

# BİLİMSEL İŞBİRLİĞİYLE GELİŞEN AKILLI SİSTEMLER VE ENERJİ ÇÖZÜMLERİ

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL



İKSAD  
Publishing House

# **BİLİMSEL İŞBİRLİĞİYLE GELİŞEN AKILLI SİSTEMLER VE ENERJİ ÇÖZÜMLERİ**

## **EDİTÖR**

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL

## **YAZARLAR**

Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ

Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI

Prof. Dr. Gül KAYKIOĞLU

Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

Doç. Dr. Kenan ALTUN

Doç. Dr. Nesli AYDIN

Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN

Dr. Öğr. Üyesi Rezvan REZAEIZADEH

Dr. Öğr. Üyesi Yosef G. Ali MADEE

Öğr. Gör. Dr. Sefa AYDIN

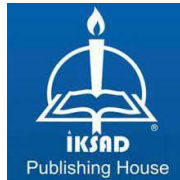
Öğr. Gör. Esmael Ommar Mahdi OMMAR

Öğr. Gör. İlknur ŞAHİN

Ali UTMA

Gürkan AKSOY

Zehra AYGÜN



Copyright © 2025 by iksad publishing house  
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or  
transmitted in any form or by  
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical  
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of  
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses  
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social

Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: [iksadyayinevi@gmail.com](mailto:iksadyayinevi@gmail.com)

[www.iksadyayinevi.com](http://www.iksadyayinevi.com)

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

**ISBN: 978-625-378-324-2**

Cover Design: İbrahim KAYA

Cover image prepared by GEMINI

September / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

# İÇİNDEKİLER

|            |   |
|------------|---|
| ÖNSÖZ..... | 1 |
|------------|---|

## CHAPTER 1

### ADVANCED FUZZY INTELLIGENT AND MPPT SYSTEMS OF BLDC MOTOR CONTROL

Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI

Lecturer İlknur ŞAHİN

Assist. Prof. Dr. Yosef G. Ali MADEE

Assist. Prof. Dr. Rezvan REZAEIZADEH

Lecturer Esmael Ommar Mahdi OMMAR.....3

## BÖLÜM 2

### MODERN GÜÇ ŞEBEKELERİNDE ENERJİ DEPOLAMANIN ÖNEMİ VE KULLANIMI

Zehra AYGÜN

Ali UTMA

Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ.....19

## BÖLÜM 3

### ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA REZERVUAR HESAPLAMA İLE HATA TESPİTİ

Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN

Doç. Dr. Kenan ALTUN.....69

## CHAPTER 4

### ENVIRONMENTAL EVALUATION OF ELECTRIC CARS

Doç. Dr. Nesli AYDIN

Prof. Dr. Gül KAYKIOĞLU.....89

## BÖLÜM 5

### TEKNOLOJİK GELİŞMELERİN MERMER YÜZEY İŞLEME SÜREÇLERİNE ETKİSİ

Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ

Gürkan AKSOY.....111

## **CHAPTER 6**

### **ANALYSIS OF DATA AND RISK ASSESSMENT FOR NUCLEAR MEDICINE APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI

Lecturer İlknur ŞAHİN

Assist. Prof. Dr. Rezvan REZAEIZADEH

Assist. Prof. Dr. Yosef G. Ali MADEE.....141

## **BÖLÜM 7**

### **HİBRİT BEYİN BİLGİSAYAR ARAYÜZ SİSTEMLERİNİN GERÇEK HAYATTA KULLANILABİLİRLİĞİNE YÖNELİK BİR DEĞERLENDİRME**

Öğr. Gör. Dr. Sefa AYDIN.....161

## ÖNSÖZ

Bilimsel iş birliğinin gücünü arkasına alan bu eser, akıllı sistemler ve enerji çözümleri alanında çok disiplinli katkılarla şekillenmiştir. Farklı uzmanlık alanlarından araştırmacıların ortak çabalarıyla oluşturulan bu kitap, güncel teknolojik gelişmeleri ve yenilikçi yaklaşımları bir araya getirerek okuyuculara kapsamlı bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır.

Enerji verimliliği, akıllı sistemler ve insan-makine etkileşimi gibi konular, hem endüstride hem de akademik dünyada giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kitap, elektrikli araçlarda hata tespitinden enerji depolama teknolojilerine, mermer yüzey işleme süreçlerindeki teknolojik gelişmelerden hibrit beyin-bilgisayar arayüzlerine kadar uygulamaya dönük güncel konuları kapsamaktadır.

Amacımız, bu alanlarda çalışan araştırmacılar ve öğrenciler için hem temel bilgileri hem de yenilikçi yaklaşımları bir araya getiren bir kaynak sunmaktır. Kitapta yer alan bölümler, alanında uzman yazarların katkılarıyla hazırlanmış olup, disiplinler arası bir anlayışla derlenmiştir.

Bu eserde yer alan değerlendirme ve sonuçlar, ilgili bölümlerin yazarlarına aittir. Editöryal süreç, çalışmaların bilimsel bütünlük içinde sunulmasını amaçlamış; uygulamaya yönelik karar ve sorumluluklar ise doğal olarak okuyucu ve uygulayıcı kurumlara bırakılmıştır. Editör olarak katkılarını ortak bir çerçevede birleştirerek tutarlı, erişilebilir ve faydaya odaklı bir anlatı sunmaya özen gösterdim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasına metinleri, verileri ve zamanı ile katkı veren tüm yazarlara; yapıcı geri bildirimleri için hakemlere, süreç boyunca destek sunan paydaşlara teşekkür ederim. Yayıma hazırlık sürecindeki özenli iş birliği için IKSAD Yayınevi'ne ayrıca teşekkür ederim.

Okuyucuların bu kitaptan, araştırma ve uygulama çalışmalarında pratik bir başvuru kaynağı olarak yararlanmasını diliyorum; umarım burada derlenen bilgi birikimi, yeni projelere ve iş birliklerine kapı aralar.

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Serkan Güldal  
Adıyaman Üniversitesi, Türkiye



## CHAPTER 1

### ADVANCED FUZZY INTELLIGENT AND MPPT SYSTEMS OF BLDC MOTOR CONTROL

Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI<sup>1</sup>

Lecturer İlknur ŞAHİN<sup>2</sup>

Assist. Prof. Dr. Yosef G. Ali MADEE<sup>3</sup>

Assist. Prof. Dr. Rezvan REZAEIZADEH<sup>4</sup>

Lecturer Esmael Ommar Mahdi OMMAR<sup>5</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214446>

---

<sup>1</sup> Kastamonu University, Faculty of Science, Department of Physics, Kastamonu, Türkiye, aybaba@kastamonu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-9830-4220

<sup>2</sup> Kastamonu University, Central Research Laboratory Application and Research Center, Kastamonu, Türkiye, ilknursahin@kastamonu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-4383-3817

<sup>3</sup> Aljufra University, Faculty of Medical Technology, Department of Radiology, Hun, Libya, youseff77@hotmail.com, orcid id: 0000-0003-4652-2990

<sup>4</sup> Department of Engineering, Faculty of Basic Science, University of Applied Science, Ahwaz, Iran, r.rezaeizade@gmail.com, orcid id: 0000-0001-6219-6174

<sup>5</sup> Kastamonu University, Institute of Science, Department of Materials Science and Engineering, Kastamonu, Türkiye, ismailammar4@gmail.com, orcid id: 0000-0001-70080-480x





## 1.INTRODUCTION

Brushless DC motors have wide range of application such as weapon systems (Muniraj and Arulmozhiyal, 2015), industrial, robotics, and commercial applications due to their low EMI (Electromagnetic Interference), high efficiency, and high mechanical reliability. They have lower inertia which provides quicker response compared to induction machines, because there is no mechanical commutator on the rotor. On the other hand, a brushless motor is more complicated in many aspects such as speed/torque control, position and algorithms, power electronic circuitry (Rodriguez and Emadi, 2007) and digital calculations (Kos et al., 2006). In this study, fuzzy intelligent system is used and analyzed for brushless DC speed motor control. Proportional controller is used to control the speed of the motor. Sugeno is used in fuzzy logic controller with nine rules. The input of fuzziness is error and derivative of error. Also, power and fuzzy logic toolbox is used in this thesis. we implement BLDC motor control using model reference based fuzzy controller. The implementation of this system is in three stages. The 1. step is to design the reference model and the 2. step is the Power Plant Model. We use BLDC motor for the power plant model. The last step is to design the fuzzy controller. MATLAB-Simulink 2020a version is used for the implementation of the model. The basic reason for the study is to decrease the number of electronic cards in the BLDC (Brushless Direct Current) motor control system of a guided missile control system. The current motor control system contains 4 brushless DC motors and 2 electronic cards. Motor control includes 2 electronic cards can constitute difficulties in terms of price, space, flexibility and design time. However, the basic reasons for using multiple cards in the system are the isolation of power and digital electronic components because of its electromagnetic interferences that may occur between them and the implementation of current and position controllers on several platforms. For instance, the position controller is applied on a DSP (Digital Signal Processor) chip and the current controller is applied on the card by the help of analog integrated circuits. Moreover, an FPGA chip is also benefited for some I/O functions and PWM (Pulse Width Modulation) application. One of the electronic cards in the system contains FPGA, analog integrated circuits for current control and power electronic circuit, while the other card contains the DSP chip and any other motor position sensory interfaces. To reduce the number of cards, a new control scheme should be

implemented in the boards to reduce the number of components. There are some control schemes in the motor control field differently. DSP plus FPGA based structure is widely used in the motor control field and popular one (Wang et al., 2008). In addition, this structure is also used in the control system of the current system. Conversely, the use of FPGA with DSP chips increases the complexity of the electronic boards, reduces the reliability of the system and complicates the design process. In this control scheme; FPGA chips are not fully utilized and are not used for simple functions such as PWM application, I/O (Input Output) functions, glue logic for communication interfaces, etc. (Shao and Sun, 2006). Another disadvantage of this control scheme is that number of CPUs (Central Processing Units), DSP chips have limited capacity in terms of speed (operations per second), ALU (Arithmetic Logic Unit) cores & number of PWM channels, which occurs in applications requiring N motors to be controlled independently (Ayasrah et al., 2006). To decrease the computational load of DSP chips and boost the current update frequency and current sampling rate, the current control loop is applied on the analog circuit (Tzou and Kuo, 1997).

The brushless DC motor do not depend on the working principle of a DC machine, but is designed as a 3-phase synchronous machine excited by permanent magnets. The three-phase winding (usually three-wire) generates a magnetic field that is attracted and rotates along the permanent magnet rotor. Through a suitable control circuit, a control response corresponding to the behavior of a DC machine is obtained. For this purpose, a simplified AC drive with block commutation is used, in which the intermediate circuit can be directly fed with a variable DC voltage, thereby controlling the speed of the motor (Fujii et al., 2018). The usage of linear motors in machine tools improves. Many machine tool manufacturers currently offer machines with linear drives. Linear motors are particularly appropriate for feed drives in high-precision, high-reliability machine tools, and high-speed.

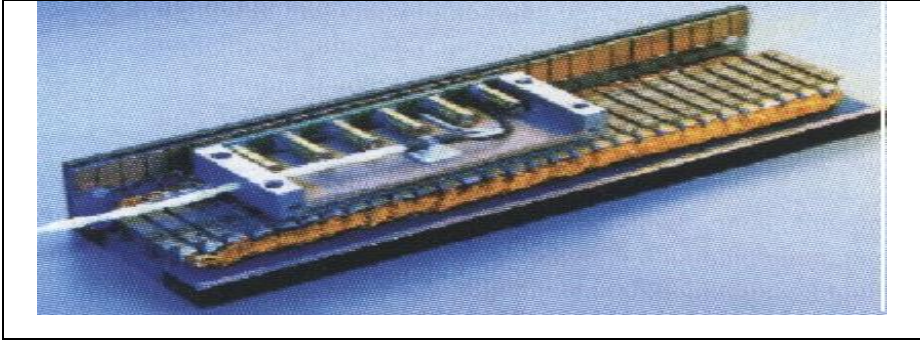
## **2. LINEAR MOTORS SERVO CONTROL**

The same types of rotary electric motors exist as in linear. The main types of rotary motors used for servo applications in machine tools are;

- i. Permanent magnet DC motor,

- ii. Brushless DC (or AC if desired), trapezoidal or sinusoidal excited motor,
- iii. Induction or asynchronous motor,
- iv. Variable resistance or hybrid stepper motor.

Each of these types has linear versions; they can be thought of as a “non rotating” version of the corresponding rotary motor (Bhatt et al., 2018). An exception to this is the voice coil or Lorentz motor, which is available only in its linear version. An example of a Lorentz motor is the loudspeaker. Voice coil motors (VCMs) are increasingly used in high-precision mechatronic positioning systems due to their excellent controllability and high bandwidth. Unlike solenoids, they provide constant force throughout the entire stroke. Their use is widespread in computer equipment (disk drives) (Lin et al., 2018). DC brushed linear servo motors Figure 1.1 are not as common as in rotary DC servo motors, due to the need to regularly replace the brushes, which are prone to wear. However, one advantage is that simple linear PWM amplifiers can be used, since the commutation has done in the motor itself. The iron core linear brushless servo motor is shown in Figure 1.2. Brushless linear servo motors are the linear equivalents of brushless DC (BLDC) servo motors. They consist of a fixed magnetic track with alternating polarity magnet stages on a back iron plate to produce the main magnetic field. The moving part, called the slider, consists of coils (3-phase) wound on a steel lamination (iron core motor) or fixed with resin/epoxy (ironless motor) to carry the currents that produce the thrust force. The iron core motor is usually placed with an air gap of about 0.5 mm, protected by suitable guides. They must also withstand the high attractive forces between the track and the slider. These motors exhibit an effect called "gearing" due to the arrangement of the magnets in the track and to eliminate the effects of slot-tooth interaction. This effect can be felt when moving the slider of a switched off motor (Force ripple is a similar effect but different in origin. It is caused by changes in the force constant with position due to the imperfect sinusoidal distribution of the magnetic field).



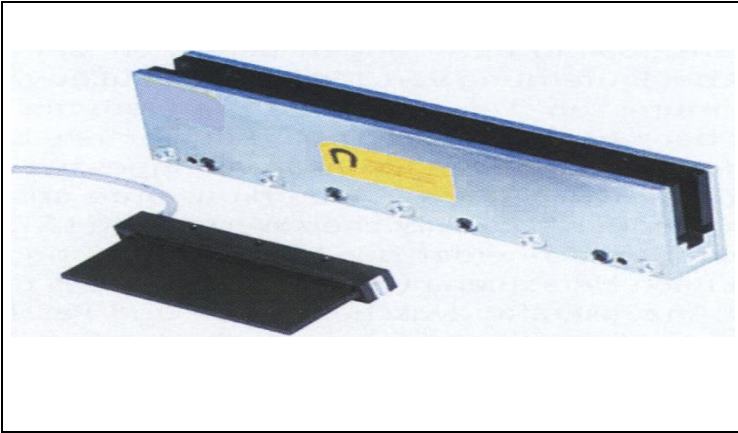
**Figure 1.1** Brushed Linear DC Servo Motor (Nagaoka and Fujita, 2018)

Ironless coils allow the motor to be placed symmetrically, and the slider moves in a U-shaped magnetic track. This configuration ensures that there is no magnetic attraction force transmitted to the outside world and that gear pull is minimal or non-existent. However, the thrust forces are significantly smaller than in an iron-core motor (Chen et al., 2018). Commutation is achieved electronically by means of Hall sensors placed in the shifter coils at appropriate locations to trigger the transition between phases. Two commutation schemes are used: In the trapezoidal configuration, the motor behaves like a stepper motor and in the sinusoidal configuration, like an AC synchronous motor. A sinusoidally commutated linear motor operates smoother and produces less heat than a trapezoidally commutated linear motor. A linear induction motor consists primarily of a moving coil assembly consisting of steel laminations and phase windings, and secondarily of a fixed reaction plate that corresponds to the squirrel cage of a rotary induction motor. The reaction plate can be made of aluminum or copper plate bonded to a steel backing. Variable frequency inverters are used in vector control schemes for speed control and motion control applications (Lin et al., 2019). The linear stepper motor is usually of the variable reluctance or hybrid type. It consists of a fixed roller (rod or tube) with teeth filled with epoxy (photochemically etched) and then ground flat. The slider or amplifier of a hybrid type stepper motor is made of a number of laminated steel cores nested with teeth like a roller. Magnetization is achieved by coils and permanent magnets. A dual-axis or planar stepper motor can be constructed by having the teeth carved into a grid pattern on the roller in a checkerboard arrangement. The booster consists of two single-axis boosters arranged perpendicularly to each other. An air bearing separates the slider and

roller. Step motors usually operate in open loop, making them easy to use. Adding a position sensory can increase reliability. Microstepping increases positioning accuracy. Table 2.1 summarizes the salient features of different linear motor types.

### 3. LINEAR MOTOR RESISTIVE MOTION CONTROLLERS

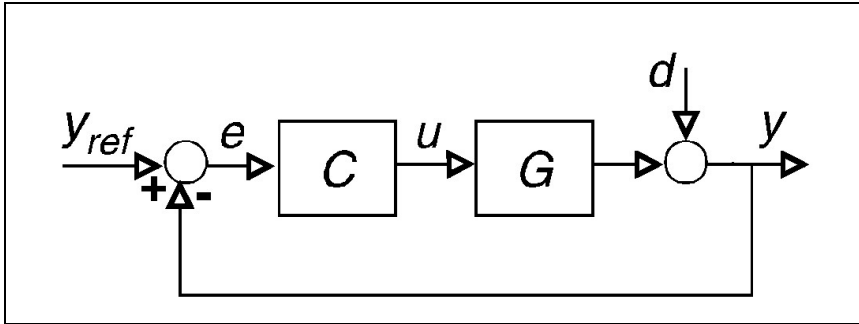
Conventional PI- and pole-positioning controllers are often used to control linear drives with a fixed inertial load. However, when load differences occur, e.g. when parts of different mass are mounted on the machine tool table, the positioning performance deteriorates for different masses than the controller itself was designed for. Cascade controllers consisting of an internal speed feedback loop and a position feedback loop around it are difficult to implement due to the unavailability of linear tachometers. The use of the Ferraris sensory has recently become popular as a tachometer. A Ferraris sensory measures relative acceleration; integration of its output gives a speed signal. In show that general motion control scheme: C, represents the controller; G represents the drive and load to be controlled; D is the external intervention (shear force, friction, etc.) Vref is the reference trajectory, and Y is the resulting trajectory.



**Figure 1.2** Symmetrically Arranged Iron-Free Core Linear Brushless Servo Motor  
(Chen et al., 2018)

**Table 2.1** Salient Features of Commonly Used Linear Motor

| Property                                  | Iron Core BLDC | Ironless BLDC                 | Induction    | Stepping |
|-------------------------------------------|----------------|-------------------------------|--------------|----------|
| Nom. pushing force $F$                    | High           | Low                           | Very high    | Very low |
| Top pushing force                         | 300 %          | 300 %                         | 500 %        | 100 %    |
| Kuvvet density ( $\text{N}/\text{cm}^2$ ) | 2,5            | 1,5                           | 1,0          | 1,5      |
| Grasping Force                            | 5-10 F         | Absent                        | Absent       | 5-10 F   |
| Gear Shift                                | Yes            | No                            | No           | Yes      |
| Pushing (typ.)                            | 10g            | 10g                           | 1g           | 1g       |
| Maximum velocity (typ.)                   | 5 m/s          | 5 m/s                         | >5 m/s       | 2 m/s    |
| Heat production                           | High           | Very low                      | Low          | Low      |
| Cooling system                            | Water          | Air (pressured or convection) | Air or water | Air      |
| Air gap (mm)                              | 0,1-1,0        | 10                            | >1mm         | <0,05    |

**Figure 2.1** General Motion Control Scheme

To make the performance of the drive independent of the above-mentioned disturbances, robust controllers are required. Controller structures that meet these requirements have been recently developed. Two of them be discussed in more detail: the  $H_\infty$ -controller and the so-called "sliding mode" controller.  $H_\infty$  is a method that optimum controllers are occurred by an optimization process in which the system uncertainties (disturbances) are calculated by defining frequency-dependent sensitivity functions that are chosen to reduce the effect of the disturbances. The selection of these sensitivity

functions is quite delicate and requires a good understanding of the method and the disturbance frequency characteristics. A sliding mode controller is a nonlinear controller in which the system state tries to reach a so-called switching line (surface) and then slides (actually squeaks) along this line to reach the final system state. The result of this control mode is that the control behavior during sliding becomes completely independent of the system dynamics and hence of the disturbances acting on the system. This explains the inherent robustness of sliding mode control. More details on the application of both methods to control feed drives with linear motors can be found in references.

#### 4. FUZZY LOGIC SIMULATION

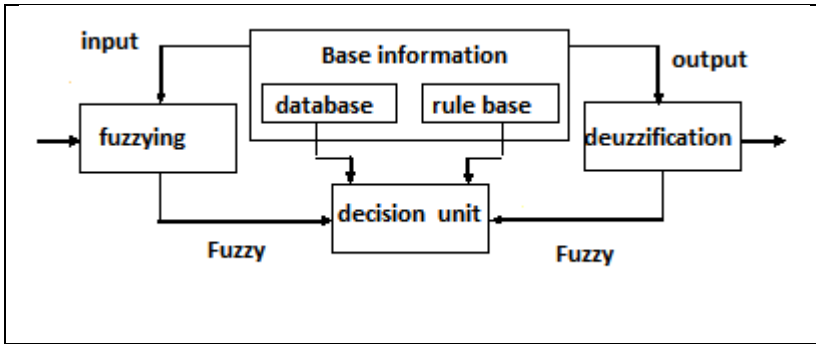
Decision makers should meet the functions in an uncertainty environment, no matter what conditions and dimensions they make decisions. The accuracy of the decisions made be supplied to the extent that the uncertainty can be formed into a risk. On the other hand, if decision makers utilize the classical scientific approach and the methodologies included in the process of decision-making, the resulting decisions be beautiful-ugly, good-bad, right-wrong, black-white, yes-no or 0-1, but real life is not depend on absolute distinction. In other words, it should not be forgotten that there are thousands of shades of gray in absolute black and absolute white (Khateb et al., 2014). At this point, studies have been conducted on how uncertainty can be predicted in general and how it can be made a part of decision-making processes, and as a result of these studies, the idea of an alternative scientific approach has been proposed. The concept of fuzzy logic was first put forward by Zadeh (1965) with the mathematical expression of uncertain expressions. The basic differences between classical logic and fuzzy logic are shown in Table 3.1.

**Table 3.1** Main Differences Between Classical Logic and Fuzzy Logic

| Classical Logic | Fuzzy Logic               |
|-----------------|---------------------------|
| A or not A      | A or not A                |
| Definite        | Partial                   |
| All or None     | To some extent            |
| 0 or 1          | Continuum between 0 and 1 |
| Binary units    | Mixed units               |



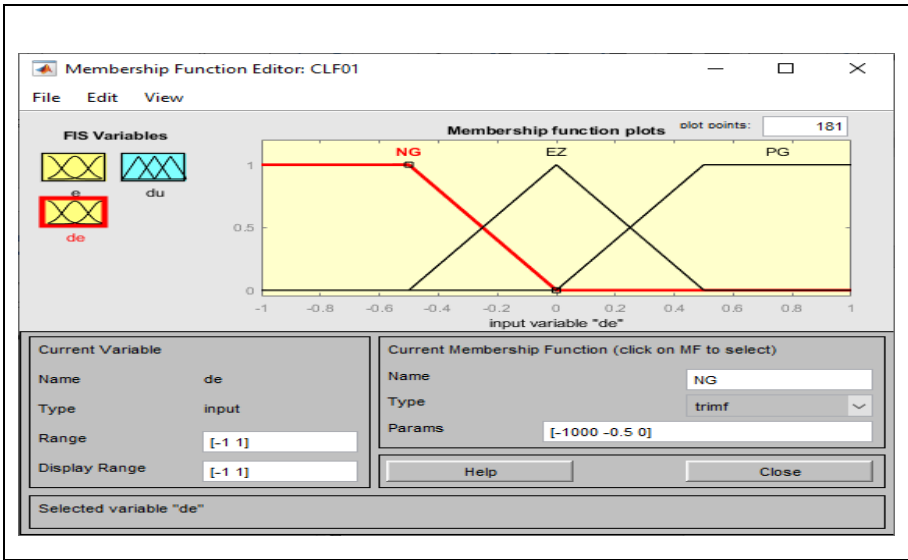
A rule-based system based on fuzzy reasoning and fuzzy rules, which basically includes 3 conceptual components, is defined as a Fuzzy Inference System (Figure 3.1). Several fuzzy inference systems have been proposed in the literature. The most widely used ones are the Mamdani Fuzzy Inference System and the Sugeno-Tagaki Fuzzy Inference System (ANFIS). The most important feature that distinguishes these two inference systems from each other is to define the output variable. The ANFIS method used in this study (Figure 3.1). Several fuzzy inference systems have been asserted in scientific literature. Widely used ones are the Sugeno-Tagaki Fuzzy Inference System (ANFIS) and the Mamdani Fuzzy Inference System. The most important feature that distinguishes these 2 systems of inference from each other is to specify the output variable. The ANFIS method was used in this study.



**Figure 3.1** General Structure of Fuzzy Logic Inference System

DC motor in an electric motor, mechanical energy is supplied from electric power and DC generator (in an electric generator, electrical energy is obtained from mechanical energy) are distinguished based on the power flow direction. DC machines can start under load and are easy to change speed. The feature of classical DC machines is called a commutator or a rotary mechanical inverter. In the rotor, a speed-dependent alternating current is generated, which helps the motor to start. In generator mode, the rotor converts the power supplied by the AC voltage into a pulsed DC voltage. There are also applications where the same DC machine is temporarily used as a motor and a generator. A special form is the homopolar generator, which can be generated without the use of a commutator with DC. Fuzzy logic controller design method for comparison and analysis with intelligent frequency adjustment techniques

such as neural networks fuzzy sets, and genetic algorithms, software computing techniques to improve call characteristics such as ladder, reduced errors for more efficient cases (rise time, overshoot time and maximum dwell time in positioning of DC control motor, etc.). DC motors are one of the main components of the automatic system. The system must automatically trigger a module that allows the system to actually perform its function. The most common exciter used to do this is the DC motor. Historically, DC motors also play a vital role in the development of many devices and systems. The fuzzy subset distribution of the FIS variable “du” is shown in Figure 3.2.



**Figure 3.2** Fuzzy Subset Distribution

## 5. FUZZY LOGIC CONTROL (FLC) AND MPPT

Fuzzy Logic Control (FLC) is a rule-based control strategy that human reasoning. Unlike classical binary logic, fuzzy logic allows intermediate values between absolute true and false, making it ideal for managing systems with high uncertainty and imprecision—common in renewable energy applications. FLC does not require an exact mathematical model of the system; instead, it relies on linguistic variables and expert-defined rules to make decisions. In PV applications, FLC is employed to evaluate the change in power and voltage (or current), determining the direction and magnitude of duty cycle adjustments to maintain operation near the MPP. The integration of FLC provides a dual-

layered control mechanism; while fuzzy logic ensures quick, intuitive adjustments based on error and error change. Fuzzy logic, which can be used in almost every field, is widely used in the industry. Japanese fuzzy logic has been applied especially to dishwashers, vacuum cleaners, washing machines and video cameras. Sement sector is the first used about Fuzzy logic applications.. The temperature and oxygen content in the kiln directly affect the quality of the cement. Only operators who are specialized in that field could provide the product within the desired limits. However, there are many operators working with a shift system in this factory and since each operator has a different expertise, the product is obtained in different quality and efficiency. The expected quality product could be only provided by experts who have been studying in this area for many years. Since cement production has a fuzzy structure, it provides control of process and invalid fuzzy rules. For example, there are no strict rules such as increasing the temperature by 10 degrees or 5 degrees. It is controlled by rules expressed in vague terms such as a little decrease, a little increase. A Danish company has developed a microcontroller based on 50-60 rules of thumb used by expert operators to control this process, resulting in consistent product quality and significant fuel savings (Nayak and Devulapalli, 2015). And then, fuzzy logic was also used in the control of unmanned aerial vehicles, train brake systems, ABS (automatic braking system) and ASC (automatic gear control). Pulse Width Modulation (PWM) and Maximum Power Point Tracking (MPPT) are two PV system components. MPPT helps monitor and manage power flow from the solar panel to the batteries. This technology modulates the DC output's high voltage value to produce the low voltage needed for the electronic battery. The output of solar panels varies depending on the weather.

Traditional MPPT methods such as Perturb and Observe, Incremental Conductance (INC), and Constant Voltage (CV) have been widely implemented due to their simplicity. However, these methods often fall short under dynamic environmental conditions, especially in cases involving rapid irradiance changes or partial shading. Issues such as steady-state oscillations around MPP, slow convergence rates, and susceptibility to local optima limit their applicability in advanced PV systems. These drawbacks to overcome intelligent MPPT strategies based on artificial intelligence and bio-inspired optimization have been proposed. Among them, fuzzy logic control (FLC) and

metaheuristic algorithms have gained considerable attention for their adaptability, robustness, and effectiveness in solving non-linear optimization problems in real-time.

MPPT charge controllers can match the battery voltage to the solar panel voltage to improve charging efficiency. By balancing the voltage and current in these systems in accordance with the equation, the entire potential of the solar panels is utilized;  $P = V \times I$ ; For instance, the electricity drawn from the panels is decreased when it is foggy outside to safeguard the voltage. More electricity is drawn from the grid when it's sunny. MPPT is a charge control technique that, under specific circumstances, draws the maximum power from a PV module. The MPPT, or the maximum power voltage, at which a PV module can output the most electricity. Maximum power is influenced by ambient temperature, solar radiation, and solar cell temperature. The voltage-current variations of solar cells, which are displayed through the I-V curve, are found using MPPT solar charge controllers. Metaheuristic algorithms; inspired by natural phenomena and animal behaviors, have demonstrated exceptional capability in solving complex engineering problems with high-dimensional, non-linear, and multimodal search spaces. Their ability to perform global optimization without requiring gradient information makes them suitable for MPPT problems in PV systems. Metaheuristic techniques include; Mimics the social behavior of bird flocking, Particle Swarm Optimization (PSO), PSO can suffer from premature convergence and oscillations; Genetic Algorithm (GA), Inspired by the natural selection process, but may involve high computational cost; Ant Colony Optimization (ACO) and Cuckoo Search (CS), Suitable for combinatorial optimization but may lack fine-tuning capacity in continuous problems; Dragonfly Optimization (DFOA): Balances exploration and exploitation, yet tuning parameters for stability is complex; Golden Eagle Optimization (GEOA): Recently introduced with high global convergence potential, yet lacks extensive hardware-based validations. While these algorithms have proven effective in various scenarios, the newly proposed Jellyfish Optimization Algorithm (JOA) has emerged as a promising solution due to its dynamic movement modeling and adaptive decision-making capabilities. The MPPT unit's function is choosing the output current and voltage to produce the highest power output. The MPPT device determines the best voltage and current to use and displays them as VMPP and IMPP,

respectively. For any solar power system to get the most energy possible from its PV modules, an MPPT solar charge controller is necessary. This device compels a PV module to work at a voltage that is very close to its maximum power point, or in this case, the greatest amount of power that can be taken from the system. The MPPT solar charge controller boosts system efficiency while bringing down system complexity. It employs many energy sources simultaneously because the PV output power immediately adjusts the DC-DC converter. Using PWM, a charge control device, the solar panel grid and the batteries are connected like an electric switch. When the battery is charged, this gadget instantly switches on or off and lowers the charging current. The PWM algorithm progressively reduces the charge when the battery voltage reaches the adjustment point to avoid overcharging and gas release from the battery and to deliver the maximum power to the battery in the shortest time. The benefits of this technology include retaining the battery's total capacity while maintaining charging efficiency and speeding up the battery recharge (Hamdan et al., 2025) (Sathish, Selvaraj, Reddy, Ram, & Pugazhenth, 2025).

## REFERENCES

- Al-Ayasrah, O., Alukaidey, T., & Pissanidis, G. (2006). Dsp based n-motor speed control of brushless dc motors using external fpga design. 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, 627–631, IEEE.
- Bhatt, J., Sladek, B., Gouda, B., & Dunham, J. (2018). Multi-mover linear motor controller providing shared coordination subsystem, Google Patents.
- Chen, S.-Y., Chen, C.-S., & Yang, Z.-W. (2018). Self-tuning cross-coupled two degree-of-freedom PID control for position synchronization of dual linear motors. *Applied Mathematical Modelling*, 64, 214–234.
- Fujii, K., Matsumoto, T., & Murao, S. (2018). Brushless DC motor and ventilation device having same mounted therein, Google Patents.
- Hamdan, M. Al, Zyoud, A., et.al.. (2025). Sustaniable battry storage. A hybrid charging solution. *Result in Enginerring*, 25, 103843.
- Kos, D., Curkovic, M., & Jezernik, K. (2006). FPGA Based BLDC Motor Current Control with Spectral Analysis. 2006 12<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, 1217–1222. IEEE.
- Lin, J., Wan, Q., Wang, M., Lei, Z., & Jia-cai, H. (2018). Predictive Functional Control Based on Sliding Mode Observer for Linear Motor Speed System. 2018 5<sup>th</sup> International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 895–899, IEEE.
- Lin, J., Xie, G., & Shi, X. (2019). Improved Double-Vector Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor. *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Innovation in Artificial Intelligence*, 150–156. ACM.
- Muniraj, M., & Arulmozhiyal, R. (2015). Modeling and simulation of control actuation system with fuzzy-PID logic controlled brushless motor drives for missiles glider applications. *The Scientific World Journal*, 2015.
- Nagaoka, K., & Fujita, T. (2018). Servo control device. Google Patents.
- Nayak, P., & Devulapalli, A. (2015). A fuzzy logic-based clustering algorithm for WSN to extend the network lifetime. *IEEE Sensors Journal*, 16(1), 137-144.

- Rodriguez, F., & Emadi, A. (2007). A novel digital control technique for brushless DC motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(5), 2365–2373.
- Sathish, S., Selvaraj, B., et al. (2025). A study on fast charging technologies and the influence of battery lifespan in electric vehicle. *IN ESS web of conference*, 610, 2012. EDP Sciences.
- Shao, X., & Sun, D. (2006). An FPGA based motion control IC and its application to robotic manipulators. *2006 9<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 1–6, IEEE.
- Tzou, Y.-Y., & Kuo, T.-S. (1997). Design and implementation of all FPGA-based motor control IC for permanent magnet AC servo motors. *Proceedings of the IECON'97 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation* (Cat. No. 97CH36066), 2, 943–947, IEEE.
- Wang, D., Yu, K., & Guo, H. (2008). Functional design of FPGA in a brushless DC motor system based on FPGA and DSP. *2008. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–4, IEEE.

## BÖLÜM 2

### MODERN GÜÇ ŞEBEKELERİNDE ENERJİ DEPOLAMANIN ÖNEMİ VE KULLANIMI

Zehra AYGÜN<sup>1</sup>  
Ali UTMA<sup>2</sup>  
Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ<sup>3</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214477>

---

<sup>1</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye  
zeh.aygun@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5421-4093

<sup>2</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye  
aliutma27@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0005-5579

<sup>3</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye  
asyilmaz@ksu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-5735-3857

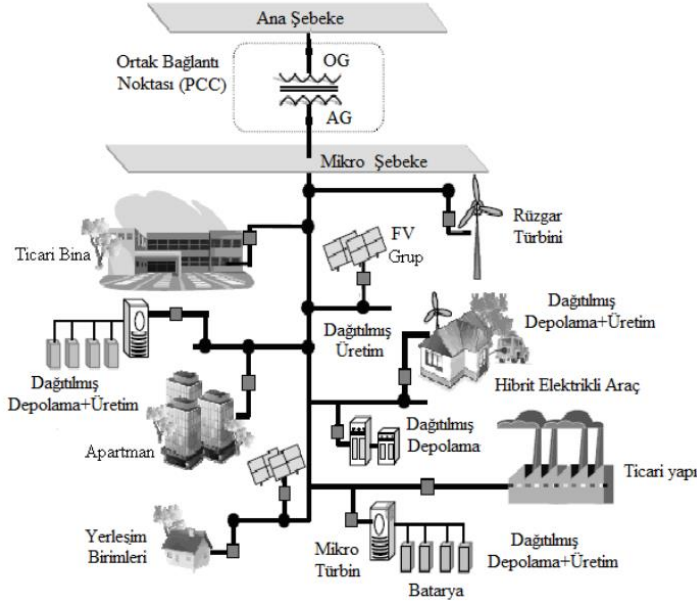




## GİRİŞ

Elektrik enerjisi; iletimi, kontrolü ve kullanımı kolay, farklı enerji türlerine dönüşebilen ve hayatımızı kolaylaştıran temiz bir enerji türüdür. Bu enerji; sosyal ve ekonomik ilerlemeyi sağlayan yegâne faktördür (Kocaman, 2014). Teknolojik gelişmeler, cihazların küçülmesi ve hızlanması ile birlikte kullanıcıların aşırı hassaslaşmasına neden olmaktadır, bu da bireysel önlemler yerine şebeke bazında önlemler alınmasını zorunlu kılmaktadır. Enterkonnekte sistem, enerjinin sürekliliğini sağlamak ve mevcut enerji talebi gereksinimi karşılamak için elektrik santrallerini ve şebekeleri birbirine entegre eden sistem olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1’de tüketim ve üretimin entegre olduğu enterkonnekte şebeke yapısı sunulmuştur. Enterkonnekte yapıda, talep edilen enerjinin artması enerji nakil hatlarında güç yoğunluğunun fazla olmasına neden olmaktadır ve arıza durumunda şebekeye bağlı olan tüm sistemler enerjisiz kalabilmektedir. Bu bağlamda, enterkonnekte şebekelerdeki kritik yüklerin kesinti ve arızalardan en az düzeyde etkilenmesi için, yenilenebilir enerji kaynakları ile klasik enerji santrallerinin entegrasyonunu sağlayan mikro şebekeler ortaya çıkmıştır (Efe ve Cebeci, 2015; Ağalar, 2012). Mikro şebeke, yeni bir enerji kaynağı olarak ortaya çıkan ve tüketicilere yakın mesafede üretim yaparak kayıplardan daha az etkilenen sistem topolojisi olarak tanımlanabilmektedir. Bu şebeke modeli enterkonnekte sistemle entegredir ve bölgesel nitelikte enerji sağlamaktadır (Mikro Şebeke Nedir? ,2022). Bu kapsamda mikro şebekeler, ana enerji şebekesine bağlı olarak şebekeyle birlikte enerji üretebilen, depolayabilen ve dağıtabilen küçük, yerel enerji sistemleri olarak da tanımlanabilmektedir (Ottenburger vd., 2024). Ana şebekenin alçak gerilim dağıtım alt istasyonunda bulunan bölümü oluşturan mikro şebeke yapısı, her biri dağıtılmış üretim (DG) biçiminde olan güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, mikro türbin, termik santral ve bataryalardan oluşmaktadır (Hartono vd., 2013). Ayrıca bu şebeke geleneksel güç sistemi dağıtım hattı ile birbirine bağlı tasarlanmıştır ve senkronize olarak çalışan farklı türdeki dağıtılmış enerji kaynakları (DER) ve yüklerin yerel olarak gruplanmasını içermektedir (Shah vd., 2011). Son yıllarda, dağıtık enerji kaynaklarının (DER), verimliliklerinin yüksek olması, çevreci, iletim ve dağıtım kayıplarının az olması, yerel elektrik şebekesini desteklenmesi ve sistem kararlılığının iyileştirilmesi gibi çeşitli avantajlardan dolayı dikkat çekmektedir (Yoldaş vd., 2017). Merkezi enerji üretim santrallerine alternatif olarak tasarlanan dağıtık enerji kaynakları (DER)

enerji kayıplarını minimize etmek hedefli enerji üretimini küçük ve yerel üretim santrali vasıtasıyla gerçekleştiren yapı olarak tanımlanmaktadır (Energy Exporter, 2024). Elektrik şebekesine entegrasyonu gerçekleştirilen dağıtılmış enerji üretim sistemlerinin temel hedefi, tüketicilere sağlanan gücün güvenilirliğini artırarak, yerel enerji kaynaklarının etkin kullanılmasını sağlamasıdır. Ayrıca, dağıtılmış enerji üretim sistemleri iletim ve dağıtım hatlarında meydana gelen kayıpların minimum seviyede olmasını ve tüketicilerin artan güç taleplerine karşı şebeke tarafında daha fazla güç kalitesi sağlanmasını amaçlamaktadır.



**Şekil 1:** Enterkonnekte Şebeke Tasarımı (Kocaman, 2015)

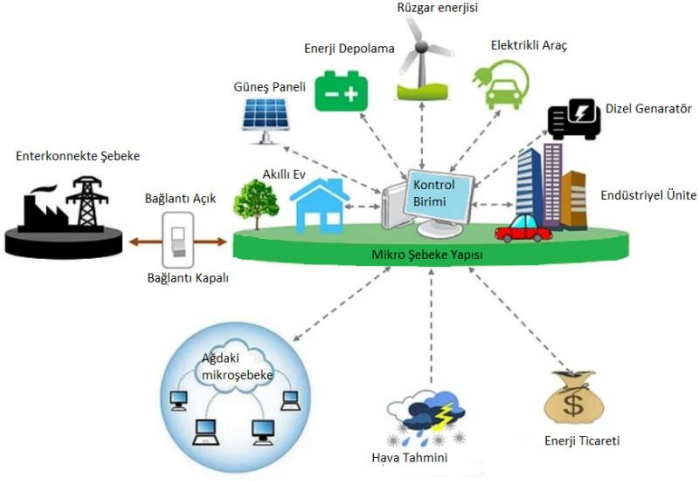
Dağıtılmış üretimle güç sağlayan mikro şebekenin iki modu bulunmaktadır. İlk modun tasarımında dağıtım hattından bağımsız olarak yükün talep ettiği üretimi sağlamak için yeterli üretim kapasitesini sağlayacak ada modu prensibi bulunmaktadır. İkinci tasarımda ise mikro şebeke dağıtım hattı ile entegredir ve dağıtılmış jenerasyon birimleri, önceden belirlenmiş aktif güç değerini sağlamak için kontrol edilmektedir. Bu minvalde güç şebekesi, dağıtılmış jenerasyonun tarafından kontrol edilen ve üretilen aktif güç ile talep edilen aktif güç arasındaki farkı karşılamaktadır (Shah vd., 2011).

Ada modunda, şebekeye bağlı moda kıyasla daha yüksek empedans ve daha düzensiz yük dağılımı sebebiyle gerilimde bozulma ve dengesizlik gibi sorunların meydana gelme olasılığı daha yüksektir. Şebekeye bağlı modda ise, dengesiz şebeke gerilimleri ve gerilim düşümü gibi bozulmalar, en çok karşılaşılan sorunlardır (Kow vd., 2015).

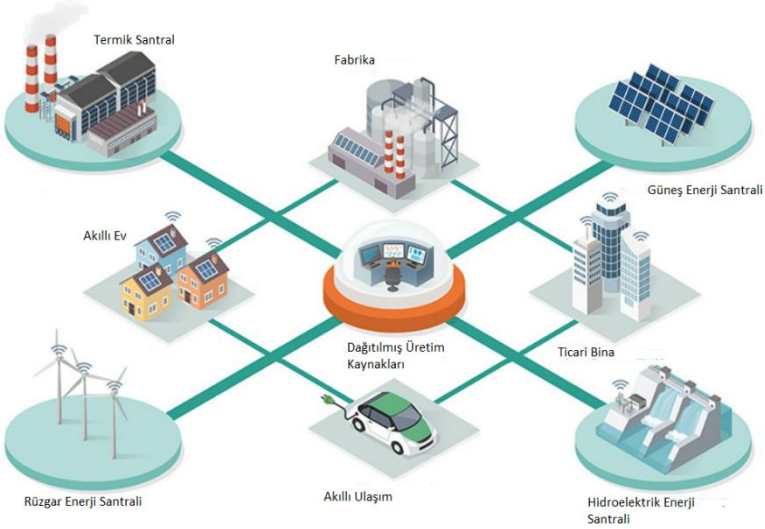
Yenilenebilir enerji kaynaklarının ve dağıtılmış üretimin geleneksel güç sistemlerine entegrasyonu şebekede güç kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır (Khokhar vd., 2015). Güç kalitesi, belirli büyüklük ve frekansta saf bir sinüzoidal gerilim dalga formunun, herhangi bir sapma olmadan öngörülen sınır içinde korunması olarak tanımlanmaktadır (Chowdhury vd., 2009). Bu bağlamda, dağıtılmış güç sistemleri ile entegre olarak çalışan yenilenebilir enerji kaynaklarındaki güç kalitesi sorunları ikiye ayrılabilir. Birincisi, ortak bağlantı noktasında oluşan gerilim harmonikleri, yüksek gerilim, düşük gerilim, gerilim yükselmesi, gerilim düşüşü, gerilim dengesizliği, gerilim dalgalanmaları, kesintiler, ikincisi ise, elektrik ark ocakları, kesintisiz güç kaynakları, hız kontrol sistemleri vb. gibi doğrusal olmayan yükler tarafından şebekeden çekilen akımla ilgili uygunsuz güç faktörü, yüksek reaktif güç, harmonik akımlar, dengesiz akımlar vb. durumlar güç kalitesinin bozulmasına yol açabilir (Muhtadi vd., 2021). Her iki durumda oluşan güç kalitesi bozulmaları, cihazların, devre ekipmanının arızalanması, dengesizlikler vb. gibi sorunlara neden olmaktadır (Viawan vd., 2006).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretim miktarının öngörülememesi nedeniyle, enerji depolama elemanlarıyla birlikte kullanılmaktadır (Tanaka vd., 2017). Enerji depolama sistemleri, dağıtık şebekenin pik enerji talebini karşılamak ve üretilen fazla enerjiyi depolamak için gereklidir (Chen ve Gooi, 2009). Yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrikli araçların mikro şebekelere entegre olması, çevresel sorunları azaltmanın yanında sürdürülebilir enerjinin sağlanması ve merkezi olmayan enerji sistemlerinin teşvik edilmesinde önemli rol oynamaktadır (Sora vd., 2024). Bununla birlikte EV'ler şarj sırasında şebekeden fazla güç çekerler. Bu nedenle, aynı anda çok sayıda EV'in şarj edilmesi de elektrik kesintileri, gerilim dalgalanmaları gibi şebeke üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilir (Sortomme ve El-Sharkawi, 2010). Mikro şebeke güç sistemi, küçük ölçekli topluluklar için enerji sürekliliğini sağlanılmasını hedeflemektedir (Ahmed vd., 2015). Bu

kapsamda mikro şebeke sistemine ait genel topoloji Şekil 2 ‘de dağıtılmış güç kaynakları ise Şekil 3’de sunulmuştur.



Şekil 2: Mikro Şebekenin Genel Topolojisi



Şekil 3. Dağıtılmış Güç Kaynakları

Enerji depolama cihazları, depolama yaparak az miktardaki enerjiyi elde edebilecek özelliktedir bundan dolayı güç sistemleri için büyük önem arz etmektedir. Enerji depolama, farklı dağıtılmış üretim kaynaklarının yüklerinin ve güçlerinin birleşmesini içeren mikro şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının üretiminin yetersiz kaldığı durumda enerji ihtiyacını gidermek için tasarlanan yapıdır. Depolama sistem tasarımı yapılarak, güç dalgalanmaları giderilmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kararlılığı ve güvenilirliği artırılmaktadır. Elektrokimyasal olarak enerji depolayan cihazlara ise batarya enerji depolama sistemleri denilmektedir. Tasarlanan batarya modeli ile bataryanın durumu ve performansı gözlemlenebilir. Örneğin SoH (batarya sağlık durumu) ve SoC (batarya şarj durumu) batarya parametrelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu kapsamda, batarya parametreleri sabit değildir ve birçok farklı duruma göre değişiklik gösterebilmektedir (Özan, 2020; Albayati & Avcı, 2023).

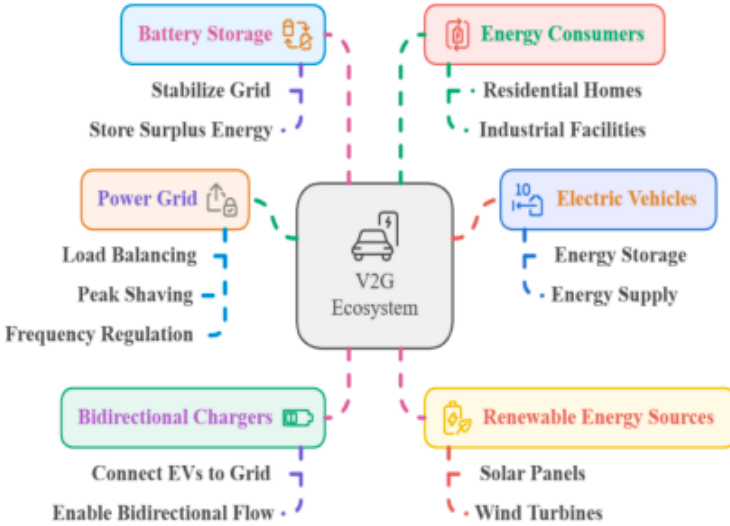
Batarya teknolojisi tasarımında, ana unsur kavramları güç yoğunluğu (W/kg) ve enerji yoğunluğu (Wh/kg)'dur. Bataryalardan maliyetin, şarj kapasitesinin, enerji verimliliğinin ve çevrim ömrünün performansı iyi olması beklenmektedir (Omar vd., 2011). Bu minvalde bataryalar, yüksek verimliliği ve düşük çevre kirliliğinden dolayı sık kullanılan enerji depolama cihazlarından olmaktadır. Ayrıca yüksek çalışma hücre gerilimi, kendi kendine deşarj oranının düşük olması ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlara sahiptir. Endüstride kullanılan çeşitli pil türleri mevcuttur bu piller elektrolitlerinde bulunan malzemeye yapısına göre: Kurşun-asit, Nikel metal hibrit (Ni-MH), Nikel kadmiyum (Ni-Cd) ve Lityum iyon (Li-ion) pilleri olarak sınıflandırılabilir (Chang, 2013).

Kurşun-asit ve lityum-iyon piller günümüz teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurşun-asit bataryalar, gelişmiş batarya tipi olup, ekonomiktir. Bu bataryanın düşük enerji yoğunluklu, ağır olması ve çevre dostu olmaması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Lityum-iyon pillerin enerji yoğunluğunun kurşun asitlere kıyasla daha iyi performans göstermesinden dolayı, günümüzde lityum-iyon piller kurşun-asit pillerin yerini almaktadır (Yong vd., 2015; Zhu vd., 2025). Lityum iyon (Li-ion) bataryalar yüksek güç ve enerji yoğunluğuna, uzun çevrim ömrüne, düşük çevre kirliliğine, daha hızlı deşarj/şarj oranları ve düşük maliyet özelliği avantajlarına sahiptir. Şarj/deşarj sırasında elektrotlarda oluşan hacimsel artışlardan dolayı patlama riski ve sınırlı

kapasitesi dezavantaj özelliğidir (Efe & Güngör, 2021). Ni-MH bataryalar düşük gerilimli, yüksek güç yoğunlukludur. Çinko hava (Zin-air) bataryalar ise güç yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı tekrar şarj edilme özelliğine sahiptir (Armand & Tarascon, 2008).

Sıvı tuzlu piller, metal-tuz elektrolitinin sıvı formda kalmasını sağlayan elektrikli araç pil teknolojisinde kullanılan yüksek sıcaklıklarda çalışan pillerdir (yaklaşık 300°C). Bu piller, sodyum nikel klorür, sodyum sülfür ve lityum demir sülfür örnek olarak verilebilmektedir (Cluzel & Douglas, 2012). Nikel kadmiyum (Ni-Cd) bataryaları uzun ömre sahiptir ve tam deşarj edildiklerinde zarar görmeden çalışabilmektedirler. Ni-Cd bataryaların özgül enerjisi yaklaşık 55 Wh/kg'dır. Bu bataryalar geri dönüştürülebilir fakat kadmiyum ağır metaldir uygun şekilde atılmadığı takdirde çevre kirliliğine neden olmaktadır. Ni-Cd bataryaların bir diğer dezavantajı ise maliyeti olmasıdır (Khaligh & Li, 2010).

Mobil enerji depolama ünitelerine dönüştüren Araçtan şebekeye V2G, elektrikli araçlar ve şebeke arasında çift yönlü enerji transferi teknolojisi olarak tanımlanmaktadır. Bu teknoloji ile iki çalışma sağlanabilir: İlk çalışmada elektrikli araçlar ihtiyaç duyduklarında şebekeden enerji çekebilir. İkinci çalışmada ise elektrikli araçların bataryaları dolu ise bataryalarındaki fazla enerjiyi şebekeye transfer edebilmektedir. Şekil 4 Araçtan şebekeye (V2G) ekosistemini göstermektedir. Bu sistemin ana bileşenleri ise: Elektrikli araçlar, elektrik şebekesi, çift yönlü şarj cihazları, yenilenebilir enerji kaynakları (güneş panelleri, rüzgâr türbinleri) ve batarya depolama cihazlarıdır. Bu sistemde elektrikli araçlar, mobil enerji depolama üniteleri olarak işlev görmektedir ve çift yönlü şarj cihazları aracılığı ile şebeke ile enerji alışverişi yapabilmektedir (Kumar vd., 2024).

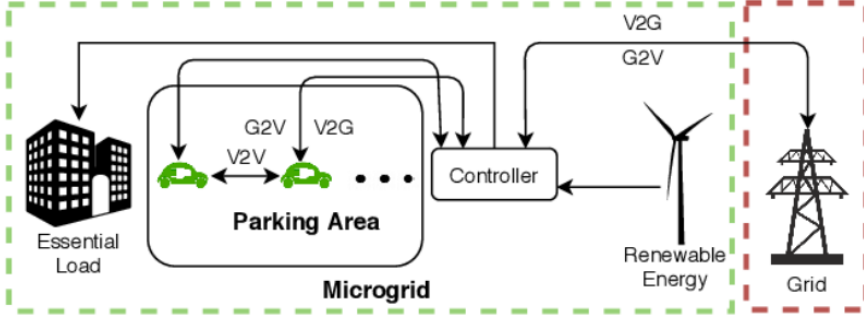


Şekil 4: V2G Teknolojisi (Kumar vd.,2024)

V2G teknolojisi, şebekeye destek sağlayabilmekte, yük faktörünü geliştirebilmekte, akım harmoniklerini azaltabilmekte ve depolama sistemlerine daha hızlı yenileyebilmektedir. Bu teknoloji geliştirilme aşamasındadır ve bazı dezavantajları mevcuttur. Elektrikli araçlar şebekeye enerji transferi yaparken şebeke için belirlenen kalite standardını karşılayamıyorsa enerji akışında problem meydana gelmektedir. Bu probleme çözüm olarak güç faktörü düzeltme devresi kullanılması gerekmektedir. Çift yönlü güç akış kapasitesine sahip şarj cihazı tasarlanmalıdır. Fakat bu şarj cihazları yüksek maliyetlidir ve ölçüm problemleri mevcuttur. Ayrıca elektrikli araçların bataryaların şarj ve deşarj döngüleri artığında bataryaların yaşam döngüsü azalmaktadır. Araç şarj modunda (G2V) çalışırken, çift yönlü bir şarj cihazı, güç ve reaktif gücü kontrol etmek için tanımlanmış bir faz açısıyla sinüzoidal akım çekmelidir. Araç deşarj(V2G) modunda ise, araç şarj cihazı benzer şekilde sinüzoidal dalgada şebekeye akım geri göndermelidir. Şebekeye bağlı olan elektrikli araç sayısının artması durumunda da dağıtım şirketinde birtakım sorunlar meydana gelmektedir (Quílez vd.,2018; Yilmaz & Krein, 2012). Şebekeden araca G2V teknolojisinde, şebeke elektrikli araçların bataryalarına enerji transfer ederek bataryayı şarj etmektedir (Hossain vd., 2023).



Bu kapsamda, G2V ve V2G teknolojileri vasıtasıyla elektrikli araçlar şebekeye entegre edilmekte ve güç akışı iki yönlü sağlanılmaktadır (Verim vd., 2013). V2G ve G2V şeması Şekil 5’de sunulmuştur (Sarkar vd., 2020).



Şekil 5: V2G ve G2V Şeması (Sarkar vd., 2020)

Bu derleme çalışması dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde günümüz modern şebekenin mevcut batarya teknolojisi durumu hakkında bilgiler sunulmuştur. İkinci bölümde enerji depolama sırasında şebekeye etki eden bozucu parametreler araştırılıp detaylı literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde mobil güçte depolama teknolojisi V2G ve G2V’nin entegrasyonu hakkında güncel ve gelecekteki çalışmalar incelenmiş gerekli çalışmalar bu bölümde sunulmuştur. En son aşamada bulgular ve değerlendirme bölümü altında yapılan literatür taramaları tablo halinde sunulmuştur.

## 1. MODERN ŞEBEKELERDE BATARYA TEKNOLOJİLERİ

(Parker, 2001) Yazar, yayınlamış makalelerden ve konferans sunumlarından bilgiler elde ederek kurşun-asit bataryaların enerji depolama sistemlerini incelemektedir. Bu kapsamda depolama sistemlerinin topolojisi, faydası, hedefi ve performans bakımından kamu hizmetleri uygulamaları için ilerlemeleri ele almaktadır.

(Winter & Brodd, 2004) Bu kitap bölümünde, Sistemlerin enerji taleplerini karşılamak için gerekli olan piller, yakıt hücreleri ve

süperkapasitörler incelenmektedir. Bataryaların enerji depolama grafikleri, nominal gerilimleri, anot, katot durumları tablo halinde sunulmuştur.

(Tie & Tan, 2013) Bu makale çalışmasında, Elektrikli araçlarda kullanılan enerji kaynaklarının, güç elektroniği dönüştürücülerinin, depolama cihazlarının, yüksek denetleyici kontrol algoritmasının son durumu incelenmiştir. Depolama cihaz kaynaklarından bataryalar, ultrakapasitörler, hidrojen enerji ve volanlı enerji depolama cihazları işlenmiştir. Kurşun asit, Nikel, Zebra, Lityum bataryalardan ise LiFeS, LiFePO<sub>4</sub>, LiPo, Li-ion batarya türlerinin yaşam döngüsü, enerji yoğunluğu, enerji verimliliği, özgül güç ve enerjilerinin hakkında tablo hazırlanmıştır.

(Koohi-Kamali vd., 2014) Bu makale, şebekeye bağlı modda çalışan bir mikro şebeke içinde batarya ve dizel santrallerini verimli bir şekilde kullanan yeni bir güç yönetim algoritması (PMA) önermektedir. Ayrıca, bu makale, sistemde hem döner hem de elektronik olarak bağlanmış dağıtık enerji kaynakları bulunurken, güneş enerjisi santralinin çıkış gücü osilasyonlarını hafifletmede batarya depolamanın rolünü incelemektedir. Bu amaçla, dizel jeneratör, batarya depolama ve güneş enerjisi santrallerini içeren akıllı bir mikro şebeke tasarımı yapılmıştır. Mikro şebeke, operatörün kararına dayanarak yerel yükünü besleyebilmekte ve güneş enerjisi sisteminin ve değişken yüklerin neden olduğu güç osilasyonlarını azaltabilmektedir. Güneş enerjisi santralinin osilasyonlu çıkış gücünü filtrelemek için zaman alanı sinyal işleme yaklaşımının yenilikçi bir uygulaması da sunulmaktadır. Bu bağlamda hem yükü hem de üretimi dikkate alan ve batarya santralini yönlendirmek için kullanılan bir güç düzeltme endeksi (PSI) formüle edilmiştir. Ayrıca, dizel santralinin şebeke ile birlikte yerel yükü paylaşabilmesi için üretimi planlamak üzere bir düşüş referans tahminleyicisi de tanıtılmaktadır. Batarya akım büyüklüğünün kabul edilebilir olmasını sağlamak için PSI'ye göre ayar yapan bir akım kontrol algoritması da tasarlanmıştır. Mikro şebeke ve iletişim platformu ile birlikte PMS, PSCAD yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. PMS, Malezya'daki gerçek yük profilleri ve çevresel veriler kullanılarak farklı senaryolar altında test edilmiştir ve önerilen mikro şebekenin operasyonel yetenekleri doğrulanmıştır. Sonuçlar, PMS'nin hem operatörün hem de talep tarafının gereksinimlerini karşılayarak mikro şebekeyi etkin bir şekilde kontrol edebileceğini göstermektedir.

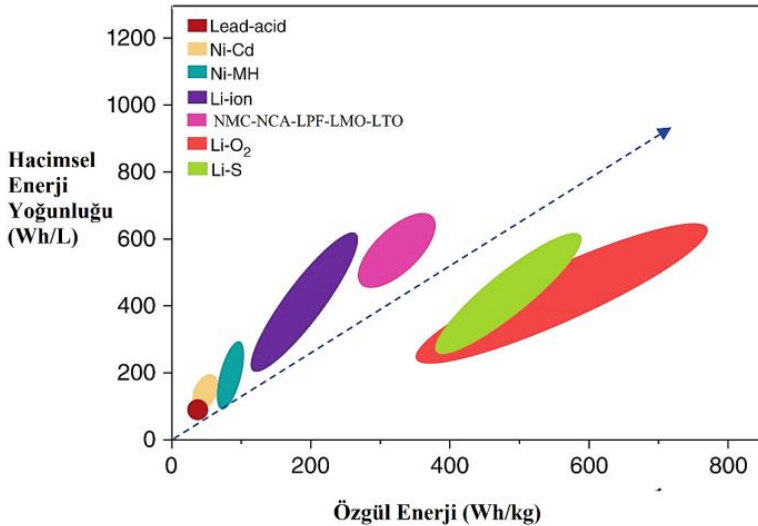
(Akinyele vd., 2017) Yazarlar, kurşun-asit, sodyum-nikel klorür ( $\text{NaNiCl}_2$ ), nikel-kadmiyum ( $\text{Ni-Cd}$ ), lityum-iyon ( $\text{Li-ion}$ ), çinko-bromür ( $\text{Zn-Br}$ ), polisülfid brom (PSB) bataryalarının enerji ve güç yoğunluklarını, maliyetlerini ve çevrim kapasitesinin performanslarını ve teknik özelliklerini mukayese etmiştir. Yenilenebilir enerjide bataryaların çevresel etkisini incelemek için 1.5 kW'lık güneş enerji sisteminden faydalanılmıştır. Bataryalar elektrikli yenilenebilir enerji kaynakları için hibrit optimizasyon modeli ortamında simüle edilmiştir. Benzetim çalışmaları Nijerya'daki altı farklı konum için tasarlanılmış ve sera gazı etkisine bakılmıştır. Sonuçlar bataryaların şebeke dışı fotovoltaik sistemde önem arz ettiğini takriben %36-68'lik sera gezi etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

(Hannan vd., 2017) Lityum-iyon pillerin yüksek hassasiyeti, çeşitli içsel ve dışsal faktörler ve karmaşık elektro-kimyasal reaksiyonlar nedeniyle doğru SOC tahmin etmek büyük bir zorluk haline gelmiştir. Bu makalede, elektrikli araç (EV) uygulamalarında SOC tahminini sağlamak için kullanılan çeşitli yöntemler ve karşılaşılan zorluklar ele alınarak, lityum-iyon pil yönetim sistemi(BMS) detaylı olarak incelenmiştir. Lityum-iyon pilin güvenli ve güvenilir çalışmasını sağlamak için batarya yönetim sisteminin (BMS) önemi vurgulanmıştır. BMS sisteminin donanım ve yazılım bileşenlerinde yer alan her bir elemanın işlevi kısaca tartışılmaktadır. Farklı literatürlerden modelin faydaları, dezavantajları ve hata tahmini ile ilgili kapsamlı bir açıklama yapılmış ve bu konular detaylı şekilde incelenmiştir. Ayrıca, SOC doğruluğunu düşüren birçok zorluğu tanımlamakta, bunlar arasında pil yaşlanma süreci, sıcaklık, kendi kendine deşarj, şarj-deşarj hızı, dinamik histerezis özellikleri ve hücre dengesizliği yer almaktadır. Her bir zorlukla ilgili olası çözümler de önerilmektedir. Araştırmacılar, bu incelemeden çeşitli zorluklar hakkında genel bir bakış elde edebilmektedir.

(Liang vd., 2019) Bu makale çalışmasında, batarya teknolojilerinin son on yılda taşınabilir elektronik cihazlara nasıl katkı sağlayacağı tartışılmaktadır. Bu kapsamda, ilk aşamada taşınabilir elektronik cihazların tarihsel gelişmeleri kapsamlı olarak ele alınmıştır. Daha sonra taşınabilir elektronik cihazlardaki yeniden şarj edilebilir bataryalar: kurşun-asit,  $\text{Ni-Cd}$ ,  $\text{Ni-MH}$  ve  $\text{Li-ion}$ 'un karakteristik özellikleri tablo halinde sunulmuştur ve taşınabilir elektronik cihazlardaki etkisine değinilmiştir.

(Kılıç, 2019) Yazar, Elektrikli araçların lityum-iyon pillerden oluşan batarya paketlerinin şarj edilmesi için DA-DA yükselten tip dönüştürücü temeli şarj cihazı tasarımı yapmıştır. Şarj cihazının tasarımı ve batarya paketi modellemesi, performansının değerlendirilmesi ve kontrol yöntemini Matlab/Simulink 'de oluşturmuştur. Şarj prensibi olarak sabit akım-sabit gerilim tekniğini kullanmıştır. Benzetim ve test çalışmasına göre, bataryaya yapılan şarj işleminde sabit gerilim modunda %90 doluluk oranına ulaşırken, sabit akım modunda takriben %7 akım dalgalanması meydana gelmiştir.

(Özcan vd., 2021) Elektrikli araçlar günümüz dünyasında hızla gelişim göstermektedir. Fakat araçların batarya maliyetleri yüksek, gidebileceği menzil sınırlıdır. Batarya teknolojisi bu bağlamda büyük önem arz etmektedir. Araçların bataryalarından uzun ömürlü, yüksek enerji yoğunluklu, hızlı şarj-deşarj edilebilmesi, yüksek güç yoğunluklu olması istenmektedir. Bu derleme çalışmasında yazarlar, geçmişten günümüze kadarki süreçte batarya kimyasını, yeni geliştirilen bataryaların zayıf ve üstün yönlerini, bataryadaki temel kavramları detaylı olarak açıklamıştır. Çalışma sonucunda lityum tabanlı NCA, LPF, NMC, LTO ve LMO araç bataryasında daha çok kullanıldığı görülmüştür. Şekil 6'da yaygın pil teknolojilerinin Ragone çizimi sunulmuştur.



Şekil 6: Yaygın Pil Teknolojilerinin Ragone Çizimi (Özcan vd., 2021)

Tablo 1’de bataryaların nominal gerilimleri, çalışma sıcaklığı, özgül enerjisi, özgül güç, yaşam döngüsü ve hacimsel enerji yoğunluğu sunulmuştur.

**Tablo 1:** Batarya Çeşitleri Parametresi

| Pil Türü                  | Nominal gerilim | 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 |
|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|
| Kurşun-Asit(Pb-Asit)      | 2               | 35                                  | 100                                             | 180                             | 1000          | <5                             | Hayır         |
| Nikel-Kadmiyum(Ni-Cd)     | 1,2             | 50-80                               | 300                                             | 200                             | 2000          | 10                             | Evet          |
| Nikel-Metal Hidrit(Ni-MH) | 1,2             | 70-95                               | 180-220                                         | 200-300                         | <3000         | 20                             | Seyrek        |
| Zebra                     | 2,6             | 90-120                              | 160                                             | 155                             | >1200         | <5                             | Hayır         |
| Lityum-İyon(Li-İyon)      | 3,6             | 118-250                             | 200-400                                         | 200-430                         | 2000          | <5                             | Hayır         |
| Lityum-Demir Fosfat(LFP)  | 3,2             | 90-140                              | 220                                             | 2000-4500                       | >3000         | <5                             | Hayır         |
| Lityum-Kükürt(Li-S)       | 2,5             | 350-650                             | 350                                             | -                               | 300           | 8 ve 15 aralığında             | Hayır         |
| Lityum-Hava(Li-Air)       | 2,9             | 1300-2000                           | 1520-2000                                       | 70-100                          | 100           | <5                             | -             |

(Yaşkı, 2022) Tez çalışmasında, Batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolamasının tasarımı yapılmıştır. Benzetim çalışmaları Matlab/Simülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Yüklerin artması/azalması ve bataryanın şarj/deşarj durumları farklı senaryolar oluşturularak kurgulanmış, sonuçları analiz edilmiştir. Kontrol sistemindeki PID parametreleri 3000 kez iterasyon yaptırılarak parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada amaç, batarya ve ultrakapasitörün birlikte çalışması sağlanılarak optimum batarya değerleri ve uzun batarya ömrünün elde edilmesidir.

(Hasanien vd., 2023) Bu çalışmada, Lityum-iyon pillerin kesin modellemesini elde etmek için ceylan optimizasyonu algoritmasından (GOA) faydalanılmaktadır. Ceylan optimizasyon algoritması, tahmini ve deneysel pil gerilimi arasındaki integral kare hatası (ISE)’yi en aza indirmek için kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında, 2.6 Ahr kapasiteli gerçek bir Panasonic lityum-iyon pil tasarımı yapılmıştır. Ceylan optimizasyon algoritması tabanlı lityum-iyon modeli çeşitli sezgisel ve geleneksel algoritma tabanlı modellerle karşılaştırılmıştır.

(Balci vd., 2023) Kurşun-asit bataryaların maliyetleri düşük, uzun raf ömrüne sahiptir. Lityum iyon bataryalar ise uzun çevrim ömrüne, yüksek verimliliğe ve sera gazı emisyonu düşürmesi özellikleri ile kurşun asit bataryalara göre daha üstündür. Bu makale çalışmasında, lityum-iyon ve kurşun-asit bataryalar ile ilgili genel bilgilendirme tanıtılması

amaçlanmaktadır. Bataryaların geliştirilmesi ile kazandırılan özellikler neticesinde elektrokimyasal performans analizi için gerçekleştirilen şarj-deşarj testleri galvanistik yöntemi ile yapılmıştır. Bu test işleminden elde edilen sonuçlar ile lityum-iyon ve kurşun-asit batarya üzerindeki avantaj-dezavantajlar sunulmuştur. Sunulan rapor ile, lityum-iyon batarya olarak kullanılan Sony VTC5'in yüksek kapasite sergileyerek kullanılan kurşun-asit batarya Orbus 6V7Ah'dan daha uzun ömürlü olacağı görülmüştür.

(Revathi vd., 2024) Bu makale, akıllı şebeke optimizasyonu için, otomatik talep yanıtı kesintisini yük sınıflandırmasıyla birleştiren hibrit bir yöntem önermektedir. Önerilen hibrit yaklaşım, Meksika Axolotl Optimizasyonu (MAO) ve Honey Badger Algoritması (HBA) entegrasyonuna dayanmaktadır. HBA yöntemi, axolotlların güncelleme davranışlarını iyileştirir ve bu yaklaşım genellikle geliştirilmiş MAO (EMAO) olarak adlandırılmaktadır. Önerilen enerji yönetim sistemi, müşteri enerji tüketim desenlerini optimize ederek karbon emisyonlarını, elektrik maliyetlerini ve tepe güç tüketimini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. EMAO yaklaşımı, şebeke üretimi, PV- batarya sistemleri ve dinamik fiyat sinyalleri entegrasyonu ile enerji tüketim maliyetlerini azaltmakta, tepe dalgalanmalarını minimize etmekte ve karbon emisyonlarını düşürmektedir. EMAO'nun kontrol topolojisi, Matlab simülasyonları ile değerlendirilmiş ve hibrit genetik parçacık sürüsü optimizasyonu, parçacık sürüsü optimizasyonu ve genetik algoritma gibi mevcut optimizasyon yöntemlerine kıyasla üstün performans sergilemiştir. Sonuçlar ise, EMAO algoritmasının sürekli olarak 310 sentlik en düşük maliyeti sağladığını, karbon emisyonlarını 1.8 pound'a indirdiğini ve %98,2'lik yüksek bir yük sınıflandırma doğruluğu elde ettiğini göstermiştir.

(Rani & Jayapragash, 2024) Bu inceleme makalesi, teknolojik ilerlemeleri, zorlukları ve ortaya çıkan araştırma merkezlerini kapsayan elektrikli araç (EV) sektöründeki güncel gelişmeleri ele almaktadır. Pil hücresi, elektrik motoru, şarj yöntemi ve kullanılan standartlar dahil olmak üzere elektrikli araç bileşenlerinin teknolojik evrimi bu incelemede ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bataryaların güvenli çalışmasını sağlamak için pil yönetim sisteminin (BMS) önemine değinilmiştir. Kurşun-asit, Ni-Cd, NİMH ve Li-ion bataryaların şarj/deşarj verimlilikleri, enerji yoğunlukları, özgül enerji ve güç yoğunlukları çeşitli batarya teknolojilerin karşılaştırılması adlı tabloda sayısal verilerle sunulmuştur. Derleme ayrıca, elektrikli araçların kullanımını teşvik

etmek için dünya çapında çeşitli hükümet organları tarafından üstlenilen çabaları da içermektedir. Elektrikli araçların yakın geleceğe yönelik beklentilerine ve akademik ve endüstriyel kuruluşların kullanımına sunulan olağanüstü araştırma sınırlarına değinerek sona ermektedir.

## 2. ENERJİ DEPOLAMANIN ŞEBEKEYE ETKİLERİ

(Lopes vd., 2010) Bu makale, elektrikli araçların enerji sistemlerine entegre edilebilmesini inceleyerek, şebeke ve enerji piyasası bakımından ele almıştır. Elektrikli araçların şebeke entegrasyonundan kaynaklanan potansiyel etkileri/faydaları göstermek için sabit durum ve dinamik davranış analizini simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonucunda, gelişmiş merkezi elektrikli araç şarj kontrol stratejilerinin benimsenmesinin, sisteme daha fazla sayıda elektrikli araçların entegre edilmesine olanak sağladığı tespit edilmiştir. Makalede sunulan şarj topolojileri şebekelerin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır ve yerel kontrol düzeyinin benimsenmesi, Ada çalışma modunda daha iyi bir performansın yanı sıra, izole güç sistemlerinde kurulu olan yenilenebilir enerji kaynaklarının (RES) miktarının güvenli bir şekilde artırılmasına da olanak tanıyacağı sonucuna varılmıştır.

(Singh vd., 2010) Bu makalede, elektrikli araçların koordineli şarj ve deşarjının, gerilim profilini iyileştirebileceğini ve güç iletim sistemlerinde oluşabilecek kayıpları azaltabileceğini öne sürmüştür. Hindistan'ın Guwahati şehrinde gerçek veriler kullanılarak simüle edilmiştir. Gerilim profili ve iletim kaybı, çeşitli elektrikli araçların penetrasyon seviyeleri ve şarj modelleri dikkate alınarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak, dağıtım kaybı ve gerilim dalgalanmalarının iki çelişkili parametre olduğu, koordineli şarj ve deşarjın, belirli bir bağlantı noktasının gerilim değişimini ve dağıtım kaybını azaltacağı belirlenmiştir. Bu nedenle, gelecekte şarj ve deşarjın çeşitli test durumlarını göz önünde bulundurarak her ikisini de aynı anda en aza indirmek için çok amaçlı optimizasyon kullanması önerilmiştir.

(Dharmakeerthi vd., 2011) Bu makalede artan elektrikli araçların şebekeye olan entegrasyonu ve şebekeye etkileri incelenmiştir. PEV'lerin(plug-in electric vehicles) artan sayısı, gerilim dengesizlikleri, aşırı yüklenmeler ve güç kayıpları gibi sorunlara yol açabilmektedir. Ancak akıllı şarj yöntemleri tasarlanarak bu problemlerin önüne geçilebileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, PEV'lerin güç elektroniği sistemleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu

ve sistem kararlılığı gibi durumlara katkıda bulunabileceği tespit edilmiştir. Yeni şarj teknolojilerinin önemi vurgulanmıştır.

(Monteiro vd., 2011) Bu makalede elektrikli araçlar (EV) ve fişli hibrit elektrikli araçlar (PHEV) için batarya şarj sistemlerinin akıllı şebeke bağlamında şebeke güç kalitesi üzerindeki potansiyel etkileri incelenmek istenmiştir. Araçtan Şebekeye (V2G) entegrasyonu ile güç kalitesi, sistem gerilim ve akım profilleri üzerinde durulmuştur. Araç şarj cihazının birim güç faktörüyle sinüzoidal akım tüketmesi durumunda, toplam akımın THD'sinin %51,6'dan %1,8'e düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca bu makalede, güç kalitesi bozulmasını azaltan bir EV akü şarj cihazı sunulmuştur. Bu şarj cihazı akülerin ömrünü en üst düzeye çıkarmak için akülerdeki gerilimim ve akımı kontrol etmeye olanak tanıyarak faydalı bir çözüm olabileceği kanaatine varılmıştır.

(Kocaman, 2013) Yenilenebilir enerji kaynaklı ve mikro şebekeye dayalı güç talebinin artması ile güç üretiminin yaygınlaşması beraberinde depolama sistemlerinin önemini göstermektedir. Bu makalede akıllı ve mikro şebekelerde enerji depolama teknolojileri araştırılmıştır. Bu teknolojiler Elektriksel Enerji Depolama Teknolojileri, Mekaniksel Enerji Depolama Teknolojileri, Kimyasal Enerji Depolama Teknolojileri ve Isıl (Termal) Enerji Depolama Teknolojileri olarak dört konu başlığı altında incelenmiştir. Enerji depolama sistemlerinin özelliklerinin ve enerji depolama teknolojilerinin uygulama alanlarının karşılaştırılması yapılarak, sonuçlar bir tablo halinde sunulmuştur.

(Poursistani vd., 2014) Bu makalede çok sayıda PHEV'in enerji yönetimi için, PHEV'lerin yük talebinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, PHEV'lerin yük talebi için bir model sunulmuş ve ardından şebeke kısıtlamasına göre genetik algoritma, pik yükü ve fosil yakıt tüketimini azaltmak için kullanılmıştır. Ayrıca daha düzgün bir yük talebi profili elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak, PHEV'leri planlamak, şarj etmek ve daha düzgün bir yük profiline sahip olmak ve pik yük değerlerini azaltmak için çok faydalı olabileceği kanaatine varılmıştır. Bununla birlikte PHEV'lerin konutlarda şarj edilmesinin trafo aşırı yüklenme oranını artıracak ve istenmeyen sonuçlara sebep olabileceği belirtilmiştir. Nihayetinde genetik algoritmayı (GA) kullanmanın daha az güç kaybı olması ve daha düzgün bir yük profili oluşturmak için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

(Faessler vd., 2017) Bu çalışmada, merkezi ve dağıtılmış bir enerji depolama sisteminin şebeke dengeleme yeteneği, karşılaştırılmıştır.



Simülasyon, akıllı sayaç verileri ve dağıtılmış fotovoltaik üretim verileri kullanılarak gerçek bir şebeke topolojisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tepe-ortalama güç oranı, gerilim düşüşü/yükselmesi ve kümülatif dağıtım kayıpları değerlendirme kriterleri olarak belirlenmiştir. Merkezi depolama sistemleri gerilim yönetiminde daha iyi performans gösterirken, dağıtılmış sistemler tepe-ortalama güç oranını azaltma avantajına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca şebeke güvenilirliğini artırmak için dağıtılmış üretimin katkılarının dikkate alınması gerektiği ifade edilmektedir.

(Özdemir vd., 2017) Bu makalede, enerji depolama sistemlerinde karşılaşılan zorluklardan bahsedilmiş olup, ayrıca 5 kW'lık fotovoltaik panel, batarya ve ultrakapasitör enerji depolama sistemleri kullanılarak yüksek güç ve enerji yoğunluklu hibrit bir şebeke sistem tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Geliştirilen hibrit şebeke topolojisinde süreklilik ve kararlılık önem arz etmektedir ve deneysel test platformu yapısında şebekenin kontrolü “dSPACE DS1103” ile sağlanılmaktadır. Bu amaçla, tasarlanan sistemde ultrakapasitörün maliyet bakımından yüksek olması dezavantaj bir faktör iken, ultrakapasitör enerji yoğunluğunun yüksek olması açısından önemli bir avantaja sahiptir.

(Nour vd., 2018) Bu makalede, gerçek bir konut alçak gerilim şebekesindeki elektrikli araçların (EV) şarj etkileri incelenmiştir. Farklı penetrasyon seviyeleri ile kontrolsüz ve gecikmeli şarj senaryoları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, gecikmeli şarjın kontrolsüz şarja göre daha düşük etkiler oluşturduğu, trafonun kontrolsüz şarjda kısa süreli aşım gösterdiğini ve kablo yüklemesinin çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, her iki durumda da gerilim değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalmış, gecikmeli şarj ise daha verimli bir sistem sunarak enerji kaybını azaltmıştır.

(Nour vd., 2020) Makalede, Elektrikli Araçlar (EV) teknolojisinin mevcut ihtiyaçları ve geleneksel araçlara kıyasla avantajları ile benimseme ve sosyal kabul için aşılması gereken zorluklar ele alınmıştır. Ayrıca, mevcut EV pazarı ve gelecekteki tahminler sunulmuştur. İletken şarj yönteminin yanı sıra kablosuz şarj ve pil değişimi gibi alternatif şarj teknolojileri de incelenmiştir. Kontrolsüz EV şarjının elektrik güç sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri, çeşitli çalışmalardan elde edilen sonuçlarla tartışılmıştır. Bu etkilerin şiddeti, birçok belirsizlik nedeniyle değişkenlik göstermektedir. Gecikmeli ve kontrollü şarj yöntemlerinin bu olumsuz etkileri azaltabileceği, hem güç sistemine hem de EV sahibine fayda sağlayabileceği belirtilmiştir. Son olarak, V2G, V2B ve

V2H gibi gelişmiş şarj kontrol yöntemleriyle sağlanabilecek elektrik hizmetleri ve gelecekteki araştırma alanları da ele alınmıştır.

(Dulău ve Bică , 2020) Bu makalede, Elektrikli araçlar ile çeşitli senaryolar tasarlanılarak güç şebekesine etkileri incelenmiştir. Bu etkiler arasında kısa devre akımlarının artması, gerilim seviyesinin standart değerler arasında olamaması, güç talebinin daha yüksek olması ve ekipmanın kullanım ömrünün etkilenmesi gibi durumlar yer almaktadır. Sonuçlardan, tüm senaryolardaki gerilim seviyesi azaldığında, gerilimin referans değerler arasında olduğu elde edilmiştir. Gerilim düşümü ve güç talebi bakımından elektrikli aracın şebekeye olan etkisi incelenmiştir. Elektrikli araç hızlı şarj edilirse, normal şarja kıyasla şebekede daha fazla gerilim düşümü meydana gelmiştir. Güç kayıplarında ise, hızlı ve normal seviyede bataryası şarj edilen elektrikli araç mukayese edildiğinde güç talebi yüksek olan hızlı şarj topolojisi normal şarj edilene göre şebekeye daha fazla güç kaybı oluşturmuştur.

(Mancini vd., 2020) Bu çalışma, farklı sayılarda elektrikli araçların (EV) şarj işlemlerinin senaryolaştırılarak, enerji şebekesi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Şarj işlemlerinin, düşük gerilim (LV) şebekesinde bazı kritik sorunlara yol açarken, orta gerilim (MV) şebekesinde önemli bir sorun oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Gelecekte, yüksek güçlü şarj istasyonlarının trafo aşırı yüklenmesi ve gerilim sorunları yaratabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, yenilenebilir kaynakların varlığı, akıllı yük kontrol stratejileri ile EV'lerin şebekeye entegrasyonunun sağlanabileceği ifade edilmiştir. Ancak, simüle edilen verilerin gerçekçi olmadığı ve fiziksel altyapı müdahalelerinin gerekliliği vurgulanmaktadır.

(Alkahtani vd., 2020) Mikro şebekeler, özellikle güç elektroniği tabanlı teknolojiler gibi çeşitli teknolojik gelişmeler kullanan farklı yenilenebilir enerji kaynaklarını kapsamaktadır. Bu sistemler çeşitli güç kalitesine yol açmaktadır. Sonuç olarak, son yıllarda güç kalitesi sorunlarını azaltmak için standartlar ve çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışma, mikro şebekelerdeki literatürde çalışılan güç kalitesi sorunlarını, çözümlerini ve standartları gözden geçirmeyi ve karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu minvalde, gerilim yükselmesi, gerilim düşmesi, gerilim ve akım harmonikleri, sistem dengesizlikleri ve dalgalanmalar gibi başlıca sorunları karşılaştırılarak mikro şebekede yüksek kaliteli çıkış gücü sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca mikro şebekelerle ilişkilendirilen yeni teknolojiler, 2-150 kHz aralığında harmonik emisyonları üretmekte ve bu

harmonik durumu, literatürde yeterince ele alınmayan yeni bir olgu olan süperharmonik (SH) emisyonuna yol açmaktadır. Bu nedenle, SH'nin nedenleri, ölçüm yöntemleri, özellikleri ve sonuçları vurgulanmış ve analiz edilmiştir. Ayrıca, güç kalitesi sorunlarının azaltılması, kontrolü ve cihazları da tartışılmaktadır. Bununla birlikte, mikro şebekelerde güç kalitesi sorunlarını hafifletmek için kullanılan en yaygın cihazlar, maliyet, kapasite ve performans açısından karşılaştırılmaktadır.

(Yunusov vd., 2016) Bu çalışmada, Bataraya enerji depolama sistemlerinin (BESS) konumunun ve yapılandırmasının alçak gerilim şebekeleri üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. BESS'in, artan enerji talebine alternatif bir çözüm olarak nasıl kullanılabileceğini ve farklı yapılandırmalarının gerilim profilleri, kayıplar ve kullanım üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde incelemektedir. Ayrıca, enerji depolaması olmayan faz dengelemenin, enerji depolaması olan sistemlere göre dengesiz şebekelerde sağladığı avantajları da ortaya koymayı hedeflemektedir. Sonuç olarak, dengesiz şebekelerde tek fazlı çözümlerin gerilim ve termal kısıtlamaları çözmede yetersiz kaldığını, ancak faz dengeleme çözümlerinin bu sorunları önemli ölçüde iyileştirdiğini görülmüştür. Dengeli şebekelerde ise, üç fazlı BESS, daha az depolama kapasitesi ile benzer veya daha iyi performans ortaya koymuştur. Genel olarak, BESS'in konumu ve yapılandırması, yerel şebeke üzerindeki etkileri açısından kritik bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

(Gemassmer vd., 2021) Bu makale, elektrikli araçların şebekeye entegrasyonundaki zorluklar ve potansiyelleri incelemek amacıyla, kentsel ve kırsal alanlar için farklı şarj topolojileri kullanılarak düşük gerilimli şebekeye yönelik bir modelleme gerçekleştirmiştir. İnceleme sonucunda, elektrikli araçların şebekeye entegrasyonu için farklı yaklaşımların gerekli olduğu, her iki bölgede enerji talebi, özel ve kamusal kullanım durumlarına göre farklılık göstermekte olduğu ve farklı şarj stratejilerinin uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Basit ve dengeli bir şarj stratejisinin, kırsal alanlardaki trafo ve hat aşırı yüklenmesini azaltabileceği, kentsel alanlarda ise pazar odaklı şarj yaklaşımları sebebiyle, şebeke durumu, gerilim dengesizliği ve aşırı yüklenme gibi faktörlerin dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır.

(Nurmuhammed ve Karadağ, 2021) Bu çalışmayla, elektrikli araç şarj sistemleri ve bu sistemlerin enerji şebekesi üzerine etkileri ile ilgili son yıllarda öne çıkan çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Şarj istasyonlarının enerji

şebekesine etkisinin azaltılarak en uygun noktaya konumlandırılması ile ilgili veriler incelenmiştir. Şarj istasyonlarının daha doğru ve enerji şebekesine etkilerinin minimize edilebilmesi için V2G gibi akıllı şebeke uygulamalarını ve şebekedeki enerji talebinin düşük olduğu saatlerde kullanılmasına yönelik uygun zamanlama yöntemlerinin kullanması ve bu sayede trafoların üzerindeki aşırı yüklenme ve enerji şebekesine yapılacak yatırım maliyetleri minimum seviyelerde tutulabileceği sonucuna varılmıştır.

(Weckesser vd., 2021) Bu çalışmada, fotovoltaiik ve ortak bataryaya sahip enerji topluluklarının boyutlandırılması ve dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini incelemektir. Çalışma, enerji topluluklarının maliyet açısından en uygun kapasitelerini belirlemek için dört farklı stratejiye dayalı doğrusal programlama optimizasyonu kullanarak, şehir, banliyö ve köy gibi üç farklı dağıtım şebekesi türünde 180 farklı senaryo durumunda değerlendirmiştir. Sonuçlar, en düşük seviyelendirilmiş maliyetin köy şebekesinde bulunduğunu ve enerji topluluğunun optimum kapasitelerinin şehir şebekesinde en yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, batarya konumunun gerilim üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve işletme stratejilerinin düşük gerilimli hat yüklemesi üzerinde büyük değişiklikler yarattığı belirlenmiştir.

(Nutmaki ve Lee, 2022) Bu makale, elektrikli araçların (EV'lerin) kentsel ve kırsal dağıtım ağları üzerindeki etkisini çeşitli işletim senaryoları çerçevesinde değerlendirerek, ağır termal kapasitesinin ana sınırlayıcı faktör olduğunu ve gerilimin ikinci önemli etken olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca, yük kaydırma ve düzenlenmiş şarj stratejilerinin EV barındırma kapasitesini artırabileceği, ancak %20'den fazla EV penetrasyonu durumunda ihlal süresinin birkaç saate çıkması nedeniyle bu artışın sınırlı olduğu sonucuna varılmıştır. Güneş enerjisinin ise EV barındırma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir.

(Adak vd., 2022) Bu makalede, elektrikli araçların şarj işlemleri için gerekli olan enerjinin mikro şebekeler tarafından sağlanması durumunda, doğrusal olmayan devre elemanlarının varlığından dolayı oluşan, şebekelerde güç kalitesinin durumu incelenmiştir. Sonuç olarak, mikro şebekenin gerilim regülasyonun sağlanması için reaktif güç desteğinin, güç faktörü değerinde iyileşme sağlayarak hatlarda oluşabilecek güç kayıplarının azaltacağını ve şebeke veriminin artıracığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca stokastik şarj ve deşarj

süreçlerinin, mikro şebekelerin verimliliği açısından önemli olduğu vurgulanmıştır.

(Amal vd., 2022) Bu çalışmada yazarlar, yenilenebilir enerji kaynağı rüzgâr enerji santralinin şebeke ile entegrasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, entegrasyonda yaşanan temel güç kalitesi problemleri, şebeke kararlılığı, rüzgâr santralindeki enerji kesintisi, reaktif gücün desteği ve arızayı önleme teknikleri tartışılmıştır. Şebeke ile entegrasyonunda yaşanan zorlukları gidermek için depolamadaki enerji yapısı, yenilenebilir enerji sistem politikası ve şebeke kodlarının önemi vurgulanmıştır.

(Olçay ve Çetinkaya, 2023a) Bu çalışmada, elektrikli araç şarj istasyonlarının elektrik şebekesine olan olumsuz etkileri analiz edilmiştir. İlk aşamada elektrik şebekesi modeli hazırlanmıştır. Tasarlanan model için IEEE 6-baralı güç test sistemi verileri kullanılmış olup, Elektriksel geçiş analiz programı (ETAP) kullanılarak oluşturulmuştur. Elektrik şebekesindeki mevcut yüklere ek olarak, elektrikli araç şarj istasyonlarının artmasıyla oluşacak yükler de eklenmiştir. Bu durumda IEEE 6-baralı test sistemi şebekesindeki jeneratörlerin, baraların mevcut yük verileri ve eklenen şarj istasyonu yüklerinin verileri ile Newton-Raphson yük akış algoritması kullanılarak elektrik şebekesi analiz edilmiştir. Her bir yük barasına bin adet ilave şarj istasyonunun yük olarak geldiği düşünülmüş olup 22 MW yük eklenmiştir. Burada tespit edilen güç kayıplarını azaltmak için şebekeye bağlı güneş enerjisi santralleri önerilmiştir, bu şarj istasyonunda enerji analizörü kullanılarak alınan ölçümler incelenmiştir. Bu santrallerin eklenmesiyle elektrikli araç şarj istasyonlarının neden olduğu yük artışının olumsuz etkilerinin azaltılması hedeflenmiştir. Sonuç olarak elektrikli araç şarj istasyonu (EVCS) kaynaklı aşırı yüklenmelerin şebeke üzerindeki etkilerinin büyük olduğu tespit edilmiştir. Şebekeye hat kaybı artışlarını azaltmak için güneş enerjisi santrali (GES) eklenmesinin faydalı sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu çalışmada olduğu gibi üretimin tüketim noktalarına yakın olması da bir avantaj olup hat kayıplarını azaltmaktadır. Bu santraller şebekeye belirli bir gerilim seviyesinin üzerinde bağlanacağından, bağlantı noktaları seçilirken şebeke gerilim seviyesi analiz edilmesi önemlidir. Kısa devre analizleri, güç akış analizi, gerilim düşümü, reaktif güç dengesi, frekans, trafo ve iletim hatları, koruma ve koordinasyon analizleri iyi bir şekilde yapılması önerilmektedir.

(Olçay ve Çetinkaya, 2023b) Bu çalışmada, elektrikli araçların mevcut elektrik şebekesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. EV şarj istasyonları ve benzeri doğrusal olmayan yükler, faz dengesizlikleri, harmonik oluşumu etkisi, enerji kalitesi, gerilim ve akım dengesizliği gibi güç sistemleri üzerinde çeşitli zararlı etkilere neden olduğu bilinmektedir. Çalışma, IEEE 6, 14 baralı ve 30 baralı test güç sistemleri kullanılarak test edilmiştir. EV şarj istasyonlarının şebekeye bağlandıkları noktada ve daha düşük gerilim seviyelerinde harmonik etkileri raporlanmıştır. Sistemde mevcut yüklere ek olarak, elektrikli araçları şarj etmek için şebekeden elektrik enerjisi alınması sonucunda şebeke üzerinde oluşabilecek etkiler gözlemlenmiştir. Mevcut yüklere ek olarak oluşacak yük artışına şebekenin tepkisi, harmonik etkileri ve mevcut şebekenin yıllar içinde elektrikli araç büyüme oranındaki artışa olan etkileri yapay sinir ağları kullanılarak tahmin edilmiş ve incelenmiştir. Benzer durumlardaki güç şebekeleri için çözüm önerileri sunulmuştur. Sonuç olarak, elektrikli araç şarj istasyonlarının elektrik şebekesi üzerindeki etkileri araştırılmış ve üç hipotez öne sürülmüştür. Bu hipotezlere göre, EV şarj istasyonları doğrusal olmayan yükler olarak kabul edilir ve transformatör üzerinde zararlı etkileri olacağı belirlenmiştir. Bir diğer hipotez ise, EV şarj olurken, güç elektroniği elemanları ve şarj istasyonunun yapısındaki anahtarlama nedeniyle akım çekerken harmonik bozulma meydana gelmektedir. Son olarak, birden fazla şarj istasyonu, elektrik şebekesinden enerji alınan ortak bağlantı noktasına bağlandığında, şebeke ve iletkenler üzerindeki etkisini artırmaktadır.

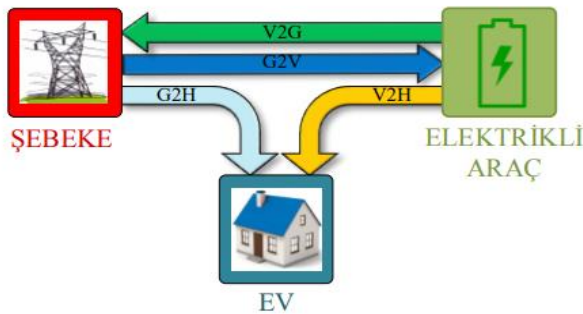
### **3. DEPOLAMA SİSTEMLERİNDE MOBİLİTE**

(Kuşdoğan) Tarafından ele alınan çalışma, Araçtan şebekeye V2G teknolojisinin güncel durumunu incelemektedir. Ayrıca mobil dağıtım enerji depolaması olarak tasarlanan fişli elektrikli aracın akıllı şebekedeki çalışmasını, altyapısını ve sistemdeki etkisini değerlendirmiştir.

(Yong vd., 2015) Bu çalışmada yazarlar, elektrikli araçların şebeke, çevre ve ekonomi üzerindeki etkilerini incelemeyi hedeflemektedir. Akıllı şebekenin elektrikli araçlar ile entegrasyonunu V2G teknolojisi ve yenilenebilir enerji kesintisini sorununa çözüm önerisi sunulmaktadır. Elektrikli araç teknolojisindeki son gelişmeleri, elektrikli araç dağıtımın etkisi ve fırsatları incelenmektedir.

(Zgheib vd., 2016) Yazarlar, Elektrikli Araçlar için iki yönlü bir batarya şarj cihazının tasarımını ve kontrolünü tartışmakta ve cihazın yerel ev elektrik şebekesine bağlıyken aktif güç filtresi olarak çalışmasını incelemektedir. İki yönlü batarya şarj cihazı tasarımı yapılırken, Üç fazlı gerilim kaynaklı doğrultucu (AA/DA) ve çift aktif köprü kıyıcı (DA/DA) topolojileri kullanılmıştır. Bu şarj cihazının amacı, batarya şarjı (G2V işlemi), bataryanın şebekeye deşarj edilmesi (V2G işlemi) ve şarj cihazı evle bağlantılıyken aktif filtrasyon sağlanmasıdır. Şarj cihazı, bataryanın şebekeden şarj edilmesi ve gerektiğinde gücün şebekeye geri verilmesini sağlamak üzere tasarlanmış ve kontrol edilmiştir. Tüm sistem, Matlab/Simulink kullanılarak simüle edilmiş ve her bir durumdaki çalışma sırasında elde edilen sonuçlar, bu farklı çalışma modlarının bir yönetim sistemiyle birlikte sunulmuştur. Simülasyon sonuçları analizinden, tartışma yapılmış ve mevcut güç kalitesi standartları ile uyumlu olduğu kanıtlanmıştır.

(Tarlak & İşen, 2018) Yazar bu çalışmada, Elektrikli araç tipleri, batarya şarj topolojisi ve elektrikli araçlarda kullanılan altı farklı güç elektroniği dönüştürücüleri hakkında detaylı literatür taraması yapmış ve dergiye derleme olarak sunmuştur. Elektrikli araçlar bataryasını şarj etmek için talep duymuş olduğu enerjiyi akülerde depo etmiş oldukları elektrikten sağlamaktadır. Elektrikli araçların şarj ihtiyacının olmadığı durumda ise akü de depo etmiş oldukları enerji çift taraflı şarj sistemi vasıtasıyla ihtiyaç durumuna göre ev ya da şebekeye verilebilmektedir. Elektrikli araçların şarj işleminde enerjisini şebekeden sağlaması durumunda şebeke için yük konumunda olmaktadır. Şekil 7’de şarj sisteminin güç akış şeması görülmektedir.



**Şekil 7:** Şarj Sisteminin Güç Akış Diyagramı (Tarlak & İşen, 2018)

(Mozafar vd., 2018) Yazarlar, Elektrikli araç sahiplerinin davranışları ve pazar detaylarına dayanan, gerçek veri bilgilerini kullanarak sistem operasyonunu incelemek amaçlı bir model sunmuşlardır. G2V ve V2G enerji profillerini elde etmek için, farklı sürüş modları için hız, sürüş koşulları ve batarya kapasitesine bağlı olan ER ve BU parametrelerini tanımlamışlardır. V2G için enerji alışverişi profili, araçların işyerlerinde park halinde oldukları sürelerde enerjiyi boşaltmak için sabit güç yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bataryayı yeniden şarj etmek için gerçek talebi hesaplamak amacıyla, farklı özelliklere ve kilometreye sahip dört araç dikkate alınmıştır. Modelde kullanılan Li-Ion bataryanın özelliklerine göre uygun yöntem kullanılarak, elektrikli araçların evlerine varış saatine dayalı günlük talep profili modellenmiştir. Önerilen model, IEEE 33-bus test sistemi ile değerlendirilmiştir. Analizler, V2G gücünün artırılmasıyla daha iyi bir güvenilirlik göstergesinin elde edildiğini ve sistemin istikrarlı bir performans sergilediğini göstermiştir. Elektrikli araçların V2G'ye katılımı, sistemin pik saatlerde enerji sağlaması için yüksek maliyetli generatörlere olan ihtiyacı sanal olarak ortadan kaldırmakta, neticede sistemin saatlik maliyetini azaltmaktadır. Ayrıca şarj ve deşarjın optimal yönetimi, ağın istikrarı, güvenliği için bir zorunluluk olmaktadır.

(Jandásek vd., 2023) Bu makalede, akıllı şebeke teknolojilerini ve elektrikteki mobilite uygulamalarını incelemektedir. Ardından BMW şirketi tarafından tanıtılan Araçtan her şeye V2X'in uygulamasını, avantajı/dezavantajı ve bu teknolojinin gerçek kullanımı göstermeyi amaçlamaktadır.

(Trivedi & Sant, 2022) Elektrikli araçların batarya şarj cihazları AA-DA ve DA-DA dönüştürücü topolojilerinin kademeli bağlantısından oluşmaktadır. Çift aktif köprü (DAB) dönüştürücü, yüksek anahtarlama frekansına sahip fazla anahtarlama kayıplarına neden olan düşük verimli dönüştürücü tipidir. Ayrıca çift aktif köprü dönüştürücü şebekeden araca(G2V) ve araçtan şebekeye (V2G) işlemini destekleyen çift yönlü DA-DA doğrultucudur. Bu çalışmada yazarlar, G2V ve V2G işlemi için Si,SiC ve GaN mosfetlerini kullanan DAB doğrultucunun detaylı karşılaştırma analizini incelemiştir. Anahtarlama frekansları 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz ve 200 kHz olarak belirlenmiştir. DAB dönüştürücüsü için tek faz kaydırma (SPS) modülasyon tekniği kullanılmıştır. SPS modülasyonu ile DAB işlemini doğrulamak için, PSIM'in SimCoder



Modülü kullanılarak TMS320F28335 DSP üzerinde SPS modülasyonunun uygulandığı deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Karşılaştırmalı analizde, GaN-MOSFET'li DAB dönüştürücünün, seçilen frekanslarda anahtarlama ve iletim kayıpları açısından diğer iki anahtardan daha iyi performans sergilediğini göstermiştir.

(Singirikonda vd., 2022) Elektrikli araç bataryası iki moda çalışmaktadır. Şebekeden araca (G2V) modu şarj sağlarken araçtan şebekeye (V2G) deşarj olmaktadır. G2V modunda, sabit akım ve sabit gerilim kontrolü ile V2G modunda ise, bataryadan şebekeye deşarj sağlanılarak sabit akım kontrolü ile sistem çalışmaktadır. Bu makalede, Adaptif kontrol tabanlı izole çift yönlü dönüştürücü tasarımı yapılarak elektrikli araç bataryasının referans değerine göre şarj ve deşarj üzerine kontrol sistemi sunulmuştur. Şebekeye yenilenebilir enerji güç paylaşımı için PV sistem bağlanmıştır. Artımlı iletkenlik MPPT algoritması PV'den maksimum gücü elde etmek için tasarlanmıştır. Her iki kontrol tekniğinde de şarj ve deşarj koşulları sırasında bataryanın daha iyi performans sağlaması için ANFIS entegre edilmiştir. ANFIS, referans ve ölçülen değerin karşılaştırılmasıyla oluşturulan hatadan girdi almakta ve gerekli görev oranı değerini üretmektedir. Bulanık yapının eğitimi, PI denetleyicisinin giriş ve çıkışından üretilen veriler kullanılarak yapılmıştır. Elektrikli araç bataryası, G2V modunda şebeke ve yenilenebilir enerji kaynağı kullanılarak şarj edilmektedir. V2G modunda ise, elektrikli araç bataryası ve yenilenebilir enerji kaynakları entegre edilerek şebekeye enerji verilmesi amaçlanmıştır. Benzetim çalışmaları, MATLAB/Simulink kullanılarak uygulanmış ve önerilen sistemin HIL performansı RT-LAB OP-5700 gerçek zamanlı simülatör ortamında incelenmiştir.

(Adhikary vd., 2023) Çift yönlü dönüştürücü tabanlı bir şarj istasyonu, şebekeden elektrikli araçların bataryalarını şarj edebilmek için G2V modunda, elektrikli aracın şebekeye elektrik transferinde V2G modunda çalışabilmektedir. Bu makalede, çift yönlü dönüştürücünün IoT tabanlı izleme sistemi ile akıllı şarj sağlanması için Matlab/Simulink'te modellenmesi yapılmıştır. IoT tabanlı şarj istasyonları bulut üzerinden iletişim sağlamaktadır. Simülasyon sonuçlarında, bataryanın SoC, gerilim, akım, güç ve enerji değerleri şebekenin ise aktif güç, reaktif güç, gerilim ve akım değerleri sunulmuştur. G2V modunda, maliyet hesaplaması için enerji tabanlı tarifenin süresi kullanılırken V2G modunda, elektrikli araçların şarj parametrelerinin

sistem izlemesi sunulmakta ve fiyatlandırma 11.09 Rs./kWh ile 16.27 Rs./kWh arasında değişmektedir. Olasılıksal bir modelde 2,54 kW şarj cihazı kullanılarak güç tüketimi hesaplanmaktadır. Son olarak çalışmanın gelecekteki yeri hakkında bilgi verilmiştir.

(Ahmadi vd., 2023) Bu makale, teknolojik ve çevresel faktörleri göz önünde bulundurarak araçtan şebekeye (V2G) ve şebekeden araca (G2V) teknolojilerini değerlendirmek ve dağıtmak için esnek, çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı önermektedir. Simülasyonlar, belirsiz parametreler olarak yenilenebilir üretimler, yük tüketimi ve şarj edilebilir elektrikli araçların şarj/deşarj zamanlamasını göz önünde bulunduran optimizasyon çerçevesinde sezgisel tabanlı ateşböceği algoritması kullanılarak işletme maliyetleri ve CO<sub>2</sub> emisyonları dahil olmak üzere iki nesnel işlevi en aza indirmek için değiştirilmiş bir IEEE 69-bus radyal dağıtım test sistemi üzerinde çalıştırılmıştır. Sonuçlar, işletme maliyetlerinde ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında önemli düşüşler olduğunu ve şebekenin gerilim profilinin düzgün bir şekilde iyileştirildiğini göstermiştir. Ayrıca, şebekede şarj edilebilir elektrikli araçlarındeşarj tesisinin uygulanmasıyla, şarj edilebilir elektrikli araçlar sahiplerinin işletme maliyetlerinde önemli miktarda tasarruf sağladığı gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, önerilen sezgisel tabanlı ateşböceği algoritması, işletme maliyetlerinde genel bir düşüş sağlamada, CO<sub>2</sub> emisyonlarını en aza indirmede ve ağ kararlılığını iyileştirmede etkili olduğunu kanıtlamıştır.

(Munusamy & Vairavasundaram, 2024) Araçtan şebekeye (V2G) şarj teknolojisine odaklanarak güç şebekesindeki elektrikli araçların güç akışı ve gerilim düzenlenmesini optimize etmek için AA-DA ve DA-DA dönüştürücülerin topolojileri incelenmiştir. Çalışmada blok zinciri yönteminde enerji ticareti ve siber güvenlik konularına, kullanımına değinilmiştir. V2G teknolojisinin performansını optimize etmek için yapay zekâ ve makine öğreniminden yararlanılmıştır. Bu kapsamda, yapay zekâ ve makine öğrenmesini entegre ederek şebeke dayanıklılığı ve elektrikli araçların kullanımını artırmak, sürdürülebilir enerjinin sağlanması hedeflenmiştir.

(Kuzu vd., 2024) Bu çalışmada, Şebekeye optimum biçimde entegre edilen elektrikli araç yapısını ve araçtan şebekeye elektrik enerjisi aktarımı olan V2G teknolojisinin gözlemlenmesi için Newton Raphson temelli model sunulmuştur. Amaç elektrikli araçlarındeşarj/şarj durumları simüle edilerek, V2G teknolojisinin analizini gerçekleştirmektir. Bu minvalde, elektrikli

araçların çevre ve şebeke üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Analiz sonucunda, 156 adet elektrikli aracın dağıtım şebekesine entegrasyonu yapılmış ve elektrikli araçlardan 10 saate üretilen toplam 4464 kWh elektrik enerjisi şebekeye aktararak takriben 1519 kg CO<sub>2</sub> salınımının azaldığı sonuçlarda rapor edilmiştir.

(Ordoneo vd., 2024) Bu makale çalışmasında yazarlar, elektrikli araçların bataryalarındaki şarj ihtiyacı ve şarj durumu (SoC)'una bakmaksızın gerilim kaynak davranışı ve şebeke desteği sağlayabilen V2G uygulaması için yeni şebeke oluşturma (GFM) denetleyici önermişlerdir. V2G teknolojisi daimi olarak şebekeye gerilim desteği sağlayan bir güç kaynağı olacaktır. Birincil frekans düzenlenmesi batarya durumuna ve şarj gereksinimine göre etkinleştirilebilir, devre dışı bırakılabilir. V2G şarj cihazının performansı, SoC denetleyicisinin durumuna bağlı olarak iki farklı senaryo altında sönümlü bir tepki sağlamak için simülasyon ve deneysel olarak incelenmiştir.

(Osman vd., 2024) Bu çalışmada, ortak DA-bara gerilimini paylaşan iki güç dönüştürücü topolojisinin çift yönlü batarya şarj cihazı için optimize edilmiş denetleyici önerilmiştir. Önerilen optimizasyon tekniği, Vahşi At Parçacık Sürüşü Optimizasyonu tekniği adı verilen hibrit bir meta sezgisel optimizasyon tekniğidir. Algoritmanın verimliliği, diğer birçok popüler algoritmayla karşılaştırıldığında klasik olarak iyi tanımlanmış yirmi üç uygunluk kıyaslama işlevi (F1-F23) kullanılarak doğrulanmıştır. Üç grup optimize edilen parametreye sahip altı PI denetleyicinin ana amacı, en iyi performansını elde edebilmek için denetleyicinin katsayılarının tasarımında temsil edilen çift yönlü batarya şarj cihazı sorununun ele alınmasıdır. Benzetim çalışması Matlab/Simulink kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca, sistem LAUNCHXL-F28377S DSP KIT emülatörü kullanılarak deneysel olarak test edilmiştir. Şebekeden Araca (G2V) çalışma modu sırasında, batarya birim güç faktörüyle alternatif akımla şebekeden şarj edilmektedir. Araçtan Şebekeye (V2G) çalışma modunda ise, aracın bataryasında depolanan enerji şebeke güç sisteminin kararlılığını ve sağlamlığını artırmak için şebekeye enerji verebilmektedir. Deneysel olarak benzetilen sistem için DA-bağlantı gerilim tepkisi optimize edildiğinde denetleyici parametrelerinin yaklaşık %3,75 oranında aşıldığı görülmüştür.

(Singh vd., 2024) Bu makalede DA mikro şebekelere dayalı elektrikli araç şarj istasyonları tasarımı yapılmıştır. Sistem fotovoltaiik sistemi, depolama

bataryası, elektrikli araç ve şebekeden oluşmaktadır. V2G ve G2V teknolojisi için yapay sinir ağı tabanlı (AI-ANN) güç yönetimi denetleyicisi (PMC) modellenmiştir. Bu denetleyici, sırasıyla güneş fotovoltaik sisteminden, depolama bataryasından, elektrikli araçtan ve şebekeden elektrik gücü elde etmek için geliştirilmiştir. Güç yönetimi denetleyicisi (PMC), tutarlı bir DA-bara gerilimini sağlamaktadır, gerilimdeki dalgalanmaları en aza indirmektedir ve her iki uçtaki güç arzını, talebini yönetmeyi amaçlamaktadır. Güç yönetim kontrolörü, MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak V2G ve G2V için test edilmiştir. Sonuçlar tipik kontrol stratejileriyle karşılaştırıldığında, ANN tabanlı denetleyicinin, aşmayı %9,6'dan %0'a, yerleşme süresini 1,18 saniyeden 0,52 saniyeye ve yükselme süresini 0,27 saniyeden 0,25 saniyeye düşürdüğünü göstermiştir. Sunulan çalışma, enerji üretiminin istikrarsızlığı ve başka bir hava veya enerji depolama koşulu içeren birden fazla senaryo için devam etmektedir.

(Shaheen vd., 2024) Bu makale, Elektrikli araçların park halindeyken şarj ve deşarj faaliyetlerini akıllıca yöneterek şebeke kararlılığı ve enerji talebi yönetimi problemlerini işlemek amacıyla yenilikçi V2G teknolojisinden faydalanmıştır. Elektrikli araçların şarj/deşarj konusuna evrimsel ve sürü kavramlarından esinlenen dört meta sezgisel algoritma uygulanmış ve karşılaştırılmıştır; bunlar arasında Diferansiyel Evrim (DE), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) kullanılmıştır. Kapsamlı bir simülasyon çalışmasından, dört algoritma arasında WOA algoritmasının EV şarj ve deşarj planlama faaliyetlerini optimize etmek için en verimli ve güvenilir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

## BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Teknolojik gelişmelerin ve dünya nüfusunun artışı ile enerjiye olan ihtiyaç artmaktadır. Geleneksel güç şebekeleri ise artan bu talebe fosil kaynaklarının sınırlı olması sebebiyle yetersiz kalmaktadır. Ayrıca fosil kaynakların çevreye ve insanlara verdiği tahribattan dolayı yenilenebilir enerji kaynağına geçiş hız kazanacaktır. Yenilenebilir enerjiye bağlı üretim kaynakların hızlı artışı beraberinde şebeke yapısında önemli değişiklikler meydana getirmektedir. Dağıtık üretim kaynakları ile entegre olan mikro şebeke veya hibrit enerji dağıtım sistemi olarak tanımlanan yeni sistem

topolojisi beraberinde, depolamayı getirmektedir. Bu çalışmada, öncelikle enterkonnekte şebeke, mikro şebeke, dağıtık üretim kaynakları tanıtılmaktadır. Bu kapsamda modern şebekedeki batarya teknolojisi, enerji depolamanın şebekeye etkisi ve depolama sistemlerinde mobilite kavramları üç ana başlıkta incelenmektedir. Modern şebekedeki batarya teknolojisi bölümünde kimyasal depolama üniteleri bataryalardan bahsedilmiş olup bataryaların mevcut teknolojik seviyesinin durumu hakkında bilgi vermek amaçlı literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Enerji depolamanın şebekeye etkisi bölümünde, yapılan literatür çalışmalarıyla depolama ünitelerinin mevcut güncel durumundan yola çıkılmış, literatürde bu problemlerde enerji depolamanın kullanımı araştırılmıştır. Depolama birimlerindeki enerji arzın talebi karşılamaması durumunda şebekede meydana gelecek bozucu etkiler sunulmuştur. Bu kapsamda, enerji kalitesindeki problemler enerji kesintileri, gerilim düşmesi, gerilim yükselmesi ve harmonik bozulmalar hakkında yapılan çalışmalar detaylı olarak belirtilmiş, enerjide depolama gereksinimi vurgulanmıştır. Son aşamada ise, mobil güçte depolama sistemleri şebekeden araca şarj G2V teknolojisi ve araçtan şebekeye deşarj V2G teknolojisi ile ilgili son on yılda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan literatür taramaları Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4’de detaylı olarak verilmiştir.

**Tablo 2:** Modern Güç Şebekesinde Batarya Teknolojisi Literatür Taraması

| Referans               | Mikro şebekedeki Batarya Teknolojileri ile Yapılan Çalışmalar                                                                                                                                  |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Parker, 2001)         | Kimyasal enerji depolama türü olan kurşun-asit bataryalar incelenmektedir. Bu kapsamda depolama sisteminin topolojisi, faydası, hedefi ve performans bakımından değerlendirilmesi yapılmıştır. |
| (Winter & Brodd, 2004) | Sistemlerin enerji taleplerini karşılamak için gerekli olan piller, yakıt hücreler ve süperkapasitörler incelenmektedir.                                                                       |

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Tie & Tan, 2013)        | Kurşun asit, Nikel, Zebra, Lityum bataryalardan ise LiFeS, LiFePO <sub>4</sub> , LiPo, Li-ion batarya türlerinin yaşam döngüsü, enerji yoğunluğu, enerji verimliliği, özgül güç ve enerjilerinin hakkında tablo hazırlanmış.Elektrikli araçlarda kullanılan enerji kaynaklarının, güç elektroniği dönüştürücülerinin, depolama cihazlarının, yüksek denetleyici kontrol algoritmasının son durumu incelenmiştir.                                                                          |
| (Koohi-Kamali vd., 2014) | Şebekeye bağlı entegre çalışan bir mikro şebeke tasarımı yapılarak batarya ve dizel santrallerini verimli bir şekilde kullanan yeni bir güç yönetim algoritması (PMA) önermektedir. Mikro şebeke ve iletişim platformu ile birlikte PMS, PSCAD yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Tasarlanan PMS, Malezya'daki gerçek yük profilleri ve çevresel veriler kullanılarak farklı senaryolar altında test edilmiştir ve önerilen mikro şebekenin operasyonel yetenekleri doğrulanmıştır. |
| (Akinyele vd., 2017)     | 1.5 kW'lık güneş enerji santrali tasarımı yapılarak bataryaların çevresel etkisini incelenmek hedeflenmektedir.Bu kapsamda benzetim çalışmalarında Nijerya'daki altı farklı konum için senaryo oluşturulmuş olup sera geza etkisi değerlendirilmiştir.                                                                                                                                                                                                                                    |
| (Hannan vd., 2017)       | Elektrikli araç uygulamalarında SOC tahminini sağlamak için kullanılan çeşitli yöntemler ve karşılaşılan zorluklar ele alınarak, lityum-iyon pilin batarya yönetim sistemi(BMS) detaylı olarak incelenmiştir.                                                                                                                                                                                                                                                                             |

|                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Liang vd., 2019)    | Batarya teknolojilerinin son on yılda taşınabilir elektronik cihazlara nasıl katkı sağlayacağı tartışılmaktadır.                                                                                                                                                                                     |
| (Kılıç, 2019)        | Elektrikli araçların, batarya paketlerinin şarj edilmesi için yükselten tip DA-DA dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. Şarj cihazının tasarımı ve batarya paketi modellemesi Matlab/Simulink 'de oluşturulmuştur.                                                                                       |
| (Özcan vd., 2021)    | Derleme çalışmasında, geçmişten günümüze kadarki süreçte batarya kimyası, yeni geliştirilen bataryaların zayıf ve üstün yönleri, bataryadaki temel kavramlar detaylı olarak açıklanılmış, yaygın pil teknolojilerinin Ragone çizimi sunulmuştur.                                                     |
| (Yaşkır, 2022)       | Batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolamasının tasarımı Matlab/Simülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Yüklerin artması/azalması ve bataryanın şarj/deşarj durumları farklı senaryolar oluşturularak kurgulanmış, sonuçları analiz edilmiştir.                                        |
| (Hasanien vd., 2023) | Tahmini ve deneysel pil gerilimi arasındaki integral kare hatası (ISE)'yi en aza indirmek için 2.6 Ahr kapasiteli gerçek bir Panasonic lityum-iyon pil tasarımı yapılmıştır. Lityum-iyon pillerin kesin modellemesini elde etmek için ceylan optimizasyonu algoritmasından (GOA) faydalanılmaktadır. |
| (Balci vd., 2023)    | Lityum-iyon ve kurşun-asit bataryaların elektrokimyasal performans analizi için şarj-deşarj testleri galvanistik yöntemi ile yapılmıştır. Bu test işleminden elde edilen sonuçlar ile lityum-iyon ve kurşun-asit batarya üzerindeki avantaj-dezavantajlar sunulmuştur.                               |

|                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Revathi vd., 2024)        | Bir enerji yönetim sistem topolojisi tasarlanılarak, karbon emisyonlarının, elektrik maliyetlerinin ve güç tüketiminin en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır. Tasarlanan sistemde, şebeke üretimi, PV- batarya sistemleri ve dinamik fiyat sinyalleri entegrasyonu yapılmıştır.                                                                                                                                                                 |
| (Rani & Jayapragash, 2024) | Pil hücresi, elektrik motoru, şarj yöntemi ve kullanılan standartlar dahil olmak üzere elektrikli araç bileşenlerinin teknolojik evrimi bu incelemede ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Araç tasarımında kullanılan kurşun-asit, Ni-Cd, NİMH ve Li-ion bataryaların şarj/deşarj verimlilikleri, enerji yoğunlukları, özgül enerji ve güç yoğunlukları çeşitli batarya teknolojilerin karşılaştırılması tabloda sayısal verilerle sunulmuştur. |

**Tablo 3:** Depolamanın Modern Şebekeye Etkisi Literatür Taraması

| Referans                  | Depolamanın Şebekeye Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Lopes vd., 2010)         | Elektrikli araçların şebeke entegrasyonundan kaynaklanan potansiyel etkileri/faydaları göstermek için sabit durum ve dinamik davranış analizinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir.                                                                            |
| (Singh vd., 2010)         | Hindistan'ın Guwahati şehrinde gerçek veriler kullanılarak simülasyon tasarımı yapılmıştır. Bu kapsamda şebekedeki gerilim profili ve iletim kayıpları gözlemlenilerek, çeşitli elektrikli araçların penetrasyon seviyeleri ve şarj modelleri analiz edilmiştir. |
| (Dharmakeerthi vd., 2011) | PEV'lerin (plug-in electric vehicles) artan sayısı, şebekede gerilim dengesizlikleri, aşırı yüklenmeler ve güç kayıpları gibi kalite problemlerini oluşturmaktadır. Bu çalışmada                                                                                 |



|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | elektrikli araçların şebekeye olan entegrasyonu ve şebekeye etkileri incelenmiştir.                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| (Monteiro vd., 2011)    | Araçtan Şebekeye (V2G) şarj entegrasyonu ile şebekede üzerindeki güç kalitesi, sistem gerilim ve akım profilleri konusu üzerine araştırma yapılmıştır. Araç şarj cihazının birim güç faktörüyle sinüzoidal akım tüketmesi durumunda, toplam akımın THD'sinin %51,6'dan %1,8'e düştüğü gözlemlenmiştir.                                                                                |
| (Kocaman, 2013)         | Akıllı ve mikro şebekelerde enerji depolama teknolojileri araştırılmıştır. Bu teknolojiler Elektriksel Enerji Depolama Teknolojileri, Mekaniksel Enerji Depolama Teknolojileri, Kimyasal Enerji Depolama Teknolojileri ve Isıl (Termal) Enerji Depolama Teknolojileri olarak dört konu başlığı altında incelenmiştir.                                                                 |
| (Poursistani vd., 2014) | PHEV'in enerji yönetimi için yük talebinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, PHEV'lerin yük talebi için bir model sunulmuş ve ardından şebeke kısıtlamasına göre genetik algoritma tasarlanılmış, bu algoritma nominal yük ve fosil yakıt tüketimini azaltmak için kullanılmıştır. Ayrıca şebeke üzerinde daha düzgün bir yük talebi profili elde edilmesi amaçlanmıştır. |
| (Faessler vd., 2017)    | Merkezi ve dağıtılmış bir enerji depolama sisteminin şebeke dengeleme ölçeği mukayese edilmiştir. Simülasyon çalışması, akıllı sayaç verileri ve dağıtılmış fotovoltaik üretim verileri kullanılarak gerçek bir şebeke topolojisi üzerinde gerçekleştirilmiştir                                                                                                                       |

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Özdemir vd., 2017)    | 5 kW'lık fotovoltaiik panel, batarya ve ultrakapasitör enerji depolama sistemleri kullanılarak yüksek güç ve enerji yoğunluklu hibrit bir şebeke sistem tasarımı yapılmıştır.                                                                                                                                                            |
| (Nour vd., 2018)       | Gerçek bir konut baz alınarak alçak gerilim şebekesinde şarj edilen elektrikli araçların şebeke üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kontrolsüz ve gecikmeli şarj senaryoları değerlendirilmiş olup, trafonun kontrolsüz şarjda kısa süreli aşım gösterdiğini ve kablo yüklemesinin çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır. |
| (Nour vd., 2020)       | Geleneksel şarj yönteminin yanı sıra kablosuz şarj ve batarya değişimi gibi alternatif şarj teknolojileri incelenmiştir. Kontrolsüz EV şarjının elektrik güç sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri, çeşitli çalışmalardan elde edilen sonuçlarla tartışılmıştır.                                                                        |
| (Dulău ve Bică , 2020) | Elektrikli araçlar ile çeşitli senaryolar oluşturularak güç şebekesine etkileri olan kısa devre akımları, güç talebi ve gerilim değişimleri incelenmiştir.                                                                                                                                                                               |
| (Mancini vd., 2020)    | Farklı sayılarda elektrikli araçların şarj işlemleri senaryolaştırılarak, araçların alçak ve orta gerilim şebekesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Gelecekte, yüksek güçlü şarj istasyonlarının trafo aşırı yüklenmesi ve gerilim sorunları yaratabileceği öngörülmektedir.                                                     |

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Alkahtani vd., 2020)          | Dağıtık şebekeye bağlı olan mikro şebekelerin literatürde çalışılan güç kalitesi sorunlarını, çözümlerini ve standartlarını gözlemek ve karşılaştırmak amaçlanmaktadır. Bu minvalde, gerilim yükselmesi, gerilim düşmesi, gerilim ve akım harmonikleri, sistem dengesizlikleri ve dalgalanmalar gibi başlıca sorunlar incelenmiştir. Ayrıca mikro şebekelerle ilişkilendirilen yeni teknolojiler, 2-150 kHz aralığında harmonik emisyonları üreten süper harmoniğin nedenleri, ölçüm yöntemleri, özellikleri ve sonuçları vurgulanmış ve analiz edilmiştir. |
| (Yunusov vd., 2016)            | Bataraya enerji depolama sistemlerinin (BESS) konumunun ve yapılandırmasının alçak gerilim şebekeleri üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Bu kapsamda BESS'in, artan enerji talebine alternatif bir çözüm olarak nasıl kullanılabileceğini ve farklı yapılandırmalarının gerilim profilleri, kayıplar ve kullanım üzerindeki etkileri sistematik bir şekilde incelenmektedir.                                                                                                                                                                          |
| (Gemassmer vd., 2021)          | Elektrikli araçların şebekeye entegrasyonundaki zorluklar ve potansiyelleri incelemek amacıyla, kentsel ve kırsal alanlar için farklı şarj topolojileri kullanılarak düşük gerilimli şebekeye yönelik bir modelleme gerçekleştirilmiştir.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| (Nurmuhammed Karadağ, 2021) ve | Şarj istasyonlarının daha doğru kullanılması ve enerji şebekesine bozucu etkilerinin minimize edilebilmesi tartışılmıştır. Bu kapsamda şebekeden alınan elektriğin maliyetini işleyerek, enerji talebinin düşük                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | olduğu saatlerde elektriğin kullanılmasına yönelik derleme çalışması yapılmıştır.                                                                                                                                                                                        |
| (Weckesser vd., 2021)       | Fotovoltaik ve ortak bataryaya sahip enerji topluluklarının boyutlandırılması ve dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri incelenmektedir.                                                                                                                                   |
| (Nutkani ve Lee, 2022)      | Elektrikli araçların kentsel ve kırsal dağıtım ağları üzerindeki etkisini çeşitli işletim senaryoları çerçevesinde değerlendirerek, ağın termal kapasitesinin ana sınırlayıcı faktör olduğu ve gerilimin ikinci önemli etken olduğu belirlenmiştir.                      |
| (Adak vd., 2022)            | Elektrikli araçların şarj işlemleri için gerekli olan enerjinin mikro şebekeler tarafından sağlanması durumunda, doğrusal olmayan devre elemanlarının varlığından dolayı oluşan, şebekelerdeki güç kalitesinin durumu değerlendirilmiştir.                               |
| (Amal vd., 2022)            | Rüzgâr enerji santralinin şebeke ile entegrasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, entegrasyonda yaşanan temel güç kalitesi problemleri, şebeke kararlılığı, rüzgâr santralindeki enerji kesintisi, reaktif gücün desteği ve arızayı önleme teknikleri tartışılmıştır. |
| (Olçay ve Çetinkaya, 2023a) | Elektriksel geçiş analiz programı (ETAP) kullanılarak, elektrikli araç şarj istasyonlarının elektrik şebekesine olan olumsuz etkileri analiz edilmiştir. Güç kayıplarını azaltmak için şebekeye bağlı güneş enerjisi santralleri tasarımı önerilmiştir.                  |

|                             |                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Olçay ve Çetinkaya, 2023b) | Çalışmada, IEEE 6, 14 ve 30 baralı test güç sistemleri kullanılarak elektrikli araç şarj istasyonlarının şebekeye bağlandıkları noktada ve daha düşük gerilim seviyelerinde harmonik etkileri raporlanmıştır. |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Tablo 4:** Mobilite Bakımından Gerçekleştirilen Çalışmalar

| <b>Referans</b>       | <b>Depolama sistemlerinde mobilite üzerine yapılan çalışmalar</b>                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Kuşdoğan)            | Mobil dağıtım enerji depolaması olarak tasarlanan fişli elektrikli aracın akıllı şebekedeki çalışması, altyapısı ve sistemdeki etkisi genel kapsamda değerlendirilmiştir.                                                                                                                             |
| (Yong vd., 2015)      | Akıllı şebekenin elektrikli araçlar ile entegrasyonunu V2G teknolojisi ve yenilenebilir enerji kesintisini sorununa çözüm önerisi sunulmaktadır. Ayrıca elektrikli araç teknolojisindeki çevre ve ekonomi üzerindeki son gelişmeleri, elektrikli araç dağıtımın etkisi ve fırsatları incelenmektedir. |
| (Zgheib vd., 2016)    | Elektrikli Araçlar için iki yönlü bir batarya şarj cihazının tasarımı Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. İki yönlü batarya şarj cihazı tasarımı yapılırken, Üç fazlı gerilim kaynaklı doğrultucu (AA/DA) ve çift aktif köprü kırıyıcı (DA/DA) topolojileri kullanılmıştır.               |
| (Tarlak & İşen, 2018) | Elektrikli araç türleri, batarya şarj topolojileri ve elektrikli araçlarda kullanılan altı farklı güç elektronigi dönüştürücüsü ile alakalı detaylı literatür taraması gerçekleştirilmiştir.                                                                                                          |

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Mozafar vd., 2018)      | V2G için enerji alışverişi profili, araçların işyerlerinde park halinde oldukları sürelerde enerjiyi boşaltmak için sabit güç yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bataryayı yeniden şarj etmek için gerçek talebi hesaplamak amacıyla, farklı özelliklere ve kilometreye sahip dört araç dikkate alınmıştır. |
| (Jandásek vd., 2023)     | Akıllı şebeke teknolojilerini ve elektrikteki mobilite uygulamaları incelenilmektedir. Ardından BMW şirketi tarafından tanıtılan araçtan her şeye V2X'in uygulaması, avantajı/dezavantajı tanıtılmaktadır.                                                                                                    |
| (Trivedi & Sant, 2022)   | G2V ve V2G işlemi için Si,SiC ve GaN mosfetlerini kullanan çift aktif köprü (DAB) doğrultucunun farklı anahtarlama frekanslarındaki iletim kayıpları karşılaştırılmıştır.                                                                                                                                     |
| (Singirikonda vd., 2022) | Adaptif kontrol tabanlı izole çift yönlü dönüştürücü tasarımı yapılarak elektrikli araç bataryasının referans değerine göre şarj ve deşarj üzerine kontrol sistemi sunulmuştur. Şebekeye yenilenebilir enerji güç paylaşımı için PV sistem bağlanılmıştır                                                     |
| (Adhikary vd., 2023)     | Çift yönlü dönüştürücünün IoT tabanlı izleme sistemi ile akıllı şarj sağlanması için Matlab/Simulink'te modellenmesi yapılmıştır.Simülasyon sonuçlarında, bataryanın SoC, gerilim, akım, güç ve enerji değerleri şebekenin ise aktif güç, reaktif güç, gerilim ve akım değerleri sunulmuştur.                 |
| (Ahmadi vd., 2023)       | Teknolojik ve çevresel faktörleri göz önünde bulundurarak araçtan şebekeye (V2G) ve şebekeden araca(G2V) teknolojilerini değerlendirmek ve dağıtmak için esnek, çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı önerilmektedir. Bu kapsamda                                                                             |

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    | maliyet,CO2 emisyonu ve şebeke kararlılığı üzerine değerlendirilmeler tartışılmıştır.                                                                                                                                                                                                                                              |
| (Munusamy & Vairavasundaram, 2024) | Araçtan şebekeye (V2G) şarj teknolojisine odaklanarak güç şebekesindeki elektrikli araçların güç akışı ve gerilim düzenlenmesini optimize etmek için AA-DA ve DA-DA dönüştürücülerin topolojileri incelenmiştir. Ayrıca çalışmada blok zinciri yönteminde enerji ticareti ve siber güvenlik konularına, kullanımına değinilmiştir. |
| (Kuzu vd., 2024)                   | V2G teknolojisinin gözlemlenmesi için Newton Raphson temelli model sunulmuştur. Bu kapsamda, elektrikli araçların deşarj/şarj durumları simüle edilerek, V2G teknolojisinin analizi gerçekleştirilmiştir.                                                                                                                          |
| (Ordono vd., 2024)                 | Elektrikli araçların bataryalarındaki şarj ihtiyacı ve şarj durumu (SoC)'una bakılmaksızın gerilim kaynak davranışı ve şebeke desteği sağlayabilen V2G uygulaması için yeni şebeke oluşturma (GFM) denetleyicisi değerlendirilmiştir.                                                                                              |
| (Osman vd., 2024)                  | Ortak DA-bara gerilimini paylaşan iki güç dönüştürücü topolojisinin çift yönlü batarya şarj cihazı için optimize edilmiş denetleyici önerilmiştir.                                                                                                                                                                                 |
| (Singh vd., 2024)                  | DA mikro şebekelere dayalı elektrikli araç şarj istasyonları tasarımı yapılmıştır.V2G ve G2V teknolojisi için yapay sinir ağı tabanlı (AI-ANN) güç yönetimi denetleyicisi modellenmiştir.                                                                                                                                          |

|                     |                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Shaheen vd., 2024) | Elektrikli araçların park halindeyken şarj ve deşarj faaliyetlerini akıllıca yöneterek şebeke kararlılığı ve enerji talebi yönetimi problemlerini işlemek amacıyla yenilikçi V2G teknolojisinden faydalanılmıştır. |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



## KAYNAKÇA

- Adak, S., Cangi, H., Kaya, R., & Yılmaz, A. S. (2022). Effects of electric vehicles and charging stations on microgrid power quality. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 9(3), 276-286.
- Adhikary, S., Biswas, P. K., Sain, C., Thanikanti, S. B., & Nwulu, N. I. (2023). Bidirectional converter based on G2V and V2G operation with time of usage-based tariff analysis and monitoring of charging parameters using IoT. *Energy Reports*, 9, 5404-5419.
- Ağalar, Ş.(2012). İletim Hatlarına Ait Donanımlar. Ağalar, Ş. (Ed.). *Güç Sistemleri Analizi içinde (Ünite 4)*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- Ahmadi, S. E., Kazemi-Razi, S. M., Marzband, M., Ikpehai, A., & Abusorrah, A. (2023). Multi-objective stochastic techno-economic-environmental optimization of distribution networks with G2V and V2G systems. *Electric Power Systems Research*, 218, 109195.
- Ahmed, M. N., Hojabri, M., Humada, A. M., Daniyal, H. B., & Frayyeh, H. F. (2015). An overview on microgrid control strategies. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 4(5), 93-98.
- Akinyele, D., Belikov, J., & Levron, Y. (2017). Battery storage technologies for electrical applications: Impact in stand-alone photovoltaic systems. *Energies*, 10(11),1760. doi:10.3390/en10111760
- Albayati, W. K. A., & Avcı, S. (2023) DA Mikro Şebeke Sisteminin Tasarımı ve Yönetimi. *EMO Bilimsel Dergi*, 13(2), 29-37.
- Alkahtani, A. A., Alfalahi, S. T., Athamneh, A. A., Al-Shetwi, A. Q., Mansor, M. B., Hannan, M. A., & Agelidis, V. G. (2020). Power quality in microgrids including supraharmonics: Issues, standards, and mitigations. *IEEE access*, 8, 127104-127122
- Amal, E., Yılmaz, K., & Özdemir, E. (2022). Rüzgâr Enerji Santrallerinin Elektrik Şebekesine Etkilerinin İncelenmesi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 50-65. <https://doi.org/10.53410/koufbd.1096254>
- Armand, M., & Tarascon, J.-M. (2008). Building better batteries. *Nature*451(7179), 652-657.

- Balcı, E., Gündüz, G., Altundağ, S., & Altın, S. (2023). Elektrikli Araç Teknolojisinde Kullanılan Kurşun Asit ve Li-iyon Bataryaların Galvanostatik Test Sonuçlarının Karşılaştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 35(2), 691-697. doi:10.35234/fumbd.1306028
- Chang, W.-Y. (2013). The state of charge estimating methods for battery: A review. International Scholarly Research Notices, 2013(1).
- Chen, S. X., & Gooi, H. B. (2009, January). Scheduling of energy storage in a grid-connected PV/battery system via SIMPLORER. In TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference (pp. 1-5). IEEE.
- Chowdhury, S., Chowdhury, S. P., and Crossley, P. (2009). Microgrids and active distribution networks, IET Renewable Energy Series 6.
- Cluzel, C., & Douglas, C. (2012). Cost and performance of EV batteries. Final Report for The Committee on Climate Change.
- Dulău, L. I., & Bică, D. (2020). Effects of electric vehicles on power networks. Procedia Manufacturing, 46, 370-377.
- Dharmakeerthi, C. H., Mithulanathan, N., & Saha, T. K. (2011, November). Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid. In 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (pp. 1-8). IEEE
- Efe, S. B., & Cebeci, M. (2015). Mikro Şebekenin Farklı İşletme Koşulları Altında İncelenmesi, 6. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu (EVK2015), 4-6.
- Efe, Ş., & Güngör, Z. A. (2021). Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (32), 947-955.
- Energy Exporter. (2024). <https://energyexporter.com>.
- Faessler, B., Schuler, M., Preißinger, M., & Kepplinger, P. (2017). Battery storage systems as grid-balancing measure in low-voltage distribution grids with distributed generation. Energies, 10(12), 2161.
- Gemassmer, J., Daam, C., & Reibsch, R. (2021). Challenges in grid integration of electric vehicles in urban and rural areas. World Electric Vehicle Journal, 12(4), 206.
- Hannan, M., Lipu, M., 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, 835-854. doi:10.1016/j.rser.2017.05.001
- Hartono, B. S., Budiayanto, Y., & Setiabudy, R. (2013, June). Review of microgrid technology. In 2013 international conference on QiR (pp. 127-132). IEEE.
- Hasanien, H. M., Alsaleh, I., Tostado-Véliz, M., Alassaf, A., Alateeq, A., & Jurado, F. (2023). Optimal parameters estimation of lithium-ion battery in smart grid applications based on gazelle optimization algorithm. Energy, 285, 129509. doi:10.1016/j.energy.2023.129509
- Hossain, S., Rokonzaman, M., Rahman, K. S., Habib, A. A., Tan, W.-S., Mahmud, M., . . . Channumsin, S. (2023). Grid-vehicle-grid (G2V2G) efficient power transmission: an overview of concept, operations, benefits, concerns, and future challenges. Sustainability, 15(7).
- Jandásek, V., Šimela, A., Mücková, P., & Horák, B. (2022). Smart Grid and Electromobility. IFAC-PapersOnLine, 55(4), 164-169.
- 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.
- Khokhar, S., Zin, A. A. B. M., Mokhtar, A. S. B., & Pesaran, M. (2015). A comprehensive overview on signal processing and artificial intelligence techniques applications in classification of power quality disturbances. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 1650-1663.
- Kılıç, E. (2019). Da-da yükselten dönüştürücü ile elektrikli araç batarya şarj cihazı tasarımı. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(4), 281-287. doi:10.17780/ksujes.652998
- Kocaman, B. (2013). Akıllı şebekeler ve mikro şebekelerde enerji depolama teknolojileri. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1), 119-127.
- Kocaman, B. (2014). Mikro şebekeler için örnek bir enerji yönetimi uygulaması. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(1), 35-52.
- Kocaman, B. (2015). Yenilenebilir enerji kaynaklı mikro şebekelerde enerji yönetimi. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli 178s.

- Koohi-Kamali, S., Rahim, N., & Mokhlis, H. (2014). Smart power management algorithm in microgrid consisting of photovoltaic, diesel, and battery storage plants considering variations in sunlight, temperature, and load. *Energy Conversion and Management*, 84, 562-582.
- Kow, K. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., & Rajkumar, R. K. (2015). Power quality analysis for PV grid connected system using PSCAD/EMTDC. *International Journal of Renewable Energy Research*, 5(1), 121-132.
- Kumar, P., Channi, H., Kumar, R., Rajiv, A., Kumari, B., Singh, G., & Singh, S. (2024). A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future. *Energy Conversion and Management*:X, 100864.
- Kuşdoğan, Ş. (tarih yok). Akıllı Şebekelerde Dağıtılmış Enerji Depolama Olarak Fişli Elektrikli Araçlar. Elektrik Mühendisleri Odası(EMO).
- Kuzu, B., Akdağ, O., Nurmhammed, M., & Karadağ, T. (2024). V2G Uygulamalarında Elektrikli Araçların Dağıtım Şebekesine Optimum Entegrasyonunun Analizi İçin Newton Raphson Temelli Yeni Bir Model. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 15(2), 375-385.
- Liang, Y., Zhao, C.-Z., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J.-Q., & Yu, D. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6-32. doi:10.1002/inf2.12000
- Lopes, J. A. P., Soares, F. J., & Almeida, P. M. R. (2010). Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE*, 99(1), 168-183.
- Mancini, E., Longo, M., Yaici, W., & Zaninelli, D. (2020). Assessment of the impact of electric vehicles on the design and effectiveness of electric distribution grid with distributed generation. *Applied Sciences*, 10(15), 5125.
- Mikro Şebeke Nedir? (2022). <https://www.enerjietutraporu.com/mikro-sebeke-nedir.html>.
- Monteiro, V., Gonçalves, H., & Afonso, J. L. (2011, October). Impact of Electric Vehicles on power quality in a Smart Grid context. In 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (pp. 1-6). IEEE.

- Mozafar, M. R., Amini, M. H., & Moradi, M. H. (2018). Innovative appraisalment of smart grid operation considering large-scale integration of electric vehicles enabling V2G and G2V systems. *Electric Power Systems Research*, 154, 245-256.
- Muhtadi, A., Pandit, D., Nguyen, N., & Mitra, J. (2021). Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(3), 2223-2235.
- Munusamy, N., & Vairavasundaram, I. (2024). AI and Machine Learning in V2G technology: A review of bi-directional converters, charging systems, and control strategies for smart grid integration. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 100856.
- Nour, M., Ali, A., & Farkas, C. (2018). Evaluation of electric vehicles charging impacts on a real low voltage grid. *Int. J. Power Eng. Energy*, 9(2), 837-842.
- Nour, M., Chaves-Ávila, J. P., Magdy, G., & Sánchez-Miralles, Á. (2020). Review of positive and negative impacts of electric vehicles charging on electric power systems. *Energies*, 13(18), 4675.
- Nurmuhammed, M., & Karadağ, T. (2021). Elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılması ve enerji şebekesi üzerine etkisi konulu derleme çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 218-233.
- Nutkani, I. U., & Lee, J. C. (2022, May). Evaluation of electric vehicles (EVs) impact on electric grid. In *2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022-ECCE Asia)* (pp. 239-246). IEEE.
- Olçay, K., & Çetinkaya, N. (2023a). Investigation of the effects of electric vehicle charging stations and solar energy integration on grid performance. *Journal of Scientific Reports-A*, (055), 206-219.
- Olçay, K., & Çetinkaya, N. (2023b). Analysis of the electric vehicle charging stations effects on the electricity network with artificial neural network. *Energies*, 16(3), 1282.
- Omar, N., Bossche, P., Mulder, G., Daowd, M., Timmermans, J., 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. In 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-7.
- Ordone, A., Asensio, F. J., Cortajarena, J. A., Zamora, I., González-Pérez, M., & Saldaña, G. (2024). A grid forming controller with integrated state of charge management for V2G chargers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, 109862.
- Osman, F. A., Eltokhy, M., Hashem, A. Y., & Hashem, M. (2024). Grid-connected bidirectional electrical vehicle charger controller parameters optimization using a new hybrid meta-heuristic algorithm. *Journal of Energy Storage*, 95, 112307.
- Ottenburger, S., Cox, R., Chowdhury, B., Trybushnyi, D., Omar, E., & Kaloti, S. (2024). Sustainable urban transformations based on integrated microgrid designs. *Nature Sustainability*, 1067-1079.
- Özan, A. (2020). Batarya enerji depolama sistemlerinin elektrik dağıtım sistemine etkisi ve sezgisel algoritmalar ile faz dengesizliğinin giderilmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 85s.
- Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan PİL Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298.
- Özdemir, E., Aktaş, A., Erhan, K., & Özdemir, Ş. (2017). Akıllı şebekelerde enerji depolama uygulamalarının önündeki fırsatlar ve karşılaşılan zorluklar. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2).499-506. doi:10.17341/gazimmfd.322175
- Parker, C. D. (2001). Lead–acid battery energy-storage systems for electricity supply networks. *Journal of Power Sources*, 100(1-2), 18-28.
- Poursistani, M. R., Abedi, M., Hajilu, N., & Gharehpetian, G. B. (2014, November). Impacts of plug-in electric vehicles smart charging on distribution networks. In 2014 International Congress on Technology, Communication and Knowledge (ICTCK) (pp. 1-6). IEEE.
- Quílez, M. G., Abdel-Monem, M., Baghdadi, M. E., Yang, Y., Mierlo, J. V., & Hegazy, O. (2018). Modelling, analysis and performance evaluation

- of power conversion unit in g2v/v2g application—A review. *Energies*, 11(5).
- Revathi, R., Senthilnathan, N., & Kumar Chinnaiyan, V. (2024). Hybrid optimization approach for power scheduling with PV-battery system in smart grids. *Energy*, 290, 130051.
- Sarkar, R., Saha, P., Mondal, S., & Mondal, A. (2020). Intelligent scheduling of V2G, V2V, G2V operations in a smart microgrid. In *Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Future Energy Systems*, 417-418.
- S, R., & R, J. (2024). Review on electric mobility: trends, challenges and opportunities. *Results in Engineering* 23, 102631.
- Shah, J., Wollenberg, B., & Mohan, N. (2011). Decentralized Power flow control for a smart micro-grid. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-6.
- Shaheen, H. I., Rashed, G., Yang, B., & Yang, J. (2024). Optimal electric vehicle charging and discharging scheduling using metaheuristic algorithms: V2G approach for cost reduction and grid support. *Journal of Energy Storage*, 90, 111816.
- Singh, A. P., Kumar, Y., Sawle, Y., Alotaibi, M., Malik, H., & Márquez, F. (2024). Development of artificial Intelligence-Based adaptive vehicle to grid and grid to vehicle controller for electric vehicle charging station. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(10), 102937.
- Singh, M., Kar, I., & Kumar, P. (2010, September). Influence of EV on grid power quality and optimizing the charging schedule to mitigate voltage imbalance and reduce power loss. In *Proceedings of 14th international power electronics and motion control conference EPE-PEMC 2010* (pp. T2-196). IEEE.
- Singirikonda, S., Obulesu, Y. P., Kannan, R., Reddy, K. J., Kumar, G. K., Alhakami, W., . . . Alhakami, H. (2022). Adaptive control-based Isolated bi-directional converter for G2V& V2G charging with integration of the renewable energy source. *Energy Reports*, 8, 11416-11428.
- Sortomme, E., & El-Sharkawi, M. A. (2010). Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1), 131-138.

- Tanaka, I., Yuge, H., & Ohmori, H. (2017). Formulation and evaluation of long-term allocation problem for renewable distributed generations. *IET Renewable Power Generation*, 11(12), 1584-1596.
- Tarлак, H., & İşen, E. (2018). Elektrikli araçlar ve akü şarj sistemleri. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 124-141.
- 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.
- Trivedi, S. S., & Sant, A. V. (2022). Comparative analysis of dual active bridge dc–dc converter employing Si, SiC and GaN MOSFETs for G2V and V2G operation. *Energy Reports*, 8, 1011-1019.
- Verim, İ., Acarkan, B., Yağcıtekin, B., & Uzunoğlu, M. (2013). Elektrikli Araçların Dağıtılmış Enerji Üretim/Depolama Sistemi Olarak Değerlendirilmesi. *EVK'2013*, 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu.
- Viawan, F. A., Karlsson, D., Sannino, A., & Daalder, J. (2006, March). Protection scheme for meshed distribution systems with high penetration of distributed generation. In *2006 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources* (pp. 99-104). IEEE.
- Weckesser, T., Dominković, D. F., Blomgren, E. M., Schledorn, A., & Madsen, H. (2021). Renewable Energy Communities: Optimal sizing and distribution grid impact of photo-voltaics and battery storage. *Applied Energy*, 301, 117408.
- Winter, M., & Brodd, R. (2004). What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? 4245-4270.
- Yaşkı, M. (2022). Akıllı Şebekeler İçin Ultrakapasitör Entegreli Batarya Yönetim Sistemi. Yüksek Lisans Tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya 99s.
- Yilmaz, M., & Krein, P. (2012). Review of charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles and commentary on unidirectional charging. In *IEEE international electrical vehicle conference*.



- Yoldaş, Y., Önen, A., Muyeen, S. M., Vasilakos, A. V., & Alan, I. (2017). Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 205-214.
- 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.
- Yunusov, T., Frame, D., Holderbaum, W., & Potter, B. (2016). The impact of location and type on the performance of low-voltage network connected battery energy storage systems. *Applied Energy*, 165, 202-213.
- Zgheib, R., Al-Haddad, K., & Kamwa, I. (2016). V2G, G2V and active filter operation of a bidirectional battery charger for electric vehicles. In 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1260-1265.
- Zhu, R., Huang, R., Lv, X., Zhang, S., Lin, Y., Xie, J., . . . Li, M. (2025). A systematical review on preparation, microstructure, cyclic parameters, and anchoring NaPSs of cathodes containing electrocatalysts for room-temperature sodium-sulfur batteries. *Applied Energy*.

## BÖLÜM 3

### ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA REZERVUAR HESAPLAMA İLE HATA TESPİTİ

Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN<sup>1</sup>, Doç. Dr. Kenan ALTUN<sup>2</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214589>

---

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas, Türkiye. [didemaltun@cumhuriyet.edu.tr](mailto:didemaltun@cumhuriyet.edu.tr), ORCID: 0000-0002-1964-3538.

<sup>2</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Sivas, Türkiye. [kaltun@cumhuriyet.edu.tr](mailto:kaltun@cumhuriyet.edu.tr), ORCID: 0000-0001-7419-1901.



## 1. Giriş

Elektrikli araçlar (EV'ler), çevre dostu bir ulaşım çözümü olarak fosil yakıt kullanımını azaltırken, karmaşık sistemleriyle modern teknolojinin bir yansımasıdır. Batarya paketleri, elektrik motorları ve güç elektroniği gibi bileşenler, bu araçların temelini oluşturur. Ancak, her biri çevresel koşullar, mekanik zorlamalar veya termal değişimler nedeniyle arızalanma riski taşır. Bu durum, sürücü güvenliğini tehlikeye atabileceği gibi araç performansını da olumsuz etkileyebilir. EV'lerin giderek yaygınlaşması, bu sistemlerdeki hataları hızlı ve kesin bir şekilde belirleme gerekliliğini ortaya koymaktadır. Geleneksel yaklaşımlar, sabit veri analizine dayalıdır ve EV'lerin sürekli değişen dinamiklerine uyum sağlamakta zorlanır. Bu noktada, rezervuar hesaplama (Reservoir Computing - RC), zaman serisi verilerini işleme kapasitesi ve düşük kaynak ihtiyacıyla dikkat çekmektedir. Bu çalışma EV'lerde hata tespitinin önemini vurgulamayı, RC'nin temel yapısını açıklamayı ve bu teknolojinin sunduğu potansiyeli araştırmayı amaçlar.

EV'ler, karbon salımını düşürerek ve enerji kullanımını optimize ederek otomotiv sektöründe köklü bir dönüşüm başlatmıştır. Hükümetlerin çevre politikalarını sıkılaştırmasıyla birlikte, bu araçların küresel çaptaki varlığı 2020'den itibaren hızla yükselmiş ve 2023'te 20 milyonu aşan bir stokla dikkat çekmiştir (Liu, 2023). Bu büyüme, araçların uzun ömürlü ve güvenilir olmasını zorunlu kılarken, bataryalarda termal kaçak, motorlarda rulman yıpranması veya invertörlerde bozulmalar gibi sorunlar, ciddi riskler oluşturur. Bu tür aksaklıkların erken fark edilmesi, güvenliği artırır ve ekonomik kayıpları önler. Ancak, klasik hata tespit sistemleri, genellikle eşik değerlerine bağlıdır ve değişken sürüş şartlarında etkisiz kalabilir. EV'lerin ürettiği yoğun gerçek zamanlı veri, daha gelişmiş analiz araçlarını gerekli hale getirir. Bu bağlamda, derin öğrenme gibi yöntemler yüksek doğruluk sunsada uzun eğitim süreleri ve fazla hesaplama ihtiyacı nedeniyle pratiklikten uzaklaşır.

RC, tekrarlayan sinir ağlarının özel bir türü olarak, dinamik sistemleri modellemede üstün bir yetkinlik sunar. Herbert Jaeger tarafından Echo State Network (ESN) olarak tanıtıldığında, zaman serisi analizinde çığır açan bir yaklaşım ortaya koymuştur (Jaeger, 2001). RC mimarisi, giriş katmanı, sabit ağırlıklı rezervuar ve eğitilebilir çıkış katmanından oluşur. Rezervuar, verileri yüksek boyutlu bir uzaya dönüştürerek geçmiş ve mevcut dinamikleri yakalar. Bu durum sistemin kısa vadeli hafızasını güçlendirir ve gerçek zamanlı

uygulamalar için ideal bir zemin hazırlar. Eğitim sürecinin yalnızca çıkış katmanıyla sınırlı olması, hesaplama yükünü hafifletir ve enerji verimliliğini artırır. EV’lerdeki batarya voltajı veya motor titreşimi gibi sürekli değişen veriler, RC ile etkin bir şekilde işlenebilir ve geleneksel modellere kıyasla daha az kaynakla sonuç alma avantajı sağlar.

Bu teknolojinin sunduğu fırsatlar, sıvı durum makineleri gibi varyasyonlarla da genişler. Bu modeller, fiziksel dinamikleri rezervuar olarak kullanarak biyolojik sistemlerden esinlenir (Maass vd., 2002). Çalışmanın hedefi, RC’nin EV hata tespitindeki rolünü kapsamlı bir şekilde incelemektir. Hata türleri ve mevcut zorluklar tanımlanacak, RC’nin bu problemlere nasıl çözüm sunduğu analiz edilecek ve pratik uygulamalar ortaya konulacaktır.

## **2. Elektrikli Araçlarda Hata Türleri ve Tespit Zorlukları**

EV’ler geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha az hareketli parça içerse de karmaşık elektrik ve elektronik sistemleri nedeniyle benzersiz arıza riskleriyle karşı karşıyadır. Bu araçların temel bileşenleri batarya sistemleri, elektrik motorları ve güç elektroniği sürekli değişen çalışma koşullarında güvenilirliklerini korumak zorundadır. Hataların zamanında ve doğru bir şekilde tespit edilmesi, yalnızca araç performansını optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda sürücü güvenliğini ve sistem ömrünü de artırır. Ancak, bu süreç hem hata türlerinin çeşitliliği hem de tespit yöntemlerinin karşılaştığı teknik engeller nedeniyle önemli zorluklar barındırır. Elektrikli araçların işleyişi, birbirine bağlı alt sistemlerin uyumlu çalışmasına dayanır ve bu sistemlerin her biri kendine özgü arıza mekanizmalarına sahiptir. Batarya sistemleri, elektrik motorları ve güç elektroniği mekanizmaları önde gelen sistemlerdir.

Elektrikli araçların en önemli ünitelerinden Lityum-iyon bataryalar, elektrikli araçların enerji depolama ve dağıtımında temel bir rol oynar. Ancak, bu bataryalar hem kimyasal hem de fiziksel stres faktörlerinden dolayı arızalara eğilimlidir. Termal kaçak (thermal runaway), batarya hücrelerinde aşırı ısınma sonucu zincirleme reaksiyonların başlamasıdır ve yangın veya patlama gibi ciddi sonuçlara yol açabilir. Bir çalışmada, termal kaçığın genellikle hücre içi kısa devrelerden veya aşırı şarj durumlarından kaynaklandığı belirtilmiştir (Feng vd., 2018). Ayrıca, bataryaların kapasite kaybı, zamanla şarj tutma yeteneklerinin azalmasıyla kendini gösterir. Bu durum, aracın menzilini

doğrudan etkiler (Han vd., 2019). Batarya yönetim sistemleri (BMS), bu tür arızaları izlemek için tasarlanmış olsa da hücreler arasındaki dengesizlikler veya sensör hataları, tespiti karmaşık hale getirebilir. Bir hücredeki küçük bir kapasite sapması, tüm paketin performansını etkileyebilir (Zhang vd., 2020). Bu tür arızalar, bataryaların karmaşık iç yapısı nedeniyle erken evrelerde fark edilmesi zor olan gizli tehlikeler barındırır.

Diğer taraftan elektrik motorları, EV'lerin tahrik sisteminin kalbini oluşturur ve genellikle sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) veya asenkron motorlar şeklinde tasarlanır. Bu motorlarda en yaygın arızalar arasında stator sargı kısa devreleri ve rulman hataları yer alır. Stator sargılarındaki yalıtım bozulmaları, aşırı akım veya termal stres nedeniyle oluşabilir ve motor verimliliğini ciddi şekilde düşürür (Shahi vd., 2022). Rulman arızaları ise mekanik aşınma veya yağlama eksikliğinden kaynaklanır ve titreşim ile gürültü artışı gibi belirtilerle kendini gösterir (Nandi vd., 2005). Motor arızalarının tespiti, genellikle titreşim analizi veya akım sinyali izleme ile yapılır. Ancak, bu yöntemler, arızanın türüne ve şiddetine bağlı olarak tutarsız sonuçlar verebilir. Erken aşamada bir rulman çatlağı, yalnızca belirli hız aralıklarında belirgin hale gelebilir (Gangsar ve Tiwari, 2020). Bu durum, motorların dinamik çalışma koşullarındaki hata tespitini zorlaştıran bir faktördür.

Aracın tüm kontrol ünitelerinin kontrol edilmesini sağlayan güç elektroniği, bataryadan motora enerji akışını kontrol eden invertörler ve dönüştürücüler gibi bileşenleri içerir. Bu sistemlerdeki en yaygın arızalar, yarı iletken anahtarların (IGBT'ler) bozulması ve kapasitörlerin yaşlanmasıdır. Invertör anahtar arızaları, genellikle termal döngü veya elektriksel aşırı yüklenme nedeniyle meydana gelir ve motor kontrolünde ani kesintilere yol açabilir (Lu ve Sharma, 2009). Kapasitör bozulmaları ise, zamanla dielektrik malzemenin degradasyonu ile ortaya çıkar ve sistemin dalgalanma gerilimini artırır (Wang ve Blaabjerg, 2014). Güç elektroniği arızaları, genellikle hızlı bir şekilde sistemin tamamen durmasına neden olmasa da performans düşüşü ve enerji kayıpları gibi dolaylı etkiler yaratır. Bu tür arızaların tespiti, yüksek frekanslı sinyal analizine dayansa da karmaşık devre yapıları ve harici gürültü, doğru sonuçlar elde etmeyi güçleştirir (Martin vd., 2024).

Diğer taraftan elektrikli araçlarda hata tespiti hem sistemlerin doğasından hem de çevresel faktörlerden kaynaklanan bir dizi zorlukla karşı

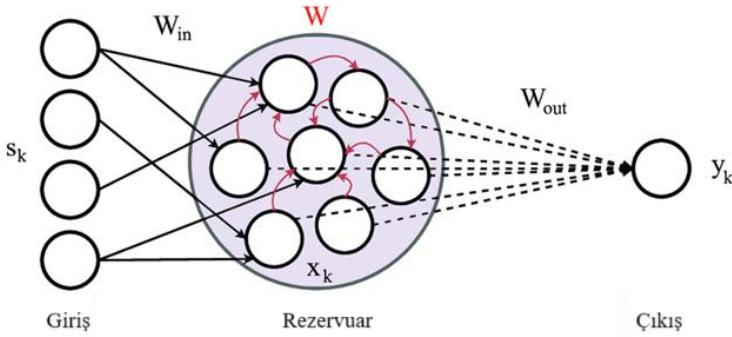
karşıyadır. Bu zorluklar, mevcut teknolojilerin sınırlarını ortaya koyarken, daha gelişmiş yöntemlere duyulan ihtiyacı da vurgular. EV'ler, sürüş sırasında sürekli olarak büyük miktarda veri üretir. Bu veriler, voltaj, akım, sıcaklık ve titreşim gibi parametreleri içerir. Hataların ciddi sonuçlara yol açmadan önce tespit edilmesi için bu verilerin gerçek zamanlı olarak analiz edilmesi gerekir. Ancak, geleneksel yöntemler, genellikle çevrimdışı analizlere dayanır ve bu da tepki süresini uzatır (Khan vd., 2024). Batarya termal kaçacağı gibi hızlı gelişen bir olay, saniyeler içinde kritik bir seviyeye ulaşabilir ve bu durumda gecikmeler kabul edilemezdir. Gerçek zamanlı analiz, yüksek hesaplama gücü gerektirir ve bu araç içi gömülü sistemlerin sınırlı kaynaklarıyla yetersiz kalabilir. Derin öğrenme gibi gelişmiş algoritmalar, yüksek doğruluk sunabilir, ancak enerji tüketimi ve işlem süresi açısından pratik değildir (Dai vd., 2024). Bu nedenle, düşük kaynak kullanımıyla hızlı sonuçlar üreten yöntemler, EV'ler için kritik bir ihtiyaçtır.

EV sensörlerinden toplanan veriler, yol koşulları, elektromanyetik parazitler ve sensör kalibrasyon hataları nedeniyle sıklıkla gürültü içerir. Titreşim sensörlerinden gelen sinyaller, aracın hızına veya yol yüzeyine bağlı olarak bozulabilir (Hamelin ve Sauter, 2000). Ayrıca, sensör arızaları veya iletişim kesintileri, veri setlerinde eksikliklere yol açabilir. Bu tür kusurlu veriler, hata tespit algoritmalarının doğruluğunu ciddi şekilde etkileyebilir. Gürültü ve eksik verilerle başa çıkmak için robust filtreleme teknikleri gereklidir. Ancak bu teknikler genellikle ek hesaplama yükü getirir. Özellikle dinamik sistemlerde, gürültünün arıza sinyallerinden ayrılması, yanlış pozitif veya negatif sonuçlara yol açabilen bir sorundur (Ding, 2008).

Elektrikli araçlar, farklı hızlar, yükler ve çevre koşullarında çalışır. Bu değişkenlik, hata sinyallerinin tutarlı bir şekilde tanımlanmasını zorlaştırır. Bir motor arızası, düşük hızda fark edilemezken, yüksek hızda belirgin hale gelebilir (Gong vd., 2023). Benzer şekilde, batarya performansı, sıcaklık değişimlerinden doğrudan etkilenir ve bu da hata tespit modellerinin genelleme yeteneğini zorlar (Hu vd., 2015). Değişken koşullara uyum sağlayabilen adaptif algoritmalar, bu zorluğu aşmada önemli bir rol oynasa da mevcut sistemlerin çoğu statik eşik değerlerine dayanır. Bu durum, EV'lerin dinamik doğasına uygun, esnek ve öğrenme tabanlı çözümlere olan ihtiyacı artırır.

### 3. Rezervuar Hesaplama: Teorik Temeller

Rezervuar hesaplama, dinamik sistemlerin modellenmesi ve zaman serisi verilerinin analizinde kullanılan yenilikçi bir yapay sinir ağı paradigmasıdır. Elektrikli araçlar gibi karmaşık ve sürekli değişen sistemlerde hata tespiti için uygun bir araç olarak öne çıkan RC, hesaplama verimliliği ve uyarlanabilirliği ile dikkat çeker. . Şekil 1’de görüldüğü gibi, girişten rezervuara ( $W_{in}$ ) ve rezervuar iç bağlantılarına ( $W$ ) ait ağırlıklar eğitim sürecinde sabit kalır. Eğitim yalnızca çıkış katmanına ait  $W_{out}$  matrisi üzerinde gerçekleştirilir. Bu özellik, RC’yi geleneksel RNN’lerden ayıran en temel noktadır.



Şekil 1. Rezervuar Hesaplama Mimarisi

Rezervuar hesaplama, Şekil 1’de gösterilen üç temel bileşenden oluşan bir mimariye dayanır: giriş katmanı, rezervuar ve çıkış katmanı. Giriş katmanı, dış dünyadan gelen ham verileri (elektrikli aracın batarya voltajı veya motor titreşim sinyalleri) sisteme aktarır. Rezervuar, bu verileri yüksek boyutlu bir dinamik uzaya dönüştüren sabit ağırlıklı bir sinir ağıdır. Çıkış katmanı ise, rezervuardan gelen bu zengin bilgiyi işleyerek nihai çıktıları bir hata durumunun varlığı ya da yokluğu bilgisini üretir. RC’nin en dikkat çekici özelliği, rezervuarın ağırlıklarının rastgele atanması ve eğitim sırasında değiştirilmemesidir; yalnızca çıkış katmanı, genellikle basit bir lineer regresyon yöntemiyle optimize edilir (Lukoševičius ve Jaeger, 2009).

Matematiksel olarak, RC’nin işleyişi şu şekilde ifade edilir: . Giriş sinyali  $u(t)$ , rezervuarın durum vektörünü  $x(t)$  güncellemek için kullanılır. Rezervuarın dinamikleri Denklem (1) ile, çıkış ise Denklem (2) ile tanımlanır. Bu iki ifade birlikte düşünüldüğünde, sistemin girişten çıktıya olan genel işleyişi netleşir. Rezervuarın dinamikleri, aşağıdaki denklemle tanımlanır.



$$x(t + 1) = f(W_{res} \cdot x(t) + W_{in}u(t + 1) + b) \quad (1)$$

Burada,  $W_{res}$  rezervuarın iç bağlantı matrisi,  $W_{in}$  girişten rezervuara ağırlık matrisi,  $b$  sapma vektörü ve  $f$  genellikle bir *tanh* veya *sigmoid* gibi doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonudur (Jaeger, 2001). Çıkış  $y(t)$  ise şu şekilde hesaplanır.

$$y(t) = W_{out} \cdot (t) \quad (2)$$

$W_{out}$ , rezervuar durumlarından çıkışa olan eğitilebilir ağırlık matrisidir. Bu yapı, rezervuarın giriş sinyallerini “yankı” etkisiyle zengin bir duruma dönüştürmesini sağlar. Bu sistemin kısa vadeli hafızasını korumasını ve zamanla değişen desenleri yakalamasını mümkün kılar (Verstraeten vd., 2007). RC’nin bu tasarımı, karmaşık sistemlerin dinamiklerini modellemek için güçlü bir araç sunar. Bir elektrikli aracın batarya sisteminden gelen sıcaklık verilerindeki ani değişimler, rezervuarın yüksek boyutlu uzayında ayırt edici bir iz bırakır ve potansiyel bir arızanın erken tespitine olanak tanır (Tanaka vd., 2019). Teorik olarak, rezervuarın kaotik dinamikleri, giriş verilerinin geçmişini doğal bir şekilde kodlar ve bu da RC’yi zaman serisi tahmini için ideal hale getirir.

Rezervuar hesaplamasının en yaygın biçimi, Echo State Network (ESN) olarak bilinir. ESN, Herbert Jaeger tarafından 2001’de tanıtılmış ve RC’nin temel taşlarından biri haline gelmiştir. ESN’nin temel özelliği, “echo state property” (yankı durumu özelliği) olarak adlandırılan bir durumdur. Bu rezervuarın başlangıç koşullarının etkisinin zamanla kaybolmasını ve durumunun yalnızca giriş geçmişine bağlı hale gelmesini ifade eder (Jaeger ve Haas, 2004). Bu özellik, rezervuarın spektral yarıçapının (spectral radius) 1’den küçük olacak şekilde ayarlanmasıyla sağlanır. Spektral yarıçap,  $W_{res}$  matrisinin en büyük özdeğerinin mutlak değeridir ve sistemin stabilitesini belirler (Lukoševičius, 2012). ESN, özellikle zaman serisi tahmini ve sınıflandırma görevlerinde başarılıdır. ESN’nin elektrik motorlarının akım sinyallerini analiz ederek arıza türlerini sınıflandırmada yüksek doğruluk sağladığı gösterilmiştir (Pathak vd., 2018). Bununla birlikte, ESN’nin başarısı, rezervuarın hiperparametrelerinin bağlantı yoğunluğu, boyut ve giriş ölçeklendirme faktörü dikkatli bir şekilde ayarlanmasına bağlıdır (Schrauwen vd., 2007).

RC'nin bir diğer önemli türü, sıvı durum makineleri (Liquid State Machines - LSM) olarak adlandırılır. LSM, Wolfgang Maass ve meslektaşları tarafından geliştirilmiş olup, biyolojik sinir sistemlerinden ilham alır (Maass vd., 2002). ESN'den farklı olarak, LSM, spiking nöronlar kullanarak fiziksel bir rezervuar oluşturur ve özellikle donanım tabanlı uygulamalarda avantaj sağlar. LSM'nin dinamikleri, sürekli zamanlı diferansiyel denklemlerle modellenir. Bu onu analog sistemlerin analizine uygun hale getirir (Natschläger vd., 2002). Elektrikli araçlarda, LSM'nin sensör verilerindeki ani dalgalanmaları yakalamada potansiyel bir rolü olabilir. Ayrıca, fiziksel rezervuar hesaplama (Physical Reservoir Computing) gibi yeni yaklaşımlar da ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, optik sistemler veya mekanik osilatörler gibi fiziksel ortamları rezervuar olarak kullanır ve enerji verimliliği açısından dikkat çeker (Nakajima, 2020). Bu tür yenilikler, RC'nin teorik çerçevesini genişletirken, pratik uygulamalara da yeni kapılar açar.

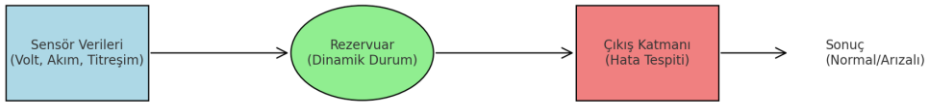
Rezervuar hesaplama, teorik yapısı gereği bir dizi avantaja sahiptir ve bu özellikler, onu elektrikli araçlarda hata tespiti gibi uygulamalar için cazip hale getirir. RC'nin en büyük avantajı, düşük eğitim maliyetidir. Geleneksel RNN'lerde, tüm ağın geri yayılım (backpropagation) ile eğitilmesi gerekirken, RC'de yalnızca çıkış katmanı optimize edilir. Bu, hesaplama süresini ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır (Gallicchio ve Micheli, 2017). Elektrikli araçlar gibi kaynak kısıtlı sistemlerde, bu özellik, gerçek zamanlı analiz için kritik bir üstünlük sağlar. Bir diğer önemli avantaj, RC'nin zaman serisi verilerine doğal uyumudur. Rezervuarın iç dinamikleri, giriş sinyallerinin temporal bağımlılıklarını yakalar. Dinamik sistemlerin modellenmesinde yüksek performans sağlar (Wyffels ve Schrauwen, 2010). EV'nin batarya sıcaklık değişimlerini izlerken, RC ani artışları ve uzun vadeli eğilimleri aynı anda analiz edebilir. RC ayrıca, gürültülü verilerle başa çıkmada robust bir yapı sunar. Rezervuarın yüksek boyutlu uzayı, gürültüyü filtreleme kapasitesine sahiptir. EV sensörlerinden gelen kusurlu verilerle çalışırken büyük bir avantajdır (Rodan ve Tiño, 2010). Bu özellik, hata tespit algoritmalarının yanlış pozitif sonuçlarını azaltabilir.

RC'nin sınırlamaları ise, çoğunlukla rezervuar tasarımının optimizasyonuna bağlıdır. Rastgele oluşturulan rezervuar ağırlıkları, sistemin performansını doğrudan etkiler. Bu ağırlıkların optimal seçimi, genellikle deneme-yanılma yöntemine dayanır (Appeltant vd., 2011). Spektral yarıçap

veya bağlantı yoğunluğu gibi hiperparametrelerin yanlış ayarlanması, rezervuarın aşırı uyum (overfitting) veya yetersiz genelleme yapmasına yol açabilir (Jaeger, 2007). Bir diğer zorluk, RC'nin büyük ölçekli sistemlerdeki karmaşıklıklarla başa çıkma kapasitesidir. Elektrikli araçlarda birden fazla alt sistemin (batarya, motor, invertör) eşzamanlı analizi gerektiğinde, tek bir rezervuarın bu çeşitliliği modellemesi zor olabilir (Bianchi vd., 2020). Bu durum, çoklu rezervuar veya hibrit yaklaşımların geliştirilmesini gerektirebilir. Son olarak, RC'nin teorik temelleri, özellikle rezervuarın kaotik dinamiklerinin tam anlaşılması açısından hala gelişim aşamasındadır. Bu dinamiklerin matematiksel analizi, gelecekteki araştırmalar için açık bir alan olarak kalmaktadır (Yıldız vd., 2012).

#### 4. Elektrikli Araçlarda RC ile Hata Tespiti Uygulamaları

EV'ler batarya, motor ve güç elektroniği gibi karmaşık alt sistemlerden oluşan entegre bir yapıya sahiptir. Bu bileşenlerdeki arızaların erken tespiti, araç güvenilirliği ile performansı için kritik öneme sahiptir. Rezervuar hesaplama, zaman serisi verilerini analiz etme yeteneği ve düşük hesaplama maliyetiyle, EV'lerde hata tespitine yenilikçi bir yaklaşım sunar. RC'nin işleyişini netleştirmek için, Şekil 2'de gösterildiği gibi, sistem mimarisi sensör verilerinden rezervuara ve çıkış katmanına uzanan bir akışla şematik olarak sunulmuştur.

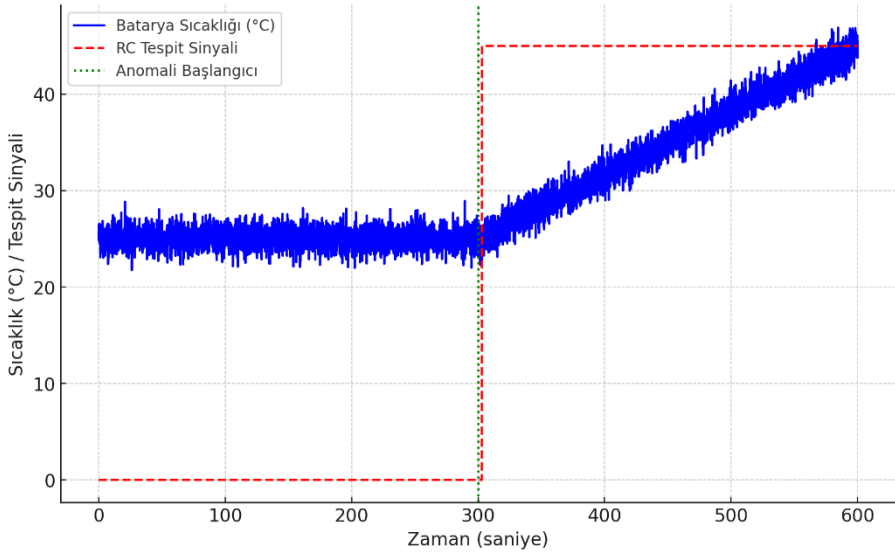


**Şekil 2.** RC ile EV Hata Tespit Sistemi Mimarisi

Bu sade tasarım, teknik detaylara girmeden genel çerçeveyi aktarır ve alt bölümlerdeki spesifik uygulamaların bu mimariye nasıl oturduğunu göstererek RC'nin yenilikçi yapısını güçlendirir (Lukoševičius, 2012).

Lityum-iyon bataryalar, EV'lerin enerji kaynağını oluşturur ve termal kaçak, kapasite kaybı veya iç kısa devre gibi arızalar sistem güvenilirliğini tehdit eder. RC, batarya sensörlerinden gelen voltaj, akım ve sıcaklık verilerini analiz ederek anormal durumları etkili bir şekilde tespit eder. Rezervuarın

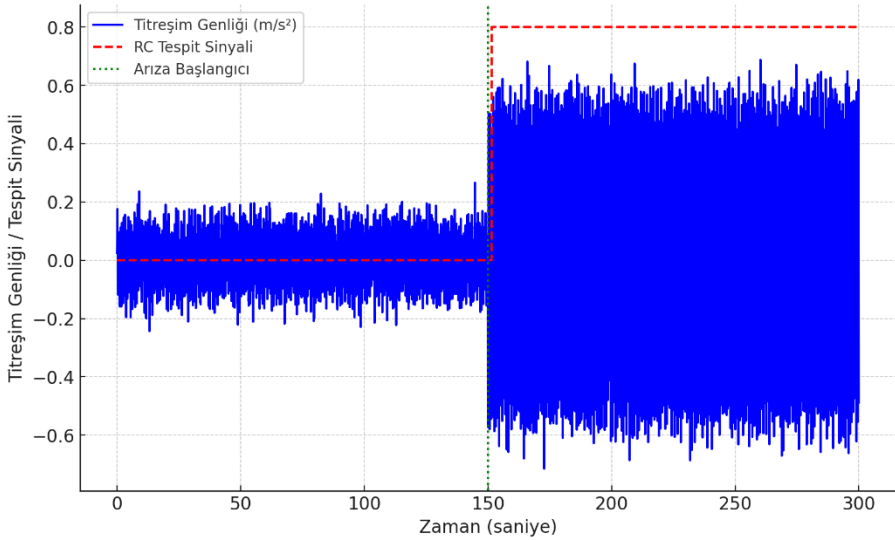
yüksek boyutlu dinamikleri, parametrelerdeki ince değişimleri yakalayarak erken uyarı sistemlerinin temelini oluşturur (Hu vd., 2015). Echo State Network (ESN) modeli, batarya sıcaklık verilerindeki ani yükselmeleri izler. Rezervuar, zaman serisindeki desenleri öğrenerek termal kaçağın öncüllerini ani voltaj düşüşü veya akım dalgalanması gibi hızla belirler. Batarya yönetim sistemlerinin kural tabanlı algoritmalarını tamamlar (Feng vd., 2018). Şekil 3’de gösterildiği gibi, 10 dakikalık bir simülasyonda sıcaklık 300. saniyede 25°C’den 45°C’ye yükseldiğinde, RC yalnızca 3 saniye içinde uyarı üreterek hızlı tepki süresinin termal tehlikeleri önlemede pratik bir değer sunduğunu kanıtlar. Bu robust performans, gürültülü verilerle bile etkinliğini korur (Gangsar ve Tiwari, 2020). Ayrıca, değişken sürüş koşullarına uyum sağlayarak sıcaklık ve yük değişimlerini tutarlı bir şekilde analiz eder, böylece uzun vadeli kapasite kaybını öngörmeye avantaj sağlar (Dai vd., 2024; Severson vd., 2019).



**Şekil 3.** Batarya Durum İzleme: Termal Kaçak Tespiti

Elektrik motorları, EV’lerin tahrik sisteminde kritik bir rol oynar ve stator sargı kısa devreleri veya rulman arızaları performans kayıplarına neden olabilir. RC, motorlardan gelen titreşim ve akım sinyallerini analiz ederek bu arızaları sınıflandırmada güçlü bir yöntem sunar. Rezervuarın dinamik yapısı, sinyallerdeki frekans ve genlik

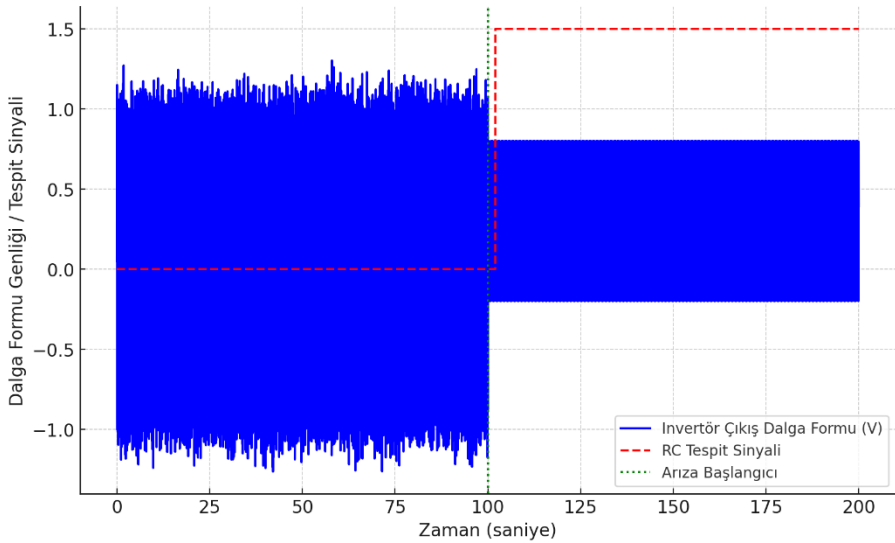
değişimlerini hassas bir şekilde modelleyebilir (Pathak vd., 2018). Bir uygulamada, ESN akım sinyallerindeki harmonik bozulmaları inceleyerek stator arızalarını belirlerken (Shahi vd., 2022), rulman arızaları için titreşim verilerinde gürültüyü filtreleyerek erken aşamada zayıf sinyalleri ortaya çıkarır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, 5 dakikalık bir simülasyonda titreşim genliği 150. saniyede artarak rulman arızasını simüle ettiğinde, RC 1.5 saniye içinde bu anomalileri tespit ederek hızlı ve hassas bir tepki verir (Gangsar ve Tiwari, 2020). Bu adaptif özellik, geleneksel Fourier analizine üstünlük sağlar ve arızaların büyük hasarlara yol açmadan müdahale edilmesini mümkün kılar (Nandi vd., 2005). Düşük hesaplama gereksinimi, RC'yi araç içi gömülü sistemlerde gerçek zamanlı izleme için ideal hale getirirken, farklı hız ve yük koşullarında verileri tutarlı bir şekilde işleme yeteneği endüstriyel uygulamalara geçişi destekler (Gong vd., 2023).



**Şekil 4.** Motor Arıza Tespiti: Rulman Anomalisi

Güç elektroniği, bataryadan motora enerji akışını düzenleyen invertörler ve dönüştürücüler gibi bileşenleri içerir. Anahtar arızaları (IGBT bozulmaları) veya kapasitör degradasyonu enerji verimliliğini düşürür ve sistem stabilitesini

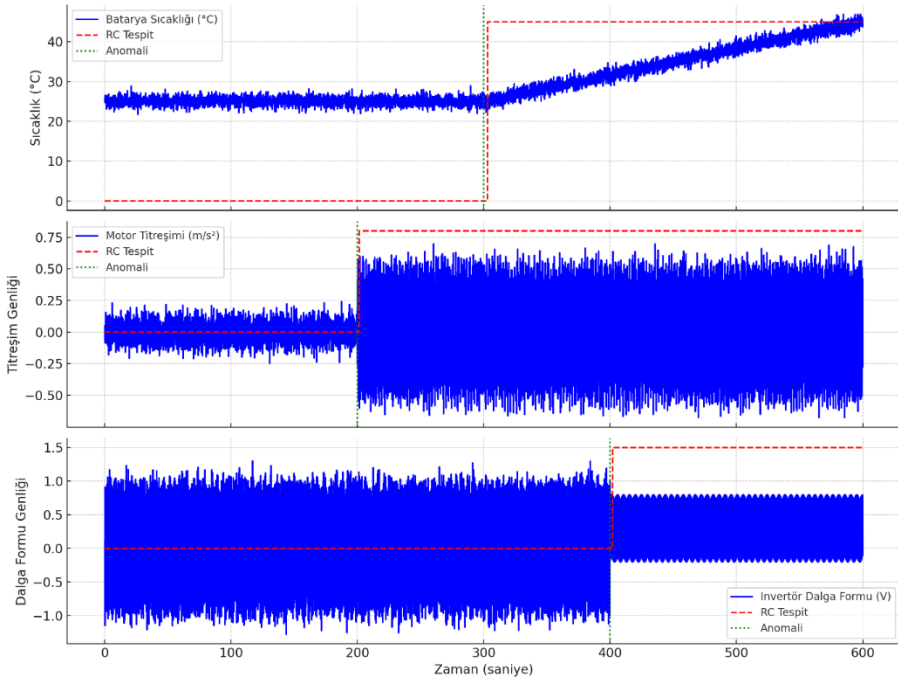
riske atar. RC, invertör çıkış dalga formlarını ve gerilim dalgalanmalarını analiz ederek bu sorunları tespit etmede etkili bir yol sunar (Li vd., 2023). Şekil 5'te gösterildiği gibi, 2 saniyelik bir simülasyonda dalga formu genliği 1. saniyede  $\pm 1$  V'dan 0.5 V'a düşüp kayma gösterdiğinde, RC 2 saniye içinde bu değişikliği belirleyerek hassasiyetini ortaya koyar. Bir anahtarın açık devre durumuna geçtiği an gibi küçük sapmaları yakalar. Geleneksel eşik tabanlı yöntemlerin gözden kaçırabileceği bu ince değişiklikler, optimize edilebilir bir tepki süresiyle tespit edilir. Kapasitör arızaları için ise, DC-link gerilimindeki dalgalanmaları izleyerek bozulmayı daha az veriyle doğru bir şekilde öngörür, böylece zorlu çalışma ortamlarında sistem ömrünü uzatır.



**Şekil 5.** Güç Elektroniği Analizi: Anahtar Arızası Tespiti

RC'nin EV'lerdeki hata tespit potansiyelini daha iyi anlamak için, simüle edilmiş bir veri seti üzerinden gerçek zamanlı bir uygulama örneği incelenebilir. Bu senaryoda, bir EV'nin batarya, motor ve invertöründen gelen sensör verileri (voltaj, akım, titreşim) bir ESN modeline beslenmiş ve alt sistemlerdeki olası arızalar eşzamanlı olarak belirlenmeye çalışılmıştır. 1000 Hz örnekleme frekansıylı 10 dakikalık bir sürüş süresini kapsayan simülasyonda, bataryada ani sıcaklık artışı, motorda rulman titreşim anomalisi ve invertörde anahtar arızası

modellenmiştir. ESN, 500 nöronluk bir rezervuar ve 0.9 spektral yarıçap ile tasarlanıp, ilk 5 dakikalık verilerle eğitilmiş, kalan 5 dakikada test edilmiştir. Şekil 6’da gösterildiği gibi, RC batarya sıcaklık artışını 3 saniye, rulman arızasını 1.5 saniye ve invertör anahtar arızasını 2 saniye içinde tespit ederek %95’in üzerinde doğruluk sunar. Bu hızlı tepki süreleri, gerçek zamanlı uygulamalar için pratik bir performans sergilerken, çok panelli grafik RC’nin sistemler arası heterojen verileri işleme kapasitesini ve gürültüye rağmen tutarlı tespit sinyalleri ürettiğini ortaya koyar, EV’lerin karmaşık doğasına uyum sağlama potansiyelini destekler.



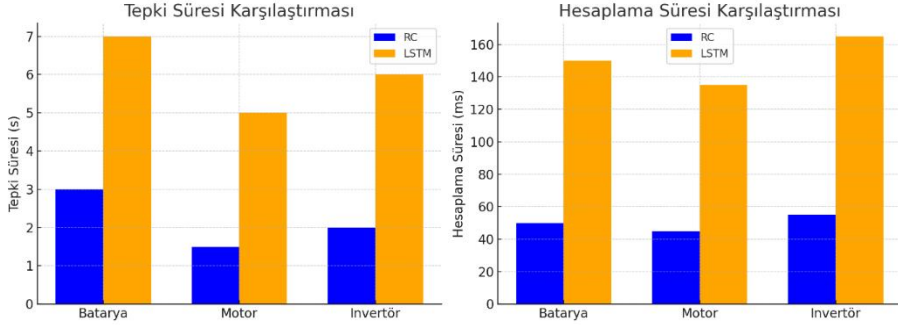
**Şekil 6.** Gerçek Zamanlı Uygulama: Çoklu Hata Tespiti

RC’nin performansını nicel bir şekilde değerlendirmek için, Şekil 2, 3 ve 4’ten türetilen simülasyon sonuçları Tablo 1’de özetlenmiştir. Bataryada %95 doğruluk, 3 saniye tepki süresi ve 50 ms hesaplama süresi; motorda %97 doğruluk, 1.5 saniye tepki süresi ve 45 ms hesaplama süresi; invertörde ise %94 doğruluk, 2 saniye tepki süresi ve 55 ms hesaplama süresi elde edilmiştir.

Bataryadaki tepki süresi termal olaylar için uygunken, motorun hızlı tepkisi mekanik aciliyeti, invertörün süresi ise güç elektroniği dinamiklerini yansıtır. Düşük hesaplama süreleri, RC'nin araç içi gömülü sistemler için verimliliğini kanıtlar.

| Sistem   | Doğruluk (%) | Tepki Süresi (s) | Hesaplama Süresi (ms) |
|----------|--------------|------------------|-----------------------|
| Batarya  | 95           | 3.0              | 50                    |
| Motor    | 97           | 1.5              | 45                    |
| Invertör | 94           | 2.0              | 55                    |

**Tablo 1.** RC Performans Metrikleri



**Şekil 7.** RC ve LSTM Performans Karşılaştırması

Karşılaştırma olarak, aynı veri seti bir LSTM modeli ile analiz edildiğinde, doğruluk benzer olsa da tepki süresi 5-7 saniyeye çıkmış ve hesaplama maliyeti üç kat artmıştır. Şekil 7’de gösterildiği gibi, RC’nin tepki süreleri (1.5-3 s) LSTM’ye göre (5-7 s) yaklaşık üç kat daha hızlıdır; bu, özellikle motor gibi hızlı müdahale gerektiren sistemlerde kritik bir üstünlük sağlar. Hesaplama süreleri (RC: 45-55 ms, LSTM: 135-165 ms) ise RC’nin enerji verimliliği ve düşük kaynak kullanımını ortaya koyar, EV’lerdeki gömülü sistemler için uygunluğunu pekiştirir. Gürültülü simülasyon verilerinde bile robust performans göstermesi, RC’nin pratik ortamlardaki potansiyelini vurgular ve araç içi diagnostik ünitelerine entegrasyonla sürücülerini anında uyarma, bakım süreçlerini optimize etme imkanı sunar.



## 5. Sonuçlar ve Tartışma

Elektrikli araçlarda hata tespiti, sistem güvenilirliğini sağlamak için temel bir ihtiyaçtır ve rezervuar hesaplama, bu alanda yenilikçi bir çözüm sunar. Bu yöntem, zaman serisi verilerini analiz etme yeteneği ve düşük hesaplama maliyetiyle dikkat çeker. Performansı, yüksek doğruluk, hızlı tepki süresi ve verimli hesaplama gibi unsurlarla öne çıkar. Geleneksel yöntemler, değişken koşullarda tutarsız sonuçlar verirken, rezervuar hesaplama, kapsamlı analizlerle daha güvenilir tespitler yapar. Derin öğrenme modellerine göre daha hızlı eğitilir ve gerçek zamanlı uygulamalarda avantaj sağlar. Diğer makine öğrenimi teknikleri ise ölçeklenebilirlik ve gürültüye karşı hassasiyet gibi sorunlarla karşılaşır; rezervuar hesaplama ise robust yapısıyla bu zorlukların üstesinden gelir. Endüstriyel açıdan, bu teknoloji güvenlik ve maliyet açısından önemli katkılar sunar. Hızlı tepki süresi, tehlikeli durumları önlerken, düşük sistem gereksinimleri donanım masraflarını azaltır. Ayrıca, arızaların erken fark edilmesi bakım süreçlerini optimize eder ve araç ömrünü uzatır. Zorlu çalışma koşullarında bile tutarlı sonuçlar vermesi, kullanıcı deneyimini iyileştirir ve üreticilere rekabet gücü kazandırır.

Bununla birlikte, teknolojinin geliştirilmesi gereken yönleri de vardır. Birden fazla sistemin eşzamanlı analizi için daha karmaşık yapılar gerekebilir. Derin öğrenme ile birleştirilmesi, uzun vadeli desenleri yakalamada fayda sağlayabilir. Kuantum hesaplama gibi yenilikçi yaklaşımlar, gelecekte büyük veri analizini hızlandırabilir. Son olarak, uzun süreli testler, yöntemin pratik uygulanabilirliğini ve dayanıklılığını kanıtlamak için gereklidir. Bu ilerlemeler, rezervuar hesaplamanın elektrikli araçlarda hata tespitinde daha geniş bir rol oynamasını sağlayabilir.

## KAYNAKLAR

- Appeltant, L., Soriano, M. C., Van der Sande, G., Danckaert, J., Massar, S., Dambre, J., ... & Fischer, I. (2011). Information processing using a single dynamical node as complex system. *Nature communications*, 2(1), 468.
- Bianchi, F. M., Scardapane, S., Løkse, S., & Jenssen, R. (2020). Reservoir computing approaches for representation and classification of multivariate time series. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 32(5), 2169-2179.
- Dai, H., Lai, Y., Huang, Y., Yu, H., Yang, Y., & Zhu, L. (2024). State-of-health estimation of lithium-ion batteries using multiple correlation analysis-based feature screening and optimizing echo state networks with the weighted mean of vectors. *Journal of Power Sources*, 623, 235482.
- Ding, S. X. (2008). Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools. Springer Science & Business Media.
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy storage materials*, 10, 246-267..
- Gallicchio, C., & Micheli, A. (2017). Echo state property of deep reservoir computing networks. *Cognitive Computation*, 9, 337-350.
- Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical systems and signal processing*, 144, 106908.
- Gong, L., Sharma, A., Bhuiya, M. A., Awad, H., & Youssef, M. Z. (2023). An Adaptive Fault Diagnosis of Electric Vehicles: An Artificial Intelligence Blended Signal Processing Methodology. *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 46(3), 196-206.
- Hamelin, F., & Sauter, D. (2000). Robust fault detection in uncertain dynamic systems. *Automatica*, 36(11), 1747-1754.
- 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.
- Hu, X., Jiang, J., Cao, D., & Egardt, B. (2015). Battery health prognosis for electric vehicles using sample entropy and sparse Bayesian predictive

- modeling. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(4), 2645-2656.
- Jaeger, H. (2001). The “echo state” approach to analysing and training recurrent neural networks-with an erratum note. *Bonn, Germany: German national research center for information technology gmd technical report, 148*(34), 13.
- Jaeger, H. (2007). Echo state network. *scholarpedia*, 2(9), 2330.
- Jaeger, H., & Haas, H. (2004). Harnessing nonlinearity: Predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication. *science*, 304(5667), 78-80.
- Khan, M. U. I., Pathan, M. I. H., Rahman, M. M., Islam, M. M., Chowdhury, M. A. R., Anower, M. S., ... & Benedetto, F. (2024). Securing electric vehicle performance: Machine learning-driven fault detection and classification. *IEEE Access*.
- Li, D., Kakosimos, P., & Peretti, L. (2023). Machine-learning-based condition monitoring of power electronics modules in modern electric drives. *IEEE Power Electronics Magazine*, 10(1), 58-66.
- Liu, D. (2023). International energy agency (IEA). In *The Palgrave Encyclopedia of Global Security Studies* (pp. 830-836). Cham: Springer International Publishing.
- Lu, B., & Sharma, S. K. (2009). A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters. *IEEE Transactions on industry applications*, 45(5), 1770-1777.
- Lukoševičius, M. (2012). A practical guide to applying echo state networks. In *Neural Networks: Tricks of the Trade: Second Edition* (pp. 659-686). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lukoševičius, M., & Jaeger, H. (2009). Reservoir computing approaches to recurrent neural network training. *Computer science review*, 3(3), 127-149.
- Maass, W., Natschläger, T., & Markram, H. (2002). Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations. *Neural computation*, 14(11), 2531-2560.
- Martin, H. A., Smits, E. C., Poelma, R. H., van Driel, W. D., & Zhang, G. (2024). Online condition monitoring methodology for power electronics

- package reliability assessment. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(4), 4725-4734.
- Nakajima, K. (2020). Physical reservoir computing—an introductory perspective. *Japanese Journal of Applied Physics*, 59(6), 060501.
- Nandi, S., Toliyat, H. A., & Li, X. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review. *IEEE transactions on energy conversion*, 20(4), 719-729.
- NATSCHL, T., GER, W. M., & MARKRAM, H. (2002). *The" liquid computer": A novel strategy for real-time computing on time series.*, *TELEMATIK* (Vol. 8, No. 1, pp. 2002-01). TELEMATIK-INGENIEUR-VERBAND, GRAZ, AT.
- Pathak, J., Hunt, B., Girvan, M., Lu, Z., & Ott, E. (2018). Model-free prediction of large spatiotemporally chaotic systems from data: A reservoir computing approach. *Physical review letters*, 120(2), 024102.
- Rodan, A., & Tino, P. (2010). Minimum complexity echo state network. *IEEE transactions on neural networks*, 22(1), 131-144.
- Schrauwen, B., Verstraeten, D., & Van Campenhout, J. (2007). An overview of reservoir computing: theory, applications and implementations. In *Proceedings of the 15th european symposium on artificial neural networks*. p. 471-482 2007 (pp. 471-482).
- Severson, K. A., Attia, P. M., Jin, N., Perkins, N., Jiang, B., Yang, Z., ... & Braatz, R. D. (2019). Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation. *Nature Energy*, 4(5), 383-391.
- Shahi, S., Fenton, F. H., & Cherry, E. M. (2022). Prediction of chaotic time series using recurrent neural networks and reservoir computing techniques: A comparative study. *Machine learning with applications*, 8, 100300.
- Tanaka, G., Yamane, T., Héroux, J. B., Nakane, R., Kanazawa, N., Takeda, S., ... & Hirose, A. (2019). Recent advances in physical reservoir computing: A review. *Neural Networks*, 115, 100-123.
- Verstraeten, D., Schrauwen, B., d'Haene, M., & Stroobandt, D. (2007). An experimental unification of reservoir computing methods. *Neural networks*, 20(3), 391-403.

- Wang, H., & Blaabjerg, F. (2014). Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—An overview. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(5), 3569-3578.
- Wyffels, F., & Schrauwen, B. (2010). A comparative study of reservoir computing strategies for monthly time series prediction. *Neurocomputing*, 73(10-12), 1958-1964.
- Yıldız, I. B., Jaeger, H., & Kiebel, S. J. (2012). Re-visiting the echo state property. *Neural networks*, 35, 1-9.

## CHAPTER 4

### ENVIRONMENTAL EVALUATION OF ELECTRIC CARS

Doç. Dr. Nesli AYDIN<sup>1</sup>

Prof. Dr. Gül KAYKIOĞLU<sup>1</sup>

---

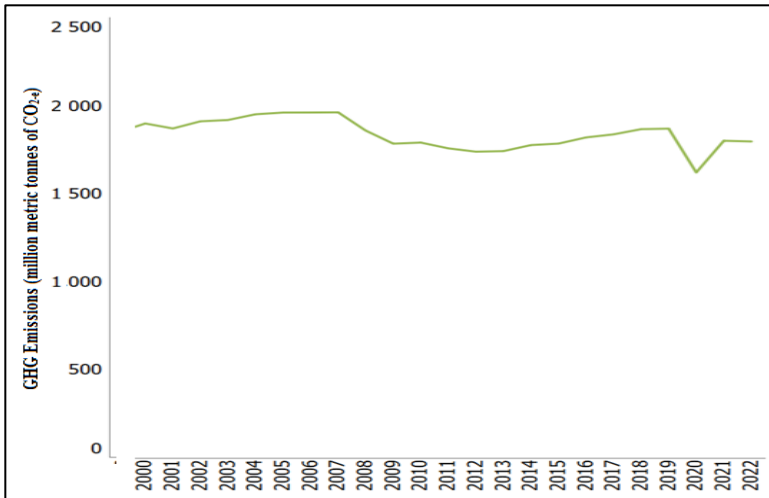
<sup>1</sup> Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu Engineering Faculty, Department of Environmental Engineering, Tekirdağ, Turkey. [naydin@nku.edu.tr](mailto:naydin@nku.edu.tr), orcid id: <https://orcid.org/0000-0002-7561-4280>, and [gkaykioglu@nku.edu.tr](mailto:gkaykioglu@nku.edu.tr), orcid id: <https://orcid.org/0000-0003-3271-211X>



## 1. INTRODUCTION

As is well known, the release of hazardous emissions from human activities and the increasing demand for energy to support these activities are among the most significant global challenges of our time. Globally, transportation accounts for 26% of global energy demand, with road transport and aviation have their share of 20% and 3%, respectively (World Economic Forum, 2025).

The global vehicle fleet is estimated to be in the billions. For example, approximately 25.8 million passenger vehicles were registered in China alone in 2023 (Statista, 2025). Traffic is expected to increase dramatically worldwide in the future, especially in developing countries. Furthermore, modern internal combustion engine vehicles still produce significant amounts of hazardous toxic emissions. It is estimated that car using account for nearly 75% of CO pollution in the USA (Environmental Protection Agency, 2021). Figure 1 shows the greenhouse gas emissions from transportation between 2000 and 2022. Emissions involved in the use of electric cars for transportation activities are also included in the graph in Figure 1, but they are not shown separately, as they also take place in other sectors as well. These indirect emissions are negligible as they are less than 1% of the total emissions shown in the graph (Environmental Protection Agency, 2021).



**Figure 1:** Greenhouse Gas Emissions from Transportation between 2000 and 2022 (EPA, 2023)



The World Health Organisation reports that air pollution poses a significant environmental health risk by ranking it as the second highest risk factor for non-communicable diseases (WHO, 2024). It was estimated that air pollution is responsible for 4.2 million premature deaths annually worldwide, and 14% of this mortality was due to ischaemic heart disease and stroke, 14% was due to acute lower respiratory infections, and 4% of it was due to lung cancers (WHO, 2024).

According to the EU environmental acquis, CO<sub>2</sub> emissions from transport must be reduced by 15% by 2025 compared to 2021 (European Environment Agency, 2024). According to vehicle registration records, the share of electric vehicles increased in many developed countries in 2023 compared to 2022 (Du Pasquier et al., 2003; European Environment Agency, 2024). Among these countries, the highest increases were seen in Norway (91%), Sweden (61%), and Iceland (60%) (European Environment Agency, 2024).

In 2023, Norway, France, and Germany accounted for approximately 54% of new electric vehicle registrations in Europe (European Environment Agency, 2024). In the same year, Norway had the highest number of new electric vehicles registered. Furthermore, electric vehicles accounted for 83% of new vehicle sales in Norway (European Environment Agency, 2024).

To meet future transportation needs, along with minimising hazardous emissions and eliminating dependence on oil, transport technology takes advantage of more efficient and environmentally friendly alternatives. In developed regions, such as Germany, Finland, and Sweden, the sustainability of electric vehicles has been further enhanced by generating electricity from renewable energy instead of fossil fuels.

The transportation sector encompasses a wide range of vehicles, including trains, aeroplanes and ships. However, within this sector, automobiles hold a distinct position as they dominate city traffic in many countries and car sales experience the highest growth rates in the world at 10% (Sanguesa et al., 2021). Beyond that, alternative and environmentally friendly technologies exist for other vehicles, such as trucks and lorries that run on biodiesel or compressed natural gas for limited ranges. Figure 2 illustrates the number of registered electric automobiles in developed countries in 2023.

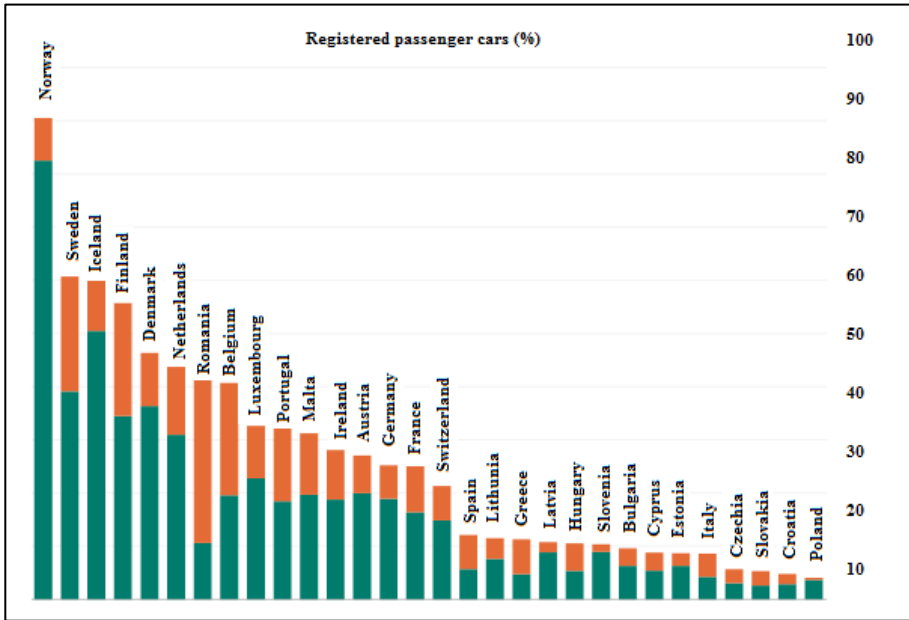
## 2. TECHNICAL CONCEPTS OF ELECTRIC CARS

There have been two approaches to automobile production to date. The first is the production of vehicles with internal combustion engines, while the other is the use of electric powertrains (Energy Saving Trust, 2025; Maharaj, 2024). The first internal combustion engine vehicle was developed in Germany in 1886 by Benz and Daimler (Sanguesa et al., 2021).

In the 1900s, electric automobiles began to gain a significant share (Energy Saving Trust, 2025; Sanguesa et al., 2021). Around the same time, Ferdinand Porsche invented hybrid electric automobiles equipped with wheel hub electric motors for the internal combustion engine (Energy Saving Trust, 2025). This approach came to the fore in 1908 when Henry Ford chose the first approach, internal combustion engines, for the first mass production in history (Albatayneh et al., 2020; Maharaj, 2024). Thus, internal combustion engines emerged as the winners of this race over battery-electric vehicles (Maharaj, 2024; Sanguesa et al., 2021).

Battery electric vehicles, which are not a new cutting-edge technology, represent a relatively simple technical concept (Adler and Mirchandani, 2014; Du Pasquier et al., 2003). Converting new or used battery electric vehicles into electric automobiles is easily achievable (Albatayneh et al., 2020; Das et al., 2020). In contrast, modern lithium-ion battery technology, the prerequisite for the practical application of most battery electric vehicles in everyday life, involves very recent technical advancements. Because a full hybrid vehicle can run on electricity, it requires only a plug and a much larger battery to charge, similar to battery electric vehicles (Berjoza and Jurgena, 2017; Das et al., 2020).

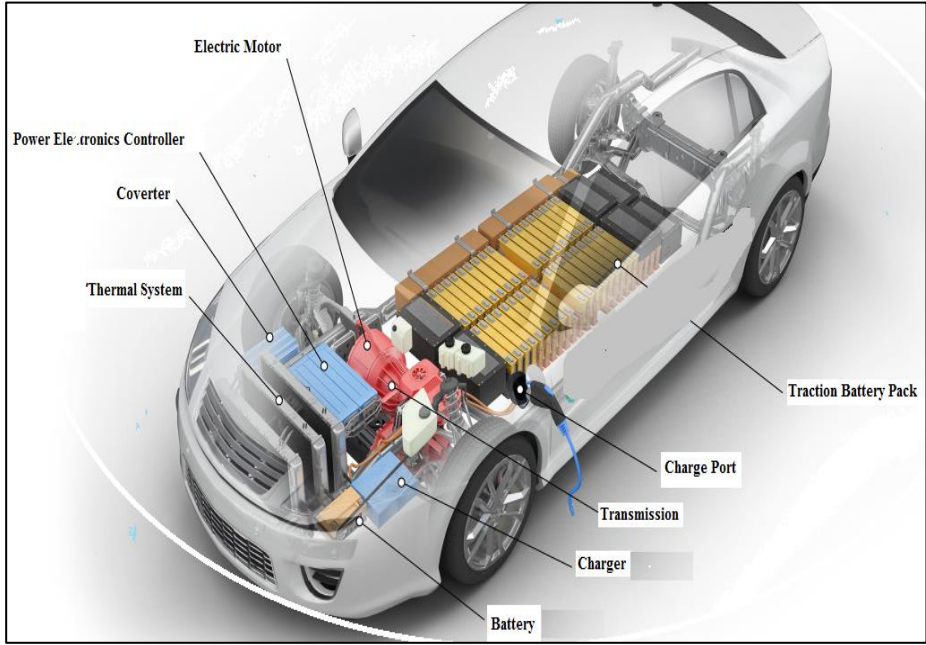
It appears that battery size should increase in parallel with the vehicle's weight (Albatayneh et al., 2020; Das et al., 2020). From a strategic market perspective, the applicability of these batteries to different vehicle size segments, taking into account the economic lifespan of electric vehicles, should be investigated (Albatayneh et al., 2020; Berjoza and Jurgena, 2017). In this context, electric automobiles have been primarily introduced to the market as small or mid-size cars (Berjoza and Jurgena, 2017; Du Pasquier et al., 2003).



**Figure 2:** Number of registered electric automobiles in developed countries (green columns for battery electric vehicles and orange columns for plug-in hybrid vehicles) (European Environment Agency, 2024)

The main components of an electric vehicle could be divided into an electric battery, an electric motor, and a motor controller (Figure 3) (Habib et al., 2015; Hawkins et al., 2012). The technical structure of such vehicles is much simpler because they do not require a starter, exhaust, or lubrication system, often a transmission, and sometimes even a cooling system (Habib et al., 2015). The battery is electrically charged when connected to the electrical grid via a charger or through recuperation during braking (Jing et al., 2016).

The charger is a critical component because its efficiency currently ranges from 60% to 97% and wastes 3% to 40% of the grid's energy as heat (Du Pasquier et al., 2003; Hawkins et al., 2012). The motor controller powers the electric motor, depending on the load (Jing et al., 2016). The electric motor converts electrical energy into mechanical energy, which is then converted into torque when used in the drivetrain (Hu et al., 2016). Modern, high-efficiency electric motors are composed of magnetic materials, including neodymium and samarium (Du Pasquier et al., 2003; Jing et al., 2016).



**Figure 3:** Main Components of Electric Cars (U.S. Department of Energy's Vehicle Technologies Office, 2025)

The scarcity of these magnetic materials and the fact that their exports are controlled by a few countries, particularly China, raises some concerns (Li et al., 2020; Liu et al., 2015). However, electric motors for electric vehicles may not necessarily contain these elements (Karimi and Li, 2013). There are several types of electric motors, including alternating current (AC) and direct current (DC) (Liu et al., 2015; Lu et al., 2013).

In electric automobiles, magnetless traction motors are quite common because they are less expensive (Kim et al., 2014; Li et al., 2019; Li et al., 2020). A subtype of AC motor includes induction motors. Vehicles like the Tesla Roadster and the Toyota RAV4EV incorporate induction motors (Tesla, 2025; Toyota, 2025).

In addition, it is also possible to use lead-acid batteries in electric vehicles. Currently, small electric trucks equipped with lead batteries, with capacities ranging from 13 to 26 kWh (Dufo-Lopez et al., 2021). These vehicles offer a maximum range of up to 200 km and a maximum speed of 60 km/h (Helmers and Marx, 2012). Furthermore, a certain portion of today's electric vehicles use lead batteries. There are studies suggesting that using

lead batteries is beneficial for diversifying future battery technology and materials (Liu et al., 2015; Lu et al., 2013). Recent improvements in lead battery performance have been made by using gel matrix and gas charging (Kim et al., 2014; Li et al., 2019). This has also been included in the work of engineers as a potential area for development.

However, the tremendous energy offered by Li-ion batteries has become a focal point for automotive electric power technology (Mahmud et al., 2018; Schuller and Hoeffler, 2014). Tesla launched the first highway-ready lithium-ion battery for electric cars with a range of 320 km per charge in 2008 (Maharaj, 2024). Following this, Mitsubishi began mass-producing its i-MiEV in parts of Asia in 2009, while the Nissan Leaf entered the Japanese and US markets in 2010 (Maharaj, 2024).

Nickel-hydride batteries, which were used in the 1990s when automobile electrification was just beginning, have been considered less competitive due to their poor performance and environmental impact compared to Li-ion batteries (Rahman et al., 2016; Richardson, 2013). The only alternative to Li-ion batteries with comparable power is the Zebra cell, which uses molten salt (Li et al., 2019; Mak et al., 2013). Therefore, these batteries are only suitable for continuous daily use (Sanguesa et al., 2021). While many different Li-ion options are available today, the price of Li-ion batteries is steadily decreasing (Helmers and Marx, 2012).

### **3. ENVIRONMENTAL IMPACTS OF ELECTRIC CARS**

The environmental impacts of electric vehicles should not be limited to exhaust emissions during the usage phase, but rather should be assessed throughout the entire life cycle, encompassing raw material extraction, production, use, maintenance, and end-of-life (disposal and recycling). Research conducted in this field analyses the sustainability of electric vehicles through their production process, the process of their usage through economic lifespan, and the process of their distribution and recycling (Adler and Mirchandani, 2014; Das et al., 2020).

In this context, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology is widely used to systematically examine the environmental performance of vehicles (Champeechoensuk et al., 2025).

### 3.1 Production Phase

The production process of electric cars has higher greenhouse gas emissions and environmental impacts compared to internal combustion engine vehicles, particularly due to the manufacture of high-energy density lithium-ion battery packs. Regarding electric vehicle production, some studies showed that producing an electric vehicle could require more than twice the energy of a conventional vehicle, particularly due to battery production (Burchart and Przytuła, 2024; Regett, 2019). For example, Shang et al. (2024) found that CO<sub>2</sub> emissions during the production phase of electric vehicles are 132% higher than those of gasoline vehicles and 123% higher than those of diesel vehicles.

IEA (2021) states that, with current technology, the extraction and processing of minerals needed for electric vehicle batteries (e.g., rare earth elements such as lithium, copper, cobalt, manganese, and neodymium) requires 350 to 650 mega-joules per kWh. Furthermore, considering that each kWh of battery capacity corresponds to 150 to 200 kg of CO<sub>2</sub> emissions, producing a 22 kWh BMW i3 battery would generate approximately 3 tonnes of CO<sub>2</sub> (Regett, 2019). Similarly, another study found that the production of every 1 kg of lithium batteries produces approximately 12.5 kg of CO<sub>2</sub>-e emissions (Shang et al., 2024). One of the main reasons why battery production accounts for a significant portion of lifecycle greenhouse gas emissions is the on-going intensive use of fossil fuel-based energy sources in the production process.

Additionally, pollutants such as PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and VOCs are also released during production. Upstream NO<sub>x</sub> emissions, particularly from battery production, can partially offset the NO<sub>x</sub> reductions achieved during the use phase (Shang et al., 2024). Furthermore, the sourcing and transportation of electric car components from different geographies for assembly leads to additional emissions from fossil fuel use (Champeecharoensuk et al., 2025).

While electric cars reduce CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM, VOC, and NO<sub>x</sub> emissions during the usage phase, they could have more negative results in terms of phosphate (PO<sub>4</sub>) emissions (Champeecharoensuk et al., 2025; Safarian, 2023). Due to the high PO<sub>4</sub> emissions in electric car production, the phosphorus-based eutrophication potential is approximately 46% higher than that of internal combustion vehicles.

When examining the sustainability of electric vehicles throughout their economic lifespan, it's also noteworthy that these vehicles, especially when widely used, require a significant amount of electricity to charge their batteries (Albatayneh et al., 2020; Du Pasquier et al., 2003). Furthermore, such an energy demand will indirectly harm the environment due to the production of the electrical energy source. While electric vehicles don't directly produce greenhouse gases that harm the climate, the electricity used for their operation, when generated by fossil fuel-fired power plants, will indirectly harm the environment. Therefore, the use of renewable energies such as solar, wind, and biogas for the production and charging of electric vehicles is a crucial consideration.

Dufo-Lopez et al. (2021) focus on solar photovoltaic modules to provide an environmentally friendly approach in developing electric vehicle infrastructure. A number of studies in this field demonstrate that solar energy could meet a significant portion of the vehicle's total energy demand, especially during the summer months (Das et al., 2020; Schuller and Hoeffler, 2014; Tan et al., 2016). Regarding electric vehicle disposal, batteries could pose an environmental hazard at the end of their lifespan. However, for such a technology to achieve its intended purpose, proper recycling is essential as mentioned in Section 3.4. Recycling offers a valuable opportunity to reduce lifecycle costs and recover high-value materials (Albatayneh et al., 2020).

### 3.2 Usage Phase

To evaluate existing technologies within a life cycle analysis, energy consumption is divided into two categories, well-to-tank and tank-to-wheel (Karimi and Li, 2013). The well-to-tank energy flow represents the phase from raw material extraction to fuel delivery to the vehicle tank, while the tank-to-wheel energy transfer relates to powertrain performance. Together, they represent the well-to-wheel efficiency. The tank-to-wheel energy transfer allows us to estimate the total energy and efficiency of automobiles powered by various propulsion technologies.

In Turkey, the average tank-to-wheel emissions for electric vehicles are 89.1 g CO<sub>2-e</sub>/km, compared to 172.2 g CO<sub>2-e</sub>/km for internal combustion cars with the 2022 electricity mix, meaning electric vehicles have 48.3% lower

emissions. With a renewable energy-supported grid, this figure could drop to 36.2 g CO<sub>2-e</sub>/km (Sahin and Esen, 2024).

Generally, the tank-to-wheel efficiency of internal combustion engines is very low, ranging from 20-40% for gasoline engines and 25-45% for diesel engines (Aiman et al., 2020). A study of internal combustion engines showed that 68% to 90% of all energy is wasted (Gheidan et al., 2022; Wang et al., 2021). However, internal combustion engines have dominated the low-cost market worldwide for over 100 years. The concept of hybrid electric and internal combustion engines has provided a boost in efficiency. Toyota and then Honda introduced this technology in large-scale production in the late 1990s (Sanguesa et al., 2021). However, the gaseous hydrocarbons used in hybrid technologies, namely methane, propane, and butane, remain as inefficient as gasoline-powered cars (Tan et al., 2016). Gas-powered propulsion systems can only be as efficient as diesel engines if these hydrocarbons are used to achieve higher compression (Vasirani et al., 2013). Unfortunately, automobile manufacturers have not yet exploited the potential of gas propulsion systems (Vasant et al., 2019; Yang et al., 2014; Yong et al., 2015).

Fossil hydrocarbons used in internal combustion engines could, of course, be replaced by biofuels such as bioethanol, biodiesel, or bio-methane in the future. In such a case, the question of how environmentally friendly and efficient vehicles running on such fuels will be compared to electric cars may come to the fore. In this regard, Arnold et al. (2011) examined the greenhouse gas assessment of natural gas and industrial bio-methane process chains using life cycle analysis. They concluded that greenhouse gas emission data will change in the future due to the development of new sources and markets, such as the growing liquefied natural gas market. However, the global data for the supply of petrol (gasoline), diesel, and methane reveal that most of the energy contained in the chain has already been consumed (Lumley, 2025).

As the development of electric automobiles has accelerated recently, the databases created for this purpose are quite extensive. For instance, Dollinger and Fischerauer (2021) developed a model which takes consumption-relevant parameters into account to produce predictions regarding the real-world impact of electric cars on energy consumption. Some data, on the other hand, are based on realistic assumptions obtained by driving



the vehicle in real life. For example, Neugebauer et al. (2022) calculated CO<sub>2</sub> emissions of two different configurations of Golf, one with a combustion engine and the other with an electric motor, by taking into account the stages of production and utilisation of them. They found out that replacing the internal combustion car with an electric car pays back in terms of cumulative CO<sub>2</sub> emissions after 4 years for an annual mileage of 15,000 km. However, some results are based on unrealistic assumptions. For example, Sullivan et al. (2004) estimated that by 2015, diesel-powered vehicles will produce 14% to 27% less CO<sub>2</sub> compared to gasoline-powered vehicles, based on German certification data, with higher efficiency in the energy transfer from the tank to the wheels. However, in reality, automobile users proved that they much prefer vehicles with larger engines than the modelled vehicles (Xing et al., 2011).

Furthermore, one of the massive obstacles to these studies is external factors (car driving patterns, seasonal changes, etc.) that are variable and difficult to control. For example, Dollinger and Fischerauer (2021) indicated that winter conditions and rough terrain reduce range by 7-9%, while aggressive driving could reduce range by up to 20%. A major problem with well-to-wheel efficiency studies is that much of the data is based on artificial testing procedures. Factors such as driving patterns, climate conditions, battery change frequency, and road type also influence environmental impacts during use. For example, while maintenance requirements increase in cold climates, electric vehicles with carbon fibre-reinforced plastic bodies could have the lowest lifecycle emissions at 68.7 g CO<sub>2</sub>-e/km in summer city driving. (Khanna et al., 2025). As a result, these data vary from one region of the world to another. Therefore, a worldwide standardised testing programme is currently under international negotiations (Xing et al., 2011).

When examining electric vehicles, electricity generation could occur under a wide variety of conditions. These conditions include a situation where up to 85% of the energy is lost due to an inefficient charger. However, with advancing charger technology, charger efficiency could now reach up to 80-97% (Sevdari et al., 2023). Studies have shown that the efficiency of energy flow from the tank to the wheels in electric vehicles is between 70% and 80% (Hoffrichter et al., 2012). This high efficiency is due to minimal energy wasted in the drivetrain (Lu et al., 2013).

Electric vehicles are the only alternative technology that offers increased efficiency in individual mobility, consuming up to 25% less energy than today's automobiles (Hoffrichter et al., 2012). This was approved in measurements performed on a vehicle converted from an internal combustion engine to an electric motor (Vasant et al., 2019; Yong et al., 2015). However, these vehicles must primarily and increasingly be powered by electricity from renewable sources and equipped with an efficient charging unit (Sevdari et al., 2023). Despite their significantly higher efficiency, the main obstacle to the widespread adoption of electric vehicles remains their range limitations. Therefore, other technologies are still needed under sustainability-optimised conditions.

### **3.3 Maintenance Phase**

Maintenance for electric cars includes periodic maintenance of components such as battery, tire and brake fluid replacement, and also powertrain cooling. Battery replacement, in particular, is a critical element in terms of environmental impacts, as it could lead to high energy consumption and greenhouse gas emissions (Khanna et al., 2025).

### **3.4 End of Life and Recycling**

Battery recycling is strategically important for both raw material recovery and the reduction of electronic waste. High-level recycling practices can reduce the lifecycle CO<sub>2</sub> emissions of battery electric vehicles by 50% and PO<sub>4</sub> emissions by 56% (Champeechoensuk et al., 2025).

Reusing batteries in "second-life" scenarios, such as stationary energy storage systems or in the building sector, provides additional benefits in terms of energy efficiency and emission reduction (Kang et al., 2025). However, improper disposal practices can lead to serious soil and water pollution.

### **3.5. Other Environmental Impacts**

Electric cars use rare earth elements in some types of engines and batteries. The mining and refining of these elements have high environmental costs (Suganya et al., 2024; Champeechoensuk et al., 2025). Furthermore, the additional weight from the battery can increase tire wear, increasing road maintenance requirements and indirect emissions.

The installation and maintenance of charging infrastructure could have local environmental impacts, such as energy and land use. Electric cars, on the other hand, contribute to improving urban air quality and reducing noise pollution because they do not produce exhaust emissions (Safarian, 2023).

LCA studies cover many impact categories, including climate change, abiotic resource depletion, ozone depletion, acidification, eutrophication, ecotoxicity, human toxicity, mineral and fossil resource scarcity. For example, the transportation of used batteries can contribute 12–14% of the global warming potential and fossil resource use (Iloje et al., 2022).

#### **4. CONCLUSIONS**

Global warming, air pollution, and ecosystem degradation resulting from the intensive use of fossil fuels necessitate a transition to sustainable alternatives in the transportation sector. Electric cars are at the heart of this transformation, offering significant benefits for both the environment and public health (Suganya et al., 2024). They directly contribute to decarbonisation goals by reducing greenhouse gas emissions and improving air quality, particularly in densely populated cities (Sahin and Esen, 2024; Suganya et al., 2024; Wang and Witlox, 2025).

However, fully realising this potential requires a holistic approach at the technological, economic, and policy levels. The environmental impacts of electric car production and battery manufacturing processes, particularly the raw material extraction and energy-intensive production stages, remain a critical focus in life cycle assessments (Soares et al., 2025; Shang et al., 2024; Safarian, 2023). Therefore, advances in battery technology, the expansion of charging infrastructure, and the integration of circular economy strategies such as “second-life” battery applications are strategically important in reducing the overall environmental footprint of electric vehicles (Picatoste et al., 2022; Tahir et al., 2025). In this context, batteries that provide greater power storage and faster charging times are expected to gain importance. This will allow electric vehicles to reach greater ranges, leading to increased demand from drivers.

Government policies and financial incentives have also played a decisive role in the growth and expansion of the electric car market (Khanna et al., 2025; Shang et al., 2024). In 2021, the UK government committed to

ending the sale of new petrol and diesel cars by 2030, with over 500,000 ultra-low emission electric vehicles already in use (Energy Saving Trust, 2025). In the future, strong policy measures, transparent regulatory frameworks, and effective stakeholder collaboration will remain critical to building a sustainable electric mobility ecosystem (Tahir et al., 2025). Furthermore, overcoming existing barriers such as high purchasing costs, inadequate charging infrastructure, and changing user habits are among the priority goals for increasing social acceptance (Wang and Witlox, 2025; Suganya et al., 2024).

Creating a globally usable connector is another key factor that could benefit the widespread adoption of electric automobiles. These cars will inevitably play a crucial role in the smart cities of the future and will meet drivers' needs more effectively. With the increased efficiency of Li-ion batteries, their use is rapidly gaining popularity, allowing them to offer a daily range of at least 100 km (IEA, 2021). However, the efficiency of electric automobiles will only be realised when the electricity is generated by efficient power plants using renewable energy. While greenhouse gas emissions from electric cars are significantly reduced in countries with high renewable energy rates, this advantage may be limited in fossil fuel-based electricity generation (Shen et al., 2023; Suganya et al., 2024; Tahir et al., 2025).

Ultimately, the transition to electric mobility is a key strategic tool for achieving global decarbonisation goals. The combination of technological innovation, a holistic approach to lifecycle management, and supportive public policies will enable the development of more accessible, reliable, and environmentally friendly electric vehicles, contributing to the construction of a sustainable future.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

The authors kindly acknowledge Senior Lecturer Oana Gui from Art and Design University, also Ioana Gansca and Maria Borsan from Montessori Academy in Cluj-Napoca, Romania.

## REFERENCES

- Adler, J.D., Mirchandani, P.B., 2014, Online routing and battery reservations for electric vehicles with swappable batteries, *Transp. Res. Part B: Methodol.*, 70, 285–302.
- Aiman, A., Assaf, M.N., Dariusz, A., Mustafa, J., 2020, Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles, *Environmental and Climate Technologies*, 24, 1, 669–680
- Albatayneh, A., Assaf, M.N., Alterman, D., Jaradat, M., 2020, Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles, *Environ. Clim. Technol.*, 24, 669–680.
- Arnold, K., 2011, Greenhouse gas balance of bio-methane – which substrates are suitable?, *Energy Science and Technology*, 1, 2, 67–75
- Berjoza, D., Jurgena, I., 2017, Effects of change in the weight of electric vehicles on their performance characteristics. *Agron. Res.*, 15, 952–963.
- Burchart, D., Przytuła, I., 2024, Carbon footprint of electric vehicles—review of methodologies and determinants, *Energies*, 17, 22, 5667. <https://www.mdpi.com/3039516>
- Champeecharoensuk, T., Saisirirat, P., Chollacoop, N., Vithean, K., Thapmanee, K., Silva, K., Champeecharoensuk, A., 2025, Global warming potential and environmental impacts of electric vehicles and batteries in Association of Southeast Asian Nations (ASEAN), *Energy for Sustainable Development*, 86, 101723. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101723>
- Das, H., Rahman, M., Li, S., Tan, C., 2020, Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 120, 109618.
- Du Pasquier, A., Plitz, I.; Menocal, S., Amatucci, G., 2003, A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications, *J. Power Sources*, 115, 171–178.
- Dufo-Lopez, R., Cortés-Arcos, T., Artal-Sevil, J. S., Bernal-Agustín, J. L., 2021, Comparison of Lead-Acid and Li-Ion Batteries Lifetime

- Prediction Models in Stand-Alone Photovoltaic Systems, *Applied Sciences*, 11, 3, 1099. <https://doi.org/10.3390/app11031099>
- Dollinger, M., Fischerauer, G., 2021, Model-based range prediction for electric cars and trucks under real-world conditions, *Energies*, 14, 18, 5804. <https://doi.org/10.3390/en14185804>
- Energy Saving Trust, 2025, A brief history of the electric car, <https://energysavingtrust.org.uk/a-brief-history-of-the-electric-car/#:~:text=In%201881%2C%20another%20French%20scientist,the%20road%20in%20the%20US.>
- Environmental Protection Agency, EPA, 2021, How Much Air Pollution Comes From Cars?, <https://auto.howstuffworks.com/air-pollution-from-cars.htm#:~:text=According%20to%20the%20U.S.%20Department,car%20pollution%20affect%20the%20environment?>
- Environmental Protection Agency, EPA, 2023, Greenhouse Gas Emissions from Transportation, 1990-2022, <https://www.epa.gov/ghgemissions/transportation-sector-emissions#:~:text=Emissions%20from%20Transportation-,Sources%20of%20Transportation%20Emissions,air%20conditioners%20and%20refrigerated%20transport.>
- European Environment Agency, 2024, New registrations of electric vehicles in Europe, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/new-registrations-of-electric-vehicles#:~:text=Electric%20cars%2C%20which%20include%20battery,of%20total%20new%20car%20registrations.>
- Gheidan, A.A.S., Wa, M.B.A., Chukwunonso, O.A., 2022, impact of internal combustion engine on energy supply and its Emission Reduction via Sustainable Fuel Source, *Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 09,3, 830-844
- Habib, S., Kamran, M., Rashid, U., 2015, Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks—A review, *J. Power Sources*, 277, 205–214.
- Hawkins, T.R., Gausen, O.M., Strømman, A.H., 2012, Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—A review, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 17, 997–1014.

- Helmers, E., Marx, P., 2012, Electric cars: technical characteristics and environmental impacts, *Environ Sci Eur*, 24, 14. <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/2190-4715-24-14>
- Hoffrichter, A., Miller, A.R., Hillmanssen, S., Roberts, C., 2012, Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17, 1, 28-34, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.002>.
- Hu, J., Morais, H., Sousa, T., Lind, M., 2016, Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 56, 1207–1226.
- IEA (2021), The role of critical minerals in clean energy transitions, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Iloeje, C.O., Xavier, A.S., Graziano, D., Atkins, J., Sun, K., Cresko, J., Supekar, S.D., 2022, A systematic analysis of the costs and environmental impacts of critical materials recovery from hybrid electric vehicle batteries in the U.S, *iScience*, 25, 104830. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104830>
- Jing, W., Yan, Y., Kim, I., Sarvi, M., 2016, Electric vehicles: A review of network modelling and future research needs, *Adv. Mech. Eng.*, 8.
- Kang, H., Jung, S., Kim, H., An, J., Hong, J., Yeom, S., Hong, T., 2025, Life-cycle environmental impacts of reused batteries of electric vehicles in buildings considering battery uncertainty, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114936. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114936>
- Karimi, G., Li, X., 2013, Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles, *Int. J. Energy Res.*, 37, 13–24.
- Khanna, D., Gemechu, E., Mahbub, N., Joy, J., Kumar, A., 2025, Assessment of life cycle environmental impacts of materials, driving pattern, and climatic conditions on battery electric and hydrogen fuel cell vehicles in a cold region, *Environmental Impact Assessment Review*, 110, 107680. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107680>
- Kim, H., Park, K.Y., Hong, J., Kang, K., 2014, All-graphene-battery: Bridging the gap between supercapacitors and lithium ion batteries, *Sci. Rep.*, 4, 5278.

- Li, Y., 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, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 113, 109254.
- Li, L., Wang, Z., Gao, F., Wang, S., Deng, J., 2020, A family of compensation topologies for capacitive power transfer converters for wireless electric vehicle charger, *Appl. Energy*, 260, 114156.
- Liu, L., Kong, F., Liu, X., Peng, Y., Wang, Q., 2015, A review on electric vehicles interacting with renewable energy in smart grid. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 51, 648–661.
- 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, *J. Power Sources*, 226, 272–288.
- Lumley, G., 2025, Are We Running Out of Fossil Fuels?, <https://bkvenergy.com/learning-center/running-out-of-fossil-fuels/#:~:text=for%20energy%20grow.-,Oil,United%20States%20and%20Saudi%20Arabia>.
- Maharaj, K., 2024, The History of Electric Cars, <https://ama.ab.ca/articles/evs-and-history-of-electric-cars>
- Mahmud, K., Town, G.E., Morsalin, S., Hossain, M., 2018, Integration of electric vehicles and management in the internet of energy, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 82, 4179–4203.
- Mak, H.Y., Rong, Y., Shen, Z.J.M., 2013, Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping, *Manag. Sci.*, 59, 1557–1575.
- Neugebauer, M., Żebrowski, A., Esmer, O., 2022, Cumulative emissions of CO<sub>2</sub> for electric and combustion cars: A case study on specific models, *Energies*, 15, 7, 2703. <https://doi.org/10.3390/en15072703>
- Picatoste, A., Justel, D., Mendoza, J. M. F., 2022, Circularity and life cycle environmental impact assessment of batteries for electric vehicles: Industrial challenges, best practices and research guidelines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112941. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112941>
- Rahman, I., Vasant, P.M., Singh, B.S.M., Abdullah-Al-Wadud, M., Adnan, N., 2016, Review of recent trends in optimization techniques for plug-



- in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 58, 1039–1047.
- Regett, A., 2019, Carbon footprint of electric vehicles-a plea for more objectivity, *Forschungsstelle für Energiewirtschaft*, 8, 2, [https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2020/10/Carbon\\_footprint\\_EV\\_FfE.pdf](https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2020/10/Carbon_footprint_EV_FfE.pdf)
- Richardson, D.B., 2013, Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 19, 247–254.
- Safarian, S., 2023, Environmental and energy impacts of battery electric and conventional vehicles: A study in Sweden under recycling scenarios, *Fuel Communications*, 14, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.fueco.2022.100083>
- Sahin, H., Esen, H., 2024, Well-to-Wheel emissions of electric vehicles in Türkiye and emission mitigation by renewable penetration, *Renewable Energy*, 235, 121344. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121344>
- 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.
- Sevdari, K., Calearo, L., Bakken, B.H., Andersen, P.B., Marinelli, M., 2023, Experimental validation of onboard electric vehicle chargers to improve the efficiency of smart charging operation, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103512, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103512>.
- Schuller, A., Hoeffler, J., 2014, Assessing the impact of EV mobility patterns on renewable energy oriented charging strategies, *Energy Procedia*, 46, 32–39.
- Shang, H., Sun, Y., Huang, D., Meng, F., 2024, Life cycle assessment of atmospheric environmental impact on the large-scale promotion of electric vehicles in China. *Resources, Environment and Sustainability*, 15, 100148. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2024.100148>
- Shen, Y.-S., Huang, G.-T., Chang-Chien, C.-L., Huang, L. H., Kuo, C.-H., Hu, A.H., 2023, The impact of passenger electric vehicles on carbon reduction and environmental impact under the 2050 net zero policy in

- Taiwan, Energy Policy, 183, 113838.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113838>
- Soares, L. O., Sodre, J.R., Boloy, R.A.M., 2025, Lifecycle assessment and environmental impacts of hybrid electric vehicles fuelled by bioethanol and biogas, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 216, 115652.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115652>
- Statista, 2025, Automotive industry,  
<https://www.statista.com/topics/1487/automotive-industry/>
- Suganya, R., Leo Joseph, L.M.I., Kollem, S., 2024, Understanding lithium-ion battery management systems in electric vehicles: Environmental and health impacts, comparative study, and future trends: A review, Results in Engineering, 24, 103047.  
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103047>
- Sullivan, J.L., Baker, R.E., Boyer, B.A., Hammerle, R.H., Kenney, T.H., Muniz, L., Wallington, T.J., 2004, CO<sub>2</sub> emission benefit of diesel (versus gasoline) powered vehicles, Environ. Sci. Technol., 38, 12, 3217–3223
- Tahir, H., Gelani, H.E., El-Ferik, S., Tayyab, M., Khosravi, N., 2025, Electric vehicles and renewable energy for sustainable mobility: Insights from bibliometric, topic modeling, and societal impact analyses, Energy Strategy Reviews, 61, 101827.  
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101827>
- 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, Renew. Sustain. Energy Rev., 53, 720–732.
- Tesla, 2025, Electric cars, <https://www.tesla.com/>
- Toyota, 2025, Electric cars, <https://www.toyota.com/electrified-vehicles/find-your-match/>
- U.S. Department of Energy's Vehicle Technologies Office, 2025, <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work#:~:text=Key%20Components%20of%20an%20All,and%20the%20torque%20it%20produces.>

- Vasant, P., Marmolejo, J.A., Litvinchev, I., Aguilar, R.R., 2019, Nature-inspired meta-heuristics approaches for charging plug-in hybrid electric vehicle. *Wirel. Netw.*, 26, 4753–4766.
- Xing, Y., Ma, E.W., Tsui, K.L., Pecht, M., 2011, Battery management systems in electric and hybrid vehicles, *Energies*, 4, 1840–1857.
- Yang, S., Yao, J., Kang, T., Zhu, X., 2014, Dynamic operation model of the battery swapping station for EV (electric vehicle) in electricity market, *Energy*, 65, 544–549.
- Vasirani, M., Kota, R., Cavalcante, R.L.G., Ossowski, S., Jennings, N.R., 2013, An Agent-Based Approach to Virtual Power Plants of Wind Power Generators and Electric Vehicles, *IEEE Trans. Smart Grid*, 4, 1314–1322.
- Wang, Y., Witlox, F., 2025, Global trends in electric vehicle adoption and the impact of environmental awareness, user attributes, and barriers, *Energy Reports*, 13, 1125–1137. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.12.054>
- Wang, Z., Shuai, S., Li, Z., Yu, W., 2021, A review of energy loss reduction technologies for internal combustion engines to improve brake thermal efficiency. *Energies*, 14, 20, 6656. <https://doi.org/10.3390/en14206656>
- WHO, 2024, Air quality, energy and health, <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts>
- World Economic Forum, 2025, Transforming Energy Demand, <https://initiatives.weforum.org/energy-and-industry-transition-intelligence/transforming-energy-demand>
- 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, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 49, 365–385.

## **BÖLÜM 5**

### **TEKNOLOJİK GELİŞMELERİN MERMER YÜZEY İŞLEME SÜREÇLERİNE ETKİSİ**

Doç.Dr. Abdul Vahap KORKMAZ<sup>1</sup>

Gürkan AKSOY<sup>2</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214627>

---

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye. [avkorkmaz@aku.edu.tr](mailto:avkorkmaz@aku.edu.tr), orcid id: 0000-0001-8691-1937.

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanobilim ve Nanoteknoloji Ana Bilimdalı, Afyonkarahisar, Türkiye. [aksoygrkn06@gmail.com](mailto:aksoygrkn06@gmail.com).



## 1. GİRİŞ

Mermer, mimariden sanata birçok alanda estetik ve dayanıklılık özellikleriyle ön plana çıkan doğal bir taştır. Ancak mermere verilmek istenilen görünüm, doku ve işlevselliğin kazandırılması, çeşitli yüzey işleme teknikleri ile mümkündür. Bu bölümde, mermerin fiziksel özelliklerinin yanı sıra geleneksel ve modern yüzey işleme yöntemleri ayrıntılı ve sistematik bir biçimde incelenmiştir. Doğal taşlar, tarihsel süreç içerisinde yapısal dayanıklılık, estetik özellikler ve sürdürülebilirlikleri nedeniyle inşaat ve mimarlık alanında kullanılan temel malzemelerden biri olmuştur. Doğal taşların performansı ve estetik kalitesi, büyük ölçüde yüzey özellikleri ile ilgilidir. Bu nedenle, yüzey işleme teknikleri, doğal taşların mekanik dayanımı, aşınma direnci, kayma katsayısı, su emme oranı ve görsel özellikleri üzerinde kritik etkilere sahiptir. Dolayısıyla, yüzey işleme tekniklerinin doğru seçimi ve uygulanması, mermerlerin kalitesini ve uzun ömürlülüğünü garanti altına almak açısından zorunludur.

Yüzey işleme teknikleri, tarihsel olarak çekiçleme, doldurma, cilalama, honlama, kumlama gibi mekanik yöntemlerden oluşmakla birlikte, teknolojik ilerlemelerle birlikte günümüzde modern ve hibrit yöntemler olarak adlandırılan yenilikçi uygulamalar ortaya çıkmıştır. Bilgisayar destekli CNC makineleri, lazer yüzey işleme teknikleri, ultrasonik titreşim teknolojileri ve yüksek basınçlı su jeti uygulamaları, doğal taş yüzeylerinde daha hassas, tekrarlanabilir ve fonksiyonel sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemler, geleneksel tekniklerin uygulaması ile yaşanan bazı sınırlamaları ortadan kaldırarak üretim süreçlerinde otomasyonun ve dijital kontrolün entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Mermer yüzey işleme tekniklerinin başarısı uygulanan yöntemin teknolojik seviyesinin yanı sıra uygulama sürecinin bütününe hakimiyetle doğrudan bağlantılıdır. Mermerin mineral yapısından başlayarak, tüm özelliklerinin tanımlanması, üretim süreci boyunca sistematik kalite kontrol uygulamaları, nihai ürün kalitesini belirleyen temel unsurlardır. Kalite kontrol kapsamında; yüzey pürüzlülüğü, renk homojenliği, kayma direnci, mekanik dayanım ve su emme gibi parametrelerin uluslararası standartlara uygun olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde, mermer yüzey işleme tekniklerinin temel prensipleri, geleneksel yöntemlerden modern ve hibrit uygulamalara kadar olan gelişimi ile uygulama ve kalite kontrol süreçleri detaylı olarak ele alınmıştır. Amacımız

hem teorik altyapıyı hem de sektörel uygulama pratiklerini içeren bütüncül bir yaklaşım sunmak, akademik çalışmalara ve endüstriyel uygulamalara ışık tutmaktır. Bu kapsamda, mermer yüzey işlemlerinde karşılaşılan teknik zorluklar, malzeme davranışları ve yeni teknolojilerin getirdiği avantajlar bilimsel bir çerçevede tartışılmıştır.

## **2. YÜZEY İŞLEMENİN AMACI**

Mermer, yüksek dayanıklılığı, estetik görünümü ve çok yönlü kullanımı ile binlerce yıldır mimaride ve heykeltıraşlıkta tercih edilen bir malzeme olmuştur. Doğal desenleri ve renk çeşitliliğiyle dikkat çeken mermerler, içsel estetiği ve zamana meydan okuyan zarafetiyle de beğeni toplamaktadır. Üstün doğal özelliklere sahip olan mermerlerin farklı yüzey işleme yöntemleri sayesinde hem dokusu hem de parlaklığı belirgin şekilde geliştirilebilmektedir (mermeroutlet, 2025). Ancak herhangi bir işleme tabi tutulmadan ocaklardan doğal haliyle çıkarılan mermer blokları, nihai kullanıcı ihtiyaçlarını ve tasarım beklentilerini karşılayamamaktadır. Bu nedenle, mermerin estetik ve dayanım özelliklerini istenen düzeye getirmek amacıyla çeşitli yüzey işleme teknikleri uygulanmaktadır (Cevheroğlu vd., 2018). Yüzey işleme tekniklerinin uygulamasının temel amacı, taşın estetik bir görünümün kazandırılmasının yanı sıra yüksek dayanım ve işlevsellik açısından taşı optimum düzeyde kullanılabilir hale getirmektir (Gürcan, vd., 2014).

Yüzey işlemenin birincil ve en temel amacı, mermere estetik bir görünüm kazandırılması ve mermerin belirli koşullara karşı dayanıklılığının artırılmasıdır. Mermerin renk tonları, damar yolu ve doğal desenleri, yüzey işlemleri ile daha belirgin hale getirilerek yüzeylerin cazibesi, doğal desenlerinin ve renklerinin ötesine geçer ve dokusunu ve parlaklığını geliştirir (Mermeroutlet, 2025). Örneğin, cilalama işlemiyle mermerin yüzeyine yüksek parlaklık kazandırılarak renklerin doygunluğu artırılır, bu da lüks ve prestijli bir görünüm sağlar. Buna karşılık honlama gibi daha az yansıtıcı işlemler, daha sade ve doğal bir estetik sunar. Yüzey işlemleriyle kazanılan bu görsel çeşitlilik, mermerin iç ve dış mekân tasarımlarında farklı ambiyanslar yaratılmasına olanak tanımaktadır (Mermeroutlet, 2025). Estetik kaygıların ötesinde, yüzey işlemenin bir diğer önemli amacı da kullanıma uygun gereksinimleri karşılamaktır. Mermerin kullanım amacına göre belirli yüzey özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Özellikle zemin kaplamalarında ve

ıslak yüzeylerde kaymazlık son derece önemlidir. Bu tür yerlerde çekişleme, kumlama ya da alevleme gibi pürüzlülük yaratan uygulamalar sayesinde mermer yüzeyinin sürtünme katsayısı artırılarak kullanıcı güvenliği sağlanmaktadır (Tang vd., 2013). Böylece, mermer sadece dekoratif bir malzeme olmaktan çıkarak teknik ve kullanım açısından da daha güvenilir bir yapı malzemesine dönüşmektedir (De Sousa Camposinhos, 2014).

Yüzey işlemenin bir diğer önemli amacı da mermerlerin dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırmaktır. Mermer, doğası gereği atmosfer koşullarına, kimyasal etkilere ve mekanik aşınmalara karşı farklı direnç seviyelerine sahiptir. Örneğin, dış cephe uygulamalarında kullanılan mermerin UV ışınlarına, yağmur suyuna ve donma-çözülme davranışlarına karşı dayanıklı olması gerekir. Bu tür uygulamalarda uygun yüzey işleme teknikleri kullanılarak mermerin gözenekliliği azaltılarak su emme oranı düşürülür, dolayısıyla don kaynaklı çatlamaların önüne geçilmiş olunur (Huang vd., 2025). Ayrıca, belirli yüzey koruyucu işlemler ve emprenye uygulamaları ile mermerin asitli maddelere karşı direnci artırılarak yüzeyin lekelenmesi ve aşınması engellenir (Huang, vd., 2019). Bunlara ek olarak, yüzey işlemleri mermerin mekanik performansını da doğrudan etkileyebilmektedir. Yüzey aşındırma veya çekişleme gibi uygulamalar sırasında oluşan mikro çatlaklar ya da gözeneklerin giderilmesi, taşı daha homojen ve sağlam hale getirir (Gürcan vd., 2014). Bu, özellikle ağır yük taşınması gereken zemin kaplamalarında ya da dış cephe elemanlarında yapısal güvenliğin korunması açısından önem arz etmektedir. Dolayısıyla yüzey işlemleri, yalnızca yüzeysel değil; aynı zamanda iç yapısal bütünlüğü ve kaliteyi de artırıcı bir rol üstlenebilmektedir (Winkler, 2013).

Yüzey işlemenin amaçlarından biri de mermerin bakım, onarım ve kullanım kolaylığını artırmaktır (Southern Living, 2024). Parlak ve düzgün yüzeyler kir tutmaz, temizliği kolaydır; bu da uzun vadede bakım ve onarım maliyetini azaltır. Fakat bazı durumlarda kolay temizlenebilirlik yerine doğal doku ve estetik görünüm tercih edilerek tasarımın ön planda olması istenebilir. Bu da yüzey işlemenin farklı uygulama amacına göre özelleştirilebilir ve esnek bir süreç olduğunu göstermektedir.



### 3. TEMEL YÜZEY İŞLEME TEKNİKLERİ

#### 3.1 Cilalama (Polishing)

Cilalama, doğal taşlarda, özellikle de mermerde en yaygın olarak uygulanan yüzey işleme tekniklerinden biridir. Bu işlem, taşın yüzeyindeki mikro pürüzlerin giderilerek düz, parlak, yansıtıcı ve derinlik etkisi yaratan bir yüzey elde edilmesini amaçlamaktadır (Huang vd., 2024). Cilalama uygulaması, estetik görünümün ötesinde, mermerin yüzey karakteristiğini, ışık yansıtma kapasitesini, kir tutma eğilimini ve kullanım ömrünü etkileyen çok yönlü bir işlemdir. Dekoratif uygulamaların yanı sıra fonksiyonel bir dönüşüm sağlayan bu işlem, ileri düzey teknik bilgi, uygun ekipman seçimi, doğru aşındırıcılar, farklı çözeltiler, kimyasal ya da doğal sıvılar kullanılarak hassas bir şekilde yürütülmelidir (Özçelik & Costa, 2010).

Cilalama işlemi genellikle mermerin yüzeyinin mat ve pürüzsüz bir yüzey haline getirildikten sonra (honlama) gerçekleştirilmektedir. Honlama ile yüzeydeki belirgin pürüzler giderilir ve taş mat bir görünüme kavuşturulur. Cilalama uygulaması ise honlamadan sonra yüzeyin aşındırıcı tanelerle giderek daha ince düzeyde işlenmesini içermektedir. Bu süreçte sırasıyla daha ince aşındırıcı disklerle geçilerek yüzey mikrometrik seviyede düzeltilir ve sonunda ayna parlaklığına yakın bir sonuç elde edilir. Bu parlaklık, ışığın yüzeye çarpıp düzgün bir şekilde yansımaya olanak tanımaktadır. Böylece cilalama işlemi mekanik aşındırma, kimyasal destekli parlatma ve yüzey stabilizasyonu olmak üzere üç temel bileşen etrafında şekillenmektedir (Allmarblerestored, 2025). Mekanik aşındırma, elmas uçlu veya silisyum karbür esaslı disklerle yapılmaktadır (Şekil 1). Bu aşındırıcılar, sertliklerine göre sıralanır ve işlem kademeli olarak en kalından en inceye doğru ilerler. İşlem sırasında taşın aşırı ısınmasını önlemek amacıyla su ile soğutma yapılır. Kimyasal parlatma ise bazı uygulamalarda, özellikle yüksek kalsit içerikli mermerlerde, özel cilalama pastalarının veya asidik çözeltilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Bu kimyasallar, yüzeyin mikroskobik seviyede çözünerek daha düzgün hale gelmesini sağlar (Huang vd., 2024).

Cilalama uygulaması, mermerin estetik değerini artırdığı gibi taşın gözeneklerini kısmen kapatarak su ve leke emilimini azaltır. Bu da iç mekanlarda özellikle mutfak ve banyo tezgâhları gibi alanlarda hijyenik bir kullanım sağlar (Zheng vd., 2021). Ancak, cilalı yüzey uygulamalarının en önemli dezavantajı, yüksek parlaklık nedeniyle mermer zeminlerde kayganlık

riskinin artmasıdır. Bu nedenle, cilalı mermerlerin ıslak veya eğimli yüzeylerde kullanılması sakıncalıdır. Islak ve kaygan zeminlerde kullanımlar için kaymazlık sağlayan yüzey katkıları tercih edilmelidir (The Spruce, 2021). Cilalama, aynı zamanda mermerin iç yapısal hatalarını da ortaya çıkarabilmektedir. Parlak yüzey, taşın içerisindeki renk farklarını ve doğal damar yapısını daha belirgin hale getirir. Bu durum, özellikle dekoratif kullanımlarda estetik değeri artırsa da bazı yapısal uygulamalarda homojenlik açısından istenmeyebilir. Bu nedenle cilalama, mermerin doğal desenlerini vurgulayan estetik odaklı, özel mekanlar için zarif ve lüks bir görünüm istenilen projelerde daha çok tercih edilmektedir

Mermer fabrikalarında cilalama işlemi genellikle tam otomatik cilalama makineleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu cilalama makinelerinde taş yüzeyleri bir konveyör bandı üzerinde taşınarak çok kademeli parlatma sistemlerinden geçirilmektedir. Bu sayede hem zamandan tasarruf sağlanmakta hem de yüzeyde homojen bir parlaklık elde edilmektedir. Ancak el işçiliğiyle yapılan cilalama işlemlerinde, özellikle mimari restorasyon projelerinde ya da özel taş işçiliği gerektiren uygulamalarda hâlâ önemini korumaktadır (Huang vd., 2024). El cilalama uygulaması, mermerin doğal özelliklerine göre farklı bölgelerde değişik parlatma yoğunluğu sağlama imkânı sunduğu için özel tasarımlarda tercih edilmektedir (Özçelik & Costa, 2010).



Şekil 1. Kalibre ve cila makinesi (Özteknik Makine, 2025)

### 3.2 Honlama (Honing)

Honlama, doğal taşlarda, özellikle de mermer ve kireçtaşı gibi nispeten yumuşak yapılı taşların yüzeylerinin pürüzsüzleştirilerek yarı mat hale getirilmesi işlemidir. Bu işlem, taş yüzeyinin pürüzsüz, mat ve kadifemsi bir doku kazanmasını sağlayan orta düzey aşındırma yöntemidir. Cilalama işlemine kıyasla daha az parlaklık sağlayan honlama, mermerin hem estetik yönünü geliştiren hem de cila parlak olmadığı için çizilmeye karşı çok dayanıklı olmasını sağlayan bir tekniktir. Özellikle iç mekân tasarımında ve modern mimari tasarımlarda sıkça tercih edilen bu teknik, pürüzsüz doku, kusursuzluk, saten görünüm, kaymazlık ve yansısız görsellik arasında başarılı bir denge kurmaktadır (Karmaden 2025; Çelik & Kavuşan, 2001).

Honlama işlemi, cilalama işleminin ön basamağı gibi görünse de kendi başına bir yüzey işleme tekniğidir. Bu işlem sırasında mermer yüzeyi, farklı aşındırıcı tanecik boyutlarına sahip zımpara taşları ya da elmas uçlar yardımıyla işlenir (Şekil 2). Kullanılan aşındırıcılar, genellikle 60 ila 400 grit aralığındadır. Daha düşük gritler (60–120), yüzeydeki daha büyük pürüzleri ve düzensizlikleri giderirken; daha yüksek gritler (200–400) yüzeyin daha homojen ve daha pürüzsüz hale gelmesini sağlar (Stone Centers, 2023). Ancak cilalamada olduğu gibi yüksek yüzey parlaklığı hedeflenmez. Honlama sonucunda mermer yüzeyi, çıkıntıların ve pürüzlerin en aza indirildiği, yumuşak bir matlıkta, yansısız ve homojen bir dokuya sahip olur (Çelik, 2003).

Yüzeyin mekanik özelliklerini etkileyen bu uygulama, mermerin gözenekliliğini kısmen azaltarak sıvı emilimini azaltır ancak tamamen engelleyemez. Bu nedenle honlanmış yüzeylerin dış etkenlere karşı korunması amacıyla emprenye gibi koruyucu uygulamalar gerekmektedir. Honlama, özellikle dış mekânlarda, ıslak yüzeylerde ve zemin kaplamalarında, cilalı yüzeylere göre daha güvenlidir. Cilalı yüzeylerin aksine honlanmış yüzeylerin yarı mat, pürüzlü olması ve ışığı yansıtmaması hem görsel konfor hem de kayganlık riskinin azaltılması açısından önemlidir. Bu kapsamda honlama, ergonomik ve güvenlik odaklı tasarım prensipleriyle de örtüşen bir uygulamadır.



**Şekil 2.** Dolgulu ve honlu traverten

Estetik açıdan değerlendirildiğinde, honlanmış mermer yüzeyleri doğal, sofistike ve sade bir görünüme sahiptir. Bu teknik, taşın damar yapısını ve renk tonlarını belirginleştirir ancak cilalı yüzeylerdeki kadar parlaklık yaratmaz. Bu durum, minimal ve modern tasarım anlayışının benimsendiği mimari projelerde honlanmış mermer kullanımını daha da yaygın hale getirmiştir. Özellikle duvar kaplamaları, iç ve dış zeminler, banyo ve mutfak tezgâhları gibi alanlarda honlama tercih edilerek mermerin doğallığı vurgulanırken, aynı zamanda kullanım güvenliği de sağlanmış olur (Çelik & Kavuşan, 2001).

Honlama işlemi, teknik olarak taşın yüzeyindeki mikro girinti ve çıkıntıların giderilerek yüzeyin yarı mat hale gelmesini sağlar. Bu süreçte yüzey, mikrometrik düzeyde inceltilerek yüzey dokusu daha düzgün hale gelir. Ancak, yüzeyde hafif bir pürüzlülük bırakılması, kaymazlık açısından önemlidir. Honlanmış yüzeyler, su tutma kapasitesi açısından cilalı yüzeylerden daha yüksektir. Bu nedenle daha sık bakım ve temizlik gerektirebilir. Honlanmış taş yüzeyleri çiziklere ve aşınmalara karşı cilalı yüzeylere oranla daha dirençlidir. Mermer yüzeylerinde parlaklık kaybı gibi görsel bozulmalar honlanmış taşlarda çok daha az fark edilmektedir (Çelik, 2003).

Endüstriyel ölçekte honlama işlemi, mermer fabrikalarında tam otomatik taş işleme hatlarında gerçekleştirilmektedir. Ayrıca özel restorasyon çalışmalarında veya küçük ölçekli projelerde manuel honlama işlemi de yapılmaktadır. Otomatik sistemlerde, taş yüzeyler konveyör üzerinde hareket ederken farklı grit boyutlarına sahip döner kafalar tarafından sırayla işlenmektedir. Böylece mermer yüzeylerinde homojen bir sonuç elde edilmesini sağlar. Manuel honlama ise taşın doğal yapısına göre yerinde müdahalelere olanak tanımaktadır. Özellikle tarihi yapılarda malzeme kaybının

en aza indirilmesi gereken durumlarda önemli avantajlar sağlamaktadır (Uğur & Gündüz, 2003).

Honlanmış yüzeyler hem fiziksel hem de kimyasal özellikler açısından bazı avantajlar sunmaktadır. Örneğin, honlanmış yüzeylerde mikroskobik çatlak oluşumu daha az olduğundan, yapısal bütünlük daha uzun süre korunabilmektedir. Ayrıca, honlanmış yüzeylerin ısı iletkenliği cilalı yüzeylere göre daha düşüktür. Termal konforun önemli olduğu alanlarda (örneğin zemin ısıtılmalı iç mekanlar) honlanmış mermer kullanmak bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Yapılan bazı yüzey direnç testlerinde, honlanmış mermerlerin çizilme direncinin cilalı yüzeylere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Ersoy vd., 2014). Sonuç olarak, honlama işlemi, mermerin estetik görünümünü doğallıkla birleştiren, farklı alanlarda kullanım olanağı sunan ve teknik açıdan avantajlı bir yüzey işleme yöntemidir. Özellikle yapı güvenliğinin ön planda olduğu projelerde, mat ve kaymaz yüzey özelliği sayesinde cilalama işlemine göre daha avantajlı bir alternatif sunar. Ancak kullanım alanına göre bakım gereksinimleri, temizlik sıklığı ve yüzey koruma tedbirleri de dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Honlama, günümüz mimarisinde sadece teknik değil; aynı zamanda tasarım stratejilerinin de önemli bir bileşeni haline gelmiştir

### 3.3 Kumlama (Sandblasting)

Kumlama (sandblasting), mermer ve diğer doğal taş yüzeylerinde desenli ve dokulu bir görünüm elde etmek için uygulanan, aşındırıcı bir yüzey işleme tekniğidir. Bu yöntemde, yüksek basınç altında belirli boyuttaki aşındırıcı tanelerin (çoğunlukla silis kumu, alüminyum oksit veya korund) mermer yüzeyine püskürtülmesiyle mikroskobik düzeyde bir pürüzlülük yaratılır. Kumlama işlemi, yüzeyin doğal desenlerini belirginleştirmeyi, kaymazlık direncini artırmayı ve taşın dış ortam koşullarına karşı dayanıklılığını arttırmayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda dekoratif ve fonksiyonel amaçlarla da kullanılan bu teknik iç ve dış mekân uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır (Rescic vd., 2014).

Kumlama işlemi, öncelikle taşın yüzey dokusunu değiştirmeye yönelik mekanik bir işlemdir. Yüksek hızlı farklı boyutlarda kumların taş yüzeyine çarpmasıyla yüzeyde kontrollü bir erozyon oluşturulur. Bu işlem, cilalı ya da honlanmış yüzeyin aksine daha mat ve homojen bir pürüzlülük sağlar. Bu

yüzey, ışığı düzensiz bir şekilde yansıttığı için yansımaz, doğal bir görünüm elde edilir. Özellikle modern mimaride tercih edilen sade ve dokulu yüzeyler, kumlama işlemiyle elde edilen bu görsel özelliklere dayanmaktadır (Çelik, 2003).

Kumlama, yüzeydeki mikro pürüzleri artırarak kaymazlık (anti-slip) özelliğini ciddi ölçüde iyileştirmektedir (Rescic vd., 2014). Bu özellikleri nedeniyle dış cephe kaplamalarında, kaldırımlarda, merdiven basamaklarında ve havuz kenarlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Cilalı mermerlerin ıslak zeminde oluşturduğu kaygan yüzey problemi, kumlanmış taşlar ile büyük ölçüde ortadan kaldırılmaktadır. Ayrıca bu yüzey işlemi, taşın mekanik dayanımını azaltmadan kullanıcının güvenlik seviyesini artıran nadir tekniklerden biridir (Dabanoğlu & Çağlayan 2024).

Teknik uygulama açısından kumlama işlemi, özel donanımlı makinelerle yapılmaktadır. Bu makinelerde aşındırıcı kum partikülleri, kompresör yardımıyla yüksek basınç altında bir hortumdan geçerek taş yüzeyine püskürtülmektedir (Şekil 3). Uygulanan yüksek basınç, kullanılan aşındırıcı malzemenin tipi, tane boyutu ve işlem süresi gibi parametreler, yüzey dokusunu doğrudan etkilemektedir. Örneğin, daha iri taneli ve yüksek basınçlı kumlama, taş yüzeyinde daha belirgin pürüzler oluştururken; ince taneli, düşük basınçlı uygulamalar daha yumuşak bir yüzey oluşturmaktadır. Bu da kumlama tekniğinin özelleştirilebilirliğini ve farklı tasarım taleplerine uyarlanabileceğini göstermektedir.



**Şekil 3.** Kumlama tekniği

Kumlama tekniğinin bir diğer önemli yönü de yüzey hazırlığı işlemi görmesidir. Bu işlem sayesinde taş yüzeyi, emprenye maddeleri, su itici kaplamalar veya boya gibi diğer yüzey koruyucuların uygulanmasına daha olanak tanımaktadır. Pürüzlü yüzey, kaplayıcı malzemelerin yüzeye daha iyi

tutunmasını sağlar, bu da taşın ömrünü uzatır ve dış etkenlere karşı korumasını artırır. Özellikle atmosferik etkilerin yoğun olduğu dış mekân uygulamalarında kumlama sonrası emprenye uygulamaları ile taş yüzeyinin hidrotermal dayanımı artırılabilir.

Kumlama işleminin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Aşındırıcı bir yöntem olduğu için yüzeyde mikro düzeyde malzeme kaybı meydana gelebilmektedir. Bu, taşın kalınlığı açısından toleransın düşük olduğu uygulamalarda dikkatle değerlendirilmelidir (Rescic vd., 2014). Ayrıca, işlem sırasında çevreye yayılan toz partikülleri sağlık açısından risk oluşturabileceğinden, uygun kişisel koruyucu donanım (KKD) ve toz emme sistemleriyle birlikte uygulanmalıdır. Özellikle silis içeren kumlar kullanıldığında silikozis riski göz önünde bulundurulmalı, mümkünse silis içermeyen aşındırıcılar tercih edilmelidir.

Estetik açıdan değerlendirildiğinde, kumlanmış mermer yüzeyler rustik, doğal ve sade bir görünüm sunmaktadır. Bu da taşın kendine özgün dokusunu ortaya çıkararak uygulandığı mekâna doğal bir görünüm kazandırmaktadır. Kumlanmış yüzeyler, ışık yansımalarını azaltır ve yüzeydeki renk varyasyonlarını daha homojen şekilde yansıtarak görsel sadelik sağlar. Bu yönüyle modern, endüstriyel ve minimalist mimari anlayışlarda kumlama işlemi sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir (Çelik, 2003).

### 3.4 Çekiçleme (Bush Hammering)

Çekiçleme (*Bush Hammering*) uygulaması, doğal taş ve mermer yüzeylerine belirgin bir doku kazandırmak ve kaymazlık özelliklerini artırmak amacıyla uygulanan mekanik bir yüzey işleme tekniğidir. Bu yöntemde, özel olarak tasarlanmış çivili ya da piramidal uçlara sahip döner tokmak (çekiç) başlıkları taşın yüzeyine belirli bir kuvvetle vurularak yüzeyde düzenli ya da düzensiz çukurlar (krater benzeri izler) oluşturulur. Elde edilen yüzey hem estetik olarak doğal, rustik bir görünüm sunar, hem de fonksiyonel olarak yüksek kaymazlık performansı sağlar (Vikipedi, 2025). Özellikle dış mekân zemin kaplamalarında, merdiven basamaklarında, kaldırımlarda ve anıtsal restorasyon işlerinde çekiçleme, sıklıkla tercih edilen geleneksel bir yöntemdir (Şekil 4) (Ciccu & Bortolussi, 2010).

Çekiçleme işlemi, esasen yüzeyde mekanik deformasyon oluşturarak, taşın doğal yapısında fiziksel bir modifikasyon sağlar. Uygulanan darbe kuvveti

taşın yüzeyinde kontrollü bir şekilde mikroskobik kırılmalara ve pul dökülmelere neden olur. Bu sayede taşın yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde artırılır. Oluşturulan çukurcuklar hem görsel hem de fonksiyonel olarak yüzeye karakteristik bir görünüm kazandırır. Uygulanan çekiçlerin biçimine ve darbelerin yoğunluğuna göre yüzey dokusu değişkenlik gösterir. Örneğin, daha sık ve küçük uçlu tokmaklarla yapılan çekiçleme işlemi daha ince bir pürüzlülük sağlarken, daha iri uçlu tokmaklarla yapılan uygulamalar derin ve kaba bir doku meydana getirir.



**Şekil 4.** Doğal taş yüzeylerine çekiçleme (Bush Hammering) uygulanmış bina

Çekiçleme işlemi hem el aletleriyle manuel olarak hem de endüstriyel makine sistemleriyle yapılabilmektedir (Şekil 5). Manuel yapılan çekiçleme, özellikle küçük alanlar ve detay gerektiren restorasyon projelerinde kullanılırken; büyük ölçekli yüzey işlemlerinde pnömatik (hava basınçlı) ya da hidrolik sistemlere bağlı otomatik makineler tercih edilmektedir. Endüstriyel çekiçleme makineleri, döner tamburlar üzerine yerleştirilmiş çok sayıda çivili başlık ile çalışmaktadır. Bu sistemler, yüzeyin homojen ve bütüncül şekilde işlenmesini sağlar ve işlem süresini minimuma indirmektedir (Özçelik & Costa, 2010).

Çekiçleme uygulaması, mermer yüzeylerin kayma direncini artırması bakımından kritik bir işlemdir. Özellikle cilalı ya da honlanmış yüzeylerin ıslak zeminde oluşturabileceği kayganlık riski, çekiçlenmiş yüzeylerde minimize edilmektedir. Bu nedenle yüzey güvenliğinin ön planda tutulduğu hastane girişleri, kamu binaları, açık hava yürüyüş yolları ve tarihi merdiven restorasyonlarında çekiçleme tekniği yaygın biçimde kullanılmaktadır. Yapılan



yüzey sürtünme testleri, çekiçlenmiş yüzeylerin ıslak ve kuru koşullarda oldukça yüksek kaymazlık değerlerine sahip olduğunu göstermektedir.



**Şekil 5.** Çekiçleme tekniği

Estetik görünüm açısından çekiçlenmiş taşlar, taş yüzeyinde yarı doğal, el işçiliği hissi veren, mat ve rustik bir görünüm vermektedir. Bu nedenle geleneksel mimaride ve tarihi yapılarda sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle kireçtaşı, traverten ve granit gibi taşlarda bu yüzey işlemi doğal dokunun korunarak açığa çıkmasını sağlar. Çekiçleme işlemi, taşın damar yapısını bastırarak daha homojen ve basit bir yüzey sunmaktadır. Bu da görsel sadelik arayan mimari tasarımcıların taşta olan cazibesini arttırmaktadır.

### 3.5 Patinato (Antik Yüzey)

Patinato uygulaması, diğer adıyla antik yüzey işlemi, doğal taşların özellikle mermer, traverten ve kalker gibi yapı taşlarının yüzeyine kendi doğal sürecinde oluşmuş gibi eski bir görünüm kazandırmak amacıyla uygulanan yüzey işleme yöntemlerinden biridir. Bu teknik, yüzeyde kontrollü bir şekilde yaşlandırma etkisi yaratır; taşın zamanla aşınmış, yumuşamış ve doğal yollarla şekillenmiş gibi görünmesini sağlar. Özellikle tarihi yapıların restorasyonlarında veya nostaljik, rustik ve sıcak bir estetik elde edilmek istenen modern mimari projelerde sıklıkla tercih edilmektedir.

Patinato işlemi, mekanik, kimyasal ve termal yüzey işleme tekniklerinin kombinasyonu ile uygulanabilir. En çok tercih edilen yöntem, düşük devirli, kauçuk veya metal fırçalarla yapılan yüzey aşındırmasıdır. Bu aşındırıcı fırçalar, taş yüzeyindeki yumuşak damarları ve kılcak boşlukları selektif olarak aşındırırken, sert mineral fazları korumaktadır. Böylece taş yüzeyi, dalgalı, yumuşak geçişli, hafif mat ve doğal bir dokuya kavuşmaktadır. Bu teknik, taşın mineralojik farklılıklarını ortaya çıkarır; renk tonlarını daha da derinleştirir ve

“zaman içerisinde kendiliğinden doğal oluşmuş” etkisi bırakacak şekilde mermer yüzeyini belirginleştirir (Çelik, 2001).

Patinato yüzeyler genellikle yarı mat veya ipeksi mat olarak tanımlanmaktadır. Cilalı yüzeylere kıyasla daha az parlaktır fakat honlu yüzeylerden daha sıcak bir doku görünümü verir. Bu özellik, iç mekân uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Antik yüzey işlemi uygulanan mermerler, zemin döşemeleri, duvar kaplamaları, tezgahlar ve merdiven basamakları gibi birçok kullanım alanında hem estetik hem de kullanım avantajları sunar. Pürüzlü yapısı sayesinde orta düzeyde bir kaymazlık sağlar ve dokusal olarak da güçlü doğal taş hissini vermektedir.

Teknik uygulama süreci, genellikle aşağıdaki adımları içerir:

1. Kaba Fırçalama (Açma): Taş yüzey, sert elmas veya silisyum karbür fırçalarla ilk aşındırmaya tabi tutulur. Bu aşama, taşın yüzeyindeki bozulmaları, pürüzleri giderirken, mineral farklılıklarını ortaya çıkarmaya başlar.
2. İnce Fırçalama (Patinasyon): Daha yumuşak fırçalarla yüzey, kontrollü şekilde yumuşatılır. Bu aşamada yüzeyde mikroskobik dalgalılar oluşur, bu da doğal ve dokusal bir görünüm kazandırır.
3. Opsiyonel Kimyasal Uygulama: Bazı uygulamalarda, zayıf asidik solüsyonlarla (örneğin düşük konsantrasyonlu hidroflorik asit veya doğal taşlara özel yüzey reaktifleriyle) taşın daha homojen şekilde yaşlandırılması sağlanır.
4. Koruyucu Emprenye: Gözenekli yapının aşındırma sonrası artması nedeniyle, yüzeyin lekeler ve neme karşı daha dayanıklı hale getirilmesi amacıyla su itici veya leke önleyici emprenye maddeleri uygulanır (Çelik, 2001).

Patinato yüzey işleme tekniğinin en önemli avantajlarından biri, taşın zamanla estetik değerini kaybetmemesi ve hatta kullanıldıkça daha doğal bir görünüm kazanmasıdır (Şekil 6). Cilalı yüzeylerde zamanla oluşan çizikler ve matlaşmalar estetik açıdan olumsuz etkiler yaratabilirken, antik yüzeylerde bu tür aşınmalar yüzey dokusuyla bütünleştiği için olumsuzluk yaratmaz. Bu nedenle Patinato işlem görmüş taşlar, yoğun kullanım alanlarında (örneğin otel lobileri, kafe ve restoran zeminleri, tarihi yapıların döşemeleri) sıklıkla tercih edilmektedir.



**Şekil 6.** Patinato uygulanmış doğaltaş yapı malzemeleri

Patinato işlemi taşın yüzey sertliğini çok fazla değiştirmez, ancak yüzeyde mikroskobik pürüzlülük oluşturarak ışığın dağılmasını sağlar. Bu sayede, mermer yüzeyinin ton farkları daha belirgin hale gelir ve derinlik algısı artar. Ayrıca, çekiçleme veya kumlama gibi agresif aşındırma tekniklerine kıyasla daha az malzeme kaybına neden olur. Bu özellik mermercilik sektöründe yüksek fiyatlı doğal taşlar için büyük bir maliyet ve rekabet avantajı sağlar.

Kullanım açısından Patinato yüzeyler, şu alanlarda yoğunlukla görülür:

- Tarihi yapıların restorasyon projeleri,
- Akdeniz, Provence, rustik ve country tarzı mimari tasarımlar,
- İç mekân zemin ve duvar kaplamaları,
- Orta düzey kaymazlık gerektiren ıslak yüzeyler ve zeminleri,
- Dekoratif mobilya yüzeyleri ve aksesuarlar (örneğin masa, tezgâh, lavabo kenarları)

Antik yüzey yönteminin dez avantajı ise özellikle dış ortamda donma-çözülme döngüsüne maruz kalan bölgelerde, yüksek gözeneklilik nedeniyle su emme riskinin artmasıdır. Bu yüzden bu tür ortamlarda emprenye uygulaması zorunlu hale gelir. Ayrıca her taş türü patinato işlemi için uygun değildir; aşırı kırılgan, çok sert ya da düzensiz mineral dağılımına sahip taşlar bu işleme homojen tepkiler vermeyebilir. Bu da taşın görünümünü olumsuz etkilemektedir.

### 3.6 Alevleme (Flaming)

Alevleme (Flaming), doğal taş ve mermer yüzeylerine pürüzlü, kaymaz ve estetik açıdan rustik bir görünüm kazandırmak amacıyla uygulanan termal bir yöntemdir. Özellikle granit gibi yüksek kuvars ve feldspat içeren sert taş türlerinde sıklıkla kullanılan bu yöntem, yüksek sıcaklıktaki alevin taş yüzeyine kısa süreli tesir etmesiyle gerçekleştirilir (Şekil 7). Alevleme işlemi sonucunda taşın yüzeyinde mikroskobik düzeyde patlamalar ve yüzey çatlakları meydana gelmektedir. Bu da taşın doğal yapısını bozmadan, yüzeyde pürüzlü, homojen ve mat bir dokusal görünüm oluşturmaktadır.



Şekil 7. Doğaltaş yüzeyinde alevleme tekniği uygulaması

#### İşlemin Temel Prensibi;

Alevleme işlemi, genellikle oksijen ve asetilen veya propan gazı karışımıyla elde edilen 1000–1300°C sıcaklıktaki alevin, taşın yüzeyine yaklaşık 5–15 cm mesafeden kontrollü bir şekilde temas ettirilmesiyle yapılmaktadır. Taşın yapısında bulunan farklı mineraller, bu yüksek sıcaklık farkına karşı kendilerine özgü genleşme katsayılarına sahiptir. Özellikle kuvars taneleri, ani ısı karşısında genişleyerek yüzeyden küçük parçacıklar halinde ayrılır. Bu mikro düzeydeki termal şok, taş yüzeyinde düzensiz fakat homojen bir pürüzlülük oluşturur (Çelik, 2001).

Taş soğurken, ısıl işlem sonucu ortaya çıkan gerilimler taş yüzeyinde yüzeyel mikro çatlaklar meydana getirir, ancak bu çatlaklar genellikle fazla derine inmez ve taşı yapısal olarak zayıflatmaz. Bu da alevleme işlemini, mevcut dayanımı koruyan fakat yüzey güvenliğini de artıran bir yöntem haline

getirir. Alevlenmiş taş yüzeyler başta dış cephe kaplamaları, yürüyüş yolları, havuz kenarları, merdiven basamakları, teras döşemeleri, şehir kaldırımlarında olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunun temel sebepleri şunlardır:

- **Kaymazlık Özelliği:** DIN 51130 ve ASTM C1028 gibi uluslararası test standartlarına göre R12–R13 sınıflarında yer alarak üst düzey kaymazlık sağlamaktadır.
- **Doğal Görünüm:** Cilalı yüzeylere kıyasla daha doğal ve estetik bir görünüm sunmaktadır.
- **Dayanıklılık:** Uygun taş türlerinde işlem sonrası taşıyıcı özelliklerde anlamlı bir azalma görülmemektedir.
- **Dış Ortam Koşullarına Uygunluk:** Donma-çözülme döngülerine karşı direnç göstermektedir.

Alevleme işlemi en verimli şekilde granit gibi yüksek kuvars içeriğine sahip magmatik kayalarda uygulanmaktadır. Kuvarsın ısı karşısındaki genleşme özelliği sayesinde yüzey pürüzlüğü etkili şekilde oluşmaktadır. Bazalt, gnays, porfir, diorit ve bazı kuvarsit türleri de alevlemeye uygun taşlar arasında yer almaktadır. Ancak mermer, kalker ve traverten gibi daha yumuşak ve düşük kuvars içeren taşlarda alevleme önerilmez. Bu taşlar ısıya karşı daha hassas davrandıkları için istenilen yüzey etkisi oluşmaz, ayrıca termal bozulma riski taşır (Çelik, 2003).

İşlem Aşamaları;

1. **Yüzey Hazırlığı:** Taş yüzeyi toz, nem veya herhangi bir yabancı maddeye karşı temizlenmektedir. Yüzeyin düzgün ve homojen olması gerekmektedir.
2. **Alevleme:** El tipi alev tabancası ya da CNC kontrollü otomatik sistemlerle alev kontrollü bir hızla yüzeye uygulanmaktadır. Alev başlığı sabit tutulmayıp sürekli hareket ettirilerek, taşın aşırı ısınması ve termal zarar görmesi önlenmektedir.
3. **Soğutma:** Alevleme işleminden sonra taşın kontrollü bir şekilde soğumaya bırakılması gerekmektedir. Hızlı soğuma, taş yüzeyinde iç gerilimlerin oluşmasına, ayrışmalara ve çatlamalara yol açabileceğinden, soğuma süreci dikkatli şekilde yürütülmelidir.
4. **Temizleme:** İşlem sonrası yüzeyde kalan gevşek partiküller su veya hava ile temizlenmektedir.

Alevleme sırasında meydana gelen termal şok, taşın yüzeyine sınırlı oranda zarar verirken alt yapıya genellikle ulaşmaz. Ancak bazı taş türlerinde yüzey sertliğinde azalma veya artan su emme gibi etkiler gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle, dış ortamda kullanılacak alevlenmiş taşların suya ve lekeye karşı empenye edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, işlem sonrası taşın yüzey pH dengesinde geçici değişiklikler olabilmekte fakat bu durum zamanla normale dönmektedir.

Mekanik özellikler açısından, uygun taş türlerinde yapılan alevleme işlemi sonrasında eğilme ve basınç dayanımlarında anlamlı bir düşüş gözlemlenmez. Aksine, pürüzlü yüzeyin yapışma katsayısını artırması sebebiyle özellikle kaplama uygulamalarında avantaj sağlar.

Alevleme işleminin avantajları ve dezavantajları şu şekildedir:

Avantajlar

- Yüksek kaymazlık performansı,
- Doğal ve rustik estetik görünüm,
- Dış mekanlarda uzun ömürlü kullanım,
- Cilalı yüzeylere kıyasla daha az leke gösterme,

Dezavantajlar

- Her taş türüne uygulanamaması,
- Oksidasyona bağlı istenmeyen renk değişimleri riski,
- Artan yüzey gözenekliliği nedeniyle suya karşı daha hassas hale gelme

#### **4. MODERN VE HİBRİT YÖNTEMLER**

Doğal taş ve mermer yüzey işleme teknikleri geleneksel tekniklerin yanı sıra günümüzde teknolojik gelişmelerle birlikte önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Modern ve hibrit yöntemler olarak adlandırılan bu yeni nesil yüzey işleme teknikleri, doğal taşların estetik, mekanik ve fonksiyonel özelliklerini optimize etmek amacıyla klasik yöntemlerin üstün yanlarını, ileri mühendislik ve dijital teknolojilerle entegre ederek uygulanmaktadır. Bu yeni yaklaşımlar, doğal taş ve mermercilik sektöründe hem üretim verimliliğini artırmakta hem de kullanıcı beklentilerine daha sofistike çözümler sunmaktadır.

#### 4.1 Modern Yöntemlerin Temel Özellikleri

Modern yüzey işleme tekniklerinden en belirgin özelliklerinden biri, işlem süreçlerinin otomasyon, bilgisayar kontrollü CNC makineleri ve robotik sistemler kullanılarak yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmesidir (Gülaçtı & Durak, 2018). Bu sayede, yüzey işleme parametreleri (örn. basınç, hız, uygulama süresi) gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve değiştirilebilmekte, böylece işlem standartları ve kalitesi üst düzeye çıkarılmaktadır. Özellikle büyük mimari projelerde, detaylı geometrik yüzeylerin (kavisler, kabartmalar, logo ya da yazı işleme gibi) üretiminde modern CNC destekli yüzey işlemleri vazgeçilmezdir. Bunun yanında, yüksek basınçlı su jeti (waterjet) ile yüzey işlemleri, ultrasonik titreşim teknolojileri ve plazma yüzey modifikasyonları gibi yenilikçi teknikler de doğal taşlarda kullanılmaya başlamıştır (Demirci & Özsoy, 2024). Bu yöntemler, taş yüzeyinin çok ince katmanlarının kontrollü şekilde işlenmesine imkân tanırken, çevresel açıdan da daha temiz ve kimyasalsız uygulama seçenekleri sunar.

#### 4.2 Hibrit Yöntemlerin Tanımı ve Önemi

Hibrit yöntemler, birden fazla yüzey işleme tekniğinin ardışık veya eş zamanlı kombinasyonunu ifade eder. Örneğin, taşın yüzeyi önce mekanik olarak kumlanıp ardından lazerle ince detaylandırılması veya alevleme sonrası robotik zımparalama ile pürüzlülüğün optimize edilmesi gibi uygulamalar hibrit yaklaşımlara örnek oluşturur (Çelik & Kavuşan, 2004). Bu yöntemler, taşın farklı özelliklerine yönelik avantajları bir araya getirerek daha üstün performans, dayanıklılık ve estetik özellikler ortaya koyar.

Hibrit teknolojilerin kullanım alanları özellikle özel tasarım mimari projeleri, sanatsal uygulamalar, yüksek dayanım gerektiren dış mekân zemin kaplamaları ve antik dokunun modern yorumlanması gibi sektörlerde hızla yaygınlaşmaktadır. Örneğin, restorasyon projelerinde klasik çekiçleme veya patinato yüzeylere lazerle detaylandırma ve emprenye tekniklerinin kombine edilmesi hem otantik görünüm hem de ileri koruma sağlamaktadır.

#### 4.3 Teknolojik Yenilikler ve Otomasyon

- **CNC Kontrollü Robotik Sistemler:** CNC makineleri, doğal taş ve mermer yüzeylerinde karmaşık geometrik işlemleri yüksek hassasiyetle ve doğrulukla yaparken, robotik kollara entegre edilen sensör ve yazılımlar sayesinde yüzeyin kalitesi ve işlem parametreleri

anlık olarak ayarlanabilmektedir. Böylece hem üretim hızı artmakta hem de insan kaynaklı hata oranı azalmaktadır.

- **Lazer Yüzey İşlemleri:** Lazerle taş yüzeyinde mikro-işleme, yüzey sertleştirme ve renk değiştirme teknikleri uygulanabilmektedir. Lazer teknolojisi, birçok mermer ve doğal taş yüzeyinde hassas ve kalıcı çalışmalar yapmaya olanak tanımaktadır. Lazer, kontrollü enerji uygulaması sayesinde kimyasal kullanımını azaltırken, yüksek çözünürlüklü detay işleme olanağı sağlamaktadır. Çevre dostu ve uzun ömürlü bir işlemdir.
- **Ultrasonik Titreşim Teknolojisi:** Ultrasonik başlıklar, taş yüzeyinde mikroskobik titreşimler yaratarak aşındırma veya temizleme işlemi yapabilmektedir. Bu yöntem, özellikle hassas ve kırılğan taş türlerinde yüzey işlemi için oldukça idealdir.
- **Yüksek Basıncılı Su Jeti (Waterjet):** Su jeti ile taş yüzeyinin mekanik olarak aşındırılması hem çevre dostu hem de işlem sonrası yüzeyin doğal yapısının korunmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca su jeti, mermer yüzeylerde istenmeyen termal gerilimi en aza indirmektedir (Çelik & Kavuşan, 2004).

#### **4.4 Çevresel ve Ekonomik Avantajlar**

Modern ve hibrit yüzey işleme teknikleri, geleneksel yöntemlere kıyasla daha az malzeme kaybı, daha az atık üretimi ve daha düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sağlamaktadır. Kimyasal kullanımının minimize edilmesi, özellikle çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Aynı zamanda otomasyon ve dijital kontrollü süreçler, işçilik maliyetlerini düşürürken, üretim kapasitesini ve sürdürülebilir ürün ağını arttırmaktadır.

##### **4.4.1 Karşılaşılan Zorluklar ve Gelecek Perspektifi**

Modern ve hibrit yöntemlerin yaygınlaşması ile birlikte, bu teknolojilerin yüksek yatırım maliyetleri ve uzmanlık gerektirmesi, küçük ve orta ölçekli mermercilik ve doğal taş atölyeleri için birtakım zorlukları beraberinde getirmektedir. Ayrıca, yeni teknolojilerin taş mineralojisine etkileri ve uzun vadeli dayanıklılıkları üzerine halen devam eden araştırmalar mevcuttur.

Gelecekte, yapay zekâ destekli yüzey analiz ve işleme sistemleri, gerçek zamanlı kalite kontrol ve malzeme özelliklerine adaptif işleme tekniklerinin entegre edilmesiyle, doğal taş yüzey işlemleri çok daha kişiselleşmiş, esnek ve



daha kaliteli hale gelecektir (Demirci & Özsoy, 2024). Aynı zamanda nanoteknoloji tabanlı kaplama ve modifikasyon yöntemleriyle taş yüzeylerinin fonksiyonel özellikleri (örneğin, su iticilik, kendi kendini temizleme, antibakteriyel yüzeyler) daha çok geliştirilecektir.

## 5. UYGULAMA VE KALİTE KONTROL

Doğal taş ve mermer yüzey işleme uygulama tekniklerinin başarısı, optimum yöntemlerin seçilmesiyle birlikte uygulama aşamasındaki titizlik ve sistematik kalite kontrol prosedürleriyle de doğrudan ilişkilidir. Yüzey işleme sürecinde yapılan hata veya eksiklikler, taşın estetik değerini, mekanik dayanımını ve kullanım ömrünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, seçilen yüzey işleme uygulamalarının her aşamasında, uluslararası standartlara uygun ve bilimsel temelli kalite kontrol mekanizmalarının sürece entegre edilmesi zorunludur.

### 5.1 Uygulama Sürecinin Önemi ve Aşamaları

Mermer yüzey işleme süreci; yüzey işleme öncesi hazırlık, işlem esnası ve sonrası bakım ve onarım adımlarından oluşur. Yüzey işleme öncesinde, taş malzemenin mineralojik yapısı, nem içeriği, mekanik dayanımı ve yüzey durumu detaylıca analiz edilmelidir. Bu analizler, uygulanacak yüzey işleme tekniğinin seçiminde belirleyici rol üstlenmektedir. Örneğin, alevleme için yüksek kuvars içeriğine sahip granit tercih edilirken, kumlama işlemi tarverten, bazalt vs. farklı taş türlerinde değişen parametrelerle uygulanabilir.

Yüzey işleme uygulamasında kumanda operatörlerinin deneyimi, kullanılan ekipmanların kalibrasyonu ve iş ortamının kontrolü kalitenin garantisidir. CNC makineleri gibi otomatik sistemlerde ise programlama doğruluğu ve sensörlerin hassasiyeti, işlem sonuçlarının tutarlılığı için kritik öneme sahiptir. İşlem süresi, uygulanan basınç, sıcaklık ve diğer parametreler üretim öncesi talimat ve prosedürlerle net olarak belirlenmelidir. Uygulama sonrası ise, taş yüzeylerinin temizliği, kuru bırakılması ve gerekirse yüzey koruyucu kaplamalarla emprenye edilmesi gerekir. Bu aşamalar, taşın dış ortam koşullarına karşı dayanıklılığını artırır ve yüzeyde oluşabilecek lekelenme, renk değişimi gibi istenmeyen etkileri engeller (Makmer, 2025).

## 5.2 Kalite Kontrol Kriterleri ve Metodolojisi

Doğal taş ve mermer yüzeylerinin kalite kontrol aşamaları hem görsel hem de mekanik açıdan kapsamlı değerlendirmeler gerektirir. Uluslararası standartlar (EN, ASTM, ISO vb.) doğrultusunda gerçekleştirilen testler, yüzey işleminin başarılı olup olmadığını ortaya koyar. Temel kalite kontrol parametreleri şunlardır:

- **Yüzey Pürüzlülüğü ve Dokusu:** Mermerlerde yüzey pürüzlülüğü; profilometre, optik mikroskop veya lazer tarama sistemleri kullanılarak ölçülmektedir. İstenen pürüzlülük seviyesi, taşın kullanım amacına göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, kaymazlık gerektiren ıslak zeminlerde yüksek pürüzlülük tercih edilirken, iç mekân dekorasyonunda daha düzgün ve parlak yüzeyler tercih edilmektedir.
- **Kaymazlık Performansı:** Standart sürtünme testleri (DIN 51130, ASTM C1028 vb.) ile taş yüzeylerinin kaymazlık dereceleri belirlenmektedir. Bu testler, özellikle dış mekân uygulamalarında güvenli kullanım açısından kritik bir rol oynamaktadır.
- **Renk ve Görsel Homojenlik:** Renk ölçer cihazlar (colorimeter) kullanılarak mermer yüzeyin renk tutarlılığı değerlendirilmektedir. Özellikle patinato, alevleme veya kumlama gibi işlemlerde renk değişimi en çok karşılaşılan problemdir. Bu nedenle, renk değişimi sınırlarının kalite kriterlerinde açıkça tanımlanması gerekmektedir.
- **Mekanik Dayanım Testleri:** Basınç dayanımı, eğilme mukavemeti ve yüzey sertliği testleri, taşın işleme sonrası mekanik performansını ortaya koymaktadır. Yüzeyde aşındırma veya termal işlem uygulanmışsa, bu test sonuçlarında anlamlı bir düşüşün gerçekleşmesi beklenmektedir.
- **Su Emme ve Gözeneklilik:** Suya karşı dayanıklılık değerlendirmesi için ASTM C97 veya TS EN 13755 standartlarına uygun atmosfer basıncında su emme testleri gerçekleştirilmektedir. Yüzey işlemi sonrasında gözeneklilik artışı gözlemlenmesi durumunda, ek emprenye veya koruyucu kaplama uygulamaları önerilmektedir (Gürcan, 2012).

### 5.3 KALİTE KONTROLÜN UYGULAMADAKİ ROLÜ

Kalite kontrol, üretim süreci, saha uygulamaları ve bakım aşamalarında da titizlikle devam etmelidir. Taş yüzeylerinin kullanılacağı alanlarda zemin düzlüğü, nem oranı ve ortam koşulları, uygulama sonrası yüzey dayanıklılığını etkileyen faktörlerdir. Uygulama hatalarının erken tespiti, ileride ortaya çıkabilecek büyük bütçeli bakım onarım maliyetlerinin önüne geçecektir. Ayrıca, projelerde müşteri beklentilerinin karşılanması, mimari tasarımla uyum ve güvenlik standartlarının sağlanması kalite kontrol süreçleriyle mümkün olabilecektir. Dijital ölçüm teknolojileri, sensör tabanlı izleme sistemleri ve yapay zekâ destekli analiz yazılımları, doğaltaş ve mermercilik sektöründe kalite kontrol süreçlerinde gerek üreticileri gerekse tüketicilerin beklentilerini maksimum düzeyde karşılamış olacaktır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğal taş ve mermer yüzey işlemlerinde yüksek kalite standartlarına ulaşmak, doğru uygulama tekniklerinin seçilmesi ve titiz bir şekilde kalite kontrol sisteminin kurulması ile mümkün olabilecektir. Dolayısıyla mermer yüzey işlemleri öncesi detaylı malzeme karakterizasyon analizi, Uluslararası standartlara uygun, belgelenmiş uygulama prosedürleri, modern ölçüm cihazlarıyla desteklenen kalite testleri, uygulama sonrası bakım ve koruma tedbirleri gibi unsurlar hayati öneme sahiptir.

Mermercilik sektöründe kalite kontrol yaklaşımının yaygın hale getirilmesi ve uygulanması hem üreticiler hem de kullanıcılar açısından uzun vadeli memnuniyetin ve ekonomik sürdürülebilirliğin temelini oluşturmaktadır. Doğal taş ve mermerlerin benzersiz doğası gereği, her parti taşın karakteristik özellikleri farklı olabilmektedir. Bu nedenle kalite kontrol süreçlerinin esnek ancak kesin kriterlerle desteklenmesi gerekmektedir.

Doğal taş ve mermer yüzey işlemleri, taşların estetik ve mekanik performansını optimize etmek için kritik bir öneme sahiptir. Bu süreç, hem geleneksel yöntemlerin zamanla kazandırdığı avantajları hem de modern teknolojilerin getirdiği hassasiyet ve verimlilik imkanlarını bünyesinde barındırmaktadır. Cilalama, honlama, kumlama, çekiçleme vs. gibi temel yüzey işleme teknikleri, taşın doğal dokusunu koruyarak istenilen görsel ve fonksiyonel özellikleri kazandırırken; alevleme, patinato vs. gibi özel işlemler taş yüzeylerine kendilerine has estetik değerler katmaktadır.

Teknolojik gelişmeler ışığında ortaya çıkan modern ve hibrit yöntemler, doğal taş ve mermer yüzey işleme süreçlerine yeni bir boyut kazandırmıştır. CNC kontrollü sistemler, lazer yüzey işlemleri, ultrasonik titreşim ve yüksek basınçlı su jeti uygulamaları gibi ileri teknikler, işlem kalitesini artırmakla birlikte, üretim sürecinde standardizasyon ve otomasyonu da mümkün kılmıştır. Bu yeni gelişmeler, doğal taşların mimari ve endüstriyel uygulamalarda daha geniş ve özgün kullanım alanları bulmasına olanak sağlamaktadır.

Mermer yüzey işleme tekniklerinin uygulamalardaki başarısı kullanılan teknolojinin niteliğine ve yüzey işleminin her aşamasında uygulanan sistematik kalite kontrol ve malzeme analizlerine bağlıdır. Yüzey pürüzlülüğü, kaymazlık, renk tutarlılığı, mekanik dayanım ve su emme vs. gibi parametrelerin uluslararası standartlara uygun şekilde ölçülmesi ve değerlendirilmesi, taş ürünlerinin kalitesinin sürdürülebilirliği açısından kaçınılmazdır. Ayrıca, uygulama sonrası bakım ve koruma işlemleri, doğal taş ve mermer yüzeyinin performansını ve dayanıklılığını yükselten kritik faktörler arasındadır.

Sonuç olarak, doğal taş ve mermer yüzey işlemlerinde başarı, disiplinler arası yaklaşım, ileri teknoloji kullanımı ve kalite kontrol yaklaşımlarının entegrasyonuna bağlıdır. Gelecekte, yapay zekâ destekli süreç optimizasyonları, nanoteknoloji tabanlı kaplama sistemleri ve sürdürülebilir üretim tekniklerinin entegrasyonu ile yüzey işlemlerinin etkinliği ve çevresel uyumu daha da artırılacaktır. Bu bağlamda, doğal taş ve mermer sektöründe araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin sürdürülmesi hem akademik hem de endüstriyel perspektifte yenilikçi çözümler üretmek için kritik öneme sahiptir.

## KAYNAKÇA

- Actintool, (2025), <https://www.actintool.com/choose-the-right-bush-hammer-tools>.
- Allmarblerestored, (2025), [https://allmarblerestored.com/f/the-science-behind-marble-polishing-restoration?utm\\_source=chatgpt.com](https://allmarblerestored.com/f/the-science-behind-marble-polishing-restoration?utm_source=chatgpt.com).
- Bortolussi, A., Careddu, N., Ciccu, R., Manca, M. G., & Olla, A. (2002, October). Surface finishing of marble with abrasive water jet. In *16th International Conference on Water Jetting* (pp. 425-435). Aix en Provence, France.
- Cevheroğlu Çıra, S., Dağ, A., & Karakuş, A. (2018). Investigation of the effects of marble material properties on the surface quality. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), 6514785.
- Ciccu, R., & Bortolussi, A. (2010). Stone Surface Finishing by Pulsed Waterjets. In *Proceedings of the Global Stone Congress*.
- Çelik, M. Y. (2003). Dekoratif Doğal Yapı Taşlarının Kullanım Alanları Ve Çeşitleri. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 42(1), 3-15.
- Çelik, M. Y., & Kavuşan, G. (2001). Doğal taş ve mermerlere uygulanan yüzey şekillendirme teknikleri, 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 77, 86.
- Çetintaş, S. (2025). Polishing Performance of Muğla White Marble with Different Abrasives. *Geoheritage*, 17(1), 23.
- Dabanoğlu, A. C., & Çağlayan, M., 2024, Yıkım Sonrası Restorasyon ve Rekonstrüksiyon Uygulaması: Geleneksel Bir Diyarbakır Evi Örneği. *Kent Akademisi*, 17(6), 2337-2365.
- De Sousa Camposinhos, Rui. *Stone cladding engineering*. Springer Netherlands, 2014.
- Demirci, S., & Özsoy, S. Y. (2024). Tasarım Uygulamalarında Doğaltaş Kullanımı ve Önemi. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 6(1), 45-64.
- Elitrestorasyon, (2025), <https://www.elitrestorasyon.com/hizmetlerimiz/patinato/>.
- Ersoy, M., & Kose, H. (2001). The relationship between easiness to polishing and mechanical properties of marbles. In *Proceedings of the National Marble Symposium* (pp. 337-349).

- Ersoy, M., Yeşilkaya, L., Çelik, M. Y., & Geçer, G. (2014). Mermer Parlatma Sürecinde Bant Hızının Yüzey Kalitesine Etkisinin Araştırılması, sayfa: 153-160. *Politeknik Dergisi*, 17(4), 153-160.
- Gülaçtı, S., & Durak, E. (2018). Beş Eksenli Köprü Tipi Cnc Mermer İşleme Makinesi Tasarımı ve İmalatı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 282-293.
- Gürcan, S. (2012). Doğal Taş Standartlarının İncelenmesi ve Ce İşareti. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 51(1), 35-41.
- Gürcan, S., Goktan, R. M., & Yıldız, A. (2014). Effect of mineralogical and microstructural properties on surface roughness and gloss of some ornamental marbles subjected to polishing process. *X-Ray Spectrometry*, 43(2), 70-78.
- <https://www.makmer.com/mermer-cnc-makinelerinin-sirlari-her-zanaatkarin-bilmesi-gerekenler/>
- Huang, S., Guo, Y., Huang, J., Yin, F., & Lu, J. (2025). Research on Robotic Polishing Process of Marble with Complex Curved Surface Based on Sol-Gel Flexible Tools. *Applied Sciences* (2076-3417), 15(1).
- Huang, S., Guo, Y., Huang, J., Yin, F., & Lu, J. (2025). Research on Robotic Polishing Process of Marble with Complex Curved Surface Based on Sol-Gel Flexible Tools. *Applied Sciences* (2076-3417), 15(1).
- Huang, S., Lu, J., Chen, S., Huang, H., Xu, X., & Cui, C. (2019). Study on the surface quality of marble tiles polished with Sol-Gel derived pads. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 91(3), 485-495.
- Huang, S., Lu, J., Xu, X., & Cui, C. (2024). Surface Evolution and Optimizing Strategy for Polishing Natural Heterogeneous Marble Using Sol-Gel Diamond Pad. *Applied Sciences*, 14(18), 8314.
- Karkaş, Z. S., & Özgünler, S. A. (2021). Tarihi Yapılarda Kagir Yapı Malzemelerinin Koruma Uygulamalarında Kullanılabilecek Bir Yöntem Önerisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(3), 564-577.
- Mermeroutlet, (2025), <https://www.mermeroutlet.com/blog/mermer-yuzey-isleme-teknikleri>.
- Mermeroutlet, (2025), <https://www.mermeroutlet.com/blog/mermer-yuzey-isleme-teknikleri>

- Mermersilim, (2025), <https://www.mermersilim.com.tr/hizmetlerimiz/dogaltas-honlama#dogaltas-honlama>.
- Mikaeil, R., Ozcelik, Y., Yousefi, R., Ataei, M., & Hosseini, S. M. (2013). Ranking the sawability of ornamental stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria decision-making techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58, 118-126.
- Ozteknikmakine, (2025), <https://www.ozteknikmakine.com/?ucx=eyJzYXlmYSIgOiAidXJ1bmxlcilZXRheSIsICJsYW5nLiA6ICJ0ciIsICJwMSIgOiAiMSIsICJwMiIgOiAiMTIiLCAicDMiIDogIjI5In0=&t=KPM%2065%20Fayans%20Kalibre%20ve%20Cila%20Makinesi>.
- Özçelik, Y., & Costa, G. (2010). Su Jeti ve Bazı Geleneksel Yüzey İşleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 49(4), 13-25.
- Piatraonline, (2025), <https://www.piatraonline.co.uk/-kavala-marble-french-pattern-set-bush-hammered-2-cm>.
- Pires, V., Guerra Rosa, L., & Dionísio, A. (2014). *Durability of marble cladding — A comprehensive literature review*. Construction and Building Materials.
- Rescic, S., Tiano, P., Fratini, F., & Manganelli Del Fà, R. (2012). The micro-sandblasting technique as a new tool for the evaluation of the state of conservation of natural stone and mortar surfaces. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(2), 113–127.
- Ribeiro, C. E. G., Rodriguez, R. J. S., & de Carvalho, E. A. (2017). Microstructure and mechanical properties of artificial marble. *Construction and Building Materials*, 149, 149-155.
- Southern Living. (2024). *How to clean and care for marble surfaces*.
- Stone Centers. (2023). *Types of Limestone Finishes*. <https://stonecenters.com/blog/types-of-limestone-finishes>.
- Uğur, İ., Gündüz, L., 2003, Mermer İşleme Fabrikalarında Dar Silim-Geniş Silim ve Honlama İşlemlerinde Silim Karakteristiklerinin İrdelenmesi. IV. Mermer Sempozyumu (Mersem'2003) Bildiriler Kitabı 18-19 Aralık 2003, Isparta, Türkiye.

- Uz, A. (2021). *Tarihi yapıların koruma-onarımı için malzeme karakterizasyon yöntemlerinin değerlendirilmesi* (Master's thesis, Mimar Sinan Fine Arts University (Turkey)).
- Wikipedia. (N.D.). *Bush hammer*.  
Retrieved July 31, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Bush\\_hammer](https://en.wikipedia.org/wiki/Bush_hammer).
- Winkler, E. (2013). *Stone in architecture: properties, durability*. Springer Science & Business Media.
- Yalçın, Ç., Özdoğlar, E., & Bingöl, K. (2023). Mimaride Doğal Taş Kullanımı: Harput Şefik Gül Kültür Evi Örneği. *Fırat Üniversitesi Harput Araştırmaları Dergisi*, 10(19), 1-18.
- Zheng, S., Bawazir, M., Dhall, A., Kim, H. E., He, L., Heo, J., & Hwang, G. (2021). Implication of surface properties, bacterial motility, and hydrodynamic conditions on bacterial surface sensing and their initial adhesion. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 643722.





## CHAPTER 6

### ANALYSIS OF DATA AND RISK ASSESSMENT FOR NUCLEAR MEDICINE APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI<sup>1</sup>

Lecturer İlknur ŞAHİN<sup>2</sup>

Assist. Prof. Dr. Rezvan REZAEIZADEH<sup>3</sup>

Assist. Prof. Dr. Yosef G. Ali MADEE<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> Kastamonu University, Faculty of Science, Department of Physics, Kastamonu, Türkiye, aybaba@kastamonu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-9830-4220

<sup>2</sup> Kastamonu University, Central Research Laboratory Application and Research Center, Kastamonu, Türkiye, ilknursahin@kastamonu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-4383-3817

<sup>3</sup> Department of Engineering, Faculty of Basic Science, University of Applied Science, Ahwaz, Iran, r.rezaeizade@gmail.com, orcid id: 0000-0001-6219-6174

<sup>4</sup> Aljufra University, Faculty of Medical Technology, Department of Radiology, Hun, Libya, youseff77@hotmail.com, orcid id: 0000-0003-4652-2990



## 1. INTRODUCTION

By detecting radiation from several regions of the body when a radioactive tracer is administered to the patient, nuclear medicine imaging is a type of methodology of producing new images. On a computer, images can be generated digitally and transmitted to a nuclear medicine doctor who makes diagnosis according to the images. Radioactive tracers utilized in nuclear medicine, can be injected into vein in most cases. They may be administered orally for some studies. These tracers have no side effects and are not drugs/dyes. The radiation amount a patient get in a habitual nuclear medicine scan is generally too low. In recent years, especially in nuclear medical applications (PET, Tomography, Spect, Radiotherapy, Nuclear imaging, Radiopharmaceuticals, etc.) in the healthcare sector, data generation and risk assessment with machine learning (ML) algorithms and new optimization software applications have become very valuable for both the patient and healthcare professionals. The interior of the human body (internal organs or tissues); Non-invasive imaging with minimum energy (X-rays, gamma rays, magnetic fields, ultrasound, etc.) is called medical imaging. The basic approach of machine learning for risk assessment in nuclear medicine applications covers the following processes; for data collection we can list them as data preprocessing, model development, risk assessment. In data collection; patient data are demographic, clinical, laboratory results, while for imaging data, PET/Spec, BM-tomography, dose distributions, radiation dose measurements are evaluated as data. Post-treatment side effects or complication data have also gained importance in risk assessment. In data preprocessing; data cleaning, completing missing data and correcting erroneous data are carried out. Especially in nuclear applications, image processing and important segmentation processes have become important. In model development; dose effective estimation, average optimization, side effects, complication risk estimation, treatment effectiveness estimation and Model analyses have been developed for diagnosis. In terms of risk assessment; integration of ML algorithm outputs into clinical decision support systems, patient-based customized dose management and early detection of patients with high risk of side effects have gained importance. Table-1 classifies ML (machine algorithms) approaches suitable for nuclear medicine applications. Machine learning algorithms have helped solve problems in various engineering and

social fields in recent years, from optimal error detection (Butcher et al., 2014) to natural disaster monitoring (Pyayt et al., 2011). The advancing in machine using learning algorithms has also emerged from a need in global industrial development (Lund et al., 2014). Without the need for human intervention during operations, IoTs give permission for data collecting for a specific application. For creation of added value in many engineering fields, the collected data can be examined with data-driven techniques (Yin et al., 2015). The systems utilized in medical imaging are listed according to the type of energy; commercial imaging systems of X-Rays, industrial treatment imaging systems of ultra-sound (very high frequency) waves, fluxes emitted from radioactive materials (alpha, beta, gamma), CPU-based nuclear treatment imaging systems, high magnetic field surgical imaging systems, thermal (infrared-infrared) treatment imaging systems and optical medical imaging systems.

**Table-1.** Suitable Machine Learning (ML) Algorithms

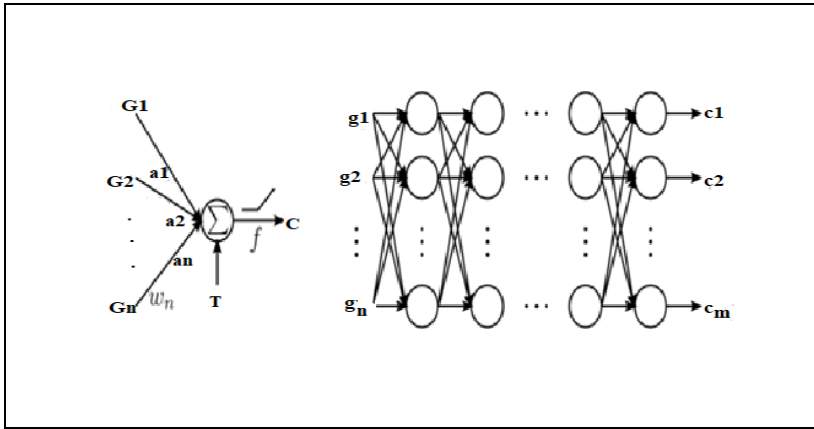
| Kind of use                              | Algorithm Suggestion                                 |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Image Classification/<br>Tumor Detection | CNN (Convulational<br>Neural Network)                |
| Dose Estimation                          | Random Forest,<br>Gradient Boosting,<br>Xcboost      |
| Side Effect<br>Risk Prediction           | Support Vector Machine (SVM),<br>Logistic Regression |
| Treatment Planning Optimization          | Reinforcement Learning                               |
| Big Patient Data Analysis                | Deep Neural Network (Dnn)<br>Ensemble Methods        |
| Anomalies/<br>Complications              | Isolation Forest,<br>Autoencoder                     |

## 2. DIAGNOSIS PLANNING AND DOSE OPTIMIZATION

In the detection of complications of the patient, the classification of lung nodules from PET images as malignant/benign can be approached with CNN models with an accuracy of over 90%. In addition, with the risk estimation of lung fibrosis after radiotherapy (using random forest with patient data+ applied dose data, a risk score can be produced. In addition, in the use of radiopharmaceuticals in nuclear medicine, we can use XGBoost for personal dosage optimization, dose optimization according to patient weight, metabolism and age. With the help of ML algorithm, we can make personalized risk estimation before treatment in terms of risk assessment, we can identify high-risk patients in advance to reduce side effects. In addition, it accelerates the clinical decision-making process and makes it objective. In terms of radiation safety, more precise dose control can be provided for patients and staff. Control and effective use of data are very important. It is an important element that requires difficulties and attention. The data sets should be balanced and have a wide spectrum and the model should be It is essential that the doctor or expert team agrees on why the model should be given in line with the decision made for the patient's treatment. Using ML (machine learning) algorithms in nuclear medical applications provides great benefits, especially in terms of personalized treatment, early risk detection and dose optimization. Deep learning-based approaches and simulations, especially in PET/SPECT and CT images, provide very strong performance. For example, the ML approach has been very successful in the effective dose optimization of radiotherapy in lung cancer patients. In addition, the ML algorithm has recently helped doctors with the successful studies of scientists in diagnosing and treatment on patients who are colon cancer. In the imaging and treatment-based analyses of the ML algorithm (PET, SPECT, MR and CT), systems are used to help diagnose the tumor or the protocol risks of the drugs to be given to cancer patients in the next stage are important in terms of treatment. It is important to take the necessary steps when determining these risks. It is important to use open source PET or CT image data sets (TCIA) as data set. In image preprocessing, filtering, normalization, malignant/benign classification with CNN provides convenience in tumor segmentation and similar situations. With risk analysis, physicians will provide optimum level of accuracy in diagnosis and treatment that will provide guidance to the patient before treatment. In

terms of treatment planning and dose optimization, in order to optimize radiotherapy or radiopharmaceutical dose with patient's personal data (age, weight, tumor type, organ functions); tumor size, organ sensitivity, feature engineering, modeling, random forest, XGBoost, model output and personalized dose recommendation are given. Using random forest, gradient boosting, XGBoost as algorithms will increase the success factor of the treatment. As a result, patient-specific detailed treatment planning is both effective and efficient in terms of patient or cancer patient comfort. Machine learning (ML) progresses tremendous progress in its usage in many fields in a time period similar to the expansion of advanced manufacturing (Rongjun et al., 2019; Gohel et al., 2020; Noorbakhsh et al., 2019).

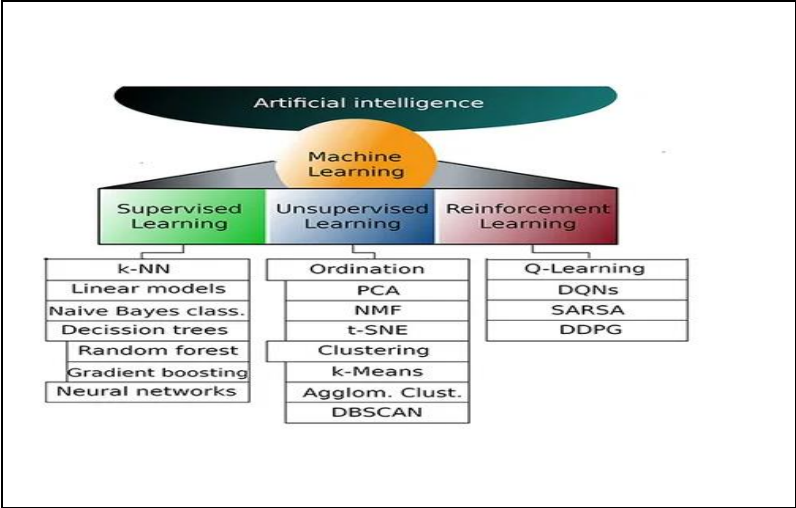
Figure-1 shows a schematic of a fully connected neural network. First of all, the left side of the figure; an artificial neuron or perceptron, output  $p$ , weighted inputs  $G = [G_1, G_2, G_3, \dots, G_n]$ , weights  $a = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n]$  and optionally an activation function  $f$  is calculated as the sum of a bias  $C$  (McCulloch, 1990; Russell, 2020, Rosenblatt, 1958; Silva et al., 2019).



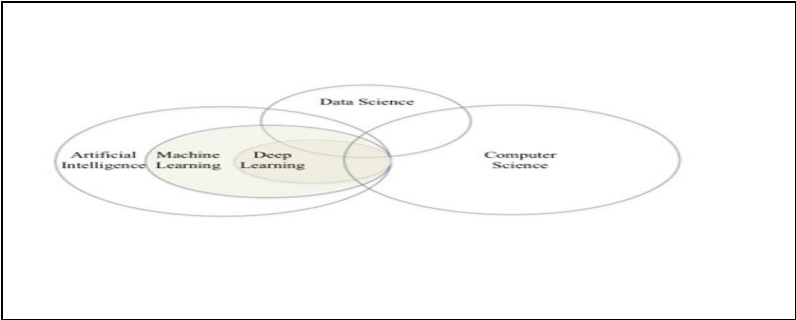
**Figure-1.** Schematic of Fully CNN (Decuyper, et al.,)

In Figure-1, the right side is an exactly connected neural network formed by adding neurons to multiple layers, which the outputs of 1 layer perform as inputs to next layer. As a result, the depicted network comprise in  $G_n$  inputs and  $C_n$  outputs. In Figure-2, (ML) artificial intelligence is a subfield of machine learning and can be separated into reinforcement and supervised/unsupervised learning. The algorithms list in each subfield is not comprehensive, on the other

hand, the most popular algorithms in each subfield. k-nearest neighbors; PCA, k-NN, NMF, non-negative matrix factorization; principal component analysis; t-SNE, DQNs, deep Q networks; state-action-reward-state-action; T-distributed stochastic neighbor embedding; SARSA, DDPG, deep deterministic policy gradient. Figure-2 and Figure-3 show that deep learning is a branch of machine learning and deep learning is a branch of artificial intelligence. The term data science is a field that uses techniques from artificial intelligence, deep learning, machine learning, and computer science.



**Figure-2.** Artificial Intelligence Sub-models (Decuyper, et al,)

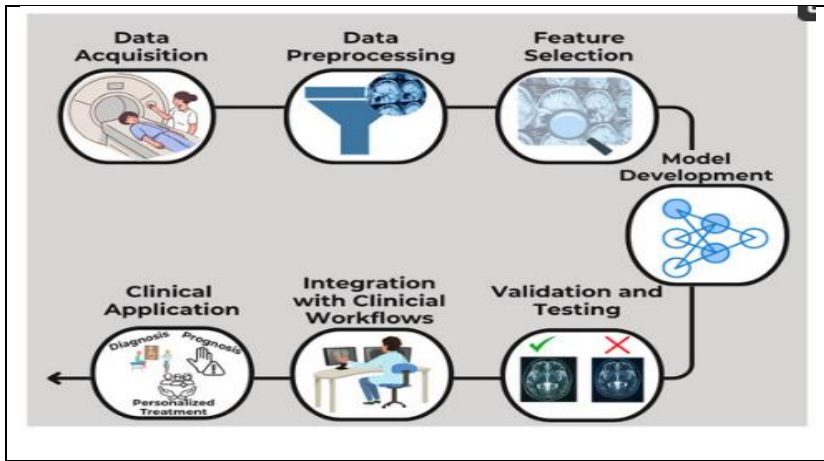


**Figure-3.** Diagram Representing AI Components (Kwang,)



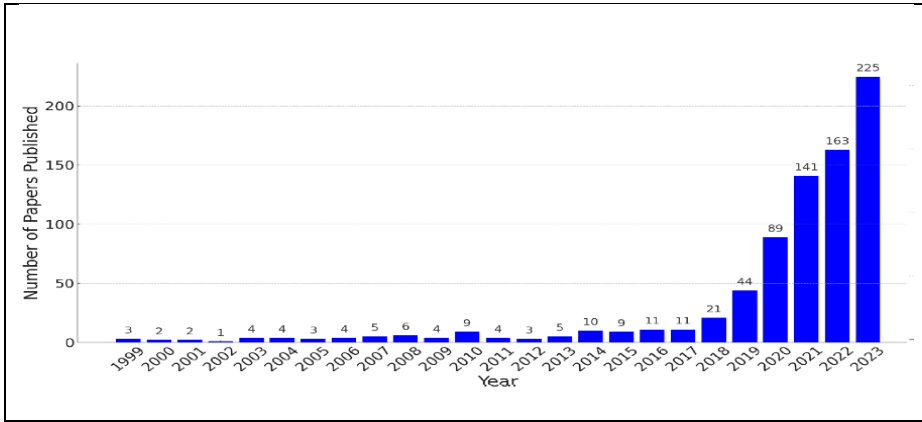
### 3. NEURO-IMAGING AI TECHNIQUES

Contemporary developed deep learning algorithms could act as recognition and object segmentation in a short time and with high accuracy. These algorithms attempt the advantages of optimizing resource use and time saving. Finally, artificial intelligence has made significant contributions to medical image processing and has been moderately integrated into daily-medical practice. Neuroimaging has seen as an important integration of artificial intelligence in different fields covering a wide range of functions. In Figure-4, CNNs are needed to be effectively utilized to the segment medulloblastomas from pediatric MRI data, enabling tumor identification precisely that is crucial for planning treatment. In Figure-5, the number of published works on medical neuroimaging and cancer involving artificial intelligence.



**Figure-4.** AI-Based Pediatric Neuroimaging (Durmuş, 2020)

Nowadays, with the help of artificial intelligence, different heuristic optimization algorithms have been developed to solve many optimization problems found in the diagnosis and treatment applications of advanced diseases such as modern medicine and nuclear imaging, especially cancer. In this context, in particular, the "grasshopper optimization algorithm" has become one of the most important of many optimization heuristic algorithms that have taken their place in the literature



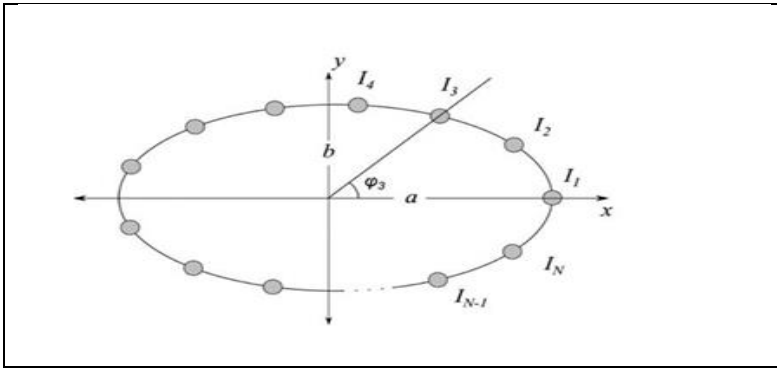
**Figure-5.** Number of Journal with AI Content (www.sciencedirect.com, 2024)

Elliptical antenna array synthesis has recently taken its place in antenna array design studies and is becoming a very popular field. This proposed method is a mathematical model that mimics the behavior of locust swarms to solve optimization problems in nature. Elliptical designs were made using the locust optimization algorithm to determine the idealized values of amplitude for the array elements. In the studies, parameters such as maximum side beam level and half beam power width were also included in the optimization problems. The optimization and successful results of this algorithm, compared to other algorithms, have been effectively used in advanced medical imaging, nuclear medicine, advanced engineering studies, stock markets, social movements and communication, space and energy fields (Durmuş, 2020). The N element is an elliptical antenna array factor given in the following equation (Lotfi Neyestanek et al., 2008). Since antenna arrays provide higher gain and directivity compared to single antennas, they are used extensively in many different areas such as radar, communication, navigation and defense systems (Balanis, 1997). Additionally, antenna arrays can suppress signals in some directions and can be steered electronically to transmit or receive signals in specific directions without the need to mechanically move the array (Balanis, 1997). The performance of intelligent design and machine learning based systems is highly dependent on an effective antenna array design. For an effective antenna array, parameters of array elements such as amplitude, location and phase must be optimized. Radiation diagrams of arrays of antenna are obtained by determining the location, amplitude, and phase parameters of array elements. The design of antenna arrays with the desired radiation diagram

has attracted considerable attention in the literature (Yuan&Su, 1991). Antenna arrays can have many different geometries. They are generally named as linear, circular, elliptical, concentric circular antenna arrays depending on their geometric structures. Elliptical antenna arrays have been a research topic that has been intensively studied in recent years. While there are many studies on linear and circular arrays in the literature, there are not enough publications on elliptical antenna arrays. One reason for this is that the synthesis of elliptical antenna arrays is more difficult than linear and circular antenna arrays. Many different methods are used in antenna array synthesis (Sharaqa&Dib, 2014). However, in recent years, with the developments in software and heuristic algorithms, classical methods have been replaced by modern methods. The fact that heuristic algorithms can be easily applied to optimization problems and have a flexible structure has made these methods more popular than classical methods. Most of the studies on synthesis of antenna array focus on circular and linear antenna arrays. On the other hand, it is a well known fact that the radiation characteristics of circular antenna arrays are similar to the radiation characteristics of elliptical antenna arrays. In addition, the basic beam of elliptical array could be easily directed in the desired one. Since elliptical antenna arrays do not have edge elements, they are less affected by mutual coupling than linear and rectangular antenna arrays (Durmuş, 2020). Many different methods have been used in the literature for elliptical antenna array synthesis (Yuan&Su, 1991). To have the desired radiation diagrams from elliptical antenna arrays with several numbers of array elements, amplitudes of array elements are calculated using the grasshopper optimization algorithm to find the optimum situation. Figure-6 show that equation-1 series  $S(\theta, \varphi)$  elliptical series  $(x_n, y_n, z_n)$  with N elements (Durmuş, 2020).

$$S(\theta, \varphi) = \sum I_n \cdot e^{(j \cdot k \cdot (x_n \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + y_n \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + z_n \cdot \cos\theta) + j\alpha_n)} \quad (1)$$

In this equation,  $I_n$ ; is the amplitude coefficient of the  $n^{\text{th}}$  element;  $k$ ; is wave number,  $\alpha_n$ , is phase coefficient value of  $n^{\text{th}}$  element, and  $x_n, y_n, z_n$ ; is the location of  $n^{\text{th}}$  element in the Cartesian coordination system. Geometric structure of N-element elliptical antenna array placed on the X-Y plane is shown in Figure-6. The values  $2a$  and  $2b$  here are the long and short axis lengths of the elliptical orbit, respectively. The formulation given in equation-2 is the cost function we used to design the elliptical antenna array.



**Figure-6.** N Element Elliptic Series Array (Durmuş, 2020)

Here,  $D$  indicates elliptical antenna arrays with lower or narrower MD values.

$$VH = Z_D \cdot Q_D + Z_{MD} \cdot Q_{MD} \quad (2)$$

Here,  $Z_D$  and  $Z_{MD}$  are the weight values of the cost function and  $Q_D$  and  $Q_{MD}$  values are the functions used for restriction, respectively (Durmuş, 2020). In addition, one of the new models supported by artificial intelligence is the grey wolf herd (GWO) model. The model has emerged as an algorithm developed to minimize the risk values and optimum performance of nuclear imaging and solar panels efficiently and effectively. In particular, this model optimization (GWO) algorithm has been proposed for solar photovoltaic maximum power point controllers. Systems that utilize solar photovoltaic energy to generate electricity are very common. However, how well they perform is affected by the elements, radiation, temperature and weather. To address this issue, maximum MPPT approaches have been created. According to experiments, their approaches outperform Perturb, Observe and Incremental Conductance algorithms. Tests show that their technology produces 6% more power on average than other controllers. Moreover, when we compare the proposed model with incremental conductance and perturb and observe controllers, the efficiency of the proposed model is 3% higher on average. The study presents the optimization and evaluation of photovoltaic grid-connected system by using the improved version of Wall algorithm, nuclear imaging, and VPFOTADF controller for PV panel systems. Their study aims to design solar cells to decrease the harmonic distortion and increase the capacity of photovoltaic grid-connected solar system by using intelligence of group. Solar

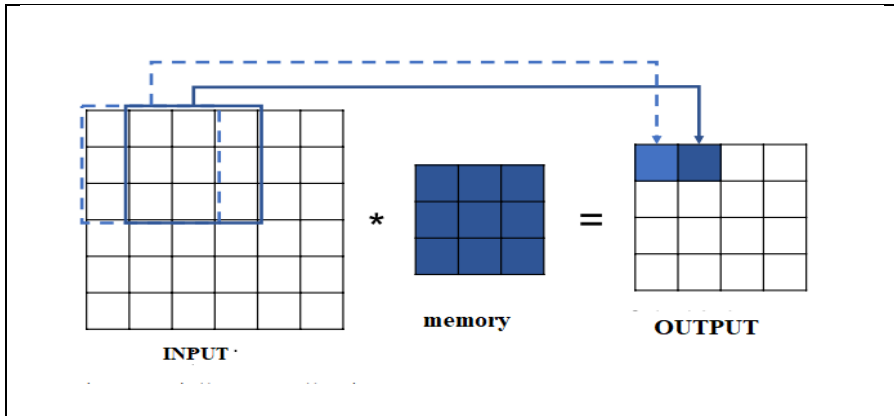
PV system has many components like photovoltaic array, multi-level inverter, boost converter, and controller. The study optimizes the boost converter by utilizing the advanced WOA algorithm. Tests and evaluation have shown that their method expands the production capacity more than the WOA algorithm. According to another study, the advanced arithmetic optimization algorithm (AOA) is asserted to extract the parameters of a one diode photovoltaic solar cell model. According to findings of experiment, results of IOAA are much more accuracy and effectiveness than those obtained using AOA.

#### **4. HYBRID OPTIMIZATION APPROACHES**

To overcome these individual limitations, hybrid algorithms have emerged. These techniques combine two or more algorithms or combine with local search methods. GA-PSO Hybrids combine the convergence of PSO with the diversity of GA. They are efficient but often computationally intensive. HHO-VMD has been recently proposed to smooth out power fluctuations in hybrid energy storage systems. GWO-LSTM integrates deep learning for temperature estimation and GWO for real-time control. WOA-SCA Fusion uses the exploratory power of SCA to avoid the local trapping behavior of WOA. Also, the improved Coati Optimization Algorithm (ICOA) which has been recently instrumental in nuclear imaging can be categorized in this paradigm due to the integration of chaos theory and adversarial learning which act as refiners of the dynamic search space control of the algorithm. Machine learning and artificial intelligence technologies, especially machine learning, are increasingly adopted in PV and nuclear medical technology parameter estimation to complement optimization approaches in PV modeling; artificial networks (ANN) are used to estimate I-V curves and identify faults in PV modules, long short-term memory (LSTM). Support vector decomposition (is particularly effective in estimating solar radiation and temperature profiles. Support vector decomposition (SVR) is particularly effective in predicting solar radiation and temperature profiles. Graph neural network (GNN) model is applied to small-scale PV and imaging risk prediction; (Gompel et al. (2023). For fault diagnosis in interconnected PV systems, although the approaches are powerful for pattern recognition, they require large datasets and are inherently unable to perform optimization. Therefore, integrating them with COA-based parameter estimators can offer a robust, hybrid framework. COA and other

algorithms COA distinguishes itself from previous methods in the following ways; behavioral modeling: inspired by the dynamic behavior of coatis, including group hunting and escape mechanisms; chaotic search: uses chaotic maps to improve randomness and avoid stagnation; Opposition-based learning (OBL) introduces a mirrored population to accelerate convergence; adaptive binary phase maintains balance between exploitation (via predator avoidance) and exploration (via iguana hunting simulation). Comparisons show that ICOA has lower RMSE, higher stability (lower SD), and is more computationally efficient than ITLBO, JSO, CPMP SO, GNDO, and WOA, with comparable or better computation. Proposed AI-enabled solar charge controllers emphasizing modular software design. Demonstrated that fuzzy-PSO hybridization improves prediction in microgrids. Introduced hybrid bat-locust and multiverse methods and improved MPPT reliability. Over the last few decades, artificial intelligence (AI) has made rapid progress, so that it has made possible by the advancing amount of computational power, available data and new algorithms. The increasing amount of data is seen in all sectors such as healthcare. All types of patient data are chained and also saved in health records electronically, like reports, laboratory results, DNA analysis, and health data from wearable devices, and activity. Medical imaging has a significant volume of health data. Based on the developments in acquisition of medical image, new procedures of imaging are being brought into practice and also diagnostic imaging procedures amount is quickly ascending. Since the early 2-dimensional X-rays, imaging of medical applications has revolutionized into dynamic, multimodal, and 3-dimensional computed tomography (CT), single-photon emission computed tomography (SPECT), magnetic resonance imaging (MRI), and positron emission tomography (PET) tests. This ascending amount and the complexity of data imaging multiplied the radiologists' workload (Maes, all., 2019; Kaelbling, all., 1996). Nuclear imaging gives images by specifying radiation from several regions of human body after application of a radioactive tracer. The records of images are on a film/computer. Some nuclear imaging tests requires many explanations of preparation. Radiologists are struggling to keep up with the increasing demand for imaging studies, which is causing delays in diagnosing and so that is it affecting the clinical decisions' accuracy. After the convolutional blocks, it can be seen a single fully connected layer. At the end of a CNN for certain tasks like regression or problems of classification, one or

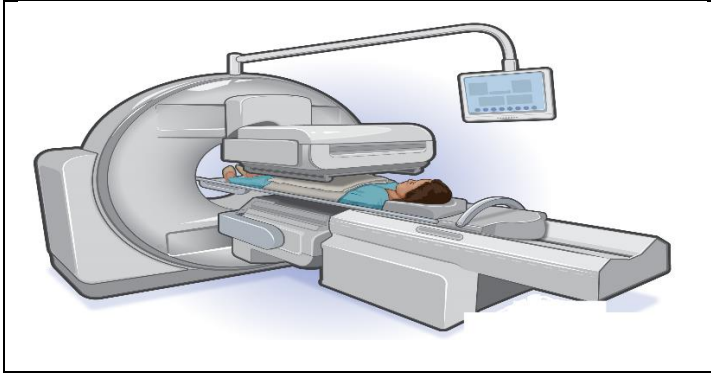
more of these are normally applied. They determine final output using the characteristics obtained by the convolutional layers. Figure-7 shows an operation of convolution between a planar input and a stride=1 and kernel of size=3. Figure-7 shows a 2-dimensional convolutional operation with a depth. The kernel size is set to a width and height= 3, resulting in a 3x3 receptive field. The kernel slides about whole input with a predefined stride/step size, and at each location, a dot product is worked between the current input patch and kernel. In that sense, at each spatial location, a feature map is obtained including the output responses of the kernel. Each convolutional layer obtains an equal amount of feature maps and includes many kernels and. The aim behind utilizing the convolutional layers is twofold: parameter sharing and sparse connectivity;



**Figure-7.** Planar Convolutional Representation (Decuyper, et al., 2021)

Figure-8, after the application of radioactive tracer material, reveals a patient undergoing a nuclear medicine imaging scan. The basic difference between other radiologic tests and nuclear medicine imaging is; the nuclear medicine imaging determines functioning of organs, while other imaging ways determines the anatomy. The main advance of evaluating the function of an organ is that it gives doctors how to plan treatment on body part being evaluated and to make a diagnosis easily. However, there is no general rules for having for a test of nuclear medicine, as each test has own necessities before the test. One test can need someone not to eat/drink anything except water for 6 hours before completion of the test. Other test can have no limits. A crystals series in the camera head can create a series of images and get the radiation from the

body organ being tested. These images are evaluated by nuclear medicine doctors to examine some abnormalities/diseases, also to make a diagnosis.



**Figure-8.** Radioactive Tracer Nuclear Medicine Imaging Scan

Electromagnetic radiation have very short wavelengths is active by making it electrically charged, to strip electrons from atoms in matter sample. X-rays/gamma rays are some examples of ionizing radiation. During the decay, gamma radiation are emitted by some radioactive materials. For instance, a gamma ray is emitted in the decay of radioactive technetium-99. In radioactive decay, where gamma radiation is emitted, the identity of the parent material is not changed because of not having particles physically emitted. In many times, the radioactive decaying of a material may result in the release of more than 1 form of radioactivity. For instance, in the radioactive decay of both alpha and gamma, and radon-222 radiation are emitted, the latter get an energy of  $8.2 \times 10^{-14}$  J per nucleus that decays. This may not have more energy, but if 1 mole of Rn atoms decays, the gamma ray energy is  $4.9 \times 10^7$  kJ. Alpha, beta, and gamma emissions have some different abilities about penetration of matter. Matter can stop the relatively large alpha particle easily. Beta particles can penetrate matter only slightly, may be a few centimeters. Gamma rays can penetrate sample deepest and also transfer huge amounts of energy to the surrounding matter. Table-2 and Table-3 show the characteristics of the 3 main radioactive emission types. They show how much the radioactive species penetrates into the substance when it interacts with it. Various radiopharmaceuticals have been utilized practically for diagnosing of diseases and treatment; on the other hand, there have been concerns about emission of radiation from ligand-labeled radionuclides (Siegel, at all., 2017).



In response to concerns about the misjudgment of the benefits and risks of imaging for patients, the concepts of radiation and radiation protection are crucial for the best usage of radiopharmaceuticals for patients and by educating nuclear medicine personnel, caregivers, medical colleagues and the public.

**Table-2 3** Radioactive Emissions Forms

| characteristic    | alpha particles | beta particles | gamma rays                |
|-------------------|-----------------|----------------|---------------------------|
| symbols           | $\alpha$        | $\beta$        | $\gamma$                  |
| identity          | helium nucleus  | electron       | electromagnetic radiation |
| charge            | 2+              | 1-             | none                      |
| mass number       | 4               | 0              | 0                         |
| penetrating power | minimal         | short          | deep                      |

**Table-3.** Types of Various Nuclear Decay Types

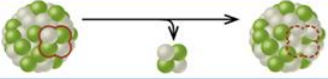
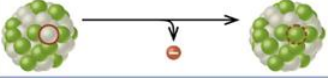
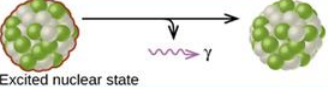
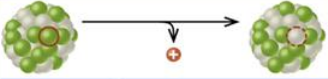
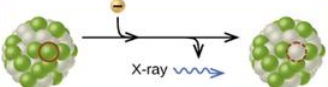
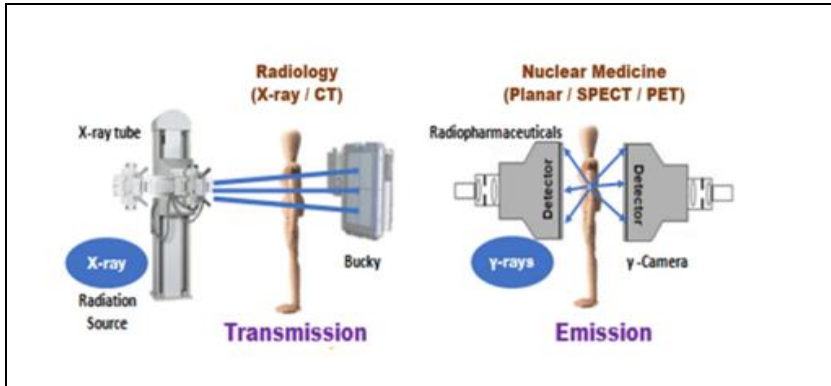
| Type              | Nuclear equation                                        | Representation                                                                      | Change in mass/atomic numbers        |
|-------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Alpha decay       | ${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$ |   | A: decrease by 4<br>Z: decrease by 2 |
| Beta decay        | ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e$          |  | A: unchanged<br>Z: increase by 1     |
| Gamma decay       | ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$                  |  | A: unchanged<br>Z: unchanged         |
| Positron emission | ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e$          |  | A: unchanged<br>Z: decrease by 1     |
| Electron capture  | ${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \gamma$ |  | A: unchanged<br>Z: decrease by 1     |

Figure-9 shows differentiation of radiation mechanisms of imaging formation between nuclear medicine departments and radiology accordingly, the ways of radiation protection may differ.



**Figure-9.** Radiology and Nuclear Medicine Departments

Based on the many developments in artificial intelligence in the image processing field and computer vision, the more processes have been initiated, specifically in artificial intelligence nuclear scanning imaging in recent years. It is indisputable that artificial intelligence has the potential to introduce nuclear medicine imaging system in nuclear medicine imaging, pave the way for precision medicine and minimize risks. In addition, artificial intelligence could process quickly, and then heat and analyze big data. Particularly, the data-driven end-to-end mapping method supplies some options for several tasks traditionally, such as the attenuation maps prediction, the prediction of internal dose maps that can be used by re-skill, and artificial intelligence has been shown to improve image quality and beautification for instantaneous multitasking.

## REFERENCES

- Butcher, K. R. (2014). The multimedia principle. In R. E. Mayer (Ed.), *The cambridge handbook of multimedia learning*, cambridge university, 2nd ed., 174–205.
- Decuyper, D., et al., (2021). Artificial neural networks for positioning of gamma interactions in monolithic pet detectors, *physics in medicine & biology*, 66(7), doi:10.1088/1361-6560/abebfc.
- Decuyper, M., et al., (2021). Artificial neural networks for positioning of gamma interactions in monolithic PET detectors, *physics in medicine & biology*, 66(7), doi: 10.1088/1361-6560/abebfc.
- Durmuş, A., (2020). Optimum design of elliptical antenna array using grasshopper optimization algorithm, *UMAGD*, 12(2), 492-499.
- Duncan McGehee, Jules S. Jaffe. "Beamforming with dense random arrays: development of a spatially shaded polyvinylidene fluoride acoustic transducer", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1994.
- Gohel, H.A, at all... ( 2020). Predictive maintenance architecture development for nuclear infrastructure using machine learning, *nuclear engineering and technology*, 52(7), 1436-1442.
- Gompel, J.V., at all..., (2023). Cost-effective fault diagnosis of nearby photovoltaic systems using graph neural networks, *energy*, 266, 126444, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126444>.
- Infrared spectral filter based on all-semiconductor guided-mode resonance
- Jacob Blevins, Ge Yang. "Machine learning enabled advanced manufacturing in nuclear engineering applications", *Nuclear Engineering and Design*, 2020
- Kaelbling, L.P., at all., (1996). Reinforcement learning: a survey, *journal of art intelligence research*, 4, 237-285.
- Kwang, G.K, (2016). Deep learning books., *healthc inform res*. 22(4):351-354.<https://doi.org/10.4258/hir.2016.22.4.351>.
- Lund, L. H., at all..., (2014). The registry of the international society for heart and lung transplantation: thirty-first official adult heart transplant report—2014; focus theme: retransplantation, 1053-2498 *front matter published by elsevier inc.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.healun.2014.08.003>.

- Maes, C., at all..., (2019). Infrared spectral filter based on all-semiconductor guided-mode resonance,
- Mcculloch WS and Pitts W. (1990).A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. 1943. Bull Math Biol., 52(2):99–115.
- Noorbakhsh, Sabad, MD., at all..., (2019) Artificial intelligence transforms the future of health care, The American journal of medicine,7,795-801.
- Optics letters, 44(12), 3090-3093, <https://doi.org/10.1364/OL.44.003090>.
- Pyayt, A.L, at all..., (2011). Artificial intelligence and finite element modelling for monitoring flood defence structures, IEEE Xplore, 2011 work shop on environmental energy and structural monitoring systems, doi: 10.1109/EESMS.2011.6067047.
- Rafa Elshara, Aybaba Hançerlioğullari, Javad Rahebi, Jose Manuel Lopez-Guede. "PV Cells and Modules Parameter Estimation Using Coati Optimization Algorithm", Energies, 2024.
- Rongjun, XEI, at all..., (2019). Collaborative extreme learning machine with a confidence interval for P2P learning in healthcare, computer networks,149(11) 127-143.
- Rosenblatt F. (1958). The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychol Rev., 65(6).
- Russell SJ and Norvig P., (2020). Artificial intelligence: a modern approach, 4<sup>th</sup> edn. Pearson series in artificial intelligence, Pearson.
- Siegel, A.S, at all..., (2017). Dose optimization to minimize radiation risk for children undergoing ct and nuclear medicine imaging is misguided and detrimental, journal of nuclear medicine, 58(6), 865-868; doi: <https://doi.org/10.2967/jnumed.117.195263>.
- Silva, M.V.F., at all... (2019). Alzheimer's disease: risk factors and potentially protective measures, Journal of Biomedical Science, 26(33), 1-
- Yin, J., at all ..., (2015). Effects of dietary supplementation with glutamate and aspartate on diquat-induced oxidative stress in piglets, plos one,1-11, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122893>.



## BÖLÜM 7

### HİBRİT BEYİN BİLGİSAYAR ARAYÜZ SİSTEMLERİNİN GERÇEK HAYATTA KULLANILABİLİRLİĞİNE YÖNELİK BİR DEĞERLENDİRME

Öğr. Gör. Dr. Sefa AYDIN<sup>1</sup>

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214662>

---

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Gümüşhane, Türkiye. sefa.aydin@gumushane.edu.tr, orcid id: 0000-0001-9965-2903



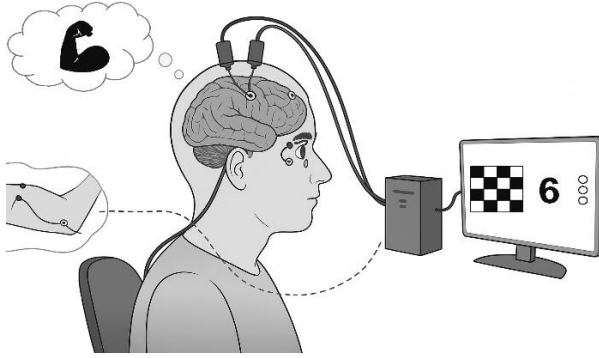
## 1. GİRİŞ

Beyin-Bilgisayar Arayüz (BBA) sistemleri, beyinde meydana gelen elektriksel faaliyetlerin çıktı komutlarına dönüştürülmesiyle dış ortamdaki cihazların kontrolünü mümkün kılan sistemlerdir. Bu teknoloji, özellikle ileri derece sinirsel rahatsızlıklara sahip veya tamamen felçli bireylerin çevreleri ile iletişim kurabilmesini ve elektronik cihazları kontrol edebilmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir [1]. İlk BBA çalışmaları 1970'lerde başlamış ve 1973 yılında Jacques Vidal tarafından "*Brain-Computer Interface*" terimi yani Beyin Bilgisayar Arayüz terimi literatüre kazandırılmıştır [2]. 1990'lı yıllara gelindiğinde ise ilk nöral-protez (nöroprotez) cihazlar insanlar üzerinde test edilmeye başlanmıştır [3]. Bu gelişmeler, beyin sinyallerinin doğrudan kullanımıyla kas veya sinir sistemine ihtiyaç duyulmaksızın iletişim ve çevresel cihazların kontrolünün mümkün olabileceğini göstermiştir.

BBA teknolojinin genel amacı, kullanıcıların istemli beyin aktivitelerini gerçek zamanlı olarak bilgisayar komutlarına dönüştürmektir. Bu sayede iletişim kurma, protez uzuv ve tekerlekli sandalye kontrolü gibi görevler geleneksel yöntemlere ihtiyaç duyulmaksızın, doğrudan beyin sinyalleriyle gerçekleştirilebilmektedir [4]. BBA sistemleri, cerrahi müdahale sonucunda (invaziv yöntem) beyin yüzeyine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla veya herhangi bir cerrahi müdahale olmaksızın (non-invaziv yöntem) Elektroensefalografi (EEG), Manyetoensefalografi (MEG), Fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI) vb. yöntemlerle sinyal toplayabilmektedir. İnvaziv yöntemlerde elektrotlar beyin yüzeyine doğrudan temas sağladığından daha yüksek sinyal kalitesi elde edilirken cerrahi riskler barındırdığından dolayı tehlikelidir. Buna karşılık pratik uygulamalarda, EEG gibi non-invaziv yöntemler kullanım kolaylığı ve güvenli oluşları nedeniyle daha yaygındır [5].

Hibrit BBA sistemleri, EEG sinyallerinin ikinci bir biyolojik sinyal veya farklı bir arayüz ile bir arada kullanılması ile elde edilen tasarımlardır. Hibrit kavramı, tıpkı iki farklı çalışma prensibine sahip motoru verimlilik amacıyla birleştiren hibrit arabalar analogisine benzer şekilde, birden fazla sinyal kaynağını sıralı veya eş zamanlı şekilde kullanarak geleneksel tek kaynaklı (tekil) BBA sistemlerine kıyasla daha üstün performans elde etmeyi hedeflemektedir [6]. Hibrit BBA sistemine ait temsili bir düzenek Şekil 1'de gösterilmiştir.





**Şekil 1.** Temsili bir hibrit BBA sistemi düzeneği.

Hibrit bir BBA sisteminin, herhangi bir BBA sisteminde olması gerektiği gibi, doğrudan beyin aktivitesine dayalı sinyal alma, kullanıcının istemli olarak bu sinyali modüle edebilmesi, anlık işleme ve geri bildirim kriterlerini karşılayabilmesi kullanılabilirlik açısından elzemdir. Hibrit sistemlerde bu kriterler, birden fazla sinyal kaynağı eşzamanlı ya da ardışık biçimde kullanılarak sağlanmaktadır. Hibrit BBA yaklaşımı 2000'lerin sonlarına doğru BBA araştırmalarında ortaya çıkmış ve 2010'lu yıllardan itibaren literatürdeki yayın sayısı belirgin şekilde artmak suretiyle hızla yaygınlaşmıştır [7]. Bu durum, hibrit BBA sistemlerinin günümüz araştırmalarında önem kazandığını göstermektedir.

Hibrit BBA sistemlerinin geliştirilme motivasyonu, tek bir sinyal türüne dayanan tekil BBA sistemlerinin sahip olduğu sınırlamaları aşmak üzerine inşa edilmiştir. Tekil BBA sistemleri yalnızca EEG sinyallerini kullanırken, karşılaşılan bozucu etkilere karşı yüksek hassasiyet, düşük doğruluk, kısıtlı komut sayısı ve yüksek hata oranı gibi sorunlar yaşayabilmektedir. Hibrit yaklaşımlar ise farklı kaynakları bir araya getirerek bu zayıflıkları gidermeyi hedeflemektedir. Nitekim hibrit sistemlerin, sınıflandırma doğruluğunu arttırma, sistemin hızını iyileştirme ve kullanıcı memnuniyetini yükseltme potansiyeline sahip olduğu yapılan çalışmalarda bildirilmektedir [7]. Mevcut avantajlar ışığında hibrit sistemler, sadece araştırma laboratuvarlarında değil, gerçek dünya uygulamalarında da BBA teknolojisinin başarılı olabilmesi için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

## 1. LİTERATÜR TARAMASI

Yapılmış güncel akademik çalışmalarda Hibrit BBA sistemleri üzerine çeşitli kombinasyonlar ve yöntemler denenmiştir. Hibrit BBA sistemleri genellikle eşzamanlı veya ardışık biçimde tasarlanmaktadır. Eşzamanlı hibrit sistemlerde iki girdi aynı anda işlenerek ortak bir kontrol çıktısı üretilirken; ardışık hibrit sistemlerde ise ilk bileşen bir "beyin anahtarı" gibi çalışıp ikinci sistemi tetiklemekte veya seçim yapmaktadır. Her iki durumda da hibrit sistemin en az bir girdi sinyali doğrudan beyinden kaydedilmekte ve birden fazla sinyal kaynağı birbirini tamamlayıcı şekilde kullanılmaktadır.

Literatürde hibrit BBA yaklaşımları genellikle şu kombinasyonlarla karşımıza çıkmaktadır:

- EEG + Elektrokülografi (EOG): Literatürde EEG tabanlı BBA sistemleri sıklıkla göz kırpması veya bakış yönü gibi istemli göz hareketleriyle zenginleştirilmiştir. Göz hareketleri, özellikle Görsel uyaran potansiyel (GUP) ve P300 gibi görsel uyaran tabanlı BBA sistemlerinde kullanıcıya ikinci bir kontrol kanalı sağlamak amacıyla kullanılmıştır [4]. Literatürde yapılan çalışmalarda [8, 9] EEG ve EOG sinyallerini eşzamanlı kullanan hibrit sistemlerin, tek başına EEG kullanan sistemlere göre belirgin şekilde daha hızlı ve etkili olduğu sıkça belirtilmiştir. Örneğin, GUP tabanlı bir BBA sistemine göz hareketlerinden elde edilen işaretlerin eklenmesiyle, kullanıcının komut verme süresinin ve bekleme zamanının önemli ölçüde azaldığı rapor edilmiştir[8]. Diğer hibrit BBA çalışmasında [9], GUP ile EOG tabanlı göz izleme birleşiminin dokuz hedefli bir sanal arayüzde uygulanması sonucu hem doğruluk hem de bilgi aktarım hızının klasik GUP tabanlı sistemlere kıyasla anlamlı derecede iyileştiği tespit edilmiştir. Bu sayede kullanıcı, örneğin bir ekrandaki hedefe bakış yönünü EOG ile belirleyip EEG ile onay vererek, tekil EEG tabanlı BBA sistemlerine oranla daha hızlı seçim yapabilmektedir.
- EEG + Elektromiyografi (EMG): Beyin sinyalleri ile EMG gibi çevresel bir biyolojik sinyalin birleştirilmesi, özellikle kısmi kas kontrolüne sahip kullanıcılar için avantajlı olabilmektedir. Oluşturulan bu hibrit yaklaşımda, kullanıcının niyeti hem beyindeki elektriksel değişimlerden hem de kalan kas aktivitesinden okunarak daha güvenilir komutlar oluşturmaktadır. Örneğin yapılan bir

çalışmada [6] kolları ve bacakları felçli (tetraplejik) bir hastada EEG sinyallerine kalp atış hızı gibi doğal bir değişkenin eklenmesiyle oluşturulan hibrit sistemin, sadece EEG tabanlı sisteme kıyasla daha yüksek performans sergilediği bildirilmiştir. Benzer şekilde EEG ile EMG verisini bir arada kullanan prototiplerde, cihaz kontrolünün doğruluğu ve hızının arttığı; kullanıcı niyetini algılama başarımı yükselmiştir. Bununla birlikte, bu yaklaşım ancak kullanıcının bir miktar kas aktivitesine sahip olduğu durumlarda faydalıdır; tamamen felçli bireylerde EMG sinyali olmadığı için bu yöntem sınırlı kalmaktadır.

- EEG + Fonksiyonel Yakın Kızılötesi Spektroskopi (FYKS): Bu yaklaşımda aynı anda beynin elektriksel aktivitesi (EEG) ve hemodinamik tepkileri (FYKS) ölçülmektedir. EEG sinyali milisaniye düzeyinde hızlı geri bildirim sağlarken, FYKS beynin kan oksijenlenme değişimlerini daha yavaş fakat mekânsal doğrulukla yakalamaktadır. Bu iki sinyalin hibrit kullanımıyla, tek başına EEG veya tek başına FYKS kullanımına göre daha yüksek sınıflandırma doğruluğu, daha fazla sayıda kontrol komutu ve iyileşmiş tepki süresi elde edilebildiği gösterilmiştir [10]. Örneğin EEG ve FYKS tabanlı hibrit sistemleri üzerinde yapılan incelemeler, bu kombinasyonun BBA performansını anlamlı derecede arttırdığını ve bilgi aktarım kapasitesini geliştirdiğini göstermiştir. Ancak EEG ve FYKS sinyalleri birlikte kullanılırken, her ikisinin de hareket artefaktlarına ve ortam gürültüsüne duyarlı olması önemli bir teknik zorluk olarak rapor edilmiştir [10]. Bu nedenle bu hibrit sistemlerde sağlam sinyal işleme tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.
- İki Farklı BBA Paradigmasının birlikte kullanımı: Hibrit sistemler, birden fazla farklı beyin kontrol paradigmasını aynı anda kullanarak da tasarlanabilmektedir. Örneğin, P300 potansiyeli ile GUP sinyalini aynı arayüzde birleştiren sistemler literatürde denenmiştir. Yapılan bir çalışmada [11], kullanıcıya hem belirli frekansta yanıp sönen hedefler (GUP) hem de rastgele vurgulanan hedefler (P300) sunularak hibrit bir kontrol sağlanmıştır. Bu hibrit sisteminin, geleneksel tekil BBA sistemlerine göre algılama doğruluğunu ve tepki hızını anlamlı ölçüde arttırdığı belirtilmiştir. Özellikle ardışık

kontrol durumlarında P300 sinyalinin bir "onay" mekanizması olarak kullanılması, istenmeyen komutları engelleyip sistemi daha güvenli hale getirmiştir [11]. Benzer biçimde Motor imgeleme (Mİ) + P300 veya Mİ + GUP gibi ikili kombinasyonlar da kullanıcıya aynı anda birden fazla komut yolu sunarak daha fazla sayıda ayırt edilebilir komut iletebilmektedir.

Farklı hibrit yaklaşımların temel avantajı, yalnızca tek bir sinyal kaynağına dayalı BBA sistemlerine kıyasla daha yüksek performans metrikleri sunmalarıdır. Birçok çalışma hibrit sistemlerin, klasik BBA sistemlerine kıyasla anlamlı ölçüde daha yüksek doğruluk ve bilgi aktarım hızı sağladığını ve kullanıcıya daha fazla sayıda komut seçeneği sunabildiğini ortaya koymuştur [10]. Örneğin yapılan kapsamlı bir incelemede [12], bir beyin sinyalinin İnsan Makine Arayüz (İMA) kaynaklı bir biyolojik sinyal ile birleştirilmesinin, iki farklı beyin sinyalinin birleştirilmesine kıyasla bile daha yüksek bir bilgi aktarım hızı elde etmeyi sağladığı vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca, hibrit sistemlerin artan performansının kullanıcı deneyimine olumlu yansdığı; çünkü sistemin hataları telafi etmesi sayesinde kullanıcının daha az hayal kırıklığı yaşadığı ve etkileşimden daha yüksek memnuniyet duyduğu rapor edilmiştir. Özetle, yapılan çalışmalarda sıklıkla hibrit BBA sistemlerinin doğru tasarlandığında hassasiyet, hız ve komut kapasitesi bakımından tekil BBA sistemlerine üstünlük sağladığı görülmektedir.

Hibrit BBA sistemleri, tekil sistemlere göre daha umut vaat edici olsa da literatürde birden fazla sensör veya sinyal türünün kullanımının sistemin donanımsal ve yazılımsal karmaşıklığını arttırması gibi çeşitli sınırlamalar belirtilmiştir. Örneğin, EEG + FYKS sinyallerini kullanan sistemlerde, kullanıcının kafasında hem elektrotlar hem de optik sensörler bulunduğu kurulum zahmetli ve maliyetli olabilmektedir. Üstelik bu iki farklı sinyalin zaman eşgüdümünü ve veri entegrasyonunu sağlamak ileri düzey algoritmalar gerektirmektedir [10]. Ayrıca, aynı anda iki farklı modelin çalışması durumunda hareket, terleme, ortam ışığı değişimi gibi etkenler her iki sistem için bozucu etki oluşturarak sistemin gürültüye duyarlılığını arttırmaktadır. Bu nedenle hibrit sistemlerde, tekil sistemlere kıyasla daha sofistike sinyal işleme ve artefakt giderme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ardışık hibrit yapıda, iki adımlı işlem süreci kullanıcı açısından gecikmeye yol açabilmektedir; örneğin önce bir "beyin anahtarı" ile sistem etkinleştirilip sonra komut

verildiğinde, toplam kontrol süresi uzayabilmektedir [4]. Kullanıcıların zihinsel yükü de hibrit sistemlerde dikkatle değerlendirilmesi gereken bir diğer husustur. Gözle bir hedefi seçmek hem zihinle onay vermek gibi iki farklı göreve odaklanmak bazı kullanıcılar için zorlayıcı olabilmektedir. Literatürde "BBA cehaleti" olarak anılan, bazı kullanıcıların belirli bir BBA paradigmasını yeterli düzeyde kullanamaması sorunu da hibrit sistemlerde ortadan kalkmış değildir. Dolayısıyla hibrit yaklaşımlar, performansı arttırmakla birlikte her kullanıcı için optimum çözüm sunma problemini de beraberinde getirmekte, kişiselleştirme gereksinimini doğurmaktadır.

Hibrit BBA sistemleri, yapılan çalışmalarda çok çeşitli uygulama alanlarında test edilmiştir. Bu alanlar ve ilgili akademik çalışmalara ait özet tarama aşağıda sunulmuştur:

- Sağlık ve rehabilitasyon: Hibrit BBA sistemleri, klinik alanda felçli veya engelli bireylerin yaşam kalitesini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Özellikle felç rehabilitasyonunda, beyin sinyallerini kas uyarımı ile birleştiren hibrit düzeneklerin kullanımı dikkat çekmektedir. Örneğin, felç geçirmiş bir hastada EEG ile kalan EMG sinyallerini birleştirerek çalışan bir hibrit BBA, hastanın bir dış iskelet veya robotik kolu daha hassas kontrol etmesini sağlayabilmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalar [13, 14], bu tür hibrit sistemlerin motor korteks aktivitelerini daha güvenilir biçimde algılayarak doğru zamanda kaslara elektriksel uyarı gönderebildiğini göstermiştir. EEG ve FYKS kaynak sinyallerini kullanan hibrit sistemler, nöro-rehabilitasyon süreçlerinde beynin motor bölgelerindeki aktiviteyi eş zamanlı izlemeyebilmesi sayesinde, hastanın tedavi sürecine dair daha zengin geri bildirim sunabilmektedir. Bir derlemede [10], hibrit BBA sistemlerinin nöro-plastisiteyi izlemek ve beyin sinyallerine dayalı adaptif terapiler geliştirmek için büyük potansiyele sahip olduğu, ancak henüz bu alanda kat edilmesi gereken mesafe bulunduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak sağlık ve rehabilitasyon alanında hibrit BBA sistemleri, hasta rehabilitasyonu, nöro-protez kontrolü ve yardımcı cihazların kullanımı gibi konularda gelecek vaat eden deneysel sonuçlar ortaya koymuştur.

- İletişim: Ağır felç nedeniyle kilit durumunda olan hastalar için BBA tabanlı iletişim sistemleri büyük önem taşımaktadır. Örneğin, P300 tabanlı yazıcı sistemleri harf seçimi için kullanıcının dikkatle bir harfi seçmesini gerektirmekte ve genellikle saniyede birkaç karakter gibi düşük hızlarda çalışmaktadır. Yapılan bir çalışmada [15], P300 harf seçimine göz takip verisi entegre edilmiş ve hibrit P300-EOG arayüzün, sadece EEG sinyali kullanan sisteme göre yaklaşık %6 daha yüksek doğruluk sağladığı ve harf seçimi için gereken uyarı sayısını azalttığı bildirilmiştir. Benzer şekilde, P300 ile GUP sinyallerini bir arada kullanan hibrit bir yazıcı düzeninde [11] ise hem yazma hızı hem de yazım doğruluğunun belirgin biçimde arttığı belirtilmiştir. Bu, kullanıcının zihinsel olarak daha az eforla daha hızlı iletişim kurabilmesi anlamına gelmektedir. İletişim amaçlı hibrit BBA sistemleri için geliştirilen bir başka yaklaşım ise beyin sinyallerini geleneksel giriş araçlarıyla birlikte kullanmaktır. Örneğin bir çalışmada [16], hibrit yazıcı sisteminde kullanıcı hem P300 ile seçim yapabilmiş hem de gerektiğinde standart bir göz kırpma hareketiyle süreci hızlandırabilmiştir. Bu durum sistemin kullanışlı olduğunu ve kullanıcıların göreceli olarak sisteme kolay adapte olabildiğini göstermiştir. Henüz bu teknolojiler deneysel aşamada olsa da hibrit BBA sistemlerinin iletişim cihazlarında kullanımıyla kilit durumundaki hastalar için daha hızlı ve güvenilir iletişim imkanları doğmaktadır.
- Robotik ve cihaz kontrolü: BBA teknolojisinin en çok araştırıldığı alanlardan biri de hareketli cihazların kontrolüdür. Özellikle beyin kontrollü tekerlekli sandalye projeleri, hibrit BBA yaklaşımının etkinliğini göstermesi açısından önemlidir. Alanda yapılan çalışmalarda tekerlekli sandalye kontrolü için hibrit sistemler önerilmiştir. Örneğin, Mİ tabanlı bir EEG sinyali ve GUP sinyali birleştiren hibrit bir BBA [11], kullanıcının sadece düşünerek ileri/geri gitmesini ve sağa/sola dönmesini sağlamıştır. Bu hibrit sistem, salt Mİ veya GUP tabanlı sistemlerle karşılaştırıldığında daha az yanlış komut üretildiği daha yüksek doğruluk elde edildiği bildirilmiştir. Başka bir dikkat çekici örnek [17] ise, BBA ile bilgisayarlı görme ve artırılmış gerçeklik (AG) tekniklerini entegre

eden tekerlekli sandalye prototipidir. Bu sistemde, kullanıcının çevresindeki nesneler bir kamera aracılığıyla otomatik olarak tanınmış ve AG gözlüğünde bir arayüz olarak sunulmuştur. Kullanıcı beyin sinyaliyle hedef nesneyi arayüzde seçip onayladığında, tekerlekli sandalye o hedefe otomatik olarak yönelmiştir. Yapılan deneylerde bu sistemle kullanıcının hedefe ulaşma başarısı ortalama %84.0 doğruluk oranı ve yaklaşık 8.1 (bit/dk) bilgi aktarım hızıyla sağlanmıştır. Dahası, hibrit sistem sayesinde kullanıcının çevreye uyum sağlaması ve engellerden kaçınması kolaylaşmıştır. Zira AG arayüz gerçek dünya görüntüsü üzerine bindirilerek kullanıcıya daha zengin bir farkındalık sunulmuştur. Genel olarak, robotik ve akıllı cihaz kontrolü alanındaki çalışmalar, hibrit BBA sistemlerinin daha güvenli, hızlı ve kullanıcı dostu bir kontrol arayüz sağladığını ortaya koymuştur.

- Eğlence, oyun ve sanal gerçeklik: Son yıllarda BBA teknolojisinin kullanım alanı, klinik gereksinimlerin ötesine geçerek sağlıklı bireyler için de yeni etkileşim yöntemleri sunmaya başlamıştır. Hibrit BBA sistemleri, Sanal gerçeklik (SG) oyunlarında veya artırılmış gerçeklik uygulamalarında "eller serbest" kontrol arayüzleri oluşturmak üzerine yoğunlaşmıştır. Örneğin, bir araştırmada [9] EEG tabanlı GUP sinyalleri ile EOG tabanlı göz takip verisi bir arada kullanılarak bir SG arayüz tasarlanmıştır. Kullanıcı, SG gözlüğü takılıyken sadece bakışlarını ve dikkatini kullanarak etkileşime girebilmiş; bu durum hibrit sistemin doğruluk ve hız açısından geleneksel yöntemleri aştığını göstermiştir. 20 katılımcıyla yapılan deneylerde, önerilen EEG + EOG hibrit arayüzünün bilgi aktarım oranı ve doğruluk değerlerinin, GUP tabanlı tekil BBA sistemlerine kıyasla anlamlı ölçüde daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bu da kullanıcılara oyunlarda veya etkileşimli simülasyonlarda daha akıcı bir deneyim sunulması anlamına gelmektedir. Bunun yanı sıra literatürde, beyin sinyallerini kullanarak dron kontrolü, robotik oyuncakları kontrol etme veya bilgisayar oyunlarında karakterleri zihnen yönlendirme gibi konsept çalışmalar da mevcuttur [18, 19, 20]. Hibrit yaklaşımlar bu tür uygulamalarda iki kademeli ama hızlı yöntemler sunarak kullanıcı deneyimini iyileştirmektedir. Henüz

erken olsa da eğlence ve sanal gerçeklik alanında hibrit BBA sistemlerinin, gelecekte geniş kullanıcı kitlesine yönelik önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir.

## 2. BULGULAR

Güncel akademik araştırmalar, hibrit BBA sistemlerinin gerçek hayatta uygulanabilirliği hakkında hem cesaret verici sonuçlar hem de önemli zorluklar ortaya koymaktadır. Örneğin, farklı hibrit sistemler ile yapılan deneylerde sağlıklı katılımcıların %80–95 aralığında değişen doğruluklarla cihaz kontrolü yapabildiği, bilgi aktarım hızlarının ise tipik olarak 5–15 (bit/dk) aralığında gerçekleştiği bildirilmiştir [17]. Bazı katılımcılar için hibrit BBA sistemleri ile %100'e yakın doğru komut iletiminin dahi mümkün olduğu vurgulanmıştır. Bu sonuçlar, hibrit yaklaşımın prensipte çalıştığını ve kullanıcı niyetini algılayıp işe yarar komutlara dönüştürebildiğini kanıtlamaktadır. Ancak, sistemi gerçek hayatın karmaşık ve değişken koşullarına taşıdığımızda laboratuvar ortamında elde edilen yüksek başarı oranlarının aynı seviyede kalması oldukça güçtür. Örneğin, kullanıcı hareket halindeyken, günlük gürültüler ve dikkat dağıtıcı etkenler BBA sinyallerinin kararlılığını azalabilmektedir. EEG ve benzeri non-invaziv sinyaller vücudun hareketlerinden, elektriksel parazitlerden ve hatta cilt terlemesinden dahi etkilenebilmektedir. Bu tür dış etkenler gerçek dünyada sistemin hata oranını arttırabilmektedir. Nitekim EEG + FYKS kaynak sinyalleri kullanan hibrit BBA sistemlerinin alt uzuv rehabilitasyonu amacıyla incelendiği bir derlemede [10], kontrollü deney koşullarında iyi sonuç veren bu sistemlerin gerçek klinik uygulamalarda onaylı bir medikal cihaz olarak kullanıma geçmesi için hala önemli engeller olduğu belirtilmiştir. Yani hibrit BBA sistemleri hâlâ büyük ölçüde araştırma prototipi düzeyindedir; günlük hayatta, ev ortamında veya hastane dışında uzun süreli ve güvenilir kullanım için gerekli olgunluğa tam erişim hala sağlanamamıştır.

Deneyisel sistemlerin başarı oranları, kullanıcı profiline göre de değişkenlik göstermektedir. Sağlıklı gönüllülerle yapılan testlerde yüksek performans elde eden bir hibrit BBA, hedef kullanıcı kitlesi olan ağır engelli bireylerde daha düşük performans sergileyebilmektedir [21]. Örneğin, çeşitli nedenlerden dolayı motor kayıp yaşayan hastalar üzerinde yapılan bazı BBA deneylerinde, kullanıcıların daha çabuk yorulduğu, konsantrasyon süresinin kısaldığı ve bu nedenle doğruluk oranlarının sağlıklı kişilere kıyasla daha fazla



düştüğü gözlemlenmiştir [22]. Yapılan bir diğer çalışmada [23] ise, hibrit BBA uygulamaları engelli ve engelsiz bireyler kullanılarak karşılaştırılmış; engelli katılımcılarda sistemin çalışabildiğini ancak kontrolün göreceli olarak daha zor olduğu belirtilmiştir. Bu bulgu, hibrit sistemlerin nihai kullanıcılar için uyarlanması gerektiğini göstermiştir. Öte yandan, kilit durumundaki az sayıdaki hastayla yürütülen bir hibrit BBA çalışmasında [24], bazı hastaların hibrit sistem yardımıyla basit de olsa iletişim kurabildiği ve tekerlekli sandalyeyi sınırlı bir ortamda hareket ettirebildiği bildirilmiştir. Bu sonuçlar tam anlamıyla klinik başarı sayılmasa da hibrit BBA sistemlerinin konsept düzeyinde doğru yolda olduğunu ve uygun koşullar sağlandığında işlevsel olabileceklerini kanıtlamıştır.

Genel olarak bakıldığında hibrit BBA sistemlerinin ticari ve klinik kullanıma dair somut örnekleri oldukça kısıtlıdır. Günümüzde BBA teknolojisiyle ilgili piyasada bulunan ürünlerin çoğu tekil EEG tabanlı cihazlardır. Hibrit BBA konseptini ticari bir ürüne dönüştüren geniş ölçekli bir örnek bulunmamaktadır. Bununla birlikte bazı firmalar ve araştırma konsorsiyumları hibrit yaklaşımları benimseyerek, EEG tabanlı iletişim cihazlarına kullanıcı göz hareketlerini algılayan modüller entegre ederek hibrit yazıcı arayüz geliştirme gibi prototip cihazlar üzerinde çalışmaktadır [25]. Yine de bu tür girişimler halen araştırma ve geliştirme aşamasında olduğunda dolayı etkin kullanıma sunulamamıştır. Öte yandan, BBA teknolojisinin geneline baktığımızda oyun ve sağlık amaçlı bazı cihazların pazarda yer almaya başladığı görülmektedir [25]. BBA ürün ve servisleri geliştiren Emotiv, Neuralink, G.tec gibi şirketlerin çalışmalarında hibrit yaklaşımların yakın gelecekte pay alması ön görülmektedir. Bu tür gelişmeler, hibrit BBA sistemlerinin laboratuvarından çıkıp ticari ürüne dönüşmesi yönünde öncü adımlar olarak görülmektedir.

Hibrit BBA sistemlerinin gerçek hayata geçişinde aşılması gereken başlıca teknik zorluklar da literatürde geniş yer tutmaktadır. Bunların ilki, sinyal kalitesinin ve sistem güvenilirliğinin ortam koşullarından olumsuz etkilenmesi durumudur [10]. Kullanıcı hareket ettiğinde, ev veya dış mekân ortamında farklı ışık, sıcaklık ve gürültü koşullarında BBA sistemlerinin performansı olumsuz etkilenmektedir. Bu durum özellikle giyilebilir EEG ekipmanlarında ve FYKS kaynaklarında belirgindir çünkü elektrotların teması bozulabileceği gibi kablosuz iletimde veri paket kayıpları da meydana

gelebilmektedir. Hareket artefaktları hibrit sistemlerde hem beyin sinyali hem diğer ek sinyali bozabilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, hibrit BBA'lar için gerçek zamanlı adaptif filtreler, artefakt tespit ve düzeltme algoritmaları geliştirmeye odaklanmaktadır [26]. İkinci önemli teknik zorluk, kalibrasyon ve eğitim sürecidir. Birden fazla sinyal kaynağının olması, kullanıcı için başlangıç kalibrasyon aşamasını uzatabilmektedir. Kullanıcıların sistemi öğrenmesi ve alışması da zaman alan bir iştir. Karmaşık bir hibrit arayüz, özellikle bilişsel yükü yüksek ise kullanıcının motivasyonunu düşürebilmektedir. Bu duruma çözüm olarak, bazı araştırmalarda [27] kalibrasyona gerek duymayan BBA yöntemleri veya kademeli öğrenme yaklaşımları önerilmiştir. Üçüncü bir teknik zorluk ise sistemin donanım entegrasyonu ve taşınabilirliğidir. Hibrit sistemler çoğu zaman çoklu cihaz donanımına ihtiyaç duyduğundan dolayı sistemlerin giyilebilir, hafif ve kablosuz hale getirilmesi güçleşmektedir. Büyük ve kablolu sistemler ev kullanımı veya günlük hayat için pratik değildir. Bu nedenle son yıllarda kablosuz EEG kulaklıklar, Bluetooth FYKS bantlar, entegre göz takipli SG başlıklar gibi teknolojiler geliştirilerek hibrit sistemlerin hacminin küçültülmesi hedeflenmektedir.

Gerçek dünya uygulamaları bakımından bir diğer problem ise etik ve yasal zorluklardır. BBA teknolojisi genel olarak, insan beynine dair hassas veriler topladığı için bir dizi etik endişeye sebep olabilmektedir. Hibrit BBA sistemleri daha kapsamlı biyolojik veri topladığından, bu konu daha hassas duruma gelmektedir. Kullanıcının beyin sinyallerinden duygu durumu, dikkat düzeyi, hatta niyetine dair ipuçları çıkarılabileceği için, bu verilerin yetkisiz kişilerce ele geçirilmesi veya kötüye kullanılması olasılığı kullanıcılar tarafından istenmeyen bir durumdur. Nitekim uzmanlar tarafından, BBA kullanımının güvenlik, gizlilik ve bilgilendirilmiş onam haklarını zedelememesi gerektiği vurgulanmakta; bu alanda erken önlemler alınmazsa zihin okuma endişelerinin yaygınlaşacağı belirtilmektedir [28]. Örneğin, bir BBA cihazının topladığı beyin verilerinin bulut sunuculara aktarılması durumunda, bu verinin siber saldırılara açık hale gelmesi ciddi bir risktir. Art niyetli bir saldırganın bir beyin kontrollü cihaza komut sızdırması veya kullanıcının istemediği halde cihazın hareket etmesine yol açması da teorik olarak mümkündür; dolayısıyla siber güvenlik boyutu önem kazanmaktadır. Etik açıdan tartışılan bir diğer husus, kullanıcının özerkliği ve sorumluluğudur. Kullanıcıların, cihazın verdiği komutlar üzerinde tam kontrol sahibi olamaması

durumunda oluşabilecek kendini makineye bağımlı hissetme veya cihazın hata yapması halinde korku hissi duyulması gibi olumsuz psikolojik etkiler araştırılmalıdır. Ayrıca bu ileri teknolojilere erişimin adil dağılımı meselesi de önemlidir. Sadece zengin veya belirli kesime ait hastaların bu imkanlara kavuşup diğerlerinin mahrum kalması, toplumsal açıdan dengeleri olumsuz etkileyebilir. BBA araştırmalarının yürütülmesi sırasında bilgilendirilmiş onam alınması, katılımcının zihinsel olarak yorulduğunda deneyin durdurulması gibi uyulması gereken araştırma etiği ilkeleri de literatürde tartışılmaktadır [25]. Özetle, hibrit BBA sistemlerinin pratikte başarılı bir şekilde hayata geçmesi için teknik engeller kadar etik, hukuki ve sosyal engellerin de dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir.

### 3. SONUÇLAR

Son yıllarda yapılan araştırmaların ışığında Hibrit BBA sistemleri, geleneksel BBA yaklaşımlarına kıyasla pratikte önemli avantajlar sunma potansiyeline sahiptir. Birden fazla sinyal kaynağını bir araya getiren bu sistemler, daha yüksek doğruluk, daha hızlı tepki ve daha fazla sayıda komut imkânı sağlayarak BBA teknolojisinin gerçek dünya uygulamalarına bir adım daha yaklaşmasını mümkün kılmaktadır. Literatür incelendiğinde, hibrit BBA sistemlerinin gerek ağır engelli bireylerin iletişim ve hareket ihtiyaçlarını karşılamada ve sağlıklı kullanıcılar için yeni nesil insan bilgisayar etkileşimi tanımlamada başarılı olabileceğini göstermektedir [29]. Örneğin, kilit sendromlu bir hasta için hibrit bir BBA yardımıyla dış dünya ile bağlantı kurabilmek veya tekerlekli sandalyeyi zihinsel komutlarla yönlendirebilmek bu teknolojinin en büyük vaadidir [30, 31]. Yine oyun ve eğitim alanlarında, sağlıklı bireylerin hibrit BBA sistemleri sayesinde cihazları ellerini kullanmadan kontrol edebilmesi, teknolojinin günlük hayata entegrasyonu açısından ufuk açııcıdır.

Bununla birlikte, mevcut çalışmalar ışığında hibrit sistemlerin sınırlılıklarını da gerçekçi bir şekilde değerlendirmek gerekmektedir. Geliştirilen sistemler laboratuvar dışında uzun süreli ve geniş katılımlı denemeler açısından oldukça sınırlıdır. Sinyal kararlılığı, uygulanabilirlik, kullanıcı eğitimi ve etik endişeler gibi konular hibrit BBA sistemlerinin önündeki başlıca engeller olarak görülmektedir. Literatürde, hibrit sistemlerin kontrollü ortamlarda başarılı olduğu ancak günlük yaşamdaki karmaşıklığa

karşı dayanıklılığının artırılması gerektiği sıkça vurgulanmaktadır [10]. Bu sistemlerin özellikle tıbbi cihaz onayı alıp klinik rutin içinde kullanılabilecek düzeye gelmeleri için alanda daha fazla çalışmaya ve bilgi birikimine ihtiyaç vardır.

Gelecekte hibrit BBA sistemlerinin gerçek hayata geçirilmesine yönelik önemli görülen bazı öneriler şunlardır:

- Donanım iyileştirmeleri ve taşınabilirlik: Hibrit sistemlerin pratik kullanımı için, elektrot ve sensör donanımlarının daha kullanıcı dostu hale getirilmesi sistem konforu ve kullanılabilirlik açısından önemli bir gerekliliktir. Kabloların azaltıldığı ve tek bir entegre başlıkla çoklu sinyal alabilen sistem çözümleri üzerinde çalışılması gerekliliği ön görülmektedir. Kuru elektrot teknolojileri, kablosuz veri iletim protokolleri ve fiziksel olarak minimize edilmiş giyilebilir cihazlar hibrit BBA sistemlerinin günlük hayata uyarlanmasını kolaylaştıracaktır. Böylelikle sistem kullanıcısı, evinde karmaşık kurulumlara gerek kalmadan cihazını aktif olarak kullanma imkanına sahip olabilecektir.
- Gelişmiş sinyal işleme ve yapay zekâ entegrasyonu: Birden fazla kaynaktan gelen verinin anlık işlenmesi karmaşık algoritmalar gerektirmektedir. Gelecekte hibrit BBA sistemlerinde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin ağırlıklı olarak kullanılması eğilimi kaçınılmazdır. Adaptif ve akıllı algoritmaların, hibrit sistemlerin hem performansını hem de güvenilirliğini arttıracığı ön görülmektedir. Böylece sistemlerin, kullanıcıdan toplanan büyük veriyi analiz ederek, her bir kullanıcı için en uygun sinyal özelliklerini otomatik olarak seçebilmesi, gürültüleri insan müdahalesi olmadan temizleyebilmesi ve büyük oranda çevresel değişimlere uyum sağlaması hedeflenebilir. Ayrıca çoklu veri füzyonu teknikleri ile sistem çıktısının farkındalığı artırılabilir. Dolayısıyla cihaz aracılığıyla kullanıcının o anki yorgunluk, dikkat düzeyi gibi durumları hesaba katılarak komut verme ertelenebilir veya adapte edilebilir.
- Kullanıcı arayüzü ve deneyimi: Hibrit BBA sistemlerinin gerçek hayatta benimsenmesi için arayüz tasarımının kullanıcı dostu ve mümkün olduğunca basit olması gerekmektedir. Kullanıcıların

zihinsel yükünü azaltan ve öğrenilmesi kolay arayüzler tercih edilmelidir. Özellikle çocuklar veya bilişsel sınırlılıkları olan kullanıcılar düşünülerek gelecekteki sistemlerde gereksiz görsel ve işitsel uyarıcılar azaltılmalı, geri bildirim mekanizmaları anlaşılır olmalı ve kullanıcıya kontrol hissi verecek tasarımlar uygulanmalıdır. Örneğin, bir hibrit yazıcı cihazında kullanıcının seçtiği harfi anında görmesi, sistemin durumunu anlaşılır ikonlarla takip edebilmesi gibi detaylar kullanıcı deneyimini iyileştirmek için önem arz etmektedir. Ayrıca, her bireyin beyin sinyali örüntüleri farklı olduğu için, kişiselleştirilmiş profiller ve kalibrasyon süreçleri üzerine yoğunlaşılmalıdır. Sistem, kullanıcı hakkında veri biriktirip zamanla daha da hassas hale getirilebilmelidir. Kullanıcı eğitimi de bu bağlamda önem arz etmektedir. Hibrit BBA sistemini evinde kullanan bir kullanıcıya, kolay anlaşılır kılavuzlar ile destek sunulması teknolojinin günlük hayatta kullanışlılığı açısından önem arz etmektedir.

- Klinik çalışmalar ve onay süreçleri: Hibrit BBA sistemlerinin hastalar üzerinde güvenle kullanılabilmesi için daha kapsamlı ve uzun süreli klinik deneyler yapılmalıdır. Farklı engel gruplarından kullanıcıların katıldığı çalışmalar, bu sistemlerin gerçek performansını ve etkisini ortaya koymakta önemli bir role sahiptir. Böylelikle, bir hibrit iletişim cihazının felç hastalarında yaşam kalitesini arttırdığına dair kanıtlar biriktikçe, sağlık otoriteleri nezdinde sistemler için tıbbi cihaz onayı almak mümkün hale gelebilir. Klinik deneyler aynı zamanda cihazların yan etkilerini veya risklerini de ortaya çıkartarak güvenlik sınırlarını belirlemekte yardımcı olabilir. Böylece, gelecekte çok merkezli uluslararası çalışmalar eşliğinde hibrit BBA teknolojisinin standart protokolleri oluşturulabilir. Bu protokoller aracılığıyla, farklı laboratuvarlarda üretilen sonuçlar karşılaştırılabilir ve belirlenen standartlar ışığında en iyi uygulamalar belirlenebilir. Gerekli regülasyonlar tamamlandığında, hibrit BBA sistemlerinin onaylı medikal cihazlar olarak hastanelerde ve evlerde aktif kullanım yolunun açılacağı ön görülmektedir.
- Etik, yasal ve toplumsal hazırlık: Teknolojik gelişimin yanı sıra, hibrit BBA sistemlerinin topluma kazandırılması için etik ve yasal

altyapının da geliştirilmesi gereklidir. Gelecekte, bu alanda gizlilik ve veri güvenliği standartlarının belirlenmesi zaruridir. Bu doğrultuda, kanun yapıcılarının ve etik kurulların devreye girerek BBA verilerinin kullanımı, saklanması ve paylaşılmasına dair açık kurallar belirlenmesinin gerekliliği ön görülmektedir. Ayrıca, kullanıcı onamı ve otonomi konusunda rehber ilkeler oluşturulmalı, kullanıcılar cihazı kullanmadan önce olası riskler ve sonuçlar hakkında tam bilgilendirilmeli, her zaman sistemi bırakma veya verilerini sildirme haklarına sahip olmalıdırlar. BBA kaynaklı hatalarda sorumluluk dağılımını netleştirecek yasal düzenlemeler de gerçek hayat uygulamaları için gerekli bir diğer husustur. Ayrıca, toplumsal kabulü arttırmak adına, teknoloji tasarımında bizzat engelli bireylerin ve potansiyel son kullanıcıların görüşlerine başvurulmalı, onların ihtiyaç ve endişelerine göre ürünler şekillendirilerek hem daha kullanışlı hem de etik açıdan daha duyarlı hibrit BBA çözümlerinin üretilmesi üzerine yoğunlaşılmalıdır.

Sonuç olarak hibrit BBA sistemleri, disiplinler arası yoğun bir araştırma ve geliştirme sürecinin ürünüdür ve pratikte çok değerli faydalar sunma potansiyeline sahiptir. Bu sistemler, ağır engelli bireylere çevreleriyle yeniden etkileşime girme şansı sunarak onların bağımsızlığını arttırabilir, iletişimsiz kalmış hastalara bir ses olabilir ve rehabilitasyon süreçlerini hızlandırabilir. Ayrıca, sağlıklı bireyler için de yeni ve doğal insan makine etkileşim yöntemleri geliştirilerek teknoloji kullanımı zenginleştirilebilir. Elbette hibrit BBA sistemlerinin başarılı bir şekilde günlük yaşama entegre olabilmesi için mevcut kısıtlamaların aşılması ve değinilen geliştirme alanlarında ilerleme kaydedilmesi gerekmektedir. Ancak devam eden araştırmalar ışığında, bu engellerin aşılabılır olduğu ve hibrit BBA sistemlerinin yakın gelecekte laboratuvar prototiplerinden çıkarak pratik uygulamalara dönüşebileceği konusunda bilim camiasında pozitif bir eğilim mevcuttur. Mevcut sorunların aşılması ile engellerin büyük ölçüde ortadan kalktığı hibrit sistemlerle donatılmış bir dünyada ve insan ile teknolojinin zihin düzeyinde uyum içinde etkileşim kurduğu bir geleceğe doğru önemli bir adım atılması kaçınılmazdır.

## KAYNAKÇA

- [1] M. O. Krucoff, S. Rahimpour, M. W. Slutzky, V. R. Edgerton, and D. A. Turner, “Enhancing nervous system recovery through neurobiologics, neural interface training, and neurorehabilitation,” *Front Neurosci*, vol. 10, no. DEC, 2016, doi: 10.3389/FNINS.2016.00584/PDF.
- [2] J. J. Vidal, “Toward direct brain-computer communication,” *Annu Rev Biophys Bioeng*, vol. 2, pp. 157–180, 1973, doi: 10.1146/ANNUREV.BB.02.060173.001105.
- [3] S. P. Levine *et al.*, “A direct brain interface based on event-related potentials,” *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 180–185, Jun. 2000, doi: 10.1109/86.847809.
- [4] S. Aydin, M. Melek, and L. Gökrem, “A Safe and Efficient Brain–Computer Interface Using Moving Object Trajectories and LED-Controlled Activation,” *Micromachines* 2025, Vol. 16, Page 340, vol. 16, no. 3, p. 340, Mar. 2025, doi: 10.3390/M16030340.
- [5] E. Klein, “Informed Consent in Implantable BCI Research: Identifying Risks and Exploring Meaning,” *Sci Eng Ethics*, vol. 22, no. 5, pp. 1299–1317, Oct. 2016, doi: 10.1007/S11948-015-9712-7.
- [6] G. Pfurtscheller *et al.*, “The hybrid BCI,” *Front Neurosci*, vol. 4, p. 1283, Apr. 2010, doi: 10.3389/FNPRO.2010.00003.
- [7] S. Sadeghi and A. Maleki, “A comprehensive benchmark dataset for SSVEP-based hybrid BCI,” *Expert Syst Appl*, vol. 200, p. 117180, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.ESWA.2022.117180.
- [8] X. Mai, J. Ai, M. Ji, X. Zhu, and J. Meng, “A hybrid BCI combining SSVEP and EOG and its application for continuous wheelchair control,” *Biomed Signal Process Control*, vol. 88, p. 105530, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.BSPC.2023.105530.
- [9] J. Ha, S. Park, and C. H. Im, “Novel Hybrid Brain-Computer Interface for Virtual Reality Applications Using Steady-State Visual-Evoked Potential-Based Brain–Computer Interface and Electrooculogram-Based Eye Tracking for Increased Information Transfer Rate,” *Front Neuroinform*, vol. 16, p. 758537, Feb. 2022, doi: 10.3389/FNINF.2022.758537/BIBTEX.

- [10] H. Khan, N. Naseer, A. Yazidi, P. K. Eide, H. W. Hassan, and P. Mirtaheri, “Analysis of Human Gait Using Hybrid EEG-fNIRS-Based BCI System: A Review,” *Front Hum Neurosci*, vol. 14, Jan. 2021, doi: 10.3389/FNHUM.2020.613254.
- [11] Y. Li, J. Pan, F. Wang, and Z. Yu, “A hybrid BCI system combining P300 and SSVEP and its application to wheelchair control,” *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 60, no. 11, pp. 3156–3166, 2013, doi: 10.1109/TBME.2013.2270283.
- [12] S. Sadeghi and A. Maleki, “Recent Advances in Hybrid Brain-Computer Interface Systems: A Technological and Quantitative Review,” *Basic Clin Neurosci*, vol. 9, no. 5, pp. 373–388, Sep. 2018, doi: 10.32598/BCN.9.5.373.
- [13] Y. Kwak, W. J. Song, and S. E. Kim, “FGANet: fNIRS-Guided Attention Network for Hybrid EEG-fNIRS Brain-Computer Interfaces,” *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, vol. 30, pp. 329–339, 2022, doi: 10.1109/TNSRE.2022.3149899.
- [14] A. P. Buccino, H. O. Keles, and A. Omurtag, “Hybrid EEG-fNIRS Asynchronous Brain-Computer Interface for Multiple Motor Tasks,” *PLoS One*, vol. 11, no. 1, p. e0146610, Jan. 2016, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0146610.
- [15] D. Kalika, L. Collins, K. Caves, and C. Throckmorton, “Fusion of P300 and eye-tracker data for spelling using BCI2000,” *J Neural Eng*, vol. 14, no. 5, Aug. 2017, doi: 10.1088/1741-2552/AA776B.
- [16] C. P. Brennan, P. J. McCullagh, G. Lightbody, and L. Galway, “EVALUATION OF AN SSVEP AND EYE GAZE HYBRID BCI”, doi: 10.3217/978-3-85125-533-1-09.
- [17] K. Liu *et al.*, “A novel brain-controlled wheelchair combined with computer vision and augmented reality,” *Biomed Eng Online*, vol. 21, no. 1, pp. 1–20, Dec. 2022, doi: 10.1186/S12938-022-01020-8/FIGURES/8.
- [18] A. Nourmohammadi, M. Jafari, and T. O. Zander, “A survey on unmanned aerial vehicle remote control using brain-computer interface,” *IEEE Trans Hum Mach Syst*, vol. 48, no. 4, pp. 337–348, Aug. 2018, doi: 10.1109/THMS.2018.2830647.



- [19] Y. Liu, M. Habibnezhad, and H. Jebelli, “Brain-computer interface for hands-free teleoperation of construction robots,” *Autom Constr*, vol. 123, p. 103523, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.AUTCON.2020.103523.
- [20] G. A. M. Vasiljevic and L. C. de Miranda, “Brain–Computer Interface Games Based on Consumer-Grade EEG Devices: A Systematic Literature Review,” *Int J Hum Comput Interact*, vol. 36, no. 2, pp. 105–142, Jan. 2020, doi: 10.1080/10447318.2019.1612213.
- [21] R. Chai, G. R. Naik, S. H. Ling, and H. T. Nguyen, “Hybrid brain-computer interface for biomedical cyber-physical system application using wireless embedded EEG systems,” *Biomed Eng Online*, vol. 16, no. 1, Jan. 2017, doi: 10.1186/S12938-016-0303-X.
- [22] P. Séguin *et al.*, “The challenge of controlling an auditory BCI in the case of severe motor disability,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 21, no. 1, pp. 1–15, Dec. 2024, doi: 10.1186/S12984-023-01289-3/FIGURES/7.
- [23] G. Müller-Putz *et al.*, “Towards noninvasive hybrid brain-computer interfaces: Framework, practice, clinical application, and beyond,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 6, pp. 926–943, Jun. 2015, doi: 10.1109/JPROC.2015.2411333.
- [24] C. Guger *et al.*, “Complete locked-in and locked-in patients: Command following assessment and communication with vibro-tactile P300 and motor imagery brain-computer interface tools,” *Front Neurosci*, vol. 11, no. MAY, p. 253594, May 2017, doi: 10.3389/FNINS.2017.00251/BIBTEX.
- [25] S. Burwell, M. Sample, and E. Racine, “Ethical aspects of brain computer interfaces: A scoping review,” *BMC Med Ethics*, vol. 18, no. 1, pp. 1–11, Nov. 2017, doi: 10.1186/S12910-017-0220-Y/FIGURES/1.
- [26] N. E. Mughal *et al.*, “EEG-fNIRS-based hybrid image construction and classification using CNN-LSTM,” *Front Neurorobot*, vol. 16, p. 873239, Aug. 2022, doi: 10.3389/FNBOT.2022.873239/BIBTEX.
- [27] R. Li, T. Potter, W. Huang, and Y. Zhang, “Enhancing performance of a hybrid EEG-fNIRS system using channel selection and early temporal features,” *Front Hum Neurosci*, vol. 11, p. 289794, Sep. 2017, doi: 10.3389/FNHUM.2017.00462/BIBTEX.
- [28] “Navigating the legal and ethical landscape of brain-computer interfaces: Insights from Colorado and Minnesota | IAPP.” Accessed: Sep. 10,

2025. [Online]. Available: <https://iapp.org/news/a/navigating-the-legal-and-ethical-landscape-of-brain-computer-interfaces-insights-from-colorado-and-minnesota>
- [29] R. J. Vlek *et al.*, “Ethical issues in brain-computer interface research, development, and dissemination,” *J Neurol Phys Ther*, vol. 36, no. 2, pp. 94–99, Jun. 2012, doi: 10.1097/NPT.0B013E31825064CC.
- [30] N. Birbaumer and L. G. Cohen, “Brain–computer interfaces: communication and restoration of movement in paralysis,” *J Physiol*, vol. 579, no. Pt 3, p. 621, Mar. 2007, doi: 10.1113/JPHYSIOL.2006.125633.
- [31] F. Aloise *et al.*, “Asynchronous P300-based brain-computer interface to control a virtual environment: initial tests on end users,” *Clin EEG Neurosci*, vol. 42, no. 4, pp. 219–224, 2011, doi: 10.1177/155005941104200406.





**ISBN: 978-625-378-324-2**