla beraber yaşanacak olan (yukarıda bahsedilen) sorunların büyümemesi adına ülkeler çeşitli politikaları yürürlüğe geçirmiş ve elektrikli araçlar üzerine yatırımlar yapılmayı başlanmıştır. Çin, geleneksel İYM'lerin üretiminin ve satışının yakın gelecekte durdurulacağını açıklarken, Hollanda, Norveç, Almanya ve Hindistan'ın yanı sıra İngiltere ve Fransa gibi bazı ülkeler 2025-2040 yılları arasında geleneksel İYM'lerin satışını yasaklayacaklarını açıklamıştır (Li vd., 2019). Ülkemizde de Türkiye'nin otomobili Girişim Grubu (TOGG) tarafından tesisin inşası, üretim ve montaj hatlarının kurulmasının ardından 2022'nin son çeyreğinde ilk aracın çıkarılacağı bildirilmiştir. Bunun yanında 2030 yılına kadar fikri ve sınai mülkiyet haklarıyla tamamı TOGG'ye ait olacak olan 5 farklı modelden toplam 1 milyon adet üretileceği belirtilmiştir (TOGG Press Release, 2020).

Her ne kadar elektrikli araçlar daha sessiz, daha az bakım gerektiren, yolda iken egzoz salınımının olmaması ve dolayısıyla daha temiz olması gibi avantajlara sahip olsa da batarya teknolojisinin istendiği boyutlara ulaşmaması, şarj istasyonlarının kısıtlı olması ve teknik altyapısının gelişmemesi gibi dezavantajları yüzünden kullanımı ve pazarlanması açısından çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Bu zorluluklardan en önemlisi de motor tahrik sistemine enerji veren bataryaların arzu edilen performanslara henüz sahip olmamasıdır. Bataryalar aracın gidebileceği menzile belirlemede ve aracın maliyetine doğrudan etki etmektedir. Bu yüzden bataryaların elektrokimyasal yapılarını geliştirerek performanslarının artırılması gerekmektedir. Çalışmalar devam ederken mevcut batarya sisteminin en uygun güvenlik bölgesinde tutulmasıyla sürüş güvenliğini sağlamak ve araç performansını artırmak adına batarya yönetim sistemine (BYS) ihtiyaç duyulmuştur.

BYS ile ilgili çalışmalar önem kazanmış ve bu konuda literatürde çokça çalışma yapılmıştır. 1993 yılında John Goodenough elektrikli bir araç üzerinde batarya yönetim sistemi uygulamıştır. 1996 yılında 660 EV1 isimindeki elektrikli araçta batarya yönetim sistemi ile donatılmıştır. 1997 yılında ise General Motors tarafından üretilen Chevrolet S10 üzerinde yeni nesil bir batarya yönetim sistemi geliştirilmiştir (Ekici, 2019). 1999 yılında yapılan bir çalışmada, elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan büyük akü paketlerinin uzun ömürlü olması istendiği belirtilmiştir. Bu amaçla batarya takımının ömrünü uzatacak akıllı bir BYB geliştirildiği ifade edilmiştir. BYB'nin işlevinin, büyük bir batarya dizisindeki tekli pillerin izlenmesi ve şarj edilmesi olduğu ifade edilmiştir (Maskey vd., 1999). 2002 yılında yapılan bir çalışmada, elektrikli araç (EA) uygulamalarında nikel metal hidrit (Ni-MH) pil için bir BYB geliştirilmiştir. Sistem, pillerin şarj ve deşarj kontrolünü optimize etmek ve pil durumunu gerçek zamanlı olarak izlemek için çeşitli işlevlere sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar pilin enerji verimliliğinin BYB ile iyileştirilebileceği ifade edilmiştir (Jung vd., 2002). BYB ile ilgili çalışmalar günümüze kadar geliştirilerek devam etmiştir. BYB alanındaki çalışmalar çeşitli yazarlar tarafından araştırılmış ve derlenmiştir. Xing vd. (2011), Rahimi-Eichi vd. (2013), Shen ve Gao (2019), Lu vd. (2013), Liu vd. (2019) batarya yönetim sisteminin genel yapısı, uygulanan yöntemler, batarya modelleme, batarya durum kestirimleri vb. konularda kapsamlı bilgiler sunmuşlardır. Bu çalışmalar sonucunda genel olarak BYB'nin kullanılması batarya ve araç güvenliği açısından oldukça önemli ve gerekli olduğu vurgulanmıştır. Aktaş vd. (2020), hücre dengelemede pasif yöntemin kullanıldığı, batarya şarj durumunun hesaplandığı, batarya genel sağlık durumunun kestiriminin yapıldığı ve bataryayı aşırı/düşük gerilim/sıcaklık değerlerine karşı koruyan bir BYB kartı tasarımı önermişlerdir. Önerdiklerin sistemin istenilen performansları karşıladığını deneysel sonuçlar ile desteklemişlerdir. Ayrıca, BYB tasarımında pasif dengeleme sistemi kullanılarak tasarım hızı, boyutu, maliyet ve kurulum kolaylığı açısından iyileştirmeler sağladığı belirtilmiştir. Aydın vd. (2013), yakıt pili ile çalışan bir elektrikli aracın Arduino tabanlı sıcaklık, nem, güç, hız göstergelerinin hesaplanması ve kullanıcıya sunulmasını sağlayan bir yönetim sistemi üzerinden çalışmışlardır. Bu yöntem ile aracın kontrolünün daha hassas olduğu ve anlık olarak okunan değerlerin hata oranının minimize edildiği vurgulanmıştır. Sarıkurt ve Balıkcı (2017), elektrikli araçlar için özgün bir enerji yönetim sistemi önermişlerdir. Önerdikleri sistemin pasif dengeleme yöntemi ile hücre dengelemesi yapabildiği, benzetim sonuçları doğrultusunda bataryaların çalışma süresinin iki kat uzattığı ve deneysel olarak enerji transferi bakımından sistemin verimliliğinin %95'in üzerinde olduğunu ifade etmişlerdir. Karabeyoğlu vd. (2019) Lityum iyon batarya gurubunun dengeleme işlemi için gerilim düşürücü-yükseltici dönüştürücü sistemini önermişlerdir. Bataryanın düşük ve yüksek yük altındaki çalışma durumlarını benzetim yoluyla irdelemişlerdir. Farklı şarj durumları altında olan ve benzetimi yapılan iki hücre arasındaki 25 mV'luk farkın dengeye ulaşma süresi düşük ve yüksek yük altında sırasıyla 147 ve 127 saniye olduğu sonucuna varmışlardır. Kıvrak vd. (2020), farklı amaçlar için kullanılabilir Can bus ile STM32f103 mikroişlemci tabanlı bir BYB kartı önermişlerdir. Önerdiklerin BYB kartının 4 farklı pilin şarj kontrolünü yapabildiğini belirtmişlerdir. Deneysel analiz sonucunda, pillerden gelen veriler, STM32f103C8 mikroişlemci kullanılarak CAN bus veriyolu üzerinden verilerin kimlik numarasına göre doğru şekilde sınıflandırmasını başarıyla gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Ekici ve Tan (2019) simülasyon ortamını kullanarak 4 farklı batarya türünün şarj/deşarj karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda ilk şarj anında en fazla akım çeken bataryanın LiFePO4 bataryasının olduğunu, en hızlı ve en yavaş şarj olan bataryaların sırasıyla Lithium Iron Phosphate ile Nickel Cadmium olduğunu, en verimli ve en verimsiz olan bataryaların sırasıyla Lithium Iron Phosphate ile Nickel Cadmium olduğunu, en yavaş ve en hızlı ısınan bataryaların sırasıyla Nickel Metal Hydride ile LiFePO4 olduğunu tespit etmişlerdir. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda genel olarak BYB'nin alt yapısında olan durum kestirimleri, hücre dengeleme, hücre izleme, şarj/deşarj durumu vb. konulara değinilmiştir. Ancak BYB ile ilgili genel bilgiler içeren, alt yapısında olan özellikle batarya durum kestirimleri, hücre dengeleme, termal yönetim gibi konuları içeren detaylı derleme çalışmalarını okuyucuya sunan herhangi bir Türkçe

çalışma henüz yapılmamıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi EA'ların gün geçtikçe önem kazanması ve ülkemizde de TOGG girişiminin başlatılması gibi nedenlerden dolayı, bu mecrada yer almak isteyen yerli araştırmacıların ve üreticilerin EA'ların temel güç kaynaklarından bir tanesi olan bataryalar ve bataryaların yönetim sistemleri üzerindeki çalışmalar yapması ve çalışmalardan faydalanması gerekmektedir. Bu çalışma araştırmacılar, firmalar ve üreticiler için BYS ile ilgili uluslararası literatürde yapılan nitelikli çalışmalar derlenmiştir. Böylelikle okuyucuya doğru kaynağa ulaşmaya olanak sağlanacağı düşünülmektedir. Ayrıca BYS'de yer alan hücre dengeleme, batarya durum kestirimleri, termal yönetim gibi en önemli konular ile ilgili yayınlar derlenmiş ve yapılan çalışmalar ışığında yöntemlerin uygulanması, avantaj-dezavantajları, nitelik bakımından karşılaştırılması gibi sonuçlar sunulmuştur. Bunların yanından BYS türleri ile bilgiler sunulmuş, türlerin nitelik bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmanın BYS alanında kapsamlı bir derleme çalışması olarak Türkçe literatürüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. EA'LARDA BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

Bataryalar yapısındaki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji depolama aracıdır. Bataryalar birincil ve ikincil batarya türü adı altında kategorize edilir. Birincil batarya türü tümüyle deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilemeyen batarya türleri iken ikincil batarya türleri ise deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilebilen ve dolayısıyla tekrar tekrar kullanılabilen batarya türleridir. Batarya teknolojisine bağlı olarak ilk elektrikli araçlarda birincil batarya türleri kullanılmıştır. Daha sonra tekrar şarj edilebilen ikincil batarya türlerinin gelişimiyle birlikte elektrik araçlarda ikincil batarya türleri kullanılmıştır. İlk şarj edilebilen batarya sistemine sahip elektrikli araçlarda kurşun-asit bataryalar kullanılmaktaydı. Ancak bu bataryalar ağır, düşük enerji yoğunluğuna sahip ve çevre dostu değildi. Bundan dolayı kurşun-asit tabanlı bataryalarının yerini nikel tabanlı bataryalar almıştır. Özellikle nikel kadmiyum (Ni-Cd) ile Ni-MH bataryalar, kurşun-asit bataryalar ile karşılaştırıldığında daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olduğu için tercih edilmekteydi. Ancak şarj olma süresi uzun ve deşarj olma süresi kısa olması, kendi kendine deşarj olma oranının yüksek olması ve hafıza etkisinin olması gibi dezavantajlara sahip olmasından dolayı elektrikli araçlarda uygun olmadığı anlaşılmıştır. ZEBRA veya diğer adıyla sodyum-nikel klorür (Na-NiCl<sub>2</sub>) bataryalar, Ni-MH bataryalar ile aynı dönemde kullanılmıştır. Bu batarya türü yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olsa da çalışma sıcaklığı aralığı (245-350°C) olması elektrikli araçta güvenlik açısından endişe oluşturduğu ve maliyeti artıracak bir termal yönetim sistemi gerektirdiğinden dolayı tercih edilmemektedir (Yong vd., 2015). 1970 yılında Lityum-iyon (Li-ion) tabanlı bataryaların gelişimi ile elektrikli araçlarda batarya sistemi açısından yeni bir çağ açılmıştır. Li-ion bataryaların yüksek enerji yoğunluğu sahip olması, az bakım gerektirdiği, daha ucuz olması, sülfatlaşmasının olmaması, yüksek şarj ve deşarj verimliliği oranına sahip olması, kendi kendine deşarj olma faaliyetinin düşük olması ve hafıza etkisinin olmaması gibi avantajları nedeniyle EA'lar da kullanıma elverişli olan ve en yaygın olarak kullanılan batarya türüdür. Li-ion batarya teknolojisinin gelişmesiyle EA'larda standart güç kaynağı olarak kullanılmasına neden olmuştur (Adany vd., 2013). EA'larda yüksek voltaj ve kapasite için batarya hücreleri birbirlerine seri ve paralel bağlanarak bir batarya grubu paketi oluşturulur. Seri bağlanan hücreler gerilimi yükseltirken, paralel bağlanan hücreler kapasiteyi ve akımı yükseltir. Yüzlerce seri ve paralel hücrelerden oluşmuş bir batarya paketi elektrikli araçta güvenlik zafiyeti oluşturmaktadır. Batarya paketinde bulunan tüm hücrelerin gerilim, akım ve sıcaklık değerlerinin en uygun çalışma bölgesinde tutulması adına batarya yönetim sisteminin kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Özellikle Li-ion bataryalar en uygun çalışma bölgesinde kullanılmazsa batarya yaşlanması hızlanır, ısınır ve araçta yanma/patlamalara neden olur. Elektrikli araçlarda BYS'nin temel görevleri bünyesindeki sensörler ve mikroişlemci vasıtasıyla hücrelerin tek tek gerilim, akım ve sıcaklıklarını izlemek; bataryayı aşırı/düşük gerilim/akım/sıcaklık değerleri sınırlarında korumak ve önlemine almak; şarj/deşarj esnasında hücrelerdeki dengesizliği gidermek; durum kestirimleri yaparak bataryanın şarj durumunu/state of charge (BŞD/SOC), bataryanın genel sağlık durumu/state of health (BGSD/SOH), bataryanın enerji durumunu/state of energy (BED/SOE), bataryanın işlev durumunu/state of function (BİD/SOF) tespit etmek ve bu sistemlerin bir haberleşme protokolü ile birbirleriyle etkileşim içinde bulunmasıyla kullanıcıya bilgiler sağlamaktır. Şekil 1'de BYS'nin genel gösterimi verilmiştir.

### 2.1. Batarya Grubunun ve Hücrelerin İzlenmesi

EA'larda batarya grubu yüzlerce seri-paralel hücrelerden oluştuğu için çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Batarya grubundaki hücrelerin değişen ortam şartlarına bağlı olarak gerilim, akım ve sıcaklık değerleri değişir. EA'larda bu değişim özellikle sürüş esnasında bariz bir şekilde yaşanır. EA değişen bu ortam koşulları ve karmaşık yapıya kendisini uyarlamalıdır. Bu işlem batarya yönetim sistemindeki algılayıcılar ile hücrelerin ve





için genellikle dijital sinyaller kullanır. Bu sinyaller genel olarak açık-kapalı, arıza var-yok, şarj başladı-bitti vb. şeklindedir. Ancak elektrikli araçlarda kullanılan BYS, aracın düzgün çalışmasını sağlamak için aracın dış dünya ve motor kontrolörü ile etkili ve güvenli bir iletişim kurmalıdır. Bu yüzden EA'lar gibi gelişmiş batarya grupları için gelişmiş bazı standart ve özel haberleşme protokolleri kullanılır. En yaygın olarak kullanılan haberleşme protokolleri RS232, RS485, Controller area network (CAN) Bus, Local interconnect network (LIN), Ethernet, Universal Serial Bus (USB), Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) port, Serial Peripheral Interface (SPI) vb. protokollerdir (Väyrynen ve Salminen, 2012). Bunlar arasında EA'lar için en yaygın olarak kullanılan ve standart hale gelen CAN bus haberleşme protokolüdür (Rajalakshmi ve Razia Sultana, 2020). CAN Bus haberleşme protokolü, 1983 yılında Robert Bosch tarafından, otomotiv uygulamalarında seri haberleşme için geliştirilmiş bir protokoldür (Navet vd., 2005). Haberleşme protokolleri ile sistemler birbiriyle haberleşirken, bazı araç bilgilerinin daha sonra kullanılmak üzere depolanması ihtiyaç vardır. Bilgilerin depolama görevini EEPROM, SD kart, bulut sistemleri, flash hafıza vb. hafıza kaydedici araçlar yürütmektedir. Bu bilgiler araç testleri, bakımı, onarımı, servisi vb. işlemler için daha sonra ihtiyaç duyulması halinde kullanabilmeye olanak tanımaktadır. Araçlar için haberleşme protokolleri ile ilgili daha detaylı bilgilerden faydalanmak için literatürde bazı çalışmalar derlenmiştir. Navet vd. (2005), otomotiv uygulamalarında kullanılan haberleşme protokolleri üzerindeki trendleri incelemişlerdir. Sonuç olarak otomotiv sektöründen kullanılan mevcut haberleşme sistemlerinin optimize edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Saraf (2012) ise otomotiv uygulamalarından kullanılan geleneksel ve gelecekte kullanılabilecek haberleşme protokollerini incelemişlerdir. Geleneksel yöntemler ile gelecek yöntemler kendi aralarında özellikleri çıkartılmış ve karşılaştırılmışlardır. Haberleşme protokollerinin kullanım amaçları doğrultusunda bazı avantaj ve dezavantajları olduğu ve kullanılan sisteme göre ağ güvenilirliği, yonga seti fiyatı, kurulum maliyeti vb. birçok faktörün dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

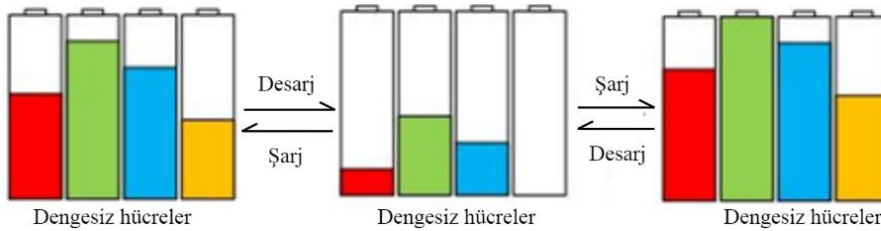
### 2.3. Hücre Dengeleme

BYS'nin temel görevlerinden bir tanesi de batarya grubu içerisinde bulunan pillerin dengede (aynı kapasitede) durmasını sağlamaktır. Batarya grubu içerisindeki hücrelerin dengesizliğine sebep olan iki etken vardır. Biri iç etken diğeri ise dış etken olarak kategorize edilebilir (Cao vd., 2008; Daowd vd., 2011; Drori ve Martinez, 2005; Omariba vd., 2019; Xiujuan Zhang vd., 2011). İç etkenler üretim farklılıklarından kaynaklanır. Bataryalar aynı fabrika ortamında ve şartlarında üretilmesine rağmen kimyasal yapı yüzünden farklı iç direnç ve kapasiteye sahiptirler. Farklı kapasite değerleri, aynı özellikte olması beklenen bataryaların kendi kendine deşarj olma oranlarının farklı olmasına sebep olmaktadır. Dış etkenler, bataryaların seri/paralel bağlanmasına, ortam sıcaklığının etkisine ve entegre devre kartlarının tasarım hassasiyetine göre dengesizliğe neden olmaktadır.

Dengelemenin temel amacı batarya grubunun kapasitesini en yüksek seviyesine çıkarmak ve tüm batarya grubu elemanı olan hücrelerin aynı kapasite değerinde olmasını sağlamaktır. Batarya grubu daha önceden de bahsedildiği gibi gerekli gerilim/akım/kapasite değerlerini sağlamak için yüzlerce hücrenin seri/paralel bağlanmasıyla oluşturulur. Pil dengeleme işlemi üç veya üçten fazla hücrenin birbiriyle seri bağlanması durumunda bataryanın güvenliği ve verimi için kaçınılmaz bir durumdur (Martinez vd., 2005). Paralel bağlı hücreler kendi kendine dengelenme eğiliminde olduğundan dolayı herhangi bir dengesizlik söz konusu değildir. Batarya grubundaki seri hücrelerden kapasitesi en düşük olan hücre batarya paketinin kapasitesini belirler. Bundan dolayı seri hücrede herhangi bir dengesizlik olması durumunda diğer hücreler dolu olsa bile batarya grubunun kapasitesi, kapasitesi düşük olan hücreden dolayı düşük olur. Şekil 2'de görüldüğü gibi dengeleme sistemi olmaz ise şarj esnasında kapasitesi az olan hücreler şarj olmaya devam ederken, dolu olan hücreler aşırı şarj akımına maruz kalacaktır. Bu durumda hücrelerin aşırı ısınması, patlayıp gaz açığa çıkarmasına neden olur. Deşarj esnasında ise diğerlerine göre dolu olan hücrelerin kapasitesi azalırken, zaten az olan kapasitesi biten hücreler aşırı deşarja maruz kalır. Bu durumda bataryanın kimyasal yapısının bozulmasına ve erken yaşlanmasına sebep olur. Yukarıda bahsedilen olumsuz sebeplerden ötürü batarya paketinin performansının artırılması, erken yaşlanmasının azaltılması ve aracın güvenliğinin sağlanması için hücrelerdeki dengesizliğin giderilmesi elzemdir. Konunun çok önemli ve gerekli olmasından dolayı araştırmacıları cezbetmiş birçok yazar araştırma ve derleme çalışmaları ile detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Cao vd. (2008), batarya dengeleme yöntemlerinin 3 gruba ayırarak açıklamışlardır ve karşılaştırma yapmışlardır. Karşılaştırma sonucunda yöntemlerin kullanıldığı uygulamaya göre farklı sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır. Hibrit elektrikli araç uygulamaları için anahtarlamalı sığaç yönteminin uygun olduğunu

önermişlerdir. Carter vd. (2020), pil dengeleme yöntemlerini detaylı bir şekilde anlatan derleme çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında sığaç, indüktör ve transformatör bazlı yöntemleri açıklamak suretiyle karşılaştırmalarını yapmışlardır. Karşılaştırma sonucunda yük dengeleme devresi veya şemasının bu alandaki araştırmacılar arasında standart hale gelmesine olanak sağlanan bir çözüm sunmuşlardır. Daowd vd. (2011), MATLAB/Simulink ortamını kullanarak çeşitli batarya dengeleme yöntemlerini derlemiş, simüle edilmiş ve detaylı karşılaştırmalarını yapmışlardır. Hücre dengeleme yöntemlerinin, maliyet, boyut, kontrol karmaşıklığı vb. yönleriyle farklılık gösterdiğini ifade ederek her türün uygulandığı sisteme göre kendi içinde avantajı ve dezavantajı olduğunu ve buna göre seçim yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Hoque vd. (2017a), EA uygulamaları için farklı türdeki pil dengeleme yöntemlerini kapsamlı bir incelemesi yapmışlardır. İnceleme sonucunda pil dengeleme işleminin EA'ların güvenli ve verimli çalışması için gerekli olduğu, mevcut yöntemlerin verimli çalışması teknolojik olarak hala istenilen seviyede olmaması ile beraber en iyi yöntemin; dengeleme hızı yüksek, verimliliği yüksek, hacmi küçük, düşük maliyete sahip olması gerektiği sonucuna varmışlardır. Omariba vd. (2019), çeşitli pil dengeleme yöntemlerini gözden geçirecek bu yöntemlerin pil performansına olan etkilerini irdelemişlerdir. Deneysel olarak analiz yapılarak, pil hücrelerinin parametrelerinde birçok sapma olduğundan dolayı pil dengelemesinin batarya grubunun performansı açısından çok önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bu nedenle, pil dengeleme işlemi BYS tarafından uygun şekilde izlenmesi ve dengeleme işleminin piller şarj edilirken veya deşarj olurken aynı anda gerçekleşmesi gerektiğini önermişlerdir. Qi ve Dah-Chuan Lu (2014), bazı popüler hücre dengeleme tekniklerini, pil hücrelerindeki fazla olan enerjiyi kullanma yöntemine göre tanımlanmış ve kategorize ederek detaylı bir şekilde açıklamışlardır. Çalışma sonucunda uygun maliyetli, yüksek dengeleme hızına sahip, yüksek güvenilirlik sahip vb. tüm avantajlara içeren tek bir türün olmadığını ve bu yüzden de pil dengeleme yönetimleri ile ilgili daha fazla araştırma yapılması gerektiğini önermişlerdir.

Hücre dengeleme, EA'larda sıkça kullanılan lityum pil uygulamalarında özellikle rejeneratif frenleme veya şarj ile deşarjın sık meydana geldiği uygulamalar için gereklidir. Rejeneratif frenleme, Lityum İyon piller için sorunlara neden olabilmektedir. Bunun sebebi anlık rejeneratif frenleme akımı, hücre voltajının aniden yükselerek eşik voltajının üzerine çıkmasıyla elektrolit bozulmaya sebep olmasıdır (Moore ve Schneider, 2001). Pil paketindeki hücrelerin dengeli kabul edilmesi için hücreler arasındaki voltaj farkının 50 mV altında olması gerekmektedir (Saw vd., 2016). Şekil 3'te görüldüğü gibi literatürde pasif ve aktif dengeleme olmak üzere iki tür yöntem mevcuttur (Gallardo-Lozano vd., 2014; Hauser ve Kuhn, 2015; Hoque vd., 2017; Moore ve Schneider, 2001; Qi ve Dah-Chuan Lu, 2014; Saw vd., 2016).



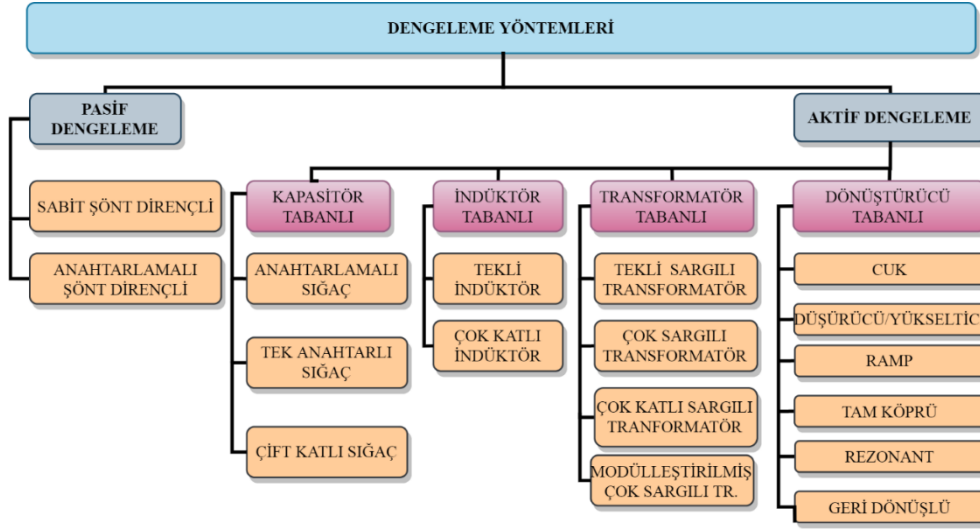
**Şekil 2.** Şarj ile Deşarj Durumunda Dengesiz Yüklerin Değişimi  
(Qi ve Dah-Chuan Lu (2014) kaynağından revize edilmiştir.)

### 2.3.1. Pasif Dengeleme

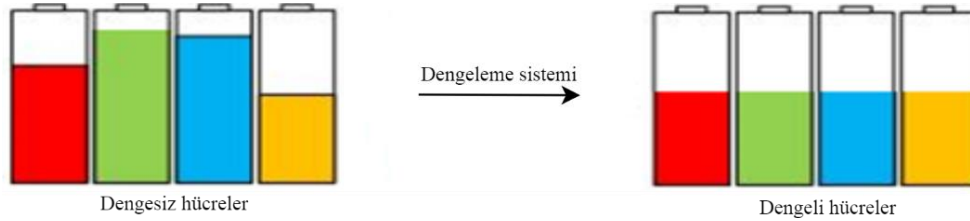
Hücre dengelemede en basit ve kolay uygulanabilen yöntem pasif dengeleme yöntemidir. Pasif dengeleme işleminde seri hücrelerden kapasitesi en düşük olan hücre belirlenir. Kapasitesi, en düşük hücreden fazla olan diğer hücreler, kendilerine paralel olarak bağlanan direnç üzerinden enerjisini harcayarak en küçük kapasitedeki hücrenin değerine ulaşmak suretiyle çalışır. Harcanan bu enerji paralel dirençler üzerinde ısı enerjisi olarak açığa çıkar. Buradaki dengeleme hızı paralel bağlanan direncin değerine göre belirlenir. Şekil 4'te dengesiz olan hücreler, kapasitesi en az olan hücrenin değerine kadar pasif dengeleme yöntemiyle dengelendiği görülmektedir.

Pasif dengeleme yöntemi iki alt kategoriden oluşur; sabit şönt direnci ve anahtarlamalı şönt direnci, Sabit şönt dirençli sistemde her hücreye paralel bir by-pass direnci vardır. Direncin paralel olduğu hücre gerilimi ne kadar fazla ise direnç üzerinde o kadar enerji harcanır. Böylelikle enerjisi yüksek olan hücreler, enerjisi en düşük olan hücrenin değerine ulaşana kadar deşarj olur ve dengesizlik giderilmiş olur. Sabit şönt dirençli sistem

kurşun-asit ve nikel bazlı bataryalar için uygundur. Ancak li-ion bazlı bataryalar için uygun değildir. Bunun sebebi de kurşun-asit ile nikel bazlı bataryalar aşırı şarj karşı dayanıklı iken, li-ion bazlı bataryalar dayanıklı olmamasıdır (Moore ve Schneider, 2001). Anahtarlamalı şönt dirençli sistemde, sabit şönt dirençli sistemdeki gibi paralel bağlı olan dirençlerin üzerinden akımın ne zaman geçeceğini kontrol etmek için transistör veya röle anahtarlamalı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Hücrelerde herhangi bir dengesizlik söz konusu olunca BYS bunu belirler ve enerjisi yüksek olan hücrenin anahtarı kapatılarak şönt direnci üzerinden enerjisini harcanmasını sağlar. Dengeleme gerçekleştikten sonra anahtar tekrar açılır. Bu yöntem sabit şönt dirençli sisteme göre daha verimli ve daha güvenlidir. Ayrıca EA'lar da sıkça kullanılan li-ion bataryalı sistemleri için de uygundur (Daowd vd., 2011). Şekil 5'te sabit dirençli ile anahtarlamalı sabit dirençli pasif dengeleme yönteminin devre çizimi görülmektedir.



Şekil 3. Hücre Dengeleme Yöntemleri

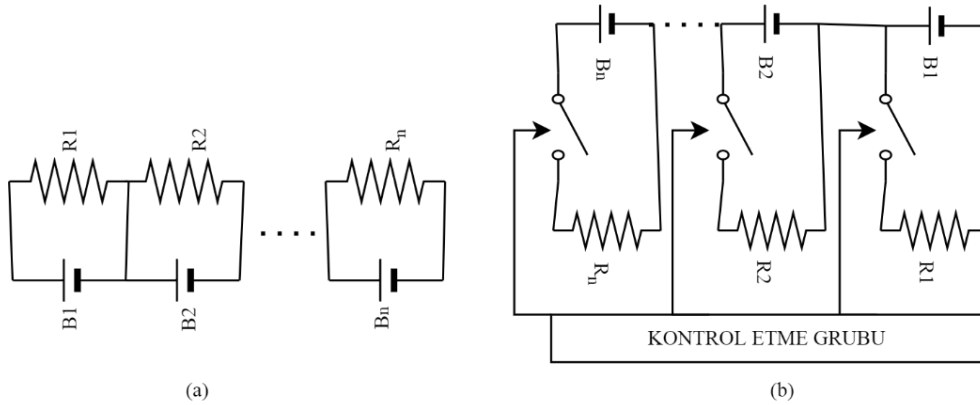


Şekil 4. Pasif Dengelemede Dengesiz Hücrelerin Dengelenmesi  
(Qi ve Dah-Chuan Lu (2014) kaynağından revize edilmiştir.)

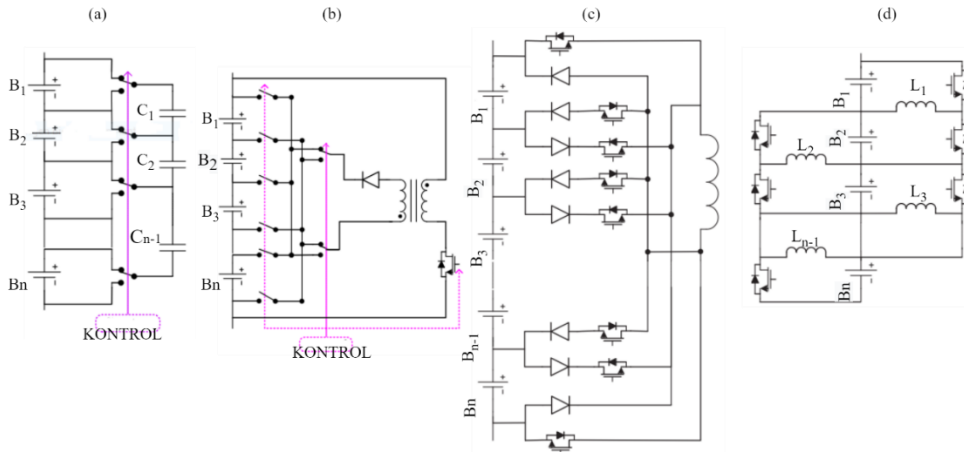
### 2.3.2. Aktif Dengeleme

Aktif dengeleme yönteminde kapasitesi yüksek olan hücre, enerjisini bir direnç üzerinden boşa harcamasının yerine, daha düşük kapasiteli hücrelere göndererek yapılır. Şarj esnasında en az bir tane hücrenin (kapasitesi en yüksek olan hücre) dolması beklenir. Dolma işlemi gerçekleştikten sonra BYS tarafından şarj işlemi durdurulur. Dolan hücrelerden kapasitesi az olan hücrelere enerji transferi yapılır. Deşarj esnasında ise kapasitesi en düşük olan hücre diğer hücrelerden daha önce biter. Aktif dengeleme sistemi, azalan kapasiteyi artırmak için kapasitesi yüksek olan diğer hücrelerden enerji transferi yapar. Bu işlemler tüm hücreler belli bir denge seviyesine ulaşana kadar devam eder. Li-ion bazlı bataryaların sıcaklığı en uygun çalışma koşullarında büyük bir hassasiyetle korunması gerektiğinden dolayı aktif dengeleme uygulanması pasif dengelemeye göre daha verimlidir. Aktif dengeleme yöntemi li-ion bataryaya paketine kullanan EA'lar için uygulanabilecek en iyi yöntemdir. Üç veya daha fazla seri bağlanan li-ion pillerin aktif dengeleme yöntemleriyle dengelenmesi daha uygundur (Cao vd., 2008). Şekil 6'da gösterildiği gibi aktif dengeleme yönteminde kapasitör, indüktör, transformator ve güç dönüştürücüleri içeren harici devreler kullanılır (Hoque vd., 2017). Şekil 3'te gösterildiği gibi aktif dengeleme yönteminde birden çok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler bazı yazarlar tarafından detaylı bir şekilde derlenmiş ve araştırılmıştır (Cao vd., 2008; Carter vd., 2020; Daowd vd., 2011; Duraisamy ve Kaliyaperumal, 2020; Gallardo-Lozano vd., 2014; Hoque vd., 2017). Yöntemler ile ilgili detaylı

bilgiler için referans olarak verilen kaynaklarda faydalanılabilir. Bu çalışmada bu yöntemlerin açıklanması ve karşılaştırmaları Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması bölümünde (2.3.3.) verilmiştir.



Şekil 5. Pasif Dengelemede Dengesiz Hücrelerin Dengelemesi



Şekil 6. Aktif Dengeleme Yöntemleri **a)** Anahtarlamalı Sığaç, **b)** Tek Sargılı Transformator, **c)** Tekli İndüktör, **d)** Düşürücü-Yükseltici Dönüştürücü (Hoque vd., 2017)

### 2.3.3. Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Derlenen çalışmalardan batarya dengeleme sistemlerinin bataryanın ömrünü artırdığı ve aynı zamanda enerji sağladığı sistemin güvenliğini artırdığı tespit edilmiştir. Ancak yine de en uygun yöntemin hangisi olduğu kesinlikle tespit edilmemiştir. Bu çalışmada yöntemler, dengeleme hızı (DH), uygulanabilirlik (U), kontrol karmaşıklığı derecesi (KKD), boyut olarak kapladığı alan (H), verimlilik (V), ve maliyet (M) faktörleri bağlamında farklı etkilere göre değerlendirilmiştir. Her bir yöntemin kullanılacak sisteme göre kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlar sahip olduğu ve bu şekilde değerlendirilmesi gerektiği kanaatine varılmıştır. Çalışmalardan derlenen yöntemler sırasıyla; #1 (Sabit şönt dirençli), #2 (Anahtarlamalı şönt dirençli), #3 (Anahtarlamalı sığaç), #4 (Tek anahtarlı sığaç), #5 (Çift katlı sığaç), #6 (Tekli indüktör), #7 (Çok katlı indüktör), #8 (Tekli sargılı transformator), #9 (Çok sargılı transformator), #10 (Çok katlı sargılı transformator), #11 (Mödüleştirilmiş çok sargılı transformator), #12 (Cuk dönüştürücü), #13 (Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü), #14 (Ramp dönüştürücü), #15 (Tam köprü dönüştürücü), #16 (Rezonant dönüştürücü), #17 (Geri dönüşlü dönüştürücü) olarak adlandırılmıştır. Tablo 1'de DH (çok yüksek: %100, yüksek: %75, orta: %50, düşük: %25), U (kolay: %100, orta: %75, zor: %50, çok zor: %25), K (çok basit: %100, basit: %75, orta: %50, karmaşık: %25), H (çok küçük: %100, küçük: %75, orta: %50, büyük: %25), V (çok iyi: %100, iyi: %80, orta: %60, düşük: %40, çok düşük: %20), M (çok ucuz: %100, ucuz: %75, orta: %50, pahalı: %25) olarak derecelendirilmiştir. Her bir faktörün derecesi belirlenmiş ve toplamda 6 faktöre bölünerek bir ortalama alınmıştır. Böylelikle ilgili faktörler bağlamında, yöntemler arasında bir kıyas yapılmıştır. Ayrıca dengeleme yönteminde kullanılan devre elemanları R (direnç), L (indüktör), C (sığaç), A (Anahtar), D (Diyot), T

(Transformatör) sayıları da Tablo 1’de verilmiştir. Tablodaki k değeri seri bağlı hücre sayısı, m değeri ise modül sayısını ifade etmektedir.

**Tablo 1. Hücre Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması**

	DH	U	KKD	H	V	M	R	L	C	A	D	T	ORT.
#1	%25	%100	%100	%100	%20	%100	k	0	0	0	0	0	%74
#2	%25	%100	%75	%100	%40	%100	k	0	0	k	0	0	%73
#3	%25	%75	%50	%50	%100	%50	0	0	k-1	2k	0	0	%58
#4	%50	%75	%25	%75	%100	%75	0	0	1	k+5	0	0	%67
#5	%50	%75	%50	%50	%100	%50	0	0	2k-3	2k	0	0	%63
#6	%75	%75	%25	%50	%80	%50	0	1	0	2k	2k	0	%59
#7	%75	%75	%25	%50	%80	%50	0	k-1	0	2k-1	0	0	%59
#8	%50	%50	%25	%50	%60	%25	0	2	0	k+6	1	1	%43
#9	%50	%50	%50	%25	%60	%25	0	k+1	0	1	k	1	%43
#10	%50	%75	%50	%25	%60	%25	0	2k	0	k	k	k	%48
#11	%50	%50	%25	%25	%80	%25	0	k+2m+1	0	m+1	m+k	m+1	%43
#12	%75	%75	%25	%50	%80	%50	0	2k-2	k-1	2k-2	0	0	%59
#13	%100	%50	%25	%50	%100	%50	0	k-1	0	2k-2	0	0	%63
#14	%50	%25	%25	%25	%60	%25	0	k/2	k	k	k	0	%35
#15	%100	%75	%25	%25	%100	%25	0	0	m	4m	0	0	%58
#16	%50	%25	%25	%25	%80	%25	0	4k-4	k-1	2k-2	0	0	%38
#17	%50	%75	%50	%25	%60	%25	0	2	1	2k+3	1	1	%48

Tablodan anlaşılacağı üzere en iyi dengeleme yöntemi tüm faktörlerden %100 derece alabilen yöntemdir. Ancak bazı limitlerden dolayı bu durum pratikte henüz pek mümkün görünmemektedir. En iyi dengeleme hızını özellikle düşük maliyet açısından karşılayabilecek olan yöntem EA’ların gelişimi açısından önemli bir katkı sunacaktır. Pasif dengeleme yöntemleri (#1, #2) maliyet, boyut, uygulanabilirlik ve kontrol yapısı bakımından iyi derece almasına rağmen, verimlilik ve dengeleme hızı bakımından zayıf kalmaktadır. Sığaç (#3, #4, #5) tabanlı sistemler verimlilik bakımından çok iyi, diğer faktörler bakımından da tatmin edici olmasına rağmen, dengeleme hızı açısından istenilen seviyeye yakalayamamaktadır. İndüktör tabanlı sistemler (#6, #7) dengeleme hızı ve verimlilik bakımından nispeten daha iyi olsa da kontrol yapıları karmaşıktır. Yüksek frekans anahtarlama ile yüksek akım durumunda filtre kapasitörler gerektirmektedir. Transformatör tabanlı sistemlerde (#8, #9, #10, #11) yüksek güç uygulamalarında, yüksek akımı, güç kaybı az olarak verimlilikle taşıyabilmesine rağmen dengeleme hızları orta seviyelerde, maliyetleri fazla, kapladığı alanın büyüklüğü, manyetizma sorunu ve kontrol karmaşıklığı bakımından dezavantajlara sahiptir. Dönüştürücü tabanlı sistemlerin (#12, #13, #14, #15, #16, #17) dengeleme hızı ve verimlilikleri çok iyi olmasına rağmen, pahalı olması, kontrol edilmesi için akıllı yöntemler gerektirdiği, kapladığı alanın fazla olması gibi olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, derlenen çalışmalar ışığında EA’larda batarya dengeleme yönteminin gerekli olduğu ve bundan dolayı dengeleme yöntemlerinin daha çok araştırılıp geliştirilmesi ve en düşük maliyetle en iyi dengeleme hızı ve verimliliği yakalayabilen sistemlerin kurulması gerektiği yazarlar tarafından önerilmektedir.

#### 2.4. Batarya Durum Kestirimleri

Bataryalar karmaşık, lineer olmayan ve zamanla değişen sistemler olduğu için anlık durumları farklılık göstermektedir. EA’larda bataryanın güvenli çalışma bölgesinde ve etkili bir şekilde çalışması için BYS tarafından anlık ve değişen zaman aralıklarında batarya durumlarının izlenmesi gerekmektedir. Bu işlemin yapılması adına, bataryanın ölçülebilen değişkenleri olan terminal gerilimi, çektiği akım ve yüzey sıcaklığı (bataryanın yüzey sıcaklığı, iç sıcaklığını temsil etmediği için hata payı mevcuttur.) değerleri ile batarya

durumlarının kestirimi yapılmaktadır. Çeşitli algoritmalar ve yöntemler geliştirilerek bataryanın şarj durumu (BŞD), bataryanın genel sağlık durumu (BGSD), bataryanın işlev durumu (BİD) ve bataryanın enerji durumu (BED) gibi batarya durumları kestirimleri yapılmaktadır. Buradaki 'kestirim' ibaresinin kullanılmasının sebebi, bahsedilen durumların doğrudan ölçülemediği dolayısıyla çeşitli değişkenlere ve algoritmalara bağlı olarak tahmin ve yaklaşımlara dayandırılmasıyla ilişkilidir. Batarya durum kestirimi yöntemleri ile ilgili literatürde bazı derleme ve araştırma çalışması yapılmıştır. Cuma ve Koroglu (2015), batarya yönetimi için durum kestirimiyle beraber, araç enerji yönetimi ve araç kontrol yönetimi ile ilgili durum kestirim yöntemlerini detaylı bir şekilde derlemişlerdir. Literatürde hibrit ve bataryalı elektrikli araçlarda kullanılan bütün kestirim yöntemlerinin detaylı bir şekilde açıklayan bir çalışmanın olmadığı ve yaptıkları çalışma ile literatürdeki bu boşluğun doldurulduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunun, bu konudaki araştırmacılara genel bir bakış açısı kazandıracaklarını belirtmişlerdir. Hu vd. (2019), batarya durum kestirimlerinden olan batarya şarj durumu, batarya enerji durumu, batarya genel sağlık durumu, batarya güç durumu, batarya sıcaklık durumu ve batarya güvenlik durumu ile kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Bütün batarya durumlarının açıklanması ve literatürde var olan yöntemleri derleyerek okuyucuya öneriler sunmuşlardır. Çalışma sonucunun, yeni nesil batarya yönetim sistemlerinin geliştirilmesi adına çalışma yapacak araştırmacılara katkı sunacağını belirtmişlerdir. Wang vd. (2020), BYS için en yaygın olarak kullanılan pil modelleme ve batarya durum kestirimlerini sistematik bir şekilde incelemişlerdir. Bunun yanında gelecek nesil batarya durum kestirimi yapacak BYS'ler ile ilgili araştırmaları ve bakış açılarını açıklamışlardır. Gelecekte çok durumlu ortak kestirim, hata teşhisi ve sağlık yönetimini içeren teknolojilerin olacağı ve büyük veri, bulut bilişim platformuna dayalı durum kestirimleri yapacak BYS türlerinin olacağını belirtmişlerdir.

#### 2.4.1. Batarya Şarj Durumu (BŞD)

EA'lar da BŞD, BYS tarafından belirlenmesi gereken önemli göstergelerden birisidir. Tanım olarak BŞD, bataryada anlık var olan kapasitenin ( $K(t)$ ), bataryanın hali hazırda sağladığı maksimum kapasitesine ( $K_m$ ) olan oranının yüzdelik olarak göstermesi olarak ifade dilmektedir. BŞD'nin matematiksel formülü Eşitlik 1'de verilmiştir. Batarya tam şarj iken, yarı şarj iken ve tam deşarj iken BŞD değerleri sırasıyla %100, %50, %0 değerlerine almaktadır.

$$BŞD(t) = \frac{K(t)}{K_m} \times \%100 \quad (1)$$

BŞD EA'lar da bataryanın kapasitesinin belirlenmesi için kullanılır. Böylelikle aracın ne kadar daha sürüş menzilinin olduğunu kullanıcıya göstermesini sağlar. Bu yönüyle bakıldığında klasik araçlardaki yakıt göstergesini ifade etmektedir. BŞD'nin bilinmesi bataryada ne kadar enerji kaldığının yanı sıra bataryanın aşırı şarj/deşarj akımına karşı da koruma sağlamaktadır. Doğru bir BŞD kestirimi bataryanın ömrünü artırmaya katkı sağlayarak hem ekonomik açıdan hem de güvenlik açısından EA'lardaki performansın artmasına doğrudan katkı sağlar. Bataryaların ve özellikle EA'larda sıkça kullanılan batarya türü olan Li-ion bataryaların karakteristiklerinin lineer olmaması, zamanla değişmesinden dolayı kestirimlerinin yapılması da zorlaşmaktadır. Özellikle EA'larda ani yüklenme durumu, rejeneratif frenleme, batarya gurubundaki hücrelerin arasındaki denge verimliliği, hücre yaşlanması, batarya sıcaklığı, bataryanın kendi kendine deşarj olma durumlarına bağlı olarak batarya karakteristiğinin sürekli değişmesinden dolayı doğru bir BŞD'nin ölçülmesi/kestirimi BYS tarafından yapılması elzemdir. BŞD, Elektrolit Ph, yoğunluk ölçümü, katodik dural akım (galvanostatik) darbeleri gibi pilin fiziksel ve kimyasal özelliklerden yola çıkarak direk olarak ölçülebilir. Ancak bu değişkenleri ölçmek için çok pahalı ve bazı limitlerden dolayı pratikte uygulanması zor olan ölçüm araçlarına ihtiyaç vardır (Rezvanizani vd., 2014). Bundan dolayı BŞD'nin doğrudan ölçülmesi henüz mümkün değildir. Ancak çeşitli sensörler vasıtasıyla bataryanın rahatlıkla ölçülebilen değişkenleri olan gerilim, akım ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak kestirim yapılması mümkündür. BŞD kestirim yöntemleri çeşitli yazarlardan tarafından farklı kategoriler altında gruplara ayrılmıştır (Messier vd., 2020; Ramadan vd., 2017; Rivera-Barrera vd., 2017; Wang vd., 2020; Xiong vd., 2013; Yang vd., 2020; Zou vd., 2015). Bu çalışmada, yöntemler kabaca 3 gruba ayrılmıştır. Bunlar geleneksel yöntemler, akıllı algoritmalar ile kestirim yöntemleri ve model tabanlı kestirim yöntemleridir.

Geleneksel yöntemlerden biri amper-sayma (AS) yöntemidir. AS yönteminde bataryanın deşarj/şarj akımını bir sensör vasıtasıyla ölçülür. Daha sonra zamana göre deşarj/şarj akımının integrali alınarak Eşitlik 2'deki gibi BŞD değeri hesaplanır (Zhe Li vd., 2017).

$$B\dot{S}D(t) = B\dot{S}D(t-1) - \int_{t-1}^t \frac{I_{pil}(t)\eta}{C_{pil}} dt, \quad t \geq 1 \quad (2)$$

Eşitlik 2’de B $\dot{S}D(t)$  anlık B $\dot{S}D$  değeri, B $\dot{S}D(t-1)$  bir önceki hesaplanan B $\dot{S}D$  değeri ( $t=1$  için başlangıç değeri),  $C_{pil}$  pil kapasitesi,  $\eta$  coulomb verimliliği (Li-ion piller için 1 değerine çok yakındır ve genellikle ihmal edilir),  $I_{pil}$  şarj/deşarj akımını (şarj için negatif,deşarj için pozitif değerini alır) ifade eder. Bu yöntem basit ve kolay uygulanabilir bir yöntem olsa da çeşitli dezavantajlar sahiptir. Doğru bir kestirim için B $\dot{S}D$  başlangıç değerinin bilinmesi gerekir. Ancak EA gibi gerçek zamanlı ve dinamik bir sistem için B $\dot{S}D$ ’nin başlangıç değerinin bulunması zordur. Ayrıca açık döngülü bir sistem olduğu için zamanla ölçüm ve gürültü hatalarının birikmesiyle kestirimin doğruluğu azalır. Bunların yanında bataryanın yaşlanması ve sıcaklık gibi etkenlerden dolayı batarya kapasitesi ve Coulomb verimliliğinin değişimiyle B $\dot{S}D$ ’nin hatalı olarak kestirilmesine sebep olmaktadır. Bazı kapsamlı kalibrasyonlarla kestirimin doğruluğu artırılabilir. Ancak her EA’ya kalibre edilmesi güç ve pratikte uygulanması çok zor bir yöntem olmaktadır (Messier vd., 2020). Sonuç olarak amper sayma yöntemi EA’larda gerçek zamanlı B $\dot{S}D$  kestirimi yapmak için doğru ve uygun sonuçlar veremeyebilecektir. Ancak Li-ion bataryaya sahip EA’lar da düşük maliyetli ölçüm sensörleri varlığının olması, kestirim yapılırken gerekli olan gücün az harcanması ve diğer tekniklerle entegre edilmesi gibi avantajlara sahip olmasından dolayı kullanılabilir (Waag vd., 2014). Başlangıç B $\dot{S}D$  değerinin hatasını azaltmak adına açık devre gerilimi yöntemi (ADG) olan diğer bir geleneksel yöntem kullanılmaktadır. ADG, bataryaya yük altında değil iken ve belli bir süre sonra kalıcı ve dengeli hal pozisyonuna geçtiğinde bataryanın terminal uçlarında ölçülen gerilim değeridir. Bu gerilim değeri ile B $\dot{S}D$  arasında lineer olmayan bir ilişki vardır. ADG yönteminde, ADG ile B $\dot{S}D$  arasında bire bir eşleşme yapılır ve bir veri tablosu oluşturulur. Dolayısıyla her bir ADG’ye karşılık bir B $\dot{S}D$  değeri vardır. Burada B $\dot{S}D$ ’nin kestirimi, her bir ADG’ye karşılık gelen B $\dot{S}D$  değeri, veri tablosundan alınarak yapılmaktadır. Bu yöntem basit ve kolay olsa da ADG’nin ölçülmesi için uzun süre beklemek gerektiğinden EA’lar gibi gerçek zamanlı sistemlerde uygulanması kullanışlı değildir. Yani bataryanın kalıcı hal durumuna gelip ADG’nin ölçülmesi için aracın en az 2 saatten fazla durması gerekmektedir (F. Yang vd., 2020). Bu durum sürüş esnasında ölçümün yapılması mümkün kılmamaktadır.

Akıllı algoritmalar ile kestirim yönteminde genellikle bulanık mantık (BM), destek vektör makineleri (DVM), sinir ağları (SA), genetik algoritmalar (GA) vb. yöntemler kullanılarak B $\dot{S}D$  kestirimi yapılır. Bu yöntemler aynı zamanda makine öğrenmesi yöntemleri olarak da adlandırılır. Akıllı algoritmalar, pili bir kara kutu (black-box) gibi kabul eder ve çok sayıda örnekleme olarak giriş-çıkış arasındaki lineer olmayan bağıntıyla pilin iç dinamiklerini makine öğrenmesi ile modelleyip B $\dot{S}D$  kestirimi yapmaktadır. Bu algoritmalar eğitilen veri setinin miktarına ve kalitesine bağlı olduğu için, sınırlı bir eğitim setinin olması B $\dot{S}D$  kestirimin dayanıklılığını ve doğruluğunu olumsuz yönde etki edebilmektedir. Eğitim setinin, miktarının fazla ve kalitesinin yüksek olması için uzun bu zaman gerekmektedir. Aynı zamanda fazla ve kaliteli bir eğitim seti verisi için dijital sinyal işleme yonga sayısının fazla olması gerekmektedir. Bu durum maliyete doğrudan etki eder. Sonuç olarak EA’lar gibi gerçek zamanlı uygulamalar için maliyet ve uzun zaman problemi istenmeyen bir durum olduğu için akıllı algoritmaları kullanarak B $\dot{S}D$  kestirimi yapmak zahmetli ve maliyetli bir yöntemdir.

Model tabanlı kestirim yöntemleri, bataryanın modellenip uyarlamalı yöntemler kullanılarak kapalı çevrim sistem ile kendi kendini regüle etmesiyle hata oranlarını düşürüp bir B $\dot{S}D$  kestirimi yapılması ile gerçekleştirilir. Bataryanın dinamik karakteristiklerini modellemek için elektriksel eş değer devresi (EED) ile elektrokimyasal mekanizma (EKM) modelleri kullanılır. Model tabanlı yöntemle B $\dot{S}D$  kestirimi yapmak için gözlemleyici ve düzenleyici yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar kalman filtreleri (KF), H sonsuzluk ( $H\infty$ ), yinelenen en küçük kareler yöntemi (RLS), kayan kipli gözlemleyici (SMO), orantısal integral gözlemleyici (PIO), parçacık filtresi (PF) vb. yöntemleridir. RLS yöntemi bataryanın modelinden ölçülen değer ile gerçek ölçülen değerinin arasındaki ortalama kare hatasını azaltan bir filtreleme yöntemidir. RLS unutma faktörünü kullanarak, bataryanın dinamik modelindeki parametreleri ayarlayıp B $\dot{S}D$  kestirimi yapmaktadır.  $H\infty$  pilin zamanla değişen parametrelerini (sıcaklık, akım, gerilim, iç direnç) dikkate alır ve sistemin herhangi bir özelliğinin bilinmesine ihtiyaç duymaz. Bunun yanında ölçüm gürültülerinden de etkilenmez. Sade ve etkili bir yöntemdir ancak batarya yaşlanması, şarj/deşarj histerезisi, batarya sıcaklığı gibi etkenler SOC doğruluğunu etkileyebilmektedir. PF algoritması bir dizi parçacık ve Gaussian olmayan bir dağılım grubuna Monte Carlo simülasyon tekniğinin uygulanarak doğrusal olmayan batarya sisteminin olasılık yoğunluk fonksiyonuna yaklaşım işlemiyle B $\dot{S}D$  kestirimi yapar (Hannan vd., 2017). SMO yönteminde batarya



parametrelerinin değişmesine karşın, sistemin dayanıklılık, kontrol ve kararlılığı korunmaktadır. BŞD kestirimi için batarya modelinin durum denklemleri elde edilir. Elde edilen durum denklemleri, gözlemci tasarlamak için kullanılır. Ancak bu yöntemde bataryanın en uygun parametrelerinin bulunması oldukça zordur (Xia vd., 2014). PIO yöntemi, bataryanın bilinmeyen giriş gürültülerine karşın sistemin durumunu kestirmek için kullanılan bir yöntemdir. Kalman filtresi tabanlı uygulamalarda batarya grubundaki her bir hücrenin dinamik bir sistem olarak kabul edilmesiyle işlem yapılır. Bu dinamik sistemin girişi akım ve sıcaklık, çıkışı ise gerilim olarak kabul edilerek bir BŞD kestirimi yapılmaktadır (Rivera-Barrera vd., 2017). Lineer Kalman filtresi (LKF) lineer sistemler için rahatlıkla uygulanabilir. Ancak EA'lardaki batarya sisteminin lineer olmaması ve zamanlı değişmesinden dolayı LKF uygulamak verimsiz olmaktadır. Bu yüzden Jacobian matrislerinin kullanılıp lineer olmayan parametreler birinci dereceden Taylor serileri açılmasıyla genişletilmiş kalman filtresi (GFK) olarak adlandırılan yöntemle sistemin lineerleştirilip BŞD kestirimi yapılması sağlatılır. Bir başka KF ailesinden, doğrusallaştırma işlemine gerek kalmadan kokusuz kalman filtresi (KKF) olarak adlandırılan yöntemle BŞD kestirimi yapılmaktadır. Tablo 2'de BŞD kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmış ve ilgili alanda yapılan çalışmalar verilmiştir. Yöntemler ile ilgili detaylı bilgiler için Tablo 2'de verilen yapılan çalışmalardan faydalanılabilir.

#### 2.4.2. Batarya Enerji Durumu (BED)

BED göstergesi, BŞD gibi bataryanın ömrü, performansı ve aracın gidebileceği yol hakkında temel bilgileri ifade etmektedir. BŞD bu durumu, kalan kapasite değerini amper-saat (Ah) cinsinden gösterirken, BED mevcut enerjiyi Watt-saat (Wh) cinsinden gösterir. Bataryanın temel görevi, enerji depolamak ve ihtiyaç durumunda kullanmaktır. EA'ların sürüş performansını gerçekleştirmesi, bataryasındaki enerji miktarına bağlıdır. Bundan dolayı BŞD kapasite kestirimi yerine, BED enerji kestirimi yapmak daha pratik ve doğru sonuçlar verecektir. Bu durum şöyle özetlenebilir; BŞD şarj/deşarj akımıyla doğrusal bir şekilde değişirken, BED gerilim değerini de hesaba kattığı için doğrusal olmayan bir şekilde değişir. Bataryadeşarj süresince enerji harcamaktadır. Bu enerji, bataryanın çıkışındaki yük üzerinde harcanmasıyla, bataryanın iç direnci üzerinde ısıya dönüşmesiyle ve elektrokimyasal işlemler için harcanan enerji miktarı gibi etkenlerle harcanır. İç direnç üzerindeki enerji kayıpları, bataryadaki elektrokimyasal değişimler, ADG'deki düşüşler BŞD kestiriminde hesaba katılmaz. Sadece yük üzerinden harcanan enerji değeri BŞD değerine etki etmektedir. Ancak diğer enerji kayıpları bataryanın kapasitesi değişiminden göz ardı edilmektedir. Oysaki tüm bu etkiler bataryanın enerjisine yani gerilimin ve zamana göre akım değerlerinin çarpılıp daha sonra toplanmasına bağlıdır. Bundan dolayı aracın gidebileceği yol aralığını tespit etmek için BED kestirimi yapmak daha anlamlı, daha güvenli ve daha doğru sonuçlar vermektedir (Zonghai Chen vd., 2019; Ye vd., 2018). Literatürde ilk BED tanımı ve kullanımı Mamadou vd. (2012) tarafından önerilmiştir. Çalışmalarında BED'yi bir enerji depolama aracının enerjik modellemesi için referans bir ölçü birimi olarak ele almışlardır. Bu tanıma göre mevcut enerjinin yani enerji durumunun, batarya en düşük voltaj değerine kadardeşarj olduğunda o andaki var olan enerjinin hali olarak tanımlamışlardır. Bu tanımın, bataryadan alınabilecek enerjiye doğrudan erişim sağlandığını belirtmişlerdir. Bir başka tanıma göre BED, bataryadaki mevcut enerjinin, bataryanın toplam enerjisine olan oranı yüzdelik bir şekilde göstererek bataryanın var olan kullanılabilir enerjisini ifade etmektedir. BED'nin matematiksel olarak gösterimi Eşitlik 3'te verilmiştir (Guenther vd., 2013).

$$BED(t) = BED(t-1) + \int_{t-1}^t \frac{P_{pil}(t)\eta_e}{E_{pil}} dt, \quad t \geq 1 \quad (3)$$

Burada BED(t) anlık BED değeri, BŞD(t-1) bir önceki ölçülen BED değeri (t=1 için başlangıç değeri), Epil pilin nominal enerji miktarı, η\_epilin enerji verimliliği, Ppil pilin t anındaki güç değerini ifade etmektedir. BED değeri batarya tam şarj olduğunda %100, tamdeşarj olduğunda %0 değerini gösterir. BŞD'de olduğu gibi BED değeri de direkt olarak ölçülemez. Bu yüzden çeşitli kestirim yöntemleri geliştirilmiştir. Kestirim işleminde bataryanın gerçek zamanlı geriliminin, akımının, iç direncinin ve sıcaklığının bilinmesi gerekmektedir. EA'larda kullanılan özellikle Li-ion bataryalarda mevcut enerji, düşük sıcaklıklarda önemli ölçüde azalır. Yüksekdeşarj akımlarında batarya kesme voltajı altına geçince kapasitesi azalmasına karşın pilde enerji hala vardır. Ancak bu durumda, pil enerjisinin olmadığı sezilmekte ve pilin boş, tamamen işlevsiz hale geldiğini kabul edilmektedir. Bu özellik, BED'nin kestirimini zorlaştırmaktadır. Bu yüzden BED kestirimi BŞD'ye göre oldukça zor ve karmaşıktır. BED kestiriminde kullanılan yöntemler BŞD kestiriminde kullanılan yöntemlerle benzerlik gösterir. Direk ölçüm yöntemleri, model tabanlı-uyarlanabilir yöntemler (Zonghai Chen

vd., 2019; Guenther vd., 2013; He vd., 2015; Lin vd., 2017; Mamadou vd., 2012; Y. Wang vd., 2016), akıllı algoritmalar (Dong vd., 2015), makine öğrenimi (Liu vd., 2014) gibi yöntemler BŞD'deki yöntemler gibi kullanılır. Direk yöntemler kolay ve basit bir şekilde uygulanır. Ancak bataryanın yaşlanmasıyla değişen parametrelere karşı hassas, başlangıç için sistemin kalibrasyon gerektirdiği ve açık çevrim sistemler oldukları için bazı dezavantajlara sahiptir. Model tabanlı-uyarlanabilir yöntemler, kendi kendine hatayı minimize etmesi, uzun süreli güvenli çalışma, gürültülere karşı dayanıklı olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak bu yöntemler de karmaşık matematiksel işlemler gerektirdiği için uygulanması oldukça zahmetlidir. Akıllı algoritma-makine öğrenmesi gibi yöntemler uygulama bakımından oldukça esnekler ve batarya gibi doğrusal olmayan sistemlerde BED kestirimi yapmak için oldukça kullanışlıdır. Bu yöntemlerin dezavantajı ise eğitilen veri seti sayısının çok fazla olması olarak gösterilebilir. Bu durum hafıza alanı gerektirdiği ve işlemci sayısını artırdığından dolayı maliyete doğrudan etki etmektedir. BŞD'den farklı olarak geleneksel yöntem olarak güç integrali yaklaşımı (Barai vd., 2016) ile karakteristik eşleşme yöntemleri (Mamadou vd., 2012) kullanılmaktadır. Güç integrali yaklaşımı açık döngülü bir sistem olduğu için, çevresel gürültülerden, sensör ölçüm gürültülerinden vb. etkenlere bağlı hassasiyeti zamanla bozulmaktadır ve uygun sonuçlar vermemektedir. İyileştirilmiş bir çözüm olarak, deşarj gücü, kalan enerji ve BED arasındaki ilişkiyi ele alan karakteristik eşleştirme yaklaşımı kullanılmaktadır. Ancak bu eşleşme yöntemi, güç integrali yöntemine göre daha verimli olmasına rağmen pahalı ve zaman alan kalibrasyon testlerine ihtiyaç duymaktadır (Hu vd., 2019).

### 2.4.3. Batarya Genel Sağlık Durumu (BGSD)

EA'larda batarya grubundaki hücreler zamanla ve kullanıma bağlı olarak elektrokimyasal yapıları bozulur. Bu durum batarya kapasitesinin ve bataryanın gücünün azalmasına doğrudan etki etmektedir. Bataryanın belli bir kullanım ömrü bulunmaktadır. Bataryanın artık kullanıma elverişsiz olduğu ve istenilen gücü sağlayamadığı zaman yaşam süresinin sona erdiği anlamına gelmektedir. Bataryanın artık kullanılmayacağı bilgisi sistem ve sürüş güvenliği açısından önemlidir. Bu yüzden bataryanın anlık genel sağlık durumu kullanıcıya bildirilmelidir. Böylelikle bataryanın değiştirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. EA sistemi için ömrünü tamamlayan batarya sistemi değiştirilmezse araç ve sürücü/yolcu açısından güvenlik problemleri ortaya çıkacaktır. Öyle ki, Nisan 2019 yılında Tesla S model EA'sı yer altı otoparkında aniden alevlenmiştir. Daha sonra yapılan incelemeler de sorunun batarya yaşlanması ile ilgili olduğu anlaşılmıştı (Tian vd., 2020). Böyle durumların yaşanmaması ve erken önlem almak için BGSD göstergesi kullanılmaktadır. BGSD bataryanın bozulma derecesini ve anlık performansı hakkında bilgileri sunmaktadır. BGSD batarya kullanımı açısından çok önemli bir parametre olsa da tanımı ve belirlenmesi hakkında kesin bir fikir birliği bulunmamaktadır. Genel olarak bataryanın anlık durumunun (halihazırda maksimum kapasitesi), bataryanın ilk servise çıktığı başlangıç koşullarına bağlı durumuna (nominal kapasite değeri) göre yüzdelik olarak ifade edilmesiyle tanımlanır. Bataryanın ilk fabrika çıkışı hali %100 BGSD oranı olarak verilmektedir. Zamanlı kapasitesinin azalması, iç direncinin artmasıyla tamamen işlevsiz hale geldiğinde BGSD %0 değerine yaklaşmaktadır. EA gibi batarya grubuna sahip olan sistemlerde var olan mevcut batarya enerjisi önemli olduğundan dolayı BSGD hesaplanmasında kullanılan parametre batarya kapasitesi değeridir. Batarya gücünün önemli olduğu HEA sistemleri için BGSD hesaplanmasından kullanılan parametre batarya iç direnç değeridir. Eşitlik 4 ile Eşitlik 5'te sırasıyla kapasite ve iç dirence bağlı BGSD'nin matematiksel formülleri verilmiştir (Park vd., 2020).

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= \int_0^T I(t) dt \\ BGSD_K[\%] &= \frac{Q_a}{Q_n} \times \%100 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$BGSD_{ID} = \left| \frac{R_{ba\_id} - R_{yb\_id}}{R_{nb\_id} - R_{yb\_id}} \right| \times 100 \quad (5)$$

Eşitlik 4'te BGSDK kapasiteye bağlı hesaplanan BGSD yüzdelik değeridir.  $Q_a$  ile  $Q_n$  sırasıyla anlık ve nominal kapasite değerlerini ifade etmektedir. Eşitlik 5'te ise BGSD<sub>ID</sub> iç dirence bağlı hesaplanan BGSD değeridir.  $R_{ba\_id}$ ,  $R_{nb\_id}$ ,  $R_{yb\_id}$  değişkenleri sırasıyla batarya anlık iç direncini, batarya nominal iç direncini ve yaşlanmış bataryanın iç direncini temsil etmektedir.

Tablo 2. BŞD Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar

Metot	Tür	Avantaj	Dezavantaj	Yapılan Çalışmalar
Geleneksel Yöntem	AS	●Basit ●Kolay ●Ucuz	●Açık çevrim ●Başlangıç BŞD bilinmeli ●Akım sensör hassasiyeti önemli	(Ng vd., 2009; Qaisar, 2020; Zhang vd., 2020a, 2020b)
	ADG	●Basit ●Kolay ●Ucuz	●Açık çevrim ve çevrim dışı kestirim ●Bekleme süresi uzun ●Gerilim sensör hassasiyeti önemli	(He vd., 2012; Pan vd., 2017; Wang vd., 2018; Xing vd., 2014; Xiong, Yu, ve Wang, 2017; Zhang vd., 2020; Zheng vd., 2016)
Akıllı Algoritmalar	BM	●Lineer olmayan sistemlerde kullanışlıdır. ●Sıcaklık, yaşlanma, akım değişimlerine karşı dayanıklı.	●Hesaplama karmaşık ●Pahalı veri işleme yongası gerekli ●Veri depolama maliyetli	(Chau vd., 2004; Hametner ve Jakubek, 2013; Hu vd., 2020; Salkind vd., 1999; Singh vd., 2004, 2006; Zenati vd., 2010)
	DVM	●Lineer olmayan ve yüksek boyutlardaki modeller için uygun. ●Doğru eğitilmiş veri seti ile hızlı bir BŞD kestirimi.	●Parametreler için uzun deneme yanılma süreci gereklidir. ●Hesaplama karmaşık	(Alvarez Anton vd., 2013; Álvarez Antón vd., 2013; Hansen ve Wang, 2005; Hu vd., 2014; Sheng ve Xiao, 2015)
	SA	●Bataryanın lineer olmayan durumlarına karşı dayanıklı	●Yüksek hafıza alanı gerektirir. ●Eğitilen veri seti fazla olmalıdır.	(Chemali vd., 2018; Eddahech vd., 2012; He vd., 2014; Jiménez-Bermejo vd., 2018; Zhou vd., 2013)
	GA	●Yüksek doğrulukla çalışır. ●Gürültülere karşı dayanıklıdır.	●Hesaplama karmaşık. ●Doğru sonuç için parametrelerin ayarlanması hassas.	(Chen vd., 2018; Lu vd., 2018; Shen, 2010, 2018a, 2018b; Ting vd., 2014)
Model Tabanlı	LKF	●Çevrim içi ve gerçek zamanlı çalışma. ●Gürültülere karşı dayanıklıdır. ●Başlangıç koşullara ihtiyaç duymaz.	●Lineer olmayan sistem için verimsizdir. ●Karmaşık matematiksel işlem gerektirir. ●Model ve ölçümün doğruluğu hassas olmalıdır.	(Campestrini vd., 2016; Choudhury vd., 2009; Dong vd., 2016; Yanwen Li vd., 2016; Mastali vd., 2013; Shrivastava vd., 2019; Urbain vd., 2007; Wei vd., 2017; Yatsui ve Bai, 2011; Yu vd., 2015)
	GKF	●Lineer olmayan parametreler karşın hassas bir şekilde kestirme işlemi yapar ●Başlangıç koşullara ihtiyaç duymaz.	●Doğrusallaştırma hatasının az olması gereklidir. ●Dayanıklılığı sınırlıdır. ●Jakobian matrisi gereklidir.	(Zheng Chen vd., 2013; Fang vd., 2018; Jiang vd., 2013; Plett, 2004; Ramadan vd., 2017; Shen, 2018c; Zhi vd., 2017)
	KKF	●Derecesi yüksek lineer olmayan sistemlere için uygun. ●Jakobian matrisine ihtiyaç duymaz.	●Modellin doğruluğuna ve bozucu etkilere karşı hassas.	(Zewang Chen vd., 2019; He vd., 2016; He vd., 2013; Sun vd., 2011; Tian vd., 2014; Zhu vd., 2020)
	$H^\infty$	●Doğruluk, maliyet, zaman bakımından tatmin edicidir.	●Bataryanın sıcaklığı, yaşlanması ve histeresizi gibi değişen etkilere karşı hassastır.	(Lin vd., 2016; Xia vd., 2018; Xiong, Yu, Wang, vd., 2017; Zhao vd., 2018; Zhu vd., 2017)
	RLS	●Doğruluğu yüksektir ●Ölçülen gerilimdeki gürültüleri yok eder.	●Yüksek hesaplama işlemi gerektirir. ●Kararlı olması unutma faktörünün doğruluğuna ve bataryanın modeline bağlıdır.	(Duong vd., 2015; Hu Xiaosong vd., 2011; Yigang Li vd., 2020; Yue Li vd., 2016; Xia vd., 2017)
	SMO	●Çevrim içi ve kapalı çevrim ●Yüksek izleme kabiliyeti ve kararlı olması	●Kayma sistemini kontrol etmek için anahtarlar kazancını ayarlamak zordur.	(Chen vd., 2012; Xiaopeng Chen vd., 2014a, 2014b; Du vd., 2016; Kim, 2006; Ma vd., 2016)
	PIO	●Az hesaplama yükü ile doğru kestirim sağlar ●Sensör gürültülerine karşı dayanıklıdır	●Doğru kestirim için uygun kontrolör parametreleri seçilmesi zor ve gereklidir.	(Amir vd., 2018; Jun Xu vd., 2014; Meng vd., 2018; Wei vd., 2017; Yang vd., 2020)
	PF	●Az hesaplama yükü ile doğru kestirim sağlar.	●Karmaşık matematiksel işlemler gerektirir.	(Amir vd., 2018; Gao vd., 2011; Meng vd., 2018; Qiu vd., 2020; Yang vd., 2020)

EA'lardaki batarya kapasitesi/enerjisi %20 oranında azalınca (BGSD değeri %80 ve altına düşünce) ya da iç direnç değeri iki katına çıktığında (BGSD %100) bataryanın değiştirilmesi gerekmektedir (Yi Li vd., 2019). Ayrıca batarya BGSD'si %0 değerine yaklaşınca tamamen kullanılmayacağı anlamına gelmemelidir. Bu sadece kullanıldığı sistem için bir göstergedir. Öyleki EA'lar için yukarıda bahsedilen sınır değerlerinde bataryanın değiştirilmesi gerekliliği, EA'nın dinamik yol koşulları için artık yeterli gücü sağlamayacağından kaynaklanır. Oysaki sistemden çıkartılan bu bataryalar başka sistemler için hala kullanılabilir seviyede olabilir. Bu bataryalar küçük ölçekli rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi vb. sistemlerde enerji depolama kaynağı olarak kullanılabilir.

BGSD diğer batarya durumlarına göre varlığını en yavaş gösteren durumdur. İç direnç artması ve kapasite azalmasını etkileyen parametre değişimleri uzun süreçlere dayanır. Bunların yanında sıcaklık, şarj/deşarj oranı/çevrimi ve bataryanın yaşlanması BGSD'ye etki etmektedir. Bundan dolayı yaşlanmaya ve dolayısıyla kapasite azalmasına bağlı BGSD'yi belirlemek için uzun zaman gerekmektedir. Her ne kadar laboratuvar koşullarında hızlı bir şekilde testler yapıp doğru sonuçlar elde edilirse de EA'lar da zorlu ve dinamik yol koşullarında laboratuvardaki gibi donanımlı bir sistem olmadığından BGSD kestirimi yapmak oldukça zorlaşmaktadır (Xiong vd., 2018). Dahası diğer batarya durumları gibi BGSD de direkt olarak ölçülemez. Ancak batarya iç direnci ve kapasite gibi BGSD göstergelerini belirleyen çeşitli yöntemler ile kestirimi yapılmaktadır. Bu yüzden literatürde değişik kestirim yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler Tablo 3'te verildiği gibi çeşitli yazarlar tarafından farklı kategoriler altında ele alınmıştır. Tian vd. (2020), Yi Li vd. (2019), Xiong vd. (2018), Berecibar vd. (2016), Lipu vd. (2018) BGSD tanımı, matematiksel ifadesi, kategorileri, yöntemleri, analizleri, kestirim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelemişlerdir.

Tabloda verilen literatür çalışmalarında bu yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Her bir ana kategorinin altında farklı yöntemler çeşitli dallara ayrıştırılmıştır. Her yöntem kullanıldığı sistemde ve amacına göre çeşitli avantajlar-dezavantajlara sahiptir. Derlenen çalışmalardan BGSD kestirim yöntemleri; direkt ölçüm yöntemleri, dolaylı ölçüm yöntemleri, uyarlamalı filtre tabanlı yöntemler ve veri-güdümlü yöntemler olarak 4 ana kategori altında değerlendirilebilir.

Direkt ölçüm yöntemleri, iç direnç, kapasite/enerji, empedans ölçümleri direkt olarak yapılmaktadır. En basit ve uygulanabilir yöntemdir. Hesaplama yükü azdır. Ancak doğru sonuçlar almak için ölçüm yapan cihazların çok hassas olması gereklidir. Öyle ki bazı parametrelerin ölçümü mevcut ölçüm cihazlarıyla ölçmek pek mümkün değildir. Bu yöntemlerin bazıları laboratuvar koşullarına ihtiyaç duyduğu için EA'lar için uygulanması uygun değildir. Ayrıca bu yöntemler de başlangıç koşullarına ihtiyaç duyulduğu için dezavantaja sahiptir.

Dolaylı ölçüm yönteminde ise kapasite ve iç direnç dolaylı yoldan ölçülmektedir. Bataryanın yaşlanmasıyla beraber bazı parametreler bataryanın kapasite ve iç direncine etki etmektedir. Bu etkilerin ölçülmesiyle dolaylı yoldan BGSD kestirimi yapılmaktadır. Bu etkiler katı elektrolit ara faz ince tabaka direnci, ADG-BŞD eşleşmesi, sabit gerilim altında şarj süresi, artan kapasite eğrisi (AKE), gerilim diferansiyeli eğrisi (GDE), ultrasonik dalga cevabı (UDC) vb. işlemlerle sonucu ortaya çıkmaktadır (Xiong, 2020). Dolaylı yöntemlerin uygulanması görece olarak kolaydır. Yüksek doğrulukla çalışmaktadır. Ancak bazı yöntemleri sıcaklık gibi değişen çevresel etkenlere karşı oldukça hassastır. Her ne kadar AKE, GDE ve UDC gibi yöntemlerle gerçek zamanlı sistemleri için uygun olsa da EA'lar gibi dinamik yol koşullarına sahip çevrim içi gerçek zamanlı sistemler için uygulanması zordur.

Uyarlamalı filtreleme yöntemleri, elektrokimyasal modeller ile elektrik eş değer devre modelleri ile rahatlıkla uygulanmaktadır. Uyarlamalı ve kapalı çevrim sistemler olduğu için doğruluk oranları yüksektir. Batarya iç parametrelerinin bulunması kolaydır. EA'lar gibi farklı kimyasal yapıya sahip bataryaların kullanıldığı çevrim içi sistemlere uygulamak için elverişlidir. Modellenen sistemin hassasiyeti, az ve doğruluğu iyi değilse yanıltıcı sonuçlar verecektir. Ayrıca ağır hesaplama yüküne sahip oldukları için yüksek performanslı denetleyicilere ihtiyaç duymaktadır. Bu durum maliyet açısından istenmeyen bir durumdur.

Veri-güdümlü yöntemler, makine öğrenmesine dayalı, optimizasyon algoritmalarına dayalı, gözleme dayalı vb. yöntemler içermektedir. Bu yöntemlerin avantajı bataryanın var olan ve değişen parametrelerin bilgisine

ihtiyaç duymamasıdır. Akıllı algoritmalara sahip oldukları için oldukça esnek ve kullanışlıdır. Yüksek doğrulukla kestirim yapmaktadır. Ancak doğru sonuçlar vermesi için eğitilen veri setinin yüksek miktar ve kalitede olması gereklidir. Genellikle diğer yöntemlerle beraber çalışma ihtiyacı duyar. Bu da işlem yükünü arttırmaktadır.

**Tablo 3. Literatürde Yapılan Çalışmalardan Derlenen BGSD Kestirim Yöntemlerinin Kategorileri**

Literatür çalışması	Kategori sayısı	BGSD kestirim yöntemleri
Wang vd. (2020)	4	Ölçüm&analiz yaklaşımı, Bayes tabanlı, gözleme tabanlı yaklaşım, Makine öğrenimi tabanlı
Park vd. (2020)	3	DeneySEL yöntemler, model tabanlı yöntemler, veri güdümlü yöntemler
Hu vd. (2019)	4	Fiziksel tabanlı modeller, deneySEL tabanlı modeller, veri güdümlü yöntemler, Artan kapasite analizi yöntemleri
Xiong vd. (2018)	2	DeneySEL yöntemler, model tabanlı yöntemler
Yang vd. (2018)	4	Direk ölçüm yöntemleri, uyarlamalı kestirim yöntemleri, model bozulması tabanlı, istatiksEL yöntemler.
Ungurean vd. (2017)	4	Coulomb sayma yöntemi, ADG yöntemi, empedans spektrumu yöntemi, Kalman filtreleri yöntemi.
Xu Zhang vd. (2018)	3	Batarya kapasitesi tabanlı, batarya empedansı tabanlı, batarya şarj/deşarj eğrileri tabanlı
Yang vd. (2017)	2	Olasılık tabanlı yöntemler, istatistik tabanlı yöntemler
Barré vd. (2013)	4	Elektrokimyasal model tabanlı, Eşdeğer devre modeli tabanlı, performans tabanlı yöntem, gözleme tabanlı., istatiksEL yöntemler
Berecibar vd. (2016)	2	DeneySEL tabanlı yöntemler, uyarlamalı kestirim tabanlı yöntemler
Lipu vd. (2018)	4	Direk ölçüm yöntemleri, uyarlamalı kestirim yöntemleri, veri güdümlü yöntemi, diğer yöntemler (hibrit)
Qian vd. (2019)	6	Kapasite tabanlı, DC direnç tab., özel alan empedansı tabanlı, AC empedans tabanlı, artan kapasite (dV/dQ) tabanlı, voltaj diferansiyeli tabanlı (dQ/dV)
Lu vd. (2013)	2	Dayanıklı model tabanlı açık çevrim yöntemleri, batarya modelleri tabanlı kapalı çevrim yöntemler

#### 2.4.4. Batarya İşlev Durumu (BİD)

Yukarıda bahsedildiği üzere BŞD ve BED bataryanın doluluk oranını, BGSD bataryanın ilk servise çıktığı andaki durumuna göre sağlık durumunu ifade etmektedir. BİD değeri ise bataryanın BŞD, BED, BGSD, sıcaklık değeri ve şarj/deşarj oranına göre enerji verdiği sistemin ihtiyaç duyduğu anlık gücü, sağlayıp sağlamadığını gösteren bir batarya durum göstergesidir. Bunun yanında bataryanın en uygun çalışma aralığı zamanla değişebilir. BİD zamanla değişen bataryanın en uygun çalışma aralığında sistemin istediği gücü sağlayıp sağlamadığını kontrol etmek için de kullanılır. Bu bağlamda düşünüldüğünde mantıksal çerçevede aldığı ikili sayma (1/0) değerine göre çalışmaktadır. Eğer BİD=1 ise sistemin yapmak istediği görev için istenilen güç batarya tarafından sağlatılır; eğer BİD=0 ise yapılmak istenen görev için istenilen güç batarya tarafında sağlatılamayacağı anlamına gelmektedir. BİD ilk tanımı Meissner ve Richter (2003) tarafından açıklanmıştır. Çalışmalarında bataryanın belli görevi yerine getirebilme durumunu ifade etmek için BİD göstergesini BŞD ve BGSD'yi baz alarak kullanmışlardır. Aslında bataryanın güç kabiliyetini gösteren iki

gösterge vardır. BİD'in dışında, BGD (batarya güç durumu) göstergesi de kullanılmaktadır (Juang vd., 2012). Bazı yazarlar BİD durumunun ifade ederken ve bulurken BGD durumu cinsinden faydalanmıştır (Dong vd., 2016; Juang vd., 2012). BGD maksimum gücün, nominal güce olan oranın yüzdesel olarak ifade edilmesidir. BGD tanımı kullanılarak BİD'in matematiksel gösterimi Eşitlik 6'daki gibi gösterilebilir (Lu vd., 2013; Park vd., 2020).

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= P_{max} \\ BİD(t) &= \frac{P(t) - P(t)_{talep}}{P_{talep_{max}}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da BİD(t) anlık BİD değerini ifade etmektedir.  $P(t)$ ,  $P(t)_{talep}$ ,  $P_{max}$  sırasıyla bataryanın anlık sağlayabildiği güç, sistem tarafından talep edilen güç, bataryanın maksimum sağlayabildiği güç (BŞD=%100, BGSD=%100, T nominal sabit sıcaklık değeri durumunda iken) değerleridir. Bu formül bataryadaki enerjinin yeterli gücü sağlayıp sağlamadığı sistemler için batarya işlevinin durum göstergesidir. EA sistemlerinde gidilebilecek yol için elektriksel enerjinin yeterli olup olmadığı önemlidir. Bu durumu ifade etmek için BİD değeri yukarıda da bahsedildiği ikili sayma sistemi mantığına göre formülize edilebilir (Hou vd., 2017). Bu durumu ifade etmek için Eşitlik 7-9 arasındaki formüller kullanılmaktadır.

$$Var\ olan\ güç = BŞD \times BGSD \times nominal\ kapasite \quad (7)$$

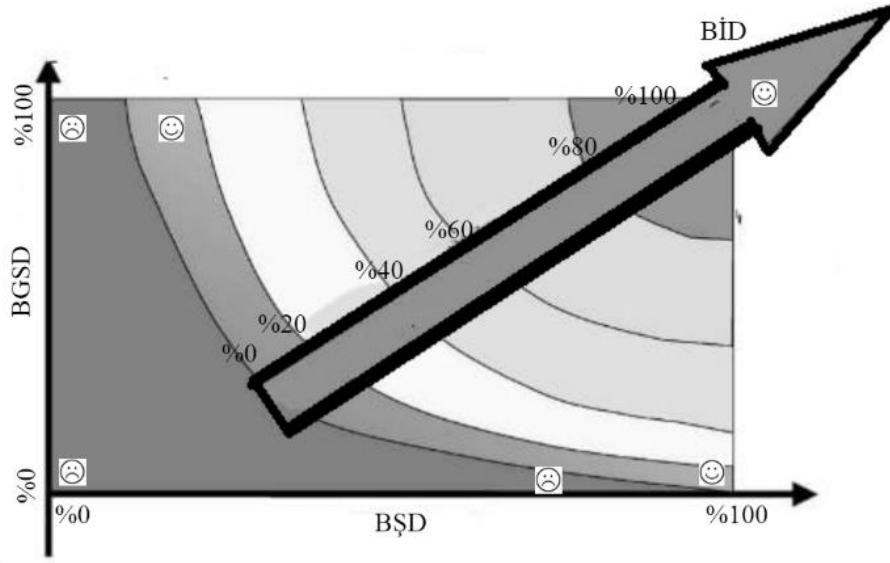
$$Harcanacak\ güç = ortalama\ güç\ tüketimi \times gidilecek\ mesafe \quad (8)$$

$$BİD = \begin{cases} 1, & Eşitlik\ 7 \geq Eşitlik\ 8 \\ 0, & Eşitlik\ 7 < Eşitlik\ 8 \end{cases} \quad (9)$$

Eşitlik 9'da da anlaşıldığı üzere batarya, sistem (motor gücü, klima, aydınlatma vb. elektriksel güç harcayan sistemler) tarafından istenilen gücü sağladığı takdirde, BİD=1 olmaktadır ve sistem aracın kontağını çalıştırabilmektedir. Eğer BİD=0 ise kontak çalıştırılmaz ve sürücüyü uyarı yapılır. Bir başka tanıma göre BİD, belirli bir kapasitedeki maksimum gücün şarj/deşarjı sırasında sağladığı maksimum anlık güç değerini ifade etmektedir. Dolayısıyla BİD kestirimi BGD kullanılarak bulunabileceği belirtilmiştir (Yi Li vd., 2019). Bunun için Eşitlik 6 yerine Eşitlik 10 kullanılabilir.  $P_{maks\_anlık}$  ve  $P_{maks}$  sırasıyla bataryanın maksimum anlık güç değerini ve belirli bir kapasiteye sahip bataryanın maksimum güç değerini ifade etmektedir.

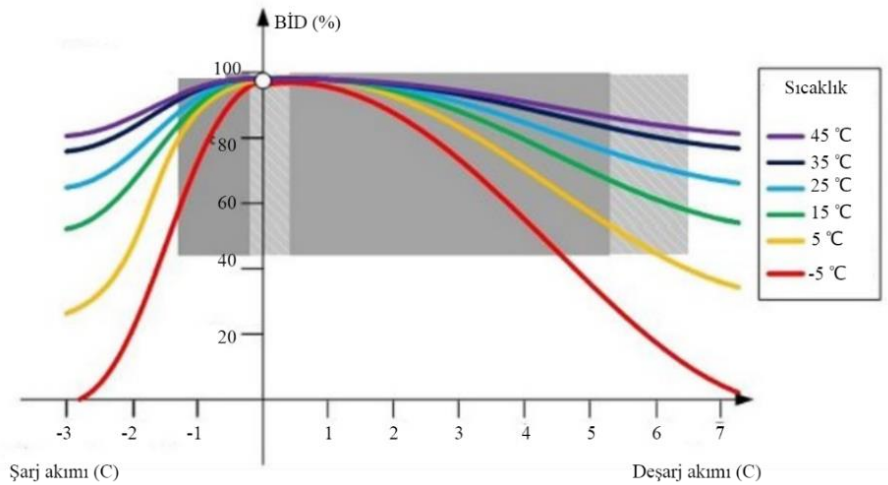
$$BİD = \frac{P_{maks\_anlık}}{P_{maks}} \times 100 \quad (10)$$

Yukardaki eşitliklerden görüldüğü üzere BİD, bataryanın sıcaklık, BGSD, BŞD değerlerinde doğrudan etkilenir. BİD sürüş için yeterli gücün olup olmadığını tespit ettiği için etkilendiği parametrelerin doğru kestirilmesi gerekmektedir. Bu durum bataryanın durum kestirimlerinin birbirleriyle bağlantı içinde olduğu ve aynı zamanda önemli olduğunu işaret etmektedir. Şekil 7'de gösterildiği gibi farklı BGSD-BŞD değerleri BİD performansını istenilen seviyede karşılayabilmektedir. Örneğin sabit T sıcaklığında; yüksek BGSD ve düşük BŞD değerleri BİD performansını olumlu yönde etki etmektedir. Yine aynı şekilde düşük BGSD ve yüksek BŞD değerleri de BİD performansını olumlu yönde etki ettiği görülebilmektedir (Meissner ve Richter, 2003). Diğer taraftan yüksek sıcaklık değerinde, yüksek BGSD oranı ve düşük BŞD oranına sahip bataryanın işlevi, düşük sıcaklıktaki, düşük BGSD oranı ve yüksek BŞD oranına sahip batarya göre daha yüksektir (Lukic ve Emadi, 2008). Bu durumdan anlaşılacağı üzere sıcaklık etkisi BİD üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Öyle ki BGSD ve BŞD oranları tatmin edici seviyelerde olsa bile batarya sıcaklığı en uygun çalışma aralığında olmazsa BİD=0 olabilir.



**Şekil 7.** Sabit T sıcaklığında BİD'in BGSD ve BŞD değerlerine göre değişimi (Meissner ve Richter, 2003)

Batarya BİD değerine etki eden durumlar sadece sıcaklık, BGSD ve BŞD değerleri değildir. Şarj/deşarj oranı, iç direnç, gerilim düşümü gibi etkilerde BİD değerine etki etmektedir (Rezvanizani vd., 2014). Bir batarya sisteminde BŞD ve BGSD değerleri biliniyor ve oranları %100'e yakın olsa bile, sistem bataryada depolanan enerjinin tamamını kullanamayabilir. Bu duruma etki eden bazı sebepler vardır. Şekil 8'de EA'larda kullanılan bir li-ion batarya için BİD, çevre sıcaklığı ve şarj/deşarj oranı arasındaki ilişkiler verilmiştir.



**Şekil 8.** Şarj/Deşarj Oranına ve Sıcaklık Değerine göre BİD Değerleri Grafiği (Rezvanizani vd., 2014)

Bu sistemde batarya düşük akımla deşarj olduğunda, iç direnç yüksek olsa bile, gerilim düşümü ihmal edilebilir seviyededir. Dolayısıyla böyle bir sistem için BİD oranı %100'e yakındır. Deşarj oranını yükseltince bataryadan kullanılacak enerji miktarı, iç direnç değeri ve gerilim düşümü de doğru orantılı olarak artacaktır. Düşük sıcaklıklarda bataryanın iç direnci daha yüksek olduğu için ortam sıcaklığına bağlı olarak bataryanın işlevi dolayısıyla BİD oranı da hızla azalacaktır. Grafikteki gri dikdörtgen, EA'larda sıkça kullanılan deşarj oranı aralığını göstermektedir. Bu batarya paketinden çok yüksek bir güç seviyesi talep etmek, BİD oranını azaltacaktır. Sonuç olarak BİD değeri önceden ayarlanan eşik değerine ulaştığında ya da altına düştüğünde lojik 0 değerini alacaktır. Ayrıca sabit sıcaklıkta şarj oranı yükseltirse, aynı sabit sıcaklıktaki deşarj oranına göre BİD oranı daha hızlı azalacaktır (Rezvanizani vd., 2014).

EA araçların gelişmesiyle çeşitli BİD kestirim yöntemleri yapılmıştır. Park vd. (2020), BİD kestirimi için yapılan birkaç yöntemden bahsetmiştir. Geleneksel olarak kullanılan bir yöntem olan elektrokimyasal tabanlı model ile BİD arasında analiz değişkenleri ile ilgili ilişkinin dikkate alındığı belirtilmiştir. Ancak, BİD ile

ilişkili analiz değişkenlerine dayalı yöntemlerin, önceden önemli bir hazırlık evresi çalışması gerektirdiği dile getirilmiştir. Araştırma trendlerinin; bataryayı aşırı şarjdan/deşarjdan korumak için gerçek zamanlı BİD tahminleri yapılması, değişen çevre koşulları altında dayanıklı BİD parametre kestirim yöntemlerinin kullanılması ve model tabanlı yöntemlere dayalı BŞD, BGSD ve BİD'nin birlikte kestirim yöntemlerinin olduğunu belirtmiştir. Balagopal ve Chow (2015), BİD kestirim tekniklerinden iki tanesinden bahsetmiştir. Bunlar güç talebine dayalı yöntemler ve bataryanın terminal gerilimine dayalı yöntemlerdir. Güç talebine dayalı yöntemde bataryanın BİD değerini belirlemek için sistemin güç talebi kullanılır. Bataryanın şarj durumuna bağlı olarak, pilin ADG-BŞD eğrisi elde edilir. Bataryanın o andaki gerilim ve kapasitesindeki maksimum değişiklik kullanılarak, sistem verilebilecek anlık güç hesaplanabilir. Bataryanın sağlayabileceği güç miktarına bağlı olarak, bataryanın BİD değerinin 1 mi yoksa 0 mı olduğunu belirlenmektedir. Bataryanın terminal gerilimine dayalı yöntemde ise bataryanın BİD değerini kestirmek için bataryanın terminal gerilimi kullanılır. Geçmiş bilgilere dayanarak, aynı uygulama için bataryanın önceki kullanımı sırasında gerilim düşümü belirlenmektedir. Bataryanın BGSD değerine, mevcut terminal gerilimine ve bataryanın kesme gerilimine bağlı olarak, bataryanın sisteme güç sağlayıp sağlayamadığını belirlenmektedir. Burada bataryanın BGSD'si bataryanın terminal voltajının bozulma oranını belirlediği için BİD kestirimi açısından çok önemli bir faktördür. Dong vd. (2016), istatistiksel verilere dayanarak BGD'den etkilenen faktörleri KF'ye dayalı olarak BŞD ve BİD'yi ortak kestirim yöntemi olarak önermiştir. Çalışmada BİD göstergesi, BGD ile ifade edilen bataryanın güç kapasitesini hesaplanarak elde edilmiştir. Shen vd. (2018), BİD, BŞD ve BGSD'yi birlikte kestirim yöntemiyle önermişlerdir. Model tabanlı BŞD kestirimi, GKF tarafından yapılmıştır. Daha sonra BGSD ve BİD ile ilgili batarya parametreleri, bir unutma faktörlü RLS algoritması kullanılarak çevrimiçi olarak tanımlanmıştır. Böylelikle kapasite ile BGSD, mevcut maksimum çıkış güç ile BİD değerleri tanımlanan parametrelere göre kestirilmiştir. Sonuç olarak birlikte kestirim yönteminin kullanılması doğruluğu artırdığı gibi hesaplama yükünü de azalttığını ifade etmişlerdir. Yukarıda bahsedildiği gibi EA araçların gelişmesiyle çeşitli BİD kestirim yöntemleri yapılmıştır. Ancak BİD hesaplamak için BŞD, BGSD, sıcaklık, şarj/deşarj oranı arasında herhangi bir matematiksel işlem henüz bulunmamaktadır.

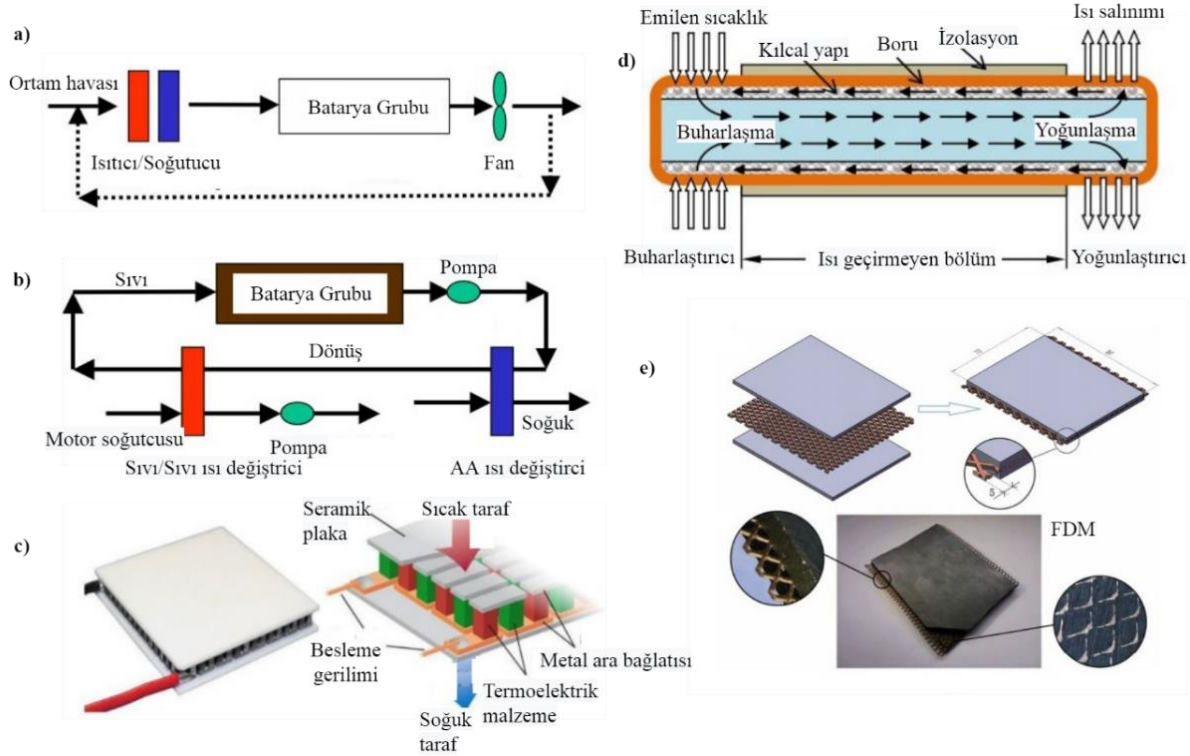
### 3. BATARYA TERMAL YÖNETİMİ (BTY)

EA'larda batarya hücrelerinden daha yüksek enerji ve kapasite değerleri elde etmek için hücreler seri-paralel olarak bağlanır. Hücreler birleştirilerek modüler hale getirilir. Modüller de birleştirilerek batarya grubu paketleri oluşturulur. Böylelikle artan hücre, modüller ile batarya gruplarının enerji yoğunlukları yükseltilecek aracın gidebileceği mesafe artırılabilmektedir. Ancak iç ve dış etkenlerden kaynaklı sıcaklık artışı/azalışı yüzlerce binlerce sayıdan oluşan hücrelerde sürüş ve araç güvenliğini tehlikeye atacak durumlar ortaya çıkarmaktadır. Bataryalar elektrokimyasal yapıda olduğu için sıcaklık değişimlerine karşı oldukça hassastır. Örneğin EA'larda sıkça kullanılan Li-ion piller için en uygun çalışma sıcaklığının 15-35°C arasında olmasından dolayı sıcaklığın bu sınır koşulları dışına çıkması bataryada hızlı yaşlanma, kapasite bakımından dengesiz hücrelerin oluşumu, farklı şarj/deşarj davranışları vb. istenmeyen durumlara neden olmaktadır (Han vd., 2019; Saw vd., 2016). Özellikle şarj etme süresinin sonuna doğru vedeşarj sırasında bataryanın sıcaklığı yükselmektedir. Düşük sıcaklık ortamında ise bataryanın anot ucundaki lityum iyonlarının difüzyon hızı düşmesi, elektrolit iletkenliği azalması ve BŞD oranının düşmesine sebep olmaktadır. Bu durumlar bataryanın iç direncinin yükselmesi ve dolayısıyla kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır (Choudhari vd., 2020). Bataryanın gücü, yaşam süresi, kararlılığı ve güvenliği yüksek sıcaklık değerlerinde olumsuz yönde ciddi bir şekilde etkilenmektedir (Thakur vd., 2020). Bu yüzden BYS'ler de Şekil 9'da gösterilen yöntemler kullanılarak batarya termal yönetimi (BTY) ile bataryanın yüksek sıcaklıklarda soğutulması, düşük sıcaklıklarda ise ısıtılması işlemi yapılmaktadır. BTY'nin aşağıda sıralanan koşulları sağlaması gerekmektedir (Pesaran, 2001; Thakur vd., 2020).

- Her hücre/modül için optimal çalışma sıcaklığının korunması
- Batarya sıcaklığı çok yüksek ise ortamın soğutulması, çok düşük ise ısıtılması
- Hücre/modül/batarya grubu arasındaki sıcaklık farklılıklarının az olması
- Ani sıcaklık değişimlerine karşı bataryanın yalıtımının yapılması
- Bataryada meydana gelebilecek zararlı gazların bir havalandırma yoluyla boşaltılması
- Bakımı kolay, güvenilir, maliyeti düşük, kolay paketlenir, hafif ve kompakt olmalı



BTY sistemi güç tüketimi, çalışma aracı, çalışma yapısı adı altında 3 ana kategoride toplanabilir (Arora, 2018). Güç tüketimi, aktif ve pasif güç tüketimi olarak ikiye ayrılmıştır. Çalışma aracı, ısıtma/soğutma için kullanılan araç temsil etmektedir. Bunlar hava ile ısıtma/soğutma, sıvı ile ısıtma/soğutma, FDM ile ısıtma/soğutma vb. yöntemleridir. Çalışma yapısı olarak iç-dış, direk-dolaylı ve seri-paralel olarak verilebilir.



**Şekil 9.** BTY sistemlerinin gösterimi; **a)** hava ile soğutma/ısıtma (Pesaran, 2001), **b)** sıvı ile soğutma/ısıtma (Pesaran, 2001), **c)** Termoelektrik yöntem (Arora, 2018), **d)** Isı borusu sistemi (Ariantara vd., 2018), **e)** Faz değiştiren malzeme (Wu vd., 2016)

### 3.1. BTY'de Aktif ve Pasif Güç Tüketimi

BTY ısıtma/soğutma işleme yaparken aktif ve pasif güç tüketimi yapmaktadır. Pasif yöntemde ortam sıcaklığı kullanılırken aktif yöntemde ise ısıtma/soğutma işlemi için bir enerji kaynağı kullanılmaktadır. Pasif yöntemde kullanılan araçlar hava ile soğutma/ısıtma, ısı dağıtıcı veya ısı emici, kanatçık kullanımı, ısı borusu ve FDM şeklindedir. Pasif yöntemlerin temel avantajları düşük maliyetli, enerji verimliliği, güvenilir ve uzun ömürlü çalışmasıdır. Aktif yöntemde bataryadaki ısı transferini sağlamak için harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Aktif sistem kullanılan ısıtma/soğutma araçları hava, sıvı ve termoelektriktir. Bu sistemlerde maliyeti artıran fan, üfleyci, pompa gibi bazı araçlar kullanılmaktadır. Aktif soğutma yöntemleri genellikle hafif, maliyetli ve kötü performans gösteren doğrudan hava soğutma ve daha iyi performans gösteren dolaylı sıvı soğutma sistemleriyle sınırlıdır (Lopez vd., 2016). Maliyetleri daha yüksek olsa da bataryada termal yönetim sağlamak adına oldukça etkili yöntemlerdir (Siddique vd., 2018). Aktif ve pasif yöntemler ile ilgili literatürde var olan bazı çalışmalar derlenmiştir. Lopez vd. (2016) çeşitli kombine aktif (sıvı ısı değiştirici) ve pasif (faz değiştirici malzeme) termal yönetim tekniklerinin hücre sıcaklıkları ve termal dengeleme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. FDM'nin, kombine aktif ve pasif termal yönetim sistemleri ile soğutulan bir modüle maksimum ve sıcaklık gradyanı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Sabbah vd. (2008) pasif soğutma (FDM) ile aktif (basınçlı hava) soğutmanın etkinliği ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, aynı test koşullarında, basınçlı hava ile soğutmanın, fan gücü harcamadan hücrenin sıcaklığını istenen çalışma aralığında tutmak için uygun bir termal yönetim sistemi olmadığını göstermiştir. Buna karşılık, pasif soğutma sistemi, ek fan gücüne ihtiyaç duymadan aynı test koşullarında istenen çalışma aralığı sıcaklığı gereksinimlerini karşılayabildiğini tespit etmişlerdir. Bahiraei vd. (2016) yaptıkları çalışmalarında üç boyutlu birleştirilmiş termal-elektrokimyasal bir batarya modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu model ile aktif (su ve soğutma plakası) ve pasif (FDM) ısı yönetim sistemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. Sonuçlar, aktif soğutma sisteminin sıcaklığı azaltmasına rağmen, batarya modülü üzerinde büyük bir sıcaklık farkına yol açtığını

göstermiştir. Öte yandan, FDM pasif soğutması, pil sıcaklığı artışını önemli ölçüde azalttığı ve modül boyunca istenen sıcaklık aralığının korunduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak aktif ve pasif yöntemler kullanıldığı sistemde ve batarya sayısına göre termal yönetim açısından kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Ancak genel olarak Chevrolet Volt, Tesla Model S ve Model 3, BMW i3 ve i8 gibi piyasada önde gelen Modern EA'larda aktif yöntemler kullanılmaktadır (Wu vd., 2019).

### 3.2. BTY Çalışma Yapısı

Çalışma yapısı olarak incelendiğinde, iç soğutma/ısıtma şekli bataryanın dış yüzeyinde değil de iç tarafından ısıtma/soğutma yapılmasını sağlayan bazı işlemlerdir. Dış soğutma/ısıtma bataryanın dış yüzeyinden ısıtma/soğutma işleminin yapılması şeklindedir. Her ne kadar bataryanın iç ile dış arasında sıcaklık farkı var ise de dış soğutma/ısıtma, iç soğutma/ısıtmaya göre uygulanması daha kolay olduğu için tercih edilmekte ve bu alanda çokça çalışmalar yapılmıştır. İç soğutma yöntemi uygulanması hala sınırlıdır. Özellikle EA'lar gibi büyük ölçekli batarya grubu paketlerindeki hücrelerin iç yapısını ulaşmak sıcaklık ölçümü yapmak ve soğutma/ısıtma tekniği uygulamak oldukça zahmetlidir. Bundan dolayı batarya termal yönetiminde daha çok dış soğutma/ısıtma teknikleri kullanılmaktadır. İç ve dış soğutma yöntemleri Wu vd. (2019) tarafından, yapılan çalışmalar incelenerek ele alınmıştır. Çalışmaları sonucunda iç termal yönetimin daha etkili olduğu ancak pratikte daha zor olduğu vurgulanmıştır. Dış termal yönteminde ise temel olarak hava, sıvı ve FDM araçlarının kullanıldığı belirtilmiştir. Hava bazlı termal yönetimin ekonomik ve güvenli olmasına karşın verimliliğinin az olduğu, FDM'nin ise batarya grubunu istenilen sıcaklık aralığından tutabildiğini ancak sızıntı problemi yaşattığı ve termal iletkenliğinin az olduğu vurgulanmıştır. Bunlara karşın sıvı bazlı termal yönetimin yüksek ısı transferi verimliliğine sahip ve kompakt olduğundan dolayı hali hazırda ticari uygulamalarda daha çok kullanıldığı belirtilmiştir.

Seri-paralel çalışma şekli soğutma/ısıtma için kullanılan aracın batarya paketlerine dağıtılma şeklindedir. Seri yöntemde, ısıtma/soğutma aracı batarya grubunun bir ucundan girip, sonundaki uca kadar gitmesidir. Burada seri yöntem denilmesi, aynı miktarda soğutma/ısıtma aracının batarya grubundaki birkaç modül serisine etki etmesidir. Paralel yöntemde ise toplam ısıtma/soğutma aracının modül sayısına göre eşit bölünmesiyle her modülle eşit bölünmüş soğutma/ısıtma aracının etki etmesi yöntemidir. Ayrıca modüllerin boyutuna ve şekline göre çeşitli seri-paralel hibrit kombinasyonlar yapılabilmektedir (Pesaran, 2001). Direk ve dolaylı yöntem de ise soğutma/ısıtma aracının bataryaya direk ya da dolaylı olarak temas etmesi işlemiyle ifade edilmektedir (Teng ve Yeow, 2012).

### 3.3. Batarya Soğutma Yöntemleri

Batarya soğutma yöntemleri, ısıtma yöntemlerinden daha çok araştırma konusu olmuştur (Bahiraeci vd., 2016; Sabbah vd., 2008). Bunu sebebi batarya ısıtma yöntemlerinin düşük sıcaklık ortamında bulunan araçların çalışması için önceden bataryanın bazı tekniklerle ısınmasını sağlamak olduğundan kaynaklanmaktadır. Sonuçta soğuk iklimlerde oluşan bir durum olduğu için karşılaşılması sınırlıdır. Ancak batarya ısınması zaten sıcak ortamlarda etkilendiği gibi soğuk ortamlarda da etkilenmektedir. Bu durum ısıl sürüklenmesi kavramı ile açıklanmaktadır. Isıl sürüklenmesi bataryada aşırı şarj/deşarj, kısa devreler, ezilme veya aşırı ısınma nedeniyle oluşmaktadır. Özellikle aşırı ısınma sonucu yangın, duman, gaz emisyonları, elektrolit ve elektrot malzemesinin ayrışması gibi durumlarla sonuçlanmaktadır (Choudhari vd., 2020). Bu tür durumların önüne geçilmesi için BYD tarafından ayarlanan BTY ile hava, sıvı, FDM, Termoelektrik (TE) ve ısı borusu (IB) araçları ile batarya soğutulması termal yönetimi uygulanmaktadır.

Hava ile soğutma, düşük ısı kapasitesi ve ısıl iletkenlik gibi dezavantajlara sahip olsa da basitliği, düşük maliyeti ve diğer sistemlere göre elektriksel güvenliği daha yüksektir. Öyle ki Çinli ve Japon EV üreticileri tarafından BYD E6, Toyota Prius, Nissan Leaf vb. EA modellerinde hala kullanılmaktadır (Xia vd., 2017). Hava ile ısı transferi, havayı batarya modülleri boyunca yönlendirerek ya da üfleyerek gerçekleştirilir. Yüksek hızda hava soğutma, batarya hücrelerinin sabit bir duruma ulaşması için gereken süreyi azaltıp, aşırı ısınma etkisini en aza indirmektedir. Hava ile soğutma, fanın kullanılmadığı doğal ısı taşınımı (pasif) ve fanın kullandığı basınçlı ısı taşınımı (aktif) sistemleri ile yapılmaktadır. Düşük bir C-oranı (şarj veyadeşarj hızı) için sıcaklık doğal ısı taşınımıyla yapılabilmektedir. Bu durumda, basınçlı ısı iletimine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak C oranındaki artışla birlikte, akım da hızla artar ve buna bağlı olarak batarya hücresi

içinde ısı artışı 50°C'nin üstünde gibi yüksek bir değere çıkabilmektedir. Bu durumda basınçlı ısı iletimini ihtiyaç duyulmaktadır (Choudhari vd., 2020).

Hava ile soğutmaya kıyasla, sıvı bazlı soğutucu sistemleri suyun veya diğer tipik olarak kullanılan akışkanların ısı transfer katsayısından dolayı daha verimli çalışmaktadır. Sıvı soğutma, hava soğutmadan 3500 kat daha verimli olabilir ve %40'a kadar enerji tasarrufu sağlayabilir. Ayrıca sıvı soğutma, gürültü seviyesini azaltabildiği gibi batarya grubu için soğutma verimliliği açısından daha kompakt olabilmektedir (Xia vd., 2017). Sıvıyla ısı transferi, her bir batarya modülünün etrafındaki ayrı borular aracılığıyla, batarya modülün etrafında bir ceket ile doğrudan temas için batarya modüllerinin bir dielektrik sıvıya batırmayla ve batarya modüllerini sıvı ısıtıcı/soğutucu bir plakaya (ısı emici) yerleştirilerek yapılmaktadır (Pesaran, 2001). Sıvı ile soğutma iki kategoriye ayrılabilir. Bunlar; batarya modülünün, bir dielektrik soğutucuya (örneğin yağ) daldırma işlemi olan direkt yöntem ile batarya modülünün etrafındaki boru/ceket yapılardan veya batarya modüllerinin üzerine yerleştirilen soğuk plaka boyunca akan akışkan tarafından gerçekleştirilen yöntemler olan dolaylı soğutma yöntemidir. Dolaylı yöntemde kullanılan sıvılar su/glikol iken direkt yöntemde silikon bazlı veya mineral yağlar içeren dielektrik malzemeler kullanılmaktadır. Mineral yağ, su, glikol, hidrojel gibi çeşitli sıvı soğutucuların etkisi hemen hemen aynıdır ancak mineral yağın viskozitesi ve hidrojel maliyeti yüksektir. Bu nedenle sıvı ile batarya soğutması işleminde genellikle soğutucu olarak su veya glikol kullanılır. Soğuk bölgelerde, suyun donma olasılığına karşı su ve glikol karışımları da kullanılabilir (Choudhari vd., 2020). Sıvı soğutma sisteminde kontrol yöntemine göre aktif soğutma ve pasif soğutma uygulamaları mevcuttur. Pasif soğutma uygulamaları, düşük soğutma verimliliğine ve yetersiz sıcaklık kontrolüne sahiptirler. Bu yüzden EA'lar gibi büyük batarya gruplarının soğutmak için yetersizdirler. Bu yüzden genel olarak aktif sıvı soğutma yöntemleri üzerine araştırma-geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Pratikte de Tesla, General Motors ve diğer otomotiv şirketleri gibi birçok otomotiv şirketi aktif sıvı soğutma sistemleri kullanmaktadır (Lu vd., 2020).

İdeal bir termal yönetim sistemi düşük hacim, hafif ve ucuz olarak batarya grubunu optimum bir sıcaklıkta tutabilmelidir. Hava soğutma ve sıvı soğutma gibi termal yönetim sistemleri, etkin olarak çalışabilmesi için genel olarak aktif yöntemlerde kullanılan fan, pompa, üfleyici, boru vb. yapılar kullanılmaktadır. Dolayısıyla böyle sistemler çok fazla alan kaplayan, karmaşık ve pahalı sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Böyle durumların etkilerini azaltmak için termal yönetimde pasif ve yarı-pasif olarak kullanılacak FDM kullanılmaktadır. Batarya termal enerjisi; gizli ısı, reaksiyonlarda kimyasal enerji ve hissedilebilir ısı şeklinde depolanabilmektedir. Bu üç formdan gizli ısı en büyük miktarda enerjiyi depolayabilmektedir. FDM termal enerjiyi duyulur ve gizli ısı olarak depolayabilen ve bu enerjiyi tersine çevrilebilir bir işlemle serbest bırakabilen malzemelerdir. FDM'ler, sıcaklık artışları sırasında çevredeki ısıyı emerek kendisinin erimesine neden olup enerjiyi depolamaktadır. Daha sonra sıcaklık, faz değişim sıcaklığının altına düştüğünde, ısı enerjisini serbest bırakarak ilk katı faz haline geri döner (Siddique vd., 2018). Bu doğal olay ile EA'larda batarya soğutma işlemi yapılmaktadır. Batarya soğutma işlemi için ilk FDM çalışması Hallaj ve Selman (2000) tarafından yapılmıştır. Aynı yazarlar FDM kullanarak li-ion bataryalar için bir termal yönetim çalışması yapmışlardır (Hallaj ve Selman, 2002). Çalışmaları sonucunda FDM soğutma sistemlerinin yüksek kompaktlık, düşük maliyet, dolaşım ağına ihtiyaç duyulmaması, istenen soğutma etkisini sağlaması, termal sürüklenme durumunda daha iyi performans ve daha homojen sıcaklık dağılımı gibi birçok avantajının olduğunu göstermişlerdir.

Bir başka batarya soğutma yöntemi olarak ısı borusu yöntemleri uygulanmıştır. Isı borusu BTY sistemleri, FDM'lerin düşük iletkenlik, hacim genişlemesi ve tepki süresinin uzun olması gibi sorunlarının üstesinden gelmenin bir yolu olarak görülmektedir. Isı borusu, bir çalışma sıvısının buharlaştırıcı, ısı geçirmeyen ve soğutucu ünitelerine bölünmüş kapalı bir boru sistemi içine yerleştirilmiş pasif bir batarya soğutma yöntemidir. Buharlaştırıcı bölümü ısı ile temas ettiğinde doymuş bir sıvı olan çalışma sıvısı kaynamaya başlar ve buhar, ısı geçirmeyen alan boyunca yoğunlaştırıcı bölümüne geçer. Bu bölgedeki buhar, ısıyı çevreleyen ortama kendisini bırakır ve sıvının yoğunlaşmasına neden olur. Sıvının yoğunlaşmasına yardımcı olmak için genellikle ek bir soğutma ortamı (hava veya sıvı) gerekmektedir. Daha sonra, bir kılcal işlem yoluyla, ani yoğunlaşma sıvısı buharlaştırıcıya geri akarak soğutma işlemi yapılmaktadır (Joris Jaguemont ve Van Mierlo, 2020). EA'larda bu işlem, bataryanın, şarj/deşarj sırasında oluşan ısıyı serbest bırakıp ve ardından bunu bataryanın alt veya yan tarafıyla doğrudan temas halinde olan ısı borusuna iletimi yapılmasıyla gerçekleştirilir. Daha sonra, ısı borusunun soğuk ucundaki ısı dağıtma sistemi tarafından ısının uzaklaştırılması yapılır. FDM'lerle

karşılaştırıldığında daha az bakım gerektiren, yaşam süresi daha uzun, daha kompakt, daha hafif ve daha esnek bir yapıya sahiptir.

Bir başka batarya soğutma yöntemi termoelektrik soğutucu sistemidir. TE, 1834 yılında keşfedilen ve Peltier etkisinin çalışma prensibine dayanan bir katıhal aracıdır. TE genellikle bakır olmak üzere iki iletken arasına sıkıştırılmış bir yarı iletken oluşmaktadır. Bir dizi p-tipi ve n-tipi içeren katkılı yarı iletken elemanlar kullanılır. Bir TE'ye gerilim uygulandığında, elektronlar, modülün bir tarafından termal enerjiyi emerek, aslında onu soğutarak, p-tipi termo-elemanın daha düşük bir enerji seviyesinden n tipi termo-elemanda daha yüksek bir enerji durumuna atlar. Elektronlar, TE modülünün diğer tarafındaki bu ısıyı reddederek kararlı bir enerji seviyesine düşer ve böylelikle üzerinde bulunan batarya sisteminde soğutma işlemi yapar. Eğer ters gerilim uygulanırsa TE bir soğutucu yerine bir ısıtıcı olarak kullanılabilir (Bahiraei vd., 2016; Bandhauer ve Garimella, 2013; Wu vd., 2019). Her ne kadar TE'ler, EA'lardaki BTY sisteminde kullanımı, uygulamanın yeniliğinden dolayı yetersiz olsa da ilk olarak Alaoui (2003) tarafından EA'lar için TE tabanlı bir BTY önerilmiştir (Joris Jaguemont ve Van Mierlo, 2020). Önerilen BTY'nin iyi bir performans gösterdiği ve batarya sisteminin sıcaklığını başarıyla düşürdüğü belirtilmiştir. Siddique vd. (2018), 2003-2018 yılları arasında TE alanından yapılan çalışmalar hakkında kapsamlı bir çalışma sunmuştur. Derlenen çalışmaları sonucunda TE ile gerçekleştirilen BTY'ler pilin maksimum sıcaklığını 40°C'nin altında tutabildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak TE'ler diğer soğutma sistemlerine göre; hareketli parçası olmayan, içinde kimyasal reaksiyonu olmayan, gürültüsüz, güvenilir çalışan, daha uzun çalışma ömrü, tehlikeli gaz emisyonu olmaması ve minimum bakım maliyeti gerektiren bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna karşın, dezavantajı olarak, düşük verimlilikleri ve ticari uygulamalarda kullanımlarını sınırlayan ek güç gereksinimlerine sahiptirler.

### 3.3.1. Batarya Soğutma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Batarya soğutma yöntemleri birçok yazar tarafından detaylı bir şekilde açıklanmış avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Çalışmalarda genel olarak her yöntemin kendi içerisinde ve kullanıldığı sisteme göre bazı avantaj ve dezavantaja sahip olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda incelenen yöntemler, avantaj ve dezavantajları bakımından karşılaştırılması yapıp Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'teki sonuçlara göre sistemlerin nitelik bakımından karşılaştırmaları Tablo 5'te verilmiştir (Arora, 2018; Choudhari vd., 2020; Ianniciello vd., 2018; Joris Jaguemont ve Van Mierlo, 2020; Liu vd., 2017; Lu vd., 2020; Pesaran, 2001; Pesaran vd., 1999; Rao ve Wang, 2011; Siddique vd., 2018; Wu vd., 2019; Xia vd., 2017; Yang vd., 2019). Pesaran vd. (1999), hava soğutma ile sıvı soğutma yöntemlerini karşılaştırmıştır. Hava soğutmanın, sıvı soğutmaya karşı verimi daha düşük olsa da daha az karmaşık yapıda olduğunu göstermişlerdir. Genel olarak, paralel HEA'lar için hava ile soğutmanın uygun olduğu ancak EA'lar ve seri HEA'lar için optimum termal performans adına sıvı bazlı sistemlerin kullanılması gerektiğini önermişlerdir. Wu vd. (2019) sıvı bazlı soğutma yönteminin, yüksek ısı transfer verimliliği ve kompaktlığı nedeniyle ticari EA ve HEA'larda uygulandığını vurgulamışlardır. Liu vd. (2017) batarya soğutma yöntemlerinden hava ve sıvı soğutmanın, ticari elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemler olduğunu belirtmişlerdir. Önde gelen ticari elektrikli araçlarından Nissan Leaf, Toyota Prius, BYD E6 hava ile soğutma, Tesla model S, NIO es8, BMW 530Le sıvı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır (Yang vd., 2019).

Bu çalışmada, Tablo 4'te verilen avantaj ve dezavantajlar ele alınarak, batarya soğutma yöntemlerinin nitelik bakımından karşılaştırmaları yapılmış ve Tablo 5'te verilmiştir. Yapılan karşılaştırma, kullanım kolaylığı (KK), Uygulanabilirlik (U), Enerji verimliliği (EV), Soğutma düzeyi (SD), Bakım (B), başlangıç maliyeti (BM), yıllık maliyeti (YM) ve teknik risk (TR) bakımından değerlendirilmiştir. Her bir nitelik kendi içerisinde minimum 1 puan, orta düzey 2, maksimum 3 puan verilerek bir ortalama alınmıştır. Daha sonra ortalamanın yüzdelik olarak hesabı yapılmış ve yöntemler kendi aralarında derecelendirilmiştir. Hesaplama sonucunda en yüksek oranı faz değiştirici malzemeler almıştır. Bu yüzden FDM ile ilgili çalışmalar, gelecekte kullanılacak olan EA'ların BTY sistemleri için umut verici olacağı düşünülmektedir. Ama yine de BTY için en uygun yöntemin düşük maliyetli, hafif, hacimsel olarak az alan kaplayan, gürültüsüz, az enerji harcayan vb. gereksinimleri karşılayabilen bir yöntem olmalıdır.

Tablo 4. BTY Soğutma Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajlarının Karşılaştırılması

Soğutma Yöntemi	Avantaj	Dezavantaj
<b>Doğal Hava (pasif)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hafif</li> <li>● Basit sistem</li> <li>● Kolay bakım</li> <li>● Pasif soğutma</li> <li>● Başlangıç maliyeti düşük</li> <li>● Kolay uygulanabilirlik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Verimlilik düşük</li> <li>● Isı transfer katsayısı düşük</li> <li>● Soğutma düzeyi düşük</li> <li>● Sıcaklık dağılımı homojen değil</li> <li>● Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar için uygun değil</li> <li>● Sadece ortamda bulunan sıcaklığı kullanır</li> </ul>
<b>Basınçlı Hava (aktif)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bataryaya doğrudan temas</li> <li>● Hafif</li> <li>● Bakımı kolay</li> <li>● Uzun ömürlü soğutma</li> <li>● Başlangıç maliyeti düşük</li> <li>● Farklı batarya tipleri için uygun</li> <li>● Ticari anlamda yaygın</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Düşük ısı transfer katsayısı</li> <li>● Ortam hava sıcaklığına bağlıdır</li> <li>● Fan kullandığı için elektrik tüketimi vardır</li> <li>● Sıcaklık dağılımı homojen değil</li> <li>● Verimlilik düşük</li> <li>● Gürültülü</li> <li>● Alan kaplar</li> </ul>
<b>Pasif Sıvı</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bakımı kolay</li> <li>● Pasif soğutma</li> <li>● Başlangıç maliyeti düşük</li> <li>● İşletme maliyeti düşük</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Sıvı sızıntısı riski vardır</li> <li>● Aşırı sıcaklık ortamında sınırlı soğutma</li> <li>● Gaz kaybı riski vardır</li> </ul>
<b>Aktif Sıvı</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Yüksek ısı kapasitesi</li> <li>● Bataryaya doğrudan temas</li> <li>● Verim yüksek</li> <li>● Sıcaklık dağılımı homojen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Karmaşık</li> <li>● Sızıntı riski vardır</li> <li>● Başlangıç maliyeti yüksek</li> <li>● İşletme maliyeti yüksek</li> <li>● Pompa kullanıldığı için elektrik tüketimi vardır</li> <li>● Aşırı sıcaklık ortamında sınırlı soğutma</li> </ul>
<b>Faz değiştiren malzeme</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pasif soğutma</li> <li>● Maliyeti düşük</li> <li>● Verimlilik yüksek</li> <li>● Bakım az</li> <li>● Kullanım ömrü uzun</li> <li>● Sıcaklık dağılımı göreceli olarak homojen</li> <li>● Daha kompakt</li> <li>● Gizli ısıyı emer</li> <li>● Yüksek sıcaklık koşullarında soğutma performans yüksek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Termal iletkenliği düşük</li> <li>● Faz değişim esnasın hacim genişlemesi</li> <li>● Malzeme eridikten sonra sızıntı riskinin olması</li> <li>● Ağır olabilmektedir.</li> <li>● Ticari anlamda yaygın değil</li> </ul>
<b>Isı borusu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Isı iletkenliği yüksek</li> <li>● Verim yüksek</li> <li>● Esnek</li> <li>● Kompakt</li> <li>● Kullanım ömrü yüksek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Başlangıç maliyeti yüksek</li> <li>● Karmaşık</li> <li>● Temas alanı sınırlı</li> <li>● Sızıntı riski vardır</li> <li>● Elektrik tüketimi vardır</li> <li>● Verimliliği batarya yapısına göre değişir</li> <li>● Ticari anlamda yaygın değil</li> </ul>
<b>Termoelektrik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bakım maliyeti düşük</li> <li>● Sabit sistem</li> <li>● Gürültüsüz çalışır</li> <li>● Enerji tüketimi düşük</li> <li>● Yapısında kimyasal reaksiyon yok</li> <li>● Çalışma ömrü uzun</li> <li>● Güvenilir</li> <li>● Zararlı gaz salınımı yoktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ek güç gereksinimi vardır</li> <li>● Verimi çok düşük</li> </ul>

**Tablo 5. Batarya Soğutma Yöntemlerinin Nitelik Bakımından Karşılaştırılması**

Soğutma Yöntemi	KK	U	EV	SD	B	BM	YM	TR	Ort.	Yüzde
<b>Hava ile</b>	Kolay 3	Basit 3	Düşük 1	Düşük 1	Kolay 3	Düşük 3	Düşük 3	Düşük 3	2,5	%83
<b>Sıvı ile</b>	Zor1	Zor 1	Yüksek 3	Yüksek 3	Zor 1	Yüksek 1	Yüksek 1	Yüksek 1	1,5	%50
<b>FDM</b>	Kolay 3	Basit 3	Yüksek 3	Yüksek 3	Kolay 3	Orta 2	Düşük 3	Düşük 3	2,875	%96
<b>IB</b>	Orta 2	Orta 2	Yüksek 3	Yüksek 3	Orta 2	Yüksek 1	Orta 2	Orta 2	2,125	%71
<b>TE</b>	Orta 2	Orta 2	Düşük 1	Orta 2	Zor 1	Yüksek 1	Yüksek 1	Orta 2	1,5	%50

### 3.4. Batarya Isıtma Yöntemleri

Yüksek sıcaklıkta olduğu gibi düşük sıcaklık değerlerinde de EA bataryası ciddi bir şekilde etkilenmektedir. Düşük sıcaklıklarda özellikle sıfırın altındaki sıcaklıklarda EA'larda sıkça kullanılan Li-ion bataryaların elektrolit iletkenliği, yük aktarım kinetiği ve lityum iyonlarının anodundaki katı hal difüzyonu yavaşlar. Bu tip istenmeyen durumlar bataryanın iç direncini artmasına, pillerde dengesizlik oluşmasına ve kapasitesinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca aşırı düşük sıcaklık koşullarında, elektrolitlerin donmasıyla deşarj ve şarj arızaları da olabilmektedir. Tüm dünyada yayılması beklenen EA'ların özellikle soğuk iklime sahip ABD, Kanada Rusya, Kuzey Avrupa vb. ülkelerde soğuk iklim özellikleri dikkate alınıp bataryanın güvenliği açısından BTY'de ısıtma yöntemleri kullanılmalıdır. Özellikle şarjdan önce, araç çalıştırılmadan önce, bazen deşarj esnasında ön ısıtma sistemi kullanılmalıdır. Böylelikle düşük sıcaklıklarda bataryanın minimum çalışma sıcaklığının üstünde bir sıcaklığı kadar BTY ile ısıtma yapıp araç kullanılmaya başlamadan önce bataryanın güvenliği sağlanmış olur. Batarya ısıtma yöntemleri iç ve dış ısıtma adı altında 2 ana kategoriye ayrılabilir. Dış ısıtma yöntemleri de kendi içerisinde 2 gruba ayrılabilir. Bunlar soğutma sistemiyle entegre olan ısıtma yöntemleri ile termoelektrik eleman kullanılan ısıtma yöntemleridir. Aynı şekilde iç ısıtma yöntemleri de kendi içerisinde 2 gruba ayrılabilir. Birinci grup kendi kendine ısıtma yöntemi, ikinci grup ise doğru akım, alternatif akım ve darbe akımlarının kullanıldığı akım uyarması ile ısıtma yapan sistemlerdir (Wu vd., 2020).

Dış ısıtma sistemlerinden hava ile ısıtma yöntemi düşük maliyetli, basit ve tüm batarya tipleri için kullanılabilen yöntemdir. Çalışması soğutma sistemindeki gibidir ancak burada soğuk hava yerine ısıtılan hava bir fan yardımıyla bataryaya dağıtılır. Diğer bir dış ısıtma yöntemi olan sıvı ile ısıtma Chevrolet Volt ve Tesla gibi EA'larda yaygın olarak kullanılan ve bir ısıtıcı, bir ısı değiştirici, bir pompa ve sirkülasyon borularından oluşmaktadır (Jaguemont vd., 2016; Wu vd., 2020). Isı değiştiricisi, batarya ile doğrudan temas halindedir. Burada sıvı, ısı değiştiricisinden geçtiğinde, sıvıdan bataryaya ısı aktararak batarya ısıtma işlemi yapılır. Hava ve sıvı gibi yöntemlerde fan, pompa ve borular vb. elemanlar kullanıldığı için sistemler çok karmaşık ve ağır olmaktadır. Bundan dolayı doğal yapısı gereği erimesi ve katılaşmasının bir sonucu olarak belirli bir sıcaklıkta büyük miktarlarda enerji (ısı) depolayabilen ve salabilen bir madde olan FDM ile ısıtma işlemi yapılabilir. Eğer batarya sıcaklığı FDM'nin erime noktasının altına düşerse, FDM tarafından depolanan ısı batarya grubuna dağıtılarak ısıtma işlemi yapılmaktadır (Jaguemont vd., 2016). Termoelektrik kullanılan yöntemler de elektrotermal elemanlar, ön ısıtma için doğrudan pil yüzeyine takılmaktadır. Konfigürasyonlara bağlı olarak, Peltier efekt elemanları, elektrotermal plakalar, elektrotermal ceketler ve elektrotermal filmler olarak 4 yöntem mevcuttur (Wu vd., 2020). Bu tür sistemler bataryanın yüzeylerine konularak sistem gereksinimleri karşılandığı takdirde ısıtma işlemi yaparlar.

İç ısıtma yönteminden biri olan kendi kendine ısıtma yönteminde, bataryalar yalnızca ohmik ve polarisasyon iç dirençleri ile ısı üretmektedir. Üretilen bu ısı ile batarya kendi kendini ısıtmaktadır. Bataryaları düşük sıcaklıklarda şarj etmek lityum kaplamaya neden olacağından, deşarj yoluyla kendi kendilerini ısıtmak için depolanan enerjilerinin bir kısmını kullanmaktadır (Ji ve Wang, 2013). Uyarım akımları ısıtma yönteminde, doğrusal akım yöntemi; pilde depolanan enerjiden boşaltılan sabit bir akım ile bataryayı ısıtmayı ifade etmektedir. Akım genliği ve ön ısıtma süresinin, lityum kaplamayı ve bataryanın eskimesini üzerine etkisi olduğu için doğru akım uyarımı belli bir süre zarfı ile sınırlandırılmalıdır (Wu vd., 2020). Diğer bir yöntem

olan alternatif akım (AC) ön ısıtma, bataryanın iç empedansı yoluyla ısı üretmek için bataryanın pozitif ve negatif elektrotlarına frekansı ve genliği olan bir alternatif akımın uygulanması yöntemidir. Çeşitli AC sinyallerinin arasında, sinüzoidal alternatif akım (SAC) en yaygın kullanılan AC ısıtma sistemidir. SAC akım genliği ve frekansı, hücre içinde daha fazla ısı üretimi için ayarlanabilir (Hu vd., 2020). Sinyal ayarlanabildiği ve osilasyon yapabildiği için doğru akımdaki şarjın ve deşarjın neden olduğu lityum çökmesi ve kapasite kaybının önüne geçilebilmektedir. DC ile karşılaştırıldığında daha verimli ve daha hızlı bir ısıtma sağlar (Wu vd., 2020). Benzer amaçlı darbeli akım yönteminde ise bataryanın iç direnci üzerinden ısı üretmek için bataryaya belirli aralıklarla sabit darbe akımları uygulanmaktadır.

Isıtma yöntemleri özetçe açıklanacak olursa; Dış ısıtma yöntemi olan hava ile ısıtma yöntemi düşük maliyetli, karmaşıklığı az, güvenlik düzeyi yüksek vb. avantajlara sahip olmasından dolayı geleneksel olarak kullanılan yöntemlerin başından gelmektedir. Ancak ısıtılan havanın dağıtılması için kullanılan fan düzeneğinin ek enerji tüketimine neden olması ve havanın ısı transfer katsayısının düşük olmasına bağlı olarak ısıtma süresini uzun olması gibi dezavantajlara sahip olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Sıvı ısıtma yönteminde, hava ile karşılaştırıldığında, sıvının daha yüksek ısı transfer katsayısına sahip olması ısıtma süresini kısalttığı söylenebilir. Ancak bu sistem daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu yüzden hacimsel olarak daha fazla alan kaplamaktadır. FDM ile ısıtma yönteminde, çalışması için ek bir güç gereksinimine ihtiyaç duymadığından dolayı enerji tüketiminin olmaması, uzun süreli kullanılabilme, batarya yaşlanmasına olan etkisinin az olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak termal iletkenlikleri düşük olduğundan dolayı ısıtma süresi yüksek, büyük batarya grupları için ağır ve hacimsel olarak alan kaplayan, eridiğinden sızıntılar meydana getirip bataryanın güvenliğini tehlikeye atabilecek dezavantajlara sahiptir. Ayrıca maliyeti yüksek ve EA'lar için kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar laboratuvar deneyleri ile sınırlıdır. Termoelektrik kullanılan yöntemlerde enerji tüketiminin az olması, güvenli ve uzun süreli olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak hacimsel olarak fazla alan kaplamakta ve maliyetleri yüksektir. Diğer bir grup olan iç ısıtma yöntemlerinin genel olarak ısıtma süreleri çok hızlıdır ve hacimsel olarak az alan kaplamaktadır. Isıtma işlemi için genel olarak bataryanın kendi enerjisini kullandıkları için enerji tüketimleri fazladır. Sadece AC sisteminde dışarıdan bir kaynak kullanılmaktadır. Bataryanın kendi enerjisini kullanılmasından dolayı batarya yaşlanmasına olan etkileri de yüksektir. Bundan dolayı DC ya da darbe akımı yerine, AC dalga tipleri kullanmak daha yararlı olacaktır. Tüm bu sistemler kendi aralarında kullandıkları sisteme göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. En uygun sistemin hangisi olduğu tespit edilmesi adına, sistemlerin nitelik bakımından karşılaştırmaları Tablo 6'da verilmiştir (Hu vd., 2020; Jaguemont vd., 2016; Ji ve Wang, 2013; Wu vd., 2020). Burada her bir nitelik özelliğine göre 1'den 4'e kadar derecelendirilmiştir. Daha sonra her niteliğin aldığı dereceler toplanıp nitelik sayısına bölünmek suretiyle ortalaması alınmıştır. Alınan ortalama sonucunda, yöntemin toplam derecesi yüzdelik olarak verilmiştir. Nitelik olarak, enerji tüketimi (ET) azdan 1 – fazlaya 4, maliyet (M) ucuzdan 4 – pahalıya 1, ısıtma süresi (IS) kısıdan 4 – uzuna 1, batarya yaşlanmasına olan etki (BYE) azdan 4 – fazlaya 1, Hacim (H) küçükten 4 – büyüğe 1, güvenilirlik (G) yüksekte 4 – düşüğe 1 olarak niteliğin etkisine göre puanlar verilmiştir. Ortalama etkinin ne kadar olumlu (4 derecesine yakın) ise yüzdelik olarak da oranı daha fazla olacaktır. Tabloda aynı zamanda yöntemlerin hali hazırda kullanıldığı EA'ların durumu da verilmiştir (Wu vd., 2020). En yüksek yüzdelik oranı alan AC ile ısıtma ile ilgili henüz gerçek bir uygulama mevcut değildir. AC ile diğer yüksek oranda olan iç ısıtma yöntemlerinin daha çok araştırılması gerektiği ve ileride EA'larda kullanılması daha uygun olacağı düşünülmektedir. Mevcut EA'larda kullanılan yöntemler arasında en yüksek oran sıvı ile ısıtma daha sonra hava ile ısıtma olmuştur. Bu yöntemlerin karmaşık yapısı, hacim, batarya yaşlanmasına olan etkileri ve maliyet gibi sorunlarının çözülmesi halinde EA'lar için kullanılması açısından daha da uygun olması beklenebilir.

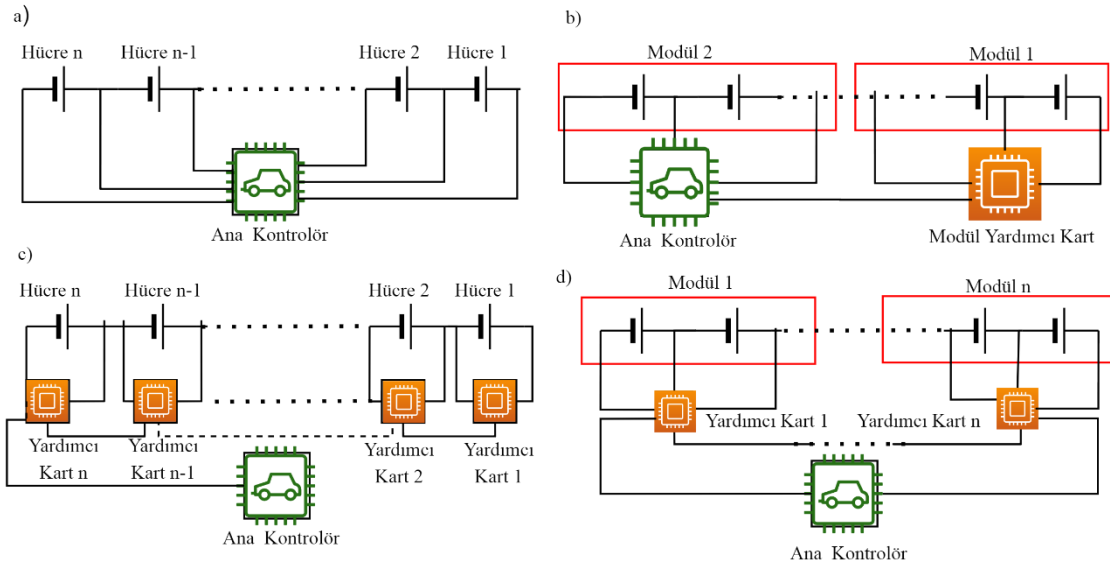
#### 4. BYS TÜRLERİ

BYS sistemleri batarya gurubunun ve hücrelerin etkili, güvenli ve verimli çalışması için kullanılan sistemlerdir. Bu yüzden BYS sistemi kullanılırken türünün doğru seçilmesi oldukça önemlidir. BYS kurulduğu sisteme göre türlere ayrılmaktadır. Her bir hücreye doğrudan ya da dolaylı olarak, toplu olarak tek bir batarya grubuna ya da batarya modüllerine vb. göre şekillenebilir. Ancak temel mantalitesi ucuz, kompakt, güvenli, kurulum ve bakımı kolay olmalıdır (Andrea, 2010). Dahası, bir BYS'nin yapısı, araç performansının gerekliliklerini sağlamalıdır. Her BYS türü kendi içerisinde bazı avantaj ve dezavantajlar sahiptir. Aslında BYS türünün seçimi batarya göre değil, bataryanın kullanıldığı sisteme göre seçilmelidir. Buna göre literatürde

BYS türleri 4 ana kategoriye ayrılabilir (Andrea, 2010). Bunlar Şekil 10'da gösterildiği gibi merkezi BYS, ana-yardımcı Kart BYS, parçalı BYS ve dağıtılmış BYS türleridir.

**Tablo 6.** Batarya Isıtma Yöntemlerinin Nitelik Bakımından Karşılaştırılması

Isıtma Yöntemi	ET	M	IS	BYE	H	G	Ortalama	Yüzdellik	EA'larda kullanımı
Hava ile ısıtma	2	4	1	2	3	3	2,50	%63	Honda Insight/ Toyota Highlander
Sıvı ile ısıtma	1	4	2	4	1	4	2,67	%67	Tesla/Chevrolet Volt
Faz değ. malzeme	1	2	2	4	2	3	2,33	%58	×
Peltier efekt	2	2	1	4	2	3	2,33	%58	SAM EVII EA
Elektrotermal plakalar	1	2	1	2	2	4	2,00	%50	Mitsubishi i-MiEV/ Nissan LEAF
Elektrotermal ceketler	1	2	2	3	2	3	2,17	%54	Chery
Elektrotermal filmler	1	2	2	3	2	3	2,17	%54	×
Kendi kendine ısıtma	1	4	4	3	4	4	3,33	%83	×
DC ile ısıtma	4	4	2	3	4	3	3,33	%83	×
AC ile ısıtma	4	4	3	4	4	4	3,83	%96	×
Darbe akımı ile	4	3	4	2	4	2	3,17	%79	×



**Şekil 10.** BYS Türleri a) Merkezi BYS, b) Parçalı BYS, c) Dağıtılmış BYS, d) Ana-Yardımcı Kart BYS

Merkezi BYS'de batarya grubundaki hücrelerin her biri doğrudan ana kontrolöre bağlanır. N sayıda hücre için bir N+1 sayıda bağlantı kablosu kullanılır. Batarya gurubu hücrelerinin bilgilerini almaya sağlayan kablolar, ana kontrolör merkezine doğrudan geldiği için ana kontrolör merkezi bir yere konumlandırılmalıdır. Bu türü kullanmak yalnızca tek bir kurulum noktası gerektirdiği gibi karmaşıklığa da sebep olmaktadır. Hücrelerdeki gerilim, akım ve sıcaklık ölçümleri gibi veriler tek bir işlemci tarafından değerlendirilir. Ana kontrolör tek olduğu için haberleşmeden kaynaklı zaman gecikmeleri azdır. Dolayısıyla bu BYS türünün uygulanması kompakt, kolay ve ucuzdur (Andrea, 2010). Ancak tek bir ana kontrolör olmasından dolayı işlemcisinin çıkış-giriş sayısı sınırlıdır. Bu yüzden batarya grubundaki hücrelerin artması merkezi BYS için sınırlı bir çalışma aralığı doğuracaktır. Dahası, ana kontrolör hücre dengelemesinin tek kaynağı olduğu için aşırı ısıya maruz kalabilmektedir. Yüzlerce-binlerce hücreye sahip EV'ler için, büyük sensör donanımları oldukça karmaşıktır ve yüksek bir ölçüm hassasiyetine sahip olması gerekmektedir. Bundan dolayı merkezi BYS'de kontrolörün yükü oldukça ağırdır. Bu nedenle, merkezi BYS, EA batarya grubunun BYS sistemi için kullanılması oldukça nadirdir (Kong vd., 2017).



Parçalı BYS’de yapı olarak merkezi BYS’ye benzemektedir. Ancak burada denetim iki birime ayrılmıştır. Birincisi ana kontrolör, ikinci ise modül yardımcı kartıdır. Batarya gurubu kullanıcıya göre istenilen şekilde 2 gruba ayrılmaktadır. Yardımcı kart birinci gruptan gerekli ölçüm verilerini alıp iletişim ağıyla ana kontrolöre gönderir, ana kontrolör de ikinci gruptan aldığı ölçümleri ve yardımcı karttan gelen diğer birinci grup ölçümlerini alıp gerekli hesaplama ve iletişimi sağlama görevini üstlenmektedir. Parçalı BYS, merkezi BYS ile benzer avantajlara sahiptir. Bunun yanında yardımcı kart ile ana kontrolör denetleyicisi batarya gurubunun yakınına kurulabileceğinden dolayı hücrelerden gelen kablo bağlantılarının kurulumu daha kolaydır. Ancak maliyet bakımından merkezi BYS’ye göre daha pahalıdır (Andrea, 2010).

Ana-Yardımcı kart BYS’de, birden fazla seri-paralel hücreden oluşan modüllerin yardımcı kartlar ile denetlenmesi ve bu yardımcı kartların hem kendi aralarında hem de bir ana kontrolör ile iletişim kurmasıyla uygulan bir BYS türüdür. Buradaki yardımcı kartların görevi modüllerdeki gerilim, akım ve sıcaklık ölçümlerinin yapılması, hücre dengelemesinin yapılması ve bu verilerin haberleşme ağı ile ana kontrolöre gönderilmesini sağlamaktır. Ana kontrolörün buradaki görevi yardımcı kartlardan gelen ölçümler doğrultusunda batarya grubu için kestirim, termal yönetim, koruma, hesaplama vb. görevleri yerine getirmektir (Messier vd., 2019). Çalışma yapısı, bazı avantaj ve dezavantajları bakımından parçalı BYS ile benzer özellikler göstermektedir. Ancak burada ana kontrolör, parçalı BYS’deki gibi gerilim ölçümü yapmaz, sadece hesaplama ve iletişimi yapar. Bundan dolayı ana kontrolörün hesaplama yükü daha azdır. Sonuç olarak EA’lar gibi büyük batarya gruplarına sahip sistemler için ana kontrolörün yükünü hafifleten, birden fazla modülde yardımcı kartların kullanılması daha hassas, daha güvenilir sonuçları doğurduğundan dolayı üreticiler tarafından diğer türlere göre daha çok tercih edilmektedir (Kong vd., 2017).

Dağıtılmış BYS, ana-yardımcı kart BYS ile benzer yapı göstermektedir. Buradaki fark yardımcı kartların batarya grubundaki hücre modüllerine değil de tek tek her hücreye direkt olarak bağlanması şeklindedir. Her bir hücreye direkt bağlı olan yardımcı kartlar bir haberleşme ağıyla birbirine ve ana kontrolöre bağlanmaktadır. Yardımcı kartların görevi hücrelerdeki gerilim, akım, sıcaklık vb. verileri almaktadır. Hücreye direkt bağlı olduğu için ölçüm güvenilirliği oldukça yüksektir. Burada ana kontrolörün görevi, yardımcı kartlardan gelen bilgiler doğrultusunda sadece hesaplama ve haberleşme işlemlerini yerine getirmektir. Bu yöntem de her bir hücre için bir yardımcı kart olduğundan dolayı sistemin uygulanması karmaşık ve geniş alan kaplamaktadır. Dahası diğer türler arasında en maliyet olan türdür. Bu yüzden endüstriyel uygulamalarda pek tercih edilmemektedir (Messier vd., 2019).

Literatürde BYS türlerinin kullanıldığı bazı çalışmalar yapılmıştır. Stuart vd. (2002), elektronik kontrol birimi ve hücre dengelemeden oluşan geleneksel bir BYS türünün blok diyagramını vermişlerdir. Ancak bu geleneksel yöntemin ucuz olması ve karmaşık olmaması gibi avantajları olsa da EA’lar gibi büyük batarya gurubunun gereksinimlerini karşılamakta yetersiz olduğunu vurgulamışlardır. Bu yüzden daha ucuz, daha hafif, daha az yer kaplayan ve birkaç değişik batarya türüne uygulanabilecek parçalı bir BYS sistemi önermişlerdir. Steinhorst vd. (2016), dağıtılmış ve yeniden yapılandırılabilir bir BYS türü önermişlerdir. Çalışma 2 boyutlu olarak geliştirilmiştir. Birinci boyutta merkezi ve dağıtılmış BYS türlerine göre sınıflandırma yapılırken, ikinci boyutta sabit ve yeniden yapılandırılabilir sistem olarak sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırma sonucunda dağıtılmış ve yeniden yapılandırılabilir BYS türünün zorluklarının çözülmesi halinde gelecekteki batarya gruplarında tercih edilen bir BYS türü olabileceğini belirtmişlerdir. Steinhorst vd. (2014) diğer bir çalışmada ise merkezi BYS yerine, her bir hücreye monte edilmiş bir hücre yönetim birimi ile gömülü bir batarya yönetim türü önermişlerdir. Bu tür, dağıtılmış BYS türü olarak kullanılmış ve merkezi BYS’ye göre önemli üstünlüklerinin olduğu vurgulanmıştır. Zhu vd. (2013), dağıtılmış BYS türü üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Sistemin bağlantı kablo sayısının azalttığı ve esnek çalıştığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, önerdikleri BYS türünün bataryanın durum bilgisi verilerini güvenilir bir şekilde ölçebildiğini ve EA’ların güvenilir bir şekilde çalışmasına destek vereceği bildirmişlerdir. Stuart ve Zhu (2011), parçalanmış bir BYS türünü önermişlerdir. Önerdikleri sistemin ticari elektrikli araçlarda veya havacılık uygulamalarında kullanılacak büyük batarya gruplarını yönetmek için görece olarak basit ancak doğru bir sonuç verecek bir sistem olduğunu vurgulamışlardır. BYS türleri için en kapsamlı ve bilgilendirici çalışma Andrea (2010) tarafından yapılmıştır. Kitabında BYS türleri hakkında genel bilgiler, gösterimler, bazı avantaj ve dezavantajları sunmuştur.

BYS türlerinin kendi içerisinde bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Derlenen çalışmalardan yola çıkarak BYŞ türleri bazı nitelikler bakımından karşılaştırılmıştır (Andrea, 2010; Kong vd., 2017; Saw vd., 2016; Steinhorst vd., 2016, 2014; T. Stuart vd., 2002; T. A. Stuart ve Zhu, 2011). Bu nitelikler Tablo 7’de verildiği üzere; karmaşıklık düzeyi (KD), (yüksek 1, orta 2, düşük 3), maliyet (M) (ucuz 3, orta 2, pahalı 1), ölçüm kalitesi (ÖK) (Yüksek 3, orta 2, düşük 1), bakım (B) (kolay 3, orta 2, zor 1), işlemciye yüklenme (İY) (Yüksek 1, orta 2, düşük 3), haberleşme süresi (HS) (Yüksek 3, orta 2, düşük 1) ve güvenilirlik (G) (Yüksek 3, orta 2, düşük 1) olarak belirlenmiştir. Her bir nitelik kendi içerisinde kullanıcının yararı doğrultusunda 1, 2 ve 3 puanları verilmiştir. Daha sonra her bir türün niteliklerinden aldığı puanlar toplanıp, nitelik sayısına bölünmek suretiyle bir ortalama elde edilmiştir. Alınan bu ortalamanın yüzdeler olarak hesaplanması yapıp BYŞ türlerinin uygunluk oranları elde edilmiştir. Elde edilen verilere göre her ne kadar maliyet ve haberleşme süresi bakımından düşük puan almışsa da EA’lar için en uygun ve güvenli türün dağıtılmış BYŞ türü olduğu sonucuna varılmıştır.

**Tablo 7. BYŞ Türlerinin Nitelik Bakımından Karşılaştırılması**

BYŞ türü	KD	M	ÖK	B	İY	HS	G	Ortalama	Yüzdeler
<b>Merkezi BYŞ</b>	1	3	2	1	1	3	1	1,71	%57
<b>Parçalı BYŞ</b>	2	1	2	1	2	2	1	1,57	%52
<b>Ana-Yrd. kart BYŞ</b>	1	1	2	1	2	2	1	1,43	%48
<b>Dağıtılmış BYŞ</b>	2	1	3	2	3	1	3	2,14	%71

## 5. SONUÇ

Ulaşım sektörü kaynaklı sera gazı salınımları, çevre kirlenmesi, küresel ısınmaya sebep vb. durumlarından dolayı geleneksel içten yanmalı motorlu araçların yerine alternatif bir kaynak olan elektrikli araçlar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Özellikle bataryalı elektrikli araçlar yolda iken tamamıyla temiz, sessiz ve çevre dostu bir hizmet sunmaktadır. Ancak bataryaların enerji kapasitesi araca güç aktarımı açısından sınırlı bir çalışma aralığı sunmaktadır. Bundan dolayı mevcut batarya sistemlerinin daha verimli ve daha güvenli çalışması için bir batarya yönetim sistemine ihtiyaç duyulması kaçınılmaz olmuştur. Bu alandaki akademik çalışmalar, araştırma-geliştirme çalışmaları birçok yerli-yabancı araştırmacılar tarafından yapılmaktadır. Ülkemizde de özellikle TOGG girişiminin başlanması ve geleceğin ulaşım araçları olacak elektrikli araçlar ile ilgili kaynak, kavram ve araştırmaların Türkçe literatüründe çokça yer alması gerektiği düşünülmektedir. Bu çalışma elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi ile ilgili detaylı bir derleme çalışmasının Türkçe literatürüne katkı sağlaması amacıyla yapılmıştır. Çalışma da genel olarak elektrikli araçların gerekliliği, tarihçesi, bir enerji kaynağı olarak kullanılan bataryaların işlevinden ve zorluklarından dolayı bir batarya yönetim sisteminin gerekliliğinden bahsedilmiştir.

Bu çalışmada batarya yönetim sistemleri ile ilgili literatürde var olan araştırma, derleme çalışmaları incelenmiş ve derlenmiştir. BYŞ alt gruplarında olan hücre izleme, bataryanın güvenliği, koruması, bataryanın dış-iç birimlerle haberleşmesi, bataryalarda hücre dengeleme, batarya durum kestirimleri, batarya termal yönetimi ve batarya türleri ile ilgili literatürde var olan çalışmalar derlenmiş ve kapsamlı bilgiler sunulmuştur. Özellikle hücre dengeleme, durum kestirimleri, termal yönetim ve BYŞ türleri ile ilgili yöntemlerin avantaj-dezavantajları sunulmuş ve nitelik bakımından karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Bu derleme çalışması BYŞ hakkında araştırma ve çalışma yapmak isteyen araştırmacılar, üreticiler, firmalar vb. için genel bir bakış açısı kazandıracağı ve literatüre daha çok hâkim olmaya yardımcı olacaktır. Bu çalışmayla beraber, yapılacak herhangi BYŞ sistemi için hangi kavramlar, kriterler, avantaj-dezavantajlar olduğu ve buna göre sistemin kurulması adına bir yol haritası olarak, Türkçe literatürüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

**KAYNAKLAR**

- Adany, R., Aurbach, D., & Kraus, S. (2013). Switching algorithms for extending battery life in Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 231, 50-59. doi:[10.1016/j.jpowsour.2012.12.075](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.075)
- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B., & Sözen, F. (2020). Elektrikli Araç İçin Düşük Maliyetli Bir Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Special Issue 2020 (HORA)*, 227-238. doi:[10.31590/ejosat.779720](https://doi.org/10.31590/ejosat.779720)
- Al-Hallaj, S., & Selman, J. R. (2002). Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 110(2), 341-348. doi:[10.1016/S0378-7753\(02\)00196-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00196-9)
- Alvarez Anton, J. C., Garcia Nieto, P. J., Blanco Viejo, C., & Vilan Vilan, J. A. (2013). Support Vector Machines Used to Estimate the Battery State of Charge. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5919-5926. doi:[10.1109/TPEL.2013.2243918](https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2243918)
- Álvarez Antón, J. C., García Nieto, P. J., de Cos Juez, F. J., Sánchez Lasheras, F., González Vega, M., & Roqueñi Gutiérrez, M. N. (2013). Battery state-of-charge estimator using the SVM technique. *Applied Mathematical Modelling*, 37(9), 6244-6253. doi:[10.1016/j.apm.2013.01.024](https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.01.024)
- Amir, U., Tao, L., Zhang, X., Saeed, M., & Hussain, M. (2018). A Novel SOC Estimation Method for Lithium Ion Battery Based On Improved Adaptive PI Observer. 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 1-5. doi:[10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607386](https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607386)
- Andrea, D. (2010). Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs. Artech house.
- Ariantara, B., Putra, N., & Supriadi, S. (2018). Battery thermal management system using loop heat pipe with LTP copper capillary wick. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 105(1), 012045. doi:[10.1088/1755-1315/105/1/012045](https://doi.org/10.1088/1755-1315/105/1/012045)
- Arora, S. (2018). Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies. *Journal of Power Sources*, 400, 621-640. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.08.020](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.020)
- Aydın, S., Gümüş, R., & Akçay, İ. H. (2013). Yakıt Pili ile Çalışan Elektrikli Bir Aracın Güç , Sıcaklık , Bağlı Nem ve Hızının Anlık Olarak İzlenmesi ve Kontrolü. *Teknik Bilimler Dergisi*, 3(2), 7-12.
- Bahiraei, F., Fartaj, A., & Nazri, G. A. (2016). Numerical Investigation of Active and Passive Cooling Systems of a Lithium-Ion Battery Module for Electric Vehicles. SAE Technical Papers, 2016-01-0655. doi:[10.4271/2016-01-0655](https://doi.org/10.4271/2016-01-0655)
- Balogopal, B., & Chow, M. Y. (2015). The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium Ion batteries. Proceeding - 2015 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2015, 2, 1302-1307. doi:[10.1109/INDIN.2015.7281923](https://doi.org/10.1109/INDIN.2015.7281923)
- Bandhauer, T. M., & Garimella, S. (2013). Passive, internal thermal management system for batteries using microscale liquid-vapor phase change. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 756-769. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2013.08.004](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.004)
- Barai, A., Uddin, K., Widanalage, W. D., McGordon, A., & Jennings, P. (2016). The effect of average cycling current on total energy of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 303, 81-85. doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.10.095](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.10.095)
- Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., & Riu, D. (2013). A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 241, 680-689. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.05.040](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.040)
- Berecibar, M., Gandiaga, I., Villarreal, I., Omar, N., Van Mierlo, J., & Van Den Bossche, P. (2016). Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 572-587. doi:[10.1016/j.rser.2015.11.042](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.042)

- Campestrini, C., Heil, T., Kosch, S., & Jossen, A. (2016). A comparative study and review of different Kalman filters by applying an enhanced validation method. *Journal of Energy Storage*, 8, 142-159. doi:[10.1016/j.est.2016.10.004](https://doi.org/10.1016/j.est.2016.10.004)
- Cao, J., Schofield, N., & Emadi, A. (2008). Battery balancing methods: A comprehensive review. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008, 3-8. doi:[10.1109/VPPC.2008.4677669](https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677669)
- Carter, J., Fan, Z., & Cao, J. (2020). Cell equalisation circuits: A review. *Journal of Power Sources*, 448, 227489. doi:[10.1016/j.jpowsour.2019.227489](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227489)
- Chan, C. C. (2013). The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned [Scanning Our Past]. *Proceedings of the IEEE*, 101(1), 206-212. doi:[10.1109/JPROC.2012.2228370](https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2228370)
- Chau, K. T., Wu, K. C., & Chan, C. C. (2004). A new battery capacity indicator for lithium-ion battery powered electric vehicles using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), 1681-1692. doi:[10.1016/j.enconman.2003.09.031](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.031)
- Chemali, E., Kollmeyer, P. J., Preindl, M., & Emadi, A. (2018). State-of-charge estimation of Li-ion batteries using deep neural networks: A machine learning approach. *Journal of Power Sources*, 400, 242-255. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.06.104](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.06.104)
- Chen, L., Wang, Z., Lu, Z., Li, J., Ji, B., Wei, H., & Pan, H. (2018). A Novel State-of-Charge Estimation Method of Lithium-Ion Batteries Combining the Grey Model and Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(10), 8797-8807. doi:[10.1109/TPEL.2017.2782721](https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2782721)
- Chen, X., Shen, W. X., Cao, Z., & Kapoor, A. (2012). Sliding Mode Observer for State of Charge Estimation Based on Battery Equivalent Circuit in Electric Vehicles. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 9(3), 225-234. doi:[10.1080/1448837X.2012.11464327](https://doi.org/10.1080/1448837X.2012.11464327)
- Chen, Xiaopeng, Shen, W., Cao, Z., & Kapoor, A. (2014a). A novel approach for state of charge estimation based on adaptive switching gain sliding mode observer in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 246, 667-678. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.08.039](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.039)
- Chen, Xiaopeng, Shen, W., Cao, Z., & Kapoor, A. (2014b). Adaptive gain sliding mode observer for state of charge estimation based on combined battery equivalent circuit model. *Computers & Chemical Engineering*, 64, 114-123. doi:[10.1016/j.compchemeng.2014.02.015](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.02.015)
- Chen, Zewang, Yang, L., Zhao, X., Wang, Y., & He, Z. (2019). Online state of charge estimation of Li-ion battery based on an improved unscented Kalman filter approach. *Applied Mathematical Modelling*, 70, 532-544. doi:[10.1016/j.apm.2019.01.031](https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.01.031)
- Chen, Zheng, Fu, Y., & Mi, C. C. (2013). State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles Using Extended Kalman Filtering. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(3), 1020-1030. doi:[10.1109/TVT.2012.2235474](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2235474)
- Chen, Zonghai, Sun, H., Dong, G., Wei, J., & Wu, J. (2019). Particle filter-based state-of-charge estimation and remaining-dischargeable-time prediction method for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 414, 158-166. doi:[10.1016/j.jpowsour.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.012)
- Choudhari, V. G., Dhoble, D. A. S., & Sathe, T. M. (2020). A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 32, 101729. doi:[10.1016/j.est.2020.101729](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101729)
- Choudhury, J. R., Banerjee, T. P., Gurung, H., Bhattacharjee, A. K., & Das, S. (2009). Real time state of charge prediction using Kalman Filter. 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), 1190-1194. doi:[10.1109/NABIC.2009.5393786](https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393786)
- Daowd, M., Omar, N., van den Bossche, P., & van Mierlo, J. (2012). Capacitor based battery balancing system. *World Electric Vehicle Journal*, 5(2), 385-393. doi:[10.3390/wevj5020385](https://doi.org/10.3390/wevj5020385)
- Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2011). Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-7. doi:[10.1109/VPPC.2011.6043010](https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043010)

- Dong, G., Wei, J., & Chen, Z. (2016). Kalman filter for onboard state of charge estimation and peak power capability analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 328, 615-626. doi:[10.1016/j.jpowsour.2016.08.065](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.065)
- Dong, G., Zhang, X., Zhang, C., & Chen, Z. (2015). A method for state of energy estimation of lithium-ion batteries based on neural network model. *Energy*, 90, 879-888. doi:[10.1016/j.energy.2015.07.120](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.120)
- Drori, Y., & Martinez, C. (2005). The benefits of cell balancing. Application Note, Xicor Incorporated, 1-9. <http://www.neue-verpackung.de/ai/resources/a03b3cf05d5.pdf>
- Du, J., Liu, Z., Wang, Y., & Wen, C. (2016). An adaptive sliding mode observer for lithium-ion battery state of charge and state of health estimation in electric vehicles. *Control Engineering Practice*, 54, 81-90. doi:[10.1016/j.conengprac.2016.05.014](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.05.014)
- Duong, V.-H., Bastawrous, H. A., Lim, K., See, K. W., Zhang, P., & Dou, S. X. (2015). Online state of charge and model parameters estimation of the LiFePO<sub>4</sub> battery in electric vehicles using multiple adaptive forgetting factors recursive least-squares. *Journal of Power Sources*, 296, 215-224. doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.07.041](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.041)
- Duraisamy, T., & Kaliyaperumal, D. (2020). Active cell balancing for electric vehicle battery management system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(2), 571-579. doi:[10.11591/ijpeds.v11.i2.pp571-579](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp571-579)
- Eddahech, A., Briat, O., & Vinassa, J. M. (2012). Adaptive voltage estimation for EV Li-ion cell based on artificial neural networks state-of-charge meter. 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1318-1324. doi:[10.1109/ISIE.2012.6237281](https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237281)
- Ekici, Y. E. (2019). Batarya yönetim sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye.
- Ekici, Y. E., & Tan, N. (2019). Charge and discharge characteristics of different types of batteries on a hybrid electric vehicle model and selection of suitable battery type for electric vehicles. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 3(4), 62-70. doi:[10.30939/ijastech..527971](https://doi.org/10.30939/ijastech..527971)
- Fang, Y., Xiong, R., & Wang, J. (2018). Estimation of Lithium-Ion Battery State of Charge for Electric Vehicles Based on Dual Extended Kalman Filter. *Energy Procedia*, 152, 574-579. doi:[10.1016/j.egypro.2018.09.213](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.213)
- Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanés-Montero, M. I., & Guerrero-Martinez, M. A. (2014). Battery equalization active methods. *Journal of Power Sources*, 246, 934-949. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.08.026](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.026)
- Gao, M., Liu, Y., & He, Z. (2011). Battery state of charge online estimation based on particle filter. 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing, 2233-2236. doi:[10.1109/CISP.2011.6100603](https://doi.org/10.1109/CISP.2011.6100603)
- Guenther, C., Schott, B., Hennings, W., Waldowski, P., & Danzer, M. A. (2013). Model-based investigation of electric vehicle battery aging by means of vehicle-to-grid scenario simulations. *Journal of Power Sources*, 239, 604-610. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.02.041](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.02.041)
- Hallaj, S. Al, & Selman, J. R. (2000). A Novel Thermal Management System for Electric Vehicle Batteries Using Phase-Change Material. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(9), 3231. doi:[10.1149/1.1393888](https://doi.org/10.1149/1.1393888)
- Hametner, C., & Jakubek, S. (2013). State of charge estimation for Lithium Ion cells: Design of experiments, nonlinear identification and fuzzy observer design. *Journal of Power Sources*, 238, 413-421. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.04.040](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.040)
- Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J., & Ouyang, M. (2019). A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*, 1, 100005. doi:[10.1016/j.etrans.2019.100005](https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005)
- Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., & Mohamed, A. (2017). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 834-854. doi:[10.1016/j.rser.2017.05.001](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001)

- Hansen, T., & Wang, C.-J. (2005). Support vector based battery state of charge estimator. *Journal of Power Sources*, 141(2), 351-358. doi:[10.1016/j.jpowsour.2004.09.020](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.020)
- Hauser, A., & Kuhn, R. (2015). Cell balancing, battery state estimation, and safety aspects of battery management systems for electric vehicles. İçinde: B. Scrosati, J. Garche & W. Tillmetz (Eds.) *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* (ss. 283-326). Elsevier. doi:[10.1016/B978-1-78242-377-5.00012-1](https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-377-5.00012-1)
- He, H. W., Zhang, Y. Z., Xiong, R., & Wang, C. (2015). A novel Gaussian model based battery state estimation approach: State-of-Energy. *Applied Energy*, 151, 41-48. doi:[10.1016/j.apenergy.2015.04.062](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.062)
- He, H., Xiong, R., & Peng, J. (2016). Real-time estimation of battery state-of-charge with unscented Kalman filter and RTOS  $\mu$ COS-II platform. *Applied Energy*, 162, 1410-1418. doi:[10.1016/j.apenergy.2015.01.120](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.120)
- He, H., Zhang, X., Xiong, R., Xu, Y., & Guo, H. (2012). Online model-based estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy*, 39(1), 310-318. doi:[10.1016/j.energy.2012.01.009](https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.009)
- He, W., Williard, N., Chen, C., & Pecht, M. (2013). State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering. *Microelectronics Reliability*, 53(6), 840-847. doi:[10.1016/j.microrel.2012.11.010](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.11.010)
- He, W., Williard, N., Chen, C., & Pecht, M. (2014). State of charge estimation for Li-ion batteries using neural network modeling and unscented Kalman filter-based error cancellation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62, 783-791. doi:[10.1016/j.ijepes.2014.04.059](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.059)
- Hoque, M. M., Hannan, M. A., Mohamed, A., & Ayob, A. (2017). Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1363-1385. doi:[10.1016/j.rser.2016.11.126](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.126)
- Hou, Z. Y., Lou, P. Y., & Wang, C. C. (2017). State of charge, state of health, and state of function monitoring for EV BMS. 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE 2017, 1, 310-311. doi:[10.1109/ICCE.2017.7889332](https://doi.org/10.1109/ICCE.2017.7889332)
- Hu, J. N., Hu, J. J., Lin, H. B., Li, X. P., Jiang, C. L., Qiu, X. H., & Li, W. S. (2014). State-of-charge estimation for battery management system using optimized support vector machine for regression. *Journal of Power Sources*, 269, 682-693. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.016)
- Hu, L., Hu, X., Che, Y., Feng, F., Lin, X., & Zhang, Z. (2020). Reliable state of charge estimation of battery packs using fuzzy adaptive federated filtering. *Applied Energy*, 262, 114569. doi:[10.1016/j.apenergy.2020.114569](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114569)
- Hu, X., Feng, F., Liu, K., Zhang, L., Xie, J., & Liu, B. (2019). State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109334. doi:[10.1016/j.rser.2019.109334](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109334)
- Hu, X., Zheng, Y., Howey, D. A., Perez, H., Foley, A., & Pecht, M. (2020). Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science*, 77, 100806. doi:[10.1016/j.pecs.2019.100806](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806)
- Hu Xiaosong, Sun Fengchun, Zou Yuan, & Peng Huei. (2011). Online estimation of an electric vehicle Lithium-Ion battery using recursive least squares with forgetting. *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, 935-940. doi:[10.1109/ACC.2011.5991260](https://doi.org/10.1109/ACC.2011.5991260)
- Ianniciello, L., Biwolé, P. H., & Achard, P. (2018). Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials. *Journal of Power Sources*, 378, 383-403. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.12.071](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.071)
- Jaguemont, J., Boulon, L., & Dubé, Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, 164, 99-114. doi:[10.1016/j.apenergy.2015.11.034](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034)
- Jaguemont, Joris, & Van Mierlo, J. (2020). A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles. *Journal of Energy Storage*, 31, 101551. doi:[10.1016/j.est.2020.101551](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101551)

- Ji, Y., & Wang, C. Y. (2013). Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures. *Electrochimica Acta*, 107, 664-674. doi:[10.1016/j.electacta.2013.03.147](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.03.147)
- Jiang, C., Taylor, A., Duan, C., & Bai, K. (2013). Extended Kalman Filter based battery state of charge (SOC) estimation for electric vehicles. 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 1-5. doi:[10.1109/ITEC.2013.6573477](https://doi.org/10.1109/ITEC.2013.6573477)
- Jiménez-Bermejo, D., Fraile-Ardanuy, J., Castaño-Solis, S., Merino, J., & Álvaro-Hermana, R. (2018). Using Dynamic Neural Networks for Battery State of Charge Estimation in Electric Vehicles. *Procedia Computer Science*, 130, 533-540. doi:[10.1016/j.procs.2018.04.077](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.077)
- Juang, L. W., Kollmeyer, P. J., Jahns, T. M., & Lorenz, R. D. (2012). Implementation of online battery state-of-power and state-of-function estimation in electric vehicle applications. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012, 1819-1826. doi:[10.1109/ECCE.2012.6342591](https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342591)
- Jun Xu, Mi, C. C., Binggang Cao, Junjun Deng, Zheng Chen, & Siqi Li. (2014). The State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Based on a Proportional-Integral Observer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(4), 1614-1621. doi:[10.1109/TVT.2013.2287375](https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2287375)
- Jung, D. Y., Lee, B. H., & Kim, S. W. (2002). Development of battery management system for nickel-metal hydride batteries in electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 109(1), 1-10. doi:[10.1016/S0378-7753\(02\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00020-4)
- Karabeyoğlu, E. D., Güzel, E., Kılıç, H., Sarıoğlu, B., Gökdel, Y. D., & Serincan, M. F. (2019). Investigation and Design of an Active Cell Balancing System for Li-İon Batteries. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(4), 869-877. doi:[10.21923/jesd.553295](https://doi.org/10.21923/jesd.553295)
- Kim, I.-S. (2006). The novel state of charge estimation method for lithium battery using sliding mode observer. *Journal of Power Sources*, 163(1), 584-590. doi:[10.1016/j.jpowsour.2006.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.006)
- Kıvrak, S., Özer, T., & Oğuz, Y. (2020). Can Bus Based BMS Control Card Design And Implementation By Using STM32f103 Series Microcontroller. *Engineering Sciences*, 15(1), 27-33. doi:[10.12739/NWSA.2020.15.1.1A0448](https://doi.org/10.12739/NWSA.2020.15.1.1A0448)
- Kong, X., Zheng, Y., Ouyang, M., Li, X., Lu, L., & Li, J. (2017). Signal synchronization for massive data storage in modular battery management system with controller area network. *Applied Energy*, 197, 52-62. doi:[10.1016/j.apenergy.2017.04.002](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.002)
- Li, Yanwen, Wang, C., & Gong, J. (2016). A combination Kalman filter approach for State of Charge estimation of lithium-ion battery considering model uncertainty. *Energy*, 109, 933-946. doi:[10.1016/j.energy.2016.05.047](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.047)
- Li, Yi, Liu, K., Foley, A. M., Zülke, A., Berecibar, M., Nanini-Maury, E., Van Mierlo, J., & Hoster, H. E. (2019). Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109254. doi:[10.1016/j.rser.2019.109254](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109254)
- Li, Yigang, Chen, J., & Lan, F. (2020). Enhanced online model identification and state of charge estimation for lithium-ion battery under noise corrupted measurements by bias compensation recursive least squares. *Journal of Power Sources*, 456, 227984. doi:[10.1016/j.jpowsour.2020.227984](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227984)
- Li, Yue, Chattopadhyay, P., Xiong, S., Ray, A., & Rahn, C. D. (2016). Dynamic data-driven and model-based recursive analysis for estimation of battery state-of-charge. *Applied Energy*, 184, 266-275. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.10.025](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.025)
- Li, Zhe, Huang, J., Liaw, B. Y., & Zhang, J. (2017). On state-of-charge determination for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 348, 281-301. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.001)
- Li, Zhenhe, Khajepour, A., & Song, J. (2019). A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles. *Energy*, 182, 824-839. doi:[10.1016/j.energy.2019.06.077](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.077)
- Lin, C., Mu, H., Xiong, R., & Cao, J. (2017). Multi-model probabilities based state fusion estimation method of lithium-ion battery for electric vehicles: State-of-energy. *Applied Energy*, 194, 560-568. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.05.065](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.065)

- Lin, C., Mu, H., Xiong, R., & Shen, W. (2016). A novel multi-model probability battery state of charge estimation approach for electric vehicles using H-infinity algorithm. *Applied Energy*, 166, 76-83. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.01.010](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.010)
- Lipu, M. S. H., Hannan, M. A., Hussain, A., Hoque, M. M., Ker, P. J., Saad, M. H. M., & Ayob, A. (2018). A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 205, 115-133. doi:[10.1016/j.jclepro.2018.09.065](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.065)
- Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304-330. doi:[10.1016/j.enconman.2017.08.016](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016)
- Liu, K., Li, K., Peng, Q., & Zhang, C. (2019). A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), 47-64. doi:[10.1007/s11465-018-0516-8](https://doi.org/10.1007/s11465-018-0516-8)
- Liu, X., Wu, J., Zhang, C., & Chen, Z. (2014). A method for state of energy estimation of lithium-ion batteries at dynamic currents and temperatures. *Journal of Power Sources*, 270, 151-157. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.07.107](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.107)
- Lopez, C. F., Jeevarajan, J. A., & Mukherjee, P. P. (2016). Evaluation of Combined Active and Passive Thermal Management Strategies for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 13(3), 1-10. doi:[10.1115/1.4035245](https://doi.org/10.1115/1.4035245)
- Lu, J., Chen, Z., Yang, Y., & L.V., M. (2018). Online Estimation of State of Power for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Using Genetic Algorithm. *IEEE Access*, 6, 20868-20880. doi:[10.1109/ACCESS.2018.2824559](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824559)
- Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272-288. doi:[10.1016/j.jpowsour.2012.10.060](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060)
- Lu, M., Zhang, X., Ji, J., Xu, X., & Zhang, Y. (2020). Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 101155. doi:[10.1016/j.est.2019.101155](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101155)
- Lukic, S., & Emadi, A. (2008). Charging ahead. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2(4), 22-31. doi:[10.1109/MIE.2008.930361](https://doi.org/10.1109/MIE.2008.930361)
- Ma, Y., Li, B., Xie, Y., & Chen, H. (2016). Estimating the State of Charge of Lithium-ion Battery based on Sliding Mode Observer. *IFAC-PapersOnLine*, 49(11), 54-61. doi:[10.1016/j.ifacol.2016.08.009](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.009)
- Mamadou, K., Lemaire, E., Delaille, A., Riu, D., Hing, S. E., & Bultel, Y. (2012). Definition of a State-of-Energy Indicator (SoE) for Electrochemical Storage Devices: Application for Energetic Availability Forecasting. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(8), A1298-A1307. doi:[10.1149/2.075208jes](https://doi.org/10.1149/2.075208jes)
- Martinez, A. C., Sorlien, D., Goodrich, R., Chandler, L., & Magnuson, D. (2005). Multi-cell Li-Ion Battery Packs. An167. [www.xicor.com](http://www.xicor.com)
- Maskey, M., Patten, M., Vines, D., & Maxwell, T. (1999). Intelligent battery management system for electric and hybrid electric vehicles. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference, VTC 1999-Fall, 2, 1389-1391. doi:[10.1109/vetec.1999.780575](https://doi.org/10.1109/vetec.1999.780575)
- Mastali, M., Vazquez-Arenas, J., Fraser, R., Fowler, M., Afshar, S., & Stevens, M. (2013). Battery state of the charge estimation using Kalman filtering. *Journal of Power Sources*, 239, 294-307. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.03.131](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.131)
- Meissner, E., & Richter, G. (2003). Battery Monitoring and Electrical Energy Management precondition for future vehicle electric power systems. *Journal of Power Sources*, 116(1-2), 79-98. doi:[10.1016/S0378-7753\(02\)00713-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00713-9)



- Meng, J., Ricco, M., Acharya, A. B., Luo, G., Swierczynski, M., Stroe, D.-I., & Teodorescu, R. (2018). Low-complexity online estimation for LiFePO<sub>4</sub> battery state of charge in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 395, 280-288. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.05.082](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.082)
- Messier, P., Lebel, F. A., Rouleau, J., & Trovão, J. P. F. (2019). Multi-cell emulation for battery management system validation. 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 - Proceedings. doi:[10.1109/VPPC.2018.8604959](https://doi.org/10.1109/VPPC.2018.8604959)
- Messier, P., Nguyễn, B. H., LeBel, F. A., & Trovão, J. P. F. (2020). Disturbance observer-based state-of-charge estimation for Li-ion battery used in light electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 101144. doi:[10.1016/j.est.2019.101144](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101144)
- Moore, S. W., & Schneider, P. J. (2001). A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. SAE Technical Papers, 724. doi:[10.4271/2001-01-0959](https://doi.org/10.4271/2001-01-0959)
- Navet, N., Song, Y., Simonot-Lion, F., & Wilwert, C. (2005). Trends in automotive communication systems. *Proceedings of the IEEE*, 93(6), 1204-1222. doi:[10.1109/JPROC.2005.849725](https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.849725)
- Ng, K. S., Moo, C.-S., Chen, Y.-P., & Hsieh, Y.-C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9), 1506-1511. doi:[10.1016/j.apenergy.2008.11.021](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.021)
- Omariba, Z. B., Zhang, L., & Sun, D. (2019). Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles. *IEEE Access*, 7, 129335-129352. doi:[10.1109/ACCESS.2019.2940090](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940090)
- Pan, H., Lü, Z., Lin, W., Li, J., & Chen, L. (2017). State of charge estimation of lithium-ion batteries using a grey extended Kalman filter and a novel open-circuit voltage model. *Energy*, 138, 764-775. doi:[10.1016/j.energy.2017.07.099](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.099)
- Park, S., Ahn, J., Kang, T., Park, S., Kim, Y., Cho, I., & Kim, J. (2020). Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems. *Journal of Power Electronics*, 20(6), 1526-1540. doi:[10.1007/s43236-020-00122-7](https://doi.org/10.1007/s43236-020-00122-7)
- Pesaran, A. (2001). Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions. Advanced Automotive Battery Conference, January 2001, 10.
- Pesaran, A. A., Burch, S., & Keyser, M. (1999). An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs Preprint. The Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition 24-27, January, 1-18.
- Plett, G. L. (2004). Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. *Journal of Power Sources*, 134(2), 252-261. doi:[10.1016/j.jpowsour.2004.02.031](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.031)
- Qaisar, S. M. (2020). Event-Driven Approach for an Efficient Coulomb Counting Based Li-Ion Battery State of Charge Estimation. *Procedia Computer Science*, 168, 202-209. doi:[10.1016/j.procs.2020.02.268](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.268)
- Qi, J., & Dah-Chuan Lu, D. (2014). Review of battery cell balancing techniques. 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings, October, 2-7. doi:[10.1109/AUPEC.2014.6966514](https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966514)
- Qian, K., Huang, B., Ran, A., He, Y. B., Li, B., & Kang, F. (2019). State-of-health (SOH) evaluation on lithium-ion battery by simulating the voltage relaxation curves. *Electrochimica Acta*, 303, 183-191. doi:[10.1016/j.electacta.2019.02.055](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.055)
- Qiu, X., Wu, W., & Wang, S. (2020). Remaining useful life prediction of lithium-ion battery based on improved cuckoo search particle filter and a novel state of charge estimation method. *Journal of Power Sources*, 450, 227700. doi:[10.1016/j.jpowsour.2020.227700](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227700)
- Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., & Chow, M. Y. (2013). Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2), 4-16. doi:[10.1109/MIE.2013.2250351](https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2250351)

- Rajalakshmi, M., & Razia Sultana, W. (2020). Intelligent Hybrid Battery Management System for Electric Vehicle. İçinde A. Chitra, P. Sanjeevikumar, J. B. Holm-Nielsen & S. Himavathi (Eds.) *Artificial Intelligent Techniques for Electric and Hybrid Electric Vehicles* (ss. 179-206). Wiley. doi:[10.1002/9781119682035.ch10](https://doi.org/10.1002/9781119682035.ch10)
- Ramadan, H. S., Becherif, M., & Claude, F. (2017). Extended kalman filter for accurate state of charge estimation of lithium-based batteries: a comparative analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(48), 29033-29046. doi:[10.1016/j.ijhydene.2017.07.219](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.219)
- Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571. doi:[10.1016/j.rser.2011.07.096](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096)
- Rezvanizani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., & Lee, J. (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of Power Sources*, 256, 110-124. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.01.085](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.085)
- Rivera-Barrera, J., Muñoz-Galeano, N., & Sarmiento-Maldonado, H. (2017). SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges. *Electronics*, 6(4), 102. doi:[10.3390/electronics6040102](https://doi.org/10.3390/electronics6040102)
- Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2008). Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution. *Journal of Power Sources*, 182(2), 630-638. doi:[10.1016/j.jpowsour.2008.03.082](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.082)
- Salkind, A. J., Fennie, C., Singh, P., Atwater, T., & Reisner, D. E. (1999). Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology. *Journal of Power Sources*, 80(1-2), 293-300. doi:[10.1016/S0378-7753\(99\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00079-8)
- Saraf, P. (2012). The Traditional and New Generation in-vehicle Networks in Automotive Field. *International Conference on Advances in Computer, Electronics and Electrical Engineering*, March, 978-981. doi:[10.3850/978-981-07-1847-3](https://doi.org/10.3850/978-981-07-1847-3)
- Sarikurt, T., & Balıkcı, A. (2017). Tam elektrikli araçlar için özgün bir enerji yönetim sistemi uygulaması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 323--333. doi:[10.17341/gazimmfd.322153](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.322153)
- Saw, L. H., Ye, Y., & Tay, A. A. O. (2016). Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. *Journal of Cleaner Production*, 113, 1032-1045. doi:[10.1016/j.jclepro.2015.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.011)
- Shen, M., & Gao, Q. (2019). A review on battery management system from the modeling efforts to its multiapplication and integration. *International Journal of Energy Research*, 43(10), 5042-5075. doi:[10.1002/er.4433](https://doi.org/10.1002/er.4433)
- Shen, P., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., & Feng, X. (2018). The co-estimation of state of charge, state of health, and state of function for lithium-ion batteries in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 92-103. doi:[10.1109/TVT.2017.2751613](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2751613)
- Shen, Y. (2010). Adaptive online state-of-charge determination based on neuro-controller and neural network. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 1093-1098. doi:[10.1016/j.enconman.2009.12.015](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.015)
- Shen, Y. (2018a). A chaos genetic algorithm based extended Kalman filter for the available capacity evaluation of lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 264, 400-409. doi:[10.1016/j.electacta.2018.01.123](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.123)
- Shen, Y. (2018b). Improved chaos genetic algorithm based state of charge determination for lithium batteries in electric vehicles. *Energy*, 152, 576-585. doi:[10.1016/j.energy.2018.03.174](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.174)
- Shen, Y. (2018c). Adaptive extended Kalman filter based state of charge determination for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 283, 1432-1440. doi:[10.1016/j.electacta.2018.07.078](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.078)
- Sheng, H., & Xiao, J. (2015). Electric vehicle state of charge estimation: Nonlinear correlation and fuzzy support vector machine. *Journal of Power Sources*, 281, 131-137. doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.01.145](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.145)
- Shrivastava, P., Soon, T. K., Idris, M. Y. I. Bin, & Mekhilef, S. (2019). Overview of model-based online state-of-charge estimation using Kalman filter family for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109233. doi:[10.1016/j.rser.2019.06.040](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.040)

- Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Heyst, B. Van. (2018). A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. *Journal of Power Sources*, 401, 224-237. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.08.094](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.094)
- Singh, P., Fennie, C., & Reisner, D. (2004). Fuzzy logic modelling of state-of-charge and available capacity of nickel/metal hydride batteries. *Journal of Power Sources*, 136(2), 322-333. doi:[10.1016/j.jpowsour.2004.03.035](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.03.035)
- Singh, P., Vinjamuri, R., Wang, X., & Reisner, D. (2006). Design and implementation of a fuzzy logic-based state-of-charge meter for Li-ion batteries used in portable defibrillators. *Journal of Power Sources*, 162(2), 829-836. doi:[10.1016/j.jpowsour.2005.04.039](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.04.039)
- Steinhorst, S., Lukasiwycz, M., Narayanaswamy, S., Kauer, M., & Chakraborty, S. (2014). Smart cells for embedded battery management. Proceedings - 2nd IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, CPSNA 2014, 59-64. doi:[10.1109/CPSNA.2014.22](https://doi.org/10.1109/CPSNA.2014.22)
- Steinhorst, S., Shao, Z., Chakraborty, S., Kauer, M., Li, S., Lukasiwycz, M., Narayanaswamy, S., Rafique, M. U., & Wang, Q. (2016). Distributed reconfigurable Battery System Management Architectures. Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC, 25-28 Jan, 429-434. doi:[10.1109/ASPDAC.2016.7428049](https://doi.org/10.1109/ASPDAC.2016.7428049)
- Stuart, T. A., & Zhu, W. (2011). Modularized battery management for large lithium ion cells. *Journal of Power Sources*, 196(1), 458-464. doi:[10.1016/j.jpowsour.2010.04.055](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.04.055)
- Stuart, T., Fang, F., Wang, X., Ashtiani, C., & Pesaran, A. (2002). A modular battery management system for HEVs. SAE Technical Papers, 111, 777-785. doi:[10.4271/2002-01-1918](https://doi.org/10.4271/2002-01-1918)
- Sun, F., Hu, X., Zou, Y., & Li, S. (2011). Adaptive unscented Kalman filtering for state of charge estimation of a lithium-ion battery for electric vehicles. *Energy*, 36(5), 3531-3540. doi:[10.1016/j.energy.2011.03.059](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.059)
- Teng, H., & Yeow, K. (2012). Design of direct and indirect liquid cooling systems for high-capacity, high-power lithium-ion battery packs. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 1(2), 525-536. doi:[10.4271/2012-01-2017](https://doi.org/10.4271/2012-01-2017)
- Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Arıcı, M., Wang, C., Zhao, W., Hwang, J.-Y., & Saidur, R. (2020). A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101771. doi:[10.1016/j.est.2020.101771](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771)
- Tian, H., Qin, P., Li, K., & Zhao, Z. (2020). A review of the state of health for lithium-ion batteries: Research status and suggestions. *Journal of Cleaner Production*, 261, 120813. doi:[10.1016/j.jclepro.2020.120813](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120813)
- Tian, Y., Xia, B., Sun, W., Xu, Z., & Zheng, W. (2014). A modified model based state of charge estimation of power lithium-ion batteries using unscented Kalman filter. *Journal of Power Sources*, 270, 619-626. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.07.143](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.143)
- Ting, T. O., Man, K. L., Lim, E. G., & Leach, M. (2014). Tuning of Kalman Filter Parameters via Genetic Algorithm for State-of-Charge Estimation in Battery Management System. *The Scientific World Journal*, 2014, 176052. doi:[10.1155/2014/176052](https://doi.org/10.1155/2014/176052)
- TOGG Press Release. (2020). 'More Than a Factory' Construction starts at TOGG Gemlik. (Accessed:18/09/2020) <https://www.togg.com.tr/Dosyalar/Press/togg-construction-pr.pdf>
- Ungurean, L., Cârstoiu, G., Micea, M. V., & Groza, V. (2017). Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices. *International Journal of Energy Research*, 41(2), 151-181. doi:[10.1002/er.3598](https://doi.org/10.1002/er.3598)
- Urbain, M., Rael, S., Davat, B., & Desprez, P. (2007). State Estimation of a Lithium-Ion Battery Through Kalman Filter. 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2804-2810. doi:[10.1109/PESC.2007.4342463](https://doi.org/10.1109/PESC.2007.4342463)
- Väyrynen, A., & Salminen, J. (2012). Lithium ion battery production. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 46, 80-85. doi:[10.1016/j.jct.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jct.2011.09.005)

- Waag, W., Fleischer, C., & Sauer, D. U. (2014). Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 258, 321-339. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.02.064](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.064)
- Wang, Q., Jiang, B., Li, B., & Yan, Y. (2016). A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106-128. doi:[10.1016/j.rser.2016.05.033](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.033)
- Wang, S.-L., Fernandez, C., Zou, C.-Y., Yu, C.-M., Li, X.-X., Pei, S.-J., & Xie, W. (2018). Open circuit voltage and state of charge relationship functional optimization for the working state monitoring of the aerial lithium-ion battery pack. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1090-1104. doi:[10.1016/j.jclepro.2018.07.030](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.030)
- Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., & Chen, Z. (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110015. doi:[10.1016/j.rser.2020.110015](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110015)
- Wang, Y., Zhang, C., & Chen, Z. (2016). An adaptive remaining energy prediction approach for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 305, 80-88. doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.11.087](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.11.087)
- Wei, J., Dong, G., & Chen, Z. (2017). On-board adaptive model for state of charge estimation of lithium-ion batteries based on Kalman filter with proportional integral-based error adjustment. *Journal of Power Sources*, 365, 308-319. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.08.101](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.101)
- Wu, S., Xiong, R., Li, H., Nian, V., & Ma, S. (2020). The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather. *Journal of Energy Storage*, 27, 101059. doi:[10.1016/j.est.2019.101059](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101059)
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182, 262-281. doi:[10.1016/j.enconman.2018.12.051](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051)
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Ke, X., Wang, Z., Situ, W., Li, X., & Zhang, J. (2016). An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for power battery pack. *Energy*, 113, 909-916. doi:[10.1016/j.energy.2016.07.119](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.119)
- Xia, B., Chen, C., Tian, Y., Sun, W., Xu, Z., & Zheng, W. (2014). A novel method for state of charge estimation of lithium-ion batteries using a nonlinear observer. *Journal of Power Sources*, 270, 359-366. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.07.103](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.103)
- Xia, B., Lao, Z., Zhang, R., Tian, Y., Chen, G., Sun, Z., Wang, W., Sun, W., Lai, Y., Wang, M., & Wang, H. (2017). Online Parameter Identification and State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Based on Forgetting Factor Recursive Least Squares and Nonlinear Kalman Filter. *Energies*, 11(1), 3. doi:[10.3390/en11010003](https://doi.org/10.3390/en11010003)
- Xia, B., Zhang, Z., Lao, Z., Wang, W., Sun, W., Lai, Y., & Wang, M. (2018). Strong Tracking of a H-Infinity Filter in Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation. *Energies*, 11(6), 1481. doi:[10.3390/en11061481](https://doi.org/10.3390/en11061481)
- Xia, G., Cao, L., & Bi, G. (2017). A review on battery thermal management in electric vehicle application. *Journal of Power Sources*, 367, 90-105. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.09.046](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.046)
- Xing, Y., He, W., Pecht, M., & Tsui, K. L. (2014). State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures. *Applied Energy*, 113, 106-115. doi:[10.1016/j.apenergy.2013.07.008](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.008)
- Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L., & Pecht, M. (2011). Battery management systems in electric and hybrid vehicles. *Energies*, 4(11), 1840-1857. doi:[10.3390/en4111840](https://doi.org/10.3390/en4111840)
- Xiong, R. (2020). Battery Management Algorithm for Electric Vehicles. İçinde Battery Management Algorithm for Electric Vehicles. Springer Singapore. doi:[10.1007/978-981-15-0248-4](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0248-4)
- Xiong, R., Gong, X., Mi, C. C., & Sun, F. (2013). A robust state-of-charge estimator for multiple types of lithium-ion batteries using adaptive extended Kalman filter. *Journal of Power Sources*, 243, 805-816. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.06.076](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.076)

- Xiong, R., Li, L., & Tian, J. (2018). Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. *Journal of Power Sources*, 405(5), 18-29. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.10.019](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.019)
- Xiong, R., Yu, Q., & Wang, L. Y. (2017). Open circuit voltage and state of charge online estimation for lithium ion batteries. *Energy Procedia*, 142, 1902-1907. doi:[10.1016/j.egypro.2017.12.388](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.388)
- Xiong, R., Yu, Q., Wang, L. Y., & Lin, C. (2017). A novel method to obtain the open circuit voltage for the state of charge of lithium ion batteries in electric vehicles by using H infinity filter. *Applied Energy*, 207, 346-353. doi:[10.1016/j.apenergy.2017.05.136](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.136)
- Yang, D., Wang, Y., Pan, R., Chen, R., & Chen, Z. (2017). A Neural Network Based State-of-Health Estimation of Lithium-ion Battery in Electric Vehicles. *Energy Procedia*, 105, 2059-2064. doi:[10.1016/j.egypro.2017.03.583](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.583)
- Yang, D., Wang, Y., Pan, R., Chen, R., & Chen, Z. (2018). State-of-health estimation for the lithium-ion battery based on support vector regression. *Applied Energy*, 227, 273-283. doi:[10.1016/j.apenergy.2017.08.096](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.096)
- Yang, F., Zhang, S., Li, W., & Miao, Q. (2020). State-of-charge estimation of lithium-ion batteries using LSTM and UKF. *Energy*, 201, 117664. doi:[10.1016/j.energy.2020.117664](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117664)
- Yang, S., Ling, C., Fan, Y., Yang, Y., Tan, X., & Dong, H. (2019). A review of lithium-ion battery thermal management system strategies and the evaluate criteria. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(7), 6077-6107. doi:[10.20964/2019.07.06](https://doi.org/10.20964/2019.07.06)
- Yang, X., Chen, Y., Li, B., & Luo, D. (2020). Battery states online estimation based on exponential decay particle swarm optimization and proportional-integral observer with a hybrid battery model. *Energy*, 191, 116509. doi:[10.1016/j.energy.2019.116509](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116509)
- Yatsui, M. W., & Bai, H. (2011). Kalman filter based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries in hybrid electric vehicles using pulse charging. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-5. doi:[10.1109/VPPC.2011.6042988](https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6042988)
- Ye, M., Guo, H., Xiong, R., & Yu, Q. (2018). A double-scale and adaptive particle filter-based online parameter and state of charge estimation method for lithium-ion batteries. *Energy*, 144, 789-799. doi:[10.1016/j.energy.2017.12.061](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.061)
- Yenigün, M., & Utlü, Z. (2018). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Soğutma Sistemlerinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 59(692), 35-47.
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385. doi:[10.1016/j.rser.2015.04.130](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130)
- Yu, Z., Huai, R., & Xiao, L. (2015). State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using a Kalman filter based on local linearization. *Energies*, 8(8), 7854-7873. doi:[10.3390/en8087854](https://doi.org/10.3390/en8087854)
- Zenati, A., Desprez, P., & Razik, H. (2010). Estimation of the SOC and the SOH of li-ion batteries, by combining impedance measurements with the fuzzy logic inference. IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 1773-1778. doi:[10.1109/IECON.2010.5675408](https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675408)
- Zhang, Q., Cui, N., Li, Y., Duan, B., & Zhang, C. (2020). Fractional calculus based modeling of open circuit voltage of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 100945. doi:[10.1016/j.est.2019.100945](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100945)
- Zhang, S., Guo, X., Dou, X., & Zhang, X. (2020a). A data-driven coulomb counting method for state of charge calibration and estimation of lithium-ion battery. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100752. doi:[10.1016/j.seta.2020.100752](https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100752)
- Zhang, S., Guo, X., Dou, X., & Zhang, X. (2020b). A rapid online calculation method for state of health of lithium-ion battery based on coulomb counting method and differential voltage analysis. *Journal of Power Sources*, 479, 228740. doi:[10.1016/j.jpowsour.2020.228740](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228740)

- Zhang, Xiujuan, Liu, P., & Wang, D. (2011). The design and implementation of smart battery management system balance technology. *Journal of Convergence Information Technology*, 6(5), 108-116. doi:[10.4156/jcit.vol6.issue5.12](https://doi.org/10.4156/jcit.vol6.issue5.12)
- Zhang, Xu, Wang, Y., Liu, C., & Chen, Z. (2018). A novel approach of battery pack state of health estimation using artificial intelligence optimization algorithm. *Journal of Power Sources*, 376, 191-199. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.11.068](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.068)
- Zhao, L., Liu, Z., & Ji, G. (2018). Lithium-ion battery state of charge estimation with model parameters adaptation using  $H_{\infty}$  extended Kalman Filter. *Control Engineering Practice*, 81, 114-128. doi:[10.1016/j.conengprac.2018.09.010](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.09.010)
- Zheng, F., Xing, Y., Jiang, J., Sun, B., Kim, J., & Pecht, M. (2016). Influence of different open circuit voltage tests on state of charge online estimation for lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 183, 513-525. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.09.010](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.010)
- Zhi, L., Peng, Z., Zhifu, W., Qiang, S., & Yinan, R. (2017). State of Charge Estimation for Li-ion Battery Based on Extended Kalman Filter. *Energy Procedia*, 105, 3515-3520. doi:[10.1016/j.egypro.2017.03.806](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.806)
- Zhou, F., Wang, L., Lin, H., & Lv, Z. (2013). High accuracy state-of-charge online estimation of EV/HEV lithium batteries based on Adaptive Wavelet Neural Network. 2013 IEEE ECCE Asia Downunder, 513-517. doi:[10.1109/ECCE-Asia.2013.6579145](https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579145)
- Zhu, H., Wu, Z., Wang, D., & Sun, J. (2013). Design and implementation of distributed battery management system. *Advanced Materials Research*, 608-609, 1039-1042. doi:[10.4028/www.scientific.net/AMR.608-609.1039](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.608-609.1039)
- Zhu, Q., Xiong, N., Yang, M.-L., Huang, R.-S., & Hu, G.-D. (2017). State of Charge Estimation for Lithium-Ion Battery Based on Nonlinear Observer: An  $H_{\infty}$  Method. *Energies*, 10(5), 679. doi:[10.3390/en10050679](https://doi.org/10.3390/en10050679)
- Zhu, R., Duan, B., Zhang, J., Zhang, Q., & Zhang, C. (2020). Co-estimation of model parameters and state-of-charge for lithium-ion batteries with recursive restricted total least squares and unscented Kalman filter. *Applied Energy*, 277, 115494. doi:[10.1016/j.apenergy.2020.115494](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115494)
- Zou, Y., Hu, X., Ma, H., & Li, S. E. (2015). Combined State of Charge and State of Health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 273, 793-803. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.09.146](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.146)



## Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması

### A Review Study on the Characteristics and Advantages of Battery Chemicals Used in Electric Vehicles

Ömer Faruk ÖZCAN<sup>1</sup> , Teoman KARADAĞ<sup>2\*</sup> , Mehmet ALTUĞ<sup>3</sup> , Ömerül Faruk ÖZGÜVEN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Dicle Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

<sup>2</sup> İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

<sup>3</sup> İnönü Üniversitesi, Malatya OSB MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Malatya, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Özet
Elektrikli Araçlar Batarya Kimyaları Bataryalar	Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve temiz enerji kavramının yaygın olarak kullanılmaya başlanması ile birlikte elektrikli araçlar içten yanmalı motora sahip araçların yerini almaktadır. Devletler enerji politikalarını değiştirerek temiz enerji üzerine somut adımlar atmaya başladılar. Bu kapsamda içten yanmalı araçların kullanımını sınırlandırma, yakın gelecekte ise tamamen sonlandırma planları yapmaktadırlar. Elektrikli araçların istenilen seviyeye gelebilmesi için aşması gereken sorunlar vardır. Bu sorunlar az menzil ve yüksek batarya maliyeti olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli araçların menzillerini ve tercih edilebilirliklerini etkileyen en önemli parametre batarya teknolojisidir. Bu sorunların çözümü batarya teknolojilerindeki gelişmelerle doğru orantılıdır. Elektrikli araçların menzilleri batarya kapasiteleri ile doğrudan ilişkili olup, bataryaların yüksek güç yoğunluğuna, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, hızlı şarj-deşarj edilebilmesi ve uzun ömre sahip olması istenir. Dolayısıyla günümüz elektrikli araç araştırma geliştirme çalışmaları bu konu üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada geçmişten günümüze kadar olan batarya kimyaları hakkında detaylı bir çalışma yapılmıştır. Bataryalar için önemli olan kavramlar açıklanarak geçmişte kullanılan ve yeni geliştirilen bataryaların üstün ve zayıf olan yönleri belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda incelenmiş olan pil türlerinden elektrikli araçlarda en çok tercih edilen pil türleri lityum tabanlı piller olan NMC, NCA, LTO, LPF, LMO olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelecek vadeden Li-S, Li-air, Zn-air pilleri ise henüz ticari olarak elektrikli araçlarda kullanılmamaktadır.

Keywords	Abstract
Electric Vehicles Battery Chemistry Batteries	With the rapid depletion of fossil fuels and the widespread use of the concept of clean energy, electric vehicles are replacing vehicles with internal combustion engines. States have started to take concrete steps on clean energy by changing their energy policies. In this context, they plan to limit the use of internal combustion vehicles and to terminate them completely in the near future. There are problems that electric vehicles have to overcome in order to reach the desired level. These problems stand out as low range and high battery cost. The most important parameter affecting the range and preferability of electric vehicles is battery technology. The solution of these problems is directly proportional to the developments in battery technologies. The range of electric vehicles is directly related to the battery capacities, and it is desired that the batteries have high power density, high energy density, fast charge-discharge and long life. Therefore, today's electric vehicle research and development studies have focused on this issue. In this study, a detailed study has been done on battery chemistry from past to present. By explaining the important concepts for batteries, the superior and non-superior aspects of the batteries used in the past and newly developed have been determined. As a result of this study, the most preferred battery types in electric vehicles, among the battery types examined, are lithium-based batteries such as NMC, NCA, LTO, LPF, LMO. Promising Li-s, Li-air, Zn-air and li-batteries are not yet commercially used in electric vehicles.

#### Alıntı / Cite

Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. F. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 276-298.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
Ö. F. Özcan, 0000-0003-1708-5699	Başvuru Tarihi / Submission Date 12.04.2021
T. Karadağ, 0000-0002-7682-7771	Revizyon Tarihi / Revision Date 14.06.2021
M. Altuğ, 0000-0002-4745-9164	Kabul Tarihi / Accepted Date 18.06.2021
Ö. F. Özgüven, 0000-0002-8376-641X	Yayın Tarihi / Published Date 24.06.2021

## 1. GİRİŞ

Enerji tasarrufu ve çevre korumanın endişe yarattığı bir dünyada, elektrikli araç teknolojisinin gelişimi 1800 yıllardan itibaren hız kazanmıştır (Chan, 1993). İlk akü ile çalışan elektrikli araç 1834 yılında içten yanmalı motorlu araçlardan yaklaşık 50 yıl önce icat edilmiştir (Chan, 2007; 2013). 1918 yılına kadar oldukça popüler olan elektrikli araçlar benzinli araçlardan daha fazla tercih edilerek çok sayıda satış yaptı (Young vd., 2013). Benzinli araçların gelişmeye devam etmesi, petrol üretiminin artması ve 1910 yılında Henry Ford'un benzinli araçlar için seri üretime geçmesi, elektrikli araçların ulaşım için kullanımını sona erdirdi. 1933'e kadar elektrikli araç sayısı neredeyse sıfıra düşürüldü.

Elektrikli araçların benzinli muadillerinden geri planda kalmasının nedenleri arasında daha yavaş ve daha pahalı olması, menzilin az olması, o dönemde kullanılan pillerin düşük enerji yoğunluğuna, uzun şarj süresine ve az dayanıklılığa sahip olması gösterilmektedir (Chan, 1993; Nor, 1993; Xiao vd., 2015; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Ayrıca kirlilik ile ilgili çevre sorunları hala öngörülemediğinden, kullanıcılar uygun maliyetli ulaşım ile daha fazla ilgilendiler. İçten yanmalı araçların yakıt dağıtım altyapısının elektrikli araç dağıtım altyapısından fazla olması elektrikli araçların geri planda kalmasını sağlayan bir başka neden olarak gösterilmektedir (Lynch & Salameh, 1997).

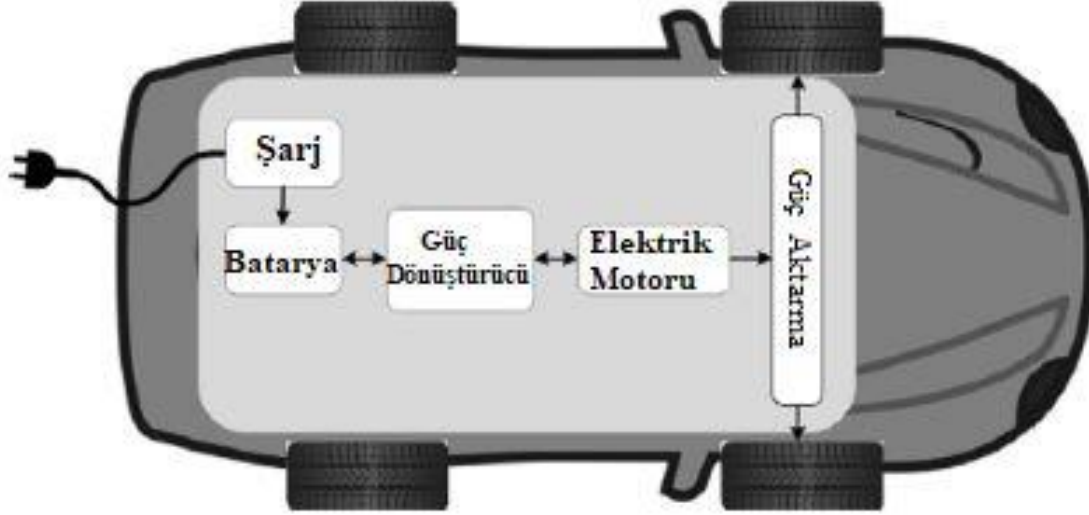
1970 yılların başında yaşanan petrol krizinin ortaya çıkmasıyla birlikte petrol fiyatlarında yaşanan artış, fosil yakıtların sınırlı bir kaynak olmasının farkına varılması elektrikli araçlara olan ilgiyi tekrar arttırmaya başlamıştır (Lukic vd., 2008; Chan, 2013; Muratoğlu & Akkaya, 2015; Xiao vd., 2015). Yaşanan enerji krizinin olumsuz etkileri, fosil yakıtların hızla tükenmeye başlaması, içten yanmalı motorların atmosfere yaydığı zararlı gazlar ve çevre kirliliğinin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar ülkelerin enerji politikalarını değiştirmelerine neden oldu (Chan, 2007; Tinğ vd., 2015). Birçok ülke elektrikli araçların tekrardan gelişimi için yasal düzenlemeler ve özel vergi politikaları uygulamaya başladı (Sun vd., 2020). Bu doğrultuda Fransa ve İngiltere'de 2040 yılına kadar konvansiyonel araçların ülke içi satışlarının kısıtlanması hedeflenmiştir (Li vd., 2019). Ayrıca ABD, Çin, İngiltere ve Japonya'da elektrikli araç teşviki için vergi indirimleri ve kredi desteği uygulanmıştır (Palmer vd., 2018; Li vd., 2019; Sun vd., 2020). Ülkelerin elektrikli araç teşvikleri ve çevreye duyarlı yaklaşımları nedeniyle elektrikli araçlar satışlarının 2030 yılında 130 milyon seviyelerine ulaşması beklenmektedir (Burd vd., 2021).

Elektrikli araç teknolojisi tam elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve yakıt hücreli elektrikli araçlar olarak üç farklı şekilde gelişme göstermiştir (Kisacikoglu vd., 2012; Tinğ vd., 2015; Sun vd., 2020). Elektrikli araçlar içten yanmalı araçlardan farklı olarak çalışmaktadır. Bataryalı elektrik araçların çalışması tamamen batarya ile olup, Şekil 1'de gösterildiği gibi büyük şarj edilebilir bir batarya, bir elektrik motoru, sürücünün gaz pedalından motora elektrik gönderen bir kontrolör ve bir şarj sistemi ile çalışmaktadır (Lynch & Salameh, 1997; Muratoğlu & Akkaya, 2015; Mersky vd., 2016; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Elektrikle çalışan araçların bu parçaları fosil yakıtlı bir aracın içinde bulunan içten yanmalı motor, yakıt deposu, yakıt hattı ve egzoz sisteminin yerini alır. İçten yanmalı motor, fosil yakıtlı bir aracın çalışmasının merkezinde yer alırken, şarj edilebilir elektrikli araçlarda merkezde bulunan ve aracın çalışmasını sağlayan sistem ise bataryalardır.

Hibrit elektrikli araçlarda iki adet güç kaynağı vardır. Bu araçlarda bir içten yanmalı motor ve elektrikli tahrik sistemi birlikte çalışmaktadır. Hibrit araçlar elektrikle çalışan araç pazarındaki en büyük oranı oluştursa da akaryakıttan tamamen bağımsız değildir (Matthews vd., 2017; Sun vd., 2020). Yakıt pilli elektrikli araçların çalışma mantığı diğer elektrikli araçlardan biraz daha farklı olup hidrojen ve oksijenin tepkimesinden yararlanır (Leitman & Brant, 2009). Yakıt hücreli araç, elektrik motorunu çalıştırmak için bir yakıt hücresi veya yakıt hücresinin yanında bir akü kullanan elektrikli araç türüdür (Das vd., 2017; Sun vd., 2020). Hibrit araçlarda bulunan elektrik motoru, içten yanmalı motora seri veya paralel bağlanabilir. Araçta bulunan hibrit güç düzenleyicisinin görevi araç şebeke beslemesini yüksek gerilimli akü ile elektrik motoru arasındaki bağlantıyı yaparak sağlamasıdır. Elektrik motoru enerjisini, yüksek voltajlı lityum iyon pillerden alır. Ayrıca



rejeneratif teknolojili frenleme sistemi sayesinde yavaşlama anında kaybedilen enerjinin bir kısmı geri kazanılarak lityum iyon pilde depolanır. Bu üç farklı araç teknolojisinin ortak noktası araç sisteminde kullanılan ve elektrik enerjisinin kimyasal olarak depolanmasını sağlayan bataryalardır (Ting vd., 2015).



*Şekil 1. Tam Elektrikli Araçların İç Yapısı*

Geçmişte olduğu gibi gelecekteki elektrikli araç konseptlerinin seçiminde en büyük teknolojik zorluk, güçlü ve aynı zamanda düşük maliyetli batarya sistemlerinin geliştirilmesinde yatmaktadır (Frieske vd., 2014). Düşük maliyetli pil hücresi üretimi, elektrikli araçların pazar başarısı için çok önemli olduğundan, öngörülen elektrikli araç büyüme oranlarına göre, pil hücresi üreticileri yeni pil hücresi tesislerine milyarlarca dolar yatırım yapmaktadır (Duffner vd., 2021).

Elektrikli araçlarda kullanılan pillerin yüksek güç yoğunluğuna, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasının yanı sıra hızlı şarj-deşarj edilebilmesi ve uzun ömre sahip olması istenir (Chu & Majumdar, 2012). Pil hücrelerinin bir araya getirilerek oluşturulan batarya sistemi elektrikli araçlarda önemli bir etken olup elektrikli araçların menzilleri pil kapasiteleri ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla daha yüksek enerji kapasiteli pillere olan ihtiyaç giderek artmaktadır (Budde-Meiwes vd., 2013; Ting vd., 2015; Halimah vd., 2019). Ancak günümüzde, hiçbir enerji depolama sistemi hibrit ve tam elektrikli araçların tüm gereksinimlerini karşılayabilecek seviyeye gelememiştir (Khaligh & Li, 2010). Bu nedenle, elektrikli araç endüstrisindeki en büyük zorluk, teknolojiyi en iyi şekilde tamamlayan son teknoloji pil sistemini geliştirmektir (Tie & Tan, 2013). Geçmişten günümüze birçok pil sistemleri mevcut olup, en uygun parametrelerde batarya geliştirmek için çalışmalar sürmektedir. Pek çok ülkede desteklenen Ar-Ge programları hem şarj edilebilir hem de yakıt hücresi tiplerinde gelişmiş yönetim sistemleri, yüksek verimli motorlar ve yüksek enerji yoğunluklu yenilikçi piller geliştirmeyi amaçlamaktadır (Guarnieri, 2011; Sun vd., 2020). Bu makalede geçmişten günümüze kadar olan pil kimyalarının bir literatür taraması yapılmıştır. Kullanılan pillerin üstün ve zayıf olan yönleri detaylı şekilde incelenmiştir.

## 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PİL KİMYALARI

### 2.1. Pillerin Teknik Özellikleri ile İlgili Kavramlar

Elektrikli araçların pil kimyalarının detaylarından bahsetmeden önce bu çalışmada kullanılacak olan pillerin teknik özellikleri ile ilgili kavramlar kısaca anlatılacaktır. Bu tanımlar pil kimyalarının üstün olan ve zayıf olan yönlerini anlamamız için gerekli olan parametreleri kapsamaktadır (Young vd., 2013; Ogura & Kolhe, 2017; Dikmen vd., 2018).

#### 2.1.1. Nominal Gerilim (V)

Pil paketi üzerinde yer alan referans voltaj değeridir. Pilin normal çalışma gerilimidir (Young vd., 2013).

### 2.1.2. Özgül Enerji (Wh kg<sup>-1</sup>)

Ağırlıksal (gravimetrik) enerji yoğunluğu olarak da adlandırılan özgül enerji, bir pilin birim kütle başına ne kadar enerji depolayabileceğini tanımlamak için kullanılır. Kilogram başına Watt-Saat (Wh kg<sup>-1</sup>) olarak ifade edilir. Ayrıca elektrikli bir aracın belirli bir menzil için gerekli olan batarya ağırlığını belirlemek için anahtar parametredir (Ogura & Kolhe, 2017).

### 2.1.3. Özgül Güç (W kg<sup>-1</sup>)

Bir pilin ağırlıksal (gravimetrik) güç yoğunluğu olarak da adlandırılan özgül güç, birim kütle başına tepe gücüdür. W kg<sup>-1</sup> olarak ifade edilir (Young vd., 2013).

### 2.1.4. Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Wh L<sup>-1</sup>)

Birim hacim başına nominal akü enerjisidir (Wh L<sup>-1</sup>). Ayrıca elektrikli bir aracın belirli bir menzil için gerekli olan batarya boyutunu belirlemek için anahtar parametredir (Dikmen vd., 2018).

### 2.1.5. Deşarj Derinliği (Depth of Discharge-DOD) (%)

Akünün tam dolu (%100) durumundan tam boş (%0) durumuna kadar olan deşarj edilme oranıdır. Örneğin %80 deşarj derinliği demek akünün amper-saat olarak belirtilen kapasitesinin %80'ine kadar deşarj edilmesi anlamına gelmektedir (Ogura & Kolhe, 2017; Dikmen vd., 2018).

### 2.1.6. Çevrim Ömrü (Cycle Life)

Akünün belli bir deşarj derinliği seviyesine kadar deşarj ve sonra tam şarj edilmesine bir "çevrim" denir. Akünün çevrim ömrü kullanım süresini yani ekonomik ömrünü belirleyen bir parametredir. Akünün ömrünü belirlemede esas önemli olan süresi değil doldur-boşalt sayısıdır (Ogura & Kolhe, 2017).

### 2.1.7. Kapasite

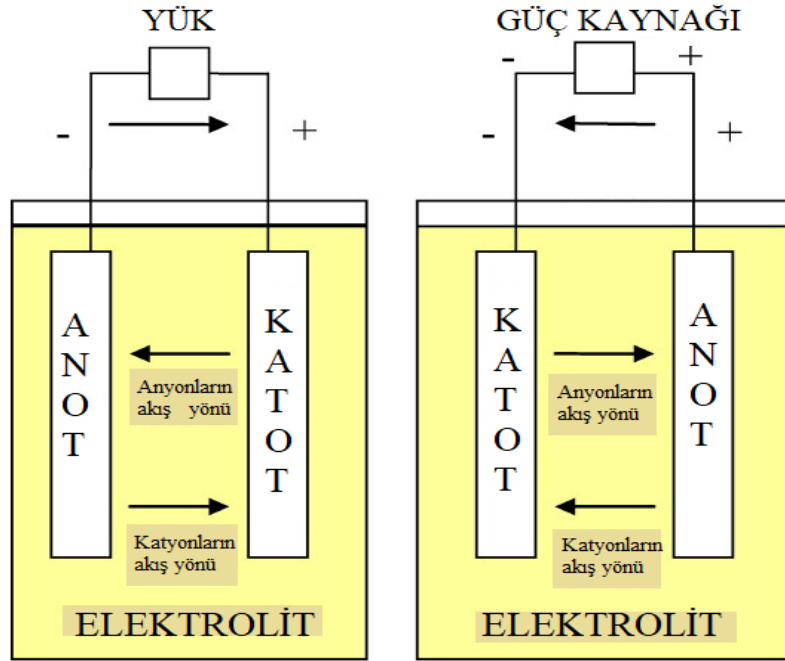
Belirli koşullar altında pilden çıkarılabilecek maksimum enerji miktarını temsil eder. Amper saat (Ah) veya watt saat (Wh) olarak ifade edilebilir ancak ikincisi elektrikli araçlar tarafından daha yaygın olarak kullanılır. Elektrikli araçların, akülerinin kapasitesinin kritik bir yönü olduğu düşünüldüğünde, araçların özerkliğinde doğrudan bir etkisi olduğu için, mümkün olan en kısa sürede daha fazla enerji miktarının depolanmasını sağlayan yeni teknolojilerin ortaya çıkması, bu tür araçların başarısında belirleyici bir faktör olacaktır.

## 2.2. Pil

Pil, depolanan kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluşan bir depolama cihazıdır (Winter & Brodd, 2004; Tie & Tan, 2013). Akünün kimyasal maddelerinde depolanan potansiyel enerjiyi serbest bırakarak elektrik üretirler (Tarascon & Armand, 2001). Şekil 2'de gösterildiği gibi bir pil tipik olarak bir elektrolit, iki elektrot (pozitif ve negatif) ve bir ayırıcıdan (elektriksel olarak yalıtık gözenekli malzeme) oluşur (Lukic vd., 2008; Ramoni & Zhang, 2013). İki elektrot, her ikisi de elektrolit ile bir miktar iyonik bağ halinde kimyasal olarak reaksiyona giren farklı malzemelerden yapılıdır (Armand & Tarascon, 2008; Rahman vd., 2014). Bu elektrotlar harici bir cihaz vasıtasıyla bağlandığında, elektronlar kendiliğinden daha negatif olandan daha pozitif potansiyele akar (Hadjipaschalis vd., 2009; Young vd., 2013). İyonlar, şarj dengesini koruyarak elektrolit yoluyla taşınır ve elektrik enerjisi harici devre tarafından kullanılabilir. İkincil veya şarj edilebilir pillerde meydana gelen şarj işlemi süresince, akım ters yöne akar (Enache vd., 2014; Lu vd., 2016; Can Güven & Gedik, 2019).

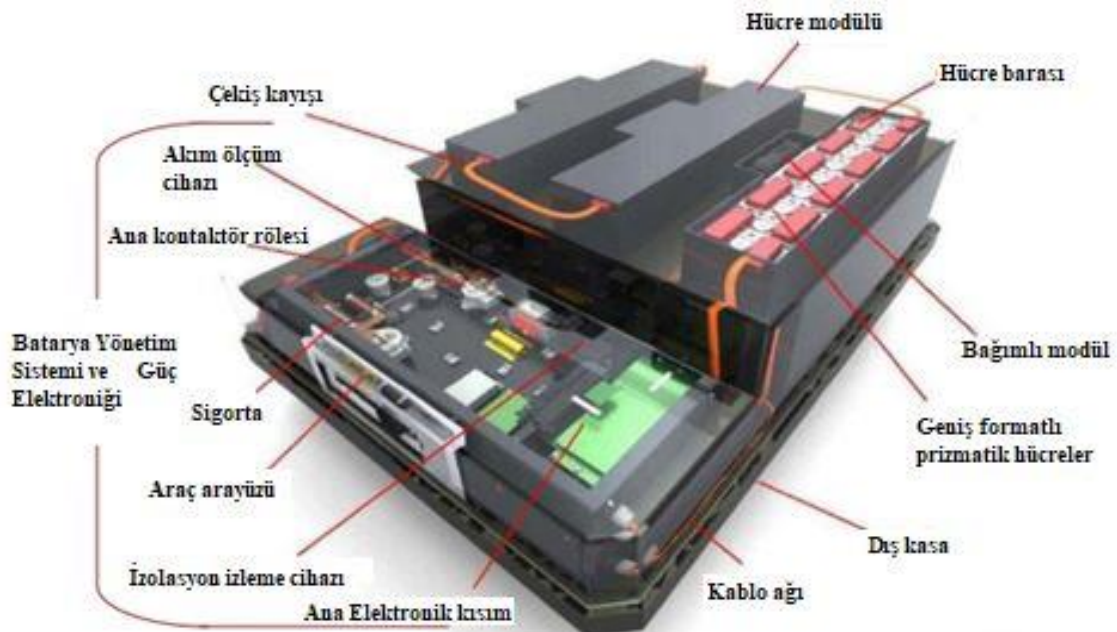
Pil teknolojisinin tasarımındaki temel hususlar tasarım konseptinden dolayı güç yoğunluğuna (W kg<sup>-1</sup>) ve ağırlıksal enerji yoğunluğuna (Wh kg<sup>-1</sup>) bağlıdır. Ancak, pil teknolojisi aynı zamanda enerji verimliliği, çevrim ömrü, maliyet, ağırlık ve şarj özellikleri açısından iyi performans gösterebilmelidir (Omar vd., 2011; Kisacikoglu vd., 2012; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Elektrikli araçlarda kullanılan piller, dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi tüketici elektronik cihazlarında kullanılanlardan oldukça farklıdır (Young vd., 2013).

Elektrikli araçlar için gerekli olan yüksek güç (100 kw'a kadar) ve yüksek enerji kapasitesi uygun boyut, ağırlık ve fiyatta sağlanmalıdır (Young vd., 2013; Vidyanandan, 2019).



Şekil 2. Pil Yapısı

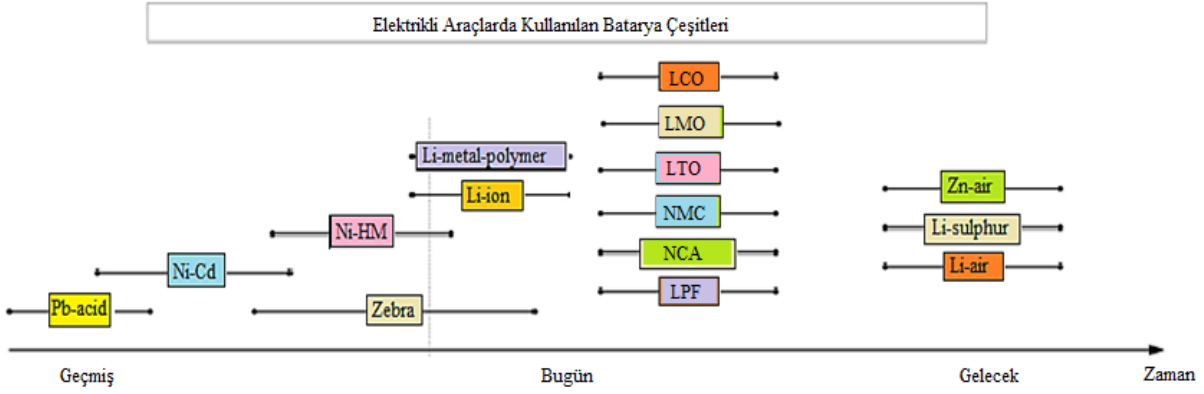
Şekil 3'te, otomotiv akü takımına bir örnek vermektedir. Otomotiv çekiş aküsü sistemleri, bir akü yönetim sistemi tarafından bağlanan ve kontrol edilen akü modülleri ve akü hücrelerinden oluşur. Hücreler, tüm sistemin performansını ve maliyetini önemli ölçüde etkiledikleri için çok önemli bir bileşendir (Duffner vd., 2021). Hücreler nispeten düşük bir voltaja (1,5-4 V arasında) ve sınırlı kapasiteye sahip olduklarından, bu hücreler seri olarak (toplam voltajı kullanılabilir bir seviyeye çıkarmak için) ve paralel olarak düzenlenir. Hücreler, taşıt aktarma organlarının gerektirdiği şekilde, seri ve paralel olarak düzenlenmiş nispeten bağımsız modüllere yerleştirilebilir (Cluzel & Douglas, 2012).



Şekil 3. Otomotiv Akü Takımı

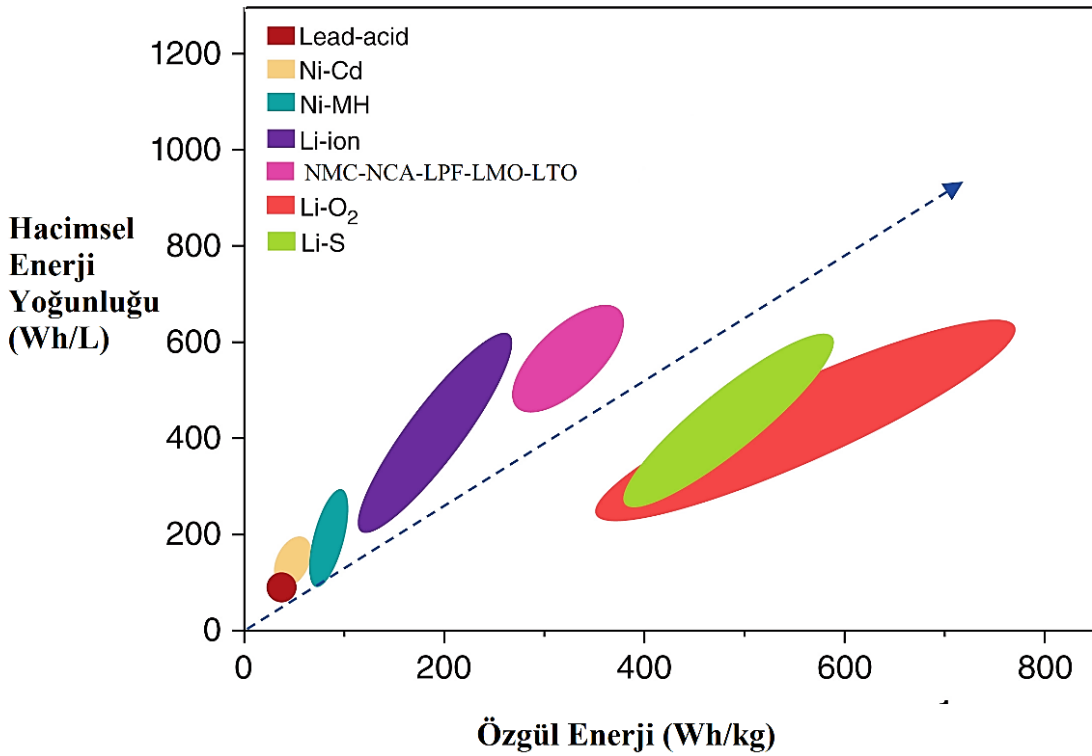
### 3. PİL ÇEŞİTLERİ

Endüstride kullanılan birçok pil çeşidi mevcut olup bu piller plakalarında veya elektrolitlerinde kullanılan malzemeye göre; Kurşun-asit, Nikel metal hibrit (Ni-MH), Nikel kadmiyum (Ni-Cd) ve Lityum iyon (Li-ion) pil olarak sınıflandırılırlar (Chang, 2013). Şekil 4'te elektrikli araçların pil gelişiminin zaman çizelgesini göstermektedir (Catenacci vd., 2013; Yong vd., 2015).



Şekil 4. Elektrikli Araçların Pil Geliştirme Zaman Çizelgesi

Mevcut elektrikli araç pili, elektrikli araçların maksimum menzili doğrudan etkileyen nispeten düşük enerji yoğunluğuna sahiptir (Tie & Tan, 2013). Ancak, elektrikli araçlarda pil teknolojileri son yıllarda büyük gelişmeler göstermiştir. Günümüzde farklı anma voltajı ve enerji yoğunluğuna sahip çeşitli pil teknolojileri bulunmakta olup en uygun parametrelerde pil üretebilmek için farklı kimyalar kullanılarak pil geliştirme çalışmaları devam etmektedir (Muratoğlu & Akkaya, 2015). Şekil 5'te en yaygın pil teknolojilerinin Ragone çizimi gösterilmektedir (Liang vd., 2019).



Şekil 5. Pil Teknolojilerinin Ragone Çizimi

Geçmişte taşımada kullanılan ilk akü teknolojisi kurşun-asit pillerdir. Kurşun asidin adı, elektrik üretmek için kullanılan kurşun elektrotları ve asit kombinasyonundan gelir. Kurşun-asit piller olgunlaşmış bir teknolojidir

ve elektrikli araçlar için maliyet açısından bir değerlendirme yapılırsa enerji depolama konusunda en uygun pil çeşididir (Enache vd., 2014; Miao vd., 2019; Asghar vd., 2021). Ancak enerji yoğunluğunun düşük, ağırlığının fazla olması dezavantaj oluşturmaktadır (Armand & Tarascon, 2008; Yong vd., 2015).

Kurşun-asit piller kısa süre sonra nikel-kadmiyum (Ni-Cd) ve nikel-metal hidrit (Ni-MH) gibi nikel bazlı piller ile değiştirildi. Nikel bazlı pil, nispeten olgunlaşmış teknoloji olarak kabul edilir ve kurşun asit pile kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (Tubb, 1939; Armand & Tarascon, 2008).

Ni-Cd pil teknolojisinin zayıf şarj ve deşarj verimliliği, yüksek kendi kendine deşarj oranı, bellek etkisi ve soğuk havalarda düşük performans gibi önemli dezavantajları vardır (Cluzel & Douglas, 2012). Ni-Cd pilin hafıza etkisi, yüksek şarj ve deşarj oranı elektrikli araç uygulaması için uygun değildir. Aslında, Ni-Cd pili, bileşenlerinin toksisitesi nedeniyle yasaklanmıştır (Catenacci vd., 2013). Düşük şarj verimliliği, ayda %20'ye kadar çok yüksek kendi kendine deşarj oranı, uzun şarj olma süreleri ve pilin kullanılmadığı zamanlarda kendini boşaltması gibi olumsuz yönleri sebebiyle elektrikli araç uygulamalarında Ni-Cd pillerin kullanımı azalmıştır (Yong vd., 2015).

Elektrikli araç pil teknolojisine Ni-MH pil ile aynı zamanda ZEBRA pil veya sodyum-nikel klorür ( $\text{Na-NiCl}_2$ ) eklenmiştir. Bu tip pil, elektrolit olarak sodyum tuzu kullanır (Cluzel & Douglas, 2012) ve 245 ila 350°C arasında oldukça yüksek bir çalışma sıcaklığına sahiptir. ZEBRA pil, elektrikli araç uygulaması için uygun olan yüksek enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna sahiptir. Bununla birlikte, aşırı çalışma sıcaklığı, termal yönetimi ve güvenlik endişeleri üzerinde büyük baskı oluşturmuştur (Yong vd., 2015).

Elektrikli araçlarda pil olarak Lityum tabanlı pilin kullanılması yeni bir dönemi başlatmıştır. Lityum bazlı pil, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, hafif, ucuz, toksik olmayan ve hızlı şarjı kabul eden umut verici pil teknolojilerinden biridir (Armand & Tarascon, 2008; Wen vd., 2020). Lityum bazlı pil en yeni elektrikli araç grubuna hakimdir. En iyi elektrikli araç seçenekleri olan Nissan Leaf, Renault Twizy, Hyundai Ionic, Volkswagen E-Golf, Mitsubishi i-MiEV, Tesla Model S ve Chevrolet Volt'ta Lityum iyon pil takımları kullanılmaktadır (Cluzel & Douglas, 2012; Catenacci vd., 2013; Iclodean vd., 2017). Yerleşik birkaç pil, Lityum-iyon (Li-iyon), Lityum-İyon Polimer (Li-Po) ve Lityum-Demir Fosfat ( $\text{LiFePO}_4$ ) gibi lityum bazlı pil kategorisine girer. Li-Po pil, daha iyi paketleme optimizasyonu için çeşitli boyutlarda şekillendirilebilen Li-ion pilden geliştirilmiştir.  $\text{LiFePO}_4$  pil, yüksek güç yoğunluğu, daha fazla yaşam döngüsü ve daha iyi güvenlik sağlar, ancak Li-ion pil ile karşılaştırıldığında daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Mevcut lityum tabanlı pil teknolojisi tam olarak olgunlaşmamış, ancak gelecekteki elektrikli araç uygulamaları için mükemmel şarj edilebilir pil olma potansiyelini taşımaktadır (Yong vd., 2015).

Deneysel aşamada üstün performans sağlayan bazı pil teknolojileri vardır. Bu piller Lityum-Sülfür (Li-S), Çinko-Hava (Zn-air) ve Lityum-Havadır (Li-air). Li-S pil lityum bazlı pil kategorisinde nispeten yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve ucuz kükürt kullanımı nedeniyle düşük maliyet avantajı vardır. Bununla birlikte, Li-S pilin yüksek deşarj oranı ve kısa ömür döngüsü vardır (Kolosnitsyn & Karaseva, 2008). Gelecekteki elektrikli araçlar için diğer potansiyel aday ise Zn-air bataryadır. Bu tür bir pilin lityum bazlı pilden daha yüksek olan çok yüksek enerji yoğunluğu vardır. Mevcut Zn-air akünün ana dezavantajları düşük güç yoğunluğu ve kısa ömür döngüsüdür. Benzer şekilde, Li-air pil hala prototip aşamasındadır ve henüz ticarileştirilmemiştir (Christensen vd., 2011). Bununla birlikte, 1700 Wh  $\text{kg}^{-1}$ 'dan fazla teorik yüksek ağırlıksal enerji yoğunluğu, konvansiyonel içten yanmalı motorlu taşıt ile rekabet etmesini sağlamaktadır (Miao vd., 2019). Mevcut araştırma, Elektrikli araçlarda tüm elektrikli tahrik aralığını genişletmek için bu çekici pil teknolojisine geliştirilmesine odaklanmıştır (Yong vd., 2015). Yukarıda bahsedilen pil çeşitlerinin detaylı olarak incelenmesi aşağıda verilmiştir.

### 3.1. Kurşun Asit Piller

Kurşun asit en eski ve en iyi bilinen şarj edilebilir aküdür (Van den Bossche vd., 2006; Sun vd., 2020). Kurşun asitli ikincil pil 1859 yılında Gaston Plante tarafından Fransa'da icat edildi (Soloveichik, 2011; Canis, 2013). Araç endüstrileri, kurşun asit akülerle denemeye 1900 yüzyılın başlarında yoğun bir şekilde başladı (Lukic vd., 2008; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Kurşun-asit pillerde negatif elektrot olarak kurşun (Pb), pozitif elektrot olarak kurşun dioksit ( $\text{PbO}_2$ ) ve elektrolit olarak ise sülfürik asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) materyalleri kullanılmaktadır

(Hadjipaschalis vd., 2009; Muratoğlu & Akkaya, 2015). Güç üretimi için elektrotlar, seyreltilmiş bir sülfürik asit çözeltisinden oluşan bir elektrolite daldırılır. Deşarj sırasında, sülfürik asit sünger kurşun ve kurşun dioksit ile birleşerek kurşun sülfat ( $PbSO_4$ ) ve su oluşturur (Oman & Gross, 1995). Deşarj işlemi gerçekleştikçe, elektrolit gittikçe seyreltilir. Buna karşılık, şarj sırasında elektrolitteki sülfürik asit konsantrasyonu artar (Khaligh & Li, 2010; Gerssen-Gondelach & Faaij, 2012). Su basmış kurşun-asit piller, dünya çapında çok sayıda otomotiv uygulamalarında aydınlatma ve ateşleme için kullanılır (May, 2006; Van den Bossche vd., 2006; Budde-Meiwes vd., 2013).

Bu pil teknolojisinin dünyada çok yaygın olarak tercih edilmesinin birkaç nedeni vardır. Kurşun-asit piller basit, üretimi ucuz, yaygın olarak kullanılan ve kolayca üretilebilen bir teknolojiye dayanır. Nispeten küçük boyutlu piller, motor bölmesine kolayca sığar, dayanıklı ve güvenilirdir ve neredeyse hiç bakım gerektirmez. En önemlisi, birçok döngüde şarj olurken motorları çalıştırmak için yeterli enerji patlamaları sağlar (Canis, 2013). Bir kurşun-asit hücresinin anma gerilimi 2V olup %85 ile %90 arasında yüksek enerji verimliliğine sahiptir (Hadjipaschalis vd., 2009). Bununla birlikte, bu piller için sınırlayıcı faktörler nispeten düşük çevrim ömrü ve pilin çalışma ömrüdür. Kurşun asitli akülerin tipik kullanım ömürleri 1200 ila 1800 şarj-deşarj döngüsü veya 5-15 yıl arasındadır (Cano vd., 2018). Çevrim ömrü, deşarj derinliği ve sıcaklığından olumsuz etkilenir. Bataryayı tamamen deşarj etme girişimleri elektrotlara özellikle zarar verebilir, böylece kullanım ömrünü kısaltır (Hadjipaschalis vd., 2009).

Piyasaya sürülen ilk elektrikli araç olan General Motors (GM) EV1 elektrikli bir tahrik motoruna güç sağlamak için kurşun-asit pil kullanmıştır (Kisacikoglu vd., 2012; Vidyanandan, 2019). Fakat kurşun asit piller düşük ağırlıksal enerji yoğunluğu  $30-40 \text{ Wh kg}^{-1}$  (özgül enerji) ve düşük özgül güç  $180 \text{ W kg}^{-1}$  nedeniyle daha sonraki elektrikli araçlarda kullanılmamıştır (Perujo vd., 2012; Budde-Meiwes vd., 2013). Bu nedenle kurşun asit pil şu anda sınırlı menzil ve hızın endişe yaratmadığı golf arabası, tekerlekli sandalye, forkliftler ve elektrikli bisikletlerde kullanılmaktadır (Van den Bossche vd., 2006; Cluzel & Douglas, 2012; Gerssen-Gondelach & Faaij, 2012). Son birkaç yıldaki yapılan çalışmalar ile birlikte kurşun asidin deşarj döngü süresini azaltma çabaları için çeşitli karbon katkı maddeleri keşfedilmiştir (Jaiswal & Chalasani, 2015; Cano vd., 2018; Hu vd., 2019). Bu gelişme kurşun asit pillerin, hafif ve tam hibrit araçlarda kullanıma izin veren performans özellikleri göstermiştir (Budde-Meiwes vd., 2013). Günümüzde, kurşun-asit bataryalar mikro-hibrit araçlarda kullanılmaktadır. Citroen, 2005 yılında kentsel modda yaklaşık %10 yakıt ekonomisi elde etmeyi başaran 55 Ah batarya ile donatılmış C3 modelini piyasaya sürmüştür (Enache vd., 2014).

### 3.2. Alkalin Piller

Nikel piller, kurşun pillerden daha uzun ömürlü olup aynı zamanda daha iyi bir güç ve enerji yoğunluğu sunan ilk ciddi rakiptir (Tubb, 1939; Enache vd., 2014). Alkalin piller nikel tabanlıdır ve elektrolit olarak bir alkalin çözeltisi kullanır (Van den Bossche vd., 2006). Nikel bazlı piller temel olarak nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-metal hidrit (Ni-MH) ve nikel-çinko (Ni-Zn) pillerdir (Enache vd., 2014).

Her üç tip de sırasıyla pozitif elektrot ve nikel hidroksit olan elektrolit ve bir miktar lityum hidroksit içeren sulu bir potasyum hidroksit çözeltisi için aynı malzemeyi kullanır. Negatif elektroda gelince, Ni-Cd tipi kadmiyum hidroksit, Ni-MH metal alaşımı ve Ni-Zn çinko hidroksit kullanır. Alkalin piller için nominal voltaj 1,2 V'dir (Ni-Zn tipi için 1,65 V). Ağırlıksal enerji yoğunlukları sırasıyla Ni-Cd için  $50 \text{ Wh kg}^{-1}$ , Ni-MH için  $80 \text{ Wh kg}^{-1}$  ve Ni-Zn için  $60 \text{ Wh kg}^{-1}$ 'dir (Hadjipaschalis vd., 2009).

#### 3.2.1. Ni-Zn (Nikel Çinko) Piller

Nikel-çinko pil, diğer alkalin pillere kıyasla daha yüksek nominal voltaj değerine sahiptir (1,65 V). Ağırlıksal enerji yoğunluğu ise  $60 \text{ Wh kg}^{-1}$ 'dir. Düşük maliyetli malzemelere sahiptir ve çevre dostudur. Bu piller elektrikli araç uygulamalarında çok fazla kullanılmamıştır. Çünkü Ni-Zn pillerinin gelişimini önleyen dendritlerin hızlı büyümesi nedeniyle kısa çevrim ömrüne sahiptir (Van den Bossche vd., 2006; Khaligh & Li, 2010).

### 3.2.2. Ni-Cd (Nikel Kadmiyum) Piller

Nikel kadmiyum pilleri 1899'da Waldemar Jungner tarafından daha iyi depolama kapasitesine sahip bir pil olarak üretildi (Miao vd., 2019). Nikel kadmiyum pillerde negatif elektrot olarak kadmiyum-kadmiyum hidroksit ( $\text{Cd-Cd(OH)}_2$ ), pozitif elektrot olarak nikel hidroksit-nikel oksihidroksit ( $\text{Ni(OH)}_2\text{-NiOOH}$ ) ve elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) materyalleri kullanılmaktadır (Enache vd., 2014; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Ana uygulama alanları, radyolar, biyomedikal ekipmanlar, profesyonel video kameralar, el aletleridir.

Nikel-kadmiyum pillerin ömrü uzundur ve hasar görmeden tamamen deşarj edilebilir. Yüksek deşarj akımına sahiptir. Kurşun-asit pillere göre daha yüksek ağırlıksal enerji yoğunluğuna  $55\text{-}80\text{ Wh kg}^{-1}$ , daha yüksek özgül güce  $200\text{ W kg}^{-1}$  ve daha uzun çevrim ömrüne sahiptir (Khaligh & Li, 2010; Soloveichik, 2011; Budde-Meiwes vd., 2013). Bu pilin kullanımını etkileyen faktörlerden birisi yüksek maliyetidir (Tie & Tan, 2013). Bunun başlıca nedeni malzemenin geri dönüşüm maliyetinin yüksek olmasıdır. Son derece zehirli bir madde olan kadmiyum, uygun şekilde atılmadığı takdirde çevre kirliliğine neden olabilecek bir tür ağır metaldir (Hirve & Vidyapeeth, 2018). Nikel-kadmiyum pillerin kısmen boşaldıktan sonra tekrar tekrar şarj edildiklerinde maksimum enerji kapasitelerini kademeli olarak kaybederek daha az şarj tutmalarına neden olur (hafıza etkisi) ve bu yüzden Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) pil, araç uygulaması gibi yüksek şarj / deşarj hızında kullanılmaya uygun olmayan bir hafıza etkisine sahiptir (Van Schalkwijk, 1993; Yong vd., 2015). Tüm bu aksaklıklara rağmen Peugeot 106, Citroen AX, Renault Clio ve Ford Think Car gibi araçlarda kullanılmaktadır (Hirve & Vidyapeeth, 2018). Nikel-kadmiyum pillerin enerji yoğunluğu ve maliyetleri göz önünde bulundurularak elektrikli araçlarda kullanımında önemli bir rol oynaması beklenmemektedir (Budde-Meiwes vd., 2013).

### 3.2.3. Ni-MH (Nikel Metal Hidrit) Piller

Kurşun-asit akülerin eksiklikleri göz önüne alındığında, araştırmacılar 1970'lerden beri daha iyi akü teknolojileri aradılar (Canis, 2013). Ni-Cd pil o zaman taşınabilir elektronik cihazlar için tek güç kaynağıdır. Fakat 80'lerde kadmiyumun (Cd) fiyatının artmasının neden olduğu krizin sonucunda yapılan Ar-Ge çalışmalarında anodu Nikel tabanlı olan ancak katotta kadmiyum içermeyen pil üretmek vardı (Enache vd., 2014). Kadmiyum ile ilgili çevre sorunlarının da etkisiyle kadmiyum elektrotu yerine metal hidrat kullanılmıştır (Muratoğlu & Akkaya, 2015). 1991 yılında ticarileştirilen Ni-MH pil en yaygın nikel bazlı pil olmuştur (Cano vd., 2018). Kurşun asit ve nikel kadmiyum pillerden daha fazla ağırlıksal enerji yoğunluğuna  $60\text{-}95\text{ Wh kg}^{-1}$  ve özgül güce  $200\text{-}300\text{ W kg}^{-1}$  sahiptir (Cano vd., 2018; Vidyanandan, 2019). Bununla birlikte, nikel ve hidrit depolama metallerinin daha yüksek maliyeti de onları Kurşun-asit pillerden daha pahalı hale getirmiştir. Zehirli malzeme içermezler. Taşınabilir ve daha sonra çekiş aküleri olarak 20 yıldan fazla bir süredir piyasada olmalarına rağmen, ikincil nikel-metal hidrit (Ni-MH) piller sadece yakın zamanda UPS ve telekom gibi sabit uygulamalar için düşünülmüştür. Ni-MH piller, telekom uygulamaları için önemli olan daha yüksek özgül enerjiye ve daha iyi ısı toleransına ( $70^\circ\text{C}$ 'ye kadar) sahiptir (Soloveichik, 2011).

Nikel Metal hidrit (Ni-MH) 1997 yılında hibrit araçlarda kullanılmaya başlandı. 2000 yılların başında Ni-MH, özellikle lityum iyondan daha iyi dayanıklılık ve güvenlik özellikleri, ultrakapasitörlerden daha düşük maliyet ve daha yüksek enerji nedeniyle otomotiv akü pazarına hâkim oldu (Kromer & Heywood, 2007; Nemry vd., 2009; Vidyanandan, 2019). Ovonic Battery Company, Ni-MH pil teknolojisi için öncü ve uluslararası lisans vericidir. Tüm büyük Ni-MH pil üreticileri Ovonic lisansı altında çalışmaktadır (Young vd., 2011). Toyota Prius ve Honda Insight, Honda Civic, Honda Accord ve Ford Escape dahil olmak üzere birçok hibrit araçta kullanıldı (Budde-Meiwes vd., 2013; Canis, 2013; Nemry vd., 2009). Ancak Ni-MH pillerin maksimum potansiyellerine ulaştığı düşünülmektedir. Uzmanlar gelecek yıllar için Ni-MH pillerde bulunan ( $7\text{-}8\text{ kg kWh}^{-1}$ ) yüksek nikel oranı ve nikel fiyatlarının yüksek olması nedeniyle bu pillerde maliyet düşüşleri beklenmemektedir (Nemry vd., 2009; van Vliet vd., 2010). Bu nedenle Ni-MH aküler, elektrikli araçlarda büyük ölçekli uygulamalar için ciddi bir aday olarak görülmemektedir (Gerssen-Gondelach & Faaij, 2012).

### 3.3. Zebra Piller (Zero Emission Battery Research Activity)

80'li yıllarda, yeni bir gelişme yönünün ardından, anot için aktif malzeme olarak sıvı sodyum kullanan piller üretilmeye başlandı (Enache vd., 2014). Sodyum nikel klorür ( $\text{NaNiCl}$ ) pillere Zebra pilleri de denir. Zebra

ismi “Sıfır Emisyon Batarya Araştırma Faaliyeti” (Zero Emission Battery Research Activity) projesinden türetilmiştir (Budde-Meiwes vd., 2013). Zebra, katot için aktif malzeme olarak nikel klorürü ( $\text{NiCl}_2$ ) ve anot için sıvı sodyum kullanır. Elektrolit iki bölümden oluşur: sıvı sodyumu çevreleyen bir seramik elektrolit, katot için sodyum klorür ve alüminyumdan oluşan ikincil bir elektrolit. Klorür ( $\text{Cl}^-$ ) iyonları elektrolitten gelen hareketli iyonlardır (iyonik akımı sağlarlar). Deşarj sırasında elde edilen elektrik enerjisi, sodyumun ürün olarak ortaya çıkan nikel klorür, nikel ve sodyum klorür ile birleştirilmesinden kaynaklanır (Enache vd., 2014).

Kurşun asit ve nikel tabanlı pillere göre enerji yoğunluğu ve nominal voltaj değeri daha fazladır. Zebra pillerin nominal voltaj değeri 2,6V, ağırlıksal enerji yoğunluğu 90-120 Wh  $\text{kg}^{-1}$  ve özgül gücü 155 W  $\text{kg}^{-1}$ 'dir. Bu pilin dezavantajları düşük özgül güç, kendi kendine deşarj problemi ve sıcaklık yönetimidir (Sun vd., 2020). Zebra pilinin ana karakteristiği yüksek sıcaklıkta çalışması olup 300-350°C'lik yüksek bir sıcaklıkta sıvı halde muhafaza edebilen erimiş bir tuz elektrolitine sahiptir (Tie & Tan, 2013; Sun vd., 2020). Yüksek sıcaklık sisteminin termal yönetimi pil ile entegredir ve herhangi bir özel işletme veya güvenlik problemi göstermez (Van den Bossche vd., 2006). Ancak bu piller, yüksek sıcaklıkta muhafaza edilmezse, bekleme durumunda 24 saat içinde yaklaşık %10'luk çok yüksek kendi kendine deşarj oranına sahiptir (Hirve & Vidyapeeth, 2018). Bu sorun, bu pili filo uygulamalarında (uzun bekleme süreleri olmadan) yoğun olarak kullanılan araçlar için daha uygun hale getirir (Van den Bossche vd., 2006; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Ayrıca Mendrisio-İsviçre'deki elektrikli araçların tanıtım programı kapsamında elektrikli araç Renault Twingo üzerine monte edilmiştir (Enache vd., 2014).

### 3.4. Lityum İyon (Li-İon) Piller

Li-ion pillerin icadı 1970'lerde M. Stanley Whittingham'ın çalışmalarına dayanmaktadır. Ardından Whittingham ile birlikte John B. Goodenough ve Akira Yoshino'nun beraber çalışması neticesinde bu teknolojinin temelleri atılmıştır (Yoshino, 2012; The Nobel Prize in Chemistry, 2019). Li-ion pilleri Sony Corporation tarafından 1991 yılında ticari olarak piyasaya sürülmüştür (Bruce vd., 2012; Lu vd., 2017). Li-ion piller Pb-asit ve Ni-MH gibi diğer pil teknolojileriyle kıyaslandığında yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun raf ömrü gibi özellikleri ile enerji depolama alanında en çok gelecek vaat eden teknolojiler arasında öne çıkmaktadır (Bai & Zhang, 2014; Choi & Aurbach, 2016; Park vd., 2016).

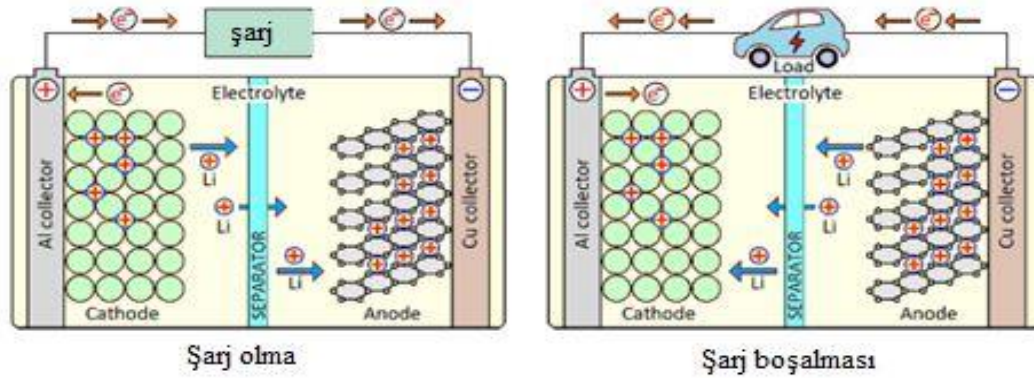
Birim hacim ve ağırlık başına depolanabilen enerji miktarı fazla olduğundan cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, müzik çalarlar ve dijital kameralar gibi taşınabilir aygıtlarda yaygın olarak kullanımı tercih edilmiştir (Bentley & Heacock, 1996; May, 2006; Lin vd., 2017). Lityum iyon piller şu anda ticari otomotiv aküleri için büyük pazara hakimdir. BMW i3, Tesla, Nissan Leaf, BYD ve diğer elektrikli araçların tümü sürüş gücü olarak lityum-iyon tabanlı piller kullanmaktadır (Vidyandan, 2019).

Lityum iyon piller için, kendi kendine deşarj oranı ayda maksimum %5 oranında çok düşüktür ve pil ömrü 1500'den fazla döngüye ulaşabilir. Bununla birlikte, bir lityum-iyon pilin ömrü sıcaklığa bağlıdır, yaşlanma yüksek sıcaklıklarda çok daha hızlıdır ve derin deşarjlar nedeniyle çevrim ömrü ciddi ölçüde azalmaktadır. Li-ion kimyası aküye zarar verebilecek, ömrünü kısaltabilecek ve hatta tehlikeli durumlara neden olabilecek aşırı şarj ve derin deşarja karşı çok hassastır (Sundaram vd., 2016). Ek olarak, lityum iyon piller kırılmalıdır ve güvenli çalışmayı sürdürmek için bir koruma devresi gerektirir. Her bir pil takımına yerleştirilen koruma devresi, şarj sırasında her hücrenin tepe voltajını sınırlar ve deşarj sırasında hücre voltajının çok düşmesini önler (Gerlitz vd., 2021). Ayrıca aşırı sıcaklıkları önlemek için hücre sıcaklığı izlenir. Çoğu paketdeki maksimum şarj ve deşarj akımı da sınırlıdır (Hadjipaschalis vd., 2009).

Bir Li-ion hücrenin ana bileşenleri: pozitif (katot) ve negatif (anot) elektrotlar, sulu bir elektrolit ve bir ayırıcıdır (May, 2006; Kromer & Heywood, 2007; Duffner vd., 2021). Katot, lityum metal oksitlerden veya fosfatlardan ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$  vb.) yapılmıştır ve anot için grafit standart seçimdir (Khaligh & Li, 2010; Miller, 2015; Wen vd., 2020). Sıvı elektrolit, bir lityum tuzu (örneğin,  $\text{LiPF}_6$ ) ve bir organik çözücü olan dietilen karbonat karışımından oluşur (Parsons & Mepsted, 2014; Stan vd., 2014; Gerlitz vd., 2021). Elektrolitin fonksiyonu, şarj ve deşarj döngüleri sırasında anot ve katot arasında pozitif iyonlar taşımaktır. Elektrotlar ayırıcı adı verilen bir yalıtım tabakası ile izole edilir. Ayırıcının işlevi dahili hatalar veya anormal koşullar nedeniyle sıvı elektrolitin kurumaması durumunda anot ve katodun kısa devre yapmasını önlemektir (Vidyandan, 2019; Gerlitz vd., 2021).



Bir Li-ion pilin çalışması mantığı Şekil 6'da gösterilmiştir. Şarj cihazı bataryaya bağlandığında, katot (+) tarafındaki lityum atomları lityum oksit ( $LiO_2$ ) veya fosfattan ( $PO_4^3$ ) ayrılır. Bir Li atomu oldukça kararsız olduğundan, anında bir Li iyonuna ( $Li^+$ ) ve bir elektrona ( $e^-$ ) ayrışır. Pozitif yüklü Li iyonları anoda doğru çekilerek elektrolitten akar ve grafit tabakalarında hapsolür. Elektronlar, negatif yükleri nedeniyle elektrolitten geçemezler ve bu nedenle şarj cihazından negatif elektroda akmaya zorlanırlar. Katottaki tüm Li iyonları anoda ulaştığında, pilin tamamen şarj olduğu kabul edilir. Böylece, yükleme sırasında Li iyonları katottan çıkarılır ve anodun içine nakledilir (Cheng vd., 2021; Gerlitz vd., 2021). Anottaki Li iyonları kararlı bir durumda değildir. Hücre bir yüke bağlandığında (yani boşaltma sırasında), Li iyonları ve elektronlar anottan katoda gider ve kararlı metal oksit olarak katoda biriktirilir. Anottaki tüm Li iyonları katoda geri taşındığında, pil tamamen boşalır ve yeniden şarj edilmesi gerekir (Stan vd., 2014; Vidyanandan, 2019).



Şekil 6. Li-ion Batarya Çalışma Mantığı

Lityum iyon piller, çeşitli anot ve katot malzemeleri kombinasyonlarını kullanan bir pil kimyası ailesinden oluşur. Her kombinasyonun güvenlik, performans, maliyet ve diğer parametreler açısından belirgin avantajları ve dezavantajları vardır (Dinger vd., 2010).

Lityum iyon pillerde pozitif elektrot olarak diğer materyallere göre düşük toksit, yüksek kapasite ve ucuz olması avantajı ile lityum metal oksitler kullanılmaktadır (Kwade vd., 2018). Yaygın olarak kullanılan lityum tabanlı oksitler: Lityum Kobalt Oksit (LCO), Lityum Mangan Oksit (LMO), Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA), Lityum-Nikel-Mangan-Kobalt (NMC), Lityum Titanat (LTO) ve Lityum-Demir-Fosfat (LFP) olarak sınıflandırılır (Burke & Miller, 2009; Dinger vd., 2010; Muratoğlu & Akkaya, 2015; Sun vd., 2020).

LCO (Lityum-Nikel-Kobalt) pillerin ağırlıksal enerji yoğunluğu (özellik güç) yüksek fakat güç yoğunluğu düşüktür. Kobalt esaslı (LCO) hücreler genellikle uzun çalışma süresi elde etmek için cep telefonları, kameralar, dizüstü bilgisayarlar vb. gibi taşınabilir aygıtlarda kullanılır (Van den Bossche vd., 2006). Bununla birlikte, LCO kimyası termal olarak çok kararsızdır ve kolayca potansiyel bir yangın tehlikesi haline gelebilir. LCO piller, yüksek maliyetlerinden dolayı elektrikli araçlarda kullanılmaz (Burke & Miller, 2009; Wang & Huang, 2011). Şu anda, mangan ve nikel bazlı Li-ion piller elektrikli araçların çekişi için standart seçimdir (Stan vd., 2014; Vidyanandan, 2019).

NCA (Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum) piller doğrudan LCO pillerin yerine kullanılabilir çünkü benzer voltajda çalışır, benzer çevrim ömrüne ve güç kapasitesine sahiptir (Parsons & Mepsted, 2014; Goutam vd., 2015). NCA piller LCO'ya göre daha iyi bir güvenlik özelliğine sahiptir. Ayrıca, NCA tabanlı piller güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu ve kullanım ömrü açısından iyi performans gösterir (Fergus, 2010; Stan vd., 2014; Wen vd., 2020). NCA pil kimyasının ana dezavantajı düşük güvenlik ve yüksek maliyetlerdir (Fergus, 2010). NCA teknolojisi son zamanlarda Tesla araçlarda kullanılmıştır ve daha da baskın olması beklenmektedir (Dinger vd., 2010; Ding vd., 2019; Sun vd., 2020).

NMC (Lityum-Nikel-Mangan-Kobalt) tabanlı pil hücreleri yüksek enerji kapasitesine sahiptir ve yüksek voltajlarda çalışabilir (Fergus, 2010; Wen vd., 2020). Araç üreticileri tarafından başarılı bulunan NMC piller, otomotiv uygulamaları için ön plana çıkan bir pildir.

LMO (Lityum-Manganez-Oksit) pilleri, kararsız hale gelmeden önce 250°C'ye dayanabildikleri için daha iyi termal stabiliteye sahiptir (Wang & Huang, 2011; Stan vd., 2014). LMO hücreleri çok düşük iç dirence sahiptir ve yüksek akım sağlayabilir ve bu nedenle bu piller elektrikli aletler ve tıbbi cihazlar için kullanılır (Goutam vd., 2015; Vidyanandan, 2019). Elektrikli araçlarla kullanımı NMC piller ile karıştırılarak sağlanabilmektedir.

LFP (Lityum-Demir-Fosfat) piller yüksek deşarj akımına sahiptir (Scrosati & Garche, 2010; Parsons & Mepsted, 2014). Termal ve kimyasal stabilitesi iyi olup ayrıca düşük maliyetinden dolayı elektrikli araçlara yaygın olarak uygulanırlar (Tie & Tan, 2013; Hannan vd., 2018; Sun vd., 2020;). Ancak LCO'ya kıyasla genel enerji depolama alanı azdır (Frieske vd., 2014; Parsons & Mepsted, 2014; Muratoğlu & Akkaya, 2015).

LTO (Lityum-Titanat-Oksit) piller ise iyi bir döngü kararlılığına ve yüksek güç yoğunluğuna sahiptir (Bruce vd., 2008) ancak çok pahalıdır (Frieske vd., 2014; Morali & Erol, 2020). Lityum-Titanat akünün, şu anda Mitsubishi'nin i-MiEV elektrikli araçları tarafından kullanılan diğer lityum iyon akülerden daha hızlı şarj olma avantajı vardır (Tie & Tan, 2013).

Yukarda detaylıca anlatılan Lityum tabanlı pillerin nominal voltaj, tam şarj, özgül enerji, şarj ve deşarj oranı, döngü ömrü, kullanıldığı yerler, üstün ve zayıf olan yönleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1. En Yaygın Lityum İyon Bazlı Pillerin Özeti**

Kimya	Lityum Kobalt Oksit	Lityum Manganez Oksit	Lityum Nikel Manganez Oksit	Lityum Demir Fosfat	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit	Lityum Titanat Oksit
<b>Kısaltma</b>	LiCoO <sub>2</sub> (LCO)	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (LMO)	LiNiMnCoO <sub>2</sub> (NMC)	LiFePO <sub>4</sub> (LFP)	LiNiCoAlO <sub>2</sub> (NCA)	Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> (ortak) (LTO)
<b>Nominal Voltaj</b>	3.60V	3.70V (3.80V)	3.60V (3.70V)	3.20, 3.30V	3.60V	2.40V
<b>Tam Şarj</b>	4.20V	4.20V	4.20V (veya üstü)	3.65V	4.20V	2,85V
<b>Özgül Enerji</b>	150-200Wh/kg	100-150Wh/kg	150-220Wh/kg	90-120Wh/kg	200-260Wh/kg	70-80Wh/kg
<b>Şarj Oranı</b>	0,7-1C (3 saat)	0,7-1C (3 saat)	0,7-1C (3 saat)	1C (3h)	1C	1C (5C maks)
<b>Deşarj Oranı</b>	1C (1 saat)	1C, 10C	1-2C	1C	1C	10C
<b>Döngü Ömrü (İdeal)</b>	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3.000-7.000
<b>Uygulamalar</b>	Cep Telefonları, Tabletler, Dizüstü Bilgisayarlar, Kameralar	Elektrikli Aletler, Tıbbi Cihazlar, Güç Aktarma Organları	E-Bisikletler, Tıbbi Cihazlar, Elektrikli Araçlar	Elektrikli Araçlar	Tıbbi, Endüstriyel, Elektrikli Araç (Tesla)	UPS, Elektrikli Araçlar, Güneş Sokak Aydınlatması
<b>Üstün ve Zayıf Yönleri</b>	Yüksek Enerji, Sınırlı Güç, Pazar Payı Durağan.	Yüksek Güç, Daha Az Kapasite, Li-Kobalttan Daha Güvenli, Performansı Artırmak için Genellikle NMC ile Karıştırılır.	Yüksek Kapasite ve Yüksek Güç, Pazar Payı Artıyor.	Düz Deşarj Voltajı, Yüksek Güç, Düşük Kapasite, Çok Güvenli, Yüksek Kendi Kendine Deşarj.	Orta Güçte En Yüksek Kapasite, Li-Kobalt'a Benzer.	Uzun Ömür, Hızlı Şarj, Geniş Sıcaklık Aralığı, Güvenli, Düşük Kapasiteli, Pahalı.

Bir başka Lityum tabanlı pil olan Lityum İyon Polimer pil lityum pillerle neredeyse aynı özelliklere sahip olup lityum pillerle arasındaki tek fark elektrolit olarak polimer materyalinin kullanılmasıdır. Diğer elektrolitlere göre polimer elektrolit materyalin elektriksel iletkenliği daha yüksektir. Polimer kullanılması avantajı ise lityum polimer pillerinin daha hızlı ve farklı şekillerde üretilmelerine olanak sağlamaktadır (Muratoğlu & Akkaya, 2015; Yong vd., 2015). Li-ion bataryaya göre daha uzun ömürlü ve daha güvenlidir (Tredeau & Salameh, 2009) ancak aşırı yüklenme hali ve şarjı kritik seviyenin altına düştüğü durumlarda fonksiyonel açıdan daha kararsız yapıdadır (Can Güven & Gedik, 2019).

Lityum-iyon pillerin günlük yaşamımız üzerinde önemli bir etkisi vardır, ancak doğal sınırlamalar Li-ion kimyalarının taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar ve şebeke ölçeğinde enerji depolama için artan

talepleri karşılama zorlaştırmaktadır (Lin vd., 2017; Hirve & Vidyapeeth, 2018; Liu vd., 2019). Bununla birlikte, Lityum iyon piller şarj oranları, kullanım ömrü ve güvenilirlik gibi sorunlardan dolayı daha da geliştirilmesi gerekmektedir (Khaligh & Li, 2010; Tie & Tan, 2013; Sun vd., 2020). Li-ion piller tehlike olarak 3 kategoriye ayrılabilir. Bu tehlikeler elektriksel, kimyasal ve patlama veya yangın olarak karşımıza çıkmaktadır (Gerlitz vd., 2021). Bu tehlikelerden dolayı, Li-ion pillerin ötesindeki pil kimyaları için çalışmalar sürmekte olup, ticari uygulamalar için uygulanabilir hale getirilmesi gerekmektedir (Grey & Tarascon, 2016; Lin vd., 2017; Ding vd., 2019). Metalik Li kullanımını, özellikle Li-S ve Li-air sistemleri için en çok tercih edilen seçeneklerden biridir (Manthiram vd., 2017).

### 3.5. Lityum-Hava Piller (Li-Air)

Lityum-hava ( $\text{Li}_2\text{O}_2$ ) pil, geliştirme aşamasında olan yeni bir teknolojidir (Stan vd., 2014). Lityum-hava pilleri, yüksek teorik özgül enerjilerine dayanarak, uzun menzilli elektrikli araçları daha ekonomik hale getirebilecek potansiyele sahip olup elektrik enerjisi depolama için son derece çekici bir teknolojidir (Christensen vd., 2011; Stan vd., 2014).

Havadan türetilen oksijeni kullanan Li-hava pili negatif bir lityum metal elektrottan oluşur (Stan vd., 2014; Aurbach vd., 2016). Lityumun doğrudan havadan oksijenle reaksiyona sokulmasıyla çok yüksek bir kapasite ( $1200 \text{ mAh g}^{-1}$ ) elde edilebilir (Li vd., 2016). Bu teknoloji (fossil yakıtların enerji yoğunluğuna yakın) bir değer olan  $3.500 \text{ Wh kg}^{-1}$  gibi yüksek bir teorik ağırlıksal enerji yoğunluğu sunmaktadır (Stan vd., 2014; Lu vd., 2016). Bu değer bugün piyasadaki çoğu aküden yaklaşık 10 kat daha fazladır (Larcher & Tarascon, 2015). Birçok faktör bilinmediği için pratik enerji depolama tahminleri belirsizdir (Lu vd., 2016). Ancak, olası yüksek enerji yoğunluğunun yanı sıra, devir sayısı, güvenlik ve çevrim ömrü gibi metal-hava sistemlerinde hala büyük zorluklar bulunmaktadır (Budde-Meiwes vd., 2013; Rahman vd., 2014; Aurbach vd., 2016).

Birçok yıldırıcı zorluklar nedeniyle potansiyelinin altında kalmıştır (Christensen vd., 2011). Bu zorlukların birkaçının üstesinden gelinmesi durumunda  $1000 \text{ Wh kg}^{-1}$  veya daha fazlasının elde edilmesi mümkün olabilecektir (Christensen vd., 2011; Aurbach vd., 2016). Bu özel enerji, pil ömrünün başında tek bir şarjla 380 milin üzerinde bir elektrikli sürüş menzili sağlayabilir, bu da benzinle çalışan bir aracın menziline yaklaşıyor. Ayrıca, bugünün sürüş aralığına ulaşan bir sistemin maliyeti, çok daha yüksek bir spesifik enerji piliyle önemli ölçüde azaltılabilir. Yeterli menzile sahip olması, araç maliyetinin azaltılması gibi koşulların oluşması halinde elektrikli araçlar istenen kitle pazarına ulaşabilir (Christensen vd., 2011).

### 3.6. Lityum-Kükürt Piller (Li-S)

Geliştirilmekte olan çeşitli pil teknolojileri arasında lityum tabanlı olan lityum-kükürt (Li-S) pili, katot malzemesi olarak sülfür kullanılan bir pildir (Muratoğlu & Akkaya, 2015). Yüksek enerji yoğunluğuna ve şarj verimine sahiptir. Ayrıca düşük hücre gerilimi ve ortalama çevrim ömrü vardır (Tredeau & Salameh, 2009; Tarascon, 2010; Pang vd., 2016). Maliyeti düşük olup geniş sıcaklıkta çalışma aralığı sunar (Kolosnitsyn & Karaseva, 2008).

Teorik olarak ağırlıksal enerji yoğunluğu  $2654 \text{ Wh kg}^{-1}$  olup (Deng vd., 2021; Kong vd., 2021) gerçekte ise  $500-600 \text{ Wh kg}^{-1}$  ağırlıksal enerji yoğunluklarına ulaşılabilir (Omar vd., 2010; Kisacikoglu vd., 2012; Budde-Meiwes vd., 2013). Bu avantajları sayesinde elektrikli araçlar için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Kromer & Heywood, 2007; Kolosnitsyn & Karaseva, 2008; Li vd., 2016; Deng vd., 2021). Ancak çevrim ömürleri, döngü sırasında kapasitede hızlı azalma (döngü başına %0,1-0,4), yüksek kendi kendine deşarj oranları (ayda %8-15) gibi sorunları mevcut olup (Deng vd., 2021) bu sorunlar aşılmadıkça, Li-S pilleri uzun menzilli elektrikli araçlar için kötü bir seçim gibi görünmektedir (Cano vd., 2018).

### 3.7. Çinko Hava (Zn-Air) Piller

Çinko hava pili gibi diğer pil türleri de gelecek vaat eden bir pildir. Bu pil lityum pilden daha yüksek ağırlıksal enerji yoğunluğuna sahiptir. Bununla birlikte, temel dezavantajı düşük özgül gücü, sınırlı çevrim ömrü ve hantal olmasıdır. (Tie & Tan, 2013). Li-air pillere göre daha düşük özgül enerjiye sahip olmalarına rağmen, daha gelişmiş teknoloji durumları ve pratik olarak daha yüksek ulaşılabilir enerji yoğunlukları nedeniyle

gelecekteki elektrikli araçlarda kullanılması daha olası görünmektedir (Larcher & Tarascon, 2015; Li & Lu, 2017). Şarj edilebilir Zn-air piller, Li-ion pillerin ortaya çıkmasından on yıllar önce taşıt elektrifikasyonu için umut verici bir aday olarak tanımlanmıştır (Blurton & Sammells, 1979; Merry, 1991; Cano vd., 2018).

Li-hava pillere benzer şekilde, zayıf özgül güçleri ve enerji verimlilikleri muhtemelen bu pillerin elektrikli araçlar için birincil enerji kaynağı olarak kullanılmasını engelleyecektir. Ancak, çift pil yapılandırmasında kullanıldığında ümit verici olabilirler. Uzun bir araç ömrü sağlamak için muhtemelen daha yüksek bir çevrim ömrüne ihtiyaç duysalar da düşük maliyetli bir elektrikli araç üretmek için yüksek güçlü karbon pillerle birleştirilebilirler. Alternatif olarak, uzun menzil sağlamak için öncelikle Li-ion pillerle çalışan bir elektrikli araçlar için menzil genişleticiler olarak uygulanabilirler. Sürücünün sadece uzun mesafeler kat etmesi gerektiğini varsayarsak bu durum kısa çevrim ömürlerini ve düşük verimliliklerini nispeten önemsiz hale getirir. Çift pil konseptleri maliyeti ve karmaşıklığı önemli ölçüde artırabilse de Zn-air pillerinin doğal güvenliği ayrıca çift pil konfigürasyonu için de uygundur, bunun nedeni araç içinde Ni-MH piller gibi yer kaplama ile ilgili daha az kısıtlama vardır. Elektrolit buharlaşmasına ek olarak havadaki karbon dioksitten hava elektrot gözeneklerindeki karbonat oluşumu, uzun ömürlü Zn-air aküleri için bir sorun oluşturmaktadır. Ancak menzil genişletici uygulamalar için bu sorun hava filtreleri ve hava menfezleri ile azaltılabilir (Cano vd., 2018).

Yukarda geçmişten günümüze kadar olan pil çeşitlerinin detaylı olarak anlatımından yola çıkarak bir tablolar olarak oluşturulmuştur. Tablo 2'de bataryaların nominal voltaj, ağırlıksal enerji yoğunluğu (özgül enerji), hacimsel enerji yoğunluğu, özgül güç, kullanım ömrü, aylık kendi kendine deşarj yüzdesi, bellek etkisi, çalışma sıcaklığı gibi parametreler belirtilmiş ve Tablo 3'te ise bu parametrelere bağlı olarak batarya türlerinin üstün ve zayıf olan yönleri belirlenmiştir.

**Tablo 2. Pil Çeşitlerinin Parametreleri**

Pil Türü	Nominal Gerilim (V)	Özgül Enerji (Wh kg <sup>-1</sup> )	Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Wh L <sup>-1</sup> )	Özgül Güç (W kg <sup>-1</sup> )	Yaşam Döngüsü	Kendi Kendine Deşarj (aylık %)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Kurşun Asit (Pb-Asit)	2,0	35	100	180	1000	< 5	Hayır	-15 ila +50
Nikel-Kadmium (Ni-Cd)	1,2	50-80	300	200	2000	10	Evet	-20 ila +50
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	1,2	70-95	180-220	200-300	< 3000	20	Seyrek	-20 ila +60
ZEBRA	2,6	90-120	160	155	> 1200	< 5	Hayır	+245 ila +350
Lityum-İyon (Li-İyon)	3,6	118-250	200-400	200-430	2000	< 5	Hayır	-20 ila +60
Lityum-Demir Fosfat (LiFePO <sub>4</sub> ) (LFP)	3,2	90-140	220	2000-4500	> 3000	< 5	Hayır	-20 ila +70
Lityum-Kobalt-Oksit (LiCoO <sub>2</sub> ) (LCO)	3,6	150-200	-	-	500-1000	-	-	-25 ila +55
Lityum-Manganez-Oksit (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) (LMO)	3,7	100-150	-	-	300-700	-	-	0 ila +50
Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)	3,6	200-260	-	-	500	-	-	-
Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt (NMC)	3,6	150-220	370	2300	1000-2000	-	-	-
Lityum-Titanat-Oksit (LTO)	2,4	50-80	90	4000	3000-7000	-	-	-
Çinko-Hava (Zn-Air)	1,65	460	1400	80-140	200	< 5	Hayır	-10 ila +55
Lityum-Kükürt (Li-S)	2,5	350-650	350	-	300	8-15	Hayır	-60 ila +60
Lityum-Hava (Li-Air)	2,9	1300-2000	1520-2000	70-100	100	< 5	-	-10 ila +70

**Tablo 3. Pil Çeşitlerinin Karşılaştırılması**

Pil Türü	Üstün Yönleri	Zayıf Yönleri
Kurşun Asit (Pb-Asit)	-Düşük fiyat -Yüksek özgül güç	-Düşük özgül enerji -Kısa yaşam ömrü -Yüksek bakım maliyeti
Nikel-Kadmium (Ni-Cd)	-Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu	-Geri dönüşüm maliyeti yüksek -Pahalı kadmium -Kadmiumun zehirli madde olması -Çevreye zararlı -Hafıza etkisi
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	-Yüksek enerji yoğunluğu -Güvenli -Uzun yaşam ömrü	-Yüksek fiyat -Kendi kendine deşarj yüksek -Hafıza etkisi
ZEBRA	-Yüksek sıcaklık aralığında çalışma -Yüksek özgül enerji	-Düşük özgül güç
Lityum-İyon (Li-İyon)	-Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu -Yüksek özgül enerji ve özgül güç -Yüksek nominal voltaj	-Kullanım ömrü az -Güvenilirlik -Yüksek maliyet
Lityum-Demir Fosfat (LiFePO <sub>4</sub> ) (LFP)	-Yüksek çevrim ömrü -Yüksek özgül güç -Düşük maliyet -Uzun ömürlü	-Düşük özgül enerji
Lityum-Kobalt-Oksit (LiCoO <sub>2</sub> ) (LCO)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek nominal voltaj	-Düşük güvenlik -Yüksek maliyet -Düşük yaşam ömrü
Lityum-Manganez-Oksit (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) (LMO)	-Yüksek nominal voltaj -Maliyet düşük	-Düşük çevrim ömrü
Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek özgül güç	-Düşük çevrim ömrü -Düşük güvenlik -Yüksek maliyet
Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt (NMC)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek özgül güç Yüksek verimlilik	-Düşük kararlılık
Lityum-Titanat-Oksit (LTO)	-Yüksek özgül güç -Yüksek çevrim ömrü -Yüksek güvenlik	-Düşük özgül enerji -Düşük hacimsel enerji yoğunluğu -Yüksek maliyet
Çinko-Hava (Zn-Air)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu	-Düşük nominal voltaj -Düşük çevrim ömrü
Lityum-Kükürt (Li-S)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu -Geniş sıcaklık aralığında çalışma	-Düşük nominal voltaj -Yüksek kendi kendine deşarj oranı
Lityum-Hava (Li-Air)	-Yüksek teorik özgül enerji	-Düşük çevrim ömrü -Düşük güvenlik

#### 4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PİLLER

Geçmişten günümüze kadar piyasada bulunan hibrid ve tam elektrikli araçların kullanmış olduğu piller ve kapasiteleri Tablo 4'te verilmiştir (Iclodean vd., 2017; Ding vd., 2019; Sanguesa vd., 2021).

Tablo 2'ye göre nikel tabanlı piller ve kurşun asit pilleri Peugeot 106-(1995), General Motors EV1-(1996-1999), Toyota Prius-(2000)-Hibrit gibi 90'lı yılların sonunda üretilmiş olan araçlarda kullanımı mevcut olup bu pillerin son yıllarda kullanımı mevcut değildir.

Nissan Leaf, BMW i3, Mitsubishi İ-MİEV tam elektrikli araçlar ve Chevy Volt hibrit aracı prizmatik bir hücrede paketlenmiş, NMC ile lityum-manganez (LMO) karışımı pili kullanır. Tesla S, 18650 hücrelerinde hücre başına 248 Wh/kg gibi etkileyici bir özgül enerji sağlayan NCA pili kullanmaktadır. Tesla 3 modeli ise NCA pile silisyum ve kobalt karışımını bir pil kullanmaya başlamıştır.

VW E-golf (2015), Chevy Bolt (2016-Hibrit), Renault Zoe (2017) araçlarında ise NMC pillerin kullanıldığı görülmektedir. BYD E6 (2010) elektrikli aracı ise LFP pilini kullanmaktadır.

Tablo 2'deki bilgiler değerlendirildiğinde hibrit ve tam elektrikli araçlarda özellikle son yıllarda ağırlıklı olarak lityum tabanlı pillerin kullanıldığı görülmektedir.

**Tablo 4. Elektrikli Araçların Kullandığı Pil Türleri**

Model-Yıl	Pil	Kapasite (kwh)
Peugeot 106 - (1995)	Ni-Cd	-
General Motors EV1 - (1996-1999)	Versiyon 1 - lead acid Versiyon 2 - Ni-MH	18.7 kWh 26.4 kWh
Toyota Prius - (2000) Hibrit	Ni-MH	-
Mitsubishi İMİEV - (2008)	NMC-LMO/C	16 kWh
BYD E6 (2010)	LFP	61 kWh
Toyota Prius - (2011) Hibrit	Li-ion	4.4 kWh
Chevy Volt - (2011) Hibrit	LMO/NMC	16 kWh,
Chevrolet Spark (2012)	LFP/C	21 kWh
Tesla S - (2012)	18650 NCA	70 kWh - 90 kWh
Honda Fit EV - (2013)	NMC/LTO	20 kWh
Smart Fortwo - (2013)	18650 Li-ion-NMC/C	16.5 kWh
VW Egolf - (2015)	NMC/C	24 kWh
Nissan Leaf - (2015)	(LMO)	30 kWh
Chevy Bolt - (2016) Hibrit	NMC/C	60 kWh
Renault Zoe (2017)	NMC/C	41 kWh
Tesla 3 - (2018)	NCA/Si-C	75 kWh
BMW i3 - (2019)	LMO/NMC	42 kWh

## 5. SONUÇLAR

Bu makalede geçmişten günümüze kadar olan elektrikli araçlarda kullanılan ve hala araştırma aşamasında olan pil kimyaları üzerine detaylı bir çalışma yapılmıştır. Elektrikli cihazlarda ve elektrikli araçlarda kullanılan pil türleri tek tek açıklanmış üstün ve zayıf olan yönleri belirlenmiştir.

Tam elektrikli araçların performansı ve rekabet gücü, mevcut pil sistemlerinin güç, verimlilik ve pil maliyetleri açısından yakından bağlantılıdır. Enerji depolama cihazı geliştirmede, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu açısından iyi bir umut vaat eden bazı ilerlemeler vardır, ancak hiçbiri hızlı şarj / deşarj (yüksek güç yoğunluğu), büyük depolama kapasitesi (yüksek enerji yoğunluğu), düşük maliyet ve uzun ömür gibi parametrelerin istenen kombinasyonuna sahip değildir. Bu parametrelerin hepsini sağlayan bir pil sistemi tam olarak geliştirilememiştir.

Tablo 3'te pillerin üstün ve zayıf olan yönleri, Tablo 4'te ise elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan piller değerlendirildiğinde elektrikli araçlar için en uygun ve uygun olmayan pil türleri açıklanmıştır.

Kurşun asit piller 1900 yıllarda araç endüstrisinde denemeleri yapılan ilk akü teknolojisi olup General motors EV 1 elektrikli aracında kullanılmıştır. Aslında enerji depolamada iyi bir pil olmasına rağmen düşük enerji yoğunluğu ve ağırlığının fazla olması nedeniyle günümüzde fazla güç gerektiren araçlarda kullanılmamaktadır.

Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) piller kurşun asitli pile kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Peugeot 206 aracında kullanılmıştır. Ancak kadmiyumun zehirli bir madde olması, yüksek maliyet, pilin kullanılmadığı zamanlarda kendi kendini boşaltması, boşaldıktan sonra şarj işleminde daha az şarj tutması gibi zayıf yönlerinin fazla olması elektrikli araçlarda kullanımını sınırlamıştır.

Ni-MH piller ise kurşun asit ve ni-cd pillere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Taşınabilir aletler ve UPS ve Telekom gibi sabit uygulamalar için uzun bir süre kullanılmıştır. 2000 yılların başında hibrit araçlarda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde Toyota Prius ve Honda Insight, Honda Civic, Honda Accord ve Ford Escape dahil olmak üzere birçok hibrid modellerinde kullanımı mevcuttur. Ancak tam elektrikli araçlarda büyük ölçekli uygulamalar için ciddi bir aday olarak görülmemektedir.

ZEBRA pil, elektrikli araç uygulaması için uygun olan yüksek enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna sahiptir. Bununla birlikte, yüksek çalışma sıcaklığı, termal yönetimi ve güvenlik endişelerinden dolayı günümüzde elektrikli araçlarda kullanımı yoktur.

Li-ion piller şarj oranları, kullanım ömrü ve güvenilirlik gibi sorunları olmasına rağmen Pb-asit ve Ni-MH gibi diğer pil teknolojileriyle kıyaslandığında yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun raf ömrü gibi özellikleri ile enerji depolama alanında, taşınabilir cihazlarda ve elektrikli araçlarda en çok kullanılan pildir.

Çeşitli anot ve katot malzemeleri kombinasyonlarını kullanan LCO, LMO, LTO, NCA, NMC ve LPF gibi lityum tabanlı piller ise LCO pil dışında şu an için elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan pillerdir.

Özellikle NCA ve NMC piller elektrikli araçlarda pazar payları çok yüksektir. NCA ve NMC pillerin güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu fazla olup ve kullanım ömrü açısından iyi performans gösterir. Maliyeti yüksek olmasına rağmen NCA piller Tesla araçlarda kullanılmaktadır. NMC piller ise Tablo 2’de yer alan elektrikli araçlarda diğer lityum tabanlı pillerin karışımları ile kullanımını oldukça fazladır.

Gelecek için umut vaat eden pillerden olan li-s, li-air, Zn-air pilleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu pilleri şu an için elektrikli araçlarda ticari bir kullanımı mevcut değildir. Bu pillerin gelecek vaat eden üstün yönlerini ve elektrikli araçlarda kullanımı için uygun olmayan zayıf yönlerini sıralayacak olursak:

Lityum-hava pilleri, yüksek teorik özgül enerjilerine dayanarak, uzun menzilli elektrikli araçları daha ekonomik hale getirebilecek potansiyele sahip olup elektrik enerjisi depolama için son derece çekici bir teknolojidir. Elektrik motorları yüksek verimlilik sağlar (içten yanmalı bir motor için %35’e kıyasla %95). Li-hava hücreleri, bataryayı korumak için gerekli tesis dengesinin ihmal edilebilir bir hacim veya kütleye sahip olduğu varsayılarak, standart yakıt tanklarının üçte biri boyutunda bir batarya paketi ile bugünün araçlarına eşdeğer bir menzil sunabilir. Ancak devir sayısı, güvenlik ve çevrim ömrü gibi zayıf yönlerinin bulunmaktadır.

Li-s piller ise yüksek enerji yoğunluğu, yüksek şarj verimi, düşük hücre gerilimi, düşük maliyet, geniş sıcaklıkta çalışma aralığı ve ortalama çevrim ömrü gibi birçok üstün yönle sahip olması elektrikli araçlar için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Ancak çevrim ömürleri, döngü sırasında kapasitede hızlı azalma, yüksek kendi kendine deşarj oranları gibi sorunları mevcut olup bu sorunlar aşılmadıkça, Li-S pilleri uzun menzilli elektrikli araçlar için kötü bir seçim gibi görünmektedir.

Zn-air piller ise Zayıf özgül güçleri ve enerji verimlilikleri muhtemelen bu pillerin elektrikli araçlar için birincil enerji kaynağı olarak kullanılmasını engelleyecektir. Li-air pillere göre daha düşük özgül enerjiye sahip olmalarına rağmen, daha gelişmiş teknoloji durumları ve pratik olarak daha yüksek ulaşılabilir enerji yoğunlukları nedeniyle gelecekteki elektrikli araçlarda kullanılması daha olası görünmektedir.

## **ÇIKAR ÇATIŞMASI**

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

**KAYNAKLAR**

- Armand, M., & Tarascon, J. M. (2008). Building better batteries. *Nature*, 451(7179), 652-657. doi:[10.1038/451652a](https://doi.org/10.1038/451652a)
- Asghar, R., Rehman, F., Ullah, Z., Qamar, A., Ullah, K., Iqbal, K., Aman, A., & Nawaz, A. A. (2021). Electric vehicles and key adaptation challenges and prospects in Pakistan: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 278. doi:[10.1016/j.jclepro.2020.123375](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123375)
- Aurbach, D., McCloskey, B. D., Nazar, L. F., & Bruce, P. G. (2016). Advances in understanding mechanisms underpinning lithium-air batteries. *Nature Energy*, 1(9), 1-11. doi:[10.1038/nenergy.2016.128](https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.128)
- Bai, Y. -s., & Zhang, C. -n. (2014). Experiments study on fast charge technology for Lithium-ion electric vehicle batteries. In: Proceedings of the IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 1-6. doi:[10.1109/ITEC-AP.2014.6940761](https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6940761)
- Bentley, W. F., & Heacock, D. K. (1996). Battery management considerations for multichemistry systems. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 11(5), 23-26. doi:[10.1109/62.494184](https://doi.org/10.1109/62.494184)
- Blurton, K. F., & Sammells, A. F. (1979). Metal/air batteries: Their status and potential - a review. *Journal of Power Sources*, 4(4), 263-279. doi:[10.1016/0378-7753\(79\)80001-4](https://doi.org/10.1016/0378-7753(79)80001-4)
- Bruce, P., Scrosati, B., & Tarascon, J. (2008). Nanomaterials for rechargeable lithium batteries. *Angewandte Chemie - International Edition*, 47(16), 2930-2946. doi:[10.1002/anie.200702505](https://doi.org/10.1002/anie.200702505)
- Bruce, P., Freunberger, S., Hardwick, L., & Tarascon, J. (2012). Li-O<sub>2</sub> and Li-S batteries with high energy storage. *Nature Materials*, 11(1), 19-29. doi:[10.1038/nmat3191](https://doi.org/10.1038/nmat3191)
- Budde-Meiwes, H., Drillkens, J., Lunz, B., Muennix, J., Rothgang, S., Kowal, J., & Sauer, D. U. (2013). A review of current automotive battery technology and future prospects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(5), 761-776. doi:[10.1177/0954407013485567](https://doi.org/10.1177/0954407013485567)
- Burd, J., Moore, E. A., Ezzat, H., Kirchain, R., & Roth, R. (2021). Improvements in electric vehicle battery technology influence vehicle lightweighting and material substitution decisions. *Applied Energy*, 283. doi:[10.1016/j.apenergy.2020.116269](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116269)
- Burke, A., & Miller, M. (2009). Performance characteristics of lithium-ion batteries of various chemistries for plug-in hybrid vehicles. In: Proceedings of the 24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 816-828.
- Can Güven, E., & Gedik, K. (2019). Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 726-737. doi:[10.21597/jist.446170](https://doi.org/10.21597/jist.446170)
- Canis, B. (2013). Battery manufacturing for hybrid and electric vehicles: Policy Issues. Congressional Research Service Report for Congress: R41709.
- Cano, Z. P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z. (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*, 3(4), 279-289. doi:[10.1038/s41560-018-0108-1](https://doi.org/10.1038/s41560-018-0108-1)
- Catenacci, M., Verdolini, E., Bosetti, V., & Fiorese, G. (2013). Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. *Energy Policy*, 61, 403-413. doi:[10.1016/j.enpol.2013.06.078](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.078)
- Chan, C. C. (1993). An overview of electric vehicle technology. *Proceedings of the IEEE*, 81(9), 1202-1213. doi:[10.1109/5.237530](https://doi.org/10.1109/5.237530)
- Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles with their superior fuel economy and performance, hybrid vehicles will likely increase in popularity in coming years; further development of control theory for hybrids is essential for their progress. *Fellow IEEE*, 95(4), 704-718. doi:[10.1109/JPROC.2007.892489](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489)
- Chan, C. C. (2013). The rise & fall of electric vehicles in 1828-1930: Lessons learned. *Proceedings of the IEEE*, 101(1), 206-212. doi:[10.1109/JPROC.2012.2228370](https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2228370)



- Chang, W. Y. (2013). The state of charge estimating methods for battery: a review. *ISRN Applied Mathematics*, 2013(1), 1-7. doi:[10.1155/2013/953792](https://doi.org/10.1155/2013/953792)
- Cheng, H., Shapter, J. G., Li, Y., & Gao, G. (2021). Recent progress of advanced anode materials of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 57, 451-468. doi:[10.1016/j.jechem.2020.08.056](https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.08.056)
- Choi, J. W., & Aurbach, D. (2016). Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities. *Nature Reviews Materials*, 1. doi:[10.1038/natrevmats.2016.13](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.13)
- Christensen, J., Albertus, P., Sanchez-Carrera, R., Lohmann, T., Kozinsky, B., Liedtke, R., Ahmed, J., & Kojic, A. (2011). A critical review of li/air batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(2), R1-R30. doi:[10.1149/2.086202jes](https://doi.org/10.1149/2.086202jes)
- Chu, S. & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411), 294-303. doi:[10.1038/nature11475](https://doi.org/10.1038/nature11475)
- Cluzel, C., & Douglas, C. (2012). Cost and performance of EV batteries. Final Report for The Committee on Climate Change. [www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/06/CCC-battery-cost\\_-\\_Element-Energy-report\\_March2012\\_Finalbis.pdf](http://www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/06/CCC-battery-cost_-_Element-Energy-report_March2012_Finalbis.pdf)
- Das, H. S., Tan, C. W., & Yatim, A. H. M. (2017). Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 268-291. doi:[10.1016/j.rser.2017.03.056](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.056)
- Deng, W., Phung, J., Li, G., & Wang, X. (2021). Realizing high-performance lithium-sulfur batteries via rational design and engineering strategies. *Nano Energy*, 82. doi:[10.1016/j.nanoen.2021.105761](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105761)
- Dikmen, İ. C., Kartaca, K., Karadağ, T., & Abbasov, T. (2018). Batarya teknolojilerine genel bir bakış. In: A. Atmaca (Eds.), *3rd International Energy & Engineering Congress Proceeding Book*, (pp. 974-987).
- Ding, Y., Cano, Z. P., Yu, A., Lu, J., & Chen, Z. (2019). Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochemical Energy Reviews*, 2(1), 1-28. doi:[10.1007/s41918-018-0022-z](https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z)
- Dinger, A., Martin, R., Mosquet, X., Rabl, M., Rizoulis, D., Russo, M., & Sticher, G. (2010). Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. The Boston Consulting Group.
- Duffner, F., Mauler, L., Wentker, M., Leker, J., & Winter, M. (2021). Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs. *International Journal of Production Economics*, 232. doi:[10.1016/j.ijpe.2020.107982](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107982)
- Enache, B., Lefter, E., & Cepisca, C. (2014). Batteries for Electrical Vehicles: A Review. In: N. Bizon, L. Dascalescu, & N. M. Tabatabaei (Eds.), *Autonomous Vehicles* (pp. 409-429). Intelligent Transport Systems and Smart Technologies, Nova Science Publishers, New York.
- Fergus, J. W. (2010). Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 195(4), 939-954. doi:[10.1016/j.jpowsour.2009.08.089](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.08.089)
- Frieske, B., Kloetzke, M., & Mauser, F. (2014). Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles. In: Proceedings of the World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 1-12. doi:[10.1109/EVS.2013.6914783](https://doi.org/10.1109/EVS.2013.6914783)
- Gerlitz, E., Greifenstein, M., Hofmann, J., & Fleischer, J. (2021). Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System. Proceedings of the 8th CIRP Global Web Conference, *Procedia CIRP*, 96, 175-180. doi:[10.1016/j.procir.2021.01.071](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.071)
- Gerssen-Gondelach, S. J., & Faaij, A. P. C. (2012). Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. *Journal of Power Sources*, 212, 111-129. doi:[10.1016/j.jpowsour.2012.03.085](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.03.085)
- Goutam, S., Timmermans, J. M., Omar, N., Van den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2015). Comparative study of surface temperature behavior of commercial li-ion pouch cells of different chemistries and capacities by infrared thermography. *Energies*, 8(8), 1-18. doi:[10.3390/en8088175](https://doi.org/10.3390/en8088175)
- Grey, C. P., & Tarascon, J. M. (2016). Sustainability and in situ monitoring in battery development. *Nature Materials*, 16(1), 45-56. doi:[10.1038/nmat4777](https://doi.org/10.1038/nmat4777)

- Guarnieri, M. (2011). When cars went electric, Part 1. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(1), 61-62. doi:[10.1109/mie.2011.940248](https://doi.org/10.1109/mie.2011.940248)
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1513-1522. doi:[10.1016/j.rser.2008.09.028](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.028)
- Halimah, P. N., Rahardian, S., & Budiman, B. A. (2019). Battery Cells for Electric Vehicles. *International Journal of Sustainable Transportation Technology*, 2(2), 54-57.
- Hannan, M. A., Hoque, M. M., Mohamed, A., & Ayob, A. (2018). Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 771-789. doi:[10.1016/j.rser.2016.11.171](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.171)
- Hirve, S. S., & Vidyapeeth, B. (2018). A Study of Different Energy Storage Devices Used in Electric Vehicles. *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 5(3), 582-595.
- Hu, H-Y., Xie, N., Wang, C., Wu, F., Pan, M., Li, H-F., Wu, P., Wang, X-D, Zeng, Z., Deng, S., Wu, M. H., Vinodgopal, K., & Dai, G-P. (2019). Enhancing the performance of motive power lead-acid batteries by high surface area carbon black additives. *Applied Sciences*, 9(1). doi:[10.3390/app9010186](https://doi.org/10.3390/app9010186)
- Iclodean, C., Varga, B., Burnete, N., Cimerdean, D., & Jurchiș, B. (2017). Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. In: Proceedings of the International Congress of Automotive and Transport Engineering - Mobility Engineering and Environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 252, 012058. doi:[10.1088/1757-899X/252/1/012058](https://doi.org/10.1088/1757-899X/252/1/012058)
- Jaiswal, A., & Chalasani, S. C. (2015). The role of carbon in the negative plate of the lead-acid battery. *Journal of Energy Storage*, 1(1), 15-21. doi:[10.1016/j.est.2015.05.002](https://doi.org/10.1016/j.est.2015.05.002)
- Khaligh, A., & Li, Z. (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), 2806-2814. doi:[10.1109/TVT.2010.2047877](https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2047877)
- Kisacikoglu, M. C., Bedir, A., Ozpineci, B., & Tolbert, L. M. (2012). PHEV-EV charger technology assessment with an emphasis on V2G operation. (Technical Report: ORNL/TM-2010/221) Oak Ridge National Laboratory. doi:[10.2172/1050257](https://doi.org/10.2172/1050257)
- Kolosnitsyn, V. S., & Karaseva, E. V. (2008). Lithium-sulfur batteries: Problems and solutions. *Russian Journal of Electrochemistry*, 44(5), 506-509. doi:[10.1134/S1023193508050029](https://doi.org/10.1134/S1023193508050029)
- Kong, L., Yin, L., Xu, F., Bian, J., Yuan, H., Lu, Z., & Zhao, Y. (2021). Electrolyte solvation chemistry for lithium-sulfur batteries with electrolyte-lean conditions. *Journal of Energy Chemistry*, 55, 80-91. doi:[10.1016/j.jechem.2020.06.054](https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.06.054)
- Kromer, M. A., & Heywood, J. B. (2007). Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. [web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/files/kromer\\_electric\\_powertrains.pdf](http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/files/kromer_electric_powertrains.pdf)
- Kwade, A., Haselrieder, W., Leithoff, R., Modlinger, A., Dietrich, F., & Droeder, K. (2018). Current status and challenges for automotive battery production technologies. *Nature Energy*, 3(4), 290-300. doi:[10.1038/s41560-018-0130-3](https://doi.org/10.1038/s41560-018-0130-3)
- Larcher, D., & Tarascon, J. M. (2015). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry*, 7(1), 19-29. doi:[10.1038/nchem.2085](https://doi.org/10.1038/nchem.2085)
- Leitman, S., & Brant, B. (2009). *Build Your Own Electric Vehicle* (2nd ed.). The McGraw-Hill Companies.
- Li, C., Negnevitsky, M., Wang, X., Yue, W. L., & Zou, X. (2019). Multi-criteria analysis of policies for implementing clean energy vehicles in China. *Energy Policy*, 129, 826-840. doi:[10.1016/j.enpol.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.002)
- Li, W., Liu, J., & Zhao, D. (2016). Mesoporous materials for energy conversion and storage devices. *Nature Reviews Materials*, 1(6). doi:[10.1038/natrevmats.2016.23](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.23)
- Li, Y., & Lu, J. (2017). Metal-Air Batteries: Will They Be the Future Electrochemical Energy Storage Device of Choice?. *ACS Energy Letters*, 2(6), 1370-1377. doi:[10.1021/acseenergylett.7b00119](https://doi.org/10.1021/acseenergylett.7b00119)

- Lin, D., Liu, Y., & Cui, Y. (2017). Reviving the lithium metal anode for high-energy batteries. *Nature Nanotechnology*, 12(3), 194-206. doi:[10.1038/nnano.2017.16](https://doi.org/10.1038/nnano.2017.16)
- Liang, Y., Zhao, C-Z., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J-Q., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M-M., Chueh, Y-L., Yu, H. & Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6-32. [10.1002/inf2.12000](https://doi.org/10.1002/inf2.12000)
- Liu, J., Bao, Z., Cui, Y., Dufek, E. J., Goodenough, J. B., Khalifah, P., Li, Q., Liaw, B. Y., Liu, P., Manthiram, A., Meng, Y. S., Subramanian, V. R., Toney, M. F., Viswanathan, V. V., Whittingham, M. S., Xiao, J., Xu, W., Yang, J., Yang, X. Q., & Zhang, J. G. (2019). Pathways for practical high-energy long-cycling lithium metal batteries. *Nature Energy*, 4(3), 180-186. doi:[10.1038/s41560-019-0338-x](https://doi.org/10.1038/s41560-019-0338-x)
- Lu, J., Chen, Z., Ma, Z., Pan, F., Curtiss, L. A., & Amine, K. (2016). The role of nanotechnology in the development of battery materials for electric vehicles. *Nature Nanotechnology*, 11(12), 1031-1038. doi:[10.1038/nnano.2016.207](https://doi.org/10.1038/nnano.2016.207)
- Lu, J., Wu, T., & Amine, K. (2017). State-of-the-art characterization techniques for advanced lithium-ion batteries. *Nature Energy*, 2(3). doi:[10.1038/nenergy.2017.11](https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.11)
- Lukic, S. M., Cao, J., Bansal, R. C., Rodriguez, F., & Emadi, A. (2008). Energy storage systems for automotive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2258-2267. doi:[10.1109/TIE.2008.918390](https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918390)
- Lynch, W. A., & Salameh, Z. M. (1997). Realistic electric vehicle battery evaluation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 12(4), 407-412. doi:[10.1109/60.638961](https://doi.org/10.1109/60.638961)
- Manthiram, A., Yu, X., & Wang, S. (2017). Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *Nature Reviews Materials*, 2(4), 1-16. doi:[10.1038/natrevmats.2016.103](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.103)
- Matthews, L., Lynes, J., Riemer, M., Del Matto, T., & Cloet, N. (2017). Do we have a car for you? Encouraging the uptake of electric vehicles at point of sale. *Energy Policy*, 100, 79-88. doi:[10.1016/j.enpol.2016.10.001](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.001)
- May, G. (2006). Battery options for hybrid electric vehicles. *IET Hybrid Vehicle Conference 2006 Publications*, 67-78. doi:[10.1049/cp:20060614](https://doi.org/10.1049/cp:20060614)
- Merry, G. W. (1991). Zinc-air batteries for electric vehicles. SAE Technical Papers. doi:[10.4271/911912](https://doi.org/10.4271/911912)
- Mersky, A. C., Sprei, F., Samaras, C., & Qian, Z. S. (2016). Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 56-68. doi:[10.1016/j.trd.2016.03.011](https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.011)
- Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 12(6), 1-20. doi:[10.3390/en12061074](https://doi.org/10.3390/en12061074)
- Miller, P. (2015). Automotive lithium-ion batteries. *Johnson Matthey Technology Review*, 59(1), 4-13. doi:[10.1595/205651315X685445](https://doi.org/10.1595/205651315X685445)
- Moralı, U., & Erol, S. (2020). 18650 lityum-iyon ve 6HR61 nikel-metal hidrit tekrar şarj edilebilir pillerinin elektrokimyasal empedans analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 297-309. doi:[10.17341/gazimmfd.463280](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.463280)
- Muratoğlu, Y., & Akkaya, A. (2015). Elektrikli Araç Teknolojisi ve Pil Yönetim Sistemi-İnceleme. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 458, 10-14.
- Nemry, F., Leduc, G., & Muñoz, A. (2009). Plug-in hybrid and battery-electric vehicles: state of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency. Joint Research Centre (Technical Note: JRC 54699). <http://ipts.jrc.ec.europa.eu/publications/pub.cfm?id=2759>
- Nor, J. K. (1993). Art of charging electric vehicle batteries. *Proceedings of WESCON 1993*, 521-525. doi:[10.1109/WESCON.1993.488489](https://doi.org/10.1109/WESCON.1993.488489)
- Ogura, K., & Kolhe, M. L. (2017). Battery technologies for electric vehicles. In: T. Muneer, M. L. Kolhe, & A. Doyle (Eds.), *Electric Vehicles: Prospects and Challenges* (pp. 139-167). Elsevier Inc. doi:[10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5)

- Oman, H., & Gross, S. (1995). Electric-vehicle batteries. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 10(2), 29-35. doi:[10.1109/62.350734](https://doi.org/10.1109/62.350734)
- Omar, N., Verbrugge, B., Mulder, G., Van Den Bossche, P., Van Mierlo, J., Daowd, M., Dhaens, M., & Pauwels, S. (2010). Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-6, 1-3 September, Lille, France. doi:[10.1109/VPPC.2010.5729083](https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729083)
- Omar, N., Van Den Bossche, P., Mulder, G., Daowd, M., Timmermans, J. M., Van Mierlo, J., & Pauwels, S. (2011). Assessment of performance of lithium iron phosphate oxide, nickel manganese cobalt oxide and nickel cobalt aluminum oxide based cells for using in plug-in battery electric vehicle applications. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-7, 6-9 September, Chicago, IL, USA. doi:[10.1109/VPPC.2011.6043017](https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043017)
- Palmer, K., Tate, J. E., Wadud, Z., & Nellthorp, J. (2018). Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan. *Applied Energy*, 209, 108-119. doi:[10.1016/j.apenergy.2017.10.089](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.089)
- Pang, Q., Liang, X., Kwok, C. Y., & Nazar, L. F. (2016). Advances in lithium-sulfur batteries based on multifunctional cathodes and electrolytes. *Nature Energy*, 1(9), 1-11. doi:[10.1038/nenergy.2016.132](https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.132)
- Park, M., Ryu, J., Wang, W., & Cho, J. (2016). Material design and engineering of next-generation flow-battery technologies. *Nature Reviews Materials*, 2(1), 1-18. doi:[10.1038/natrevmats.2016.80](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.80)
- Parsons, M. B., & Mepsted, G. O. (2014). Development of off-road hybrid-electric powertrains and review of emerging battery chemistries. *5th IET Hybrid and Electric Vehicles Conference*, 1-7, 5-6 November, London. doi:[10.1049/cp.2014.0940](https://doi.org/10.1049/cp.2014.0940)
- Perujo, A., Grootveld, G. V., & Scholz, H. (2012). Present and future role of battery electrical vehicles in private and public urban transport. In: Z. Stević (Eds), *New Generation of Electric Vehicles* (pp. 3-25). Intech doi:[10.5772/54507](https://doi.org/10.5772/54507)
- Rahman, M. A., Wang, X., & Wen, C. (2014). A review of high energy density lithium-air battery technology. *Journal of Applied Electrochemistry*, 44(1), 5-22. doi:[10.1007/s10800-013-0620-8](https://doi.org/10.1007/s10800-013-0620-8)
- Ramoni, M. O., & Zhang, H. C. (2013). End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(6), 881-891. doi:[10.1007/s10098-013-0588-4](https://doi.org/10.1007/s10098-013-0588-4)
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404. doi:[10.3390/smartcities4010022](https://doi.org/10.3390/smartcities4010022)
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419-2430. doi:[10.1016/j.jpowsour.2009.11.048](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048)
- Soloveichik, G. L. (2011). Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2(1), 503-527. doi:[10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116](https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116)
- Stan, A. I., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Teodorescu, R., & Andreasen, S. J. (2014). Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications - An overview. *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2014*, 713-720, 22-24 May, Bran, Romania. doi:[10.1109/OPTIM.2014.6850936](https://doi.org/10.1109/OPTIM.2014.6850936)
- Sun, X., Li, Z., Wang, X., & Li, C. (2020). Technology development of electric vehicles: A review. *Energies*, 13(1), 1-29. doi:[10.3390/en13010090](https://doi.org/10.3390/en13010090)
- Sundaram, S. M., Kulkarni, M., & Diwakar, V. (2016). Management of large format liion batteries. *2015 IEEE International Transportation Electrification Conference*, 1-7, 27-29 August, Chennai, India. doi:[10.1109/ITEC-India.2015.7386883](https://doi.org/10.1109/ITEC-India.2015.7386883)
- Tarascon, J. M. (2010). Key challenges in future Li-battery research. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1923), 3227-3241. doi:[10.1098/rsta.2010.0112](https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0112)
- Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359-367. doi:[10.1038/35104644](https://doi.org/10.1038/35104644)

- Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82-102. doi:[10.1016/j.rser.2012.11.077](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077)
- Tinğ, N. S., Aksoy, İ., & Şahin, Y. (2015). Elektrikli Araçların Batarya Şarjında Kullanılan Güç Faktörü Düzeltmeli Klasik Ve Interleaved Yükseltici Türü Dönüştürücülerin Karşılaştırılması. VI. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi 2015, 1-6, 4-6 Haziran, Kocaeli, Türkiye.
- The Nobel Prize in Chemistry. (2019). <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/popular-information/>
- Tredeau, F. P., & Salameh, Z. M. (2009). Evaluation of lithium iron phosphate batteries for electric vehicles application. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1266-1270, 7-10 September, Dearborn, MI, USA. doi:[10.1109/VPPC.2009.5289704](https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289704)
- Tubb, R. (1939). Battery-driven electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Automobile Engineers*, 33(2), 582-603. doi:[10.1243%2FPIAE\\_PROC\\_1938\\_033\\_029\\_02](https://doi.org/10.1243%2FPIAE_PROC_1938_033_029_02)
- Van den Bossche, P., Vergels, F., Van Mierlo, J., Matheys, J., & Van Astenboer, W. (2006). SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. *Journal of Power Sources*, 162(2), 913-919. doi:[10.1016/j.jpowsour.2005.07.039](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.07.039)
- Van Schalkwijk, W. A. (1993). Lithium rechargeable batteries. *Proceedings of WESCON 1993*, 291-296. doi:[10.1109/WESCON.1993.488450](https://doi.org/10.1109/WESCON.1993.488450)
- van Vliet, O. P. R., Kruithof, T., Turkenburg, W. C., & Faaij, A. P. C. (2010). Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars. *Journal of Power Sources*, 195(19), 6570-6585. doi:[10.1016/j.jpowsour.2010.04.077](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.04.077)
- Vidyanandan, K. V. (2019). Batteries for Electric Vehicles. IEEE.
- Wang, Y., & Huang, H. Y. S. (2011). Comparison of lithium-ion battery cathode materials and the internal stress development. In: Conference Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition - Volume 4 (Parts A and B), 1685-1694, 11-17 November, Denver, Colorado, USA. doi:[10.1115/imece2011-65663](https://doi.org/10.1115/imece2011-65663)
- Wen, J., Zhao, D., & Zhang, C. (2020). An overview of electricity powered vehicles: Lithium-ion battery energy storage density and energy conversion efficiency. *Renewable Energy*, 162, 1629-1648. doi:[10.1016/j.renene.2020.09.055](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.055)
- Winter, M., & Brodd, R. J. (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?. *Chemical Reviews*, 104(10), 4245-4270. doi:[10.1021/cr020730k](https://doi.org/10.1021/cr020730k)
- Xiao, Q., Li, B., Dai, F., Yang, L., & Cai, M. (2015). Application of lithium-ion batteries in vehicle electrification. In: P. K. Shen, C-Y. Wang, S. P. Jiang, X. Sun, & J. Zhang (Eds.), *Electrochemical Energy: Advanced Materials and Technologies* (pp. 159-168). CRC Press.
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385. doi:[10.1016/j.rser.2015.04.130](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130)
- Young, K., Fierro, C., & Fetcenko, M. A. (2011). Status of Ni/MH battery research and industry. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 18-20, 24-28 July, Detroit, MI, USA. doi:[10.1109/PES.2011.6039071](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039071)
- Young, K., Wang, C., Wang, L. Y., & Strunz, K. (2013). Electric Vehicle Battery Technologies. In: R. Garcia-Valle, J. A. P. Lopes (Eds.), *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* (pp. 15-56). doi:[10.1007/978-1-4614-0134-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0134-6)
- Yoshino, A. (2012). The Birth of the Lithium-Ion Battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(24), 5798-5800. doi:[10.1002/anie.201105006](https://doi.org/10.1002/anie.201105006)



## Effect of Post-Annealing Treatment on the Structural, Optical, and Electrical Properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Thin Films

Semih INCECAM<sup>1,2\*</sup>, Adem SARAC<sup>1,2</sup>, Evren ERDİL<sup>1,2</sup>, Ali Orkun CAGIRTEKİN<sup>3</sup>, Selim ACAR<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>METU MEMS Center, Ankara, Turkey

<sup>2</sup>Department of Advanced Technologies, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, Ankara, Turkey

<sup>3</sup>Department of Physics, Science Faculty, Gazi University, Ankara, Turkey

Keywords	Abstract
Amorphous V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Post-Annealing DC Magnetron Sputtering Thin Films Characterization	Vanadium pentoxide (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) thin films were prepared on microscope glass slides using the reactive DC magnetron sputtering technique at room temperature. Post annealing process was performed at atmospheric conditions in 480°C for 1 hour. To investigate the effect of post-annealing treatment, morphological and structural analyses were carried out by field emission scanning electron microscopy (FESEM) and X-ray diffraction (XRD), respectively. Additionally optical characterization was completed using UV-Vis spectrophotometer. Current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements were performed to examine electrical properties. XRD revealed the drastic effect of post-annealing on the crystallization of amorphous V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> thin films. The amorphous as-deposited film structure transformed into the polycrystalline form after post-annealing treatment. FESEM images revealed a remarkable change in surface morphology from a smooth flat surface to a rough surface with the formation of V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> nanorods under the influence of post-annealing. Optical energy band gap was observed to decrease drastically. The significant changes in the structure and morphology of the thin films with post-annealing affected their electrical properties to a fair extent. While resistance increased, capacitance and dielectric permittivity of the films decreased with post-annealing treatment.

### Cite

İnceçam, S., Saraç, A., Erdil, E., Çağırtekin, A. O., & Acar, S. (2021). Effect of post-annealing treatment on the structural, optical, and electrical properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 299-307.

### Author ID (ORCID Number)

S. İnceçam, 0000-0003-0417-3761  
A. Saraç, 0000-0002-9099-4883  
E. Erdil, 0000-0001-5079-8530  
A.O. Çağırtekin, 0000-0001-8602-6233  
S. Acar, 0000-0003-4014-7800

### Article Process

**Submission Date** 30.04.2021  
**Revision Date** 18.06.2021  
**Accepted Date** 22.06.2021  
**Published Date** 24.06.2021

## 1. INTRODUCTION

Vanadium oxides have received a lot of attention recently because of their complex stages within the vanadium-oxygen graph. Especially, vanadium pentoxide (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), which is recently broadly utilized in electrical switching, catalysts, gas sensing, optoelectronic and smart thermochromic applications, has gotten major attention in research and innovation over the years among other MOS materials (Yan et al., 2015). Among different vanadium oxides, four compounds (namely VO, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, VO<sub>2</sub>, and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) correspond to the single valence state of vanadium (that is, V<sup>2+</sup>, V<sup>3+</sup>, V<sup>4+</sup> and V<sup>5+</sup>, respectively). Due to their extraordinary basic adaptability as well as their extraordinary chemical and physical features that are essential in catalytic and electrochemical implementations, these oxides merit special attention (Hébert et al., 2002). V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> is a semiconductor oxide of n-type conductivity that can be affected by the change in the density of oxygen vacancies following any V<sup>5+</sup> ↔ V<sup>4+</sup> transformation (Shimizu et al., 2009). Vanadium oxidation states rely on surrounding circumstances and production strategies. Nanostructured thin films can be synthesized by different techniques; like, sputtering (Cho et al., 2006; Xue-Jin et al., 2008; Ba et al., 2013; Luo et al., 2014), chemical vapor deposition (Kim et al., 1993; Kiri et al., 2011), sol-gel (Béteille & Livage, 1998; Wang et al., 2013), and

\*Corresponding Author, e-mail: [sincecam@mems.metu.edu.tr](mailto:sincecam@mems.metu.edu.tr)

pulsed laser deposition (Bowman & Gregg, 1998; Kumar et al., 2004). Various changes occurred in the structural and electrical properties of amorphous  $V_2O_5$  by the post-annealing process. In similar studies in the literature, Zou et al. (2009; 2010) and Prześniak-Welenc et al. (2015) reported the effect of post-annealing on  $V_2O_5$  thin films synthesized by different techniques. They found that after increasing the temperature up to 450-500°C, peaks appeared in XRD patterns. Besides that, samples that were post-annealed at 450°C and 500°C showed very thin  $V_2O_5$  nanorods grown from the surface of the as-prepared  $V_2O_5$  amorph film similar to Zou et al. (2010). After annealing at 500°C and higher temperatures, the  $V_2O_5$  nanorods became larger (Zou et al., 2009) and thus 480°C has been chosen as the post-annealing temperature.

In this work, vanadium pentoxide thin films were synthesized by the reactive DC magnetron sputtering method and then prepared by post-annealing in atmospheric conditions. The aim was to examine in detail the possible effects of post-annealing on the structural, optical and electrical properties of vanadium oxide thin films. For this purpose, unannealed and 480°C annealed samples were compared according to various measurements.

## 2. MATERIAL AND METHOD

The microscopy glass slides were used as substrates. Before vanadium oxide thin film was grown, the substrates were chemically cleaned to remove organic and other dirt on the surface. Ultrasonic cleaning were carried out in acetone for 10 minutes, isopropanol for 10 minutes and dried using nitrogen gas, sequentially. A series of amorphous  $V_2O_5$  thin films were deposited on microscope glass slides at room temperature using AJA ATC Orion 3 sputter system with a base pressure  $3 \times 10^{-7}$  Torr. Amorphous  $V_2O_5$  thin films were deposited by using a circular vanadium target of 4 inches (Kurt J. Lesker Co.) with a purity of 99.99%. Before the deposition process, to prevent surface contamination, the vanadium target was sputtered with Ar plasma for 3 minutes. The sputter parameters for amorphous  $V_2O_5$  thin films are shown in Table 1. During deposition, without any heating, the substrates were placed on a rotating fixture which rotates at a speed of 80 rpm. The deposition time was 20 minutes, and the film thickness was approximately 210 nm which was measured by a step profilometer (Dektak, Bruker).

**Table 1.** Sputtering Parameters for Amorphous  $V_2O_5$  Thin Films

Base Pressure	$3 \times 10^{-7}$ Torr
Sputtering Pressure	1.8 mTorr
Target	99.99% V
DC Power	550W
Sputtering gas	Pure Argon
Ar:O <sub>2</sub>	30:4
Substrate Temperature	RT
Thickness	210 nm
Sputtering time	20 min

After deposition, the post-annealing was performed at 480°C for 1 hour in the air. Throughout the paper, the as-grown (unannealed) and the 480°C annealed samples will be denoted respectively as AG and AT-480.

The phase structure of the synthesized thin films was identified by GI- X-ray diffraction (GIXRD, Rigaku, Ultima IV, Cu K $\alpha$  emission), and their surface morphology was investigated by a field emission scanning electron microscopy (FESEM, Hitachi SU-8230). Besides, the samples' optical properties were investigated by a UV-Vis spectrophotometer (Shimadzu UV-1800). An uncoated microscope glass slide was used as a reference and the optical energy band gap of the thin films was calculated.

A pair of interdigitated Ni-Cr electrodes were deposited on the substrates with a shadow mask by DC magnetron sputtering. The sputter parameters for Ni-Cr IDT are shown in Table 2.

**Table 2.** Sputtering Parameters for Ni-Cr IDT Electrodes

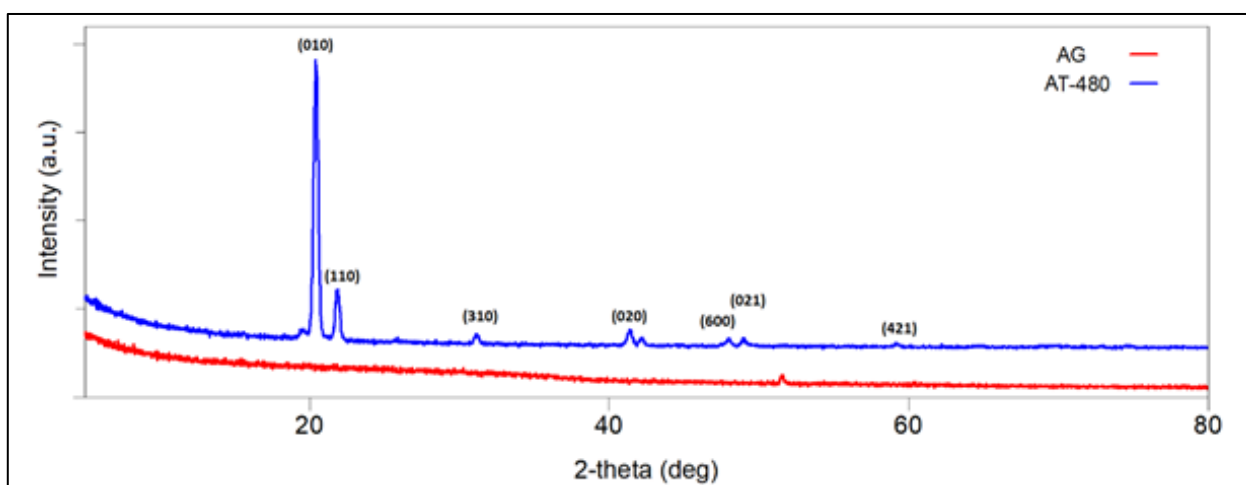
Base Pressure	$2 \times 10^{-7}$ Torr
Sputtering Pressure	2.7 mTorr
Target	99.99% Ni/Cr (80/20wt%)
DC Power	100W
Sputtering gas	Pure Argon
Ar:O <sub>2</sub>	30:0
Substrate Temperature	RT
Thickness	120 nm
Sputtering time	40 min

Electrical characterization of AG and AT-480 was investigated by a Keysight E4990A impedance analyzer and a Keithley 2400 source meter. The capacitance and conductance spectra of the AG and AT-480 samples were recorded in the frequency range from 1 kHz to 1.5 MHz. In addition to that current voltage measurements were performed.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Structural and Morphological Characterizations

Structural properties of the thin films were probed by GIXRD technique and the corresponding patterns of the produced films are given in Figure 1. Clearly, AT-480 thin film showed a polycrystalline V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> structure with preferred (010) orientation while AG thin film showed an amorphous phase. This demonstrates the critical impact of post annealing on the structure of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films.



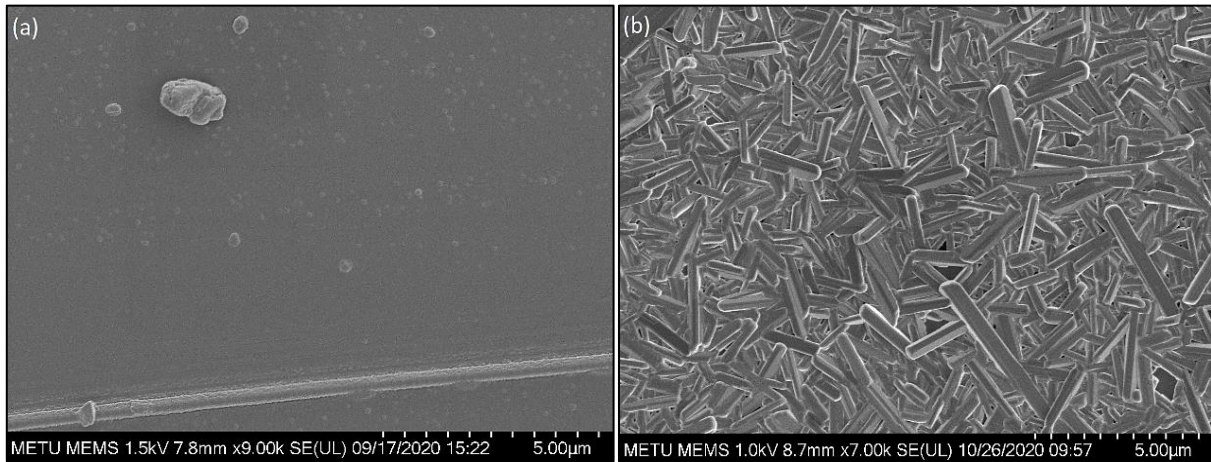
**Figure 1.** GIXRD Patterns for AG and AT-480 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Thin Films

In the XRD pattern, no obvious Bragg peaks were observed in the AG sample which corresponds to amorphous V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> material. However, the post-annealed sample AT-480 can be indexed to the orthorhombic V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> phase (ICDD: 01-72-0598). The sharpest peak appeared to indicate the V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (010). This crystalline structure is the same as that reported for V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorods by other research groups (Zou et al., 2009; Yan et al., 2015; Van de



Kerckhove et al., 2017). The crystalline property and grain size of the films were found to increase after annealing.

Surface morphologies of the synthesized films were examined through FESEM. To investigate the effect of post-annealing on the material, FE-SEM images in Figure 2 were taken from AT-480 and AG samples. The secondary electron (SE) detector of the device was used while these images were taken.

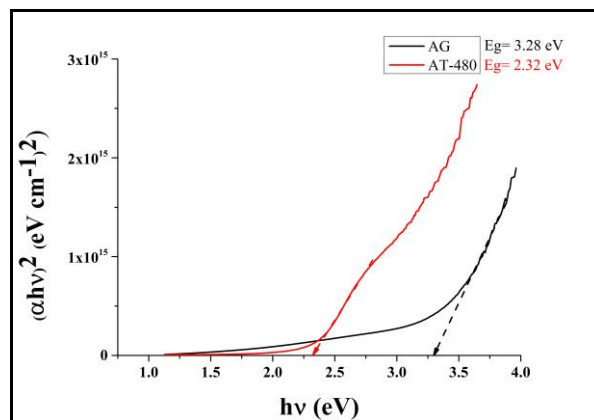


**Figure 2.** FESEM Images of *a)* AG and *b)* AT-480  $V_2O_5$  Thin Films

Structural differences are seen in Figure 2a and 2b. In Figure 2a of the AG sample, vanadium oxide is seen as a flat film. No nanostructural formation was observed on the surface. In Figure 2b, AT-480 thin film took the form of a nanorod by the post-annealing effect. The resulting nanorods have a 150-300 nm width and approximately a 1µm length. This shows the impact of thermodynamic-based surface diffusions in the growth mechanism of nanorods (Zou et al., 2010). In a similar study in the literature, similar structures were observed in the SEM image taken from the vanadium oxide thin films, produced by Zou et al. (2009) with the sputtering technique.

### 3.2. Optical Characterization

The optical properties of thin films were examined by a UV-Vis spectrophotometer. Measurements were taken for AG and AT-480 samples in the 300-1100 nm wavelength range with the Shimadzu UV-1800 instrument. Using these, the Tauc graphs in Figure 3 were drawn with calculations and the energy bandgap range was calculated for each sample. The effect of post-annealing was investigated.



**Figure 3.**  $(\alpha hv)^2 - hv$  Graphs for AG and AT-480  $V_2O_5$  Thin Films

The direct optical band gap ( $E_g$ ) of the  $V_2O_5$  films was estimated by extrapolating the linear region of  $(\alpha hv)^2$  versus  $hv$  curve to zero (Figure 3). From the  $(\alpha hv)^2 - hv$  graph shown in Figure 3, the point where the slope of

the edge-tail intersects on the energy axis gives the optical energy band gap range for that material. The values of  $E_g$  were estimated as 3.28 eV and 2.32 eV for AG and AT-480 thin films, respectively.

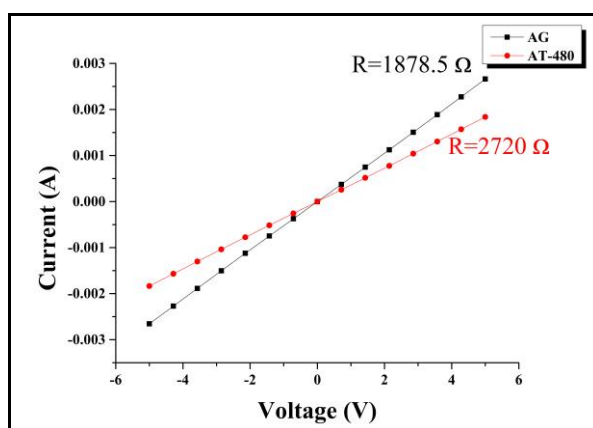
Optical energy band gap was observed to decrease drastically. Indeed, upon exposure of the films to higher annealing temperatures in another literature study, a shift of the band gap to low energy was recorded implying that Vanadium oxides' band gaps decrease with the increase in annealing temperature (Yelsani et al., 2019). For the annealed  $V_2O_5$  thin film, the optical energy band gap value was found similarly by Lamsal & Ravindra (2013) and Vijayakumar et al. (2014).

Similar observations were also reported in  $V_2O_5$  films deposited by dip-coating technique (Vasanth Raj et al., 2013), it can also be explained by the quantum size effect in which the films have large size crystallites. However, the bandgap of  $V_2O_5$  is dependent on the experimental conditions and preparation methods (Benmoussa et al., 2002; Rajendra Kumar et al., 2003).

### 3.3. Electrical Characterization

#### 3.3.1. Current-Voltage

Current-voltage measurements were performed at room temperature to determine the effect of post-annealing on the resistance of the films. The current-voltage characteristic plot and corresponding resistances are displayed in Figure 4.



**Figure 4.** Current-Voltage Curves for AG and AT-480  $V_2O_5$  Thin Films

Obviously, surface resistance increased from 1878.5  $\Omega$  to 2720  $\Omega$  with the annealing process. This points out that electrical properties can change drastically with the annealing process. It is established that resistivity of a material is associated with carrier concentration and mobility (Hu et al., 2004). This behavior which is observed in some oxides such as ITO (Mohamed, 2007) and  $V_2O_5$  (Mohamed, 2009) may be attributed to the process of oxygen chemisorption on the surface of the films where it behaves like an electron acceptor. The electrical resistivity increments slightly which may be due to the increment in the surface roughness as was seen by SEM images (Figure 2), due to the possible interaction of glass substrate and the produced films at high temperatures (Ramana et al., 2004; Mohamed, 2007).

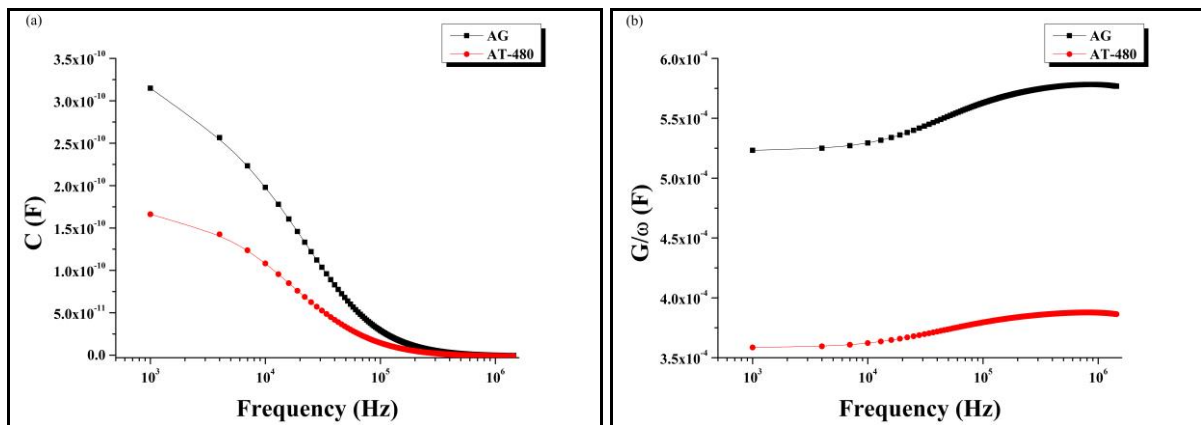
#### 3.3.2. Capacitance and Conductance

The capacitance and conductance measurements were performed over a frequency range of 1 kHz-1.5 MHz at room temperature. Figures 5a and 5b show respectively the capacitance-frequency and conductance-frequency measurements of both samples.

As can be seen from Figure 5a, the capacitance decreases with increasing frequency. Such a decrease can be best attributed to the inability of electric dipoles to follow the polarity of the high-frequency electric field and to the immobilization of charge carriers captured at deep traps (Budaguan et al., 1998). It can be also correlated with the confinement of charge carriers by gap states present more densely in amorph structures (Sengodan et al., 2013), and this explains the observed steep decrease in amorphous AG films and the gradual decrease in

AT 480 well-crystallized films. The AT-480 thin film showed nanorods and porous morphology of the surface as mentioned above. This can be the reason for the decrease of the capacitance of the  $V_2O_5$  film after annealing at  $480^\circ\text{C}$ . As a result, a small number of charges were stored in  $V_2O_5$  nanorods which gave down to its capacitance value.

As can be seen from Figure 5b, the measured conductance values increase with increasing frequencies. The conductance of both samples revealed similar behavior as a function of frequency. However, the effect of frequency on conductance was more prominent in AG samples than in AT 480 samples where the latter recorded a very slight increase in conductance with frequency as compared to the former. The conductance decreased slightly with the annealing process and this result is in line with the resistance result which was discussed above.



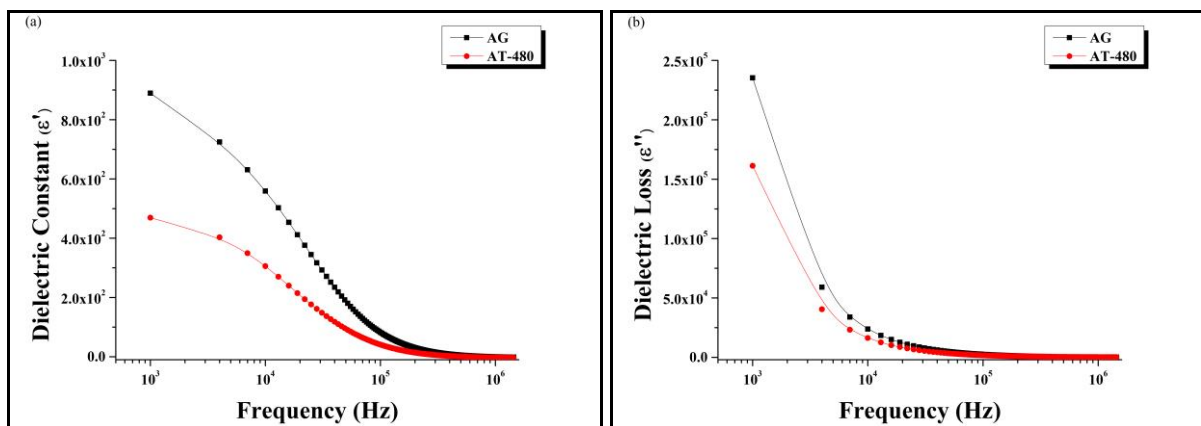
**Figure 5.** a) Capacitance-Frequency and b) Conductance-Frequency Measurements of AG and AT-480  $V_2O_5$  Thin Films

### 3.3.3. Dielectric

The complex dielectric permittivity ( $\epsilon^*$ ) can be written as (Karaduman Er et al., 2021);

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$$

where  $\epsilon' = \frac{C}{C_0}$  is the real part that is known as dielectric constant and  $\epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0}$  is the imaginary part that is known as dielectric loss.  $\omega = 2\pi f$  is the angular frequency of electric field,  $C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$  is capacitance of free space, A is area and d is thickness of the films,  $\epsilon_0$  is permittivity of free space, C and G are respectively the measured capacitance and conductance. The frequency dependence of dielectric properties at room temperature for the AG and AT-480 thin films is calculated and plotted in Figure 6.



**Figure 6.** The Frequency-Dependent Behavior of a) Dielectric Constant and b) Dielectric Loss of AG and AT-480  $V_2O_5$  Thin Films

Figure 6a shows the dielectric constant of AG and AT-480 samples at room temperature. As frequency increased, the dielectric constant of both samples was found to decrease. The dielectric constant is observed to decrease with increasing frequency due to the inability of induced dipoles to arrange themselves in the direction of the applied field (Sengodan et al., 2013). A similar situation was also reported earlier in the literature by Thomas & Jayalekshmi (1989). Furthermore, with the post-annealing process, the dielectric constant of the AT-480 film decreased. Similar results have been reported by Ahmed et al. (2019). Subsequently, an increase in the annealing temperatures caused a further decrease in the dielectric constant as was demonstrated earlier in the literature (Arshad et al., 2014). The significant changes in the dielectric constant after the post-annealing process may be due to phase change caused by annealing (Obstarczyk et al., 2019).

Figure 6b shows the dielectric loss of AG and AT-480 samples at room temperature. It is clear from the figure that the dielectric loss of both samples decreased as the frequency is increased. The observed decrease in dielectric loss can be also related to the aspects of electrical polarization. At low frequencies, the dipoles contribute to the polarization since they can orient themselves with the electric field. However, as frequency increases, the dipole response becomes limited and thus the dielectric loss becomes low as well (Kumar et al., 2016). Besides that, the AG sample recorded higher dielectric loss values than that of AT-480 only in the low frequency region (up to about  $10^4$  Hz), beyond which both samples had approximately same loss values.

#### 4. CONCLUSION

In summary, the effect of post-annealing treatment on structural, morphological, optical and electrical properties of DC reactive magnetron sputtered amorphous  $V_2O_5$  films grown on microscope glass slides has been thoroughly examined by XRD, SEM, UV-Vis as well as I-V and C-V electric measurements, respectively. Structural studies revealed that the post-annealing treatment improves the crystal quality of an originally amorph structure. Surface morphologies of the films changed from amorphous flat-like structure to  $V_2O_5$  nanorods structure accompanied with an increase in roughness and grain size of the films under the effect of post-annealing treatment. The optical band gap energy recorded a remarkable decrease from 3.28 eV to 2.32 eV with the post-annealing treatment. Besides that, the changes in phase and morphology caused by post-annealing treatment have also induced some considerable changes in electric and dielectric properties of the films. The 480°C post-annealed film exhibited higher electric resistance (2720  $\Omega$ ) compared to the unannealed film (1878.5  $\Omega$ ) at room temperature. The increase in resistance was associated with a decrease in capacitance and dielectric constant. Nonetheless, the steep decrease of dielectric loss as compared to the slight decrease in dielectric constant with frequency demonstrates the eligibility of both materials for the manufacture of devices operating at mid-frequencies (particularly in the range of 10 kHz where dielectric losses are small enough compared to dielectric constant values).

#### ACKNOWLEDGEMENT

Authors would like to thank to Dr. Mustafa YILDIRIM and Emrah DIRICAN for their valuable supports and for their assistance during thin film deposition at METU MEMS Center. Authors also thank to Ahmad AJJAQ and Tayfun AGIR for the fruitful discussion on manuscript.

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

#### REFERENCES

- Ahmed, N. M., Sabah, F. A., Abdulgafour, H. I., Alsadig, A., Sulieman, A., & Alkhoaryef, M. (2019). The effect of post annealing temperature on grain size of indium-tin-oxide for optical and electrical properties improvement. *Results in Physics*, 13, 102159. doi:[10.1016/j.rinp.2019.102159](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102159)
- Ba, C., Bah, S. T., D'Auteuil, M., Ashrit, P. V., & Vallée, R. (2013). Fabrication of high-quality VO<sub>2</sub> thin films by ion-assisted dual ac magnetron sputtering. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(23), 12520-12525. doi:[10.1021/am403807u](https://doi.org/10.1021/am403807u)

- Benmoussa, M., Outzourhit, A., Bennouna, A., & Ameziane, E. L. (2002). Electrochromism in sputtered V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films: Structural and optical studies. *Thin Solid Films*, 405(1–2), 11–16. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01734-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01734-5)
- Béteille, F., & Livage, J. (1998). Optical Switching in VO<sub>2</sub> Thin Films. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 13(1-3), 915-921. doi:[10.1023/a:1008679408509](https://doi.org/10.1023/a:1008679408509)
- Bowman, R. M., & Gregg, J. M. (1998). VO<sub>2</sub> thin films: Growth and the effect of applied strain on their resistance. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 9(3), 187-191. doi:[10.1023/A:1008822023407](https://doi.org/10.1023/A:1008822023407)
- Budaguan, B. G., Sherchenkov, A. A., Chernomordic, V. D., Biriukov, A. V., & Ljungberg, L. Y. (1998). A-Si:H/c-Si heterostructures prepared by 55 kHz glow discharge high-rate deposition technique. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 227-230, Part 2, 1123-1126. doi:[10.1016/S0022-3093\(98\)00289-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00289-0)
- Cho, C-R., Cho, S., Vadim, S., Jung, R., & Yoo, I. (2006). Current-induced metal-insulator transition in VO<sub>x</sub> thin film prepared by rapid-thermal-annealing. *Thin Solid Films*, 495(1-2), 375-379. doi:[10.1016/j.tsf.2005.08.241](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.08.241)
- Hébert, C., Willinger, M., Su, D. S., Pongratz, P., Schattschneider, P., & Schlögl, R. (2002). Oxygen K-edge in vanadium oxides: Simulations and experiments. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, 28(4), 407-414. doi:[10.1140/epjb/e2002-00244-4](https://doi.org/10.1140/epjb/e2002-00244-4)
- Hu, Y., Diao, X., Wang, C., Hao, W., & Wang, T. (2004). Effects of heat treatment on properties of ITO films prepared by rf magnetron sputtering. *Vacuum*, 75(2), 183-188. doi:[10.1016/j.vacuum.2004.01.081](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.01.081)
- Karaduman Er, I., Çağırtekin, A. O., Artuç, M., & Acar, S. (2021). Synthesis of Al/HfO<sub>2</sub>/p-Si Schottky diodes and the investigation of their electrical and dielectric properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(2), 1677–1690. doi:[10.1007/s10854-020-04937-9](https://doi.org/10.1007/s10854-020-04937-9)
- Kim, H. K., You, H., Chiarello, R. P., Chang, H. L. M., Zhang, T. J., & Lam, D. J. (1993). Finite-size effect on the first-order metal-insulator transition in VO<sub>2</sub> films grown by metal-organic chemical-vapor deposition. *Physical Review B*, 47(19), 12900-12907. doi:[10.1103/PhysRevB.47.12900](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.12900)
- Kiri, P., Warwick, M. E. A., Ridley, I., & Binions, R. (2011). Fluorine doped vanadium dioxide thin films for smart windows. *Thin Solid Films*, 520(4), 1363-1366. doi:[10.1016/j.tsf.2011.01.401](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.401)
- Kumar, R. T. R., Karunagaran, B., Mangalaraj, D., Narayandass, S. K., Manoravi, P., & Joseph, M. (2004). Characteristics of amorphous VO<sub>2</sub> thin films prepared by pulsed laser deposition. *Journal of Materials Science*, 39(8), 2869-2871. doi:[10.1023/B:JMSE.0000021467.53474.e3](https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000021467.53474.e3)
- Kumar, N. S., Raman, M. S., Chandrasekaran, J., Priya, R., Chavali, M., & Suresh, R. (2016). Effect of post-growth annealing on the structural, optical and electrical properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorods and its fabrication, characterization of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/p-Si junction diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 41, 497-507. doi:[10.1016/j.mssp.2015.08.020](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.08.020)
- Lamsal, C., & Ravindra, N. M. (2013). Optical properties of vanadium oxides-an analysis. *Journal of Materials Science*, 48(18), 6341-6351. doi:[10.1007/s10853-013-7433-3](https://doi.org/10.1007/s10853-013-7433-3)
- Luo, Z., Zhou, X., Yan, D., Wang, D., Li, Z., Yang, C., & Jiang, Y. (2014). Effects of thickness on the nanocrystalline structure and semiconductor-metal transition characteristics of vanadium dioxide thin films. *Thin Solid Films*, 550, 227-232. doi:[10.1016/j.tsf.2013.10.172](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.10.172)
- Mohamed, H. A. (2007). The effect of annealing and ZnO dopant on the optoelectronic properties of ITO thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(14), 4234-4240. doi:[10.1088/0022-3727/40/14/019](https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/14/019)
- Mohamed, H. A. (2009). Sintering process and annealing effect on some physical properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications*, 3(7), 693-699.
- Obstarczyk, A., Kaczmarek, D., Mazur, M., Wojcieszak, D., Domaradzki, J., Kotwica, T., & Morgiel, J. (2019). The effect of post-process annealing on optical and electrical properties of mixed HfO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> thin film coatings. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(7), 6358-6369. doi:[10.1007/s10854-019-00938-5](https://doi.org/10.1007/s10854-019-00938-5)

- Prześniak-Welenc, M., Łapiński, M., Lewandowski, T., Kościelska, B., Wicikowski, L., & Sadowski, W. (2015). The Influence of Thermal Conditions on V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Nanostructures Prepared by Sol-Gel Method. *Journal of Nanomaterials*, 2015(Special Issue), 418024. doi:[10.1155/2015/418024](https://doi.org/10.1155/2015/418024)
- Rajendra Kumar, R. T., Karunakaran, B., Senthil Kumar, V., Jeyachandran, Y. L., Mangalaraj, D., & Narayandass, S. K. (2003). Structural properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films prepared by vacuum evaporation. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 6(5–6), 543–546. doi: [10.1016/j.mssp.2003.08.017](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2003.08.017)
- Ramana, C. V., Smith, R. J., Hussain, O. M., & Julien, C. M. (2004). On the growth mechanism of pulsed-laser deposited vanadium oxide thin films. *Materials Science and Engineering B*, 111(2-3), 218-225. doi:[10.1016/j.mseb.2004.04.017](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.04.017)
- Sengodan, R., Shekar, B. C., & Sathish, S. (2013). Morphology, structural and dielectric properties of vacuum evaporated V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *Physics Procedia*, 49, 158-165. doi:[10.1016/j.phpro.2013.10.022](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.10.022)
- Shimizu, K., Chinzei, I., Nishiyama, H., Kakimoto, S., Sugaya, S., Matsutani, W., & Satsuma, A. (2009). Doped-vanadium oxides as sensing materials for high temperature operative selective ammonia gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 141(2), 410-416. doi:[10.1016/j.snb.2009.06.048](https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.06.048)
- Thomas, B., & Jayalekshmi, S. (1989). Dielectric properties of vanadium pentoxide thin films in the audiofrequency range. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 113(1), 65-72. doi:[10.1016/0022-3093\(89\)90319-0](https://doi.org/10.1016/0022-3093(89)90319-0)
- Van de Kerckhove, K., Mattelaer, F., Dendooven, J., & Detavernier, C. (2017). Molecular layer deposition of “vanadicone”, a vanadium-based hybrid material, as an electrode for lithium-ion batteries. *Dalton Transactions*, 46(14), 4542-4553. doi:[10.1039/c7dt00374a](https://doi.org/10.1039/c7dt00374a)
- Vasanth Raj, D., Ponpandian, N., Mangalaraj, D., & Viswanathan, C. (2013). Effect of annealing and electrochemical properties of sol-gel dip coated nanocrystalline V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(2), 256-262. doi:[10.1016/j.mssp.2012.11.001](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2012.11.001)
- Wang, N., Magdassi, S., Mandler, D., & Long, Y. (2013). Simple sol-gel process and one-step annealing of vanadium dioxide thin films: Synthesis and thermochromic properties. *Thin Solid Films*, 534, 594-598. doi:[10.1016/j.tsf.2013.01.074](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.01.074)
- Xue-Jin, W., Chun-Jun, L., Kang-Ping, G., De-Hua, L., Yu-Xin, N., Shi-Oiu, Z., Feng, H., Wei-Wei Z., & Zheng-Wei, C. (2008). Surface oxidation of vanadium dioxide films prepared by radio frequency magnetron sputtering. *Chinese Physics B*, 17(9), 3512-3515. doi:[10.1088/1674-1056/17/9/062](https://doi.org/10.1088/1674-1056/17/9/062)
- Vijayakumar, Y., Sayanna, R., Ramana Reddy, M. V. (2014). Annealing Effect on Structural, Optical and Electrical Properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Thin Films by Dip Coating. *Asian Journal of Applied Sciences*, 7(8) 753-760. doi:[10.3923/ajaps.2014.753.760](https://doi.org/10.3923/ajaps.2014.753.760)
- Yan, W., Hu, M., Wang, D., & Li, C. (2015). Room temperature gas sensing properties of porous silicon/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorods composite. *Applied Surface Science*, 346, 216-222. doi:[10.1016/j.apsusc.2015.01.020](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.020)
- Yelsani, V., Pothukanuri, N., Sontu, U. B., Yaragani, V., & Musku Venkata, R. R. (2019). Effect of annealing temperature on structural, morphological, optical and electrical properties of spray deposited V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 25(1), 3-6. doi:[10.5755/j01.ms.25.1.18492](https://doi.org/10.5755/j01.ms.25.1.18492)
- Zou, C. W., Yan, X. D., Han, J., Chen, R. Q., & Gao, W. (2009). Microstructures and optical properties of β-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorods prepared by magnetron sputtering. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(14), 145402. doi:[10.1088/0022-3727/42/14/145402](https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/14/145402)
- Zou, C. W., Yan, X. D., Patterson, D. A., Emanuelsson, E. A. C., Bian, J. M., & Gao, W. (2010). Temperature sensitive crystallization of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: from amorphous film to β-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorods. *CrystEngComm*, 12(3), 691-693. doi:[10.1039/b916614a](https://doi.org/10.1039/b916614a)



## Analysis of the Effect of Tool Nose Radius, Feed Rate, and Cutting Depth Parameters on Surface Roughness and Cutting Force in CNC Lathe Machining of 36CrNiMo4 Alloy Steel

Mustafa ÖZDEMİR<sup>1\*</sup>, Kazım ERCAN<sup>2</sup>, Burak BÜYÜKER<sup>3</sup>, Hamza Kemal AKYILDIZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yozgat Bozok University, Machine and Metal Technology Department, Yozgat Vocational High School

<sup>2</sup>Yozgat Bozok University, Department of Mechanical Engineering, Yozgat Bozok University

<sup>3</sup>Yozgat Bozok University, Graduate School of Education, Yozgat Bozok University

Keywords	Abstract
Machinability	In this study, in turning 36CrNiMo4 steel, the effects of cutting parameters on surface roughness ( $Ra$ ) value and main cutting force ( $Fc$ ) were investigated. Tool nose radius ( $R$ ), feed rate ( $f$ ), and cutting depth ( $a$ ) were used as machining parameters. The experiments were carried out at a constant cutting speed ( $V$ ) of 150 m/min and under dry cutting conditions. Taguchi L9 orthogonal index was used in the design of the experiment, and the effect levels of processing parameters according to Signal to Noise (S/N) ratios and the relationship between them were analyzed using the analysis of variance (ANOVA) method for the analysis of the results. It was determined that the $f$ was the most effective factor on the $Ra$ value with 75.13% by contribution rate, and the best $Ra$ value was obtained when 0.03 mm/rev $f$ was used. It was determined that the most effective factor affecting the $Fc$ was the $a$ with a ratio of 62.39%, was determined that the $Fc$ increased with the increase of the $a$ , the smallest $Fc$ was obtained when the $a$ was 0.05 mm.
Surface Roughness	
Cutting Forces	
Analysis of Variance	
Taguchi Method	

### Cite

Özdemir, M., Ercan, K., Büyüker, B., & Akyıldız, H. K. (2021). Analysis of the effect of tool nose radius, feed rate, and cutting depth parameters on surface roughness and cutting force in CNC lathe machining of 36CrNiMo4 alloy steel. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 308-317.

Author ID (ORCID Number)	Article Process	
M. Özdemir, 0000-0002-7340-0940	Submission Date	07.04.2021
K. Ercan, 0000-0003-1486-5681	Revision Date	16.06.2021
B. Büyüker, 0000-0003-3259-2736	Accepted Date	24.06.2021
H. K. Akyıldız, 0000-0002-5670-2314	Published Date	25.06.2021

## 1. INTRODUCTION

36CrNiMo4 steel is frequently used in aerospace, automotive, and machinery industries. Some application requirements operating under high stresses and repeated loads require this steel. The most important features of 36CrNiMo4 steel are its ability to reach high hardness values and to have a high level of toughness. The machinability of this material at the desired quality and tolerances depends on the manufacturing method used and the optimization of the method parameters. Despite the other manufacturing methods developed, machining methods constitute a significant part of the industry (Puertas & Luis-Pérez, 2003; Kundrak et al., 2008). Turning, which is one of the machining methods, is one of the most used methods. The reason why the turning process is more preferred is that shapes with complex geometries can be manufactured with more precise tolerances in a single operation. Basic parameters in the turning process;  $f$ ,  $a$ , and  $V$ . The effects of  $Ra$  values of the cutting parameters at different rates (Korkut et al., 2007; Selvaraj & Philip, 2021). Dureja et al. (2014) analyzed the cutting parameters that affect the  $Ra$  value when turning hardened AISI D3 steel using a coated carbide tool. Their analysis as a result of the optimization of the cutting parameters stated that the factor affecting the  $Ra$  value the most was the  $f$ . Thamizhmanii et al. (2007) found that the most influencing factor on surface quality in turning AISI 4140 steel is the  $a$  and the lower  $f$  provides better surface quality. In turning of AISI 4340 steel,  $Ra$  values decrease with low  $f$  (Rashid et al., 2016). Chou & Song (2004) reported that

\*Corresponding Author, e-mail: [mustafa.ozdemir@bozok.edu.tr](mailto:mustafa.ozdemir@bozok.edu.tr)

with increasing  $R$ , a better  $Ra$  value is obtained, but it also causes an increase in the  $Fc$ . Zerti et al. (2017) demonstrated the most significant effect on the  $Fc$  and the  $a$  is reported that the  $f$  that follows. Aouici et al. (2012) reported in their analysis that the  $a$  was statistically insignificant, but the  $Fc$  increased with increasing  $a$ . Şahinoğlu & Rafighi (2020a) studied the machinability properties of the AISI 4140 material. In this experimental study, the influence of cutting parameters on vibrations, sound intensity, current value, and  $Ra$  value was investigated. From the results of the experiment, it was found that the most effective parameter for the  $Ra$  value is the  $f$ . Günay (2013) investigated the effect of AISI 316L cutting parameters on cutting force and  $Ra$  during turning. The experimental design with Taguchi L9 and the effects of cutting parameters with ANOVA were investigated. Gupta & Kohli (2014) Response Surface Method (RSM), ANOVA, and utilizing a mathematical model of AISI 4340 alloy steel turning operations have examined the  $Ra$  that occurred. In the results of working; affecting the  $Ra$  values have concluded that the  $f$  of the most important parameters. İynen et al. (2020a, b) analyzed the effect of cutting parameters on  $Ra$  and cutting forces using the Taguchi method in the turning process of AISI 4140 material. The effect levels of the cutting parameters were investigated using ANOVA.

In the presented work, the effect of constant cutting speed ( $V$ ) and variable depth of cut ( $a$ ), feed rate ( $f$ ) and nose Radius ( $R$ ) on the surface roughness ( $Ra$ ) and cutting force ( $Fc$ ) was investigated during turning of 36CrNiMo4 alloy steel using VCMT inserts under dry cutting conditions. The design of experiment was performed according to the Taguchi method and the analysis of variance was performed to obtain the most significant parameters. In addition, the main effect plots show the impact of each cutting parameters on the response.

## 2. MATERIAL AND METHOD

The chemical composition of the 36CrNiMo4 steel used in the experimental study is shown in Table 1, the diameter of the steel is  $\varnothing 70$  mm and the turning operations were done in 20 mm lengths. A constant  $V$  of 150 m/min was used in the experiments. As machining parameters,  $a$  (0.05, 0.10, and 0.15 mm),  $f$  (0.03, 0.06, and 0.09 mm/rev) and as  $R$  (0.4 mm, 0.8 mm, and 1.2 mm) respectively VCMT 160404-SM, VCMT 160408-SM and VCMT 160412-SM inserts are used. The cutting inserts are connected to the lathe using AKKO TTJNL 2525 M16 barrel. The turning processes were done on the GOODWAY GS-260Y machine. During the turning process, the  $Fc$  was recorded using the KISTLER TYPE 9129AA dynamometer and the Kistler TYPE 5070 amplifier device. The test setup and the cutting tool used for chip removal are shown in Figure 1.

**Table 1.** Chemical Composition of AISI 4340 Steel

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P <sub>max</sub> (%)	S <sub>max</sub> (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)
0.34	0.32	0.63	0.032	0.033	1.45	0.24	1.55

$Ra$  values of the machined parts were measured along 4.8 mm on the surfaces using the Mahr MarSurf PS 10 device. The experiments were carried out under dry processing conditions. The experiments were repeated three times and the average of the measurement results was recorded. Taguchi method was used to create the experimental set used for turning processes. Taguchi method is more powerful and easy to use than traditional methods. Designing experiments with the Taguchi method reduces the number of experiments and costs as well as saves time (Kirby et al., 2006). L9 experiment sequence was created using Minitab 16 program for three different levels of  $R$ ,  $f$ , and  $a$  factors given in Table 2 with Taguchi method and experiment sequence is given in Table 3.

**Table 2.** Processing Parameters and Levels

Symbol	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
$R$	mm	0.4	0.8	1.2
$f$	mm/rev	0.03	0.06	0.09
$a$	mm	0.05	0.10	0.15



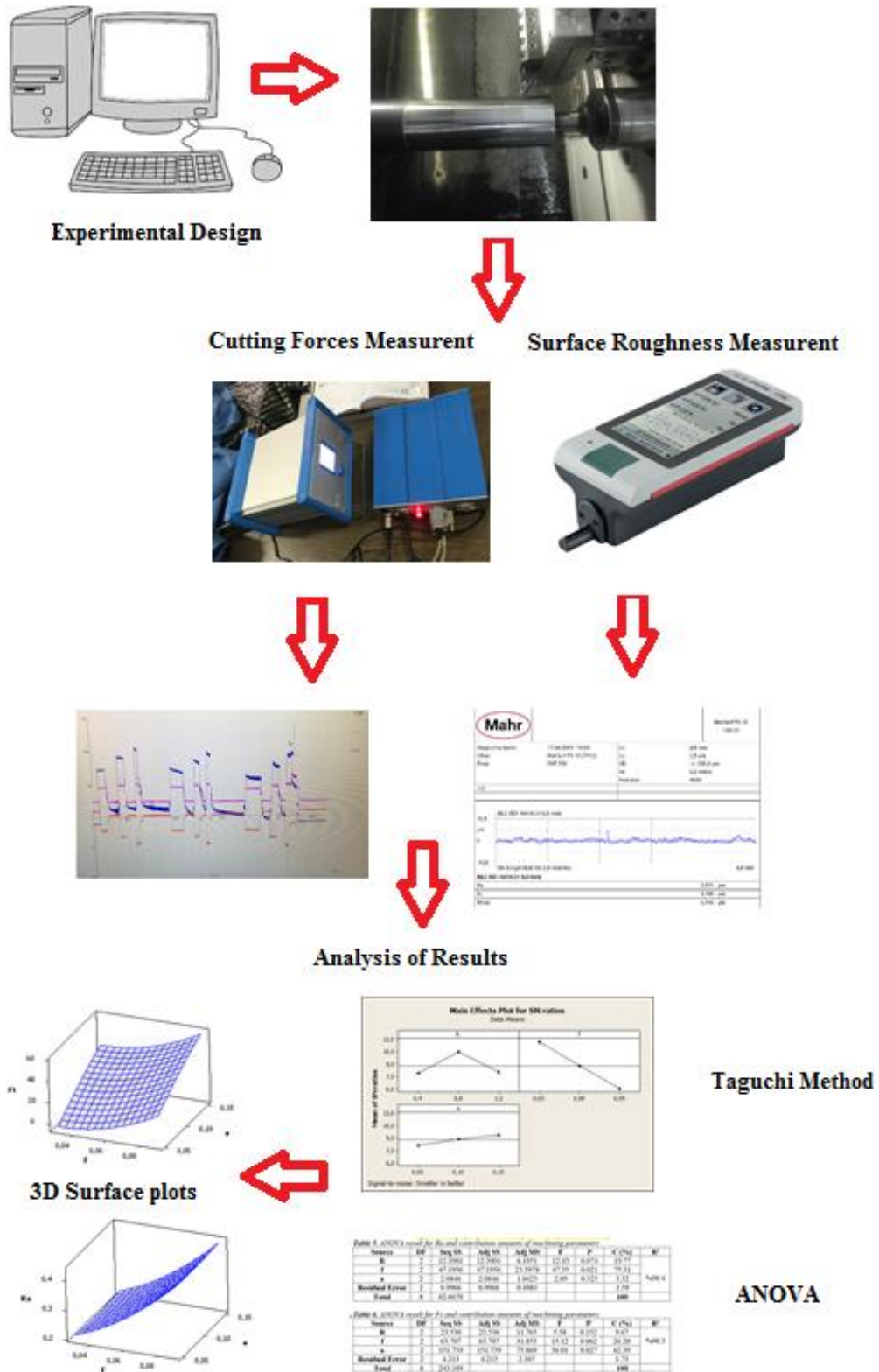


Figure 1. Experiment Setup

When analyzing with the Taguchi method, the S/N ratio is used to determine optimum levels. In the S/N ratio, the S term indicates the desired value (average) and the noise term (N) indicates the unwanted output value. In the Taguchi method, three basic criteria are used to evaluate S/N ratios; largest best, smallest best, and best rated. In this study, the optimum levels for optimum *Ra* are determined by using the "smallest best" criterion. The formulation used to calculate the S/N ratio is given in Eq. (1).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \left( \sum y^2 \right) \quad (1)$$

Table 3. Experiment sequences

Experimental No	Machining Parameters		
	R	f	a
1	0.4	0.03	0.05
2	0.4	0.06	0.1
3	0.4	0.09	0.15
4	0.8	0.03	0.1
5	0.8	0.06	0.15
6	0.8	0.09	0.05
7	1.2	0.03	0.15
8	1.2	0.06	0.05
9	1.2	0.09	0.1

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The results were obtained according to the average **Ra** and, **Fc** values. Taguchi method S/N ratios obtained as a result of the experiments depending on the cutting parameters are given in Table 4. S/N ratios showing the effect of machining parameters on **Ra** values are shown in Figure 2. When the figure is examined, it has been determined that the S/N ratios have the largest S/N ratios, respectively, the 1st level of the **f** (11.629 dB), the 2nd level of the **R** (10.448 dB), and the 3rd level of **a** (9.336 dB). The levels corresponding to these S/N ratios are respectively 0.03 mm/rev **f**, 0.8 mm **R**, and 0.15 mm **a**. It is seen in the influence degree table that the most effective parameter on the **Ra** value is the **f**. Secondly, the most effective value is the **R** and the **a** is in the last place in terms of the effect ratio. S/N ratios of the main forces measured during turning and the levels of machining parameters are shown in Figure 3.

The efficiency degrees of cutting parameters that affect the **Fc** are the **a** the **f**, and the **R**, respectively, from large to small. The S/N ratios of these values, respectively; The S/N ratio of the 1st level of **a** (-24.13 dB), the S/N ratio of the 1st level of the **f** (-26.43 dB), and the S/N ratio of the 2nd level of the **R** (-27.74 dB). Optimum cutting parameters were obtained at 0.05 mm **a**, 0.03 mm/rev **f**, and 0.8 mm **R**.

Table 4. Experimental results for Ra and Fc

Ex. No.	R	f	a	Ra(μm)	Ra(dB)	Fc(N)	Fc(dB)
1	0.4	0.03	0.05	0.33	9.6297	10.70	-20.5877
2	0.4	0.06	0.10	0.39	8.1787	33.89	-30.6014
3	0.4	0.09	0.15	0.51	5.8486	65.76	-36.3592
4	0.8	0.03	0.10	0.21	13.5556	17.19	-24.7055
5	0.8	0.06	0.15	0.30	10.4576	39.24	-31.8746
6	0.8	0.09	0.05	0.43	7.3306	21.45	-26.6285
7	1.2	0.03	0.15	0.26	11.7005	50.12	-34.0002
8	1.2	0.06	0.05	0.42	7.5350	18.13	-25.1680
9	1.2	0.09	0.10	0.57	4.8825	61.59	-35.7902

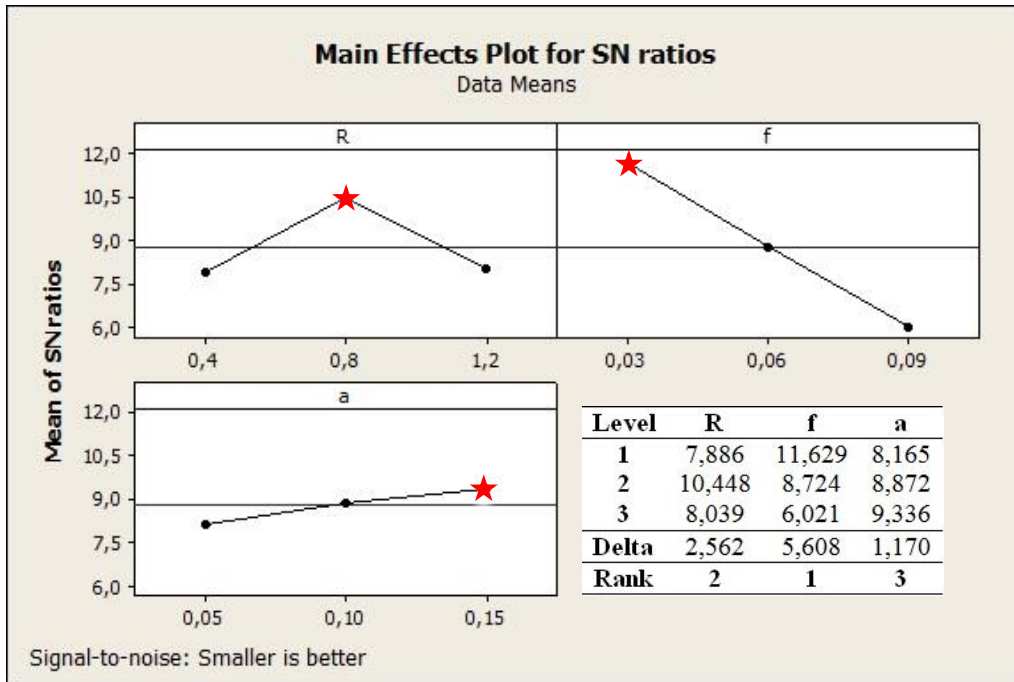


Figure 2. Effect of machining parameters on Ra

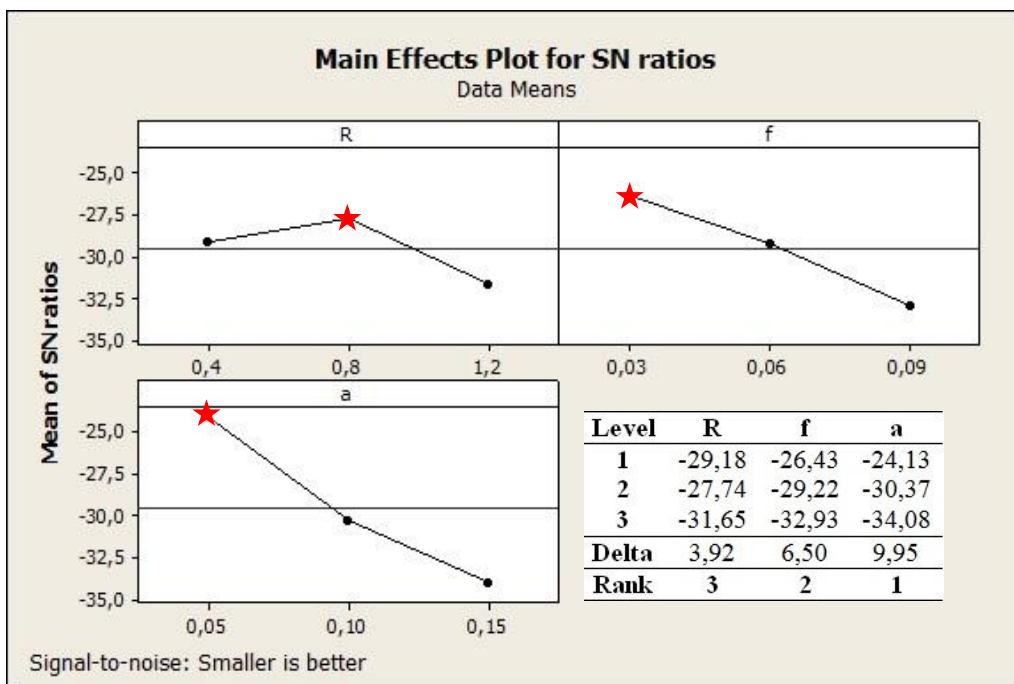
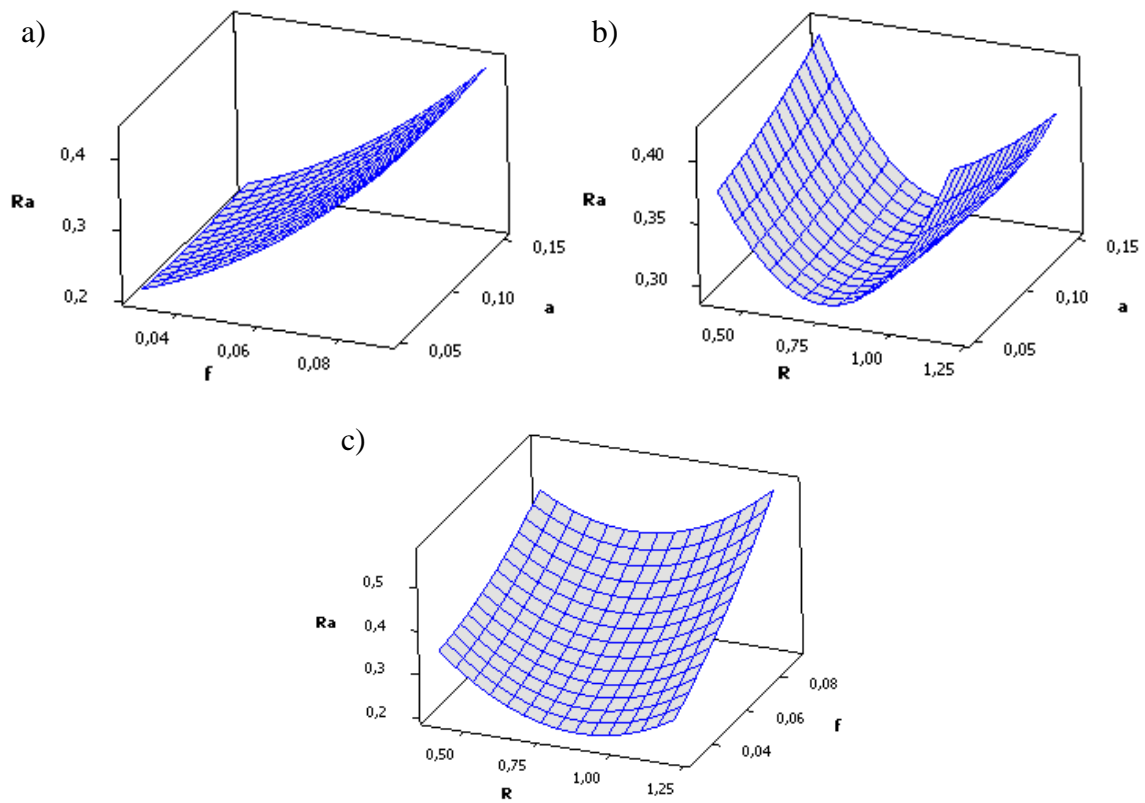


Figure 3. Effect of machining parameters on Fc

When Figure 4 is examined, it is seen that the **Ra** value increases with the increase in the **f** (Figure 4a). If the low **f** is even below the surface area required for minimum chip formation, the cutting tool mostly follows the surface without cutting the material and causes the material to flow in the horizontal direction (Thamma, 2008). At the same time, as the **f** increases, the number of chips removed per unit time increases, increasing **Ra**. Some increase in **R** in Figure 4b and 4c provides a good surface quality, while a larger radius will reduce damping between tool and material, resulting in a worse surface quality (Beauchamp et al., 1996; Kishawy & Elbestawi, 1997). It is seen in Figure 4a-4b that as the **a** increases, the **Ra** value decreases. On the other hand, this combination provides some reduction in the **Ra** value, as it reduces the BUE formation together with low **a** and high **V** (Kwon & Choi, 2002; Thamma, 2008).



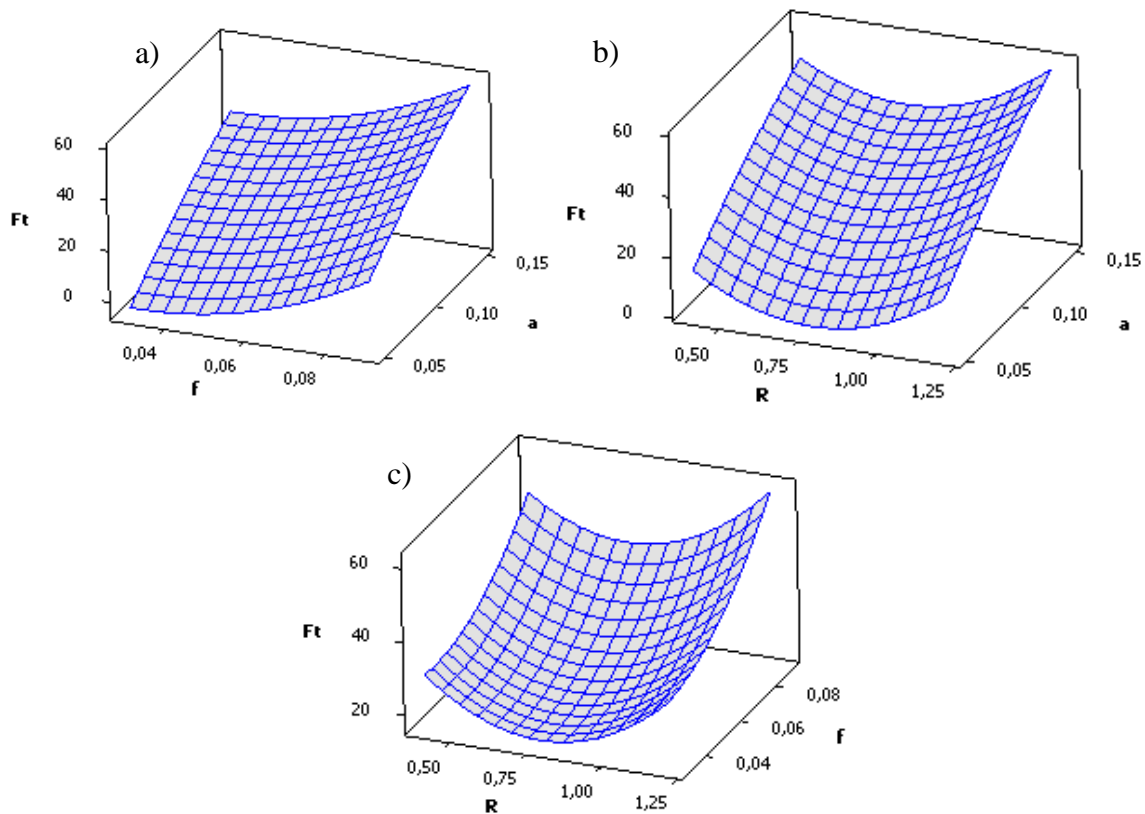
**Figure 4.** 3D graph of the relation of  $Ra$  with a)  $f$ - $a$ , b)  $R$ - $a$ , c)  $R$ - $f$

The effect of cutting parameters on the  $F_c$  is shown in the surface graph in Figure 5. The  $F_c$  increases depending on the increase in the  $a$  and the  $f$  affecting the  $F_c$  (Figure 5a). Increasing the  $f$  and  $a$  will increase the contact area of the chip tool interface, thus increasing the cutting force (Bouacha et al., 2010). Also, the increase in the chip cross-sectional area as a result of the increase in the resistance of the material to rupture with the increase in the  $f$  caused an increase in the  $F_c$  (Saini et al., 2014). At the same time, as the  $f$  increases, the amount of chips removed per unit time increases, increasing the  $F_c$ . The increase in the  $F_c$  with the increase in the  $f$  and  $a$  can be explained by the Kienzle equation. Here, the chip cross-sectional area, which increases due to the increase in the  $f$  and  $a$ , causes the cutting forces to increase (Çakır, 2000). When looking at the relationship between the  $R$  and the  $F_c$  in Figure 5b and 5c, it is seen that the minimum cutting force value is obtained at 0.8 mm  $R$ . Thamma stated in his study that as the area required for the formation of minimum chip thickness decreases as the  $R$  increases, there is an increase in the  $f$  and  $F_c$  (Thamma, 2008). As a result of the machining experiments observed, the increase in the  $a$  and the  $f$  increases the  $F_c$  and  $Ra$  value, which is parallel to the studies in the literature, and the same determinations have been obtained in studies using different materials and different cutting tools in the literature (Nalbant et al., 2007; Motorcu, 2010; Asiltürk & Neşeli, 2012; Gürbüz et al., 2017; Mia et al., 2017; Koçak, 2020; Şahinoğlu & Rafighi, 2020b).

The contribution amounts ( $C$ ) of machining parameters and levels to the  $Ra$  value were evaluated by performing an ANOVA, the results are shown in Table 5. According to the analysis results, 75.31%  $f$ , 19.77%  $R$ , 3.32%  $a$  affect the  $Ra$  value, respectively. In the light of the data shown in Table 5, considering the significance value of  $p < 0.05$ , it was determined that the  $R$  and  $a$  parameters were not significant in terms of semantic ratio, and the  $f$  was significant. The effective rates of machining parameters on the  $F_c$  are shown in Table 6. When the table is examined, it has been determined that the contribution rates are respectively 62.39%  $a$ , 26.20%  $f$ , and 9.67%  $R$ . In terms of semantic ratio ( $p < 0.05$ ), it was determined that  $R$  and  $f$  were not significant, but  $a$  was significant. The test results are above 95% for the  $Ra$  value and the  $F_c$  according to the error rates shown in Table 5 and Table 6.

**Table 5.** ANOVA result for  $R_a$  and contribution amounts of machining parameters

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	C (%)	R <sup>2</sup>
<b>R</b>	2	12.3901	12.3901	6.1951	12.43	0.074	19.77	%98.4
<b>f</b>	2	47.1956	47.1956	23.5978	47.35	0.021	75.31	
<b>a</b>	2	2.0846	2.0846	1.0423	2.09	0.323	3.32	
<b>Residual Error</b>	2	0.9966	0.9966	0.4983			1.59	
<b>Total</b>	8	62.6670					<b>100</b>	

**Figure 5.** 3D graph of the relation of  $F_c$  with a)  $f$ - $a$ , b)  $R$ - $a$ , c)  $R$ - $f$ **Table 6.** ANOVA result for  $F_c$  and contribution amounts of machining parameters

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	C (%)	R <sup>2</sup>
<b>R</b>	2	23.530	23.530	11.765	5.58	0.152	9.67	%98.3
<b>f</b>	2	63.707	63.707	31.853	15.12	0.062	26.20	
<b>a</b>	2	151.739	151.739	75.869	36.01	0.027	62.39	
<b>Residual Error</b>	2	4.213	4.213	2.107			1.73	
<b>Total</b>	8	243.189					<b>100</b>	

Since optimum values obtained according to Taguchi S/N ratios were not included in the Taguchi L9 experiment set, verification experiments were needed. Therefore, 0.8 mm  $R$  ( $R_2$ ), 0.03 mm/rev  $f$  ( $f_1$ ), and 0.15 mm  $a$  ( $a_3$ ) parameters were determined as optimum cutting parameters for  $R_a$  and  $F_c$ . The experiments were repeated 3 times and the arithmetic mean of the results was obtained. Experimental and predicted values

obtained after verification tests are shown in Table 7. The **Ra** between the experimental data and predicted values is 93.10% when the table is examined, it was found that the **Fc** close relationship is 86.32%.

**Table 7. Optimization Test Results for Fc and Ra**

Factor	Level	Fc (N)		Ra ( $\mu\text{m}$ )	
		Prediction	Experimental	Prediction	Experimental
<b>R2</b>	0.8	33.36	38.53	0.216	0.232
<b>f1</b>	0.03				
<b>a3</b>	0.15				

#### 4. RESULTS

In the study, the relationship between process parameters namely, **R**, **a**, **f** and responses such as **Ra** and **Fc** were investigated in the turning process of 36CrNiMo4 steel.

- There is a proportional relationship between **f** and **Ra**. With the increase in the **f**, the roughness value also increases.
- Considering the highest S/N ratios of the factors affecting the **Ra** value according to the "smallest best" criterion, the values corresponding to these levels were determined to be 0.03 mm/rev **f**, 0.8 mm **R**, and 0.15 mm **a**, respectively.
- According to ANOVA analysis, 75.31% **f**, 19.77% **R**, and 3.32% **a** affect the **Ra** value.
- In terms of semantic ratio, it was concluded that **R** and **a** are not significant for **Ra** value according to  $p < 0.05$ .
- It was determined that the cutting parameters that affect the **Fc** are the **a**, the **f**, and finally the **R**, respectively, from large to small. The contribution levels of the **Fc** as% of the **a**, **f**, and **R** parameters were determined as 62.39%, 26.20%, and 9.67%, respectively.
- When the effect of cutting parameters on the **Fc** was examined in terms of semantics, it was seen that only **a** was significant.
- It was determined that the ANOVA results of the parameters affecting the surface roughness value and the main cutting force were above the 95% confidence level.

#### CONFLICTS OF INTEREST

No conflict of interest was declared by the authors.

#### REFERENCES

- Aouici, H., Yallese, M. A., Chaoui, K., Mabrouki, T., & Rigal, J. F. (2012). Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement*, 45(3), 344-353. doi:[10.1016/j.measurement.2011.11.011](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.11.011)
- Asiltürk İ., & Neşeli S. (2012). Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis. *Measurement*, 45(4), 785-794. doi:[10.1016/j.measurement.2011.12.004](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.12.004)
- Beauchamp, Y., Thomas, M., Youssef, Y. A., & Masounave, J. (1996). Investigation of cutting parameter effects on surface roughness in lathe boring operation by use of a full factorial design. *Computers & Industrial Engineering*, 31(3-4), 645-651. doi:[10.1016/S0360-8352\(96\)00234-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(96)00234-3)
- Bouacha, K., Yallese, M. A., Mabrouki, T., & Rigal, J. F. (2010). Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool.

- International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(3), 349-361. doi:[10.1016/j.ijrmhm.2009.11.011](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.11.011)
- Chou, Y. K., & Song, H. (2004). Tool nose radius effects on finish hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2), 259-268. doi:[10.1016/j.jmatprotec.2003.10.029](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.029)
- Çakır, M. C. (2000). Modern talaşlı imalat yöntemleri. Uludağ University Publications, Bursa.
- Dureja, J. S., Singh, R., & Bhatti, M. S. (2014). Optimizing flank wear and surface roughness during hard turning of AISI D3 steel by Taguchi and RSM methods. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 767-783. doi:[10.1080/21693277.2014.955216](https://doi.org/10.1080/21693277.2014.955216)
- Gupta, U., & Kohli, A. (2014). Experimental investigation of surface roughness in dry turning of AISI 4340 alloy steel using PVD-and CVD-coated carbide inserts. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 4(1), 94-103.
- Günay, M. (2013). AISI 316L Çeliğinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu. *Gazi University Journal of Engineering and Architecture*, 28(3), 437-444.
- Gürbüz, H., Şeker, U., & Kafkas, F. (2017). Investigation of effects of cutting insert rake face forms on surface integrity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(9-12), 3507-3522. doi:[10.1007/s00170-016-9652-7](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9652-7)
- İyner, O., Şahinoğlu, A., Özdemir, M., & Yılmaz, V. (2020a). Investigation of the effect of cutting parameters on the surface roughness value in the machining of AISI 4140 steel with Taguchi method. *Journal of The Institute of Science and Technology*, 10(4), 840-2849. doi:[10.21597/jist.736802](https://doi.org/10.21597/jist.736802)
- İyner, O., Şahinoğlu, A., Özdemir, M., & Yılmaz, V. (2020b). Optimization of the effect of cutting parameters on the cutting force in the gradual turning process by Taguchi method. *Journal of The Institute of Science and Technology*, 10(3), 1909-1918. doi:[10.21597/jist.697433](https://doi.org/10.21597/jist.697433)
- Kirby, E. D., Zhang, Z., Chen, J. C., & Chen, J. (2006). Optimizing surface finish in a turning operation using the Taguchi parameter design method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(11), 1021-1029. doi:[10.1007/s00170-005-0156-0](https://doi.org/10.1007/s00170-005-0156-0)
- Kishawy, H. A., & Elbestawi, M. A. (1997). Effect of process parameters on chip morphology when machining hardened steel. *Manufacturing Science and Technology*, 6(2), 13-20.
- Koçak, H. (2020). Ç2842, MS58 ve Al 6013 Malzemelerin Elektolitik Ni Kaplanması ve Kaplama Kalınlığı ve Yüzeysel Özelliklerin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1001-1008. doi:[10.21605/cukurovaummfd.869166](https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.869166)
- Korkut, I., Boy, M., Karacan, I., & Seker, U. (2007). Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameter. *Materials and Design*, 28, 2329-2335. doi:[10.1016/j.matdes.2006.07.009](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.07.009)
- Kundrak, J., Karpuschewski, B., Gyani, K., & Bana, V. (2008). Accuracy of hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 202(1-3), 328-338. doi:[10.1016/j.jmatprotec.2007.09.056](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.056)
- Kwon, W. T., & Choi, D. (2002). Radial immersion angle estimation using cutting force and pre-determined cutting force ration in face milling. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 42, 1649-1655. doi:[10.1016/S0890-6955\(02\)00119-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00119-0)
- Mia, M., Khan, M. A., & Dhar, N. R. (2017). Study of surface roughness and cutting forces using ANN, RSM, and ANOVA in turning of Ti-6Al-4V under cryogenic jets applied at flank and rake faces of coated WC tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1), 975-991. doi:[10.1007/s00170-017-0566-9](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0566-9)
- Motorcu, A. R. (2010). The optimization of machining parameters using the Taguchi method for surface roughness of AISI 8660 hardened alloy steel. *Journal of Mechanical Engineering*, 56(6), 391-401.
- Nalbant, M., Gökkaya, H. & Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & Design*, 28(4), 1379-1385. doi:[10.1016/j.matdes.2006.01.008](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.008)

- Puertas, A. I., & Luis-Pérez, C. J. (2003). Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 390-396. doi:[10.1016/S0924-0136\(03\)00407-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00407-2)
- Rashid, W. B., Goel, S., Davim, J. P., & Joshi, S. N. (2016). Parametric design optimization of hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(1-4), 451-462. doi:[10.1007/s00170-015-7337-2](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7337-2)
- Saini, A., Dhiman, S., Sharma, R., & Setia, S. (2014). Experimental estimation and optimization of process parameters under minimum quantity lubrication and dry turning of AISI-4340 with different carbide inserts. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(6), 2307-2318. doi:[10.1007/s12206-014-0521-8](https://doi.org/10.1007/s12206-014-0521-8)
- Selvaraj, D. P., & Philip, P. R. (2021). Some studies on surface roughness of AISI 304 austenitic stainless steel in dry turning operation. *Trends in Mechanical and Biomedical Design*, 869-877. doi:[10.1007/978-981-15-4488-0\\_73](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4488-0_73)
- Şahinoğlu, A., & Rafighi, M. (2020a). Investigation of Vibration, Sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 765-778. doi:[10.1007/s13369-019-04124-x](https://doi.org/10.1007/s13369-019-04124-x)
- Şahinoğlu, A., & Rafighi, M. (2020b). Optimization of cutting parameters with respect to roughness for machining of hardened AISI 1040 steel. *Materials Testing*, 62(1), 85-95. doi:[10.3139/120.111458](https://doi.org/10.3139/120.111458)
- Thamizhmanii, S., Saparudin, S., & Hasan, S. (2007). Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20(1-2), 503-506.
- Thamma, R. (2008). Comparison between multiple regression models to study effect of turning parameters on the surface roughness. In Proceedings of the 2008 IAJC-IJME International Conference, Paper 133, 1-12.
- Zerti, O., Yallese, M. A., Khettabi, R., Chaoui, K., & Mabrouki, T. (2017). Design optimization for minimum technological parameters when dry turning of AISI D3 steel using Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5-8), 1915-1934. doi:[10.1007/s00170-016-9162-7](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9162-7)



# JOURNAL OF SCIENCE

PART A: ENGINEERING AND INNOVATION



## Correspondence Address

Gazi University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Emniyet Neighborhood, Bandırma Avenue  
No:6/20B, 06560, Yenimahalle - ANKARA  
B Block, Auxiliary Building

## Yazışma Adresi

Gazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Emniyet Mahallesi, Bandırma Caddesi  
No:6/20B, 06560, Yenimahalle - ANKARA  
B Blok, Ek Bina

**e-mail | e-posta**  
gujsa06@gmail.com

**web page | web sayfası**  
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujisa>

e-ISSN 2147-9542