

Table of Contents

Atakan KONUKBAY, Ahmet KOLUMAN

Swarm Robots in CBRN Decontamination: Enhancing Efficiency and Safety.....72-81

Mustafa TERKİN, Kasım SERBEST, Ömer SEÇGİN

Diz Eklemleri Hareketine Destek Sağlayan Bir Diş İskelet Geliştirilmesi.....82-95

Fatma Betül DERDİYOK, Kasım SERBEST

Solunum Sistemi Takibi ve Egzersizlerine Yönelik Cihazlar Üzerine Sistemik Bir İnceleme.....96-118

Neslihan DENĞİZ

Improved MEMS microphone frequency response through design-optimization.....119-126

Gökhan ATALI, Şeyma DEĞİRMENCİ, Emre DEMİRÖZ

HoReCa Sektörü için Doğal Navigasyon Otonom Mobil Servis Robotu: komiBot.....127-139

Süleyman UZUN, Mustafa Zahid YILDIZ, Tolga SUGETİREN, İsmail YÜKSEL

Indoor Cargo Vending System Development and Development Environment Design... 140-159

Dilara KARACA, Süleyman UZUN, Sezgin KAÇAR

A Yolov3-Based Garbage Detection Systems.....160-176

Hamid ASADİ DERESHGİ, Dilan DEMİR, Sedanur YILMAZ, Aya ABDERRAHMANE, Belkis ABDERRAHMANE

Advancements in Active Dynamic Orthoses: A Comprehensive Review of Hand Muscle Rehabilitation Strategies.....177-186

İbrahim Çağrı BARUTÇU, Faruk AYGÜN, Ali ERDUMAN

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının ve Elektrikli Araçların Belirsizlikleri Göz Önüne Alınarak Dağıtım Sisteminin QPSO Yöntemi ile Yeniden Yapılandırılması.....187-205

Editor in Chief

Prof. Dr. Zafer Tatlı

Publishing Manager

Assoc. Prof. Dr. Kasım Serbest

Editorial Board

Prof. Dr. Yusuf Çay

Prof. Dr. Fatih Çalışkan

Prof. Dr. Gözde Çelebi Efe

Assoc. Prof. Dr. Halil Arslan

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif Koç

Assoc. Prof. Dr. Tahir Akgül

Assist. Prof. Dr. Fatih Uysal

Publishing Board

Muhammad Shahreeza Safiruz Bin Kassim, Department of Artificial Intelligence, University of Malaya (Malaysia)

İsmail Esen, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi (Turkey)

Mehmet Aydın, Computer Science and Creative Technologies, University of the West of England (UK)

Shyqyri Haxha, Department of Electronic Engineering, Royal Holloway University of London (UK)

Enes KILINÇ, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi (Turkey)

Rasim TEMÜR, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi (Turkey)

Hasan Arman, Department of Geology, United Arab Emirates University (UAE)

Ahmet Türk, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi (Turkey)

İbrahim Karaman, Materials Science and Engineering, Texas A&M University (USA)

Rahul Ribeiro, Department of Mechanical Engineering, Alliance University (India)

Murat Alçın, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi (Turkey)

Swarm Robots in CBRN Decontamination: Enhancing Efficiency and Safety

Atakan Konukbay¹ , Ahmet Koluman^{2*} 

¹Havelsan, CBRN Product Management, Türkiye, akonukbay@havelsan.com.tr,

²Biomedical Engineering, Pamukkale University, Türkiye, akoluman@pau.edu.tr

ABSTRACT

In this review article, we explore the integration of swarm robots in CBRN (Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear) decontamination processes. Swarm robots, known for their collaborative and decentralized nature, hold promise in improving the efficiency and safety of decontamination operations. The paper provides an overview of swarm robots and CBRN decontamination, highlighting the challenges and requirements associated with this critical task. We delve into the specific applications of swarm robots in CBRN decontamination, discussing their design considerations, operational aspects, and the advantages they bring to the process. To evaluate the efficacy of swarm robot systems, we present real-world case studies encompassing various scenarios. Furthermore, we address the remaining challenges in this field and explore future directions by identifying emerging technologies and techniques. Our research aims to contribute to the existing knowledge base, fostering a deeper understanding of swarm robot based CBRN decontamination and inspiring further advancements in this evolving domain.

Keywords: Swarm Robots, CBRN Decontamination, Collaborative Robotics, Decentralized Control, Hazardous Materials, Efficiency, Safety.

1. Introduction

In recent years, there have been remarkable advancements in the fields of robotics and decontamination, leading to innovative approaches for tackling complex challenges. One such approach involves the utilization of swarm robots in CBRN (Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear) decontamination. Swarm robots are a form of robotic systems that operate collaboratively in large numbers, exhibiting collective intelligence and decentralized control. They have the potential to revolutionize various domains by offering enhanced capabilities and efficiency in performing tasks [1].

CBRN decontamination refers to the process of removing, neutralizing, or mitigating chemical, biological, radiological, or nuclear contaminants from affected areas, equipment, or individuals. It is a critical operation that requires careful planning, efficient execution, and minimal risk to human personnel. Traditional decontamination methods often face limitations in terms of time, effectiveness, and safety. This is where swarm robots come into play, offering a promising solution to address these challenges [2].

The primary objective of this paper is to delve into the concept of swarm robots in the context of CBRN decontamination. By leveraging the collective intelligence and distributed nature of swarm robot systems, it becomes possible to enhance the speed, accuracy, and safety of decontamination operations. We aim to explore the fundamental concepts of swarm robots and their characteristics, followed by providing an

* Corresponding Author's email: akoluman@pau.edu.tr

overview of CBRN decontamination, the associated challenges, and the requirements it entails. Furthermore, we will examine the specific applications of swarm robots in CBRN decontamination, highlighting the tasks they can perform and the benefits they bring to the process. We will discuss the design considerations and operational aspects of swarm robots, focusing on their communication, coordination, sensing, detection, and mobility capabilities necessary for effective decontamination. To provide a comprehensive understanding, we will present and analyze case studies of real-world applications where swarm robots have been employed in CBRN decontamination. Through evaluating these case studies, we can gain insights into the effectiveness and efficiency of swarm robot systems in different scenarios. Finally, we will discuss the remaining challenges in swarm robot based CBRN decontamination and explore future directions for advancements in the field. By identifying emerging technologies and techniques, we can anticipate the potential impact of swarm robots in improving the effectiveness and safety of CBRN decontamination operations.

In summary, this paper aims to contribute to the existing knowledge base by examining the integration of swarm robots in CBRN decontamination processes. The insights gained from this analysis will not only highlight the benefits of swarm robots in handling hazardous materials but also pave the way for further research and development in this exciting area of robotics and decontamination [3].

2. Swarm Robots: Concepts and Characteristics

Swarm robots represent a unique paradigm in robotics, where a collective of individual robots work together to accomplish tasks through decentralized control and coordination. Understanding the concepts and characteristics of swarm robots is crucial for comprehending their application in CBRN decontamination scenarios. A swarm robot system consists of multiple autonomous robots, referred to as agents, which communicate and cooperate with one another to achieve a common objective. These robots are typically small in size and possess limited capabilities individually, but their strength lies in their collective behavior and emergent intelligence [3,4].

Key components of swarm robot systems include communication mechanisms, sensing capabilities, decision-making algorithms, and mobility mechanisms. Communication allows the robots to exchange information, share data, and coordinate their actions in a distributed manner. Sensing capabilities enable swarm robots to perceive the environment, detect CBRN agents, and gather relevant information for decision-making. Decision-making algorithms govern the behavior of individual robots, allowing them to respond to changes in the environment and adapt their actions accordingly. Mobility mechanisms enable swarm robots to navigate through complex and hazardous environments, reaching target locations for decontamination operations [5].

Swarm robots exhibit several characteristics that make them suitable for CBRN decontamination applications. Firstly, their decentralized control and coordination enable them to adapt to dynamic and uncertain situations. Swarm robots can continue functioning effectively even if some robots in the system are damaged or disabled. Secondly, swarm robots can operate in parallel, allowing for efficient coverage of large areas and expedited decontamination processes. Additionally, swarm robots can exhibit emergent collective behavior, where the interactions between individual robots give rise to complex and intelligent group behavior. This emergent behavior can lead to self-organization, self-repair, and fault tolerance within the swarm robot system. Moreover, swarm robots offer scalability, as the number of robots in the swarm can be easily adjusted to match the scale of the decontamination task. They also provide redundancy, ensuring that multiple robots can perform the same task, enhancing reliability and fault tolerance. Furthermore, swarm robots can be equipped with diverse sensing modalities, enabling them to detect various types of CBRN agents and assess the contamination levels in different areas. Overall, swarm robots possess unique concepts and characteristics that make them well-suited for CBRN decontamination. Their decentralized control, coordination, scalability, emergent behavior, and diverse sensing capabilities enable them to overcome the challenges associated with decontamination operations.

Understanding these concepts and characteristics is crucial for harnessing the full potential of swarm robots in addressing CBRN threats effectively and efficiently [6,7].

3. CBRN Decontamination: Challenges and Requirements

CBRN decontamination involves the mitigation of chemical, biological, radiological, and nuclear contaminants from affected areas, equipment, or individuals. It is a complex and demanding process due to the hazardous nature of CBRN agents and the critical need to ensure the safety of both decontamination personnel and the surrounding environment. Understanding the challenges and requirements associated with CBRN decontamination is essential for evaluating the role of swarm robots in this domain [8,9].

CBRN agents pose significant risks to human health and the environment. Chemical agents can cause severe burns, respiratory distress, and systemic toxicity. Biological agents can lead to infectious diseases and rapid spread among individuals. Radiological agents can emit harmful ionizing radiation, causing acute and long-term health effects. Nuclear agents can cause devastating explosions and release radioactive materials. Decontamination operations must consider these hazards and implement measures to protect personnel and minimize the spread of contamination. CBRN decontamination often takes place in complex and challenging environments, such as contaminated buildings, confined spaces, or outdoor areas with diverse terrain. These environments can pose obstacles to human personnel and conventional decontamination methods. Swarm robots offer the advantage of maneuverability and adaptability, allowing them to navigate through intricate spaces, access hard-to-reach areas, and operate in hazardous conditions. Swift response and efficient decontamination are critical in CBRN incidents to mitigate the spread of contaminants and minimize the impact on human lives and infrastructure. Traditional decontamination methods may be time-consuming and labor-intensive, resulting in delays that can have severe consequences. Swarm robots, with their parallel operation and coordinated efforts, have the potential to accelerate the decontamination process and reduce the time required for effective cleanup [10,11]. CBRN decontamination involves inherent risks to the personnel involved in the process. Direct exposure to CBRN agents can result in severe injuries or fatalities. Minimizing human intervention in hazardous areas and reducing the potential for direct contact with contaminants are crucial aspects of ensuring personnel safety. Swarm robots can assume the role of frontline responders in hazardous environments, reducing the exposure of human operators to CBRN agents and mitigating the risks associated with decontamination operations. The primary objective of CBRN decontamination is to eliminate or reduce the contamination levels to safe and acceptable limits. Achieving effective decontamination requires proper understanding of the specific CBRN agents involved, their behavior, and the appropriate decontamination methods and materials. Swarm robots equipped with sensing capabilities and tailored decontamination mechanisms can contribute to more accurate detection and targeted decontamination processes, improving the overall effectiveness of the operation. CBRN decontamination operations are subject to strict regulatory and compliance frameworks to ensure environmental protection and adherence to safety standards. Any solution, including swarm robots, must meet the necessary regulatory requirements and comply with established protocols for handling hazardous materials and decontamination procedures. Addressing these challenges and meeting the requirements of CBRN decontamination necessitates innovative approaches and technologies. Swarm robots offer potential solutions by providing enhanced mobility, adaptability, efficiency, and safety. Their integration into the decontamination process can help overcome these challenges and contribute to more effective and efficient CBRN decontamination operations [12-16].

4. Swarm Robots in CBRN Decontamination

The application of swarm robots in CBRN (Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear) decontamination introduces a novel and promising approach to enhance the efficiency and effectiveness of the decontamination process. Swarm robots, with their collaborative and decentralized nature, offer unique capabilities that can address the challenges associated with CBRN incidents. In this section, we

will explore the specific applications of swarm robots in CBRN decontamination, highlighting their tasks, benefits, and existing systems [1,3,4].

4.1 Application of Swarm Robots:

Swarm robots can perform various tasks in CBRN decontamination. Swarm robots equipped with sensors can detect and identify CBRN agents, allowing for rapid and accurate assessment of contamination levels. They can navigate through contaminated areas, collect data, and transmit real-time information to the decontamination team. Swarm robots can collaboratively map contaminated areas, creating detailed maps that provide crucial information for planning and executing decontamination operations. By generating comprehensive and up-to-date maps, swarm robots assist in optimizing resource allocation and identifying high-priority zones. Swarm robots can actively participate in the decontamination process by delivering decontamination agents, spraying neutralizing substances, or mechanically scrubbing surfaces. They can coordinate their actions to ensure thorough coverage and efficient use of resources. Swarm robots can continue monitoring the environment after decontamination, conducting post-decontamination assessments to verify the effectiveness of the process. They can detect any residual contamination and provide feedback on the success of decontamination efforts [5,6,7].

4.2 Benefits of Swarm Robots in CBRN Decontamination:

The integration of swarm robots in CBRN decontamination offers several advantages. Swarm robots can operate in parallel, enabling simultaneous execution of multiple tasks and increasing the overall efficiency of decontamination operations. They can cover larger areas and perform tasks concurrently, reducing the time required for decontamination. Swarm robots can adapt to dynamic and changing environments. They can autonomously adjust their behavior and reconfigure their formations to optimize task execution based on real-time information. This adaptability enables swarm robots to respond effectively to unforeseen challenges or obstacles during decontamination operations. Swarm robots can be easily scaled up or down, depending on the size and complexity of the decontamination task. The addition or removal of robots does not disrupt the overall system, ensuring scalability. Redundancy within the swarm provides fault tolerance, as the loss of individual robots does not incapacitate the entire system. By employing swarm robots, the exposure of human personnel to hazardous environments and CBRN agents can be significantly reduced. Swarm robots can operate in areas with high contamination risks, minimizing the potential harm to human operators and improving overall safety during decontamination operations [17,18].

4.3 Examples of Existing Swarm Robot Systems:

Several swarm robot systems have been developed for CBRN decontamination:

a. RoboBees: These small, flying robots inspired by bees can perform surveillance and mapping tasks, collecting data on contamination levels and providing real-time information to the decontamination team [19,20,21].

b. Collective Perception and Navigation (COPAN): COPAN is a swarm robot system designed to autonomously explore and map environments. It utilizes multiple robots equipped with sensors to detect and track contaminants, aiding in the planning and execution of decontamination strategies [22,23,24].

c. Miniature Autonomous Robotic Swarms (MARS): MARS is a swarm robot system that focuses on collective mapping and decontamination. It consists of small ground-based robots that collaborate to create detailed maps of contaminated areas and actively participate in the decontamination process [25,26,27].

d. SwarmFly: SwarmFly is a swarm robot system comprised of small aerial robots that can collaboratively perform tasks such as contaminant detection, mapping, and decontamination. These flying robots offer the advantage of maneuverability and rapid coverage of large areas. These examples

demonstrate the diverse capabilities of swarm robots in CBRN decontamination and serve as a testament to the potential of this technology to revolutionize the decontamination process. Swarm robots have emerged as a promising solution for CBRN decontamination, offering a range of applications that can enhance efficiency, adaptability, scalability, and safety. By leveraging their collaborative and decentralized nature, swarm robots can tackle the challenges posed by CBRN incidents and contribute to more effective and timely decontamination operations. The existing swarm robot systems developed specifically for CBRN decontamination highlight the practical implementation of this technology. Continued research and development in this field hold the potential for further advancements and widespread adoption of swarm robots in CBRN decontamination scenarios [28-32].

5. Swarm Robot Design and Operation for CBRN Decontamination

The successful integration of swarm robots in CBRN (Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear) decontamination requires careful consideration of their design and operation. In this section, we will explore the key aspects of swarm robot design and operation relevant to CBRN decontamination scenarios, including communication and coordination mechanisms, sensing and detection capabilities, and navigation and mobility features [31,33,34].

Swarm robots rely on effective communication and coordination to achieve collective intelligence and synchronized behavior. In CBRN decontamination, swarm robots must exchange information, share data, and coordinate their actions to optimize decontamination operations. Communication mechanisms can include wireless communication, local communication through direct physical connections, or a combination of both. The communication protocols should be robust, fault-tolerant, and capable of handling the challenges posed by CBRN environments, such as interference or limited connectivity. Coordination mechanisms ensure that swarm robots work together towards a common goal. Decentralized control algorithms, such as consensus algorithms or self-organizing behaviors, can enable swarm robots to adapt to dynamic situations, allocate tasks, avoid collisions, and maintain efficient operation within the swarm. Effective communication and coordination mechanisms are crucial for achieving cooperative behavior and maximizing the collective capabilities of swarm robots in CBRN decontamination [35,36].

Swarm robots require advanced sensing and detection capabilities to identify, locate, and assess CBRN agents in the environment. Sensors can include chemical sensors, biological sensors, radiation detectors, and visual or thermal imaging systems. These sensors enable swarm robots to detect and quantify the presence and concentration of CBRN agents, as well as identify contaminated areas. The sensing capabilities should be sensitive, selective, and capable of operating in hazardous and challenging conditions. Integration with data fusion techniques allows swarm robots to combine information from multiple sensors, enhancing the accuracy and reliability of contamination detection. In addition to CBRN agent detection, swarm robots can also incorporate environmental sensors to monitor parameters such as temperature, humidity, or air quality. This information provides valuable data for assessing the effectiveness of decontamination and ensuring the safety of the surrounding environment.

Swarm robots operating in CBRN decontamination scenarios must possess robust navigation and mobility features to navigate through complex and hazardous environments. They should be capable of traversing various terrains, including rough surfaces, obstacles, and confined spaces. Navigation mechanisms can include algorithms for path planning, obstacle avoidance, or swarm formation control. Mobility features depend on the specific design of the swarm robots and can vary from ground-based robots with wheels or legs to aerial robots with wings or propellers. The choice of mobility mechanisms depends on the requirements of the decontamination task, such as access to elevated surfaces, maneuverability in confined spaces, or rapid coverage of large areas. Integration with localization and mapping techniques allows swarm robots to accurately navigate and build maps of the contaminated environment. The design and operation of swarm robots for CBRN decontamination should prioritize robustness, adaptability, and resilience. Redundancy measures, such as multiple sensors or redundant communication links, can enhance the fault tolerance and reliability of the swarm robot system. Moreover, power management and

energy efficiency considerations are crucial to ensure the longevity and autonomy of swarm robots during prolonged decontamination operations. By addressing the communication, coordination, sensing, detection, navigation, and mobility aspects, swarm robot design and operation can be optimized for effective and efficient CBRN decontamination. The integration of these features allows swarm robots to respond to CBRN incidents collectively and intelligently, facilitating safer and more successful decontamination processes [34,37,38].

6. Case Studies: Swarm Robots in CBRN Decontamination

In this section, we present case studies that highlight real-world applications of swarm robots in CBRN (Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear) decontamination. These case studies provide insights into the effectiveness, challenges, and lessons learned from utilizing swarm robots in various scenarios.

6.1 Case Study 1: Urban Decontamination

In an urban setting affected by a chemical spill, a swarm robot system was deployed for CBRN decontamination. The swarm robots utilized advanced sensors to detect and map the contaminated areas, enabling efficient identification of hotspots and planning of decontamination routes. The swarm robots collaborated to apply decontamination agents using spray mechanisms, achieving thorough coverage of surfaces. Their collective intelligence allowed for adaptive response to changing contamination levels and dynamic environments. The case study demonstrated the potential of swarm robots in enhancing the speed and accuracy of decontamination operations in urban settings [31,33,34].

6.2 Case Study 2: Confined Space Decontamination

In scenarios where CBRN contamination occurs in confined spaces, such as underground tunnels or industrial facilities, swarm robots proved to be valuable assets. The swarm robots were equipped with mobility mechanisms suitable for confined spaces, such as caterpillar tracks or compact flying drones. Their small size and maneuverability allowed them to navigate through tight spaces and access areas inaccessible to human personnel. The swarm robots utilized sensors to detect and map contamination, coordinated their actions to apply decontamination agents, and monitored the effectiveness of the process. This case study demonstrated the efficacy of swarm robots in addressing the challenges posed by decontamination in confined spaces [19,35,36].

6.3 Case Study 3: Large-Scale Outdoor Decontamination

For CBRN incidents occurring in large outdoor areas, swarm robots offered advantages in terms of coverage and scalability. In this case study, a swarm robot system consisting of aerial and ground-based robots was employed for decontamination operations in a contaminated outdoor environment. The aerial robots conducted initial reconnaissance, mapping the extent of the contamination and identifying high-priority areas. The ground-based swarm robots, equipped with decontamination mechanisms, collaborated to cover the contaminated terrain and apply neutralizing agents. By working collectively, the swarm robots achieved rapid coverage of the area and efficient decontamination. The case study demonstrated the potential of swarm robots in large-scale outdoor decontamination scenarios [37,38].

These case studies illustrate the diverse capabilities and benefits of swarm robots in CBRN decontamination. They showcase the ability of swarm robots to tackle complex challenges, adapt to different environments, and enhance the efficiency and effectiveness of decontamination operations. While these case studies demonstrate successful applications, they also highlight the need for ongoing research and development to address challenges such as swarm coordination, sensor integration, and system scalability. Evaluation and analysis of these case studies provide valuable insights into the strengths and limitations of swarm robots in CBRN decontamination. They serve as a foundation for further refinement of swarm robot systems, improved coordination mechanisms, and the development of standardized protocols for swarm robot deployment in CBRN incidents. Continued research and

development, guided by real-world case studies, are crucial for unlocking the full potential of swarm robots in future CBRN decontamination scenarios [25-32].

7. Challenges and Future Directions

While swarm robots have shown promise in CBRN decontamination, several challenges remain to be addressed. In this section, we discuss the remaining challenges and highlight future directions for the advancement of swarm robots in this domain [9,22].

Achieving effective coordination and collaboration among swarm robots is a complex task. Ensuring seamless communication, efficient task allocation, and synchronization of actions within the swarm requires further research. Developing robust algorithms and protocols for swarm coordination, considering the dynamics of CBRN environments and the specific requirements of decontamination tasks, is essential. Integrating diverse sensors and sensing technologies into swarm robots for CBRN decontamination presents challenges. Overcoming limitations in sensor sensitivity, selectivity, and robustness in harsh environments is crucial. Advances in sensor miniaturization, multi-modal sensing, and data fusion techniques are needed to enhance the accuracy and reliability of contamination detection and mapping. Swarm robots should possess enhanced autonomy and decision-making capabilities to adapt to changing conditions during decontamination operations. Developing intelligent algorithms that enable swarm robots to dynamically assess contamination levels, adjust decontamination strategies, and respond to emerging threats autonomously is an important area of research. The integration of swarm robots with human operators and existing decontamination protocols requires attention. Designing intuitive human-swarm interfaces, enabling effective communication and control, and ensuring compatibility with existing operational procedures are challenges to be addressed. Collaboration between humans and swarm robots should be seamless and mutually beneficial. As swarm robot systems become more sophisticated, scalability and system complexity become critical considerations. Efficiently managing large numbers of robots, maintaining swarm connectivity, and managing information exchange without overwhelming the system pose challenges. Developing scalable architectures, efficient resource allocation mechanisms, and robust communication protocols will be crucial for handling larger-scale decontamination operations [34,36,39,40].

Future directions for swarm robots in CBRN decontamination are various. Further research into swarming algorithms and coordination mechanisms will enhance the collective behavior and intelligent decision-making capabilities of swarm robots, enabling them to adapt to complex and dynamic CBRN environments. Leveraging AI and machine learning techniques can enhance swarm robot capabilities in detection, mapping, and decision-making. Developing algorithms that enable swarm robots to learn from their environment, optimize their behavior, and adapt to evolving challenges will further improve their performance in CBRN decontamination. Investigating techniques for collaboration between multiple swarms or heterogeneous swarm robot systems will expand the possibilities in CBRN decontamination. Collaboration can enhance coverage, task allocation, and information sharing, leading to more efficient and comprehensive decontamination operations. Fostering research on human-swarm system integration will ensure seamless interaction, effective cooperation, and improved situational awareness between human operators and swarm robots. Understanding the requirements and preferences of human operators and integrating their expertise will lead to more efficient and reliable decontamination processes. Establishing standardized protocols, best practices, and safety guidelines for the deployment and operation of swarm robots in CBRN decontamination will facilitate interoperability, ensure safety, and streamline the integration of swarm robots into existing response frameworks. Addressing these challenges and exploring future directions will drive the continued development and utilization of swarm robots in CBRN decontamination. Through interdisciplinary collaboration, technological advancements, and close engagement with end-users and stakeholders, swarm robots can become indispensable tools for mitigating CBRN threats and safeguarding human lives and the environment [41,42,43].

8. Conclusion

The integration of swarm robots in CBRN decontamination processes has been examined in this paper. A promising solution is offered by swarm robots, given their collaborative and decentralized nature, to enhance the efficiency, effectiveness, and safety of decontamination operations. The fundamental concepts and characteristics of swarm robots, including their collective intelligence, decentralized control, and emergent behavior, were discussed to understand their potential in CBRN decontamination. The challenges and requirements associated with CBRN decontamination were explored, encompassing hazards and risks, complex environments, time constraints, safety concerns, effectiveness of decontamination, and regulatory compliance. Swarm robots were identified as a means to address these challenges through adaptability, scalability, redundancy, and improved safety measures. The specific applications of swarm robots in CBRN decontamination were examined, with a focus on contaminant detection, area mapping, decontamination operations, and post-decontamination assessment. Real-world case studies were presented to demonstrate the effectiveness of swarm robots in diverse scenarios, such as urban environments, confined spaces, and large-scale outdoor areas. The design and operation aspects of swarm robots were discussed, emphasizing the significance of communication and coordination mechanisms, sensing and detection capabilities, and navigation and mobility features. These considerations play a crucial role in optimizing swarm robot performance during CBRN decontamination. Furthermore, the challenges that remain in swarm robot-based CBRN decontamination were addressed, including swarm coordination, sensor integration, autonomous decision-making, human-swarm interaction, and scalability. Future directions were outlined, such as the development of advanced swarming algorithms, integration of AI and machine learning, multi-robot collaboration, human-swarm system integration, and the establishment of standardization and guidelines. In conclusion, swarm robots offer a promising solution to address the challenges associated with CBRN decontamination. Their collective intelligence, adaptability, and scalability contribute to mitigating risks posed by hazardous agents. Continued research, development, and interdisciplinary collaboration will further enhance the capabilities of swarm robots, ensuring their effectiveness, reliability, and safety in CBRN decontamination scenarios. Ultimately, harnessing the potential of swarm robots will lead to improved speed, accuracy, and efficiency in CBRN decontamination, thereby safeguarding human lives and protecting the environment.

Author Contributions

Atakan Konukbay and Ahmet Koluman contributed to the data acquisition, interpretation of data and wrote the manuscript. All manuscript authors have read the manuscript and approved it for submission.

Conflict Of Interest

All authors declared that they have no conflict of interest.

Funding Information

None.

Data Availability Statement

Not applicable.

References

- [1] León, J., Cardona, G., Botello, A., & Calderón, J. (2019). Robot Swarms Theory Applicable to Seek and Rescue Operation. , 1061-1070. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53480-0_104.
- [2] García, R., Iglesia, D., Paz, J., Leithardt, V., & Villarrubia, G. (2021). Urban Search and Rescue with Anti-pheromone Robot Swarm architecture. 2021 Telecoms Conference (ConfTELE), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ConfTELE50222.2021.9435557>.
- [3] Wang, Q., & Zhang, L. (2021). External Power-Driven Microrobotic Swarm: From Fundamental Understanding to Imaging-Guided Delivery.. ACS nano. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c07753>.

- [4] Bakhshipour, M., Ghadi, M., & Namdari, F. (2017). Swarm robotics search & rescue: A novel artificial intelligence-inspired optimization approach. *Appl. Soft Comput.*, 57, 708-726. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.02.028>.
- [5] Tang, Q., Xu, Z., Yu, F., Zhang, Z., & Zhang, J. (2019). Dynamic target searching and tracking with swarm robots based on stigmergy mechanism. *Robotics Auton. Syst.*, 120. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2019.103251>.
- [6] Yang, B., Ding, Y., Jin, Y., & Hao, K. (2015). Self-organized swarm robot for target search and trapping inspired by bacterial chemotaxis. *Robotics Auton. Syst.*, 72, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.05.001>.
- [7] Zheng, Z., Li, J., Li, J., & Tan, Y. (2014). Improved group explosion strategy for searching multiple targets using swarm robotics. 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 246-251. <https://doi.org/10.1109/SMC.2014.6973915>.
- [8] Balta, H., Bedkowski, J., Govindaraj, S., Majek, K., Musialik, P., Serrano, D., ... & De Cubber, G. (2017). Integrated data management for a fleet of search-and-rescue robots. *Journal of Field Robotics*, 34(3), 539-582.
- [9] Bayindir, L., & Şahin, E. (2007). A review of studies in swarm robotics. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 15(2), 115-147.
- [10] Gent, N., & Milton, R. (2018). Chemical, biological, radiological and nuclear incidents: clinical management and health protection. *Publ Health Engl.*
- [11] Guchua, A. (2023). NATO'S ROLE IN THE POLICY OF NON-PROLIFERATION OF WEAPONS OF MASS DESTRUCTION AND GLOBAL SECURITY: A SHORT OVERVIEW. *Journal of Liberty and International Affairs*, 9(2), 495-506.
- [12] Currie, J., & Heslop, D. (2018). Operational systems evaluation of a large scale multi-agency decontamination exercise. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2018.03.027>.
- [13] Kacer, P., Švrček, J., Syslová, K., Václavík, J., Pavlík, D., Červený, J., & Kuzma, M. (2012). Vapor Phase Hydrogen Peroxide – Method for Decontamination of Surfaces and Working Areas from Organic Pollutants. . <https://doi.org/10.5772/33451>.
- [14] Lipp, M., Jaehnicen, G., Golecki, N., Fecht, G., Reichl, R., & Heeg, P. (2000). Microbiological, microstructure, and material science examinations of reprocessed Combitubes after multiple reuse.. *Anesthesia and analgesia*, 91 3, 693-7. <https://doi.org/10.1097/0000539-200009000-00037>.
- [15] Bayir, A., Eyi, Y., Durusu, M., Oztuna, A., & Eryilmaz, M. (2011). (P1-74) Introduction of the Portable Decontamination Unit of Gulhane Military Medical Academy. *Prehospital and Disaster Medicine*, 26, s122 - s123. <https://doi.org/10.1017/S1049023X11004067>.
- [16] Rybka, A., Gavel, A., Pražák, P., Meloun, J., & Pejchal, J. (2019). Decontamination of CBRN units contaminated by highly contagious biological agents.. *Epidemiologie, mikrobiologie, imunologie : casopis Spolecnosti pro epidemiologii a mikrobiologii Ceske lekarske spolecnosti J.E. Purkyne*, 68 1, 40-45.
- [17] Zhang, Y., Yan, K., Ji, F., & Zhang, L. (2018). Enhanced Removal of Toxic Heavy Metals Using Swarming Biohybrid Adsorbents. *Advanced Functional Materials*, 28. <https://doi.org/10.1002/adfm.201806340>.
- [18] Xue, S. D., & Zeng, J. C. (2008). Control over swarm robots search with swarm intelligence principles. *Journal of System Simulation*, 20(13), 3449-3454.
- [19] Wood, R. J., Nagpal, R., & Wei, G. Y. (2013). Flight of the RoboBees. *Scientific American*, 308(3), 60-65. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0313-60>
- [20] Ma, K. Y., Chirarattananon, P., Fuller, S. B., & Wood, R. J. (2013). Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot. *Science*, 340(6132), 603-607. <https://doi.org/10.1126/science.1231806>
- [21] Hilder, J., Naylor, R., Rizih, A., Franks, D., & Timmis, J. (2014). The Pi Swarm: A Low-Cost Platform for Swarm Robotics Research and Education. , 151-162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10401-0_14.
- [22] Schranz, M., Umlauf, M., Sende, M., & Elmenreich, W. (2020). Swarm robotic behaviors and current applications. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 36. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00036>
- [23] Saska, M., Vonásek, V., Chudoba, J., Thomas, J., Loianno, G., & Kumar, V. (2016). Swarm distribution and deployment for cooperative surveillance by micro-aerial vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 84, 469-492.
- [24] Francesca, G., Brambilla, M., Brutschy, A., Garattoni, L., Miletich, R., Podevijn, G., ... & Birattari, M. (2015). AutoMoDe-Chocolate: automatic design of control software for robot swarms. *Swarm Intelligence*, 9, 125-152.
- [25] Kuckling, J., Van Pelt, V., & Birattari, M. (2022). AutoMoDe-Cedrata: automatic design of behavior trees for controlling a swarm of robots with communication capabilities. *SN Computer Science*, 3(2), 136.
- [26] Shan, Q., & Mostaghim, S. (2020, October). Collective decision making in swarm robotics with distributed Bayesian hypothesis testing. In *International Conference on Swarm Intelligence* (pp. 55-67). Cham: Springer International Publishing.
- [27] De Masi, G., & Ferrante, E. (2020, February). Quality-dependent adaptation in a swarm of drones for environmental monitoring. In *2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)* (pp. 1-6). IEEE.

- [28] Cambier, N., Albani, D., Frémont, V., Trianni, V., & Ferrante, E. (2021). Cultural evolution of probabilistic aggregation in synthetic swarms. *Applied Soft Computing*, 113, 108010.
- [29] Wörn, H., Szymanski, M., & Seyfried, J. (2006). The I-SWARM project. ROMAN 2006 - The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 492-496. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2006.314376>.
- [30] Li, M. (2019). Swarm Robot Task Planning Based on Air and Ground Coordination for Disaster Search and Rescue. *Journal of Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.3901/jme.2019.11.001>.
- [31] Cardona, G., & Calderón, J. (2019). Robot Swarm Navigation and Victim Detection Using Rendezvous Consensus in Search and Rescue Operations. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/APP9081702>.
- [32] Song, Y., Liang, W., & Yang, Y. (2012). A method for grinding removal control of a robot belt grinding system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23, 1903-1913. <https://doi.org/10.1007/S10845-011-0508-6>.
- [33] Hilder, J., Naylor, R., Rizih, A., Franks, D., & Timmis, J. (2014). The Pi Swarm: A Low-Cost Platform for Swarm Robotics Research and Education. , 151-162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10401-0_14.
- [34] Duarte, M., Gomes, J., Costa, V., Rodrigues, T., Silva, F., Lobo, V., Marques, M., Oliveira, S., & Christensen, A. (2016). Application of swarm robotics systems to marine environmental monitoring. OCEANS 2016 - Shanghai, 1-8. <https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2016.7485429>.
- [35] McGuire, K., Wager, C., Tuyls, K., Kappen, H., & Croon, G. (2019). Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment. *Science Robotics*, 4. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aaw9710>.
- [36] Ducatelle, F., Caro, G., Förster, A., Bonani, M., Dorigo, M., Magnenat, S., Mondada, F., O'Grady, R., Pinciroli, C., Rétornaz, P., Trianni, V., & Gambardella, L. (2014). Cooperative navigation in robotic swarms. *Swarm Intelligence*, 8, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s11721-013-0089-4>.
- [37] Zhang, X., & Ali, M. (2020). A Bean Optimization-Based Cooperation Method for Target Searching by Swarm UAVs in Unknown Environments. *IEEE Access*, 8, 43850-43862. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977499>.
- [38] Arvin, F., Murray, J., Shi, L., Zhang, C., & Yue, S. (2014). Development of an autonomous micro robot for swarm robotics. 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 635-640. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2014.6885771>.
- [39] Lee, W., & Kim, D. (2019). Adaptive approach to regulate task distribution in swarm robotic systems. *Swarm Evol. Comput.*, 44, 1108-1118. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.11.005>.
- [40] Higgins, F., Tomlinson, A., & Martin, K. (2009). Survey on Security Challenges for Swarm Robotics. 2009 Fifth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems, 307-312. <https://doi.org/10.1109/ICAS.2009.62>.
- [41] Rango, F., Palmieri, N., Yang, X., & Marano, S. (2018). Swarm robotics in wireless distributed protocol design for coordinating robots involved in cooperative tasks. *Soft Computing*, 22, 4251-4266. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2819-9>.
- [42] St-Onge, D., Kaufmann, M., Panerati, J., Ramtoula, B., Cao, Y., Coffey, E., & Beltrame, G. (2020). Planetary Exploration With Robot Teams: Implementing Higher Autonomy With Swarm Intelligence. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 27, 159-168. <https://doi.org/10.1109/MRA.2019.2940413>.
- [43] Johnson, M., & Brown, D. (2016). Evolving and Controlling Perimeter, Rendezvous, and Foraging Behaviors in a Computation-Free Robot Swarm. *EAI Endorsed Trans. Collab. Comput.*, 2, e5. <https://doi.org/10.4108/eai.3-12-2015.2262390>.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Diz Eklemi Hareketine Destek Sağlayan Bir Dış İskelet Geliştirilmesi

Mustafa TERKİN^{1*} , Kasım SERBEST² , Ömer SEÇGİN³

¹ Makine Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye
mustafaterkin1@gmail.com

² Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Türkiye
kserbest@subu.edu.tr

³ Makine Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye
omersecgin@subu.edu.tr

ÖZ

Diz eklemünde yaşanan rahatsızlığı gidermek, daha rahat konforlu bir yürüyüş sağlamak, sürekli ayakta duran insanların dizinde oluşan baskıyı almak, aynı zamanda dizdeki tüm serbestlik derecelerini karşılayarak dizde hareket kısıtlaması olmadan rahat şekilde oturup kalkma sağlanabilmesi için bu çalışma yapılmıştır. Bu sistem, bir dizi sensör, akışkan ve kanal içerir. Sensörler, kullanıcının hareketlerini algılar ve akışkanın basınç seviyelerini ayarlamak için bir kontrol ünitesine geri bildirim sağlar. Kişinin diz eklemlerine daha fazla destek ve stabilite sağlamak için akışkanın akışı ayarlanabilir. Protezler, ortezler ve giyilebilir cihazlar şu amaçla kullanılabilir: dizi desteklemek, dizdeki ağrıları azaltmak, diz kas bozulmalarında dizi rahatlatmak amacıyla sahip endüstriyel olarak üretime uygun elektronik sensörler yardımıyla dizdeki hareket kabiliyetini rahatlatmak. Bu makalede dize destek sağlayan, giyilebilir hafif ve estetik özellikte bir cihaz tasarımı yapılmıştır. Diz destek sisteminin çalışması akışkanın basıncı ayarlanarak yapılmaktadır, basınç ayarı da elektronik kart sayesinde yapılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dizlik, diz ortezi, oturup kalkma, diz rehabilitasyonu.

ABSTRACT

This study was carried out to relieve the discomfort experienced in the knee joint and to provide a more comfortable walk, to relieve the pressure on the knees of people who constantly stand, and at the same time to meet all degrees of freedom in the knee and thus enable sitting and standing comfortably without restricting the movement of the knee. This system includes a set of sensors, fluids, channels. Sensors detect the user's movements and provide feedback to a control unit to adjust the pressure levels of the fluid. Thus, the flow of fluid can be adjusted to provide greater support and stability to a person's knee joints. In this article, prostheses, orthoses and wearable devices can be used for the following purposes: to support the knee, to reduce pain in the knee, to relieve the knee's mobility with the help of industrially produced electronic sensors to relieve the knee in case of knee muscle deterioration. This device, which provides knee support, is made to be wearable, lightweight and aesthetic. The operation of the knee support system is done by adjusting the pressure of the fluid, and the pressure adjustment is made by the electronic card.

Keywords: Knee braces, knee orthosis, sit to stand, knee rehabilitation.

* Sorumlu yazar: mustafaterkin1@gmail.com

1 Giriş

Diz ortezleri, diz eklemine destek ve stabilite sağlamak, ağrıyı azaltmak, hareket kısıtlamalarını düzeltmek veya önlemek amacıyla kullanılan tıbbi cihazlardır [1]. Plastik, metal, köpük kumaş gibi malzemelerden yapılmışlardır ve dizi desteklemek için vücudun çeşitli bölgelerine sabitlenirler. Diz ortezleri, çeşitli tedavi koşulları veya durumları için farklı tiplerde ve tasarımlarda bulunmaktadır [2].

Çeşitli rahatsızlıklar ve durumlar için farklı diz ortezleri mevcuttur. Dizde oluşan yaygın rahatsızlıklar şöyle örneklendirilebilir: diz yaralanmaları, diz burkulmaları, bağ yaralanmaları, menisküs yırtılmaları, yumuşak doku yaralanmaları. Diz ortezleri bu tarz yaralanmaların iyileşmesini desteklemek için kullanılır [3].

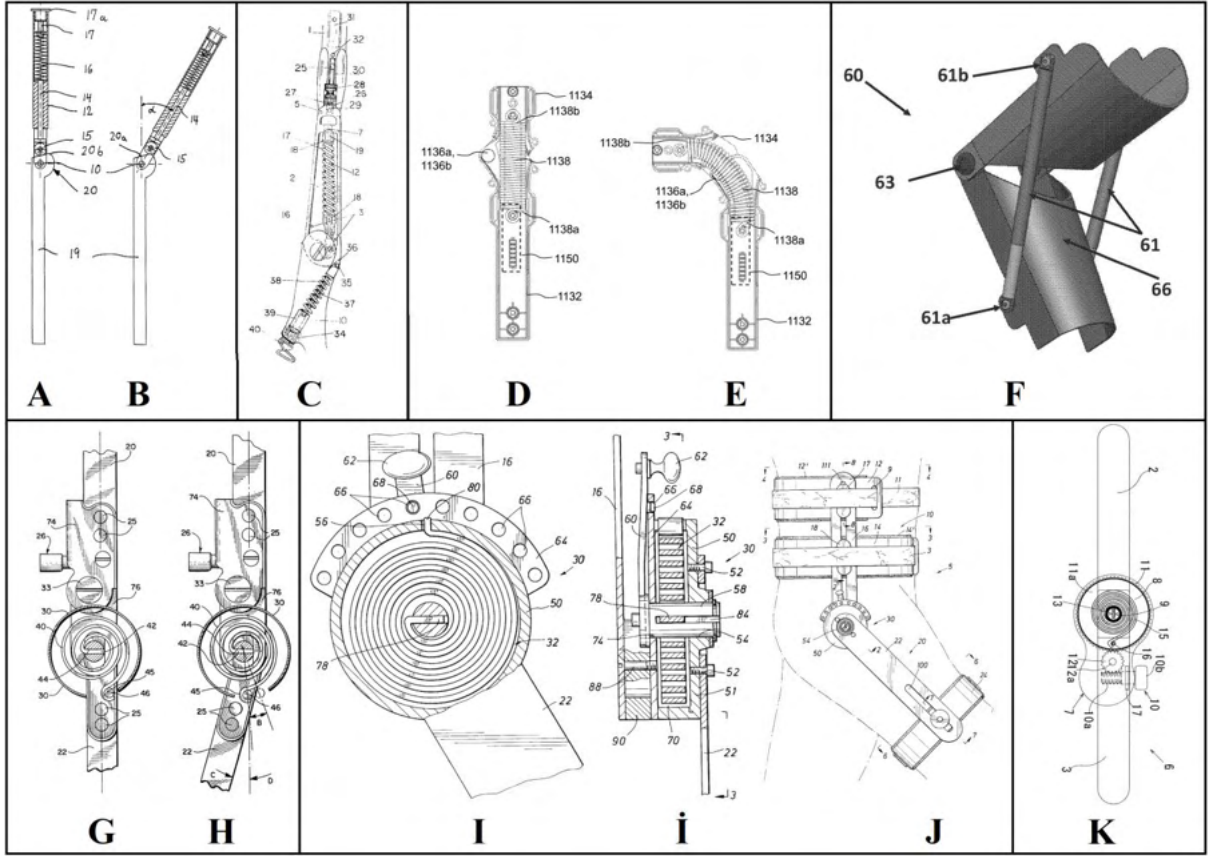
Literatür incelendiğinde bu problemleri çözmek için birçok patentin bulunduğu görülmektedir. Yapılan araştırmada konuyla ilgili olarak toplamda 193 adet patente ulaşılmıştır. Çalışma mekanizmalarını gösteren bazı örnek görseller aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Şekil 1.A ve Şekil 1.B'de kam üstünde kayarak yaylı diz eklem ortezi mekaniği [4], Şekil 1.A'da düz konumu, Şekil 1.B'de bir miktar açı yapılarak burulma detayı, Şekil 1.C'de yaylı diz eklem ortezi mekaniği [5], Şekil 1.D ve Şekil 1.E'de yaylı bükme yöntemiyle yapılmış diz eklem ortezi mekaniği [6], Şekil 1.D'de düz konumu, Şekil 1.E'de bir miktar açı yapılarak burulma detayı, Şekil 1.F'de gazlı pistonlu diz eklem ortezi mekaniği [7], Şekil 1.G ve Şekil 1.H'de burulma yaylı diz eklem ortezi mekaniği [8], Şekil 1.G'de düz konumu, Şekil 1.H'de bir miktar açı yapılarak burulma detayı, Şekil 1.I, Şekil 1.İ ve Şekil 1.J'de burulma yaylı diz eklem ortezi mekaniği [9], Şekil 1.I'da Mekanizmanın üst görünüş detayı, Şekil 1.İ'de mekanizmanın yandan görünüş detayı, Şekil 1.J'de mekanizmanın insan üzerinde kullanım detayı, Şekil 1.K'da burulma yaylı vidalı gerdirme mekanizmalı diz eklem ortezi mekaniği [10] hakkında patent örneği bulunmaktadır. Hazırladığımız mekanizma bunlardan farklı yeni bir sistem olarak tasarlanmıştır.

Araştırmalar incelendiğine yaşlılık veya sakatlık gibi durumlarda oluşan yürüme zorlukları için günümüzde kullanılan birçok dış iskelette elektik motorları kullandığı görülmüştür [11]. Yüksek tork oluşturacak durumlarda kullanılabilmesi, uygun dişli büyüklüğünün sınırlı olması nedeniyle, dişli redüktör tip elektrik motorları tercih edilememektedir. Bu sistem yerine, hidrolik silindirler, bu tip uygulamalarda daha uygundur. Örnek verecek olursak; ağır yüklü askerlerin sırt çantasının taşınmasını kolaylaştırmak amaçlı alt kısmında hidrolik silindirler kullanılmıştır (BLEEX) [12].

Seri elastik aktüatör, karşı kuvvet ile motor arasında bulunan birbirine seri bağlanmış iki yayın bulunduğu sistemlerdir [13]. Bu sistem yük karşısında şok emmesi ve enerji depolama gibi avantajları vardır [14].

Farklı bir araştırma da pnömatik yapay kaslar kullanmıştır [14]. Bu sistem üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Pnömatik kas yapıları hafiflik ve doğal esneklik özelliği oldukça başarılı sonuçlar verildiği görülmüştür [15].

Piyasada diz destek cihazları genel olarak; yay ve benzeri mekanik parçalardan üretilmektedir. Bu parçaların ham maddesi; metal, plastik, kumaş karışımı olan ve ağırlığı oldukça yüksek cihazlardır. Cihazların bu sorunları göz önüne alındığında daha rahat, kıyafet içine giyilebilir, yürüme ve oturma gibi durumlarda herhangi bir zorluk yaratmayan, estetik olarak güzel görünen bir cihaz arayışından bu araştırma ortaya çıkmıştır. Bu araştırmamızda akışkan ile insan kilosundan etkilenmeyen ve şarjlı elektronik kontrollü bir cihaz geliştirilmesi düşünülmüştür. Bunun üzerine akışkan destekli diz destek ortezi geliştirilmiştir.



Şekil 1: Literatür incelendiğinde örnek olarak bazı patentler. **A ve B:** Kam üstünde kayarak yaylı diz eklem ortezi mekanikliği [4]. **C:** Yaylı diz eklem ortezi mekanikliği [5]. **D ve E:** Yay bükme yöntemiyle yapılmış diz eklem ortezi mekanikliği [6]. **F:** Gazlı pistonlu diz eklem ortezi mekanikliği [7]. **G ve H:** Burulma yaylı diz eklem ortezi mekanikliği [8]. **I, J ve J:** Burulma yaylı diz eklem ortezi mekanikliği [9]. **K:** Burulma yaylı vidalı gerdirme mekanizmalı diz eklem ortezi mekanikliği [10].

Araştırmamız sonucunda üretilen diz destek cihazımızın; sağlık, askeri ve endüstriyel alanlarda iş gücünün büyük bölümünde yoğun olarak kullanabilmesi hedeflenmektedir [16]. Bu amaca uygun olarak insan yürüyüşüne ve eklem hareketine destek sağlayan dış iskelet geliştirilmesi için bu araştırma yapılmıştır. Yapmış olduğumuz bu araştırmada maliyetin düşük olması, her beden ve ölçüye uygun ayarlanabilir ürün tasarımı yapılmıştır. Tasarımını gerçekleştirilen bu ürün giyilebilir konforlu bir ürün olduğu için diz eklemleri dışında vücudunun başka bölgelerinde de (kol, bel, boyun gibi) bazı küçük değişiklikler yapılarak kullanılabilir. Bu çalışmadaki amacımız giyilebilir teknolojilerde yeni bir ürün ortaya çıkarmaktır. Bu sebep ile insan vücudunun şeklini alıp vücuda giyildiğinde rahat ve konforlu bir cihaz tasarlamak hedeflenmiştir. Tasarımını yapmış olduğumuz bu cihaz, estetik olarak kıyafet içinde rahat bir şekilde kullanma imkânı sağlar. Bu çalışmada giyilebilir bir cihaz tasarımı ve prototip üretimini yapılmıştır.

2 Metodoloji

Bu sistem, bir dizi sensör, akışkan içermektedir. Sensörler, kullanıcının hareketlerini algılar ve akışkanın basınç seviyelerini ayarlamak için kontrol ünitesine geri bildirim sağlar [17]. Böylece, kişinin diz eklemlerine daha fazla destek ve stabilite sağlamak için akışkanın akışı ayarlanabilir. Bu buluş protezler, ortezler, giyilebilir cihazlar, dizi desteklemek, dizdeki ağırları azaltmak, diz kas bozulmalarında dizi rahatlatmak amacına sahip endüstriyel olarak üretime uygun elektronik sensörler yardımıyla dizdeki hareket kabiliyetini rahatlatan, diz kaslarını destekleyebilen cihazdır. Diz eklemi

hareketine destek sağlayan giyilebilir, akışkan kontrollü cihaz tasarımı yapısından oluşmaktadır [18]. Düşük maliyetin, kullanım kolaylığının, rahatlığın ve esnekliğin ön planda olduğu bir cihazdır.

Geliştirdiğimiz bu sistem, akışkan basıncı kontrolü sayesinde istenildiği açıda istediği şekilde çömelme, oturma ve kalkma hareket kabiliyetlerini akışkan basıncı ayarlayarak, üzerinde bulunan sensörler yardımıyla diz rahatlığı sağlama imkânı sunar [19]. Diz destek cihazını geliştirmekteki amacımız; diz rahatsızlığı çeken insanların oturup kalkması veya çömelmesini rahatlatan bir cihaz geliştirmektir. Bunu da normal yürüyüşte vs. konforunu etkilemeden yapmasıdır. Bu sistem, rehabilitasyon süreçlerini hızlandırmak veya kişinin daha aktif bir yaşam tarzını sürdürebilmesini sağlamak için kullanılabilir.

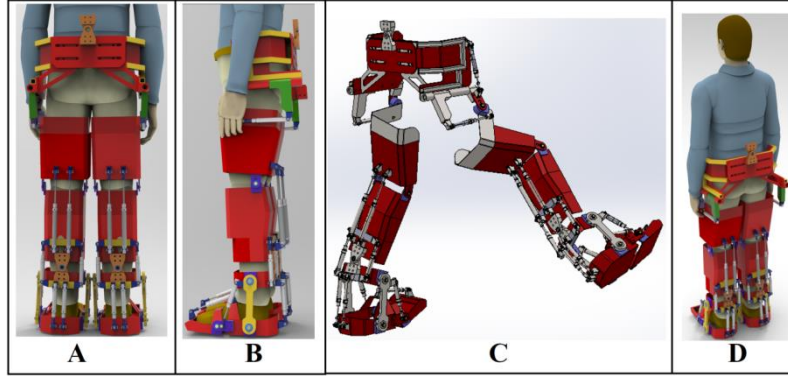
2.1 Kavramsal Tasarım

Bu çalışma, tüm vücut kaslarını destekleyebilen, vücuda giyilebilir bir cihaz olarak tasarlanması düşünülmüştür. İlk olarak vücudun bel altını akışkan ile destekleyici bir tasarım yapılmıştır. Devamında ise dizi desteklemeye yönelik tasarımlar yapılmıştır.

Diz eklemi sorunlarına sahip olan kişiler için, rahat hareket sağlayabilmelerine yönelik farklı fikirlerde tasarımlar yapılmıştır. Yapılan tasarıma nasıl geldiği aşağıdaki konu başlıklarında sırasıyla bahsedilmiştir.

2.1.1 Tasarım 1: Giyilebilir Mekanik ve Elektronik Dış İskelet Sistemi

Tüm vücut giyilebilir dış iskelet sistemi geliştirilmesi ve bu sistemin hassas sensörler vasıtasıyla vücudun tepkilerine göre daha güçlü ve destekleyici bir sistem olarak hedeflenmiştir. İlk etapta bel altı giyilebilir dış iskelet sistemi olarak tasarımı yapılmıştır.



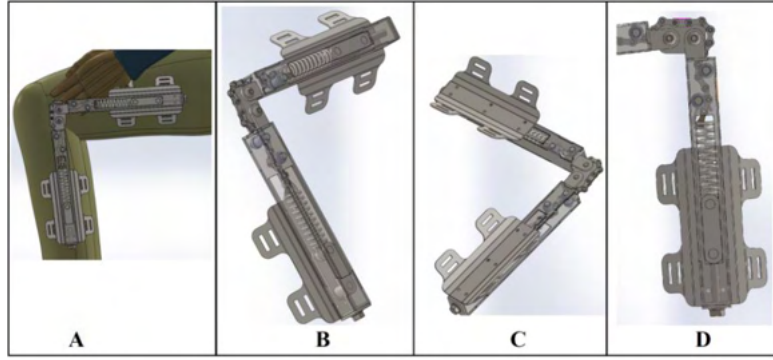
Şekil 2: Tasarım 1 çalışma görseli. **A:** Arkadan görünüş. **B:** Sol yandan görünüş. **C:** Sistemin hareket serbestliği. **D:** Dış iskeletin arka yandan perspektifi.

Bu çalışmada vücuda giyilebilir olup tüm esneme hareketlerini karşılayabilen bir tasarım geliştirilmiştir [20]. Şekil 2.A'da arkadan görünüş detayı verilmiştir, Şekil 2.B'de sol yandan görünüş detayı verilmiştir, Şekil 2.C'de görüldüğü üzere ayak bileğinden kalçaya kadar esnek hareketleri karşıladığı görülmektedir, bu esnek hareketleri karışılmayabilmek için tüm eklemlerde manada gözü rulmanlar ve itici pistonlarla desteklenmiştir, Şekil 2.D'de dış iskeletin arka yandan perspektifi görüntüsü verilmiştir. Bu sistem kıyafet gibi giyilebilen ve aynı zamanda tüm vücut eklemlerindeki serbestliği verebilen bir tasarımıdır. Bu sistem tam otomatik bir dizi sensörler yardımıyla hiç yürüyemeyen birini yürüten, egzersiz amaçlı kullanım, sanayi sektöründe ağır yük taşıma veya askeri sistemlerde dışı zırhla

donatılmış mekanik ile güçlendirilmiş bir tasarım olarak yapılması da düşünülmüştür [21]. Bu tasarım ilerleyen süreçlerde süre azlığı nedeniyle diz destek sistemi olarak tek bir noktaya indirgenmiştir.

2.1.2 Tasarım 2: Yaylı ve Zincir Diz Destek Sistemi

Sac metal malzemeden yapılıp içerisinde bulunan 2 adet çekme yay kullanılmıştır [22]. Mekanizma gergi yapılabilmeye uygun dizayn edilip ağırlık farklılığını da tolere edebilir şekilde tasarlanmıştır [23]. Zincir yardımıyla iki yay arasında gerginlik kontrolü sağlanmıştır. Dizde mandagözü rulmanlar kullanılarak esneklik sağlanması hedeflenmiştir. Şekil 3.A'da Diz eklemindeki görüntüsü verilmiştir, Şekil 3.B'de Ürünün önden perspektif görüntüsü verilmiştir, Şekil 3.C'de diz üzerine bağlantı detayı verilmiştir, Şekil 3.D'de zincir ve yay mekanizması detayı verilmiştir.

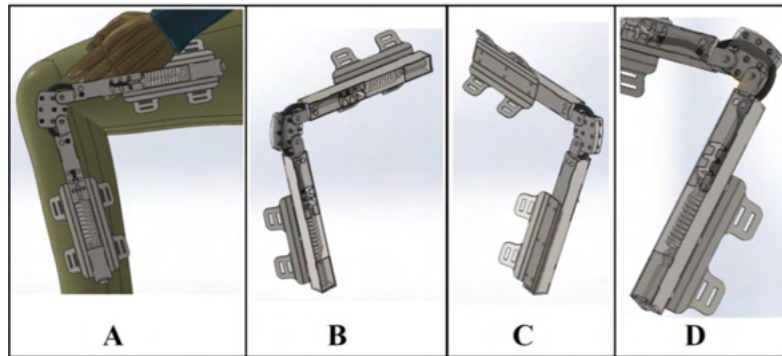


Şekil 3: Tasarım 2 çalışma görseli. **A:** Diz eklemindeki görüntüsü. **B:** Ürünün önden perspektif görüntüsü. **C:** Bağlantı detayı. **D:** İç mekanizma detayı.

Tasarım yay kuvvetini ayarlayan zincir ve yay mekanizmasından oluşmaktadır. Ürünün toplam ağırlığının fazla olması ve estetik açıdan hoş durmamasından dolayı bu tasarımdan vazgeçilmiştir.

2.1.3 Tasarım 3: Yaylı ve Halatlı Diz Destek Sistemi

Sac metal malzemeden yapılıp içerisinde bulunan 2 adet çekme yay kullanılmıştır [22]. Mekanizma gergi yapılabilmeye uygun dizayn edilip ağırlık farklılığını da tolere edebilir şekilde tasarlanmıştır. Esnek halat yardımıyla iki yay arasında gerginlik kontrolü sağlanmıştır. Dizde, mandagözü rulmanlar kullanılarak esneklik sağlanmıştır. Şekil 4.A'da mekanizmanın diz eklemi üzerindeki görüntüsü verilmiştir, Şekil 4.B'de ürünün önden perspektif görüntüsü verilmiştir, Şekil 4.C'de diz üzerine bağlantı detayı verilmiştir, Şekil 4.D'de ise halat ve yay mekanizması detayı verilmiştir.

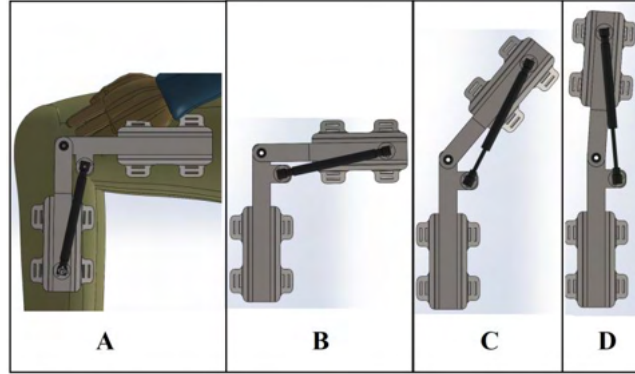


Şekil 4: Tasarım 3 çalışma görseli. **A:** Diz eklemindeki görüntüsü. **B:** Ürünün önden perspektif görüntüsü. **C:** Bağlantı detayı. **D:** İç mekanizma detayı.

Tasarım yay, kablo ve kanalda kaydırma yöntemiyle yay kilit kuvvetini ayarlayan mekanizmadan oluşmaktadır. Ürünün toplam ağırlığının fazla olması ve estetik açıdan hoş durmamasından dolayı bu tasarımdan da vazgeçilmiştir.

2.1.4 Tasarım 4: Gazlı Piston Destek Sistemi

Bu tasarım da sac metal malzemeden oluşmaktadır ve 1 adet gazlı piston kullanılmıştır. Mekanizma, kullanıcı kilosuna göre uygun gazlı piston kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır. Dizde mandagözü rulmanlar kullanılarak esneklik sağlanmıştır. Şekil 5.A'da diz eklemindeki görüntüsü verilmiştir, Şekil 5.B'de 90 derece açı durumu verilmiştir, Şekil 5.C'de 135 derece açı durumu verilmiştir, Şekil 5.D'de 180 derece açı durumu verilmiştir.

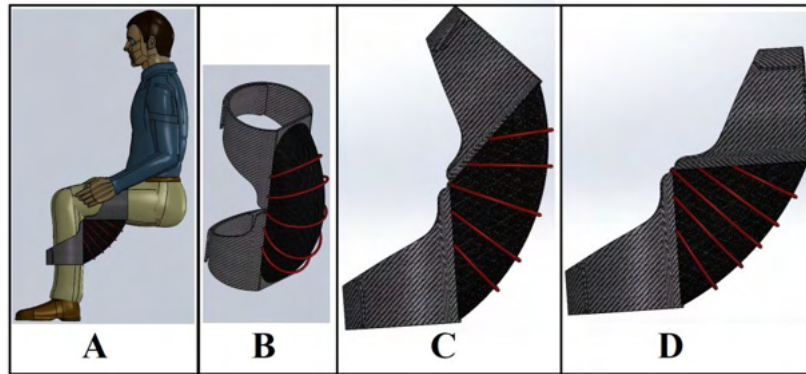


Şekil 5: Tasarım 4 çalışma görseli. **A:** Diz eklemindeki görüntüsü. **B:** 90 derece açı durumu. **C:** 135 derece açı durumu. **D:** 180 derece açı durumu.

Ürünün toplam ağırlığının fazla olması ve estetik açıdan hoş durmamasından dolayı bu tasarımdan da vazgeçilmiştir.

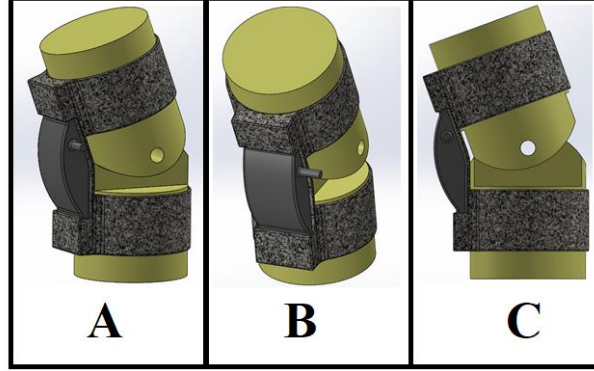
2.1.5 Tasarım 5: Akışkan körüklü Diz Destek Sistemi (Final Tasarım)

Bu tasarımın amacı, körük şeklinde dizin arkasından destek sağlayarak oturup kalkma esnasında dizdeki baskıyı azaltıp daha rahat hareket kabiliyeti sağlamaktır. Bu cihaz kıyafet üstüne giyilebileceği gibi kıyafet içine de giyilebilir (Şekil 6). Şekil 6.A'da diz eklemindeki görüntüsü verilmiştir, Şekil 6.B'de 180 derece açı durumu verilmiştir, Şekil 6.C'de 135 derece açı durumu verilmiştir, Şekil 6.D'de 90 derece açı durumu verilmiştir.



Şekil 6: Tasarım 5 akışkan körüğü çalışma görseli. **A:** Diz eklemindeki görüntüsü. **B:** 180 derece açı durumu. **C:** 135 derece açı durumu. **D:** 90 derece açı durumu.

Bu tasarım akışkanın körük içerisinde basınç oluşturup, sırasıyla Şekil 6.D'deki pozisyondan Şekil 6.C'ye daha sonra Şekil 6.B'deki pozisyona doğru getirerek çalışmaktadır. Tasarım daha sonra Şekil 7'de görüldüğü üzere hazır dizlik üzerine hava körüğü montajı yapılacak şekilde dizayn edilerek ürün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.A'da ürünün arka yandan perspektifi gösterilmiştir, Şekil 7.B'de ürünün arkadan perspektifi gösterilmiştir, Şekil 7.C'de ise yandan görünüş detayı verilmiştir. Bu görseller akışkan körüğü çalışma prensibi hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 7: Tasarım 5 akışkan körüğü ve dizlik görseli. **A:** Ürünün arka yandan perspektifi. **B:** Ürünün arkadan perspektifi. **C:** Yandan görünüş hakkında detayı.

2.2 Tasarım aşaması

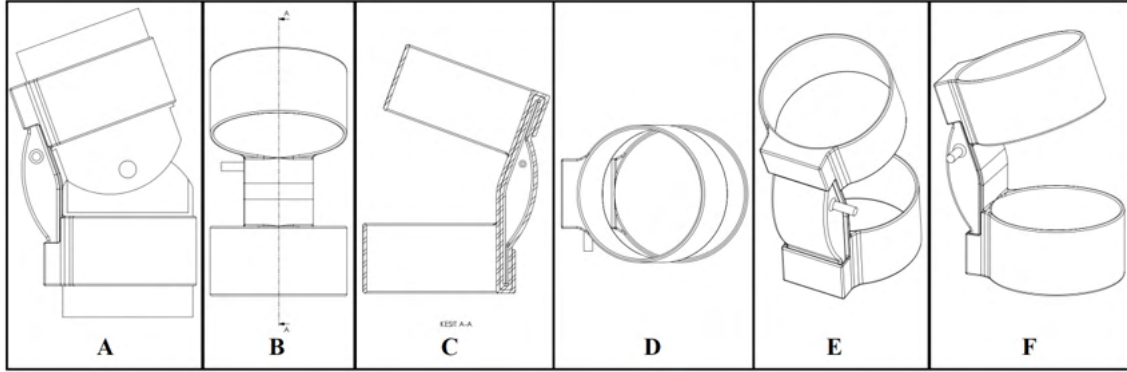
Bu çalışmada geliştirilip diz bölgesine takılan cihaz, akışkan basıncını ayarlayarak diz eklemine destekleyebilir. Özellikle diz eklemi sorunlarına sahip olanlar için bu cihaz, dizin stabilitesini artırarak ağrıyı azaltabilir ve daha rahat bir hareket sağlayabilir. Üretim aşamasında ilk önce dizlik için kullanılacak mevcut hazır bir bant belirlenmiş olup, üzerinde değişiklikler yapılarak tasarıma uygun hale getirilmiştir.



Şekil 8: Diz destek sistemi oturup kalkma durumunda çalışma prensibi. **A:** Ayakta durma detayı. **B:** Oturma durumu detayı.

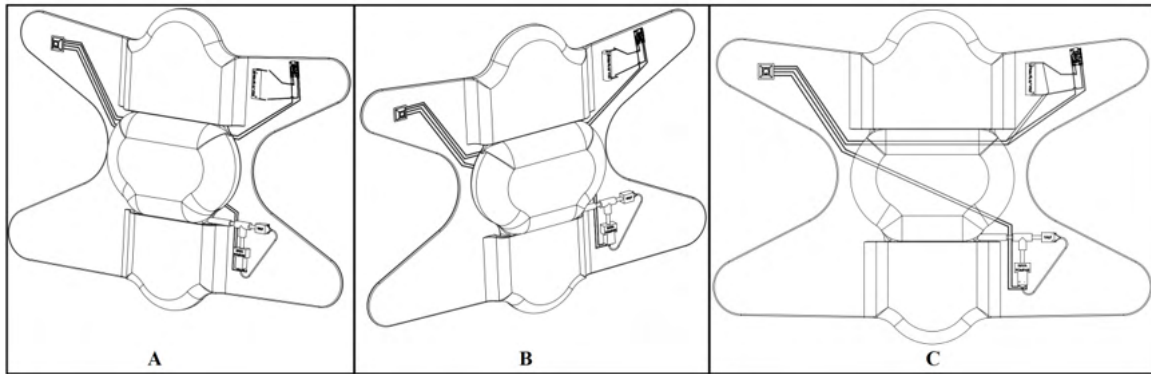
Şekil 8'de görüldüğü üzere dizin arka kısmının içinde katlanıp açılabilen balon körük bulunmaktadır. Şekil 8.A'da ayakta durma detayı verilmiştir, Şekil 8.B'de oturma pozisyonundaki durumu hakkında detay verilmiştir. Bu körük şişmeye başladığında dizli yukarı kaldırarak itmeye çalışmaktadır. Bu da ayağı kalkma esnasında dizdeki baskıyı azaltıp rahat bir şekilde ayağı kalkma olanağı sağlamaktadır. Bu sistem, bir dizi sensör, akışkan içerir. Sensörler, kullanıcının hareketlerini algılar ve akışkanın basınç seviyelerini ayarlamak için bir kontrol ünitesine geri bildirim sağlar. Böylece, kişinin diz eklemlerine

daha fazla destek ve stabilite sağlamak için akışkanın akışı ayarlanabilir. Cihazı bacak kaslarına destek ihtiyacı olan kişiler, farklı kas hastalığı olan kişiler kullanabilir. Cihaz, bu tarz rahatsızlıkların ortadan kaldırılmasına destek olacaktır. Kaza sonucu dizini kullanmakta zorluk çekenler de bu cihazı kullanabilir. Diz bölgesinde felç olup bu bölgenin egzersiz amaçlı çalışması sağlamak isteyenler kullanabilir. Kullanım alanına bağlı olarak sağlık sektörü sektöründe, spor, endüstriyel tip iş ve fabrika ortamlarında, ağır yük taşıyan sürekli çömelip kalkan ayakta çalışan işçilerde ve buna benzer birçok alanda kullanılabilir. Şekil 9.A'da yandan görünüş detayı verilmiştir, Şekil 9.B'de önden görünüş detayı verilmiştir, Şekil 9.C'de yandan kesit görüntüsü verilmiştir. Şekil 9.D'de üstten görünüş detayı verilmiştir, Şekil 9.E'de arka açıdan perspektif görünüş detayı verilmiştir, Şekil 9.F'de ön açıdan perspektif görünüş detayı verilmiştir.

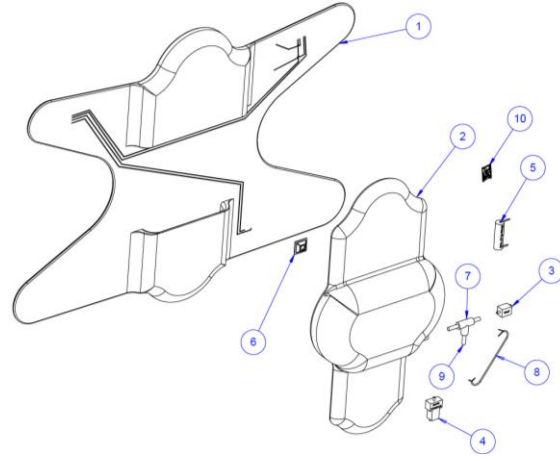


Şekil 9: Diz destek sistemi akışkan körüğü çalışma prensibi. **A:** Yandan görünüş. **B:** Önden görünüş. **C:** Yandan kesit görüntüsü. **D:** Üstten görünüş. **E:** Arka açıdan perspektif görünüş. **F:** ön açıdan perspektif görünüş.

Akışkan diz destek sistemi Şekil 10'da görüldüğü üzere diz bandı üzerine sonradan takılabilen bir sistemdir. Herhangi dizlik üzerinde de monte edilebilmesi mümkündür. Bu sistemin elektronik kart ile kontrolü sağlanmakta olup şarjlı olarak kullanılması mümkündür. Elektronik kart tasarımında birçok özellik eklenip otomatik halde darbe sensörleri veya dizdeki kasılmaları algılayan sensörlerle hem yürüyüşü desteklemek hem de oturup kalkma hareketini hassas olarak cihazın hissetmesini sağlayabilmektedir. Bu sensörler yardımıyla mobil uygulamalar ile haberleşmesi sağlanıp cihazın anlık olarak spor modu gibi eklentiler eklenerek kayıt altına alınarak egzersiz takibi de yapılması mümkündür [24]. Şekil 10'da diz destek sistemi komponent montajı yapılarak ürün üzerindeki detayı verilmiştir, Şekil 10.A'da soldan perspektif görünüm detayı verilmiştir, Şekil 10.B'de sağdan perspektif görünüm detayı verilmiştir, Şekil 10.C'de Ön görünüm detayı verilmiştir.



Şekil 10: Diz destek sistemi detayı (Final Tasarım). **A:** Soldan perspektif görünüm detayı. **B:** Sağdan perspektif görünüm detayı. **C:** Ön görünüm detayı.



Şekil 11: Diz destek sistemi patlatılmış resim görüntüsü (Final Tasarım).

Diz destek sisteminde kullanılan malzemelerin listesi aşağıda belirtilmiştir (Şekil 11):

1. Kumaş dizlik.
2. Şişirilebilir hava körüğü.
3. Mini Hava Valfi (Normalde Açık).
4. Mini Hava Pompası
5. Şarjlı Pil
6. Silikon Anahtar kontrol devresi
7. T bağlantı rekoru.
8. Kablolar.
9. Akışkan hortumu.
10. Pil Şarj Devresi

1. Kumaş dizlik:

Kumaş dizlik, dizi tahriş etmeyen diz bandı kumaşından üretilmiştir. Dizliğin dize takılması sabitlenmesi için cırt cırt kullanılabilir, gerdirme kilitli mekanizmaları olabilir, bedene göre otomatik ayarlanabilen servo kontrollü mekanik veya akış kontrol sistemler gibi birçok çeşit bağlantı şekilleri olabilir. Kumaş dizliğin arka kısmında bulun haznelerin içinde konumlandırılacak şekilde ve iç kısmında cırt bant ile montajı yapılacak şekilde balon körüğün birleştirilmesi sağlanmıştır. Akışkan ile şişen elastik körük montajı yapılmıştır.

2. Şişirilebilir hava körüğü:

Çalışmamızda, içine akışkan verildiğinde iç lastiğin şişebileceği ve bu iç lastiğin dış yüzeyine yırtılmaya dayanıklı kumaş ile kaplı bir körük kullanılmıştır. Burada körük mekanizmasının malzemesi tamamen kauçuk veya elastik özelliği olan birçok malzeme çeşidinden olabilir.

3. Mini Hava Valfi (Normalde Açık):

Normalde açık, elektrik verildiğinde kapalı konuma geçen valf kullanılmıştır.

4. Mini Hava Pompası:

Mikro hava pompası, akışkanı istenilen basınca getirmek için elektronik karta bağlı olarak devreye girip devreden çıkar.

5. Şarjlı Pil:

Şarjlı pil olarak birçok batarya çeşidi kullanılabilir. Elektronik kart çıkışı voltaj değerlerine göre şarj edilebilir küçük, hafif, yüksek verimli şarjlı pil kullanılmıştır.

6. Silikon Anahtar Kontrol Devresi:

Tek buton ile kontrol edilebilen farklı çalışma modlu anahtar devresidir.

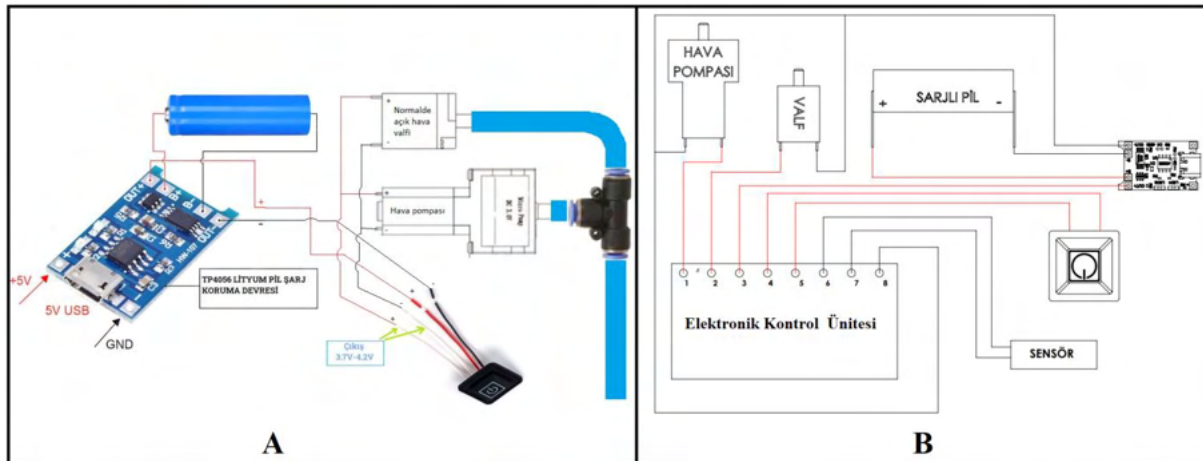
Devre üzerindeki butona 2 saniye basıldığında ürün çalışmaya başlar. 2 Saniye tekrar basılı tutulursa ürün kapanır. İlk başlangıçta anahtar çıkışa tüm enerjiyi sürekli olarak aktarır. Kırmızı renkte led yanar. Belirli bir basınca ulaştığında ikinci moda geçer, daha sonra tekrar yine belirli bir basınçtan sonra birinci moda dönüp bu şekilde 1-2 arasında çalışır.

Birinci aşamada iken butona kısa basılırsa 2. aşamaya geçer. Yaklaşık olarak 3 saniye enerji verir 1 saniye enerji aktarımını kapatır. Yani 3 saniye enerjiyi açar 1 saniye voltajı kapatır. 2. Aşamada buton rengi mavidir.

İkinci aşamada iken butona kısa basılırsa 3. aşamaya geçer. Bu aşamada buton rengi yeşildir. 2 saniye kapalı 1 saniye açık olarak çalışır. Bu kısım Şekil 12.A'da yarı otomatik diz destek sistemi devre şemasını kapsamaktadır.

Diğer aşamada ise, üzerinde bulunan sensörlerle kullanıcının yapmak istediği hareketi algılayarak otomatik olarak çalışabilmektedir. Ürün üzerinde bulunan sensörlerle kullanıcının yapmak istediği hareketi algılayarak otomatik olarak çalışabilmektedir. (Şekil 12.B)

Şekil 12.B'deki devre şeması; tam otomatik elektronik kontrol ünitesinde yazılım alt yapısı bulunan ve sensörler yardımıyla haberleşme sağlayıp dizdeki tepkime hareketlerini kolaylaştırmaya yönelik bir sistemdir [25].



Şekil 12: Diz destek sistemi elektronik kontrol devre şeması. **A:** Yarı otomatik diz destek sistemi devre şeması. **B:** Tam otomatik sensörlü diz destek sistemi devre şeması.

7. T Bağlantı Rekoru:

Akışkan gücü ile çalışan sistemin akışkan bağlantılarını oluşturan ara bağlantı parçasıdır.

8. Kablolar:

Bükülmelere, esnemelere, sıcaklık gibi etkenlere dayanıklı uzun ömürlü kablolar tercih edilmiştir. Kırmızı, siyah vb renkli kablolar için soketler karşılıklı olarak tasarlanmıştır. Bu sayede ters bağlantı yapma riski ortadan kalkmaktadır. Herhangi yedek parça ihtiyaç durumunda soketler aracılığıyla sökülüp yenisi ile değiştirmek mümkün olarak tasarlanmıştır.

9. Akışkan Hortumu.

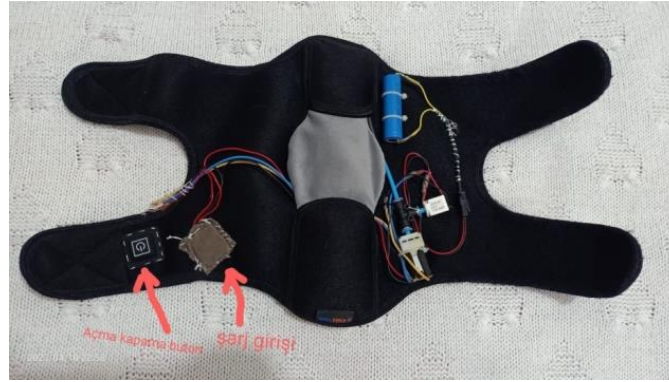
Üründe akışkanı bir yerden başka bir yere aktarabilmek için akışkan hortumları kullanılmıştır. Bu hortumlar esnek özellikli kırılma, esneme ve basınca dayanıklı malzemelerdir.

10. Pil Şarj Devresi

Ürün üzerinde Type-C konektör bulunmaktadır. Bu bağlantı istenildiğinde farklı şarj soketlerinde dönüştürülebilir. Bu sayede bağlanan bataryalar bağlanarak rahatlıkla şarj edilebilir.

3 Bulgular ve Tartışma

Şekil 13'de görüldüğü üzere komponentlerin diz hareketleri esnasında esnemeler sonucu zarar görmeyecek şekilde yerleşimi yapılmıştır. Kırılmaya ve esnemeye dayanıklı kablolar seçilerek montajı yapılmıştır.



Şekil 13: Diz destek sistemi bağlantılarının yapılması.

Cihazın montajı bittikten sonra şişme sonucu oluşacak tepkimeler gözlemlenmiştir. Burada gözlemler sonucu; iç basıncın artmasıyla birlikte dizin 90 derece konumdan 180 derece konuma doğru açılmasıyla diz hareketine destek sağladığı gözlemlenmiştir. İlk örnek numunesi hazırlandıktan sonra Şekil 14'te görüldüğü üzere açıkta kalan kablo ve diğer komponentlerin üstlerinde kumaş kaplama yapılmıştır.



Şekil 14: Diz destek sistemi test için hazırlanmış bitmiş ürün (Final Ürün).

Cihazımız, akışkan yardımıyla körük şişme prensibi olarak çalışmaktadır. Bu çalışma prensibi dizin arka kısmında dizi yukarıya doğru kaldırmaya çalışan elastik bir körük yapısından oluşmaktadır. Cihazımızı uygulama alanlarına; diz problemi olan kişilerin kullanması, diz ekleminde egzersiz olarak uygulanması, yürüyüşte dizi destekleyip sabitleme veya dizi destekleme amaçlı kullanılması, diz ağrısının giderilmesi, spor yaparken dizde destek cihazı olarak kullanılması örnek olarak verilebilir.

4 Sonuçlar

Bu araştırmada, insan yürüyüşünü desteklemek amacıyla kullanılacak giyilebilir bir diz ortezi dış iskelet geliştirilmiştir, prototip üretimi gerçekleştirilerek çalışır hale getirilmiştir.

Diz destek cihazının kumaş esnek bir yapıda olması ister direkt kıyafet içine istenirse kıyafet dışına da giyilebilir olması insanların konfor alanını daraltmadan rahat bir şekilde kullanma olanağı sağladığı görülmüştür.

Bu çalışmada keşfedilen yöntem; insan vücudunun farklı kaslarını da akışkan destekli cihazı ufak değişiklikler yapılarak istenilen bölgedeki kaslar içinde uyarılabilir sonucunu verir. Bu sistem uygun yazılım ve sensörlerle desteklendiğinde çok hassas bir cihaz olarak kullanılması da mümkündür.

Bu araştırma kapsamında yapılan tasarımlarda geliştirilen ürünün, dizin arka kısmından oturma ve kalkma sırasında dizi desteklediği görülmüştür. Ayaklarından felçli veya diz kaslarında sorun olan bir insanı fizik tedavi sırasında spor yapması amacıyla dizi açıp kapatma işlemleri için uygun olduğu görülmüştür. Bu cihaz akışkan kontrolü sayesinde kullanıcı ağırlığına göre basıncı ayarlamaktadır. Ağırlık farkı sorun olamadan her insana uygun bir yapıya sahiptir. Bu çalışma prensibi akışkan körüğü sayesinde basıncı kontrollü bir şekilde ayarlanarak kaslara, doğal bir esneklik özelliği ve hafiflik kazandırır.

5 Beyanname

5.1 Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

5.2 Yazarların Katkıları

Sorumlu Yazar Adı SOYADI: Mustafa TERKİN

Araştırma fikrinin oluşturulması, literatür incelemesi, tasarım süreçleri, makale yazımı.

2. Yazar Adı SOYADI: Ömer SEÇGİN

Araştırma fikrinin oluşturulması, literatür incelemesi, tasarım süreçleri, makale yazımı.

3. Yazar Adı SOYADI: Kasım SERBEST

Araştırma fikrinin oluşturulması, literatür incelemesi, tasarım süreçleri, makale yazımı.

Kaynakça

- [1] Neslihan, T. O. P., BAŞAK, H., & ŞAHİN, İ. (2021). Biyomimetik Tabanlı Fonksiyonel Yürüteç Tasarımı ve Dijital İnsan Modelleme İle Ergonomik Analizi. *El-Cezeri*, 8(2), 618-619.
- [2] ÇALIKUŞU, İ., UZUNHİSARCIKLI, E., & FİDAN, U. Alt ekstremite dış iskeletinin modellenmesi ve biyomekanik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(1), 550-561.
- [3] Öçal, A. E. (2023). Tahriksiz, giyilebilir ve ergonomik üst gövde dış iskelet sistemi geliştirilmesi.
- [4] Patent: ES2116882A1 <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DES2116882A1>
- [5] Patent: ES2116882A1 <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DES2116882A1>
- [6] Patent: US20210290420A1 <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS2021290420A1>
- [7] Patent: US20180271690A1 <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS2018271690A1>
- [8] Patent: US6471664 <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS6471664B1>
- [9] Patent: US6039707 <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DUS6039707A>
- [10] Patent: JP5801859B2 <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DJP5801859B2>
- [11] Young, Aaron J., and Daniel P. Ferris. (2017). State of the Art and Future Directions for Lower Limb Robotic Exoskeletons, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25 (2), 171–182.
- [12] Zoss, A. B., Kazerooni, H., Chu, A. (2006). Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11 (2), 128-138.
- [13] Series Elastic Actuators. (t.y). Erişim: 5 Şubat 2019, http://fab.cba.mit.edu/classes/865.15/people/rebecca.kleinberger/assets/papers/SEA_Pratt.pdf
- [14] Huo, Weiguang, et al. (2016). Lower Limb Wearable Robots for Assistance and Rehabilitation: A State of the Art, *IEEE Systems Journal*, 10(3), 1068–1081.
- [15] Chou, Ching-Ping, ve B. Hannaford. (1996). Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12 (1), 90–102.
- [16] ERTAN, K., & ELDEM, C. (2022). TEMSİLİ BİR GİYİLEBİLİR DIŞ İSKELETİN ERGONOMİK ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ. *Ergonomi*, 5(1), 19-20.
- [17] Hazar, Y. (2020). Giyilebilir dış iskelet el (Master's thesis, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü). 39-48
- [18] BAYSAL, CV (2020). Pnömatik Yapay Kaslar için Sinir Ağı Tabanlı Ters Modelleme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* , (Ejosat Ek Özel Sayı (HORA)) 56-58.
- [19] Aydoğan, İ. ve AYDIN, EA (2022). Parmak Hareketlerine Dayalı Gerçek Zamanlı İnsan-Makine Arayüzleri için Giyilebilir Elektromiyogram Tasarımı. *Politeknik Dergisi* , 1-1. 975-977.
- [20] AKKAŞ, Y., & ERTAŞ, Ö. Ü. H. A. YÜKSEK LİSANS TEZİ. ESNEK UZUVLU PARALEL MANİPÜLATÖR KULLANARAK GİYİLEBİLİR ROBOTİK BACAĞI TASARIMI VE KİNEMATİK ANALİZİ. 2-13

- [21] Zhou, J., Yang, S., & Xue, Q. (2021). Lower limb rehabilitation exoskeleton robot: A review. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(4), 16878140211011862. 3–10.
- [22] Serbest, Kasım. El kaslarının rehabilitasyonu için aktif dinamik el-el bileği ortezi tasarımı. 2017. PhD Thesis. Sakarya Üniversitesi (Turkey). 67 – 110.
- [23] KILIÇ, E., Şekerci, B., KIZILHAN, H., & Başer, Ö. (2020). Sertliği değiştirilebilir bir ayak bileği dış iskelet robotun çeşitli kontrolcüler ile pozisyon takibi kontrol performansının değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1554-1558.
- [24] Mert, A.; Seçgin, Ö.; Akan, A. Sürekli Vücut Sıcaklığı Ölçümü İçin Biotelemetri Cihaz Tasarımı The Design of a Biotelemetry Device for Continuous Body Temperature Monitoring. *Tıp Teknolojileri Ulusal Kongresi*, 2014,
- [25] Karabıyık, İ., Kılıç, E., & Bayram, A. (2019). Bilek rehabilitasyonu için düşük maliyetli bir taşınabilir robotik cihazın geliştirmesi ve kontrolü.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Solunum Sistemi Takibi ve Egzersizlerine Yönelik Cihazlar Üzerine Sistematik Bir İnceleme

Fatma Betül DERDİYOK^{1*} , Kasım SERBEST²

¹ Biyomedikal Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye.
22500305004@subu.edu.tr.

² Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye.
kserbest@subu.edu.tr

ÖZ

Solunum egzersizleri torakal bölgede duyuşal ve mekanik uyarı oluşturma; göğüs duvarı altında bulunan akciğer bölgesinin havalanmasını artırmayı amaçlayan manuel olarak yapılan uygulamalardır. Solunum fonksiyonlarında problem olan kişilerin tedavisinde pulmoner rehabilitasyon programı kapsamında fizyoterapistler tarafından uygulanmakta ve ev rehabilitasyon programı içerisine dahil edilmesi gerekmektedir. Bu egzersizlerin hasta tarafından doğru postür ve biçimde yapılması bunun yanında hastanın progresyon takibinin yapılması tedavinin etkinliği açısından önem arz etmektedir. Derleme çalışması kapsamında, solunum sistemine yönelik cihazların; hasta verilerini almak, solunum eğitimini desteklemek, telerehabilitasyon ile entegre çalışmak üzere tasarlanan sistemlere odaklanıldığı sistematik bir inceleme çalışması sunulmaktadır. Çalışmada akademik araştırmalar, patentler ve ticari ürünlere ait cihazlar ve özellikleri incelenmektedir. İncelenen cihazlar güçlü ve zayıf yönlerine göre karşılaştırılmaktadır. Literatürde incelenen çalışmalar neticesinde solunum sistem verilerini almak ve solunum eğitimini aktif uyarılar ile karşılamak üzere tasarlanan cihazların hastaların solunum mekaniğini destekleyerek solunum kapasitelerini artırabilmekte olduğu değerlendirilmektedir. Buna ek olarak telerehabilitasyon ile entegre sistem tasarımlarının pulmoner rehabilitasyon için ev ortamında rehabilitasyona katkı sağlanabileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Pulmoner rehabilitasyon, Giyilebilir teknoloji, Hasta- uzman arayüzü, Solunum kapasitesi

A Systematic Review on Devices for Respiratory System Monitoring and Exercises

ABSTRACT

Respiratory exercises create sensory and mechanical stimulation in the thoracic region; they are manual applications that aim to increase the ventilation of the lung area under the chest wall. In the treatment of people with problems in respiratory functions, they are applied by physiotherapists within the scope of pulmonary rehabilitation program and should be included in the home rehabilitation program. It is important that these exercises are performed by the patient in the correct posture and form, as well as the progression follow-up of the

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: 22500305004@subu.edu.tr

patient in terms of the effectiveness of the treatment. Within the scope of the review study, a systematic review of the devices for the respiratory system is presented, focusing on systems designed to receive patient data, support respiratory training, and work integrated with telerehabilitation. In the study, academic research, patents and commercial products and their features are analyzed. The analyzed devices are compared according to their strengths and weaknesses. As a result of the studies reviewed in the literature, it is evaluated that devices designed to receive respiratory system data and meet respiratory training with active stimuli can increase the respiratory capacity of patients by supporting respiratory mechanics. In addition, it is evaluated that system designs integrated with telerehabilitation can contribute to rehabilitation in the home environment for pulmonary rehabilitation.

Keywords: Pulmonary rehabilitation, Wearable technology, Patient-expert interface, Respiratory capacity

1 Giriş

Solunum sistemi solunum yolları, akciğer, göğüs kafesi, göğüs boşluğu, solunum kasları ve bu yapıları denetleyip kontrol eden sinir sisteminden oluşmaktadır [1]. Bu yapılar içerisinde akciğer; göğüs boşluğunda yer alan, alt kısmında diyafram kaburgalar (kosta) arası interkostal kaslar ile çevrili bir organdır. Akciğer, arası sıvı ile dolu çift katlı plevra adı verilen bir zar ile çevrilidir ve bu yapı içerisinde bulunan plevral sıvı etkisiyle recoil özellik kazanmaktadır. Akciğerin bu yapısı sayesinde, dış ve iç basınç değişimlerine duyarlı hale gelmekte ve solunum mekaniği sorunsuz bir şekilde gerçekleşmektedir. Solunum mekaniğinin sağlıklı bir şekilde ilerlemesi için solunum kaslarının etkili bir şekilde kullanılması gerekmektedir.

Solunum Kasları; diyafram, eksternal- interkostal kaslar ve skalen, sternokleidomastoid gibi yardımcı kas gruplarından oluşmaktadır. Akciğeri tamamen sararak inspirasyon ve ekspirasyonda aktif rol oynayan interkostal kaslar, solunumda önemli rol oynayan kas grubu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kaslar içerisinde diyafram akciğerin mekanik olarak desteklenmesinde görev alarak zorlu ekspirasyon başta olmak üzere solunum döngüsünde önemli bir yere sahiptir. İnterkostal kaslar kaburgalar arası saran iki tabakalı kas filamentlerinden oluşmuş yapıdır. Kas liflerinin konumlanma şekli kostanın yönlendirilmesinde ve göğüs kafesinin hacminde değişim yaratmaktadır. Diyafram ve interkostal kaslar haricinde solunuma yardımcı kaslar da göğüs kafesinin hacminde değişim oluşturarak solunumda rol alabilmektedir.

Solunum kaslarının disfonksiyonu, solunum kaslarında güçsüzlüğü nedeniyle işlevini yerine getirmede zorlanma ve yetersizlik durumudur. Sağlıklı solunum sistemine sahip bireyde solunum kasları, hava yolu ve çevreleyen dokular gibi dış faktörlerin oluşturduğu dirence karşı koyabilecek güçtedir [2]. Ancak kas iskelet sistemi hastalıkları [3], obstrüktif ve restriktif hava yolu hastalıkları [4] gibi solunum kaslarının etkilendiği durumlarda solunum kasları aktivasyonu azalmakta ve kişilerin inspirasyon ve ekspirasyon fizyolojisi etkilenmektedir. Solunum fizyolojisi ve mekaniğinin bozulduğu durumlarda fizyoterapistler tarafından pulmoner rehabilitasyon adı verilen tedavi programı uygulanmaktadır.

Pulmoner rehabilitasyon, Avrupa Solunum Araştırmaları Derneği (ERS) ve Amerika Toraks Derneği (ATS) tarafından yapılan tanımlamaya göre; kronik solunum problemine sahip ve semptom gösteren, kişinin günlük yaşam aktivitelerine olumsuz yönde etkilendiği; kanıta dayalı, disiplinler arası çalışma sunan, kişiye özelleştirilmiş tedavi oluşturmayı hedefleyen uygulamalar bütünü olarak tanımlanmaktadır. Bu tedavi yaklaşımı kişilerin fiziksel ve psikolojik durumunu iyileştirme, uzun dönemli sağlığı koruma ve geliştirme üzerine yoğunlaşmaktadır. Pulmoner rehabilitasyonda temel amaçlar; kişilerin hastalık nedeni oluşan semptomlarını azaltmak, kişilerin fiziksel ve emosyonel iyilik halini koruma ve sürdürmeye yardımcı olmak, günlük yaşam aktivitelerini rehabilitasyon ile entegre ederek kişilerin bağımsız katılımını geliştirmeye, yaşam kalitesini artırmaya çalışmaktır. Pulmoner

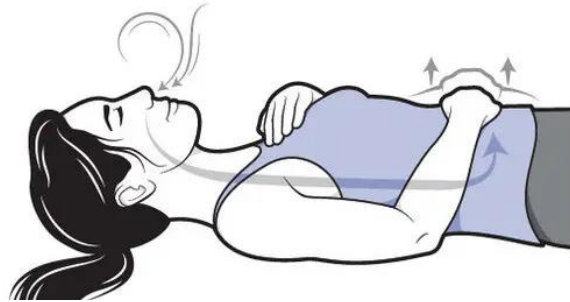
rehabilitasyon içerisindeki uygulamalar; hasta eğitimi, egzersiz programının oluşturulması ve eğitilmesi, çeşitli teknikler, genel yaşam aktiviteleri (GYA) ve psikososyal destek ve rehberlik ile çok çeşitli ve kapsamlıdır.

Pulmoner rehabilitasyonun önemli bir parçası olan solunum egzersizleri; solunum fonksiyonlarında azalma görüldüğü, solunum kas aktivitesinin yeterli düzeyde olmadığı durumda; akciğer hacmini artırmak, solunum iş yükünü azaltmak, inspirasyon ve ekspirasyonu fizyolojik standartlarına uygun gerçekleştirebilmek için pulmoner rehabilitasyon içerisinde yer alan terapötik müdahalelerden biri olarak tanımlanmaktadır [5]. Solunum egzersizleri diyafram solunumu, segmental solunum, kontrollü solunum vb. türleri içermektedir.

Diyafram Solunumu; diyafram kası ile gerçekleşen yavaş ve derin solunum olarak tanımlanmaktadır. Diyafram solunumunda hastadan arzu edilen; göğüs kaslarının daha az aktif olduğu, abdominal duvar kaslarının daha baskın yer aldığı bir solunum gerçekleştirmesidir. Bunun için hastanın baskın kullandığı elini kaburgaların bitiminde, karın bölgesinde tutması ve diğer elinin de göğüs üzerine konulması istenmektedir. Hasta derin solunum yaparken havanın karın bölgesine yönelmesi için abdominal duvara baskı yaparken, göğüs duvarının şişmemesi için kendisini kontrol etmesi istenmektedir [5] (Bkz. Şekil 1).

Diyafram solunumu ile;

- Ventilasyon ve akciğer havalanması artmaktadır.
- Solunum iş yükü azalmaktadır.
- Diyafram hareketliliği ve torakal mobilite artmaktadır.
- Alveollerde gaz değişimi düzenlenmektedir.
- Yardımcı solunum kas aktivitesi azalmaktadır.
- Soluk hacmi ve solunum parametrelerinde iyileşmeler sağlamaktadır [5].



Şekil 1: Diyafram solunumu. [6]

Literatürde torakal ekspansiyon egzersizleri olarak da adlandırılan segmental solunum egzersizleri ise göğüs kafesi üzerinde belli bölgelere basınç uygulayarak o bölgelerde proprioepsiyon uyarısı ve mekanik uyarı oluşturma; göğüs duvarı altında bulunan akciğer bölgesi havalanmasını artırmayı amaçlayan manuel uygulama olarak tanımlanmaktadır. Uygulama; ekspirasyon sonrasında akciğerin havalanması istenilen bölgesinin iz düşümü göğüs duvarı bölgesine, el ile uygulanan basınca karşı akciğerin o bölgesini şişirmeye çalışma şeklindedir. Basınç uygulanan göğüs duvarının altında bulunan interkostal kaslar uyarılmakta ve basınç uygulanan akciğer bölgesini havalandırmak için göğüs o yönde hareket etmektedir (Bkz. Şekil 2). Böylelikle hastanın o bölgeye olan dikkati ve farkındalığı artmakta ve o göğüs bölgesi daha aktif çalışmaya başlamaktadır [5].

Segmental solunum ile;

- Kişilerin solunum fonksiyonları düzelmekte
- Solunum mekaniği düzenlenmekte
- Sekresyon birikimi önlenmekte
- Torakal mobilite artmakta
- Plevral boşlukta sıvı birikmesi engellenmekte
- Stres seviyesi azalmaktadır [5].



Şekil 2: Segmental solunum [7].

Solunum sistemi problemleri yaşayan kişilerde, solunum egzersizleri rehabilitasyonun önemli kısmını oluşturmaktadır. Ancak hastanelerde; hasta istihdamının sınırlı olması, hastaya ayrılan vaktin kısıtlı olması nedeniyle rehabilitasyon hizmetine yeterince ulaşamamakta ve hastalar tarafından pulmoner rehabilitasyon uygulamaları konusunda bilgi eksikliği, tedaviye ulaşım imkanında problemler görülmektedir. Bunlara ek olarak, kliniklerde pulmoner rehabilitasyona ulaşım sağlayan kişilerin, solunum egzersizlerini; ev rehabilitasyon programı içerisinde, uzmanın tavsiye ettiği şekilde uygulaması gerekmektedir. Bu bağlamda her geçen gün değişen ve gelişen teknolojik yapılar, sağlık sistemine ait problemlere çözüm sağlamada öncülük etmektedir.

Bu çalışmanın amacı solunum sistemine yönelik son zamanlarda yapılmış çalışmış çalışmaların detaylı bir incelemesini yapmaktır. Bu doğrultuda sonraki kısımlarda çalışmalara ait bulgular araştırmalar sunulmaktadır.

2 Metodoloji

Bu derleme çalışmasında, farklı özelliklere sahip solunum sisteminin takip ve/veya tedavisinde kullanılmak üzere tasarlanan cihazları belirlemek amacıyla Ekim 2023'te araştırılan çalışmaları sunulmaktadır. Çalışma akademik yayımlar, patent/ faydalı modeller ve ticari ürün olarak üç ayrı grupta incelenmektedir.

Akademik araştırmalar geleceğe yönelik tasarım fikirlerinin ve etkilerinin ortaya konması için önemli bir araç olmuştur. Bu derleme çalışmasında, solunum sistemine yönelik cihazlar ve kullanıcıların değerlendirilmesinin sunulduğu çalışmalar incelenmiştir. Akademik yayımlar incelenirken Web of Science, Scopus, Google Akademik, IEEE Explore ve Springer Link veri tabanları üzerinde arama yapılmıştır. Araştırmalarda anahtar kelime olarak “breathe device”, “breathe guide device”, “ventilation conceptual design”, “segmental breathe exercises”, “wearable breathe device”, “telerehabilitation in

pulmonary rehabilitation” vb. sözcük grupları aranmıştır. Elde edilen çalışma örnekleri taranarak derleme çalışması kapsamına uygun çalışmalardan seçilen örnekler sunulmaktadır.

Solunum sistemi problemlerinin tespiti, analizi ve problemlerin çözümü için geçmişten beri çeşitli cihaz tasarımları oluşturulmuştur. Bu tasarımların bir kısmı patent olarak tescillenmektedir. Solunum ile ilgili patent araştırması için Ekim 2023’te; Google patent, Espacenet patent araştırmaları içeren internet sayfaları üzerinden “segmental breathing”, “breathe device”, “pulmonary rehabilitation”, “breathing exercises” vb. anahtar kelimeler ile arama yapılmış, bulunan patentler derleme çalışmasında sunulmaktadır.

Ticari ürünler belirli bir sorun karşısında toplumun ihtiyaç, talep ve yöneliminin belirlenebilmesinde yardımcı olabilmekte ve yerel ve uluslar arası pazarlarda kullanıcıya sunulmaktadır. Solunum sistemi problemleri yaşayan kişilerin solunum sistemini takip etmek ve desteklemek üzere piyasaya arz edilen çeşitli ticari ürünler çalışma kapsamında incelenmiştir. Bu açıdan Google arama platformu üzerinden “breathing device”, “pulmonary rehabilitation”, “breathing exercises” vb. anahtar kelimeleri kullanılarak yapılan aramalarda çeşitli ticari ürün yetkilisinin online platformuna ulaşılmış, derleme çalışmasında sunulmaktadır.

Derleme çalışması kapsamında incelenen araştırma, patent ve ticari ürünler yukarıda belirtilen anahtar kelimeler özelinde araştırması yapılmıştır. Araştırmada; tasarlanan ürünlerin solunum sistemi özelliklerine ait verilerin izlenmesi, semptomaya yönelik tedavi yaklaşımları, solunum verilerinin yapay zeka uygulamaları ile takibi üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Solunum sistemi takibi içerisinde solunum sesi, göğüs hacim değişimi, solunum ritmi, solunum kas kuvvet ölçümü gibi özellikleri içeren çalışmalar yer almaktadır. Solunum tedavisinde ise solunum kontrolünü sağlayarak stres kontrolünü amaçlayan giyilebilir ya da taşınabilir cihazlar, diyafram solunumunun eğitilmesine odaklanan cihazlar, solunum yollarında biriken sekresyonun atılımına yönelik giyilebilir cihazlar, solunum kapasitesini artırmaya yönelik taşınabilir ya da giyilebilir cihaz örnekleri yer almaktadır. Bu sonuçlar derleme çalışması kapsamında bir elemeye tabi tutulmaktadır. Bu eleme derleme çalışmamızın odak noktasına yakın olması nedeniyle solunum takip sistemleri, solunum kas aktivitesini artırmayı amaçlayan solunum egzersizlerinin öğretilmesini sağlayan cihazlar ve çeşitli donanımlar içeren mobil uygulamalı sistemler özelinde yapılmaktadır. Bu kapsamda akademik yayınlar, patentler ve ticari ürünler araştırılarak detaylı inceleme sonuçları sonraki kısımlarda sunulmaktadır.

2.1 Akademik Yayınlar

Solunum sistemine yönelik cihaz tasarımı araştırması konusunda literatürde birçok çalışma yer almaktadır. İncelenen çalışmalar; bir sonraki bölümlerde, solunum takibi yapmakta olan ve solunum veri takibi ile birlikte solunum egzersiz öğretilmesi üzerinde odaklanan cihazlar olarak iki başlıkta detaylandırılmaktadır.

2.1.1 Sensör bazlı cihaz tasarımına yönelik araştırmalar

Literatüre baktığımızda solunum hızı, ritmi, paterni gibi parametreleri değerlendiren giyilebilir sensörler ile hasta takibi yapabilen sistemler yer almaktadır (Tablo 1). Solunum takibi için torakal mobilitayı inceleyen bir çalışma örneği, solunum parametrelerinin torasik hareketin kaydını içeren manyetik sensörlerden oluşmuş yelek tasarımıdır. Sensörlerin yer aldığı; sırt skapulaların alt ucundan başlayacak şekilde spinal kord boyunca, trakeanın alt ucunda, kostaların en alt ucunda olacak şekilde konumlandırılmış 4,6 ve 8 noktanın oluşturduğu torasik hacim şablonu MATLAB programı üzerinden takip edilmektedir. Aynı zamanda bu çalışma kişilerin solunum parametrelerini de spirometre cihazı ile ölçerek ağızdan ölçülen solunum hacimleri ile, torakal yer değiştirme verileri ile olan ilişkiyi

incelemektedir. Çalışma sonucuna göre 6 ve 8 köşeli solunum hacim ölçümünün solunum parametreleri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir [8].

Solunum takibi için tasarlanan cihazlarda bulunan giyilebilir sensörlerin daha küçük boyutlarda geliştirilerek tekstil malzemeleri ile birleştirilmiş birçok çalışma örneği bulunmaktadır [9-11]. Bu örneklerden biri incelenecek olursa; Yang ve ark. [12] yaptığı çalışmada; obstrüktif solunum hastalıkları, astım gibi durumlarda hastanın takibini sağlayabilmek ve monitörize edebilmek için giyilebilir, yıkanabilir ve dayanıklı tekstil malzeme ile oluşturulmuş bir sensör sistemi tasarımı sunulmaktadır. Bu araştırma iletken iki gümüş iplik kumaş ile bağlantılı sensör ve bunları birbirinden ayıran suni elyaftan oluşan bir kemer tasarımından oluşmaktadır. Kemer göğüs ve abdominal bölgeye bağlanarak göğüs ve abdominal solunumu, dalga formunda takip edilmektedir. Aynı şekilde bluetooth sistemi ile verileri mobil cihaza aktarabilmekte ve hasta takibini sağlayabilmektedir.

Solunum hastalıklarının sadece günlük yaşamda değil uyku sırasında takibinin yapılmasını sağlayan cihaz tasarımları da bulunmaktadır. Bunlardan biri olan uyku apnesinin belirlenebilmesi ve analizi için Bethel ve ark. [13] yaptığı çalışmada, uyku testlerinin karmaşık bir sistem olması, birçok kablo içermesi ve testin uygulanmasını zorlaştırması sorununa çözüm için tek bir giysi üzerinde birçok sensör barındıran, giyilebilir bir sinyal kaydedici sistem üretilmektedir. Giysi; solunum takibi, interkostal ve diyafram kasların EMG sinyali ve kalp hızı için EKG verilerinin alındığı sensörlerden oluşmaktadır. Solunum döngüsü içerisinde diyafram ve interkostal kas aktivitesi, EMG ile takip edilerek uyku apnesi incelenmektedir. Bunun yanı sıra kalp hızı ve inspirasyon analizi monitörize edilmekte ve apne tespiti yapılabilmektedir. Cihaz evde kullanıma olanak tanınması, uzaktan takip edilebilmesi ile telerehabilitasyon çalışmalarına ön ayak oluşturmaktadır.

Literatürde solunum ve fizyolojik parametrelerin sensörler ile alındığı tasarımlar görülmektedir. Alınan bu verileri sağlık uzmanına iletebilen, bağlantı kurabilen ve bir alanda depolayabilen bilişim sistemi oluşturma üzerinde tasarlanan bilişim sistemi çalışmaları da bulunmaktadır. Bu sistemlerden biri olan “WELCOME” adlı akıllı bulut bilişim sistemidir. Sistem; KOAH gibi solunum sistemi problemlerini belirlemek, hastadan giyilebilir sensörler aracılığı ile alınan verileri bir havuzda toplama, depolama ve hasta-doktor arasındaki erişimi ve 24 saat takip sağlamaktadır. Sistem hasta merkezi, sistem bulutu ve karar sistemini içermektedir. Hastadan veri alma sistemi, üzerine sensörler yerleştirilmiş bir yelekten oluşmaktadır. Yelek ile SpO₂, EIT (elektiriksel empedans tomografi bulguları, oskültasyon, EKG), aktivite verileri alınmakta ve hasta merkez platformunda toplanmaktadır. Sistem bulutu ise içerisinde depolama, özellik belirleme ve karar destek unsurlarını içermektedir. Karar destek sistemi ile hastanın klinik verileri, sensörlerden alınan veriler ve çıkarımlar ile ilgili hastayı bilgilendirici alarm, uyarı ve sağlık uzmanının klinik müdahaleleri için durum tahminleri yer almaktadır. [14]

Tablo 1. Sensör bazlı solunum cihazı çalışmaları ve özellikleri.

Referanslar	Amaç	Veri	Sensör	Uyarıcı sistem
[8]	Manyetik sensörler ile akciğer kapasitelerinin saptanması ve spirometre değerleri ile karşılaştırılması.	Akciğer hacmi	Manyetik sensör (trakSTARTM)	-

[9]	Solunum monitörizasyonu için bir tekstil sensörü tasarlama.	Solunum ritmi	Kapasitif sensör	Görsel geri bildirim
[10]	Solunum monitörizasyonu için bir tekstil sensörü tasarlama.	Solunum ritmi	Kapasitif sensör	Görsel geri bildirim
[11]	Solunum monitörizasyonu için bir tekstil sensörü tasarlama.	Solunum ritmi	Kapasitif sensör	Görsel geri bildirim
[12]	Solunum monitörizasyonu için bir tekstil sensörü tasarlama.	Solunum ritmi	Capacitive sensor (with silver fiber thread)	Görsel geri bildirim
[13]	Uyku apnesi tespiti için giyilebilir bir solunum takip cihazı geliştirme	Solunum kasi aktivitesi, Solunum ritmi, Kalp atış hızı	EMG, EKG	-
[14]	WELCOME bulut bilişim sistemi	Bioharness	-	Solunum verileri (ritm,sayısı vb.)

2.1.2 Solunumu yönlendirici sistem tasarımına yönelik araştırmalar

Pulmoner rehabilitasyon seanslarında öğretilen ve hastaların ev programı dahilinde uygulanması istenen solunum egzersizleri; hastanın tedaviyi doğru biçimde uygulaması ve tedavi devamlılığı takibi açısından değerlendirilememektedir. Solunum terapisinde, hastalığın takibi ve progresyonu ile ilgili bilgi almanın yanı sıra pulmoner rehabilitasyona destek olabilecek, hastaya rehberlik edebilecek cihazlara da ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde hastaların solunum sinyallerini değerlendiren ve solunum egzersizlerine destek ve rehberlik eden birçok tasarım örneği bulunmaktadır (Tablo 2).

Pulmoner rehabilitasyonun tedavi uygulamalarından olan; solunum eğitimi, relaksasyon egzersizleri, kontrollü solunum gibi tedavi yaklaşımları, stresle başa çıkmada önem arz etmektedir. Literatürde kontrollü solunum eğitimi ile stres yönetimi sağlamayı amaçlayan, sanal gerçeklik kullanılarak oluşturulmuş sistemler bulunmaktadır [15]. Bunlardan biri; yogik solunumdan örnek alarak derin ve kontrollü solunum yapabilmek amacıyla kişilerin solunumunu izleyebilen ve solunum tekniklerinin doğru bir şekilde uygulanması için kişilere rehberlik eden giyilebilir bir cihaz tasarımıdır. Cihaz kalp hızını tespit etmek için bileğe takılan bir sensör ve kişilerin postür ve solunum bilgilerinin alınmasını sağlayan, giyilebilir sensörlü bir kemerden oluşmaktadır. Bileğe takılan sistem, nabız sensörü içermesinin yanında kişilerin verilerini yansıtan, küçük bir ekran ile monitörize etmektedir. Abdominal bölgeye takılan kemer üzerinde kişilerin postürünü izlemeyi sağlayan fleks sensörü bulunmaktadır. Aynı sistem üzerinde solunum takibi için göğüsteki genişleme ve daralmaya duyarlı ivme ölçer içeren bir sensör bulunmaktadır. Bunların yanı sıra solunum paternindeki sapmaları uyarlamak için titreşim veren

bir titreşim motoru bileklik üzerinde yer almaktadır. Çalışma test edildiğinde, bu cihaz ile farklı solunum tiplerinin kolayca ayırt edilebildiği ve hastayı doğru solunum biçimine yönlendirebildiği değerlendirilmektedir [16].

Aynı amaçla oluşturulmuş başka bir çalışmada, kişilerin solunum hızlarını düzenleyerek stres seviyelerini azaltmak için geri besleme yöntemini içeren bir cihaz tasarımı görülmektedir. Bu emniyet kemeri gibi bir kemere veya bir kayışa kolayca takılabilen bir sistem şeklinde tasarlanmıştır. Sistem içerisinde hava keseleri, eyleyici dizisi ve solunum takibini monitörize eden bir yapı yer almaktadır. Sistemde, solunum hızının takibi için Bioharness cihazı ile solunum, Qsensör ile elektrodermal aktivite takibi yapılmaktadır. Pnömatik eyleyiciler, kişinin solunum tipini yönlendirebilmek için üzerinde bulunan hava keselerini şişirip içindeki havayı boşaltarak kişiye taktik uyarı vermektedir. Hava keselerini şişme sırası mobil cihaz üzerinden kontrol edilebilmektedir. Sistem denendiğinde, balonların sırası ile şişirilmesi ile kişilerde solunum biçimine daha kolay adaptasyon sağladığı, bu sayede solunumlarının düzenlendiği belirtilmektedir. Sistemin ileriki çalışmaları için gerçek koşullarda, günlük yaşam aktiviteleri sırasında ve yüksek stres seviyelerine sahip kişilerde uygulanması gerektiği değerlendirilmektedir [17].

Literatürde solunum analizi ve takibini inceleyen sistem tasarımları arasında görsel geri bildirim ile solunum egzersizlerine destek olan çalışma örnekleri yer almaktadır. Bu örneklerden biri olan; KOAH hastalarının solunum takibi üzerinde yapılan çalışmada; torakal mobilitayı ölçebilen ve mobilite takibi için hasta ve sağlık uzmanı için gerçek zamanlı monitörize edebilen bir cihaz tasarımı sunulmaktadır. Cihaz; göğsü çevreleyen bir kablo ve sternumun alt ucunda konumlandırılmış, göğüs çevresi değişimini ölçen bir encoderdan oluşmaktadır. Göğüs çevre değişimleri, görsel geri besleme özelliği ile bilgisayar ekranına aktarılması ile hasta takibi yapılabilmektedir. Sistemin iki genç erkek üzerinde denemesi yapılmıştır. Deneme sırasında ilk önce görsel geri bildirim olmadan, derin inspirasyon ve ekspirasyon yapılması istenmiş; daha sonra aynı solunumu şeklinde, eş zamanlı görsel geri bildirim ile kişilerin takip etmesi sağlanmıştır. Bu iki ölçüm arasında değerlendirme yapıldığında; görsel geri bildirim olmadığı durumda, kişilerde çabuk yorulma gerçekleşmesi nedeniyle torasik eklem hareket açıklığının (EHA) azaldığı, görsel geri bildiri ile kişilerde daha stabil ve geniş torasik EHA olduğu görüldüğü belirtilmiştir [18].

Görsel geri bildirim geliştirilip mobil oyun uygulama ile birleştirilmesi ile tasarlanan sistem çalışmaları da yer almaktadır. Bunlardan biri olan Stafford ve ark. [19] yapmış olduğu çalışma, solunum problemleri yaşayan insanların solunum egzersizlerini yapmada rehberlik edecek ve bu egzersizleri eğlenceli hale getirebilecek sistem tasarımıdır. Sistem solunum takibi için bir göğüs kemeri, mikrofon ve bir akıllı mobil cihazdan oluşmaktadır. Akıllı mobil uygulama olarak kurulmuş oyun sistemi, mikrofon ve kemerden alınan inspirasyon bilgisi ile ekranda bulunan karakterin inspirasyon ile yukarı yönde, ekspirasyon ile aşağı yönde hareket etmesini sağlayarak oyundaki engellerden geçilmesini şeklinde kurgulanmaktadır. Cihaz, akıllı mobil cihazı olan herkesin bu uygulamaya ulaşabilmesini, hasta solunum verilerinin alınmasını hedeflemektedir. Hastadan alınan ventilasyon döngüsü bilgisini, hastanın solunum sağlık profilini ve progresyonunu ortaya koyabilmesi ile sağlık uzmanlarına yol gösterici olabilmektedir. Mobil oyun ile uyarlanarak, çocukların egzersiz eğitimini desteklemek üzere sunulmuş bir örnek Siering ve ark. [20] yaptığı çalışmadır. Çalışma; solunum disfonksiyonu ve astım problemi gibi solunum problemi yaşayan; dispne, düşük egzersiz kapasitesi, yüzeysel solunum semptomları gösteren çocukların solunum ritimlerini düzenlemek için onların ilgisi ve odağını yakalayabilecek bir solunum eğitimi cihazı tasarlanmaktadır. Çocuklara derin solunum öğretilerek soluk hacmi ve akciğer kapasitesini artırmak amaçlanmaktadır. Bunun için sistem, çocuğun solunum derinliğini ölçebilen giyilebilir bir yelek ve egzersizle entegre bir mobil oyundan oluşmaktadır.

Giyilebilir yelek üzerinde LED ışıklar bulunmaktadır. Bu LED ışıklar arasında kullanılan sensör; parçaların birbiri ile olan uzaklığını analiz etmekte, parçaların birbirine yaklaşmasına duyarlı olması ile de sensörlerin birbirine uyguladığı basıncı ileterek göğüs duvarındaki değişimi gösterebilmektedir. Aynı zamanda bu yeleğe eklenmiş LED lambalar da bu değişim ile birlikte yanıp sönmektedir. LED lambalar, beyaz renge döndüğünde “solunum ritmi iyi değil”, ışıklar söndüğünde “solunum iyi ve ritmi normal” anlamına gelmektedir. Solunum ritmine ait bütün bilgiler oyun üzerine aktararak çocuğun solunum ritmi ve yeterliliği (derin, yüzeysel solunum) ile ilgili bilgi ekran üzerinde bulunan barlarda gösterilmektedir. Oyunun arayüzü incelendiğinde; oyun, uzayda yaşam süren karakterlerin hayatta kalmaları için gereken enerji ve oksijen miktarını karşılamak üzere kullanıcının solunumun verilerini oyun- oyuncu etkileşimi olarak kabul eden bir kurguya sahiptir. Oyun amacına uygun olarak karakterin enerji miktarı (solunum pozisyonu, derinlik) ve ihtiyaç duyduğu oksijen miktarı (solunum ritmi) çocuğun solunumunun düzgünlüğü ile karşılanmaktadır. Aynı şekilde ekran üzerinde yelek üzerindeki ışıklandırma durumu görsel olarak gösterilmektedir. Bu cihaz prototip olarak üretilmiş ve faydalılık denetimi için çocukların kullanımına sunulduğunda, çocukların solunum egzersizlerine odaklarında artma görülmekte ve sistem kullanılabilir bulunmaktadır. Özellikle cihazın LED ile uyarıcı görevi “Cihazın solunum egzersizlerine rehberliğinde daha açık ve anlaşılır olmasını sağlamıştır.” şeklinde yorumlanmaktadır. İlerleyen süreçler için “Bu sistem, solunum hastalıklarının kökeninin bulunması ve hastalık şiddetinin analiz edilmesinde kullanmak üzere geliştirilmesi ve çocuğun bedensel gelişimine bağlı olarak kişiselleştirilmesi sağlanabilir.” değerlendirmesi yapılmaktadır. Bunun yanında yelek tasarımının çocuklar için daha ilgi çekici ve güzel görünüme sahip olabileceği önerisi de bulunmaktadır.

Sağlıklı bir solunum döngüsünde, kişilerin ventilasyon ile oksijen dolan akciğer alanları maksimum seviyededir. Ancak dış (hava kirliliği, sigara vb.) ve iç (solunum yolu enfeksiyonları, solunum sistemi hastalıkları vb.) unsurlar nedeniyle bu alanların havalanmasında problemler görülebilmektedir. Pulmoner rehabilitasyonda sekresyon birikimini önlemek, havalanma alanlarını genişletmek için solunum egzersizlerinin yanı sıra solunum mekaniğine uygun, torakal hareketliliği artırıcı, normal solunumu destekleyici çeşitli uygulamalar (perküsyon, vibrasyon, postüral drenaj vb.) yapılmaktadır. Literatürde bu uygulamaları tıbbi cihaz ile yapabilen ve ventilasyon döngüsünü destekleyen bir çalışma örneği karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma; tetrapleji (sinir hasarı) nedeniyle solunum kaslarında işlevsizliğe sebep olan, ileri seviye solunum kas güçsüzlüğü görülen kişilerde; zorlu ekspirasyon mekanizması desteklemek, solunum döngüsünü taklit etmek amacıyla solunum mekanik modeli kuran bir cihaz tasarlanmaktadır. Cihaz kullanıcının maksimum ekspiratuvar kas gücünü artırmak için karın ve göğüs üzerine negatif ve pozitif basınç uygulayan vakumlu bir sistemden oluşmaktadır. Negatif basınç sağlayan kompresyon aktivatörü diğer bir adıyla demir akciğer, dış iskelete modüle edilmekte, aynı zamanda pozitif basınç ile interkostal ve diyafram kasının kasılmasını taklit etmektedir. Pozitif basınç abdominal kasları sıkıştırarak diyaframı yukarı yönde hareket ettirmekte ve kapalı olan glottisin açılması ile havanın dışarı hızla çıkışı, yani maksimum ekspirasyonu sağlanmaktadır. Bu cihazın deneysel sonuçlarında kişilerin sekresyon atımlarını kolaylaştırdığı, akciğerin havalanma alanlarının genişlediği değerlendirilmektedir [21]. Mekanik uyarılar ile akciğerin havalanma alanlarını artırmayı amaçlayan pulmoner rehabilitasyon uygulamalardan biri segmental solunumdur. Mekanik uyarılar ile bu solunum tipini uyaraabilen giyilebilir bir cihaz tasarımı örneği Tsaknaki ve ark. [22] tarafından sunulmuştur. Sistem ses sanatçılarının nefes kontrolü sağlayarak fonetik yeteneklerini geliştirmesinden yola çıkarak, solunum kontrolünü deneyimlemeyi sağlayan bir cihaz tasarımı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Çalışmada hem solunum tiplerinin deneyimlenmesi ve öğretilmesi hem de solunum sırasındaki farkındalığı yaklaşımlarına yer verilmektedir. Bunun için çalışmada ilk önce, ses eğitmenlerinin rehberliğiyle solunum tipleri öğretilmekte daha sonra sensörler yardımı ile solunum takibi yapılmaktadır. Solunum takibi için gerinim sensörü kullanılmış olup, gerilim değişimine duyarlı bir kemeri daha sert ve sıkı bir kemer olacak şekilde modifiye edilerek cihaz tasarımında sunulmaktadır. Aynı zamanda rektus

abdominus kasların aktivitesini, dansçıların kullandığı dar bir elbiseye monte edilen EMG sensörleri ile inceleyen giyilebilir ekipman da yer almaktadır. Ayrıca solunumun hissedilmesi, taktik uyarı ile doğru solunumun uyarılması ve eğitilmesini sağlamak için sensör- eyleyici yastık sisteminden oluşan “solunum kabuğu” adlı bir sistem oluşturulmuştur. Bu yastıklar toraksın anterior, lateral ve posteriorunda konumlanmaktadır. Yastıklar şişerek dışarıdan bir el gibi kişinin toraksına basınç uygulayarak solunumun o bölgede yoğunlaşmasını sağlamaktadır. Aynı şekilde nefes verildiğinde yastıklar içindeki hava boşalarak ekspirasyonu desteklemektedir. Tasarım denenmiş ve solunum takibi, destekleme ve farkındalığında etkili ve dikkat çekici olduğu yönünde değerlendirilme yapılmaktadır. Sistemin ileriye yönelik çalışmaları için fizyolojik sinyallerin takibi ile kişilerin solunumunu kapsamlı, ayrıntılı değerlendirme ve daha etkili destekleme sağlanabileceği değerlendirilmektedir.

Tablo 2: Aktivatör bazlı solunum cihazı çalışmaları ve özellikleri.

Referanslar	Amaç	Veri	Sensör	Uyarıcı sistem
[13]	Sanal gerçeklik kullanarak solunum kontrolünün sağlanması.	Solunum hızı, ritmi	EquiVital biyosensörü	Görsel geribildirim
[14]	Yogik solunum ve teknik uygulama performansını değerlendirmek için giyilebilir bir cihazın tasarımını araştırmak.	Kalp atış hızı Duruş Solunum ritmi ve paterni	Nabız sensörü Esnek sensör Jiroskop ve ivmeölçer (MPU 6050)	Titreşim aktüatörü Görsel izleme
[15]	Stres yönetimi için geri bildirim yöntemi ile solunum ritmini düzenleyen giyilebilir bir cihaz oluşturmak.	Solunum hızı	Bioharness göğüs kemeri	Pnömatik aktüatör
[16]	Torasik dilatasyonu inceleyebilecek ve geri bildirim sağlayabilecek bir cihaz tasarlamak	Torasik genişleme	Encoder (Microtech, MLS- 30)	Görsel geri bildirim
[17]	Solunum problemi olan hastaların solunum egzersizlerine katılımını artırmak için sanal bir oyun tasarlamak.	Solunum sayısı, göğüs genişleme miktarı	Akustik sensör, Advanpro göğüs kemeri (hızlanma sensörü dahil)	Görsel bildirimlerle mobil oyun
[18]	Solunum problemi olan çocuklarda nefes eğitimini desteklemek için çocukların motivasyonunu ve odağını	Solunum ritmi ve derinliği	Reflexible tekstil	Görsel geri bildirim

	artıran, mobil oyunla entegre giyilebilir cihaz tasarlamak.			LED ışık
[19]	Solunum sensörünü yatak ve sandalyeye entegre ederek hasta takibini sağlamak.	Göğüs genişleme miktarı Oksijen doygunluğu	Gerinim sensörü Pulse oximeter	-
[20]	Farklı solunum paternlerinin tespitini destekleyebilecek bir cihaz tasarlamak.	Solunum kası hareketi Göğüs genişleme miktarı	EMG, Gerinim sensörü (Basınç sensörü)	Pnömatik yastık aktüatörü

2.2 Patentler

Tablo 3'te yer alan patentler detaylı incelenecek olunursa; Patent örneklerinden ilki Dietz tarafından 1984 yılında, solunum hava akımının kısa süreli kesilmesi olarak tanımlanan apne rahatsızlığını tespit etmek için solunum sensör sistemi oluşturma düşüncesi üzerine şekillenmektedir. Bunun için torakal genişleme ve daralmayı pnömatik yollarla algılayan kemer şeklinde pnömatik sensör yer almaktadır. Hasta bu kemeri giymekte ve kemer üzerinden hava kanalları ile uygun bir monitöre bağlanmaktadır. Pnömatik sensörün çalışma mantığına göre, kişi inspirasyon yaparken göğü genişlemesi cihazdan pozitif hava akışına dönüşmekte yani basınç etkisi göstermekte; ekspirasyon yaparken göğüs kasılması, daralması ise negatif basınca dönüşmekte yani vakum etkisi göstermektedir. Bu şekilde oluşan değişimler monitörde takip edilebilmektedir. Cihaz pediatrik ve yetişkin grup dahil olmak üzere antropometrik ölçülere uyum sağlayabilen, hastanın vücut hareketlerine izin veren, kullanımı kolay ve ergonomik yapıda tasarlanmıştır. Cihazda, düşük maliyetli malzemelerden kolayca üretebilmek ve kullanılıp atılabilecek kadar basit halde tasarlamak amaçlanmaktadır [23].

İkinci çalışma 2004 yılında Verheem tarafından patentlenen; solunuma rehberlik etmek amacıyla sesli, görsel veya duyuşal sinyaller sağlayan elektronik zamanlayıcı cihaz tasarımıdır. Cihaz solunum rehberliğini; kişi solunum yaparken nefes alma, verme ve nefesi tutma uzunluğu oranını zamanlayıcı ile düzenleyerek yapmaktadır. Bunun için kullanıcının verilen uyarıya uygun olarak nefes alma, verme ve tutma uzunluğunu ayarlaması beklenmektedir. Cihaz göğüs, el bileği ve ayak bileğine takılabilecek şekilde kemer aparatı ile kullanılmaktadır [24].

Üçüncü çalışma 2007 yılında Murphy tarafından, kişilerin solunumunu algılamak için elektromekanik sensörler ve taktik uyarı ile geri bildirim sağlamak için dönüştürücü (elektronik transdüser) içermektedir. Sistem birbirlerine bağlanmış üç kemerli bir görünüme sahiptir. Solunum analizi içerisinde solunum hızı, derinliği elektrik sinyallerine elektromekanik sensörler ile dönüştürülmektedir. Solunumu takiben alınan elektrik sinyallerinin genliği solunum derinliğine, periyot uzunluğu solunum hızına karşılık gelmekte değerlendirmesinde bulunmaktadır. Aynı zamanda cihaz; solunum farkındalığını artırmak için kişilere, dönüştürücüler yardımıyla titreşim, darbeleme benzeri duyuşal uyarı ile geri dönütte bulunmaktadır [25].

Dört numaralı patent, Wasnick tarafından 2008 yılında patentlenen cihaz; derin nefes alma eğitimi vermek üzere tasarlanmış gövdeye takılan kemerden oluşmaktadır. Cihaz üzerinde göğüsün anahtar bulunmaktadır. Derin nefes egzersizi sırasında karının banda karşı genişlemesi bandı aktifleştirmektedir. Karın yeterince genişlemediği takdirde anahtar aktifleşmemekte gösterge aktifleşmemektedir. Bu şekilde kişi solunum derinliği ile ilgili geri bildirim alabilmektedir [26]. Bir sonraki patent, 2008 yılında Brauers tarafından tasarlanan, solunum egzersizlerine rehberlik etmek amacıyla solunum sensör sistemi ve sensör sinyalinin işleme yöntemi üzerinde çalışmaktadır. Bunun için kişinin ventilasyonunu izleyen bir kontrol ünitesi ve egzersiz ritmini düzenlemek için kullanıcıya sesli, görsel veya dokunsal uyarılar ile yönlendirmede bulunan bir talimat cihazı ve veri sinyalini işlemek ve solunum egzersizini ayarlamak için kontrolör içermektedir. Tasarımda, solunum fazlarını ve hızını inceleyebilen algılayıcı sistemler için piezoelektrik eleman veya kuvvet sensörü alternatiflerinin kullanılabilmesi belirtilmektedir. Bu sensörler kullanılarak inspirasyon ve ekspirasyonu içeren solunumun hangi aşamada olduğu saptanmakta ve her bir aşamanın süresi belirlenmektedir [27].

Altı numaralı, Amurthur ve ark. 2009 yılında patentlenmiş tasarım; uyku apnesi için solunum izleme sistemi üretmek amaçlı oluşturulmaktadır. Tasarım; izleme sistemi, yapışkan sensörler ve uzaktan izleme sistemini içermektedir. Sensörler içerisinde nabız sensörü ile kalp hızı takibi yapılmaktadır. Postürdeki değişimi incelemek ve solunumu takip etmek için ivme ölçer kullanılmaktadır. Sensörlerden alınan veriler sayesinde hastanın solunum durumunu belirlemek için mikroişlemci ile tanımlama yapılmaktadır [28]. Ayrıca kablosuz iletişim cihazına bağlı uzaktan izleme sistemi ile hasta takibi yapılmaktadır. Bir sonraki çalışma; 2012'de Dijk arkadaşları tarafından; solunum yönlendirme, egzersize uygun nefes alma tekniğini öğretmek için işitsel ve dokunsal bilgi sağlayan taşınabilir solunum cihazı tasarımıdır. Sistem, bilgi çıktısının alındığı bilgi çıkış aracı ve solunum bilgisine ait çıktıyı kontrol eden solunuma rehberlik eden solunum yönlendirme cihazından oluşmaktadır. Sistemde solunum hızını, solunum modelini ve değişimleri izlemek için ivme ölçer, kişinin hareketini takip edebilmek için basınç sensörü içermektedir. Bunun yanında kişinin egzersize odaklanmasını incelemek ve ortamdaki gürültü oranını analiz etmek için mikrofon, ışık sensörü ve fizyolojik sensörler yer almaktadır. Kullanıcı sisteme önceden tanımlanmış, solunum egzersizi bilgisine uygun modu seçerek egzersizini yapmaktadır. Fizyolojik verilerin takibi için EKG, EMG içerebileceği alternatif çözüm olarak belirtilmiştir. Cihaz solunuma rehberlik etmek için sesli, görüntülü, taktik (titreşim) uyarıcılar içermekte ve solunumdan sapmalar olduğu durumda geri dönüşte bulunabilmektedir [29]. Bir sonraki çalışma; Gavish ve Doron tarafından 2013 yılında tasarlanan; solunum analiz etmek amacıyla yeni bir yöntem sunan cihaz tasarımıdır. Sistem mikrofon kulaklık ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Ventilasyon periyodunu, ekspirasyon ve ekspirasyon süresini belirlemek için mikrofon ile alınan düşük frekanslı sesleri incelemekte ve dışarı gürültüsü ile ayırt etmektedir. Aynı zamanda kişiyi solunumunu yönlendirmek için kulaklık ile talimat verme özelliği de barındırmaktadır [30]. Bir sonraki çalışma; Al Thalab tarafından 2014 yılında; bronşial astım problemi yaşayan bebeklerin solunum seslerini izlemek için giyilebilir sensör ve bakım vereni uyarmak için göstergeler içeren bir tasarımıdır. Sistem elastik kayış, oksimetre ve alınan bilgileri ileten bir verici sistemden oluşmaktadır. Kemer üzerinde solunum modellerini algılayan akustik sensör içermektedir. Kemere bağlı olan oksimetre bebeğin oksijen alma yüzdesini ölçmektedir. Cihaz aynı zamanda sinyal işleyici ile solunumu, oksimetre değerini birlikte incelemektedir. Bebeğin solunumunun şiddetine göre bebek bakıcısını uyaran bir sesli bir alarm içererek solunum takibi yapabilmeyi sağlamaktadır [31].

Bir sonraki çalışma; Persidsky ve Ahlund tarafından 2015 yılında; solunum egzersizlerine göre solunumu izleme, yönlendirmek ve değerlendirmek üzere cihaz tasarlamışlardır. Sistemde solunumun takip edilmesi için içerisinde aç ve yer değiştirme sensörü barındıran kemer yer almaktadır. Yer değiştirme sensörü, inspirasyon ve ekspirasyonu takip ederken, aç sensörü ise seçilen nefes modeline

yer değiştirme sensörü verilerini karşılaştırma ve kalibre etmek üzere kişinin duruşu ve vücut hareketini izlemektedir. Bunun yanında diyafram nefesini tanımlayıp, takip eden ve oluşan herhangi bir sapma durumunu geri bildirim ile göstermektedir [32]. Bir sonraki çalışma; 2016 yılında Roy ve ark. tarafından, solunum indüktans pletismografisini kullanarak solunum aktivitesini analiz eden sistem tasarlanmıştır. Oluşturulan sistem bir t-shirt ve üzerine sarılmış tel ve bu tele bağlı Colpitts osilatörü içeren elektronik cihazdan oluşmaktadır. Vücutu saran her bir tel vücut parçasının etrafında halka oluşturmaktadır. Oluşan bu halkadan pletismografik sinyal ölçülmekte ve buna göre kişinin fizyolojik ve solunum verileri bu sinyal üzerinden elde edilebilmektedir [33]. Bir sonraki çalışma; 2017 yılında Dwarika tarafından; solunum özelliklerini her koşulda izlemek ve uyarı sistemi oluşturmak üzere tasarım oluşturmuşlardır. Cihaz taşınabilir, vücut üzerinde elbise, takı vb. yapılara yapıştırılabilir küçük boyutta tasarlanmaktadır. Bu cihaz içerisinde akustik sensör barındırmakta ve bunun yanında ivme ölçer, sıcaklık ölçer ve titreşim sensörü içermektedir. Cihaz wifi ile bağlantı kurarak sensörlerden alınan bütün veriler bulut depolama alanında depolanmaktadır [34].

Tablo 3. Patentler.

Ref.	Patent no	Özellik
[23]	US4602643	Ventilasyon sırasında göğüs, karın ve sırttaki hacim artış ve azalışını pnömatik olarak algılar ve izler.
[24]	US2004022482 2A1	Nefes egzersizlerini yönlendirmek için basınç ve elektrik akımı gibi sesli, görsel ve duyuusal sinyaller sağlayan elektronik bir zamanlayıcı cihaz tasarımıdır.
[25]	US2007020343 3A1	Ventilasyon monitörizasyonu ile solunum hızı ve solunum derinliğini ölçen elektromekanik sensörlü elektronik transdüserler ile dokunsal geri bildirim sağlayan giyilebilir bir cihazdır.
[26]	US2008014200 4A1	Anahtar, derin nefes almayı eğitmek için göğüs kemeri ve göğüs genişletme ile etkinleştirilen gösterge sistemidir.
[27]	WO2008139380 A2	Sistem, solunum kemeri ve tekstil kumaşı üzerine monte edilen sensörler ile nefes egzersizlerini yönlendirmek, inspirasyon ve ekspirasyon yoğunluğunu izlemek ve egzersizle bütünleşik bir şekilde yönlendirmek için görsel, işitsel ve dokunsal uyarı sağlayan bir cihazdır.
[28]	WO2009036327 A1	Giyilebilir solunum izleme (biyoempedans sensörü) ve uykuda solunum kalıplarını incelemek için fizyolojik verileri (nabız oksimetresi) ve duruş için hareket bilgilerini (ivmeölçer) alan sensörler ve verileri uzaktan izleyebilen bir kablosuz izleme işlemcisinden oluşur.
[29]	WO2012117376 A1	Özellikle fiziksel aktivite sırasında solunumu yönlendirmek ve yönetmek için hareketi ölçen ses, ışık ve fizyolojik sensörler (ivmeölçer), solunum hızı, solunum paterni, ses, ışık ve fizyolojik sensörlerden oluşan cihaz tasarım önerileri.

[30]	US2013028943 1A1	Solunum süresini, inspirasyonu ve son kullanma süresini analiz etmek için mikrofon ve hoparlör sistemi tasarımı.
[31]	US8663126	Pediyatrik grubun solunum seslerini izlemek için akustik sensörlü giyilebilir göğüs kemeri ve solunum seslerini izlemek ve veri toplamak için mikroışlemcili bir cihazdır.
[32]	US2015034251 8A1	Solunum egzersizlerine göre solunumu izlemek (yer değiştirme sensörü), yönlendirmek ve değerlendirmek (yer değiştirme sensörü) ve duruşu izlemek (açı sensörü) için bir mikrodenetleyici içeren giyilebilir bir nefes eğitim sistemidir; sinyal verilerini alın, işleyin ve iletin.
[33]	CA2896498C	Kişinin fizyolojik parametrelerini, solunum hızını, tidal hacmini, dakika ventilasyonunu pletismografik sinyali ölçerek ölçebilen giyilebilir bir cihazdır.
[34]	US2017007150 6A1	Fizyolojik parametrelerin ve solunumun izlenmesi için akustik sensörlerden (ivmeölçer, mikrofon, titreşim sensörü vb.) oluşan, kötüleşen ilerleme için uyarı sistemine sahip, bluetooth üzerinden veri aktarımı yapılabilen ve toplanabilen giyilebilir bir cihazdır.

2.3 Ticari Ürünler





Solunum takibi için Tablo 4’te gösterilen ticari ürünler incelendiğinde; incelen cihazların birincil amacı çoğunlukla egzersiz performansını değerlendirmek olmakla birlikte literatürde yapılan birçok çalışmada solunum hastalıklarının takibi için de kullanılabilirdiği gösterilmektedir. Belirtilen cihazlar içerisinde solunum takibinin yanında yoga solunumu eğitimi ile relaksasyon sağlamayı amaçlayan Prana cihazı [37] üretilmiştir. Relaksasyon sağlayarak kan basıncını düzenlemek, uyku kalitesini artırmak için üretilmiş bir cihaz örneği de “RESPeRATE” dir [41]. Tabloda belirtilen cihazlar incelendiğinde, cihazların solunum ile ilgili veri alma ve takip özelliklerinin yanı sıra fizyolojik parametrelerden kalp hızı, vücut sıcaklığı gibi verileri ve bunlara ek olarak antrenman sırasındaki aktiviteyi değerlendirmek üzere hareket takibi yapmaktadır. Cihazlar genel olarak veri izlemeyi hedefliyor olsa da birçoğu solunum eğitimi için görsel ve dokunsal geri bildirim sistemleri içermektedir. Görsel geri bildirim için, ekran üzerinden ve mobil uygulama ile veri monitorizasyonunu sağlayabilen; dokunsal geri bildirim için titreşim eyleyicisi içeren cihazlar yer almaktadır. Solunum ile ilgili ticari ürün araştırması yapıldığında, giyilebilir cihazların dışında relaksasyon sağlamak için solunumu yönlendirici, taşınabilir cihazlara rastlanmıştır. Bu cihazlardan ilki; solunum ritmi ve paternini düzenlemek için geliştirilmiş “Bulo” adlı bir solunum egzersiz cihazıdır [42]. Cihaz ağızdan nefes üflenmesi için plastik yapıda bir boru ve nefes analizi yapmayı sağlayan bir aparat içermektedir. Cihaz aynı zamanda mobil uygulama ile elde edilen verileri sunmakta ve solunum egzersizi sırasında kişileri yönlendirmektedir. Cihaz hastanın akciğer kapasitesi, dayanıklılığı ve akciğer yaşına ait bilgiler vermektedir. Hastaya nefes egzersizleri vermekte ve egzersiz sonuçlarını haftalık aylık ve yıllık bazda göstermektedir.

Başka bir cihaz olan “Melo” stres ve anksiyete kontrolü için solunum ve meditasyon egzersizlerini destekleyen taşınabilir bir el cihazıdır [43]. Cihaz elde taşınabilecek kadar küçük boyutta tasarlanmıştır.

Cihaz, kişinin solunum egzersizlerini yönlendirmek üzere ışık ve titreşim şeklinde uyarılar vermektedir. Cihazın, kişilerin solunum kapasitesi derecesine bağlı olarak uygun cihaz tasarımları bulunmaktadır.

Benzer amaçla oluşturulmuş diğer bir ticari ürün, cihaz solunum ritmini düzenlemek için kullanıcıya dokunsal bildirim veren “Moonbird” adlı cihazdır. Cihaz bildirim vermek üzere ritim ile şişip inen bir balon mekanizması ile kişinin cihazın bu ritmine uygun olacak şekilde soluk alıp vermesini istemektedir. Bu şekilde hasta solunum ritmi düzenlenerek, relaksasyon sağlanabilmektedir [44].

Tablo 4: Solunum izleme ve eğitim için ticari giyilebilir ürünler.

Ref.	Ürünler	Özellik	Görsel
[35]	Spire	Solunum verileri ve Fizyolojik veriler (Kalp atış hızı vb.) izleme. Mobil uygulama ile izleme.	
[36]	Oxa	Solunum (Pletisismografi), Kalp Atış Hızı (EKG) ve vücut ısısı (Kızılötesi sensör) izleme. Egzersiz takibi (İvmeölçer).	
[37]	Prana	Diyafram nefesi izleme, duruş kontrolü ve dokunsal stimülasyon ile solunum eğitimi. Mobil oyun ile görsel geri bildirim ve eğlence sağlamak.	
[38]	Eq lifemonitor	Solunum Hızını, Kalp Atış Hızını (EKG) ve vücut ısısını (Termometre) izleyin. Egzersiz takibi (3 eksenli ivmeölçer).	

[39] BioHarness
Zehr

Solunum izleme, veri analizi.



[40] Hexoskin

Solunum hızı ve hacmi (Pletismografi), Kalp atış hızı (EKG) izleme; yorgunluk ve stres seviyesi izleme. Egzersiz hareketi izleme (ivmeölçer).



[41] RESPeRATE

Solunum hızı (gerinim sensörü), gevşemeyi teşvik etmek için sesli geri bildirim sağlar.



[42] Bulo

Solunum kapasitesini belirlemek ve derin nefes almayı kontrol eden bir aparat- mobil uygulama sistemidir.



[43] Melo

Solunum ritmini düzenlemek için kullanıcıya titreşim geri bildirimini vermektedir.



[44] Moonbird

Solunum ritmini düzenlemek için solunum döngüsünü uyarıcı kumanda sistemidir.



3 Tartışma

Bulgular kısmında sunulan çalışma, patent/ faydalı model ve ticari ürünler incelendiğinde; tasarlanan cihazların birçoğunun, stres seviyesinin düzenlenmesi, spor aktiviteleri sırasında kullanıcının solunumunu değerlendirmek ve solunum sistemine ait hastalıkların tespit ve tedavisini incelemek ve desteklemek gibi amaçlar ile geliştirildiği görülmektedir. Çalışma içeriklerinde; solunuma ait parametrelerde solunum hızı, ritmi, paterni, göğüs genişleme miktarı, solunum derinliği, akciğer total hacmi, solunum kas aktivitesi gibi veriler ele alınmaktadır. Bir kısım çalışma, solunum parametreleri yanında; kalp hızı, kan basıncı, oksijen satürasyonu, vücut ısı değişimi gibi fizyolojik değişkenleri; bunlara ek olarak postüral değişim, yorgunluk gibi diğer değişkenleri incelemektedir. Çalışmalarda solunum parametreleri veri takibinde kullanılan sensörler içerisinde en sık kullanılan sensör ivme ölçer olmak üzere gerinim sensörü, kuvvet sensörü, manyetik sensör, EMG, encoder, akustik sensör gibi çeşitli tipleri yer almaktadır. İncelenen çalışma örnekleri çoğunlukla solunum veri takibi amaçlı oluşturulmaktadır. Bu çalışmalarda genelde uyarıcı sistem, görsel geri bildirim yolu üzerinden monitörizasyon ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Çalışmaların bir kısmında görsel uyarıcı sistemler, telerehabilitasyon ile entegre olacak şekilde geliştirilmektedir. Bunun yanında bazı çalışmalar; solunum eğitiminde yönlendirici olmak amacıyla sesli uyarı ve taktil uyarı sistemleri eklemektedir. Taktil uyarı oluşturmayı hedefleyen çalışmalarda eyleyici sistemlerinde; titreşim, yumuşak eyleyici unsurlar yer almaktadır.

Solunum sistemine yönelik tasarlanan cihazların; kişilerdeki solunum performansı ve kullanıcı memnuniyeti açısından değerlendirmesi gelecekte oluşturulacak cihazlar için bir ışık tutmaktadır. Bu bağlamda kullanıcı üzerindeki fizyolojik etkilerinin incelendiği çalışmalar incelenmektedir.

Vanegas ve ark. [45] solunum izleme sistemlerini teknik olarak inceledikleri derleme çalışmasında, ele alınan çalışmaların %60'lık oranı solunum verileri içerisinde göğüs duvarı hareketini inceledikleri gösterilmektedir. Bu veri; solunum parametreleri ile ilgili dolaylı değerlendirme yapılabilme imkanı sağlayabilmesi ile solunum verileri içerisinde göğüs duvarı hareketliliği dolayısıyla solunum hızı, solunum ritmi ve derinliği ile ilgili değerlendirme yapmaktadır. Aynı zamanda, solunum veri takibi için kullanılan sensörler gösterilmiş ve sensörler içerisinde en çok tercih edilen ilk üç algılayıcının, sırası ile optik sensör, direnç sensörü, ivme sensörü olduğunu belirtmiştir. Cao ve ark. [46] yaptığı çalışmada; KOAH hastalığının progresyonu, takibi için hastanın vital bulguları dahil olmak üzere solunum paterni, solunum hızı gibi bilgilerini monitörize etmek amacıyla giyilebilir sensör kullanımının, güvenilirliği ve yeterliliği değerlendirmektedir. Katılımcılara pulmoner rehabilitasyon programı içerisinde; solunum paterni, solunum egzersiz eğitimi, 6MWT (6 Dakika Yürüme Testi) ve 24 saatlik fizyolojik takibi yapılmış ve katılımcılar giyilebilir kemer solunum takip cihazı olan SenseEcho cihazını

kullanılmaktadır. Katılımcılar KOAH hastası olan ve olmayan iki grup oluşturulmuş ve bu grupların 6MWT içerisindeki: EKG, oksijen saturasyonu (spO₂), kalp hızı, solunum hızı; 24 saat monitörizasyonda ise: fizyolojik değerleri (vücut ısıları, kan basınçları da dahil sanırım), uyku kalitesi, uyku bozukluğu tespiti vb. bulguları; solunum paterni içerisinde: göğüs solunumu ve diyafram solunumu değerlendirilmektedir. Çalışma sonuçlarına göre cihazın fizyolojik ve solunum parametrelerinin detaylı olarak değerlendirmesini sağlayabilmesi ile hasta uyumu ve solunum rehabilitasyonunun etkileri hakkında daha detaylı ve faydalı bilgiler elde edilebilmesini sağlayabilmekte olduğu; giyilebilir sensör kullanımının solunum hastalarının takibi için önemli olduğu ve pulmoner rehabilitasyon için yol gösterici olabileceği değerlendirilmektedir. Çalışma sonuçları değerlendirilerek, veri analizi ve karıştırıcı faktör düzeltilmesi için kapsamlı bilgi sağlamak üzere elektronik sağlık kayıtlarından alınan bilgileri giyilebilir sistemler tarafından, fizyolojik verilerle birlikte takip etmek gerektiği değerlendirilmektedir. Bu amaca uygun olarak solunum sistemine yönelik tasarlanması planlanan cihazların takip ettiği veriler içerisinde; solunum verileri ve bunların çeşitli sensörler ile dolaylı olarak değerlendirilebileceği görülmektedir. Bunlara ek olarak solunum verileri yanında fizyolojik parametrelerden kalp hızı ve saturasyon bilgisi takibinin dahil edilmesi değerlendirilmelidir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışmalarda uyarı sistemleri genellikle görsel geri bildirim şeklinde olduğu görülmektedir. Zhu ve ark. [47] geri beslemenin ve geri besleme türünün solunum eğitimi üzerindeki etkisini incelemektedir. Çalışmada katılımcılara solunum egzersiz eğitimi verilmekte, egzersiz sırasındaki kalp hızı takibi yapılmaktadır. Katılımcılar herhangi bir geri bildirim uygulanmayan ve görsel, işitsel geri bildirim uygulanan olmak üzere iki gruba ayrılarak değerlendirme yapılmaktadır. Çalışma sonucunda geri beslemenin solunum eğitimi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu; uyaran tipi olarak incelendiğinde ise görsel geri bildirim sesli geri bildirim oranla daha etkili olduğu değerlendirilmektedir. Görsel geri besleme üzerinde geliştirilen bir başka çalışmada, sanal gerçeklik ile entegre mobil uygulama tasarlanarak askerlere kontrollü solunum eğitimi için geri besleme yöntemi uygulanmakta ve kişilerin stres seviyelerindeki değişim incelenmektedir. Sistemin test edilmesinin ardından, geri besleme yönteminin kullanılmasının kişilerin katılım ve öğrenmesini geliştirdiği; eğitim başarısına önemli bir katkıda bulunduğu değerlendirilmektedir [15]. Bu nedenle, biofeedback bileşeninin, kişiselleştirilmiş ventilasyon döngüsü, nefesteki düzeltmeler, kararlı bir solunum paterni ve solunum hızını azaltma becerisi geliştirme konusunda daha etkili bir yaklaşım geliştirmede son derece yararlı olduğu değerlendirilmektedir. Cihaz tasarımlarında yer alan diğer bir uyarıcı bileşen taktil uyarı sistemidir. Taktil uyarı propriosepsiyon duyusunu geliştirerek dış dünya ile olan etkileşimimizi derinleştirerek solunum eğitiminde aktif olan sinir yapılarını geliştirmektedir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte cihaz- kullanıcı arasında veri aktarımı sağlanarak duyuşal etkileşim sağlanabilmektedir. Bu cihazlar; bedensel farkındalığımızı artırmada yardımcı olarak, duyuşal yeteneklerimiz daha etkili şekilde gelişebilmektedir. Karpashevich ve ark.[48] solunum egzersizleri için şekil değiştirebilen uyarıcı sisteme sahip soma korse tasarımını değerlendirdikleri çalışmada; solunum ritmi ile uyumlu dokunsal uyaran veren pnömatik sistem kurulmuştur. Sistem kişinin solunum döngüsüne uygun olarak kişinin solunum ritmine özel olacak şekilde uyarı sistemini aktive etmektedir. Çalışma sonucunda; bu uyarıcı sistemin, kas sinir sistemi reaksiyonunu geliştirerek solunum egzersizlerini öğrenmede etkili bir yol olduğu değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda kapsamlı bir solunum sistemine rehabilitasyon cihaz tasarımında uyarıcı sistem barındırması ve bu uyarıcı sistemin görsel, sesli ve özellikle taktil uyaranlardan en az biri ile desteklenmesinin rehabilitasyonda hasta farkındalık ve katılımını artırabileceği değerlendirilmektedir.

Solunum takibi ile ilgili çalışmaların birçoğu görsel geri bildirim sağlanması için kullanıcıya mobil cihazlar üzerinden ulaşılabilen uygulama vb. arayüz sistemleri sunmaktadır. Bununla birlikte bu cihazların birçoğu hasta takibi yapmak ve hastaya geri dönüşte bulunmaya imkan tanıyan uzaktan takip

özellikleri barındırmamakta buna karşın çalışmaların ileriye yönelik hedefleri içerisinde bahsedilmektedir. Literatürde telerehabilitasyon ile entegre solunum takip cihazları incelendiğinde, araştırmalar içerisinde bulut bilişim sistemlerine ait çalışmaların yer aldığı görülmektedir. Bu sistemlerden biri olan WELCOME; solunum takibi için giyilebilir sensörlü yapı ve bulut bilişim sistemi ile hasta değerlendirmesi yapabilmektedir. Sistemin etkinliğini değerlendirmek üzere Kaimakamık ve ark. [49] KOAH hastalarını WELCOME sistemi ve giyilebilir sensörlü yelek kullanarak hasta verilerini ve gelişimini uzaktan takip etmektedir. Çalışmaya 17 semptom gösteren KOAH hastası (GOLD seviye 2-4) olan, hastane yatışı verilmiş kişiler dahil edilmektedir. Hastaların takibi, hastanede yatış süresi boyunca WELCOME sistemi ile yapılmaktadır. Çalışma sonucunda uzaktan takip sisteminin, hasta verilerini değerlendirebilmesini ve altta yatan hastalık durumlarının daha iyi anlaşılmasını sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Aynı zamanda diğer sağlık profesyonelleri ile iletişim kurabilme yeteneği ile birden fazla komorbiditye sahip hastaları incelemede uzmanlar arasında işbirliğini destekleyebileceği; bu işbirliği ile hastalarının hastalık durumu ve yaşam kalitesi hakkında çok yüksek bir durumsal farkındalık ve hastalıkla ilgili değişkenlerde göze çarpmayan detayların fark edilmesini sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle Covid 19 salgını sonrasında; solunum rehabilitasyonuna ihtiyaç duyan kişilerin uzaktan takibini sağlayabilecek sistem tasarımı çalışmaları artmakta ve telerehabilitasyon sistemlerinin hastaların solunum fonksiyonlarını iyileştirmede ve olası komplikasyonların azalmasına yardımcı olabileceği değerlendirilmektedir [50- 51]. Derdiyok [52] solunum egzersizleri içerisinde yer alan segmental solunuma yönelik giyilebilir bir cihaz tasarlamakta ve tasarımlar arasında değerlendirme yaparak en ideal cihaz tasarımını detaylı bir şekilde incelemektedir. Yaptığı çalışma içerisinde solunum sisteminin değerlendirmesi, tedaviye yön verici unsur içermesi ve telerehabilitasyon özelliğini barındıracak şekilde özellikler eklenmek üzerinde yoğunlaşmakta, bu özelliklerin solunum cihazında yer alması ile pulmoner rehabilitasyona önemli bir katkı sağlanabileceğini değerlendirmektedir. Solunum fizyoterapistlerine olan ilgi ve ihtiyaç artmakta; kişiler hastane ortamından uzaktan takip edilebilen tedavi yöntemlerine başvurmaya başlamaktadır. Solunum tedavisine olan ihtiyacı karşılamak için tasarlanan cihazlar ile hastaların uzaktan takibi ve desteklenmesi yapılabilmektedir. Bunun yanında solunum tedavisine olan ilgi ve bilgi artabilmektedir. Bu sayede solunum terapisi farkındalığı oluşmakta ve tedaviye olan erişim olanağı artmaktadır. Solunum sistemi rehabilitasyon programının bölgesel ve ulusal yayılımının sağlanması için solunum sistemine yönelik tasarlanan cihaz sistemlerinde telerehabilitasyon özelliğinin yer alması cihazı öne taşıyabileceği ve kullanıcı kitlesinin kapasitesini artırmada önemli rol oynayabileceği değerlendirilmektedir.

4 Sonuç

Bu makale solunum sistemi rehabilitasyonun uygulamalara yönelik tasarım, cihaz, sistemler ile ilgili mevcut patent, araştırmalar ve ticari ürünlerin çeşitli kaynakların taranması ile ayrıntılı bir derleme çalışması sunmaktadır. İncelenen çalışmalar; solunum sistemine ait verilerin alınması, solunum egzersizlerinin çeşitli amaçlarla desteklenmesi özelinde araştırılarak solunum sistemi rehabilitasyonu içerisinde ihtiyaç duyulabilecek cihazları ortaya koymaktadır.

İncelenen tasarımların içerisinde solunum sistemi hastalıklarına sahip kişilerin progresyonunun takip edilmesini sağlayabilme özelliği olan cihazların sağlık uzmanları için daha hızlı ve etkili değerlendirme yapabilmelerine imkan sağlayabilecek veriler sunabilmekte olduğu görülmektedir. Ayrıca sporcuların kullanımına yönelik tasarlanan cihazlar ile de solunum verileri alınarak, sporcunun kondisyonunu değerlendirme imkanı sunulabilmektedir. Bu cihazların klinikte ve klinik dışında aktif kullanılabilmesi sağlandığı takdirde kullanıcıların daha güvenli bir solunum rehabilitasyon sürecini yaşayabileceği değerlendirilmektedir.

Solunum sistemi problemi yaşayan kişiler ya da solunum kontrolü sağlamak isteyen kişiler için solunum egzersizlerinin eğitimi ve bu egzersizler dahilinde solunum kontrolünün uyarılmasını sağlayabilen aktif cihazlar yer almaktadır. Sistem içerisinde eyleyici bulunduran bu cihazların solunum sistemi fizyolojisi ve mekaniğini destekleyerek solunum kontrolü sağlama, akciğer kapasitesi artırmaya yönelik tedaviyi destekleyici olabileceği değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra solunum kontrolü sağlanarak stres seviyesini azaltmak da olduğu da ortaya konulan sonuçlardan biridir.

Çalışma sonucunda solunum sistemini destekleyen çalışmaların sayısının gün geçtikçe artmakta olduğu, ihtiyaçlar doğrultusunda fonksiyonlarının gelişmekte olduğu ve hatta yapay zeka ile entegre sistemleri kullanmaya yöneldiği görülmektedir. Buna ek olarak solunum sistemi verilerini almak, değerlendirmek; solunum rehabilitasyonunu desteklemek üzere solunum sistemi problemi olsun olmasın herkesin solunum sisteminin kontrol ve gelişimini sağlamak açısından solunum sistemine yönelik değerlendirme ve destekleme odaklı cihazlar solunum sistemini rehabilite etmede önemli bir yere sahip olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yapay zeka ile desteklenen tasarımların mobil uygulama formunda kullanıcıya ulaştırılması ile daha fazla kişinin solunum rehabilitasyonuna ulaşım imkanı sağlanabilmekte, kontrollü izleme ile progresyon takibi yapılabilmektedir.

Solunum sistemine yönelik cihaz tasarımı planlanması durumunda tasarımcıların; sistem içerisinde solunum verileri yanında fizyolojik verilerin takibinin yapıldığı; solunum eğitiminin desteklendiği ve bu amaçla görsel/ sesli/ taktik uyarıcıların sisteme dahil edildiği ve telerehabilitasyon ile entegre bir yazılım içeren tasarım oluşturulduğu bir sistem ile solunum rehabilitasyonuna önemli katkı sağlayabileceği, optimum tasarımı oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

5 Beyanname

5.1. Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

5.2. Yazarların Katkıları

Fatma Betül DERDİYOK: Çalışma fikrinin oluşturulması, literatür incelemesi, patent ve ticari çalışmaların incelenmesi, derleme sonuçlarının sunulması, makale yazımı ve sorumluluğu.

Kasım SERBEST: Çalışma fikrinin oluşturulması, makalenin gözden geçirilmesi ve yazım düzenlemelerinin yapılması.

Kaynakça

- [1] Bacak, G., & Gümtüştekin, K. (2007). ÖSS'ye Hazırlanan Öğrencilerin Deneme Sınavları Ortalamaları İle Solunum Parametreleri Arasındaki İlişki. (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Fizyoloji Anabilim Dalı, Erzurum.
- [2] Yamak, D., & Yamak, B. (2019). Solunum Mekaniği. (s. 21). Ankara: Hipokrat kitabevi.
- [3] Aboussouan, L. S. (2009). Mechanisms of exercise limitation and pulmonary rehabilitation for patients with neuromuscular disease. *Chronic Respiratory Disease*, 6(4), 231-249.
- [4] Laghi, F., & Tobin, M. J. (2003). Disorders of the respiratory muscles. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 168(1), 10-48.
- [5] nytimes.com [Internet]. USA; Breathe Better With These Nine Exercises; 2018 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022] Erişim adresi: <https://www.nytimes.com/2020/07/18/at-home/coronavirus-breathing-exercises.html>
- [6] fizyoo.com [Internet]. Türkiye; Solunum Egzersizleri Fizik Tedavi; 2018 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022] Erişim adresi: <https://fizyoo.com/solunum-egzersizleri-fizik-tedavi/>
- [7] Ergene, T., Karabibik, D. (2019), Pulmoner Fizyoterapi- Rehabilitasyonun Teknikleri ve Tamamlayıcıları, (89-101) Ankara: Hipokrat Kitabevi.
- [8] Loubet, M., Goujon, L., & Barthod, C. (2021). Recording breathing volumes with magnetic motion sensors, dedicated to COPD during the CPT session. 3rd Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability.(s. 60-62).Taiwan: Tainan, Mayıs 28-30.
- [9] Yang, C. M., Huang, W. T., Yang, T. L., Hsieh, M. C., & Liu, C. T. (2008). Textiles digital sensors for detecting breathing frequency. 5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors. (s. 276-279). China: Hong Kong, Haziran 1-3.
- [10] Xiao, G., Ju, J., Lu, H., Shi, X., Wang, X., Wang, W., ... & Lu, Z. (2022). A Weavable and Scalable Cotton-Yarn-Based Battery Activated by Human Sweat for Textile Electronics. *Advanced Science*, 9 (7), 1-14.
- [11] Zhao, C., Liu, D., Xu, G., Zhou, J., Zhang, X., Liao, C., & Wang, Y. (2022). Recent advances in fiber optic sensors for respiratory monitoring. *Optical Fiber Technology*, 72, 1-12.
- [12] Yang, C. M., Yang, T. L., Wu, C. C., Hung, S. H., Liao, M. H., Su, M. J., & Hsieh, H. C. (2014). Textile-based capacitive sensor for a wireless wearable breath monitoring system. *IEEE International Conference on Consumer Electronics*. (s. 232-233). USA: Las Vegas, January 10-13
- [13] Bethel, S. J., Joslin, C. T., Shepherd, B. S., Martel, J. M., & Dow, D. E. (2015). Wearable at-home recording system for sleep apnea. 17th International Conference on E-health Networking, Application & Services, (s. 149-152). USA: Boston, October 14-17.
- [14] Chouvarda, I., Philip, N. Y., Natsiavas, P., Kilintzis, V., Sobnath, D., Kayyali, R., ... & Maglaveras, N. (2014). WELCOME—innovative integrated care platform using wearable sensing and smart cloud computing for COPD patients with comorbidities. 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, (s. 3180-3183). USA: Chicago, August 26-30.
- [15] Kluge, M. G., Maltby, S., Walker, N., Bennett, N., Aidman, E., Nalivaiko, E., & Walker, F. R. (2021). Development of a modular stress management platform (Performance Edge VR) and a pilot efficacy trial of a bio-feedback enhanced training module for controlled breathing. *PLoS one*, 16(2), 1-22.
- [16] Puranik, K. A., & Kanthi, M. (2019). Wearable Device for Yogic Breathing. *Amity International Conference on Artificial Intelligence*. (s. 605-610). United Arab Emirates: Dubai, Şubat 4-6.
- [17] Choi, K. Y., Lee, J., ElHaouij, N., Picard, R., & Ishii, H. (2021). Aspire: clippable, mobile pneumatic-haptic device for breathing rate regulation via personalizable tactile feedback. *Conference on Human Factors in Computing Systems*, (pp. 1- 8). Japan: Yokohama, Mayıs 8-13.
- [18] Ando, T., Kawamura, K., Fujitani, J., Koike, T., Fujimoto, M., & Fujie, M. G. (2011). Thoracic ROM measurement system with visual bio-feedback: System design and biofeedback evaluation. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, (pp. 1272-1274). USA: Boston, Ağustos 30- Eylül 3.
- [19] Stafford, M., Lin, F., & Xu, W. (2016). Flappy breath: A smartphone-based breath exergame. *IEEE First International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies*. (pp. 332-333). USA: Washington, Haziran 27-29.
- [20] Siering, L., Ludden, G. D., Mader, A., & van Rees, H. (2019). A Theoretical Framework and Conceptual Design for Engaging Children in Therapy at Home—The Design of a Wearable Breathing Trainer. *Journal of Personalized Medicine*, 9(2), 27.

- [21] Zhang, Y., Wang, Z., Ge, Q., Wang, Z., Zhou, X., Han, S., ... & Wang, D. (2022). Soft Exoskeleton Mimics Human Cough for Assisting the Expectorability of SCI Patients. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30, 936-946.
- [22] Tsaknaki, V., Cotton, K., Karpashevich, P., & Sanches, P. (2021). "Feeling the Sensor Feeling you": A Soma Design Exploration on Sensing Non-habitual Breathing. *Conference on Human Factors in Computing Systems*. (s. 1-16). USA: New York, Mayıs 8-13.
- [23] Dietz, H. G. (1986). U.S. Patent No. 4,602,643. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [24] Verheem, J. B. (2004). U.S. Patent No. 10/839,998. Carlsbad, CA: U.S. Patent Application Publication
- [25] Murphy, M. (2007). U.S. Patent No. 11/657,831. New York, NY: U.S. Patent Application Publication.
- [26] Wasnick, M. S. (2008). U.S. Patent No. 11/639,657. Poulsbo, WA: U.S. Patent Application Publication.
- [27] Brauers, A. (2008). W.O. International Application Number: PCT/IB2008/051797
- [28] Amurthur, B., Bly, M. J., Libbus, I., & Manicka, Y. D. (2009). U.S. Patent No. 2008/0142004. Chicago: US. Patent Application Publication.
- [29] Dijk, E. O., Janssen, J. H., Westerink, J. H. D. M., De Vries, J. J. G., & Dooren, M. Van. (2012). Patent No. PCT/IB2012/050984. Gronenewoudseweg, Eindhoven: U.S. World Intellectual Property Organisation, International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty.
- [30] Gavish, B. ve Doron, Y. (2013). U.S. Patent No. 13/926,840. Gereda, IL: U.S. Patent Application Publication.
- [31] Al Thalab, F. S. (2014). U.S. Patent No. 8,663,126. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [32] Persidsky, A. M., & Ahlund, R. A. (2015). U.S. Patent No. 14/706,939. San Francisco: U.S. Patent Application Publication.
- [33] Roy, J. F., Fournier, P. A., Robillard, C., Corriveau, R., Dubeau, S., Gagne-turcotte, A., & Khouya, D. (2016). CA Patent No. 14/955,749. Ottawa: Canadian Intellectual Property Office.
- [34] Dwarika, J. (2017). U.S. Patent No. 15/147,293. Rochester, N.Y.: U.S. Patent Application Publication.
- [35] techcrunch.com [İnternet]. San Francisco (CA): Josh Constine; [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://techcrunch.com/2014/06/17/spire-breath-taker/>
- [36] thegadgetflow.com [İnternet]. New York (USA): Genevieve Healey; 2022 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://thegadgetflow.com/portfolio/oxa-breathing-wearable-uses-live-biofeedback-to-both-reduce-stress-improve-sleep/>
- [37] prana.co [İnternet]. USA; Prana; 2022 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022] Erişim adresi: <https://prana.co/pages/how-it-works>
- [38] equivital.com [İnternet]. Cambridge (UK): Eq lifemonitor; 2022 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://equivital.com/products/eq02-lifemonitor/>.
- [39] zephyranywhere.com [İnternet]. Colorado (ABD): Zephyr; 2022 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://www.zephyranywhere.com/system/overview>
- [40] hexoskin.com [İnternet]. Montréal (Canada): Hexoskin; 2013 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://www.hexoskin.com/>.
- [41] Resperate.com [İnternet]. New Jersey (ABD): Resperate; c 2017-2023 [güncelleme 2023 4 Eylül; Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://www.resperate.com/how-it-works/>.
- [42] Bulo.breathing.co.kr [İnternet]. Seoul (South Korea): Bulo; 2022 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://www.kickstarter.com/projects/breathings/bulo-increase-performance-with-curated-breathing-exercises/>.
- [43] theawellbeing.com [İnternet]. London (UK): Melo; 2022 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://me.currentbody.com/products/melo-handheld-anxiety-and-meditation-breathing-device/>.
- [44] Moonbird.life [İnternet]. London (UK): Moonbird; 2022 [Alıntılama tarihi: 22 Kasım 2022]. Erişim adresi: <https://www.moonbird.life/>.
- [45] Vanegas, E., Igual, R. and Plaza, I. (2020). Sensing systems for respiration monitoring: A technical systematic review, *Sensors*, 20(18), p. 5446. Erişim: <https://doi.org/10.3390/s20185446>.

- [46] Cao, D., Zhang, Z., Liang, H., Liu, X., She, Y., Li, Y., ... & Yu, M. (2018). Application of a wearable physiological monitoring system in pulmonary respiratory rehabilitation research. 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, (pp. 1-6).China: Beijing, 13-15 Ekim.
- [47] Zhu, Q., Kong, X. L., & Xie, Y. Y. (2012). The influence of biofeedback on respiratory training effect. In 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012) (pp. 1067-1071). China: Yantai, 19-20 Mayıs.
- [48] Karpashevich, P. et al. (2022). Touching our breathing through shape-change: Monster, organic other, or Twisted Mirror, ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 29(3), s. 1-40. Erişim: <https://doi.org/10.1145/3490498>.
- [49] Kaimakamis, E., Perantoni, E., Serasli, E., Kilintzis, V., Chouvarda, I., Cheimariotis, G. A., ... & Maglaveras, N. (2019). Applying translational medicine by using the welcome remote monitoring system on patients with COPD and comorbidities. EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI) (s. 1-4). USA: Chicago, Mayıs 19-22.
- [50] Bermejo-Gil, B. M., Pérez-Robledo, F., Llamas-Ramos, R., Silva, L. A., Sales-Mendes, A., Leithardt, V. R. Q., & Llamas-Ramos, I. (2021). RespiraConNosotros: a viable home-based telerehabilitation system for respiratory patients. Sensors, 21(10), 3318.
- [51] Kilintzis, V. et al. (2022). CoCross: An ICT platform enabling monitoring recording and fusion of clinical information chest sounds and imaging of covid-19 ICU patients, Healthcare, 10 (2), s. 276 Erişim: <https://doi.org/10.3390/healthcare10020276>.
- [52] Derdiyok, F. B. (2023). Segmental solunuma yönelik giyilebilir bir telerehabilitasyon sisteminin kavramsal tasarımı (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Improved MEMS microphone frequency response through design-optimization

Neslihan DENGİZ^{1*} 

¹ Mechatronics Engineering Department, Sakarya University of Applied Sciences

ABSTRACT

Microphone main characteristic is to faithfully detect and transform incoming acoustic signal in electric one. Semiconductor based capacitive MEMS microphones, despite their limited dimensions, offer remarkable performances (frequency response, SNR). The purpose of this article is to introduce some design optimizations in the current SDM (Sealed-Dual-Membrane) capacitive MEMS microphone mainly concerning the position of the ventilation hole. The effects of the suggested modifications on the microphone's performances were evaluated using Lumped Model simulation tool. Device frequency response within audio-band clearly changed and a totally flat shape was obtained. Improvements in the microphone performances were also achieved, Signal-to-Noise Ratio (SNR) passed from a starting value of 71,24 dB to a final value of 71,49 dB. This SNR increase is related to the A-weighted noise decrease, it passed from 107,98 dB to 108,22 dB.

Keywords: capacitive MEMS microphone, frequency response, lumped model, ventilation hole, back-volume.

1 Introduction

Micro-Electro-Mechanical Systems, or MEMS, is a technology that can be broadly defined as miniaturized mechanical and electro-mechanical elements made using microfabrication techniques [1]. The critical physical dimensions of MEMS devices can range from well below a micron to several millimeters at the lower end of the dimensional spectrum. The most notable elements of MEMS devices are microsensors and micro-actuators [2]. Microsensors and micro-actuators are conveniently categorized as "transducers", defined as devices that convert energy from one form to another. In the case of microsensors, the device typically converts a measured mechanical signal into an electrical signal [2][3]. Many of these micromachine sensors have demonstrated performances that exceed those of their macro-scale counterparts. MEMS devices manufacturing methods are based on batch manufacturing techniques which can translate into low manufacturing costs per device [3]. As a result, it is possible to achieve excellent device performance but also to do so at a relatively low-cost level [4]. Unsurprisingly, silicon-based discrete microsensors are rapidly becoming commercially available and the markets for these devices continue to grow rapidly. The true potential of MEMS begins to emerge when these miniaturized

* Corresponding Author's email: g180918023@subu.edu.tr

sensors, actuators and structures can be combined on a common silicon substrate together with integrated circuits [2]. Microelectronic integrated circuits can be considered as the "brain" of a system, and MEMS augments this decision-making capability with "eyes" and "arms", enabling microsystems to sense and control the environment. Sensors collect information from the environment by measuring mechanical, thermal, biological, chemical, optical and magnetic phenomena. The electronics then process the information obtained from the sensors [3]. Furthermore, because MEMS devices are manufactured using mass production techniques, unprecedented levels of functionality, reliability and complexity can be placed on a small silicon chip at a relatively low cost [2, 4]. MEMS technology is extremely diverse and efficient, both in terms of expected application areas and how the devices are designed and manufactured. Capacitive microphones currently represent one of the most widespread application of MEMS devices. Their key performance parameters are primarily bound to their acoustic behavior and include frequency response, Signal-to-Noise Ratio (SNR), Total Harmonic Distortion (THD), Acoustical Overload Point (AOP) and package size. The starting point of our investigation is based on the SDM microphone design [5] that represents the most performing and sophisticated capacitive MEMS microphones. Many studies and simulations have been performed to improve and optimize its performances [6]. To improve its frequency response, especially near the lower limit of the audio-band (20 Hz – 20 kHz), a modification of the ventilation hole [7][8] position is suggested. This is beneficial for device performances because it makes the frequency response flat inside all the audio-band so the microphone is able to detect and transduce in the same way all the signals, independently from their frequency. Suggested modification of ventilation hole position is also beneficial for device stability and robustness over the time against contaminants like water and particles. Lumped model simulations have been performed to verify and support our expectations.

2 Material and method

2.1 Ventilation hole position

The ventilation hole is a circular opening required in the SDM membrane design to compensate for the slow pressure change between the back volume and the front volume (Bosch cavity). Microphones have to perform identically in different conditions at sea level and above sea level where the atmospheric pressure is different. In absence of the ventilation hole to compensate for this variation in atmospheric pressure, it is possible for a pressure difference to occur between the front volume, which is connected to the external environment through the sound port, and the back volume, which is completely enclosed. This difference may cause the membrane to pre-bend and change the membrane mechanical stress, consequently altering the acoustic performance of the microphone. The ventilation hole function is very important to guarantee the correct operating mode of the microphone, but it also has some disadvantages:

- it is a possible access for contaminants like water and particulate. These contaminants can enter the back-volume through the vent and permanently jeopardize MEMS membrane performances.
- It creates additional acoustic noise as the air volume has to flow from the larger front-volume (Bosch cavity) to a much smaller volume (ventilation hole channel).
- Combination of ventilation hole and back-volume is at the origin of the high-pass filter effect visible in the microphone frequency response. It has a corner frequency between 10 Hz and 40 Hz and gives the microphone frequency response its non-flat shape.
- It results in a reduction of the active area of the membrane capable of generating signals.

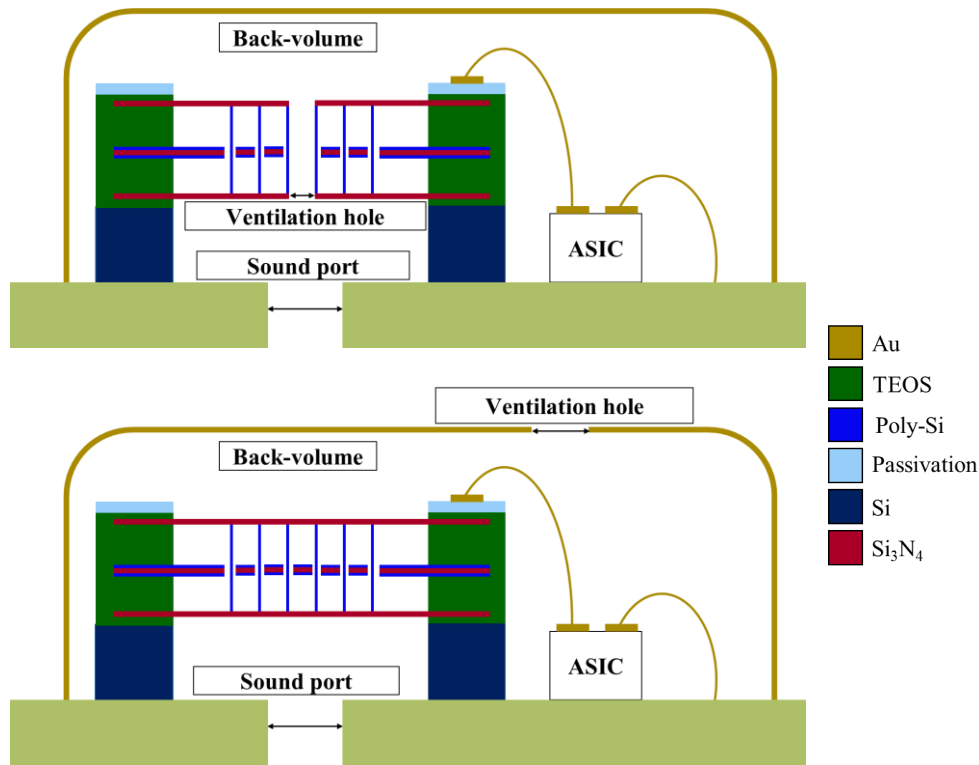


Fig. 1. On the upper side there is a cross section of current SDM MEMS microphone design where the ventilation hole is on the membrane and the lid is completely sealed. On the lower side there is a cross section of new SDM MEMS microphone design where the ventilation hole is on the lid while membrane has no opening.

In summary, the removal of the ventilation hole may provide some improvements in terms of acoustic performance (noise reduction, signal enhancement) and robustness, but the slow pressure compensation function must be implemented in an alternative way. A possible solution to compensate for atmospheric pressure variation is to add an opening in the microphone lid, so that a connection between the back-volume and the environment can be created (Figure 1). This design change is not only an alternative solution for the compensation of slow pressure variation, but also has some additional advantages:

- it reduces the microphone noise level because the ventilation hole channel, that generates noise, is removed and the back-volume is much larger and even infinite.
- Microphone robustness is improved.

In the current design, since the back-volume is confined and closed, the membrane oscillations are damped because a portion of their energy is used to compress this volume. Making the back volume larger or even infinite, the effects described above disappear. Regarding robustness, if the vent hole is removed from the membrane, contaminants (micro and nano particles, water) cannot access the back volume and add noise to the system by shrinking it, changing its acoustic behavior, or remain in the upper membrane, permanently changing its mechanical characteristics. Another important consequence resulting from the removal of the vent hole is related to the frequency response. Using the lumped model approach, the ventilation can be described as an acoustic resistor with resistance R , while the back volume can be described as an acoustic capacitor C . These two components form a series RC circuit [8]. Microphone output signal corresponds to the voltage on the resistance R (Figure 4), as consequence the above-mentioned circuits behaves like a high-pass filter with corner frequency f having the following expression

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tag{1}$$

where R is calculated using the Hagen-Poiseuille formula [9] for the acoustic resistance of a cylindrical channel and C is calculated using the back-volume dimensions and the air compressibility.

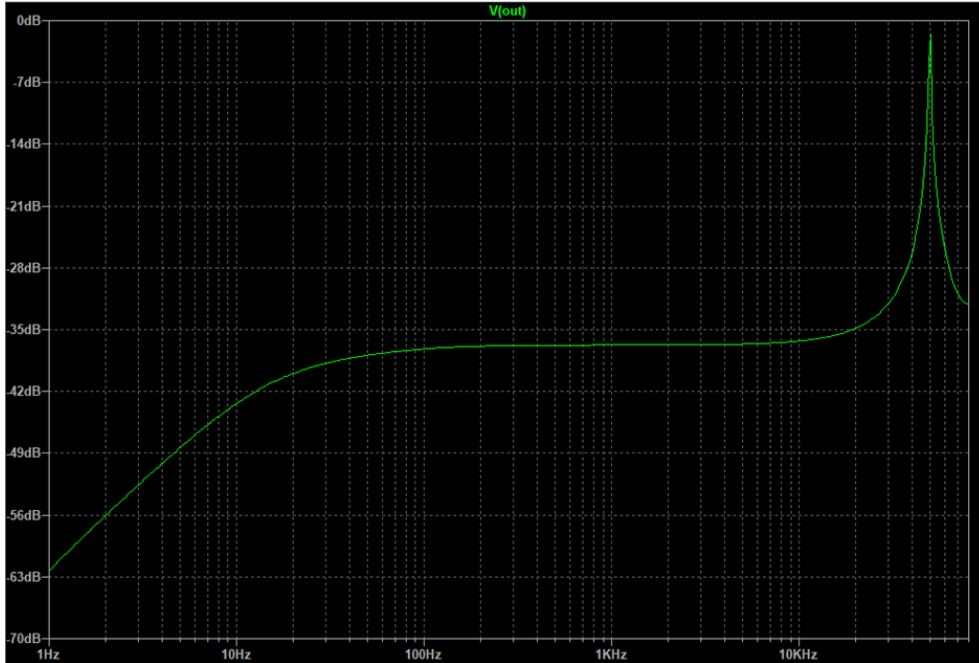


Fig. 2. Typical frequency response of SDM MEMS microphone with an approximately flat shape in the frequency range 40 Hz – 20 kHz and a corner frequency below 40 Hz.

2.2 Membrane clamping

In this section a new possible membrane design is proposed. It is finalized to increase the signal detected from the MEMS and to reduce the harmonic distortion when the acoustic signal has to be converted into an electrical signal. The current design consists of a highly compliant membrane clamped to its perimeter,

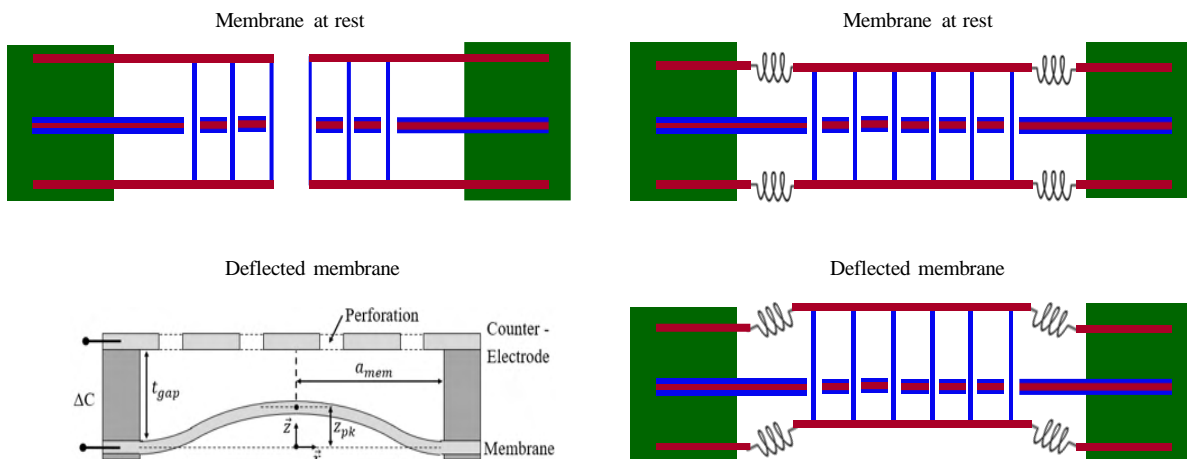


Fig. 3. On the left side the old membrane clamping design with the schematic showing the parabolic shape assumed by the membrane in presence of an acoustical signal. On the right side the new membrane clamping design and the schematic showing the flat shape assumed by the membrane in presence of an acoustical signal.

in the presence of an incoming signal, the membrane deflections assume a parabolic profile [10]. The central area of the membrane is the area of maximum displacement, therefore this part generates more signals than the other areas. In Figure 3 it is clearly showed that the current capacitive MEMS membrane behavior is only approximately described by a parallel plate capacitor, while its behavior is quite different [11]. To optimize the signal from the membrane and make its behavior more similar to that of a parallel plate capacitor, a new anchoring method of the membrane is proposed. The membrane material must be changed to a rigid material so that it does not deflect in the presence of an incoming sound wave. The membrane should be connected to the surrounding immovable structure using a spring design, so that it can be rigidly attached by means of these spring connections.

3 Results

The effect related to the modification of the vent hole was evaluated running a Lumped Model simulation using *LTspice* simulator software. An equivalent circuit [12] [13] can be used to simulate a complex acoustic and mechanical system such as a MEMS microphone. Such a circuit is constructed using appropriate correspondences between mechanical elements of the microphone and electrical components. The circuits describing the previous SDM MEMS microphone design and the new one are showed in Figure 4. The differences between them consist of the removal of the resistor R_{vent} parallel to the part of the circuit defining the membrane and the addition of a new resistor R_{lid} parallel to the components defining the back volume. The result of the simulation is relevant because it shows that the high-pass filter effect in the microphone frequency response disappears and becomes completely flat (Figure 5). A MEMS microphone with a completely flat frequency response over the entire audio band (20 Hz - 20 kHz) can

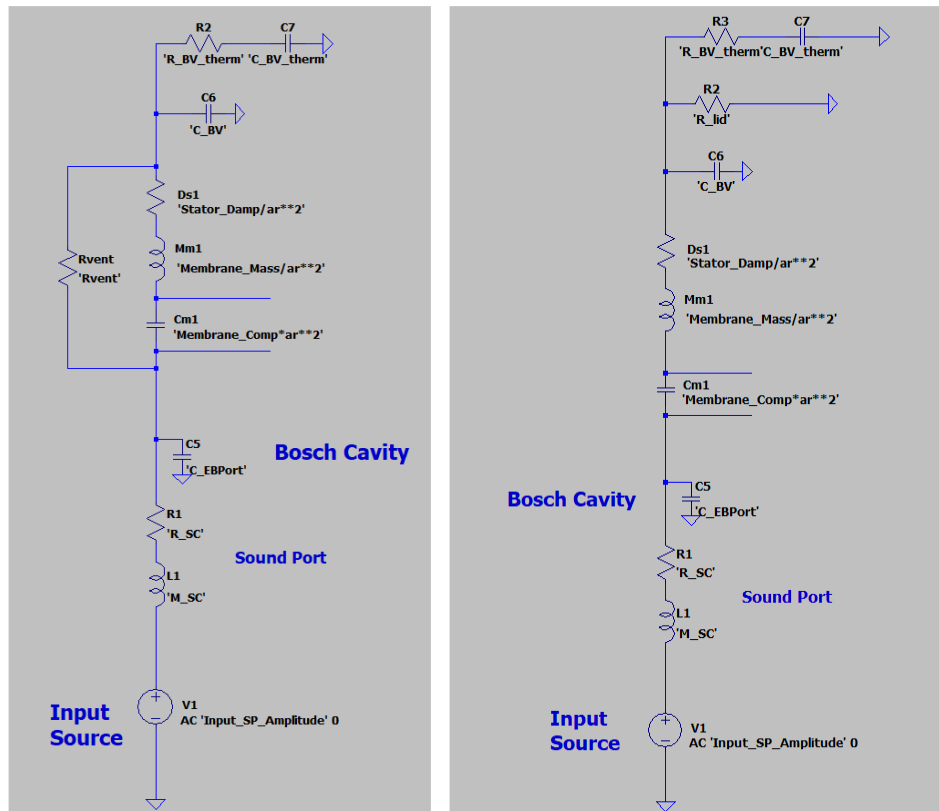


Fig. 4. On the left side the equivalent circuit describing the standard SDM MEMS microphone design, on the right side the equivalent circuit describing the modified design of the SDM MEMS microphone design.

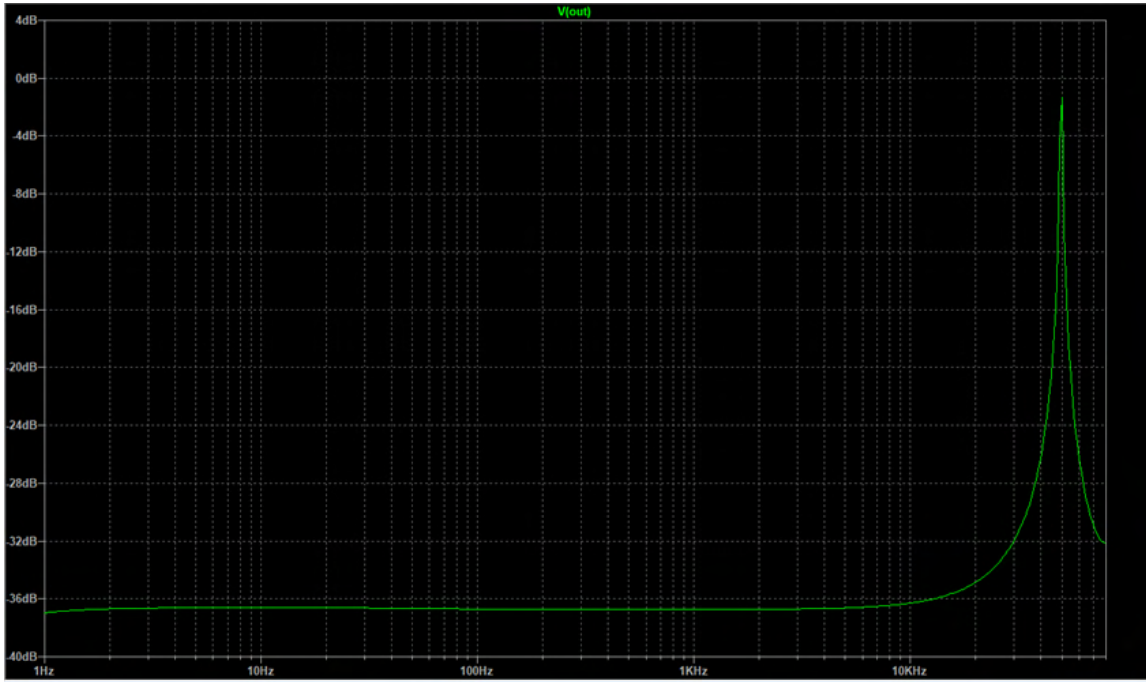


Fig. 5. Frequency response of SDM MEMS microphone with modified design. The high-pass filter effect disappeared so that sensitivity is approximately constant in all the audio band.

accurately detect sounds within this frequency range. In the field of applications, this new frequency response can provide a significant improvement, especially for devices that have limited dimensions but also need to reproduce sounds as accurately as possible. A relevant example is the hearing aid. The significant difference between the two frequency responses lies in the behavior at low frequencies (<40 Hz). The new design also improves the overall performance of the device, although not significantly, as can be seen by comparing the values of the three basic quantities (Sensitivity, A-weighted noise, SNR) that define the performance of a microphone (Table 1).

Table 1 Simulated values of Sensitivity, A-weighted noise and SNR related to the old design and new design.

Simulated quantities	Previous design	New design
Sensitivity (dBV)	-36,74	-36,74
A-noise (dBV)	-107,98	-108,22
SNR (dB)	71,24	71,49

4 Conclusion

Ventilation hole removal can bring some improvements in terms of acoustic performances (noise reduction, signal enhancement) and robustness but slow pressure variations due to the change in environmental conditions have to be compensate. The suggested solution implies the creation of an opening in the lid, creating a connection between the back-volume and the environment. As consequence

of this design modification, microphone frequency response becomes completely flat therefore every acoustic wave having a frequency inside the audio band, can be detected by the microphone with the same accuracy. Just mentioned capability of the new designed microphones and their improved robustness to contaminants makes them suitable to be integrated in medical devices like hearing aids. To further improve the microphone acoustic performances, especially noise reduction, using the suggested design, additional studies can be done regarding the dimension, the number and position of the holes implemented in the lid.

5 Declarations

5.1 Competing Interests

There is no conflict of interest in this study.

References

- [1] Stephen D. Senturia. *Microsystem design*. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/b117574>
- [2] Judy, Jack. (2001). *Microelectromechanical systems (MEMS): Fabrication, design and applications*. *Smart Materials and Structures*. 10. 1115-1134. 10.1088/0964-1726/10/6/301.
- [3] Gad-el-Hak, Mohamed & Seemann, We. (2002). *MEMS handbook*. *Applied Mechanics Reviews*. 55. 109-. 10.1115/1.1508147.
- [4] J H Rector *et al*, Optimization of the batch production of silicon fiber-top MEMS devices, 2017 *J. Micromech. Microeng.* **27** 115005.
- [5] Moore, J., Davis, C., Coplan, M., & Greer, S. (2009). *Building Scientific Apparatus* (4th ed.). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511609794.
- [6] V. Naderyan *et al.*, "MEMS microphone with 73dBA SNR IN A 4mm x 3mm x 1.2mm Package," *2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers)*, Orlando, FL, USA, 2021, pp. 242-245, doi: 10.1109/Transducers50396.2021.9495414.
- [7] L. Sant *et al.*, "A 130dB SPL 72dB SNR MEMS Microphone Using a Sealed-Dual Membrane Transducer and a Power-Scaling Read-Out ASIC," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 7825-7833, 15 April 15, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3154446.
- [8] A. Dehé, M. Wurzer, M. Földner, and U. Krumbein, "The Infineon silicon MEMS microphone," in *Proc. AMA Conf. Sensors*, 2013, pp. 95–99.
- [9] Landau, Lifshitz, *Fluid Mechanics (Second Edition)*, Pergamon, 1987, ISBN 9780080339337, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-033933-7.50010-6>.
- [10] S. Anzinger, C. Bretthauer, D. Tumpold and A. Dehé, "A Non-Linear Lumped Model for the Electro-Mechanical Coupling in Capacitive MEMS Microphones," in *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 360-368, June 2021, doi: 10.1109/JMEMS.2021.3065129.
- [11] S. Anzinger, A. Fusco, D. Tumpold, C. Bretthauer and A. Dehé, "Modeling of Dual-Backplate based Airborne CMUTs with Enhanced Bandwidth," *2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/IUS46767.2020.9251571.

- [12] Lenk, Arno & Ballas, Rüdiger & Werthschützky, Roland & Pfeifer, Günther. (2011). Electromechanical Systems in Microtechnology and Mechatronics – Electrical, Mechanical and Acoustic Networks, their Interactions and Applications. 10.1007/978-3-642-10806-8.
- [13] Shubham, Shubham & Seo, Yoonho & Naderyan, Vahid & Song, Xin & Frank, Anthony & Johnson, Jeremy & Silva, Mark & Pedersen, Michael. (2021). A Novel MEMS Capacitive Microphone with Semiconstrained Diaphragm Supported with Center and Peripheral Backplate Protrusions. Micromachines. 13. 22. 10.3390/mi13010022.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



HoReCa Sektörü için Doğal Navigasyon Otonom Mobil Servis Robotu: komiBot

Gökhan ATALI^{1*} , Şeyma DEĞİRMENCİ² , Emre DEMİRÖZ³ 

^{1*} Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye.
gatali@subu.edu.tr

² Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye.
B200104021@subu.edu.tr

³ Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye.
B200104067@subu.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, özgün tasarlanan bir mobil otonom servis robotunun ROS (Robot İşletim Sistemi) entegrasyonu ve performans değerlendirmesi kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Araştırmanın odak noktası, robotun ROS altyapısı altında nasıl entegre edildiği ve gerçek dünya testlerinin nasıl yürütüldüğüdür. Bu bağlamda, çalışma iki ana aşamada gerçekleştirilmiştir: simülasyon ve gerçek dünya testleri. Simülasyon testleri, Gazebo simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Sanal dünyada, robotun temel kinematik verileri olan x ve y pozisyonları, açılma hızı ve çizgisel hızı incelenmiştir. Bu verilerin analizi, robotun gerçek dünya senaryolarında nasıl tepkiler verebileceğini anlamamıza yardımcı olmuştur. Robotun engellere yaklaşımı, "move_base" paketi ile denetlenmiş ve detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, robotun engel algılama, kaçınma ve manevra yeteneklerinin hem simülasyon hem de gerçek dünya senaryolarında etkili bir biçimde çalıştığını doğrulamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, otonom mobil robotun (komiBot) başarılı entegrasyonunu ve gerçek dünya testlerini içermekte ve robotun kinematik verilerini ve engellere yaklaşımını ayrıntılı bir şekilde incelemektedir. Bu çalışmanın sonuçları, otonom robot sistemleri alanında ilerleme hedefleyen araştırmacılar ve uygulamacılar için önemli bir temel sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Otonom mobil robot, ROS, Engel tanıma, Servis robotu

Natural Navigation Autonomous Mobile Service Robot for HoReCa Sector: komiBot

ABSTRACT

In this study, the comprehensive integration and performance evaluation of an autonomously designed mobile service robot within the Robot Operating System (ROS) framework is extensively investigated. The focal point of the research lies in elucidating how the robot is integrated under the ROS infrastructure and how real-world tests are conducted. In this context, the study unfolds in two

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: gatali@subu.edu.tr

main stages: simulation and real-world tests. Simulation tests are conducted in the Gazebo simulation environment, where the fundamental kinematic data of the robot, such as x and y positions, angular velocity, and linear velocity, are examined. The analysis of these data aids in understanding how the robot may respond in real-world scenarios. The robot's approach to obstacles is controlled using the "move_base" package and thoroughly analyzed. The results obtained affirm the effective operation of the robot's obstacle detection, avoidance, and maneuvering capabilities in both simulation and real-world scenarios. Consequently, this study encompasses the successful integration of the autonomous mobile robot (komiBot) and detailed examinations of its kinematic data and approach to obstacles. The outcomes of this study provide a significant foundation for researchers and practitioners aspiring to advance in the field of autonomous robot systems.

Keywords: Autonomous mobile robot, ROS, Obstacle detection, Service robot

1 Giriş

Gelişen teknoloji, insan yaşamının her alanında önemli dönüşümlere neden olurken bu değişimlerin sektörler arasında yarattığı etkiler de kaçınılmaz olmaktadır. Gerek özel gerekse kamu kurumlarında her geçen gün kullanılan hizmetler otonom hale gelmektedir. Yiyecek içecek sektörü de dâhil olmak üzere birçok alanda sunulan hizmetlerin de otonom özellikler taşıyan sistemlere yöneldikleri görülmektedir [1]. Bu bağlamda, HoReCa ("Hotel", "Restaurant", "Cafe") sektörü, teknolojik yeniliklerin hızla benimsendiği ve dönüştüğü alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Covid-19 pandemi sürecinde, robotların üretiminde ve hizmet sunumlarında daha çok yer almaları düşüncesi, turizmde robotlaşma uygulamaları ile robot-insan ilişki ve etkileşimlerini incelemeyi araştırmacılarca daha önemli bir hale getirmiştir [2]. Bu bağlamda otomatik sistemler ve otonom robotlar kullanılmaya başlanmıştır [3]. Robotlar genellikle endüstriyel veya hizmet odaklı olarak sınıflandırılır. Endüstriyel robotlar çeşitli endüstriyel görevleri yerine getirmek için sabit veya hareketli olarak kullanılırken, hizmet robotları insan odaklı işleri gerçekleştirmek üzere fiziksel ve sosyal etkileşimlerde bulunabilir [4]. Servis robotları, gelişen yapay zeka algoritmaları ve otomasyon teknolojileri sayesinde, işletmelerin verimliliğini artırma, müşteri deneyimini iyileştirme ve kaynakları daha etkin kullanma potansiyeli sunmaktadır [5,6]. Yeme-içme sektöründe yaşanan yoğun rekabet, işletmeleri daha yenilikçi çözümler arayışına yönlendirmiştir. Bu noktada, akıllı robotlar, sipariş alımından masaların düzenlenmesine kadar geniş bir yelpazede hizmet sunma kapasitesine sahiptir [7]. Otellerdeki restoranlardan sokak lezzetlerinin sunulduğu kafelere kadar farklı işletme türlerinde, servis robotlarının kullanımı işletmelerin hızlı ve etkili hizmet sunmasına olanak tanımaktadır [8]. Projemizin temel amacı, turizm otelcilik sektöründeki yeme-içme işletmelerinin, akıllı servis robotlarını kullanarak operasyonel verimliliği artırma potansiyelini değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda, robotların yemek servisinden masaların temizlenmesine kadar olan süreçlerdeki rolü üzerine odaklanarak işletmelerin verimlilik artışı, hizmet kalitesi ve maliyet tasarrufu gibi kritik konulardaki deneyimler ele alınacaktır. Robotların yemek servisi aşamasında, akıllı algoritmalar sayesinde siparişlerin hızlı ve doğru bir şekilde alınması ve mutfığa iletilmesi sağlanacaktır. Bu süreç, insan hatalarını minimize ederken servisin hızını artıracaktır. Aynı şekilde, mutfakta yemek hazırlık süreçlerinin otomasyonu sayesinde daha düzenli ve tutarlı sonuçlar elde edilecektir. Robotlar, masaları tespit edecek, tabak ve bardakları toplayacaktır. Masaları temizleyecek ve hızla yeni müşterilere hazır hale getirecektir. Bu işlem, işletmelerin daha hızlı bir dönüşüm sağlamalarına ve dolayısıyla daha fazla müşteriye hizmet sunmalarına olanak tanır. Robotlar ayrıca, işletmelerin hizmet kalitesini artırmalarına da yardımcı olabilir. Özellikle yemek servisi sırasında robotlar, müşterilere etkileyici ve eğlenceli bir deneyim sunabilir. Örneğin, robotlar yemekleri sunarken veya müşterilerin sorularını cevaplarken etkileşimde bulunabilirler. Bu etkileşim, müşterilerin ziyaretlerini daha unutulmaz hale getirebilir. İşletmelerin bu robotları başarıyla uygulayabilmeleri için iyi bir planlama ve yönetim gerekmektedir. İnsan-personel etkileşimi yerine robotlarla yapılan etkileşimin, bazı müşteriler için duygusal iletişim eksikliği hissi yaratabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, robotların kullanımının insan-müşteri etkileşimini tamamlamak amacıyla tasarlandığı unutulmamalıdır [9,10].

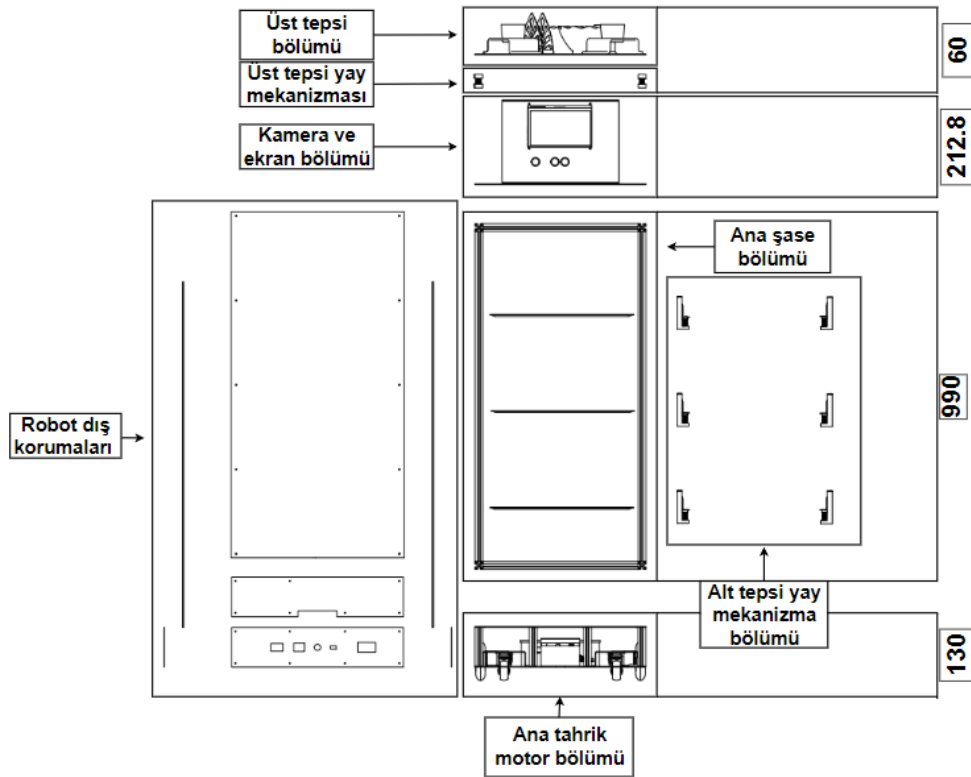
Sonuç olarak akıllı servis robotlarının yeme-içme işletmelerindeki etkisi, sektörün geleceğini şekillendirme potansiyeline sahiptir. Bu makale, turizm sektöründeki yeme-içme işletmelerinde kullanılmak üzere özgün olarak tasarlanan doğal navigasyon özellikli bir mobil robotun (komiBot) tasarım, imalat, yazılım ve testlerini kapsamaktadır.

2 Metodoloji

2.1 Otonom Mobil Robotun Özgün Tasarımı

Bu çalışmada kullanılan robotun 3D modeli Autodesk Fusion 360 programında oluşturulmuştur. Bu model robotun fiziksel şekillerini ve görsel özelliklerini içermektedir. Şekil 1’de robotun genel teknik resmi mm birimi kullanarak ölçütleri belirtilerek sunulmuştur. Bu sayede, robotun fiziksel özelliklerini ve hareketlerini detaylı bir şekilde planlayarak üretim aşamasına hazırlık yapılmıştır. Şekil 2’de gösterilen robotun tepsi taşıma bölgesindeki yaylı kısım, titreşimi engellemesi için özgün olarak tasarlanmıştır. Tepsi tutucular ve iskelet sigma profilden oluşturulmuş olup ana tahrik gövdesi sac levhadan üretilmiştir. Ana tahrik gövdesi, elektronik aksamın yerleşimine uygun tasarlanmıştır.

Bu aşamada, oluşturulan 3D model ve tasarım detayları, üretim sürecine geçiş için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Robotun fiziksel özellikleri, hareket kabiliyeti ve yapısı, detaylı bir şekilde planlanarak üretim aşamasına hazırlık yapılmıştır. Bu sayede, gerçek dünyada robotun istenilen görevleri etkili bir şekilde yerine getirmesi amaçlanmaktadır. Amaç doğrultusunda, simülasyon ortamında kontrolleri yapılması üzerine oluşturulan katı modelden urdf format alınmıştır. Urd formatı, robotların tanımlanması, simülasyonu ve görselleştirilmesi için önemli bir araçtır. Bu formatı kullanarak robot daha gerçekçi bir şekilde modellenmiş ve simüle edilmiştir.



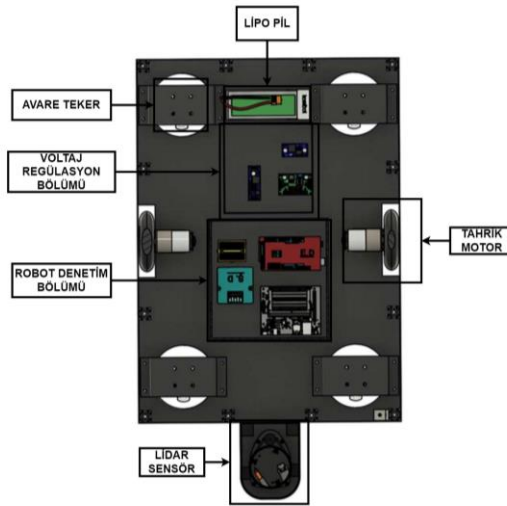
Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Otonom Mobil Robot Teknik Resim



Şekil 2. Üst ve Alt Tepsi Süspansiyon Bölümü

2.2 Elektronik Bileşenler

Çalışmada kullanılan robotun elektronik bileşenleri arasında Jetson Nano kontrol kartı, Arduino Mega, Lidar sensör, Kinect kamera, Motor sürücü kartı ve sistem için gerekli olan elektrik enerjisini sağlayacak batarya ve DC dönüştürücü modüller kullanılmaktadır. Şekil 3'te ana tahrik gövdesi üzerinde kurulu elektronik bileşenler belirtilmiştir. Jetson Nano kontrol kartı sistemin merkezi olarak görev yapmakta ve tüm sensörlerin verilerini işlemektedir. Aynı zamanda motorların kontrolünü gerçekleştirmektedir. Arduino Mega, Jetson Nano tarafından gönderilen sinyalleri alıp motor sürücüler ve enkoderler arasındaki iletişimi sağlamak ve hareket kontrolünü gerçekleştirmektedir. Motor sürücü kartı, robotun hareketini kontrol etmek için kullanılmış olup enkoderler, robotun hareket konumunun gerçek zamanlı olarak ölçülmesini sağlamaktadır.



Şekil 3. Otonom Mobil Robot Ana Tahrik Gövde 3D Görüntüsü

2.3 ROS (Robot Operating System)

ROS, dünya çapında yaygın olarak kullanılan bir robot işletim sistemidir. Robotik platformlar için özel olarak tasarlanmıştır ve birçok robotik araç, donanım simülasyonu ve yazılım düğümleri arasında mesaj aktarımı sağlar [11]. Yayın topolojisi ile çalışır ve düğümler bağımsız olarak veya birden çoğa aboneli modellerle çalışabilmektedir. Ayrıca TCP/IP ve SSH gibi birçok ağ protokolünü de destekler. Özellikle robotik platformlar için özelleştirilmiş bir altyapı sağlayan ROS, çeşitli robotik araçlar, donanım simülasyonları ve yazılım düğümleri arasında veri iletişimini kolaylaştırmak amacıyla kullanılmaktadır [12]. Şekil 4'te üretimi gerçekleştirilen otonom mobil robotun donanımı gösterilmiştir.

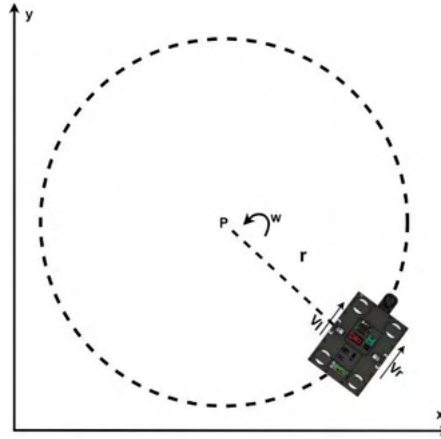


Şekil 4. Çalışmada Kullanılan Otonom Mobil Robot (komiBot)

Bu çalışma kapsamında, tamamen özgün tasarlanmış bir otonom mobil robot, ROS altyapısı içerisinde başarılı bir şekilde entegre edilmiştir. Geliştirilen özgün otonom mobil robot, ROS yazılımının temelini oluşturmaktadır. Bu robot, kendine özgü tasarım prensipleri ve ileri teknolojik özellikler ile donatılmıştır. Bu bağlamda, özgün otonom mobil robotun ROS işletim sistemi ile uyumlu bir şekilde entegrasyonu, teknolojik alanda ileri seviyede çalışmaların temelini oluşturan başarılı bir örneği sunmaktadır.

2.4 Kinematik Model

Otonom mobil robot platformunun hareket kabiliyeti, sınırlı çalışma alanlarında büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle projemiz kapsamında robotun hareket kabiliyetini anlamak için detaylı kinematik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, robotun enerji ihtiyacının belirlenmesine ve mekanik sistemin hareketinin analizine olanak sağlamaktadır.



Şekil 5. Otonom Mobil Robotun Kinematik Modeli

Diferansiyel tekerleklerin doğrusal hızı, mobil robotun Şekil 5'te gösterilen nokta etrafındaki dönüşünü etkilemektedir. Bu nedenle, her bir tekerleğin doğrusal hızı, gösterilen P noktası etrafında dönen bir mobil robotun doğrusal hızını tespit etmek için hesaplanır ve aritmetik ortalaması alınmaktadır. Sonuç olarak Denklem 1 ve 2 elde edilmektedir. Denklem 1 ortalama doğrusal hızı hesaplamak için kullanılır. Denklem 2'de verilen hızlar tekerleklerin açısal hızları ile oluşturulabilmektedir. Ayrıca Denklem 1 ve 2'de verilen ifadelerin nicelik birimleri Tablo 1'de sunulmuştur. Şekil 5'te ana tahrik gövdenin harekete ilişkin yönünü ifade eden dönme matrisi Denklem 2'de verilmiştir

$$v = \frac{vr + vl}{2} = r \frac{(\varphi_r + \varphi_l)}{2} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{vr - vl}{2L} = r \frac{(\varphi_r - \varphi_l)}{2} \quad (2)$$

Tablo 1. Robotun kinematik modelinin kısaltma tablosu

Sembol	Nicelik	Birim
v	Doğrusal hız	m/s
ω	Robotun açısal hızı	rad
vr	Sağ tekerleğin doğrusal hızı	m/s
vl	Sol tekerleğin doğrusal hızı	m/s
φ_r	Sağ tekerleğin açısal hızı	rad
φ_l	Sol tekerleğin açısal hızı	rad
r	Robotun doğrusal hızı	m
L	Sağ ve sol tekerlek arasındaki mesafe	m
θ	Robotun yön açısı	rad
q	Robotun temel çerçevedeki durum matrisi	m/s
T	Dönme matrisi	-

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

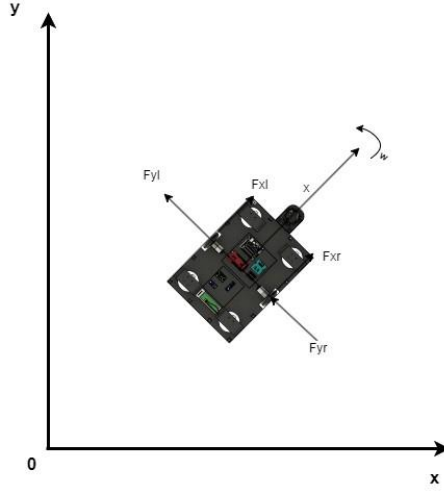
$$T(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Robot ana tahrik gövdesinin kinematik modeli Robotun temel çerçevedeki durum matrisi olan Denklem 3 ve θ açısına bağlı dönme matrisi olan Denklem 4 kullanılarak elde edilmiştir (Denklem 5).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{r}{-L} & \frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_r \\ \varphi_l \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.5 Dinamik Model

Diferansiyel tekerlekli mobil robot platformunun dinamik modeli Newton-Euler yöntemiyle oluşturulmuştur. Robot platformunun hareketi sırasında ön ve arka tekerleklere hareket yönünün tersi yönde bir kuvvet etki etmektedir. Ancak etkisi çok küçük olduğundan ihmal edilebilir seviyededir. Mobil robot platformuna etki eden kuvvetler Şekil 6'daki kuvvet diyagramında gösterilmektedir.



Şekil 6. Otonom Mobil Robotun Kuvvet Diyagramı

Hareketli robot için gerekli olan hız ve koordinatlar arasındaki bağlantıyı veren x ve y koordinatlarına ait hareket denklemleri Denklem 6'da verilmiştir. Robotun dinamik modelini ifade eden tüm kısaltmalar Tablo 2'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v_x \cos \theta - v_y \sin \theta \\ \dot{y} &= v_x \sin \theta + v_y \cos \theta\end{aligned}\quad (6)$$

Tablo 2. Otonom mobil robotun dinamik modelinin kısaltma tablosu

Sembol	Nicelik	Birim
v	Boyuna Hız Vektörü	m/s
ω	Yanal Hız Vektörü	m/s
θ	Başlık Açısı	rad

Yanal hız ve boylamsal hız ile ilişkili olan yön açısı hızının fonksiyonu Denklem 7'de gösterilmektedir.

$$\dot{v}_y = f(v_x, \omega)\quad (7)$$

Mobil robotun dinamik modeli Denklem 8'de verilmiştir. Robotun, tekerlek yön açılarındaki oluşabilecek farklılıklar dikkate alındığında $\dot{\theta} = \omega$ olabileceği gibi ileri yön hareket vektöründen sapması olabilir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v_x \cos \theta - v_y \sin \theta \\ \dot{y} &= v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \\ \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{v} &= f(v_x, \omega)\end{aligned}\quad (8)$$

2.6 Odometri Verisine Kalman Filtresinin Uygulanması

Kalman filtresi, bir sürecin veya sistemin durumunu tahmin etmek veya izlemek için kullanılan istatistiksel bir filtreleme yöntemidir. Genellikle belirsiz veya gürültülü ölçümlerle bir sistemin durumunu hesaplamak için kullanılır [13]. Odometri ise bir cismin hareketini izlemek ve bu hareket sonucunda cismin konumunu tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Özellikle robotik sistemlerde, tekerleklerin dönme miktarları veya sensörler aracılığıyla cismin hareketi izlenerek odometri verileri elde edilir. Kalman filtresi, bu odometri verilerinin belirsizliklerini ve hatalarını düzeltmekte ve daha doğru bir konum

tahmini yapılmasına yardımcı olmaktadır.

Tablo 3. Kalman filtresinin kısaltma tablosu

$\mu_1(m)$	İlk ortalama. Birimi metredir.
σ_1^2	İlk varyans
$\mu_2(m)$	Ölçülen Ortalama. Birimi metredir.
σ_2^2	Ölçülen Varyans

Kalman filtresi uygulamasında kullanılan metriklere ait denklemler;

$$\mu' = \frac{\sigma_1^2 \cdot \mu_2 + \sigma_2^2 \cdot \mu_1}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (9)$$

Denklem 9, mevcut tahminlerin ağırlıklı bir kombinasyonunu kullanarak yeni bir tahmin oluşturmaktadır.

$$\sigma^{2'} = \frac{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}} \quad (10)$$

Denklem 10, varyansların harmonik ortalama formülünü kullanarak yeni bir tahmin varyansını hesaplamaktadır.

$$\mu' = \mu_1 + \mu_2 \quad (11)$$

Denklem 11, ortalama değerlerin toplamını alarak yeni bir ortalama tahmini oluşturmaktadır.

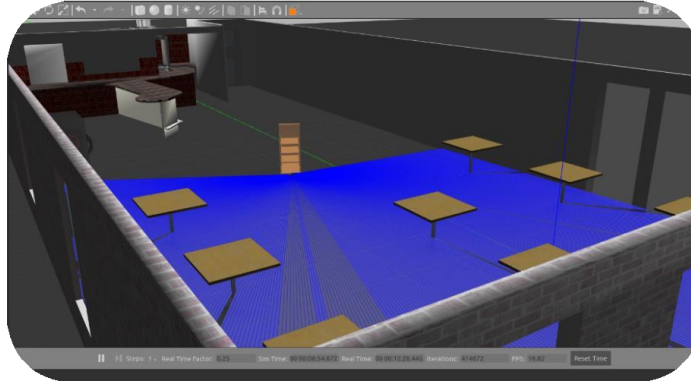
$$\sigma^{2'} = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (12)$$

Denklem 12, varyans değerlerini toplayarak yeni bir tahmini varyans değeri hesaplamaktadır.

3 Deneysel Çalışma

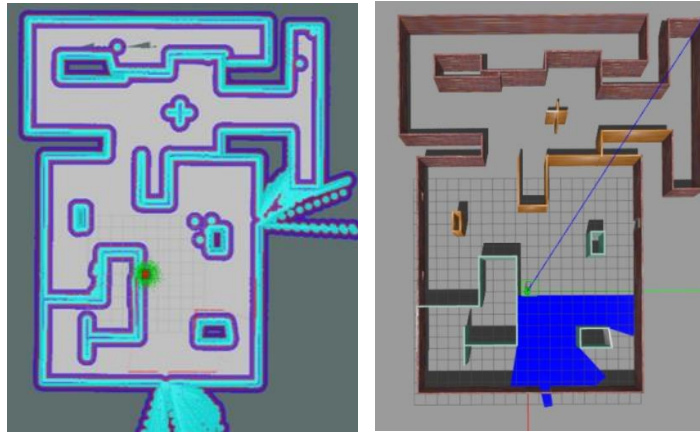
3.1 Simülasyon Testleri

Bu bölümde, özgün tasarım otonom mobil robotun ROS çerçevesinde gerçekleştirilen simülasyon testleri detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Bu testler, geliştirilen robot platformunun çeşitli senaryolarda performansını değerlendirmek ve otonom sürüş yeteneklerini analiz etmek amacıyla yürütülmüştür. Simülasyon testlerinin başlangıcında, robot modelinin tam ve doğru bir biçimde temsil edilmesi gerekliliği vardı. Bu amaçla, Xacro dosyaları kullanılarak robot modeli ayrıntılı bir şekilde tanımlandı. Xacro dosyaları, robotun fiziksel özelliklerini, donanım bileşenlerini ve sensörlerini birebir şekilde modellemek üzere kullanılmıştır. Bu dosyalar, robotun anatomik yapısını detaylıca tasvir ederken aynı zamanda ROS platformu ile uyumlu bir şekilde entegre olmalarını sağlamıştır.



Şekil 7. Otonom Mobil Robot Gazebo Simülasyon Ortamı

Bu dosyalar sayesinde robotun fiziksel yapısı, donanım bileşenleri ve sensörleri ayrıntılı bir biçimde modellendi. Şekil 7’de gösterildiği gibi elde edilen model, Gazebo ve RViz simülasyon ortamlarına aktarılarak gerçek dünya koşullarına en yakın bir şekilde simülasyon gerçekleştirildi. Simülasyon testlerinin bir parçası olarak AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) ve Move Base paketlerinden yararlanıldı. AMCL, robotun konumunu yüksek bir hassasiyetle tahmin edebilmesi için kullanılan bir lokalizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, monte carlo yöntemlerini adapte ederek robotun gerçek konumunu haritalanmış bir ortam içinde doğru bir şekilde belirlemektedir. Diğer yandan, Move Base paketi robotun otonom navigasyonunu yönetmek üzere kullanılmıştır. Bu paket, belirlenen hedeflere güvenli bir şekilde ulaşmak için hareket planları oluşturur ve bu planları gerçek zamanlı olarak güncelleyebilir. Şekil 8’de robot simülasyon ortamında gösterilmiştir. AMCL ile gerçekleştirilen testlerde, robotun konum tahminlerinin gerçek dünya koordinatları ile karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar değerlendirildi. Move Base paketi sayesinde ise robotun verilen hedeflere nasıl güvenli bir şekilde ulaştığı ve navigasyon stratejilerinin etkinliği incelendi. Ayrıca, robotun engelleri nasıl atladığı, engellerden kaçındığı ve bu engellere karşı verdiği tepkiler detaylı bir şekilde analiz edildi. Bu testler, geliştirilen algoritmaların ve yazılımın performansını değerlendirmek ve geliştirmek için büyük öneme sahiptir. Bu simülasyon testleri, özgün tasarım otonom mobil robotun ROS tabanlı yazılımının, farklı senaryolarda nasıl tepki verdiği ve otonom sürüş yeteneklerini ne ölçüde etkin bir şekilde gerçekleştirdiği konularında derinlemesine bir içgörü sağlamaktadır. Bu aşama, geliştirilen robot platformunun gerçek dünya uygulamalarında sergileyeceği performansın öngörülmesine yardımcı olmuş ve yazılımın doğruluk ve güvenilirlik düzeyini belirlemek amacıyla temel bir adım olarak öne çıkmıştır.

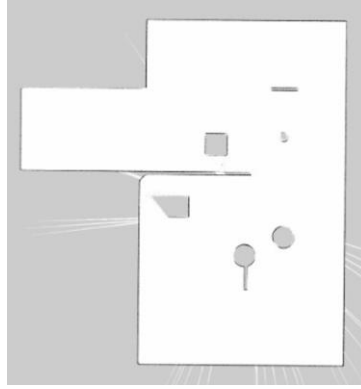


Şekil 8. Otonom Mobil Robot Simülasyon Ortamı

3.2 Gerçek Dünya Testleri

Bu bölümde, gerçek dünya testleri adı altında yürütülen çalışmaların ayrıntıları ele alınmaktadır. Bu testlerde, özgün tasarım otonom mobil robotun performansının gerçek dünya koşullarında nasıl olduğu ve otonom yeteneklerinin nasıl gerçekleştiği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Gerçek dünya testlerinde

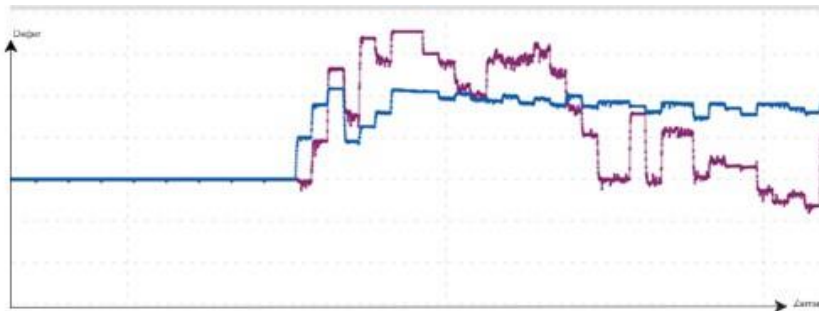
otonom mobil robot haritalandırma testi Şekil 9'da gösterilmiştir. Arduino ve Jetson Nano arasındaki iletişim, ROS platformu üzerinden ROSSerial aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Bu iletişim protokolü, düşük seviyeli mikrodenetleyicilerin yüksek seviyeli yazılım platformları ile haberleşmesini sağlayarak robotun veri paylaşımını mümkün kılar. Bu sayede Jetson Nano, Arduino üzerinde çalışan sensör ve aktüatörlerin verilerine erişebilir ve bunları işleyebilir. Robotun hareketi, motor sürücüsü tarafından kontrol edilen motorlar vasıtasıyla sağlanmıştır. Motor sürücüsü, Jetson Nano tarafından gönderilen komutlara göre motorların hızını ve yönünü ayarlar. Bu sayede robotun istenilen şekilde hareket etmesi sağlanmıştır. Lidar sensörü, gerçek dünya ortamında haritalandırma ve otonom navigasyon için kritik bir bileşendir. Lidar sensörü sayesinde çevresel veriler toplanarak gerçek zamanlı haritalar oluşturulmuş ve robotun çevresini algılaması sağlanmıştır. Otonom navigasyon için ise toplanan bu veriler, harita üzerindeki hedeflere yönlendirilerek robotun güvenli ve etkili bir şekilde hareket etmesi sağlanmıştır. Bu görüntü verileri, navigasyon ve nesne tespiti gibi önemli görevler için kullanılmıştır. Bu gerçek dünya testleri, özgün tasarım otonom mobil robotun sahip olduğu farklı sensörler ve yazılım yeteneklerinin gerçek dünya uygulamalarındaki performansını gözler önüne sermek üzere tasarlanmıştır. Robotun Arduino ile Jetson Nano arasındaki entegrasyonu, motor sürücüsü ile hareket kontrolü, lidar sensörü ile haritalandırma, makinenin gerçek dünya koşullarında nasıl başarılı bir şekilde çalıştığını gösteren önemli ayrıntıları sunmaktadır.



Şekil 9. Otonom Mobil Robot Haritalandırma Testi

4 Sonuçlar

Bu aşamada kalman filtresi ve Gazebo simülasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Kalman filtresinde Gauss dağılımı metodu kullanılmış olup verilen formüllerde başlangıç değerleri farklı girilerek elde edilen sonuçlar gözlemlenmiştir. Test aşamasında zaman saniye olarak konum ise metre olarak girilmiştir. Gazebo simülasyon ortamında detaylı bir sanal dünya oluşturulmasıyla şekillendirilmiştir. Bu sanal dünyada, otonom mobil robotun performansı ve tepkileri titizlikle incelenmiştir. Robotun x ve y pozisyonları, açısal hızı ve çizgisel hızı gibi temel kinematik verileri hassas bir şekilde eş zamanlı elde edilerek ele alınmış ve çeşitli senaryolar altında analiz edilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu veriler, robotun anlık konumunu belirtirken çizgisel ve açısal hız değerleri robotun hareket hızını ve yönelimini yansıtmaktadır. Robotun gönderdiği mesajlar, ROS üzerinde yaygın olarak kullanılan "topic" adı verilen veri iletim mekanizmaları aracılığıyla elde edilmektedir.



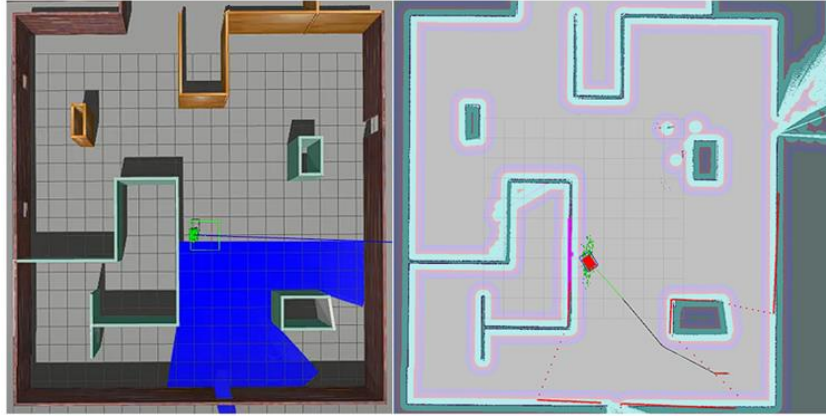
Şekil 10. Mobil Robota move_base Paketinden Gelen Çizgisel ve Açısal Hızlar

- Robotun çizgisel hızı(m/s)
- Robotun açısal hızı(rad/s)

Bu mesajlar arasında özellikle "odometri" ve "twist" mesajları öne çıkmaktadır. "Odometri" mesajı, robotun anlık pozisyonunu ve yönelimini içeren verileri içerir. x ve y pozisyonları, açısal hız ve çizgisel hız gibi değerler bu mesajın içeriğini oluşturur. "Twist" mesajı ise robotun hareket hızını ve yönelimini belirleyen çizgisel ve açısal hız değerlerini içerir. Birim olarak, çizgisel hız m/s cinsinden ifade edilirken açısal hız rad/s cinsinden ifade edilir. Bu analizlerin ardından, farklı senaryolarda robotun verdiği tepkiler dikkatlice incelenmiş ve bu tepkilerin gerçek dünya uygulamalarında robotun hareket yetenekleri üzerindeki olası etkileri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar, otonom mobil robotun hız, konum ve genel davranışlarının gerçek dünya senaryolarına nasıl yansiyebileceğini anlamamıza katkı sağlamıştır. Ayrıca, çalışmanın bu aşamasında, robotun karşılaştığı engellere olan yaklaşımı da kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Gazebo simülasyon ortamında oluşturulan senaryolarda, robotun önüne çeşitli engeller yerleştirilmiş ve bu engellere yaklaşımı titizlikle gözlemlenmiştir. Belirlenen yol planı içerisine farklı şekiller ve boyutlardaki engeller yerleştirilerek robotun yol planı algoritması değerlendirilmiştir. Robotun engellere olan tepkisi, "laser_scan" sensörü aracılığıyla elde edilen verilerin analiziyle değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın son aşamasında, otonom mobil robotun farklı senaryolarda sergilediği davranışlar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Geliştirilen senaryolar, robotun engellerle karşılaşma ve hedefe yönelme durumlarına dair kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Çalışma aşağıda belirtilen senaryolar çerçevesinde yapılmış ve sonuçlar bu senaryoların analizine dayanmaktadır:

4.1 Senaryo 1

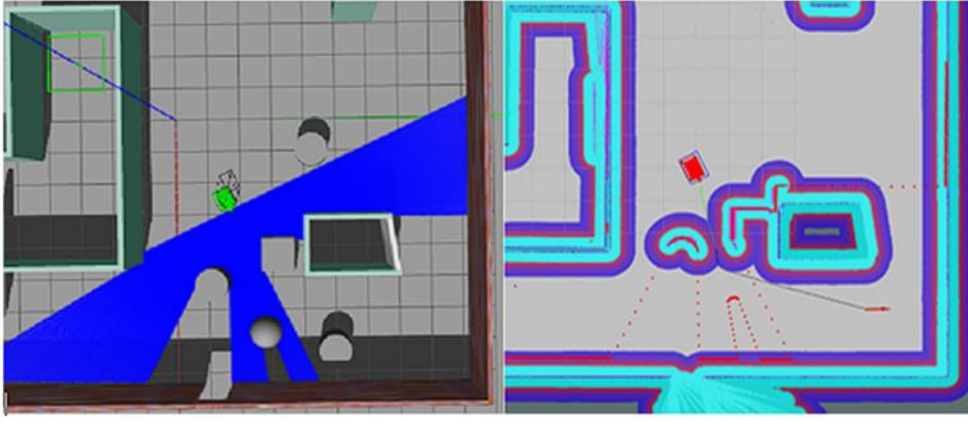
Bu senaryoda, robotun engel olmadan hedefe yönelmesi ve çizdiği yol planı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 11 üzerinde mobil robot engelsiz yol planı gösterilmiştir. Robotun düzgün ve engelsiz bir yolda hedefine nasıl ilerlediği ve çevresel değişkenliklere nasıl tepki verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 11. Mobil Robot Engelsiz Yol Planı

4.2 Senaryo 2

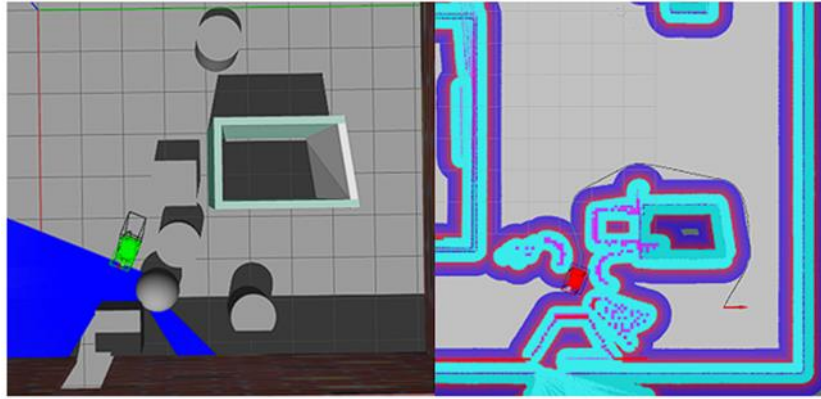
İkinci senaryo, robotun hedef yol üzerine yerleştirilen cisimlerin yol planına olan etkisini incelemek amacıyla tasarlanmıştır. Bu senaryoda, yol üzerine yerleştirilen cisimlerin robotun hareketini nasıl etkilediği ve robotun bu değişen koşullara nasıl uyum sağladığı analiz edilmiştir. Şekil 12 mobil robot engelsiz yol planı 1 üzerinde detaylandırılmıştır.



Şekil 12. Mobil Robot Engelli Yol Planı

4.3 Senaryo 3

Üçüncü senaryo, robotun başka bir yol planı yaparak hedef yolunu değiştirmesinin gerektiği durumları ayrıntılı olarak göstermektedir. Bu senaryo, robotun, cisimler hedef yolunu tamamen kapattığında, yeni bir yol planı oluşturarak hedef yolunu değiştirmesini vurgulamaktadır. Şekil 13 mobil robot engelsiz yol planı 2 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 13. Mobil Robot Engelli Yol Planı

Bu çalışmada, otonom mobil robotun hareket tahmini sürecinde Kalman filtresiz ve Kalman filtresi kullanılarak elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen veriler, iki farklı yöntemin robotun konumunu tahmin etme yeteneği üzerindeki etkilerini göstermektedir. Kalman filtresiz yöntemle elde edilen sonuçlar, hızlı ve doğru bir hareket tahmini sağlama konusunda sınırlamalar ortaya koymaktadır. Bu yöntem, sensör verilerinin gürültüsü ve sistem modelindeki belirsizliklerle başa çıkmakta zorlanmaktadır, bu da konum tahmininin güvenilirliğini azaltmaktadır. Öte yandan, Kalman filtresi kullanılarak elde edilen sonuçlar daha kesin ve güvenilir bir konum tahmini sağlamaktadır. Kalman filtresinin belirsizlikleri düzeltme ve sensör verilerini daha etkili bir şekilde entegre etme yeteneği, robotun gerçek dünya koşullarında daha iyi performans sergilemesine olanak tanımaktadır. Bu bulgular, Kalman filtresinin otonom mobil robotun hareket tahmini sürecinde önemli bir rol oynayabileceğini ve sistem performansını artırabileceğini göstermektedir.

4.4 Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü imkânı sağlayan Robot Teknolojileri ve Akıllı Sistemler Uygulama ve Araştırma Merkezi (ROTASAM)'a teşekkür ederiz.

4.5 Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

4.6 Yazarların Katkıları

Gökhan ATALI: Makale için fikir geliştirme, sonuçlara ulaşma yöntemlerini planlama, sonuçların açıklanması ve sunumu için sorumluluk alma, literatür taraması sorumluluğunu alma, makalenin tamamının oluşturulmasında katkı sağlama.

Şeyma DEĞİRMENCİ: Makale için fikir geliştirme, sonuçlara ulaşma yöntemlerini planlama, sonuçların açıklanması ve sunumu için sorumluluk alma, literatür taraması sorumluluğunu alma, makalenin tamamının oluşturulmasına ek olarak, bu çalışmada robotun otonom sürüşünde ve elektronik bağlantılarında da aktif bir rol üstlenmiştir.

Emre DEMİRÖZ: Makale için fikir geliştirme, sonuçlara ulaşma yöntemlerini planlama, sonuçların açıklanması ve sunumu için sorumluluk alma, literatür taraması sorumluluğunu alma, makalenin tamamının oluşturulmasına ek olarak, bu çalışmada robotun otonom sürüşünde ve elektronik bağlantılarında da aktif bir rol üstlenmiştir.

Kaynakça

- [1] E. Çirioğlu, A. S. Çetin, and A. Albayrak. "Yiyecek içecek işletmelerinde kullanılan dijital uygulamaların Swot analizi ile değerlendirilmesi." pp. 127, Kongre Kuralları , 2021.
- [2] G. Özgürel. "Turizmde robotlaşma: Yiyecek-içecek sektöründe robot şefler ve robot garsonlar.", pp. 1849-1882, OPUS International Journal of Society Researches 18. Yönetim ve Organizasyon Özel Sayısı, 2021. <https://doi.org/10.26466/opus.899296>
- [3] D. Okatan and Y. Yıldırım. "ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİNİN TURİZM SEKTÖRÜNE YANSIMALARI: LİTERATÜR İNCELEMESİ.", pp. 168-185, vol.4, no.2, Journal of Tourism Intelligence and Smartness, 2021.
- [4] G. Lukanova and G. Ilieva. "Robots, artificial intelligence, and service automation in hotels." pp. 157-183, Robots, artificial intelligence, and service automation in travel, tourism and hospitality. Emerald Publishing Limited, 2019. <https://doi.org/10.1108/978-1-78756-687-320191009>
- [5] M. Çerkez and Ö. Kızıldemir. "Yiyecek-içecek işletmelerinde yapay zekâ kullanımı." pp. 1264-1278, vol.4, no.2, Türk Turizm Araştırmaları Dergisi, 2020.
- [6] R.E. Özgüneş, D. Bozok, and D. Küçükaltan. "Yiyecek ve içecek sektöründe ileri teknoloji ve pandemik düzene doğru: yakın gelecekte bir robota 'eline sağlık!' diyebilir miyiz?." pp.1124-1139, vol.22, no.4, Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 2020. <https://doi.org/10.32709/akusosbil.797343>
- [7] S.K. Özsoy. "İnsan Ve Servis Robotları Etkileşimi: Roomba Robotik Elektrik Süpürgesi İtalya Ev Örneği." Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] S. İbiş. "Turizm endüstrisinde robotlaşma.", pp. 403-420, vol.3, no.3, TÜRK TURİZM ARAŞTIRMALARI DERGİSİ, 2019.
- [9] Ş.B. Uzan and Y. Sevimli. "Gastronomideki robotik uygulamalar ve yapay zekâ.", pp. 46-58, vol.2, no.2, Tourism and Recreation, 2020. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tourismandrecreation/issue/59266/777446>
- [10] S. Doğan and A. Vatan. "Misafirler, hizmet robotları hakkında ne düşünüyor? TripAdvisor'daki yorumlara yönelik bir araştırma.", 2019.
- [11] A. Glasauer and N. S. Chandel. "Ros.", pp. 100-102, vol.23, no.3, Current Biology, 2013. <https://doi.org/10.1155/2021/7753857>
- [12] M. Gök, Ö.Ş. Akçam and H. Aydemir. "Otonom Mobil Robotlar İçin ROS El Kitabı." 2022. <https://hdl.handle.net/20.500.12452/9176>
- [13] İ. Çayiroğlu. "Kalman filtresi ve programlama." Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşımı vol. 1, 2012.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Indoor Cargo Vending System Development and Development Environment Design

Süleyman UZUN^{1,3*} , Mustafa Zahid YILDIZ^{2,3} , Tolga SUGETİREN⁴ , İsmail YÜKSEL⁵ 

¹ Computer Engineering, Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Science, Türkiye, suleymanuzun@subu.edu.tr

² Electrical Electronics Engineering, Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Science, Türkiye, mustafayildiz@subu.edu.tr

³ ArGe Center, Canovate Electronics Industry and Trade Inc., Türkiye

⁴ ArGe Center, Canovate Electronics Industry and Trade Inc., Türkiye, tolga.sugetiren@canovate.com

⁵ ArGe Center, Canovate Electronics Industry and Trade Inc., Türkiye, ismail.yuksel@canovate.com

ABSTRACT

The rapid expansion of e-commerce caused by the Covid-19 pandemic has increased the significance of the logistics industry. Processes for delivery and return need to be more adaptable and effective in this situation. Smart outdoor cargo vending systems have been created to satisfy this need. These systems do, however, have some drawbacks, such as security and energy usage. In order to address the issues with outdoor vending, this paper presents an indoor smart cargo vending system with high security and minimal energy consumption. Customers have the choice to pick up or return their orders with the help of this system. Additionally, this creative solution aids e-commerce businesses in decreasing logistics expenses and raising customer satisfaction. For manufacturers of vending machines and e-commerce businesses, this proposed indoor smart cargo vending system provides solutions for all scenarios of cargo order processes. This solution combines the design of the system's hardware and software with a methodology that has been discussed in the scientific literature. The study's conclusion suggests a novel indoor smart cargo vending system that was created in response to the logistical difficulties brought on by the expansion of e-commerce. This system can have a positive impact in key areas like security, energy efficiency, and customer satisfaction, and it can be seen as a significant advancement for the logistics sector.

Keywords: Indoor Cargo Vending, System design, Development Environment Design, System software.

1 Introduction

The acceleration of e-commerce and the rise of mobility trends in today's rapidly digitalizing world have fundamentally altered consumer behaviors and business models. The significance and role of the logistics sector have been revised in light of this change. Particularly, the rise of e-commerce has highlighted the necessity of prompt and reliable product delivery to customers, complicating and undermining logistics operations. E-commerce has increased the need for efficient management of processes like physical transportation, storage, delivery, and return of goods. Customer satisfaction, operational effectiveness,

* Corresponding Author's email: suleymanuzun@subu.edu.tr

and cost-effectiveness are all critically impacted by these processes. Traditional logistics techniques might not be adequate to meet these new demands, though. To address these issues, intelligent cargo vending machines are being developed [1,2]. By reducing the time and space requirements of delivery and return processes, which is one of the key logistics services, and giving online shoppers access to their orders around-the-clock, these systems significantly enhance the customer experience [3]. When the literature is examined, however, effective cargo distribution models [4,5], mathematical methods used in the location selection of vending machines [1], and mobile application-based local cargo vending machine solutions [6,7] have been prioritized rather than the development of hardware and software solutions for cargo vending machines. Some studies on cargo systems have been conducted in the literature. Karabulut et al. [1], developed a mathematical model for the cargo vending machine location selection problem. They applied their proposed model to the placement of five cargo vending machines in Buca district of Izmir province. Yaman and his friend [5], with their proposed system, aimed to increase the speed, capacity and efficiency of the currently used cargo management systems. In their proposed system, they used UHF-RFID labels instead of conventional barcode or QR code labels. In the system, they installed UHF-RFID reader antennas in cargo shipping branches, transportation vehicles and transfer centers. In this way, all cargoes are read automatically, quickly and easily. Çakır and his friend [7], tracked cargo packages using RFID technology. In this way, the separation of cargo packages from a central point was performed automatically over the tape. A study similar to the system proposed in this study was not found in the literature. Due to the growth of e-commerce and the effects of mobility trends on logistics operations, new and creative solutions are now required.

To address the issues faced by e-commerce businesses and their customers, a Smart Indoor Cargo Vending System has been developed in this study. For the first time, a comprehensive approach is used in this study to discuss the software and physical security design of the designed smart indoor vending machine, energy efficiency, continuous monitoring, design of an alarm system for system failures, management of multiple vending machines and system updates from a single center, and the design of systems that ensure the complete and accurate transfer of data flow.

2 Material and Methods

2.1 System Design

The proper and systematic management of the processes for product delivery and return in e-commerce systems is proposed. The two main sections of this system are the hardware and software designs. The emphasis in this study is more on software processes. In order for multiple software developers to work on the system's software processes at once, the environment and its features are also highlighted.

2.1.1 Establishing a Software Development Environment

Software for automated indoor cargo tracking is created using a server-client model and micro-service architecture. Utilizing the information gleaned from the analysis and field audits of the software, analyses of indoor cargo tracking automation are prepared. The prepared analyses are used to divide the work into sections. Each piece of work is entered into the Jira software as a task to be assigned to various software developers. Within the time allotted to them, each software developer completes the tasks given to them and uploads them to the system. The flow chart in Figure 1 depicts the setting and procedures set up for the creation of indoor cargo tracking automation software.

The Bitbucket software hosts all written lines of code. Over time, it is necessary to update every piece of produced code. The versions of each piece of code must be preserved for this reason. This task makes use of the git software. With the help of the comprehensive Jenkins application, the deployment procedures

for developed and programmed software projects are managed. Through the git version control system, changes made to each task are sent to the Bitbucket application. When the code is committed using Bitbucket, Jenkins starts the deployment process, which is then completed by deploying the necessary environments (develop, stage, and prod) using a Kubernetes cluster.

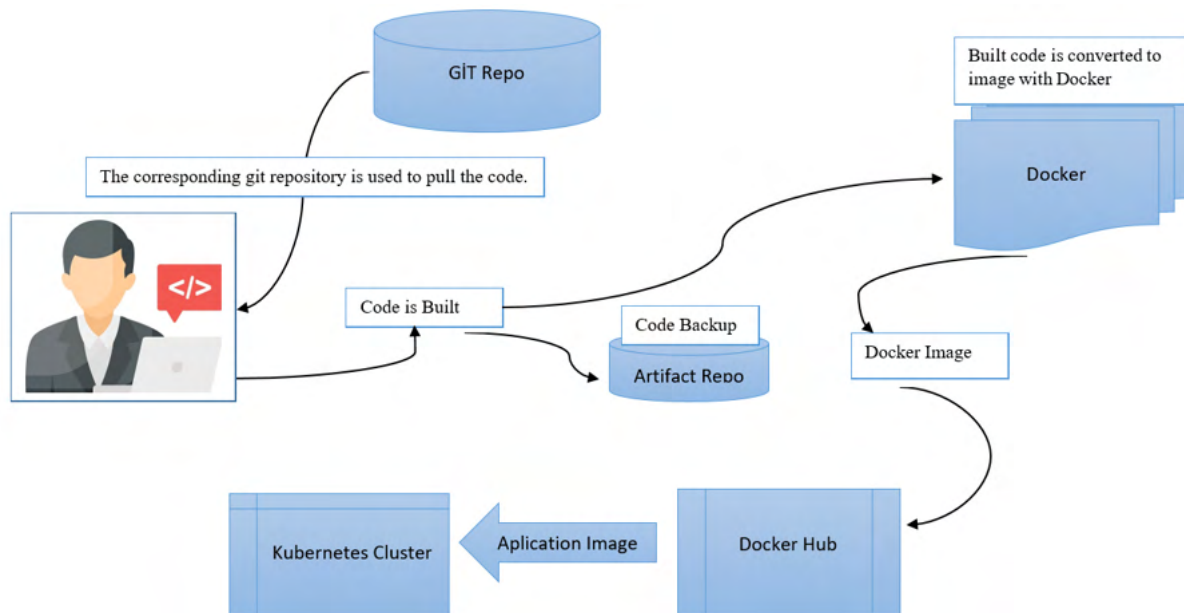


Figure 1: Schematic of the environment prepared for the development of indoor cargo tracking automation software in general

2.1.2 Establishing a Software Development Environment

Jira software is a project and business process management software developed by Atlassian [8]. It is widely used especially in areas such as software development and information technology service management [9]. This application was used during the development of the indoor cargo vending system software. In this application, all personnel involved in the project such as software developers, designers, analyzers, hardware designers and electronic card developers are involved. All processes such as work orders, completed works, etc. are managed through this application.

2.1.3 Bitbucket Application

Bitbucket is a code management and version control application developed by Atlassian to facilitate software development processes and support collaboration [10]. The codes and versions of the developed system are tracked through this software. All codes produced during the software development phase of the indoor cargo vending system are stored on this application. It is an application that can also look at old versions of the developed codes when necessary. It also supports applications such as git and mercurial for version tracking. The bitbucket application used in this study works in integration with the git version tracking application. Continuous Integration/ Continuous Delivery (CI/CD) DevOps tools have a flexible structure thanks to their integration with application monitoring and communication tools.

2.1.4 Git: Version Control Application

Git is an open source software for version control in software development projects and allows many developers to develop code in a project at the same time [11]. It was developed by Linus Torvalds in 2005 [12]. Git is distributed and each developer can create and work on their own copies. This facilitates parallel development and collaboration. It is used together with bitbucket in the established software development environment.

2.1.5 Git: Version Control Application

Jenkins is an open source automation server used as a CI/CD product to automate and manage software processes. It was first launched in 2004 as part of the Hudson project, later renamed Jenkins [13]. In the system development environment, an end-to-end deployment pipe structure was built and used to automate deployment/testing processes. The process is triggered by committing the relevant project code in the Git repo and ends with the deployment of the prepared docker image on the kubernetes cluster. The project owner is notified according to the result of the process. Software security control in the pipeline is done with SonarQube software.

2.1.6 Kubernetes Application

Kubernetes is a container orchestration platform for automating and managing container-based applications, defined as portable packages used to isolate and make portable applications and their dependencies [14]. Kubernetes organizes, controls and manages independent containers across multiple servers or cloud environments. In the software development environment designed in this study, it is installed and used on one cluster. The deployments of the developed software and services are made on these clusters. For the production environment, it is set up as 3 Master + 5 worker nodes. It can be scaled horizontally and vertically if needed. Due to the cluster structure, services are redundant and can be replicated up to the desired number of replicas.

2.2 System Hardware Design

The hardware components of the indoor cargo vending system are designed in two different ways: lockers and main unit. The sizes of the cabinets are designed in three different ways as shown in Figure 2 small, medium and large.

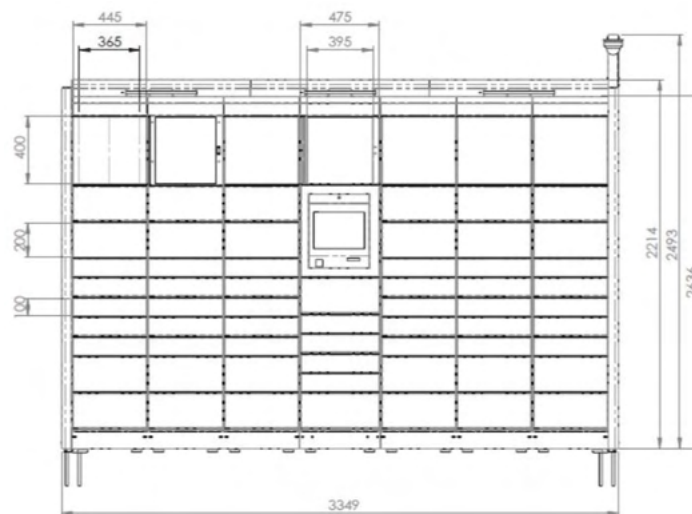


Figure 2: Sizes of the designed cargo vending machine

The front view of the prototyped lockers is shown in Figure 2. The cabinet unit consists of chambers of different sizes in which cargoes of different sizes can be placed. Since the cabinets will be stored in safer places indoors, thin sheets are used in the manufacture of the cabinet unit. Since it does not require sealing, no welding process was performed on the unit. In addition, the cabinet unit is designed to be easily assembled after cutting, bending and punching.

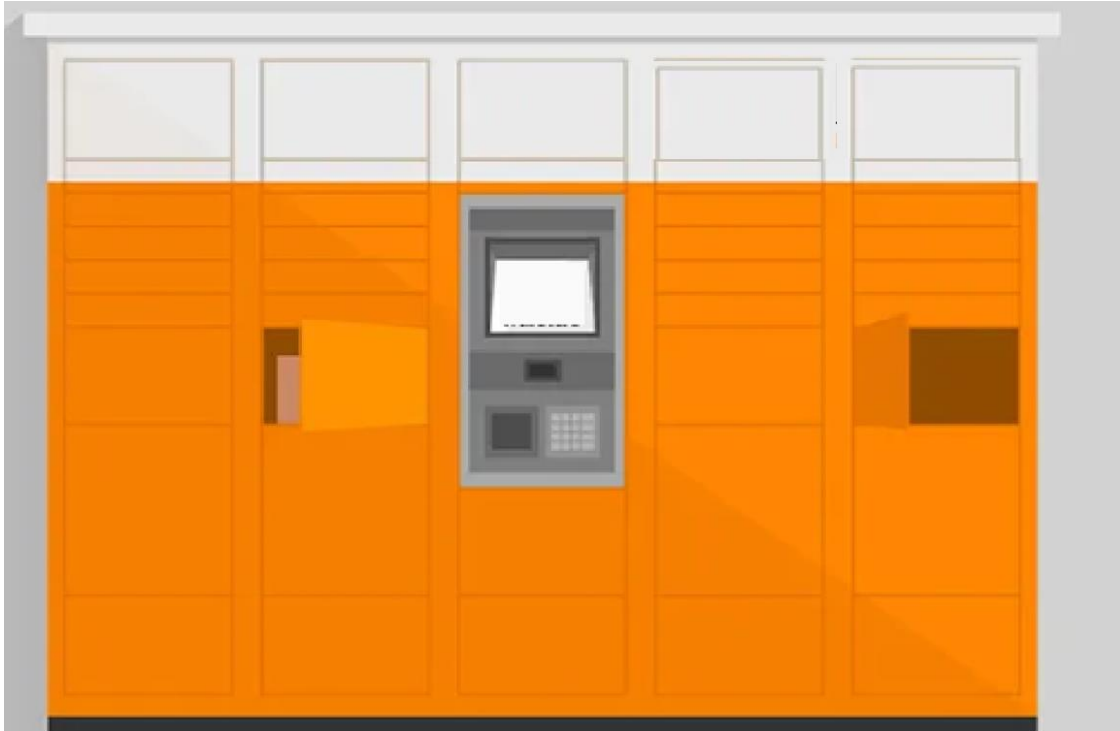


Figure 3: Cabinet unit of indoor cargo vending system

In addition, a camera system was added in order to take and store the images of the people making transactions. A single control card was used to control the lock mechanisms of the lockers. One computer was used to receive the cargo of the users and to operate the lock mechanism. One modem was used to provide internet connection. In the main unit;

- The case of the computer used in the system,
- Modem where the internet connection is provided,
- Network Video Recorder (NVR) device where camera recordings are saved,
- Uninterruptible Power Supply (UPS) devices used to protect devices from instantaneous power outages and sudden fluctuations in the grid,
- A smart Power Distribution Unit (PDU) that can remotely monitor power outages and how much electricity is used by connected devices,
- Lock mechanism control cards,

are available.

2.3 Indoor Cargo Vending System

The designed indoor cargo vending systems are cabinets in which e-commerce companies place their shipments, receive returns and customers receive their orders. In this way, many problems such as the customer not being found at the address for e-commerce companies, sending the cargo back to the e-

commerce company and incurring additional shipping costs have been prevented. At the same time, many problems such as not receiving their cargo in customers, adjusting themselves to the time the cargo will be delivered, have been prevented. Thanks to the cargo vending system software designed in short items;

- The Cargo personnel brings cargo and places it in the vending machine,
- Informing the e-commerce company as a result of placing the shipments in the vending machine,
- Receipt of shipments by the customer,
 - Single product pickup
 - Multiple product pickup
- Product return process,
- Product cancellation process,
- Personnel service operations

It has the opportunity to make transactions.

2.4 Indoor Cargo Vending System Screen Designs

At this stage, the screens designed on cargo vending machines and the capabilities of these screens are explained. Difficulties encountered with these screens and the measures taken are also mentioned.

2.4.1 Placing the shipment in the cargo vending machine

After the customer completes the purchase from the e-commerce company, a reconciliation number is created for the cargo personnel to place the customer's order in the cargo vending machine. After the cargo personnel place the customer's order in the cargo vending machine, a single-use password is created for the customer. This password is sent to the relevant customer as Short Message Service (SMS). The process of cargo personnel placing orders into the cargo vending machine is shown in Figure 4.

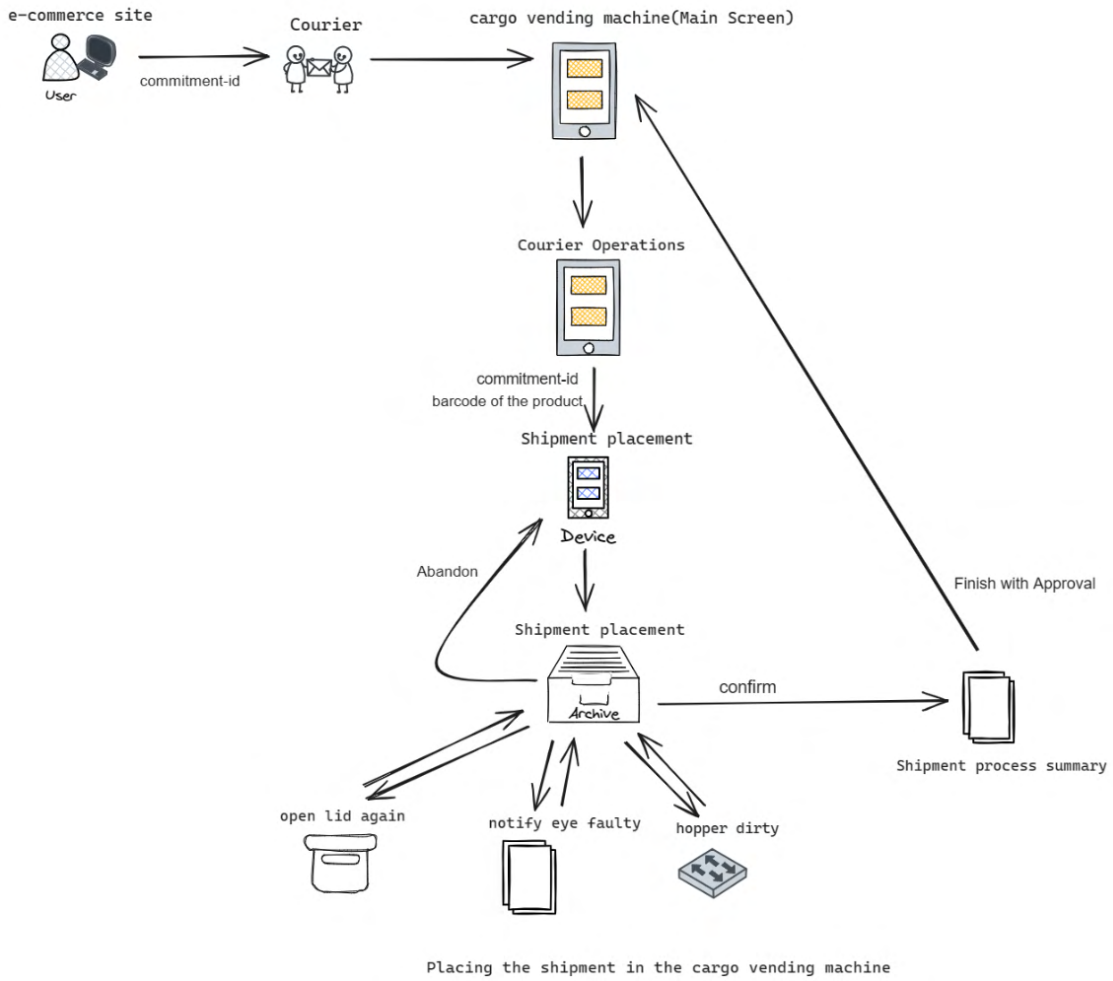


Figure 4: The process of cargo personnel placing orders into the cargo vending machine

When the cargo personnel arrive at the relevant cargo vending machine, they click on the " *Cargo personnel Operations*" menu shown in Figure 5 and enter the reconciliation number on the screen shown in Figure 6.

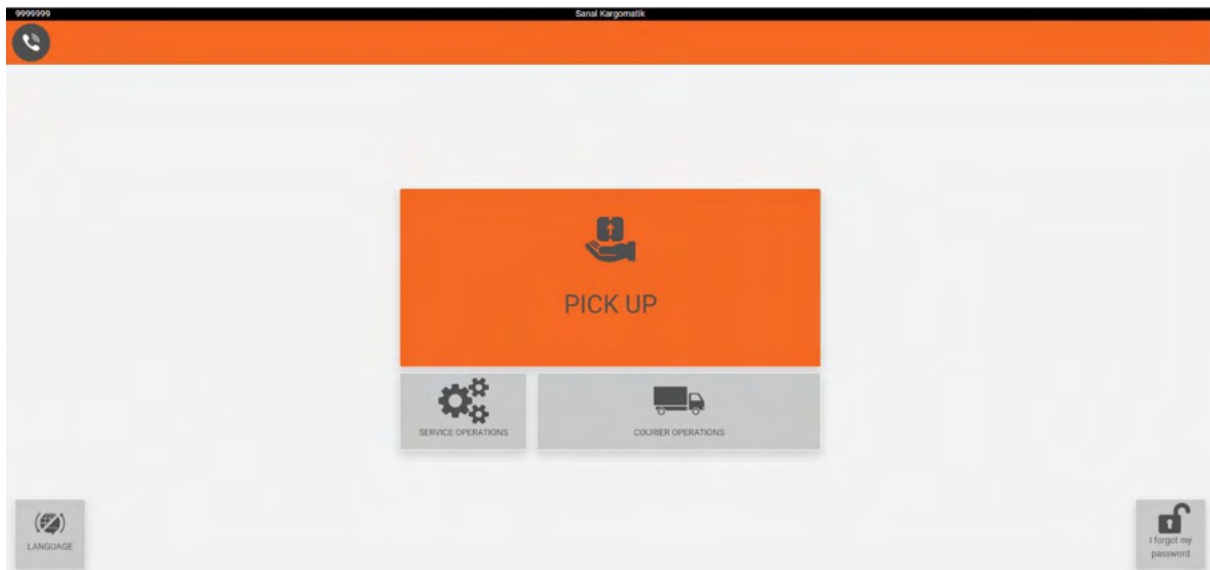


Figure 5: Cargo vending machine main screen

In Figure 5, (a) shows the unique ID of the cargo vending machine and (b) shows the name of the cargo vending machine. On the same screen, multi-language options and the ability to create a new password for those who have forgotten their password are also available.

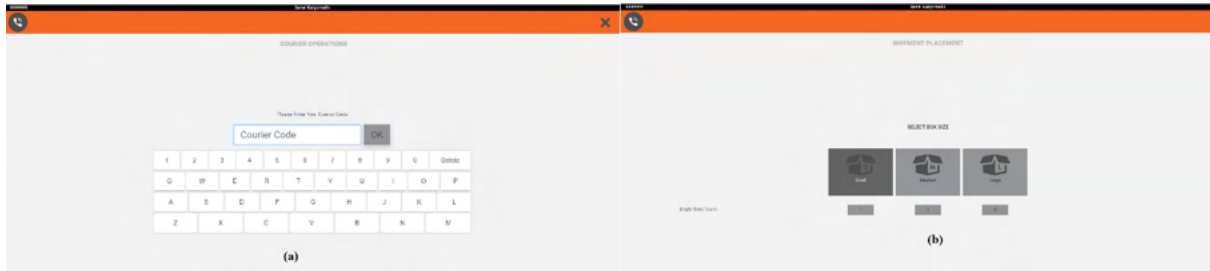


Figure 6: Product placement screens for cargo vending machines. (a) Cargo personnel operations reconciliation number entry screen, (b) Shipment placement screen.

After entering the consensus number on the screen shown in Figure 6.a, the cargo personnel can scan the barcode of the product to be placed inside the cargo vending machine or write it manually. On the screen shown in Figure 6.b, the size of the relevant cargo is selected and placed in a suitable hopper. The full or empty containers are detected by sensors and can be monitored on the screen shown in Figure 7.

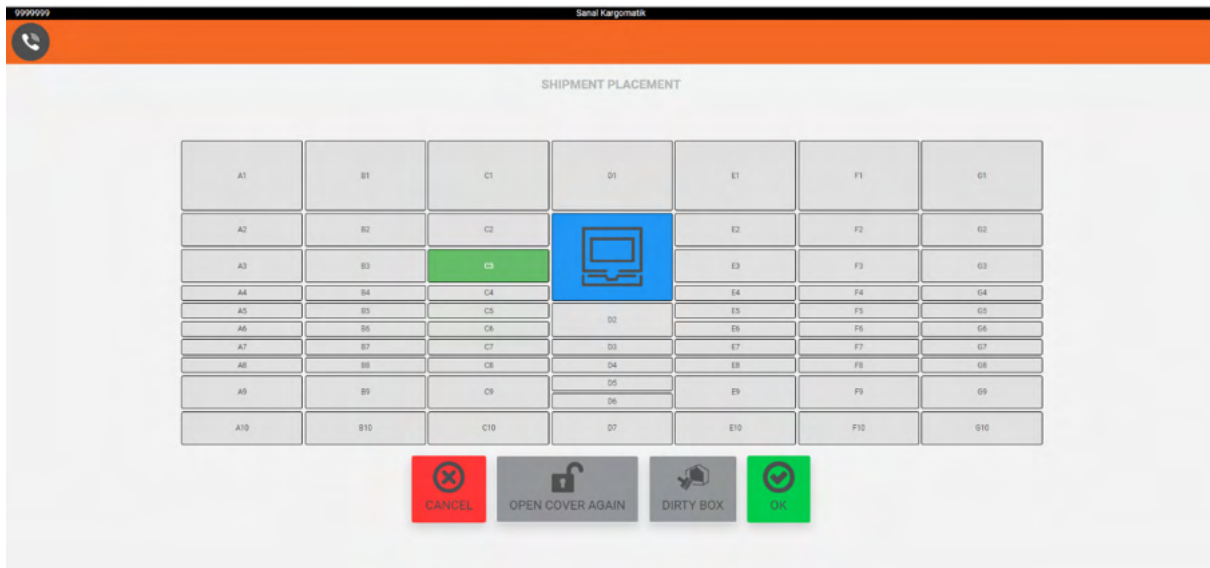


Figure 7: Shipment placement screen

After the hopper selection is made, the relevant hopper will be opened automatically. In addition, an audible warning will be made to the cargo personnel as "Please place the shipment". The "ABANDON" button on this screen is used in case the cargo personnel want to select a different size hopper. The "OPEN LID AGAIN" button is used to retrigger the lid in cases where it is not opened. If the lid opening problem persists after clicking this button, the "OPEN LID AGAIN" button turns into the "NOTIFY EYE FAULTY" button as shown in Figure 8 to report the relevant hopper as faulty and the cargo personnel reports the relevant hopper as faulty. Defective hopper notifications are monitored instantly from the portal system. Defective hoppers are disabled and reduced from the capacity on the size selection screen. The "HOPPER DIRTY" button has been added for the cargo personnel to use in case the hopper is dirty during the placement of the shipment. When the cargo personnel press this button, the relevant hopper will be marked as dirty and the relevant hopper will be taken out of use and reduced from the total capacity as in the faulty hopper notification process step. The "OPEN LID AGAIN" and "READY TO OPEN" buttons have

been added as measures to prevent the cargo personnel from returning to the very beginning of the shipment placement work process. In this way, it has been observed that it is very important in terms of both time and practical progress of the work.

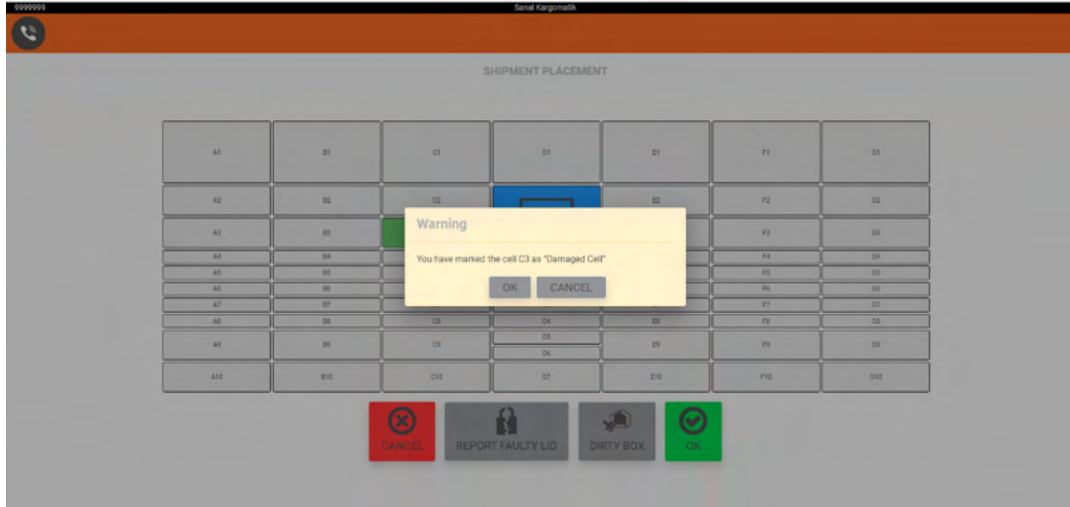


Figure 8: Hopper malfunction notification screen

The "*CONFIRM*" button is used by the cargo personnel to complete the transactions. After the cargo personnel clicks this button, the shipment transaction summary is shown as shown in Figure 9. By pressing the "*FINISH WITH APPROVAL*" button, the placement process is completed and the main screen is returned.

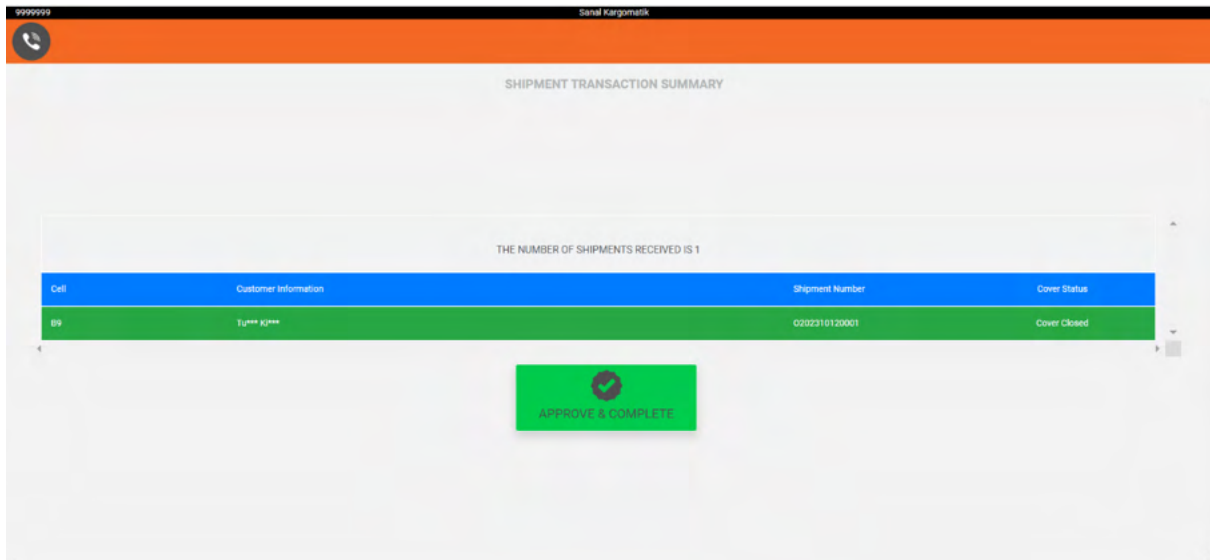


Figure 9: Shipment process summary screen

On this summary screen;

- **Hopper information;** Information on which screen the cargo personnel placed the product,
- **Customer information;** The name and surname of the customer for which customer the product belongs to,
- **Delivery Number;** The order number of the shipment,

- **Lid Status**; The closed status of the lid of the placed hopper is given. (The lid closure status control is provided by the information received from the lock switches in each hopper in cargo vending machines).

In multiple product placement operations, all operations are performed as described above. Only after the cargo personnel enters the reconciliation number, they are informed that they will enter more than one product and the personnel can complete the placement process by scanning the barcodes of all products.

2.4.2 Receiving the order from the cargo vending machine

Customers can pick up their products 24/7 from indoor cargo vending machines. The process of customers receiving their orders from the cargo vending machine is shown in Figure 10.

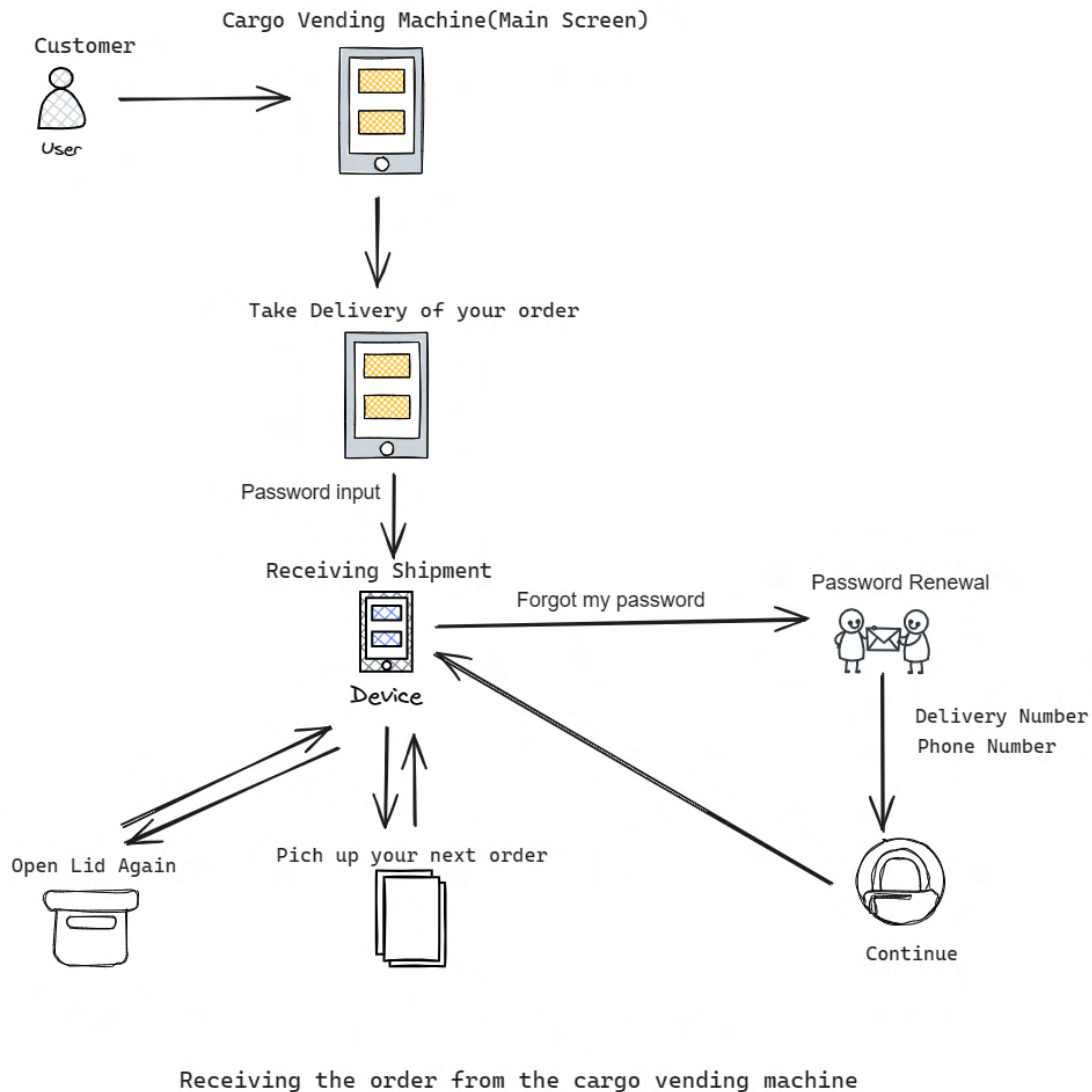


Figure 10: The process of customers picking up their orders from the cargo vending machine

When the customer presses the "TAKE DELIVERY OF YOUR ORDER" button on the main screen of the cargo vending machine shown in Figure 5, they will be directed to the password entry screen shown in Figure 11.

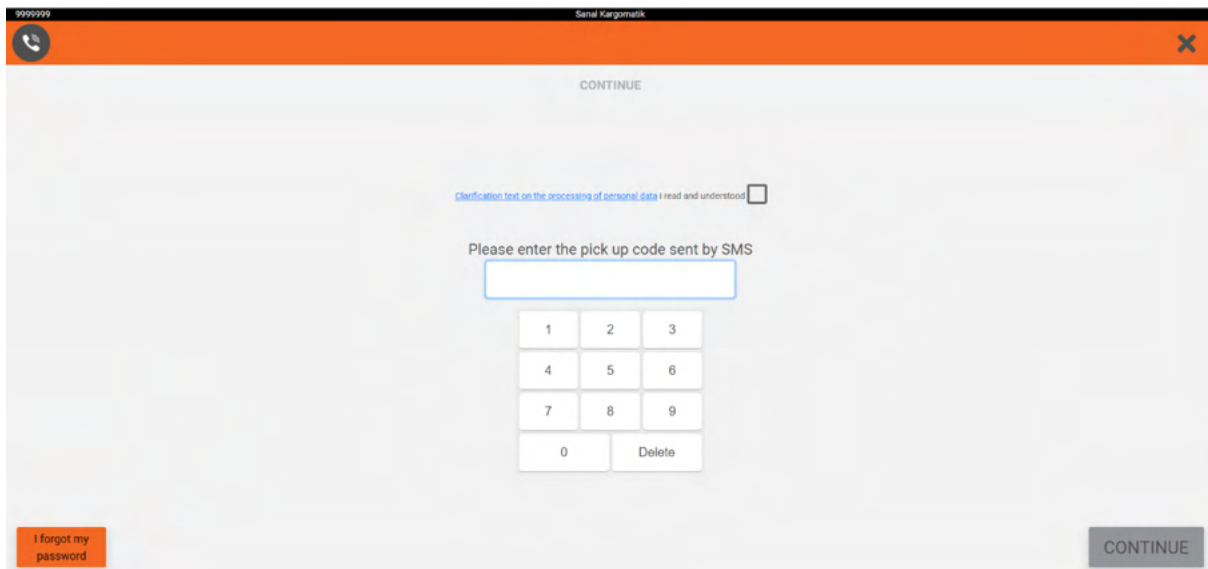


Figure 11: Password login screen

On this screen, the user can first read the Clarification Text on the Processing of Personal Data and then is expected to check the "I have read and understood" box. If the user does not check this box, the transactions cannot continue. After checking the relevant box, the user enters the password sent by the e-commerce company and passes to the "Order Receiving" screen shown in Figure 12.

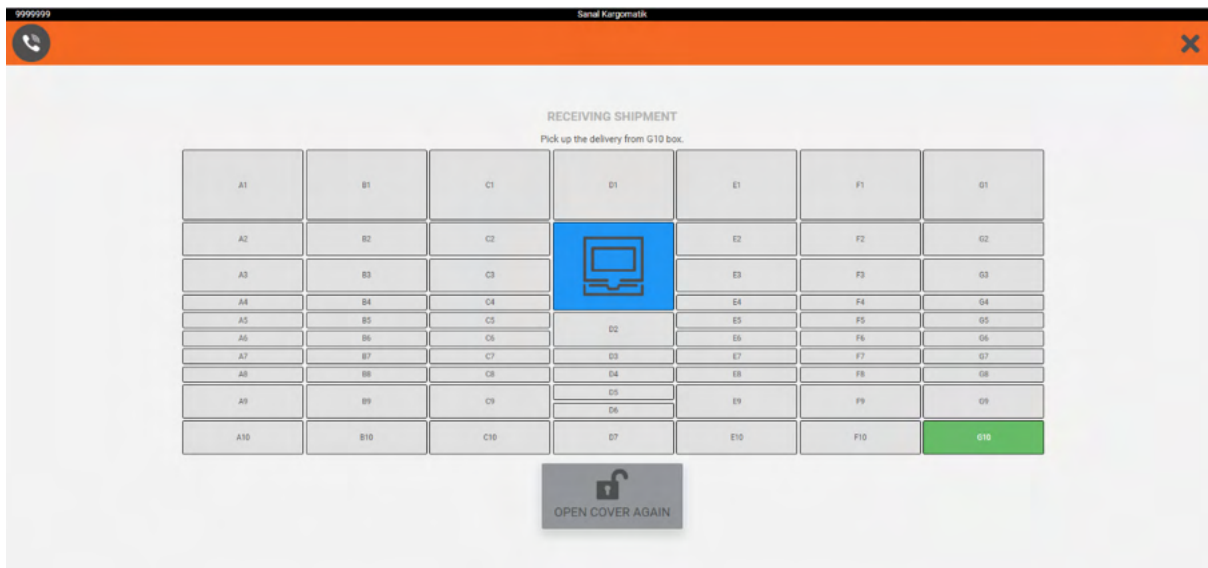


Figure 12: Order receiving screen

The hopper from which the customer will pick up his/her cargo is colored green as shown in Figure 12. In this case, the lid opens by itself and an audible warning is given as "Please pick up your shipment". In cases where the lid cannot be opened or jammed, the "OPEN LID AGAIN" button has been added. This button works as described in the title of placing the shipment in the cargo vending machine. After the customer takes the shipment from the hopper, an audible warning is given as "Please close the lid" and the transaction is considered successfully completed. In the case of multiple product pick-ups, all steps are executed in the same way, only after the product from the first hopper is picked up, the hopper with the other product is opened by clicking the "PICK UP YOUR NEXT ORDER" button as shown in Figure 13. In this way, the transaction is considered successful after all shipments have been received.

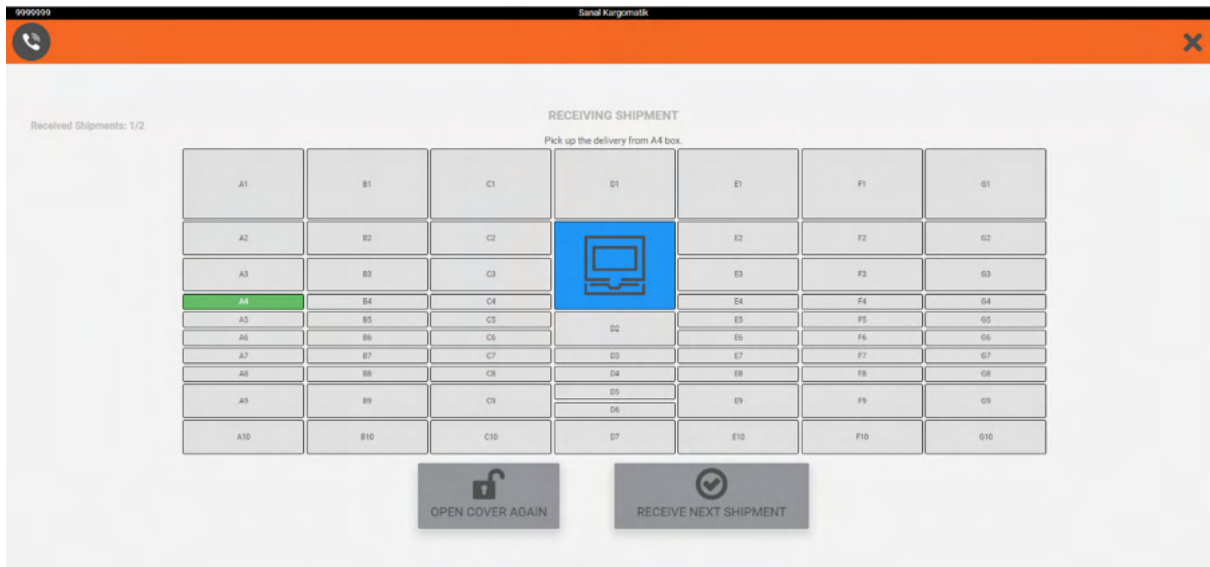


Figure 13: Multiple order receiving screen

In the screen shown in Figure 11, if the customer forgets his/her password, he/she can click on the "FORGOT MY PASSWORD" button. In this case, the customer is presented with the Password Renewal screen shown in Figure 14.

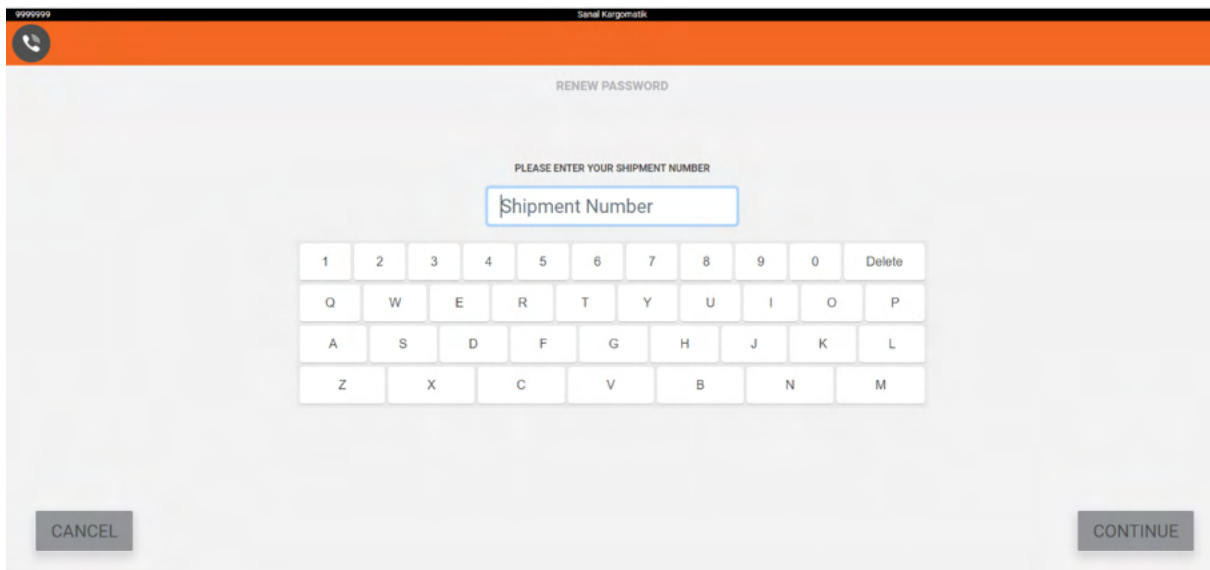


Figure 14: Password reset screen

On this screen, the customer first enters the Delivery Number and presses the continue button. The customer is presented with a screen where he/she enters the last two digits of the phone number shown in Figure 15. After pressing the Continue button, a new password is sent to the customer's cell phone.

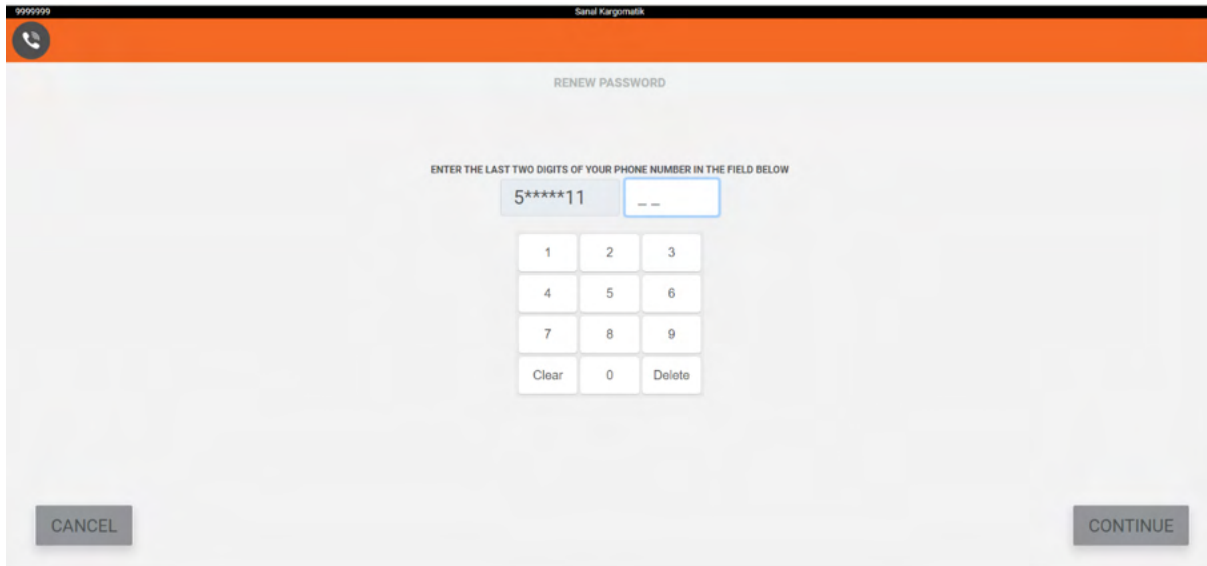


Figure 15: The screen where the last two digits of the phone number are entered

The phone icon in the upper left corner of the screen shows the call center contact number of the e-commerce company and the steps to be followed in the application.

2.4.3 Order refund process

The order refund process is initiated when the customer orders are placed in the cargo vending machines and are not received at the end of the periods determined by the e-commerce company. The refund processes are initiated by the e-commerce company. The e-commerce company transmits the refund process information of the relevant order to the server to which the relevant cargo vending machine is connected and is transferred to the cargo vending machine device via the service running on this server. When the cargo personnel comes to place the product in the relevant cargo vending machine, they enter the reconciliation number given to them. If there are products to be returned first, the screen shown in Figure 16 appears before the cargo personnel.

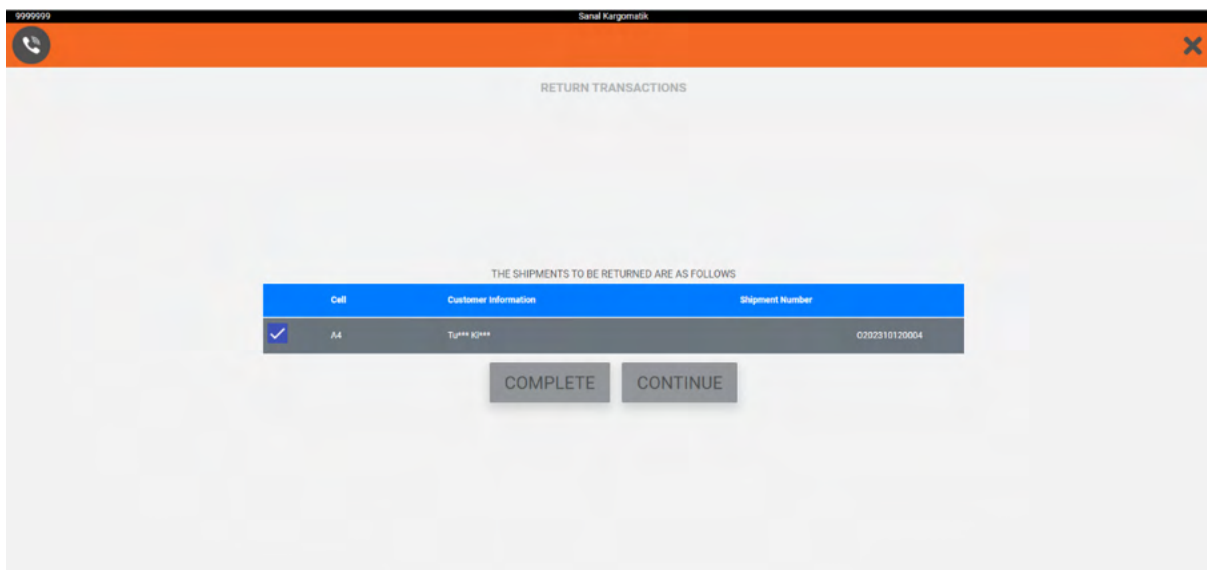


Figure 16: Cargo personnel refund processing screen

This screen contains information about the products to be returned. By pressing the "CONTINUE" button on this screen, the screen shown in Figure 17 appears before the cargo personnel.

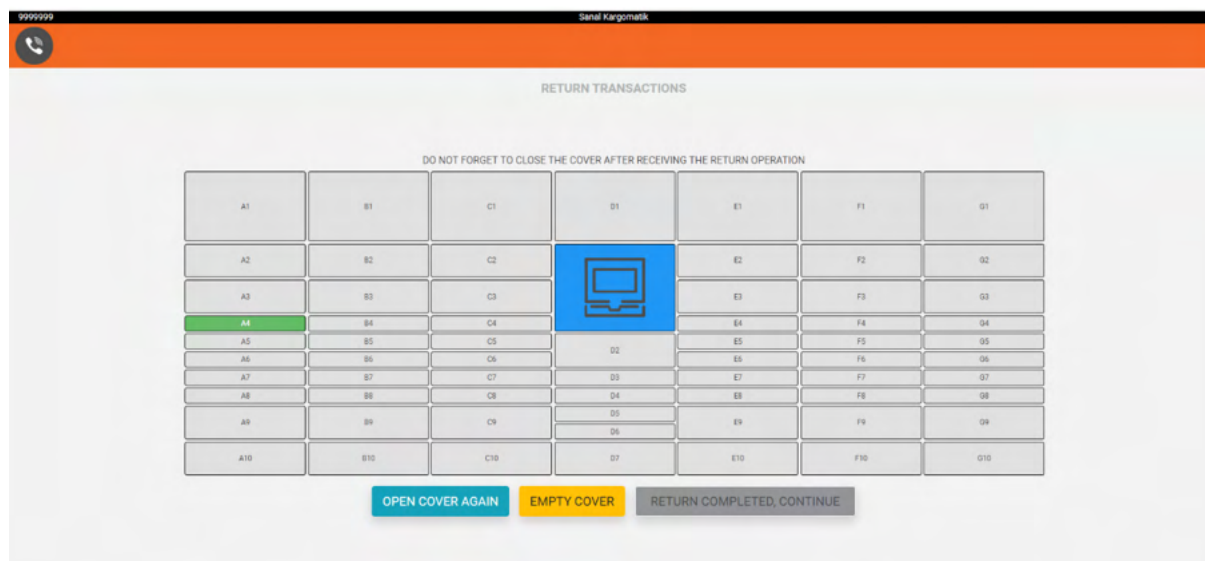


Figure 17: In refund processes, the screen for retrieving the order from the hopper

The product to be refunded is in the green colored hopper. The relevant hopper opens automatically. After the cargo personnel receive the refunded products, the process is continued by closing the hopper cover and clicking the "REFUNDE RECEIVED CONTINUE" button. On the next screen, a screen showing the summary of the refunded products is displayed. Cargo personnel complete their transactions by comparing the refunded products on this screen. After this process, the SMS password sent to the relevant customer is invalidated and no delivery is made to the customer. Then, if the cargo personnel will place a new order, they can continue to perform these operations.

Even if the refund process is initiated by the e-commerce company, the customer can pick up the order from the cargo vending machine during the period until the cargo personnel receive the order from the relevant cargo vending machine. If the customer picks up the order at the cargo vending machine during this period, the return process is automatically canceled.

2.4.4 Order cancellation process

Cancellation can be initiated at any stage after the creation of the order through the e-commerce company. Cancellation procedures are initiated for reasons such as loss of the customer order, damage to the order, fraud (online purchases made by copying, stealing credit card information in e-commerce or taking information from the cardholder with various fraud methods) and the customer canceling the order. The cancellation is made by the e-commerce company and then the refund process is initiated. After this process, the system prevents the delivery of the order to the customer. Cargo personnel are directed to follow the steps in the return process and the process is finalized by following the necessary steps.

2.4.5 Service operations

There is a "SERVICE OPERATIONS" button on the main screen shown in Figure 5. This menu has been created for cleaning staff to perform cleaning operations and technical service personnel to perform maintenance, repair and control operations. When this button is pressed, the Service Operations screen shown in Figure 18 appears.

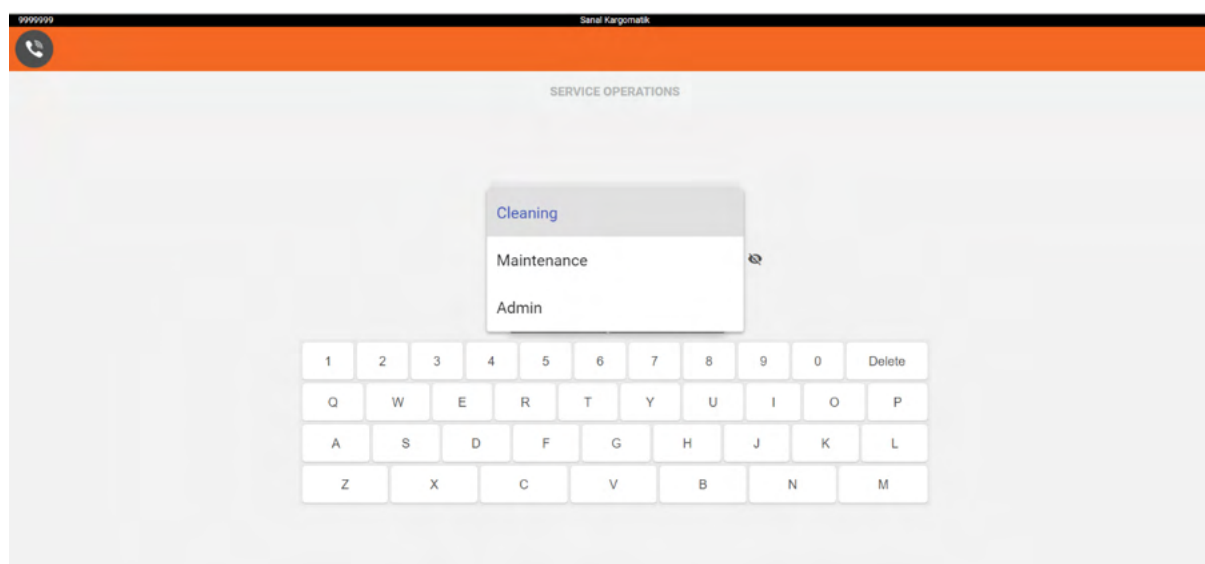


Figure 18: Service operations screen

There are three different types of users on this screen. Each group selects their own user name and after entering their passwords, they perform their transactions related to their own fields. The passwords of the individuals are generated automatically through the main system at certain intervals. These generated passwords are sent to both the device and the relevant persons via e-mail.

2.5 Indoor Cargo Vending System Software

Many information such as reconciliation number, customer password, cleaning and technical staff passwords, return information, cancellation information, etc. must be transferred to the cargo vending machines. It is necessary to know clearly that this information is fully transferred to the cargo vending machines and that the transfer is transferred correctly. If there are deficiencies in this information, it may cause problems such as the customer not receiving the product and technical personnel not being able to open the cargo vending machines. Services and software developed to prevent such problems are described under this heading.

2.5.1 Integration processes after order placement

In shipment placement processes, all information to be transmitted to the cargo vending machine is transmitted by e-commerce companies to a central server to which the cargo vending machines are connected. The reason for this is that e-commerce companies can transmit data directly to cargo vending machines, but since they cannot guarantee that the data is transmitted exactly, all data is transmitted to a central server. On this server, services have been prepared that guarantee that the data that needs to be transmitted is transmitted completely and accurately. While the passwords required for the customer to receive their orders are transmitted to the customers as SMS by the e-commerce company, the same password is transmitted to the cargo vending machine via the central server. When the customer enters the password on the cargo vending machine, verification can be done. All these steps are explained on the architecture shown in Figure 19.

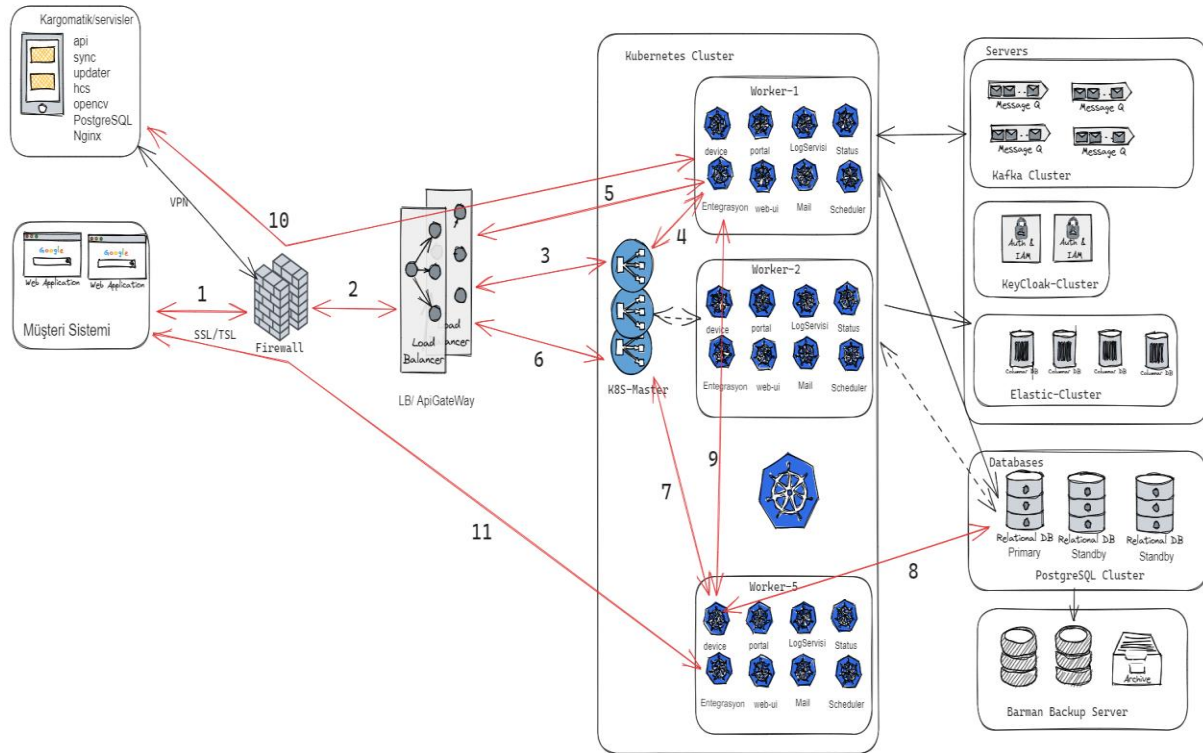


Figure 19: The process of transmitting the package information from the e-sales application to the cargo vending machine

The operations in the numbered stages in Figure 19 are explained below.

Process-1: A request is sent to the integration service by the e-commerce company. Incoming requests are met by the firewall and it is confirmed whether they come from an authorized system.

Process-2: If a successful pass through the firewall is provided, the request is directed to the api gateway. After Authentication check on the api gateway, the request is directed to Load balancer.

Process-3: Load balancer sends the request to the active Kubernetes master.

Process-4: Kubernetes master routes the request to the active Kubernetes worker. Kubernetes worker redirects the request to the service belonging to the domain.

Process-5: Integration service sends a request to the device domain via load balancer to learn the ip address of the cargo vending device by looking at the content of the incoming request.

Process-6: Load balancer sends the request to the active Kubernetes master.

Process-7: Kubernetes master forwards the request to the active Kubernetes worker. Kubernetes worker redirects the request to the service belonging to the domain.

Process-8: Device service reads the ip information via Postgresql and returns a response.

Process-9: Integration service receives the response on the same channel.

Process-10: Integration service sends a package information request to the cargo management device. Transaction confirmation information is received via the cargo vending device.

Process-11: Transaction confirmation information is sent to e-commerce service.

2.5.2 Used applications

Services and applications used in cargo vending systems and their intended use are described below.

Cargo vending-api: It is the backend software on cargo vending machines. The application processes request from the interface and forwards them to the database and the relevant server software. It directs requests such as opening/closing hopper lids to the relevant hardware service. Manages requests by connecting with the hopper control unit. Responds to requests from the server. Processes sensor data in the hoppers and processes status information such as open/closed, full/empty.

Cargo vending -UI: Provides an application interface for users. Nginx is used as web server. It opens automatically in kiox mode on chromium every time the PC starts.

Cargo vending -hcs: Provides access of API software to cargo vending hopper and lids. Controls all hardware.

Cargo vending -sync: It is the service that transfers the "log/transaction" information generated by the API to the server side at short intervals. These logs are written to the kafka queue via the log service on the server side.

Cargo vending -opencv: It contains hundreds of functions that support capturing, analyzing and manipulating visual information connected to a computer by webcams, video files or other types of devices thanks to the OpenCV library.

Cargo vending -updater: Starts the update process by following the update tasks created through the portal. By getting the name and version information of the service to be updated, it pulls the update on the cargo automaton via Object Store and restarts the service.

Cargo vending machine sleep services: It enables cargo vending machines to be put into sleep mode (suspend) at night and to be woken up automatically at the specified time in the morning. During sleep, the customer can wake up by touching the screen if necessary. After the customer's transaction is completed, it goes back to automatic sleep after 3 minutes of passive waiting.

PostgreSQL: Due to the offline working structure of the cargo vending, a database is run on them. Two separate databases are defined for API service and updater services.

Nginx: Serves as a web server.

2.5.3 Specially developed applications

The applications and services described here have been developed to control and provide solutions to a number of major problems.

Updater application: It is an application that works in a structure similar to Ansible but developed as custom. Work tasks are defined to cargo vending machines via the Portal. Cargo vending machines regularly check their work tasks and make updates. The results are also tracked on the relevant portal page.

Uploader application: It is a custom developed software that allows uploading software packages or script files to be updated to the Object store.

Remote PDU control: All devices in the cargo vending machine and connected to the PDU can be turned off and on with this application. The computers on the cargo vending machine, which we cannot connect via remote ssh, can be turned off / on via PDU (Smart Socket) when necessary.

Portal warning monitoring application: It is the portal screen where the status of all cargo vending machines are monitored via the portal and detailed failure logs are viewed.

Energy saving software: In order to save energy, cargo vending machines were suspended at a specified time interval. Customers can wake up by touching the screen when necessary. In the event that the full operation of the wake-up scripts coincides with the moment of package delivery or package placement, due to the negative impact on the operation of the cabinet, it is ensured that extra scripts are researched and written to delay the sleep process by determining whether the cabinet is being used at that moment.

3 Conclusions

With the development of e-commerce, the importance of the logistics sector also increases. In cases where e-commerce companies deliver their orders to their customers and receive their returns, the orders are sent back to the e-commerce companies in cases such as the customer not being at the address or changing the address, which increases the shipping costs. Similarly, it creates problems such as customers not being able to receive their orders from cargo companies.

Indoor cargo vending systems have been developed to overcome similar problems. These systems are installed at certain points and allow cargo personnel and customers to go and pick up their orders independently of time. In the developed system, a central server system has been prepared to which all cargo vending machines are connected. The system allows for expansion depending on the number of cargo vending machines. Thanks to the offline operation feature and suspend modes of cargo vending machines, it keeps customer satisfaction at the highest level with both energy efficiency and service uninterruptedness. In addition, all cargo vending machines are constantly monitored through a central portal and all relevant parties are informed instantly in case of malfunctions. Cargo vending machine software can be updated from the central point. In order to ensure that the updates are not left unfinished, the current files are first transferred to the cargo vending machine. When the information that all files are transferred completely, the update works on the vending machine and a problem-free process is realized. In addition, the information received from e-commerce companies is transferred to the relevant cargo vending machines smoothly with the system software developed. If the transfer is interrupted, the file on the cargo vending machine side is deleted and the relevant files are started to be transferred again after the connection is re-established. Thus, it is guaranteed that the data is transferred completely and accurately.

4 Declarations

4.1 Study Limitations

The study's findings are based on the implementation and testing of a prototype in a controlled environment. The scalability and generalizability of the system to different settings and scales, such as urban and rural areas, diverse e-commerce businesses, and varying customer demographics, need further exploration.

4.2 Acknowledgements

The authors and the project team would like to thank Canovate Electronics Industry and Trade Inc. and R&D Center for their contributions.

4.3 Funding source

This scientific research project work was supported by Canovate Electronics Industry and Trade Inc. R&D Center with the project number of M22-144 and titled "Indoor Smart Autonomous Cargo Delivery Cabinet Design".

4.4 Competing Interests

There is no conflict of interest in this study.

4.5 Authors' Contributions

Define the contribution of each researcher named in the paper to the paper.

Corresponding Author Süleyman UZUN: Contribution to the article. Organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part, reworking not only in terms of spelling and grammar but also intellectual content or other contributions.

2. Author's Mustafa Zahid YILDIZ: Contribution to the article. Organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part, reworking not only in terms of spelling and grammar but also intellectual content or other contributions.

3. Author's Tolga SUGETİREN: Contribution to the article. Developing ideas or hypotheses for the research and/or article, planning the materials and methods to reach the results, taking responsibility for the experiments, organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results.

4. Author's İsmail YÜKSEL: Contribution to the article. Developing ideas or hypotheses for the research and/or article, planning the materials and methods to reach the results, taking responsibility for the experiments, organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results.

5 Human and Animal Related Study

The work does not involve the use of human/animal subjects.

5.1 Ethical Approval

No ethical approval is required for this project.

5.2 Informed Consent

All authors consent to the publication of the study.




References

- [1] Karabulut OA, Seyret MK, Avcı MG. Kargo Otomatı Yer Seçimi Problemi için Bir Matematiksel Model. *Endüstri Mühendisliği* 2023;34:26–41. <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1130216>.
- [2] Rohmer S, Gendron B. A guide to parcel lockers in last mile distribution: Highlighting challenges and opportunities from an OR perspective 2020.
- [3] Tang YM, Chau KY, Xu D, Liu X. Consumer perceptions to support IoT based smart parcel locker logistics in China. *J Retail Consum Serv* 2021;62:102659. <https://doi.org/10.1016/J.JRETCONSER.2021.102659>.
- [4] Toraman Y. Planlı Davranış Teorisi Çerçevesinde Kargo Otomat (Kargomat) Sisteminin İncelenmesi: Elektronik Son Adım Teslimat Süreçlerinin E-Ticaret Platformları Özelinde Araştırılması. *J Transp Logist* 2022;7:303–20. <https://doi.org/10.26650/jtl.2022.1006593>.
- [5] YAMAN O, BAYĞIN M. UHF-RFID Based Smart Cargo Management and Real Time Tracking Approach. *J Intell Syst Theory Appl* 2020:38–45. <https://doi.org/10.38016/jista.762685>.
- [6] Kim K, Kim J-H. A Development of an Low Cost Smart Parcel Service System with Enhanced Security. *J Converg Inf Technol* 2018;8:193–9. <https://doi.org/10.22156/CS4SMB.2018.8.6.193>.
- [7] Çakır A, Güngör O. Rfid ile Kargo Yönetimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilim Derg* 2011;10:83–9.
- [8] Atlassian. Jira Work Management | A Friendly and Powerful Way to Work. Atlassian 2023. <https://www.atlassian.com/software/jira/work-management> (accessed September 30, 2023).
- [9] Filion L, Daviot N, Le Bel JP, Gagnon M. Using Atlassian tools for efficient requirements management: An industrial case study. *11th Annu IEEE Int Syst Conf SysCon 2017 - Proc 2017*. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2017.7934769>.
- [10] Chakraborty S, Aithal PS. A Practical Approach to GIT Using Bitbucket, GitHub and SourceTree. *Int J Appl Eng Manag Lett* 2022;6:254–63. <https://doi.org/10.47992/IJAEML.2581.7000.0156>.
- [11] Demiral Y, Carkaci N, Cekmez U. DevOps architecture in the cloud. *27th Signal Process Commun Appl Conf SIU 2019 2019*. <https://doi.org/10.1109/SIU.2019.8806433>.
- [12] HANAYLI M. GİT: Versiyon Kontrol Sistemi 2022.
- [13] Smart J. Jenkins: The Definitive Guide: Continuous Integration for the Masses 2011.
- [14] Rensin DK. Kubernetes 2015.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

A Yolov3-Based Garbage Detection Systems

Dilara KARACA^{1*} , Süleyman UZUN² , Sezgin KAÇAR³ 

¹ Department of Biomedical Engineering, Graduate Education Institute, Sakarya University of Applied Sciences, dilarakaraca@subu.edu.tr

² Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Sciences, suleymanuzun@subu.edu.tr

³ Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Sciences, skacar@subu.edu.tr

ABSTRACT

Today, the increase in the number of people and advances in industry and technology cause an increase in the number of wastes generated with the acceleration of production. It is important for the future of our country and the world that these wastes are more easily identified and recycled. In the process of recycling wastes, the classification of wastes as well as their collection require costly energy and manpower. Wastes are basically separated into paper, plastic, glass, and metal. Various studies have been carried out to complete these processes in a shorter and easier way with technologies such as artificial intelligence, deep learning, and image processing. In this study, waste detection was performed using YoloV3, an artificial intelligence network model frequently used in object detection, using a specially created dataset and global datasets. Also, a dataset of paper, plastic, and food and beverage wastes that are common in the environment was created. In this dataset, paper cups, plastic water bottles, and fast food wastes were detected from different locations in nature and photographed. These images were labeled, trained, and tested with YoloV3 deep learning algorithms. In addition, in order to compare the performance of the new dataset, studies were conducted on a global dataset used in the literature. As a result of the studies, it was observed that it was successful in classifying the newly created dataset and the global dataset.

Keywords: YoloV3, Garbage detection, Garbage dataset.

1. Introduction

Since the beginning of nature, various wastes have developed while living things on earth continue to carry out their essential functions. The development of robots, the creation of intelligent machines, and advancements in engineering all contribute to making life easier for people as time goes on and

* Corresponding Author's email: dilarakaraca@subu.edu.tr

technology advances. As in all facets of life, these developments have begun to be applied to the identification, collection, and recycling of waste. Waste is currently gathered and dumped in landfills. In these areas, a variety of reclamation projects are being completed. Examples of reclamation work done in landfills include recycling, incineration, and composting, which is the decomposition of organic wastes by microorganisms when they are reacted with in an oxygenated environment [1]. Some of these areas have waste areas covered and have been planted. Methane gas is now created after waste is gathered and handled in various ways. This gas is used to create electricity. The majority of the electricity requirements in the areas where these facilities are located are satisfied in this way. These storage spaces also provide a solution to the issue of waste collection. Additionally, avoid environmental harm from waste and the issue of unsightliness. People classify waste in these facilities. Workers separate different types of waste, including glass, paper, plastic, batteries, etc. The system suggested in this paper offers a solution for the problem of decomposition [2]. Wastes of all kinds, including toxic wastes, medical wastes, industrial wastes, and others, are created. In our nation, waste workers are responsible for collecting trash. Workers in the waste industry can be categorized as either permanent employees or temporary employees. The technique used for waste collection directly relates to the city's level of development [3]. On Earth, millions of tons of waste are produced every day. According to studies, paper and plastic make up the majority of the waste that is gathered. According to the research done in our nation in 2014, paper and cardboard make up 40.7% of the domestic waste collected from municipalities, and plastics make up 30% [4]. There are nations in the world that use the technique of sorting and getting rid of waste during the collection phase. While this process is currently carried out by humans, it is anticipated that, within the parameters of the study and with technological advancements, robots will be able to perform it. According to technological advancements, mechanization will increase in many areas, including the process of collecting waste [5]. Through artificial intelligence, machines are being taught to perform their tasks more humanely. Both supervised and unsupervised methods are used to accomplish this. The first approach involves teaching by naming various phenomena. The machine predicts a phenomenon based on what it has previously observed. The second approach is to instruct without defining the phenomenon. By grouping related features, learning occurs. Semi-supervised learning is possible by combining the two techniques. In this learning process, the learning process is realized, and 50% of the data is labeled. K-Nearest Neighbor (KNN) and SVM (Support Vector Machine) are two artificial neural network techniques and applications that have been developed. Typically, these techniques fall under the category of machine learning algorithms [6]. Machine learning algorithms make a prediction on the created model [7]. The neural networks in the human brain serve as the foundation for machine learning. A subset of machine learning known as "deep learning" was developed as artificial neural networks were further developed [8]. Convolutional Neural Networks (CNN), which stand for deep learning, have been used in many computer vision applications, including face recognition, text detection, target detection, etc. The process of detection using techniques derived from mathematical models based on human experience is known as machine vision [9]. Deep learning utilizes a layered architecture to process input data and produces more accurate results.

The studies conducted by designing autonomous vehicles and robots for waste sorting and waste sorting using deep learning models in the literature were analyzed. Alawi et al. [10], classified waste using CNN in their study. In their study, they used Alexnet, DenseNet121, and SqueezeNet algorithms from pre-trained networks. In the study, they used the waste classification data dataset made available for open access on the Kaggle website and used a total of 22564 images in two classes: recyclable and organic wastes. They divided 10% of the images as test data, 20% as validation data, and 70% as training data. According to the performance results obtained at the end of the study, the highest classification performance was achieved with the DenseNet121 pre-trained network, with an accuracy of 94.10%. With the other networks used in the study, SqueezeNet and Alexnet achieved 91% and 92% accuracy,

respectively. Ramsurrun et al. [11], used a deep learning model to classify waste images into five classes: plastic, metal, paper, cardboard, and glass. It uses a trained machine-learning algorithm to perform object recognition. In their study, they used the Trashnet dataset, consisting of 2527 images divided into 6 classes. 70% of the dataset was used for training and 30% for testing. The proposed SVM, Sigmoid, and Softmax classifiers are tested with 12 different transfer learning techniques, and the highest result is obtained in the VGG-19+Softmax algorithm with an accuracy of approximately 87.9%. Assis et al. [12], in their study, developed a system that recognizes waste and collects it through an autonomous waste collection vehicle. The robot is connected to a Raspberry Pi device, ultrasonic sensors, and an Arduino UNO. The robot is programmed to stop when an object is detected at a distance of 20 cm or less from the ultrasonic sensor, and when the robot stops, the object detection module activates the robot arm. The object image is detected by a web camera. They used the YoloV3 real-time deep learning algorithm to distinguish the detected object image from other objects. In the study, they used a self-selected dataset divided into 5 classes: bottle, can, food package, paper ball, and plastic ball. The images were manually labeled with LabelImg. As a result of the study, they achieved 93% accuracy.

Koganti et al. [13], in their study, divide waste into biodegradable and non-biodegradable. In the study, images in the outdoor environment are taken with a Raspberry Pi (a SSD-Mobilenet trained model is pre-loaded) and the camera connected to it. Using the MobileNet deep learning algorithm in Raspberry Pi, the detected objects are classified into two different classes: biodegradable and non-biodegradable. The model gives results only for non-biodegradable waste. The test accuracy of the previously trained MobileNet network model was 99%. Zhihong et al. [14], realized a robotic sensing system for waste sorting in their study. The system consists of three main structures: a recognition module for waste detection, a transportation module for waste transportation, and a capture module for waste collection. The two main networks that make up the Fast-RCNN architecture were implemented with Region Proposal Network (RPN) and VGG-16 models, and these models were used for object recognition (bottle) in the study.

Different object detection studies with deep learning algorithms were also conducted, and model results were compared. In addition, different autonomous vehicles were designed, and different data sets were used in these studies. Khanum et al. [15], trained a ResNET convolutional neural network to drive an autonomous vehicle by lane control on a Udacity simulation. The study provided a network model trained to prevent traffic accidents that may occur in situations such as driver inattention by lane control, resulting in high achievements. In the study, the Udacity simulator was used by considering driving situations and target situations such as steering angle throttle, brake and speed. The images stored in the folder are saved as a csv file. The data is decomposed as 80% training and 20% testing. The model result showed that 0.81% of the time the vehicle correctly planned its movement to avoid leaving the lane. Turgut et al. [16], conducted a study for search and rescue activities under the rubble caused by natural disasters. It is very dangerous to work in risky areas as a result of natural disasters. Semantic classification of the ramps and obstacles in the tracks facilitated the robots' operations in these areas. The data obtained with 2b laser gives information about the height at which the ramps are located. In this study, semantic classification of planes such as ramps, floors and walls were performed with PointNET, Dynamic Graph Convolution Network (DGCNN), PointNet++ and PointCNN deep learning models. ESOGU RAMPS dataset was used. 581 data were used for training while 100 were used for testing. High performance was obtained in all CNN models used. The highest performance was obtained in the DGCNN model with 99.9%. Yao et al. [17], proposed a machine vision-based vehicle detection system for smart cities in their study. In the study, it was determined that the traditional YoloV3 algorithm is not a preferred method for fast-moving and small-sized vehicles. For this reason, the model created by adding one more convolution layer to the original YoloV3 layer was used. The study uses 1642 photographs of traffic vehicles taken from the internet. Labeling was done in Pascal VOC format.

The model achieved an accuracy of 91.01% (mAP). Rajesware et al. [18], used transfer learning methods to detect Alzheimer's disease, which is very difficult to identify and diagnose. In this context, they used techniques such as VGG-19, VGG-16, ResNet50, and Xception. The dataset used for the study is ADNI brain MRI images. 80% of the data was used for training and 20% for testing. The highest accuracy was obtained in the VGG-19 model with 98%.

In the literature, there are also studies that use data sets generated by waste but use algorithms other than deep learning models. In the studies, systems proposed for waste sorting, waste collection, and controlling waste levels in waste bins were mentioned.

Ravanan et al. [19], proposed an IoT-based smart waste monitoring system. The system monitors waste bins with ultrasonic sensors and provides information about the amount of waste through a web page. Their proposed system consists of a PIC microcontroller, GSM module and wifi module. When the measured waste level in the waste bins is equal to the width of the waste bins, the data sent to the server alerts the authority via the internet. The system proposed by Amitha et al. [20] determines the level of waste in the waste bin with the help of sensors. It checks whether the waste bin is full or empty. It classifies the waste as dry or wet and sends a message to the user when it detects that the waste bin is full. Authorities have access to the information that the system is full or empty at any time. Thus, the need for unnecessary use of waste collection vehicles is eliminated. Bai et al. [21] designed a deep learning-based robot that automatically collects waste from lawns. GPS measurement module, navigation module, sensing module, map module, and driving module are used in the robot. In the map module, the environment to be cleaned is defined for the robot. The sensing module is used to understand whether the detected object is an object or ground. ResNet-34 is used in the architecture of the network. If the detection module does not work correctly, it will perceive a non-waste object as waste. For this reason, a data set consisting of 5 waste classes and 1 non-waste class was used. It consists of 40,000 training images and 7,000 test images. The robot was tested in a playground. Experimental results show that waste recognition accuracy can reach up to 95%. Yuan et al. [22] designed a robot for cleaning swimming pools. It is important to clean swimming pools that have been in continuous use for a short time. The robot can be controlled by a wired remote control with a wheeled movement feature. It also consists of hydraulic push and movement mechanisms. The control box provides control of the robot, while the power supply provides power for the robot. The monitor displays the working environment in time with the camera of the robot body. The water passing through the filter is sent out by the pump of the robot body.

In the second part of the study, the dataset created specifically for the study and the global dataset used for comparison purposes are analyzed in detail. This section also focuses on the data labeling processes and the complexity matrix. Furthermore, this section provides a detailed review of the Yolo v3 network structure. The third section presents the results of the experimental studies and describes the results in detail. The fourth and final section summarizes the overall conclusions of the study.

2. Material and Method

2.1. Custom Dataset

In this study, two distinct datasets are used to compare deep network model outputs and draw conclusions using performance metrics. The first data set was specifically created for the study, whereas the second data set was created using data that was widely available. Paper cups, plastic bottles, and waste food and beverage packaging make up the majority of the waste images in the dataset created for the study. Three classes make up the data set that has been prepared for the study. Paper cups, plastic bottles, and other trash are separated from it. The data set for other wastes includes bags, cardboard,

food and beverage packaging, etc. 1225 images in total were used. These photos are unique ones that were taken in the study's setting. It consists of 250 waste images, 500 plastic bottle images, and 500 paper cup images. The most frequent items found in the environment, such as food and beverage packaging and fast food packaging, are included in the data set for the other waste class. The images have a resolution of 1200x1599 and are in jpg format. The waste found in places like playgrounds, street sides, and school gardens was photographed to create the images. The dataset created especially for this study will be made public and shared on a global scale.



Figure 1: Examples from the custom dataset

2.2. Global Dataset

The publicly accessible Trashnet dataset was also used to compare the outcomes of the networks used in the study. [23]. There are 2527 images total in this dataset. The 512x384 dataset was captured in natural light and under artificial lighting, and it was printed on a white poster board. Images from six categories of waste—glass, paper, cardboard, plastic, and metal—are included in the dataset. 1000 images from the Trashnet dataset were used to create a more precise comparison with the dataset produced for the purposes of the study. Only images from the global dataset that belonged to the classes of paper, glass, and metal were chosen.

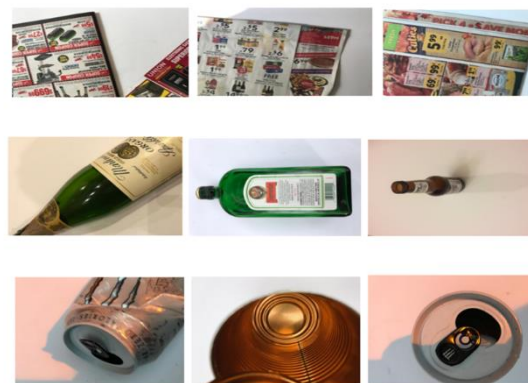


Figure 2: Examples of the global dataset's images

2.3. Labeling The Dataset

Paper cups, plastic bottles, and other waste were the three categories into which the data set that was created for the study was labeled. Glass, paper, and metal were assigned to images from the Trashnet dataset. MakeSense.AI (MSA) was used to manually label the data [24]. 70% of the labeled data was used for training, 20% for testing, and 10% for validation. After the labeling process, the program

generates the dataset for the study as a.txt file. The values of the image are stored in this file as matrices. The data consists of the object's ID, the x and y axes' centers, and its width and height.

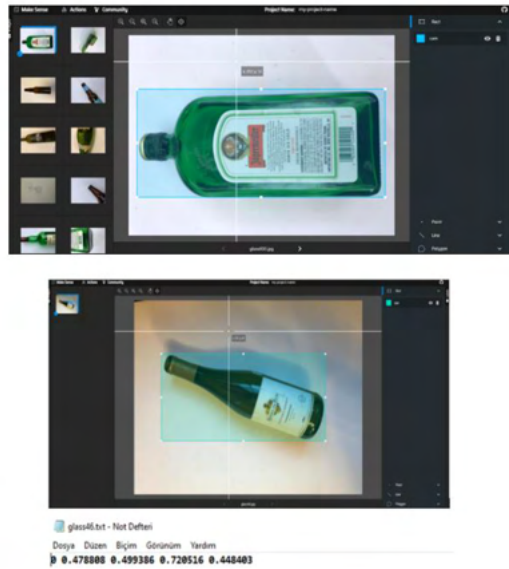


Figure 3: Labeling images with MSA

2.4. Confusion Matrix

In machine learning and deep learning algorithms, where results are obtained through mathematical calculations from a set of outputs, the confusion matrix is a performance metric. The estimated and actual values from the algorithm are combined in four different ways in the matrix. A dataset of 400 images, 200 of which included paper cup images and 200 of which did not, was created. The confusion matrix depicted in Figure 7 was used to calculate the deep learning network's performance after training and testing on this dataset.

		Real Values	
		1	0
estimated values	1	True Positive	False Positive
	0	True Negative	False Negative

Figure 4: Confusion matrix

The matrix represents the following four states:

True Positive (TP): The prediction of the data that includes a picture of a paper cup is referred to as "the one with a paper cup" in this situation.

True Negative (TN): "No paper cup" is another name for the prediction of the data that does not include a picture of a paper cup.

False Positive (FP): "With a picture of a paper cup" is the prediction made for data that does not contain a paper cup.

False Negative (FN): Data with an image of a paper cup is predicted to be "an image without a paper cup."

These numbers are used to calculate various performance metrics in the confusion matrix [25].

$$Sum = TP + TN + FP + FN$$

$$Real\ Positive = TP + FN \tag{1}$$

$$Real\ Negative = TN + FP$$

Accuracy: Refers to how accurate the model is all in all. It is calculated by multiplying all of the matrix's data by the accurate forecasts. In Equation 2, it is specified.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \tag{2}$$

Recall: The percentage of correct values that are classified as correct is known as sensitivity, and it is expressed as a recall metric. It appears in equation three.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{3}$$

Precision: a way to gauge how well and how poorly all outcomes are predicted. In Equation 4, it is specified.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \tag{4}$$

F1- Score: The harmonic mean of the sensitivity and sensitivity of the score is F1. In Equation 5, it is specified.

$$F1 - Score = \frac{2*Precision*Recall}{Precision+Recall} \tag{5}$$

2.5. Artificial Intelligence

With the introduction of the "Turing test" in the 1950s, Alan Turing first laid the groundwork for artificial intelligence, which now encompasses the fields of machine learning and deep learning [26].

The idea of artificial intelligence is based on the artificial working structure of neuron cells in the human brain and is derived from the idea of intelligence. Science has greatly benefited from understanding how the human brain functions in order to train machines [27]. According to a recent report, thinking robots could be created by imbuing machines with emotions as a result of the human brain's similarities to machines [28]. With its historical development, artificial intelligence has become specialized in machine learning and deep learning. By processing large amounts of data collected on a variety of topics in machine learning algorithms, intelligent results can be produced [29]. Deep learning performs training and results with its multi-layered architecture, which is acknowledged to produce more accurate results than machine learning [30].

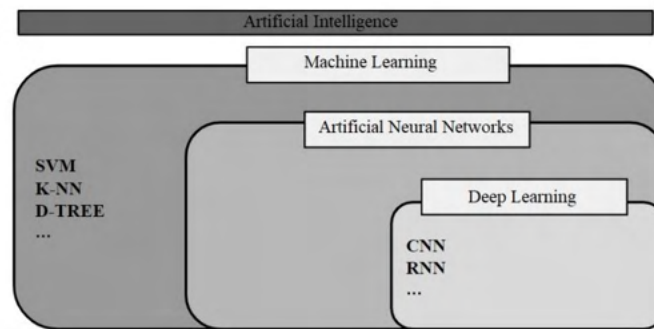


Figure 5: Artificial Intelligence and subclasses

2.6. Yolo version 3

Different deep learning algorithms have been developed up to this point. Yolo is one of the most successful and quick algorithms. This is because the algorithm only takes into account the image's bounding boxes as a whole [31]. A real-time object detection algorithm called YoloV3 was created by Redmon et al. in 2018 [32]. Both the performance and the object detection rate are quite high. YoloV3 was developed using the Yolo and YoloV2 network models [33]. Furthermore, Yolo V3 [34] used Darknet-53 as a backbone network to replace Darknet-19 [35], [36]. Yolo networks perform very well in fast object detection and especially in real-time object detection [37]. The YOLOv3 network was chosen because it uses Darknet-53, which is a better backbone than YoloV2, and uses a single-stage CNN network and a feature extraction network [38], [39].

The COCO dataset is utilized by the initial YoloV3 architecture. TensorFlow and the DARKNET libraries' networks were used to train this dataset. The 200,000 images in the COCO dataset, which includes 80 different objects, were prepared for detection, tracking, and classification. An open source dataset is COCO [40]. The object is divided into regions by the algorithm. Bounding boxes, which are drawn around the object in a region, are created. In order to determine the likelihood of discovering the object, calculations are performed on the marked boxes. For each object, the marked boxes determine a confidence score. The percentage of time that the algorithm is confident that the data is present in the grid is represented by the confidence score [41]. An image is provided to the algorithm as input data. The image is set to be 32 pixels wide and has multiples. The Darknet-53 CNN model is utilized by the YoloV3 algorithm as a feature extractor. Consequently, an additional 53 layers are added to the object detection algorithm [42]. The Yolo layer makes use of the features that were extracted from the convolution layer (darknet-53). By using pre-trained weights for object detection, the network in the

Darknet 53 layer is taught how to extract features. There are a total of 106 convolutional layers in the YoloV3 architecture. As seen in Figure 5, YoloV3 employs feature pyramid networks (FPN) to find objects at three different scales. The input image is divided into 52×52 boxes at scale 3, 26×26 boxes at scale 2, and 13×13 boxes at scale 1. This results in the detection of the smallest objects at scale 3 and the medium-sized objects at scale 2. The algorithm executes the output process by executing specific steps on each of these three scales. The overlap between the estimated bounding box value (Intersection over Union, IoU) and the actual area value of the object is used to calculate the confidence score. The same object is enclosed several times in the marked boxes if more than one output vector detects it. Application of the Non-Maximal Suppression (NMS) algorithm The calculated threshold value is used to delete checked boxes that fall below it.

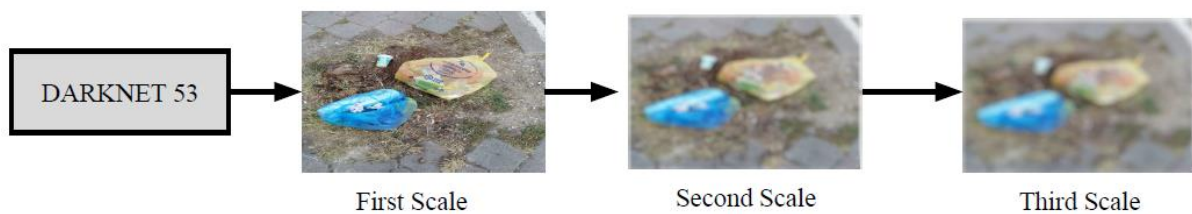


Figure 6: Output of the YoloV3 network

3. Experimental Results

3.1. YoloV3 Training Phase

To train the YoloV3 network, files called "obj.name," "obj.data," "generatetrain.py," and "generatevalidation.py" are created. The names of the classes used in training are listed in the "Obj.names" file in the labeling order. The number of classes, the training and validation file paths, the path to the file containing the class names (obj.names), and the path to the folder where the weights produced as a result of the training will be saved are all contained in the "object.data" file. The training data set access codes for DarkNet are written in a file called "Generate_train.py." The code for DarkNet to access the validation file is contained in the file "Generate_validation.py." The preparation of the file with a ".cfg" extension is the final step in the algorithm's preparation. By reading this file, the algorithm creates the network. The batch parameter is the parameter that specifies the number of images processed at the same time. It is set to 1 to increase the training speed. The "batch" parameter divides the data set into portions for training. We train using these chunks. The batch parameter specifies the part size and is assumed to be 1 during the test phase. The max batch value is used to prevent overfitting by controlling the number of batches during the training phase. The value of Max_batches is determined. It conveys the parameter size's maximum value. "class_number * 2000" is the formula used to calculate this value. In single-class algorithms, it is interpreted as 4000. Calculating "Steps = 4800, 5400" involves subtracting 80% and 90%, respectively, of the value of max_batches. "(Number of classes + 5) * 3" is the formula for the filter parameter. The final three convolution layers at the bottom have their filter values changed. The DarkNet weights to be used as a feature extractor are first downloaded to begin training in the Colab environment, which enables us to run Python codes directly through the browser used in studies such as machine learning and data analysis. This comes after the file preparations are complete. The Open Source Computer Vision Library (OPENCV) is configured for the Graphics

Processing Unit (GPU). By connecting to the Drive environment, images and labeling files that have been prepared for training and validation are moved to the data folder in DarkNet. "obj.names, obj.data," generate train and validation files, and the ".cfg" file created at the start of the training are transferred to DarkNet.

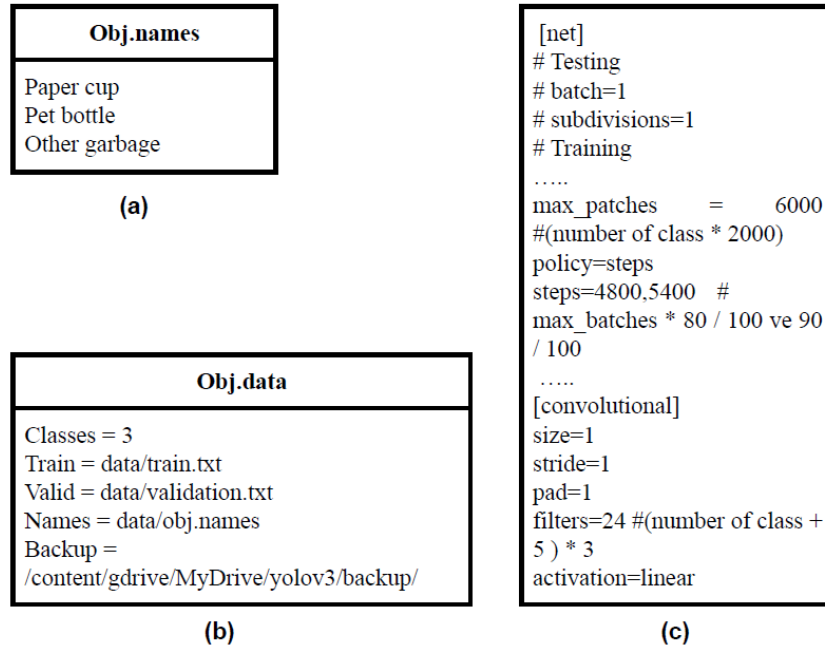


Figure 7: Example of project files. (a) Obj.names file. (b) Obj.data file. (c) cfg file.

3.2. Training Results

The Mean Average Precision (mAP) values obtained from the original dataset created for this study using the YoloV3 algorithm using 3 different classes, including paper cups, pet bottles, and other wastes, are provided in Table 1.

Table 1: Performance results of the classes as a result of training from custom dataset.

	mAP	TP	FP
Paper Cup	100.00%	201	3
Pet bottle	98.34%	203	2
Other trash	76.91%	96	38

The most precise prediction value for each class in the specially created data set was 203 for the pet bottle class, according to Table 1. When the results from images with and without objects are compared, it can be seen that the other waste class has the highest error value. 38 is this value. The paper cup class received the best performance value of 100% out of the three classes' AP scores. The F1 Score, Recall, and Precision values of the network after training all classes with the Yolov3 algorithm are shown in Table 2.

Table 2: Overall performance result obtained as a result of training from custom dataset.

	Recall	Precision	F1-Score
Custom Data Set	0,94	0,92	0,93

In the study, 500 data points were correctly predicted. 43 data points were found to be present even though they were not objects. In 31 image data points, although there was a labeled object, it was found to be absent. In the testing process of the YOLOV3 network model trained with the dataset prepared for the study, 175 test data sets are used, different from the data used for training and validation. The results obtained from these data are given in Table 3.

Table 3: Performance results of the classes as a result of test from custom dataset.

	F1-Score	Precision	Recall
Paper Cup	0,9902	0,9712	1,0000
Pet bottle	0,9804	0,9712	0,9902
Other trash	0,3902	0,2682	0,7164

The highest accomplishments belong to the paper cup class, per Table 3's results. The pet bottle class had an accuracy value of 0.98, the paper cup class had an accuracy value of 0.99, and the other waste class had an accuracy value of 0.39. The high values obtained in the test results are a result of the patterns on the paper cups being similar to the data in the paper cup dataset. Table 4 provides the test performance results for the entire YOLOV3 network.

Table 4: Overall performance result obtained as a result of test from custom dataset.

	F1-Score	Precision	Recall
Custom Data Set	88.111	73.682	90.220

In the study, the network's mAP value of 86.45 was calculated from test results using various images from 175 training and custom datasets. There are tables of the results obtained using the deep learning network models and the custom dataset. Below are some images that were validated using the YOLOV3 algorithm using a custom dataset. Figure 8 displays the results of testing the YOLOV3 network model that had been trained on a single image.

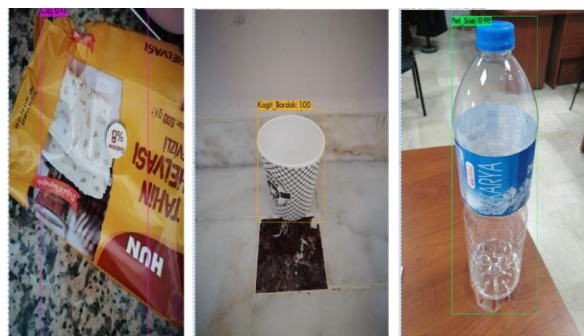


Figure 8: Images from test results produced with a custom dataset.

According to these values, the highest value belongs to the images belonging to the paper cup class and then to the pet bottle class. The high performance in the paper cup class is due to the similar external designs of the paper cup objects in the images. The high number of similar images resulted in high

performance when the network was tested with new data that was similar to the images in the trained dataset. The lowest value belongs to the food packaging belonging to the other waste category. This is due to the fact that the other waste dataset consists of multiple different types of data with low similarity. The fact that this data set category does not belong to a single standard in terms of similarity means that training with very different data and testing with very different data again reduces the network performance by one level. According to the training results, it is seen that higher achievements are obtained when the real area overlaps with the predicted area. The higher achievements obtained from the paper cup class are due to the fact that the objects in the training and test images are similar; the difference is due to the object shape, color, and pattern, and these options contain less different formatting compared to other datasets. The data for the YOLOv3 architecture training and testing process with the global data set are given in the tables below. Performance values of 700 data points used in training are given in Table 5.

Table 5: Performance results of the classes as a result of training from global dataset.

	mAP	TP	FP
Glass	%95.11	42	9
Metal	%95.83	35	3
Paper	%96.13	33	0

When the training data set was used, the best performance was obtained from the paper data set when the correct prediction for each class was proportional to the number of data sets. None of the images without the paper dataset were identified as having paper. The highest AP value was obtained from the paper dataset.

Table 6: Overall performance result obtained as a result of training from global dataset.

	Recall	Precision	F1-Score
Global Data Set	0.90	0.90	0.90

Table 6 shows the training network performance metrics of the YOLOv3 algorithm. Precision, recall, and F1-score values were obtained as 0.90. In the results of the study, 122 correct predictions were made. For 12 images with the labeled object, the prediction was made as no object.

Table 7: Performance results of the classes as a result of test from global dataset.

	F1-Score	Precision	Recall
Glass	0.8636	0,7600	1,0000
Metal	0.8510	0,7407	1,0000
Paper	0,9050	0,9048	0,9048

The highest success rate of the test result of the global dataset is obtained from the glass class. The mAP value of the glass class was obtained as 1.0000. The results of the test dataset, consisting of images different from the images in the training and validation datasets, are given in the tables below.

Table 8: Overall performance result obtained as a result of test from global dataset.

	F1-Score	Precision	Recall
Global Data Set	87.722	80.183	96.825

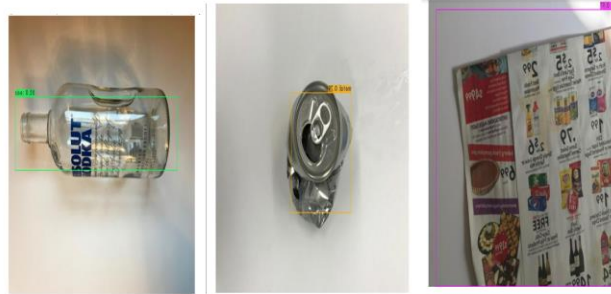


Figure 9: Test result images obtained using global dataset.

As a result of the test study with the global dataset, the individual results of the prediction of the sample images of the metal, paper, and glass classes that are not included in the dataset are given in Figure 9. The sample image belonging to the glass class was predicted correctly at a rate of 0.50. The sample image belonging to the metal class was predicted correctly with a prediction rate of 0.79, and the paper class was predicted correctly with a prediction rate of 0.95. The highest prediction success was obtained in the paper class.

Table 9: A comparison table of the results obtained in the study with the literature.

Authors	Year	Network Model	Data set	mAP(%)
Carolis et al. [43]	2020	YoloV3	Trashnet	59.57
Lin et al. [44]	2022	Yolo-Green	Trashnet	78.04
Mao et al. [45]	2022	YoloV3	Trashnet	81.36
Zhang et al. [46]	2022	Yolo-Waste	Trashnet	93.12
Proposed Method	2023	YoloV3	Trashnet	96.67
Proposed Method	2023	YoloV3	Custom	86.45

The comparison of the obtained results with the literature is shown in Table 9. When the table is analyzed, it is seen that Yolo-based deep learning networks have achieved quite high performance compared to the studies on the Trashnet dataset.

4. Conclusion

In this study, a system that classifies the wastes that are found in settlements has been developed. In the developed system, an algorithm that includes transfer learning techniques from deep learning network models and the CNN algorithm is proposed. The networks used in the study were trained and tested

using two types of data sets. The first data set used is a data set consisting of glass, plastic, and paper waste prepared for the study. The other dataset used is the globally published Trashnet dataset. It consists of six classes: glass, paper, cardboard, plastic, metal, and waste. Considering the performance results, the results obtained with the dataset prepared for the study are generally higher than the performance metrics obtained from the Trashnet dataset. The reason is that the integrity of the images in the dataset prepared for the study is higher. In this sense, the dataset prepared for the study has a privileged aspect in the category of images that increases its performance.

5. Declarations

5.1. Study Limitations

The findings of the study show that nowadays it is of great importance to automatically detect, collect, and recycle waste. With the development of artificial intelligence, this is now possible. However, a data set is needed to train the AI. Considering that the waste data set is quite small today, it is thought that the waste data set created in this study will contribute significantly to the field.

5.2. Acknowledgements

There are no acknowledgements available.

5.3. Funding source

There is no funding source available.

5.4. Competing Interests

There is no conflict of interest in this study.

5.5. Authors' Contributions

Define the contribution of each researcher named in the paper to the paper.

Corresponding Author Dilara KARACA: Developing ideas or hypotheses for the research and/or article, planning the materials and methods to reach the results, taking responsibility for the experiments, organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research.

2. Author's Süleyman UZUN: Developing ideas or hypotheses for the research and/or article, Contribution to the article. Organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part, reworking not only in terms of spelling and grammar but also intellectual content or other contributions.

3. Author's Sezgin KAÇAR: Contribution to the article. Organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part, reworking not only in terms of spelling and grammar but also intellectual content or other contributions.

6. Human and Animal Related Study

The work does not involve the use of human/animal subjects.

6.1. Ethical Approval

No ethical approval is required for this project.

6.2. Informed Consent

All authors consent to the publication of the study.

References

- [1] A. Sağlık, Y. Selim Domaç, Ş. N. Reyhan, F. Avcı, F. Kartal, and D. Şenkuş, "Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi Academia Journal of Nature and Human Sciences Katı Atık Depolama Alanlarının Islahı ve Analizi Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Örneği," vol. 7, no. 1, pp. 105–125.
- [2] R. Erdoğan and G. Uzun, "Katı Atık Depolama Alanlarının Bitkisel Islahına Bir Örnek: Adana-Sofulu Çöp Depolama Alanı," *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Derg.*, vol. 20, no. 1, pp. 71–82, 2007.
- [3] N. Özgen, "Kent ve çöp," *TBB Mesleki Sağlık ve Güvenlik Derg.*, vol. 7, no. 8, pp. 10–12, 2006.
- [4] T. Ç. M. Odası, "Dünya çevre günü Türkiye raporu," TMMOB Çevre Mühendisleri Odası. [Online]. Available: http://www.cmo.org.tr/resimler/ekler/0d4a5b926c005a6_ek.pdf, Erişim Tarihi: 12.10.2021
- [5] P. P. Rao, S. P. Rao, and R. Ranjan, "Deep Learning Based Smart Garbage Monitoring System," *MPCIT 2020 - Proc. IEEE 3rd Int. Conf. "Multimedia Process. Commun. Inf. Technol.*, pp. 77–81, Dec. 2020, doi: 10.1109/MPCIT51588.2020.9350390.
- [6] A. Datumaya Wahyudi Sumari, R. Andrie Asmara, D. Rossiawan Hendra Putra, and I. Noer Syamsiana, "Prediction Using Knowledge Growing System: A Cognitive Artificial Intelligence Approach," *Proc. - IEIT 2021 1st Int. Conf. Electr. Inf. Technol.*, pp. 15–20, Sep. 2021, doi: 10.1109/IEIT53149.2021.9587367.
- [7] E. Saygin et al., "Karaciğer Yetmezliği Teşhisinde Özellik Seçimi Kullanarak Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Başarılarının Ölçülmesi," *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Derg. Araştırma Makal.*, vol. 33, no. 2, pp. 367–377, 2021, doi: 10.35234/fumbd.832264.
- [8] F. Doğan and İ. Türkoğlu, "Derin Öğrenme Modelleri ve Uygulama Alanlarına İlişkin Bir Derleme," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 10, no. 2, pp. 409–445, 2019, doi: 10.24012/dumf.411130.
- [9] G. Liu, "Surface Defect Detection Methods Based on Deep Learning: A Brief Review," *Proc. - 2020 2nd Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Appl. ITCA 2020*, pp. 200–203, Dec. 2020, doi: 10.1109/ITCA52113.2020.00049.
- [10] A. E. Ba Alawi, A. Y. A. Saeed, F. Almashhor, R. Al-Shathely, and A. N. Hassan, "Solid Waste Classification Using Deep Learning Techniques," *2021 Int. Congr. Adv. Technol. Eng. ICOTEN 2021*, Jul. 2021, doi: 10.1109/ICOTEN52080.2021.9493430.
- [11] N. Ramsurrin, G. Suddul, ... S. A.-... zooming innovation in, and undefined 2021, "Recyclable waste classification using computer vision and deep learning," *ieeexplore.ieee.orgN Ramsurrin, G Suddul, S Armoogum, R Foogooa2021 zooming Innov. Consum. Technol. Conf. (ZINC), 2021•ieeexplore.ieee.org*, pp. 11–15, May 2021, doi: 10.1109/ZINC52049.2021.9499291.
- [12] A. Assis, A. R. Biju, N. A. Alisha, A. Dhanadas, and N. Kurian, "Garbage Collecting Robot Using YOLOv3 Deep Learning Model," *10th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. ICACC 2021*, 2021, doi: 10.1109/ICACC-202152719.2021.9708298.
- [13] S. K. Koganti, G. Purnima, P. Bhavana, Y. V. Raghava, and R. Resmi, "Deep Learning based Automated Waste Segregation System based on degradability," *Proc. 2nd Int. Conf. Electron. Sustain. Commun. Syst. ICESC 2021*,

- pp. 1953–1956, Aug. 2021, doi: 10.1109/ICESC51422.2021.9532837.
- [14] C. Zhihong, Z. Hebin, W. Yanbo, L. Binyan, and L. Yu, “A vision-based robotic grasping system using deep learning for garbage sorting,” in *Chinese Control Conference, CCC*, 2017, pp. 11223–11226. doi: 10.23919/ChiCC.2017.8029147.
- [15] A. Khanum, C. Y. Lee, and C. S. Yang, “End-to-end deep learning model for steering angle control of autonomous vehicles,” *Proc. - 2020 Int. Symp. Comput. Consum. Control. IS3C 2020*, pp. 189–192, Nov. 2020, doi: 10.1109/IS3C50286.2020.00056.
- [16] K. Turgut and B. Kaleci, “Comparison of Deep Learning Techniques for Semantic Classification of Ramps in Search and Rescue Arenas,” *Proc. - 2020 Innov. Intell. Syst. Appl. Conf. ASYU 2020*, Oct. 2020, doi: 10.1109/ASYU50717.2020.9259851.
- [17] X. Yao et al., “Traffic vehicle detection algorithm based on YOLOv3,” *Proc. - 2021 Int. Conf. Intell. Transp. Big Data Smart City, ICITBS 2021*, pp. 47–50, Mar. 2021, doi: 10.1109/ICITBS53129.2021.00020.
- [18] S. S. Rajeswari and M. Nair, “A Transfer Learning Approach for Predicting Alzheimer’s Disease,” *2021 Int. Conf. Nascent Technol. Eng. ICNET 2021 - Proc.*, Jan. 2021, doi: 10.1109/ICNTE51185.2021.9487746.
- [19] V. Ramanan, R. Subasri, M. G. Vimal Kumar, K. T. Dhivya, P. S. Kumar, and K. Roobini, “Next Generation Smart Garbage Level Indication and Monitoring System using IoT,” *Proc. - 1st Int. Conf. Smart Technol. Commun. Robot. STCR 2021*, Oct. 2021, doi: 10.1109/STCR51658.2021.9588961.
- [20] S. Amitha et al., “Segregated waste collector with robotic vacuum cleaner using internet of things,” *Proc. - 2020 IEEE Int. Symp. Sustain. Energy, Signal Process. Cyber Secur. iSSSC 2020*, Dec. 2020, doi: 10.1109/ISSSC50941.2020.9358839.
- [21] J. Bai, S. Lian, Z. Liu, K. Wang, and D. Liu, “Deep Learning Based Robot for Automatically Picking Up Garbage on the Grass,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 64, no. 3, pp. 382–389, Aug. 2018, doi: 10.1109/TCE.2018.2859629.
- [22] F. C. Yuan, H. L. Sun, S. J. Hu, and L. Z. Wang, “Design of cleaning robot for swimming pools,” *2011 Int. Conf. Manag. Sci. Ind. Eng. MSIE 2011*, pp. 1175–1178, 2011, doi: 10.1109/MSIE.2011.5707629.
- [23] G. Thung, “Trashnet Dataset.” [Online]. Available: <https://github.com/garythung/trashnet/blob/master/data/dataset-resized.zip>, Erişim Tarihi: 10.08.2021
- [24] M. Hewitt, “Make Sense,” *Victorian Studies*. [Online]. Available: <https://www.makesense.ai/>, Erişim Tarihi: 10.08.2021
- [25] A. Luque, A. Carrasco, A. Martín, and A. de las Heras, “The impact of class imbalance in classification performance metrics based on the binary confusion matrix,” *Pattern Recognit.*, vol. 91, pp. 216–231, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.PATCOG.2019.02.023.
- [26] J. McCarthy, “What Is Artificial Intelligence?,” in *What Is Artificial Intelligence?*, philpapers.org, 2004.
- [27] J. H. Fetzer, “What is Artificial Intelligence?,” pp. 3–27, 1990, doi: 10.1007/978-94-009-1900-6_1.
- [28] K. Arslan, “Eğitimde Yapay Zekâ ve Uygulamaları,” *Batu Anadolu Eğitim Bilim. Derg.*, vol. 11, no. 1, pp. 71–80, 2020.
- [29] J. G. Carbonell, R. S. Michalski, and T. M. Mitchell, “An Overview of Machine Learning,” *Mach. Learn.*, pp. 3–23, 1983, doi: 10.1007/978-3-662-12405-5_1.
- [30] E. S. Brunette, R. C. Flemmer, and C. L. Flemmer, “A review of artificial intelligence,” *ICARA 2009 - Proc. 4th Int. Conf. Auton. Robot. Agents*, pp. 385–392, 2009, doi: 10.1109/ICARA.2000.4804025.
- [31] T. Dergisi, A. Altay, S. Yilmaz, K. Tarihi, A. Kelimeler, and Y. Algoritmas, “YOLO Algoritması Kullanılarak T Hücrelerinin Sınıflandırılması Classification Of T Cells Using YOLO Algorithm Abstract,” vol. 3, no. 2, pp. 66–81, 2023.
- [32] J. Redmon and A. Farhadi, “YOLOv3: An Incremental Improvement,” *arxiv.org*, Apr. 2018, Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1804.02767>
- [33] A. Aktaş, B. Doğan, and Ö. Demir, “Tactile paving surface detection with deep learning methods,” *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 35, no. 3, pp. 1685–1700, 2020, doi: 10.17341/gazimmfd.652101.
- [34] J. Redmon and A. Farhadi, “YOLO9000: better, faster, stronger,” in *IEEE conference on computer vision 2017, Undefined*, 2017, pp. 7263–7271.
- [35] S. K. Tai, C. Dewi, R. C. Chen, Y. T. Liu, X. Jiang, and H. Yu, “Deep Learning for Traffic Sign Recognition Based

- on Spatial Pyramid Pooling with Scale Analysis,” *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10, Page 6997, vol. 10, no. 19, p. 6997, Oct. 2020, doi: 10.3390/APPI10196997.
- [36] C. Dewi, R. C. Chen, and S. K. Tai, “Evaluation of Robust Spatial Pyramid Pooling Based on Convolutional Neural Network for Traffic Sign Recognition System,” *Electron.* 2020, Vol. 9, Page 889, vol. 9, no. 6, p. 889, May 2020, doi: 10.3390/ELECTRONICS9060889.
- [37] C. Dewi, R.-C. C. Chen, X. Jiang, and H. Yu, “Deep convolutional neural network for enhancing traffic sign recognition developed on Yolo V4,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 81, no. 26, pp. 37821–37845, Nov. 2022, doi: 10.1007/s11042-022-12962-5.
- [38] H. Hussein, Y. Zhu, R. F. Hassan, S. Teng, Z. Liu, and X. Li, “Improved YOLOv3-Based Bridge Surface Defect Detection by Combining High- and Low-Resolution Feature Images,” *Build.* 2022, Vol. 12, Page 1225, vol. 12, no. 8, p. 1225, Aug. 2022, doi: 10.3390/BUILDINGS12081225.
- [39] S. Teng, Z. Liu, G. Chen, and L. Cheng, “Concrete Crack Detection Based on Well-Known Feature Extractor Model and the YOLO_v2 Network,” *Appl. Sci.* 2021, Vol. 11, Page 813, vol. 11, no. 2, p. 813, Jan. 2021, doi: 10.3390/APPI11020813.
- [40] E. Ulutaş, H. Cengiz, and M. C. Yazicioğlu, “Derin öğrenme temelli nesne tespiti algoritmaları kullanılarak kişiye özgü reklam sunulması,” vol. 24, no. 1, pp. 10–28, 2022, doi: 10.25092/baunfbed.878224.
- [41] T. Shi, Y. Niu, M. Liu, Y. Yang, C. Wang, and Y. Huang, “Underwater dense targets detection and classification based on YOLOv3,” *IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2019*, pp. 2595–2600, Dec. 2019, doi: 10.1109/ROBIO49542.2019.8961615.
- [42] A. Karacı, “Detection and classification of shoulder implants from X-ray images: YOLO and pre-trained convolution neural network based approach,” *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 37, pp. 283–294, 2022, doi: 10.17341/gazimmfd.888202.
- [43] B. De Carolis, F. Ladogana, and N. Macchiarulo, “YOLO TrashNet: Garbage Detection in Video Streams,” in *2020 IEEE Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)*, IEEE, May 2020, pp. 1–7. doi: 10.1109/EAIS48028.2020.9122693.
- [44] W. Lin, “YOLO-Green: A Real-Time Classification and Object Detection Model Optimized for Waste Management,” in *2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, IEEE, Dec. 2021, pp. 51–57. doi: 10.1109/BigData52589.2021.9671821.
- [45] W.-L. Mao, W.-C. Chen, H. I. K. Fathurrahman, and Y.-H. Lin, “Deep learning networks for real-time regional domestic waste detection,” *J. Clean. Prod.*, vol. 344, p. 131096, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131096.
- [46] Q. Zhang *et al.*, “A multi-label waste detection model based on transfer learning,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 181, p. 106235, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2022.106235.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Advancements in Active Dynamic Orthoses: A Comprehensive Review of Hand Muscle Rehabilitation Strategies

Hamid ASADI DERESHGI^{1*} , Dilan DEMIR² , Sedanur YILMAZ¹, Aya ABDERRAHMANE¹,
Belkis ABDERRAHMANE¹

¹Department of Biomedical Engineering, Istanbul Arel University, 34537 Istanbul, Turkey

²Artificial Intelligence Studies, Application and Research Center (ArelMED-I), Istanbul Arel University, 34537 Istanbul, Turkey

ABSTRACT

In the field of rehabilitation, nuanced interventions are imperative due to the intricate anatomical complexity and versatile functionality of the human hand. From fractures and tendon injuries to neurological disorders and congenital anomalies, hand orthoses, both static and active, serve as crucial adjuncts to conventional therapeutic approaches. Active hand orthoses play a pivotal role in coordinating rehabilitation efforts, offering tailored support, dynamic control, and therapeutic facilitation. This review paper explored the scientific landscape surrounding active hand orthoses, consolidating evidence-based insights into their design, functionality, and clinical applications. The paper offered an in-depth examination of various studies, showcasing pioneering designs like hinged gloves, electro-hydraulic orthoses, and those integrating virtual reality exercises. The biomechanical principles underlying the effectiveness of active hand orthoses were emphasized, highlighting their role in optimizing outcomes across different rehabilitation scenarios. The review also covered advancements in electroencephalography (EEG)-controlled orthoses and myoelectric technology, illustrating the diverse applications for hand rehabilitation. By synthesizing current knowledge, this review established a foundation for further research and advancements in the ever-evolving field of active hand orthoses.

Keywords: Active hand orthoses, wearable assistive technology, hand dysfunction rehabilitation, biomechanical interventions

1 Introduction

In the realm of medical rehabilitation, the therapeutic exercise of fingers and wrists serves as a pivotal component in restoring optimal musculoskeletal function [1-2]. The rationale behind this lies in the principles of neuromuscular adaptation, tissue remodeling, and functional restoration [3-4]. An injury or pathology afflicting the fingers or wrists often results in a cascade of detrimental effects, such as muscle atrophy, joint stiffness, and diminished neuromuscular control. The targeted exercises aim to counteract these deleterious consequences through several mechanisms [5]. Firstly, the implementation of controlled, progressive resistance exercises facilitates the activation of motor units within the affected muscles. This

* Corresponding Author's email: hamidasadi@arel.edu.tr

engagement prompts an adaptive response, fostering muscle hypertrophy and preventing atrophy. Consequently, the restoration of muscle mass contributes to enhanced strength and endurance [6-7]. Moreover, therapeutic exercises are designed to address joint mobility and flexibility. Range of motion exercises mitigate the development of contractures and alleviate joint stiffness, thereby promoting the restoration of functional movement patterns. These interventions are especially crucial in scenarios involving immobilization or prolonged disuse, which can lead to joint restrictions [8-11]. From a neurological perspective, rehabilitation exercises play a pivotal role in neuromuscular re-education. They stimulate proprioceptors and enhance motor control, aiding in the refinement of coordinated movements. This neuroplasticity is instrumental in restoring precision and dexterity to the fingers and wrists [12-13]. Furthermore, therapeutic exercises contribute to the improvement of circulation, fostering an environment conducive to tissue healing. Increased blood flow facilitates the delivery of oxygen and nutrients while promoting the removal of metabolic byproducts, expediting the overall recovery process [14-15]. In essence, the multifaceted approach of therapeutic exercises addresses both muscular and joint components, leveraging physiological adaptations to attain functional restoration. This comprehensive strategy aligns with the overarching goal of promoting the rehabilitation and reinstatement of optimal musculoskeletal function in the context of finger and wrist pathology [16-19]. Active hand orthoses play a pivotal role in the realm of therapeutic and rehabilitation exercises, serving as integral components in the comprehensive management of hand-related pathologies [20]. These orthotic devices are designed with a nuanced understanding of musculoskeletal physiology, aiming to optimize functional outcomes through precise mechanical interventions [21-23]. One primary significance of active hand orthoses lies in their ability to provide targeted support and stabilization to the affected structures [24]. In instances of traumatic injuries, post-surgical interventions, or chronic degenerative conditions affecting the hand, these orthotic devices serve as external aids that strategically immobilize or facilitate controlled movement. This controlled support minimizes undue stress on injured tissues, thereby fostering an environment conducive to healing and preventing maladaptive responses such as contractures or joint stiffness [25-26]. Furthermore, active hand orthoses are instrumental in promoting neuromuscular re-education. Through their carefully engineered design, these devices engage specific muscle groups and encourage coordinated movements. This aspect is particularly pertinent in rehabilitation scenarios where motor control and proprioception may be compromised. The orthoses serve as facilitators in the process of re-establishing optimal neuromuscular pathways, contributing to enhanced functional recovery [27-28]. Moreover, these orthotic interventions are adaptable to a spectrum of therapeutic exercises. Their incorporation into rehabilitation protocols allows for a graduated and progressive approach to recovery. The adjustability of active hand orthoses enables healthcare professionals to tailor the intensity and range of motion of exercises, thereby addressing the evolving needs of the patient's rehabilitation journey [29]. In the context of deformities or contractures, active hand orthoses contribute to the prevention of further structural abnormalities. By providing a corrective influence on joint alignment and soft tissue balance, these devices mitigate the risk of progressive deformity, offering a proactive strategy to preserve or restore optimal hand function [30]. Consequently, active hand orthoses biomechanical precision, adaptability to therapeutic exercises, and role in neuromuscular re-education underscore their paramount importance in fostering optimal functional outcomes for individuals grappling with hand-related pathologies [31-32]. Thus, active hand orthoses have become a focal point for researchers, driving a surge in studies conducted in recent years.

This review paper played a critical role in consolidating past knowledge and advancements in the realm of active hand orthoses, offering a comprehensive overview of their clinical significance and therapeutic implications. By synthesizing existing literature, the paper aimed to elucidate the multifaceted importance of active hand orthoses in the context of therapeutic and rehabilitative interventions. It covered a spectrum of topics ranging from the biomechanical principles underlying these orthotic devices to their applications in diverse pathological conditions affecting the hand. Additionally, the review delineated their role in neuromuscular re-education, their adaptability to therapeutic exercises, and their potential in preventing and correcting deformities. By addressing these facets, this paper provided a valuable resource for engineers, researchers, and allied healthcare professionals, fostering a deeper understanding of the nuanced contributions of active hand orthoses to optimal patient outcomes.

The organization of the paper was presented as follows. In the open literature, studies that highlighted the different dynamic actuator-equipped configurations used in the structure for the exercise control of active hand orthoses were examined in Section 2. The investigation of active hand orthoses, controlled via electroencephalography (EEG) and electromyography (EMG) techniques, was covered in Sections 3 and 4. Finally, the concluding remarks were reviewed in Section 5.

2 Dynamic Actuator Controlled Active Hand Orthoses

Venturing into the realm of progressive rehabilitative technologies, this section delved into the intricate domain characterized by sophisticated mechanisms and responsive actuators. These elements converged to redefine the landscape of interventions, aiming to restore hand functionality in individuals grappling with neuromuscular impairments. The open literature contained an abundance of studies (see Figure 1). For example; Becchi et al. (2017) proposed a hinged glove design and orthosis with a DC motor for the transmission of movement for the rehabilitation of finger joints. In this study, it was emphasized that the plate made of thermoplastic material, despite being securely fastened to the hand, does not restrict the movements of the fingers and wrist [33]. Bos et al. (2018) proposed a novel electro-hydraulic hand orthosis for individuals with Duchenne muscular dystrophy. The orthosis was able to move the four-finger module with a linear actuator. Thanks to the orthosis hydraulic system components produced with polyamide (PA 2200) material, it demonstrated high durability against increased system pressures [34]. Ghassemi et al. (2018) integrated a linear servo motor into the X-Glove, which was presented for use in rehabilitation. The system had been integrated with virtual reality (VR)-based exercises. The observation was made that tactile feedback could assist in sensorimotor learning [35]. Kamper et al. (2019) proposed an orthotic glove model that incorporated a linear actuator, which strengthened the hand, regulated finger movement, and prevented excessive extension of finger joints. The device included an operating system to control finger flexion, sensor systems to detect tension, and control systems [36]. Gelanyi et al. (2019) designed an active orthotic device incorporating shape memory materials capable of replicating the movements of the wrist and fingers, thus facilitating the gripping and releasing functions of the hand. This device was specifically designed for individuals with partial or spastic paralysis of the hand. The device consisted of supporting elements that connected the moving components to each other. The moving components generated an activation signal and moved the supported fingers. In addition, the supporting elements provided reinforcement to the lower part of the arm and allowed free movement of the wrist joint [37].

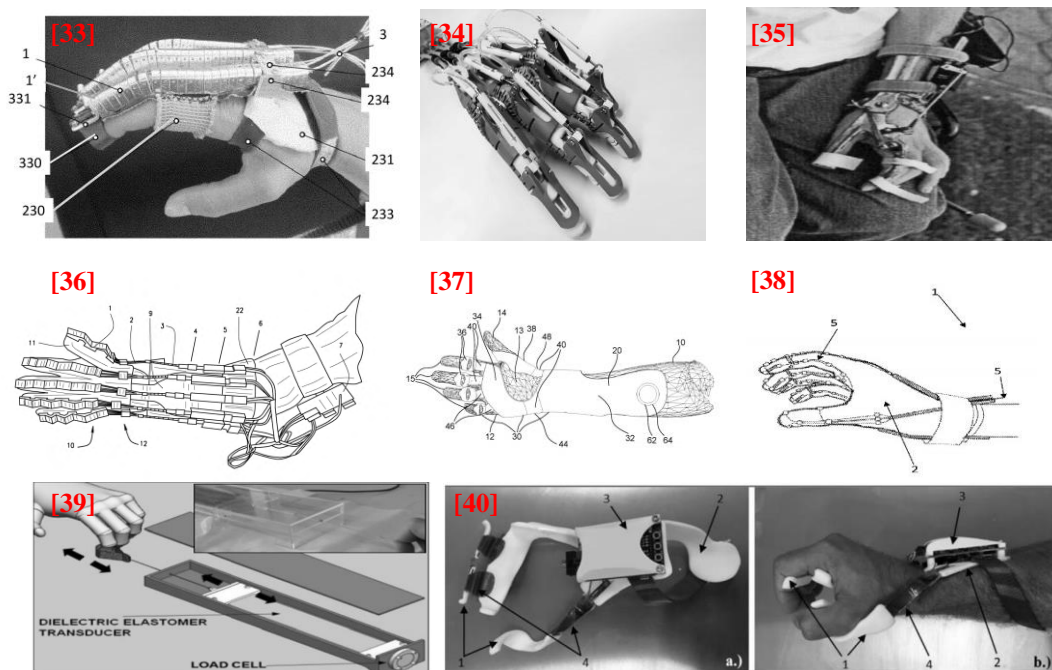


Figure 1: Diverse configurations of some active hand orthoses with dynamic actuators

Abdelhafiz et al. (2020) designed a soft hand orthosis incorporating an exo-tendon system aimed at mimicking the movement of the human hand. In this study, it was emphasized that flexion forces were distributed equally to the distal and proximal phalanges [38]. Toth et al. (2020) developed a cost-effective, personalized, and lightweight active orthosis targeting post-stroke spasticity. The orthosis underwent mechanical characterization using 3D printing and nitinol smart memory alloy. Functionality testing, Likert scale assessments, and movement analysis were conducted on six post-stroke patients, revealing significantly improved functionality and positive overall impressions. This smart and lightweight orthosis proved to be an effective solution for home-based rehabilitation in managing post-stroke spasticity [39]. Muehlbauer et al. (2021) developed a modular orthosis for paralyzed hands, aiming to support finger range of motion and force. Twisted string actuation (TSA) and an antagonistic drive unit were utilized, demonstrating quiet and lightweight force generation without additional gears. The orthotic structure, made of adaptable thermoplastic material, housed the TSA and motors, enabling flexion and extension of paralyzed fingers. The prototype, validated on spastically paralyzed fingers, utilized a constant speed mechanism controlled by user input and demonstrated promising functionality for future applications with paralyzed subjects [40].

3 EEG Controlled Active Hand Orthoses

In the rapidly evolving landscape of active hand orthoses, this section comprehensively examined the integration of EEG-based control paradigms, exploring the pivotal role of neural signals in shaping the next frontier of precision and adaptability in rehabilitative interventions for individuals with impaired hand function. Many scholarly inquiries populated the open literature (see Figure 2). Consider, for example; Pfurtscheller et al. (2000) developed an electrically powered hand orthosis to regain grasping movement of the hand. A Computer Control interface was designed with a 60-channel EEG system. It was emphasized that in the experiment conducted on a tetraplegic patient, the hand could be effectively opened and closed by straightening it [41]. Diab et al. (2016) developed an EEG-controlled brain-computer interface. In this study, an Artificial Neural Network model was utilized by incorporating a linear actuator into a commercial orthosis to classify the opening and closing movement. In conclusion, it was obtained that the developed system demonstrated good performance on real-time EEG data; however, it was emphasized that the achieved performance was lower than the expected performance [42]. Osayande et al. (2020) developed a hand orthosis using a Brain-Computer Interface to detect signals for finger movement in participants. A force sensor was added to the orthosis with the aim of enhancing hand muscle strength after paralysis. The robotic orthosis demonstrated a detection accuracy of 64.1% for unclenching and 62% for clenching activities, effectively actuating the orthosis digits in response [43]. Kina et al. (2021) investigated a brain-computer interface (BCI) system for hand rehabilitation. The system was comprised of an EEG amplifier, a desktop computer, and a hand orthosis. A healthy subject participated in the experiment, and during hand movement tasks, his EEG signals were recorded. A support-vector machine (SVM)-based classifier was trained using the processed data. Subsequently, the system, equipped with the learned SVM-classifier, was tested using test data.

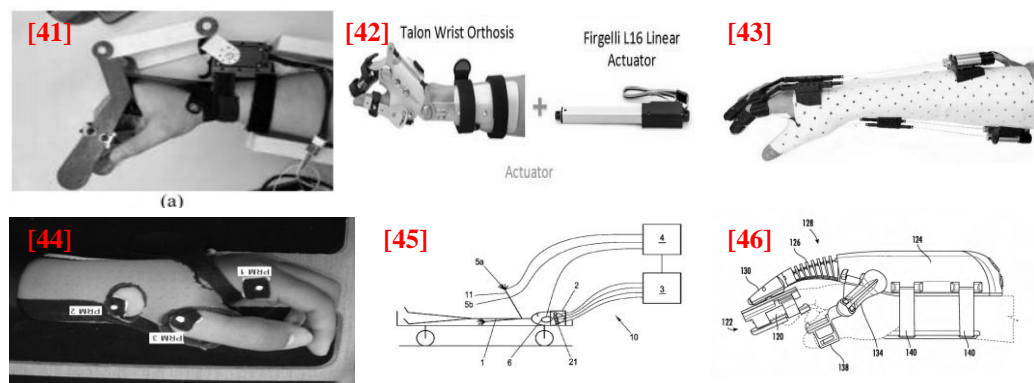


Figure 2: Diverse configurations of some EEG-controlled active hand orthoses

The results confirmed that the classifier had a test accuracy of 73.3%, and the finger movements (extension and flexion) of the experimental subject were executed by the hand orthosis, activated through the subject's intention [44]. Guger et al. (2021) developed a training and simulation system with mental assessment using EEG measurements. The focus of the study was on a mechanical orthosis dedicated to moving a specific body part, encompassing diverse mental activities to facilitate the test activation stimulus [45]. Bhugra et al. (2022) designed a wearable orthotic device incorporating sensors, imaging apparatus, and a computer system for patients with hemiplegic cerebral palsy. The device was used to process signals derived from patients' thoughts using built-in therapeutic equipment and subsequently to move the affected part of the body under the control of BCI [46].

4 EMG controlled active hand orthoses

In the realm of biomechanics-focused advancements within active hand orthoses, this section conducted a detailed exploration of EMG-controlled systems. It delved into the intricacies of EMG signals and their integration into orthotic design, navigating the biomechanical landscape to elucidate the profound impact of EMG-controlled active hand orthoses on enhancing both precision and functionality. This approach provided a nuanced perspective on the biomechanical considerations that shaped rehabilitative interventions for individuals with compromised hand function. The open literature was replete with a multitude of studies (see Figure 3). For example; Ochoa et al. (2011) examined an EMG-controlled orthosis for the purpose of hand rehabilitation. In this study, five subjects with significantly chronic hand disability due to stroke participated, and the initial results demonstrated improvement in performance. It had been determined that the full potential range of the EMG signal increased by an average of 177 mV during hand opening [47]. Loconsole et al. (2013) introduced a pioneering EMG-driven robotic hand exoskeleton designed for bilateral active training of grasp motion in stroke patients. The system enabled precise control of grasping force in the impaired hand, utilizing EMG readings from the unaffected arm to modulate the exoskeleton force. The study detailed the design, integration, and experimental evaluation, demonstrating successful optimal force tracking during the grasp of two cylindrical objects [48]. Bryant (2016) developed a hand orthosis that could assist patients in moving and controlling their fingers using EMG signals. The patent involved a microprocessor-controlled, shape-memory alloy wire designed to restore the functional use of the hand [49].

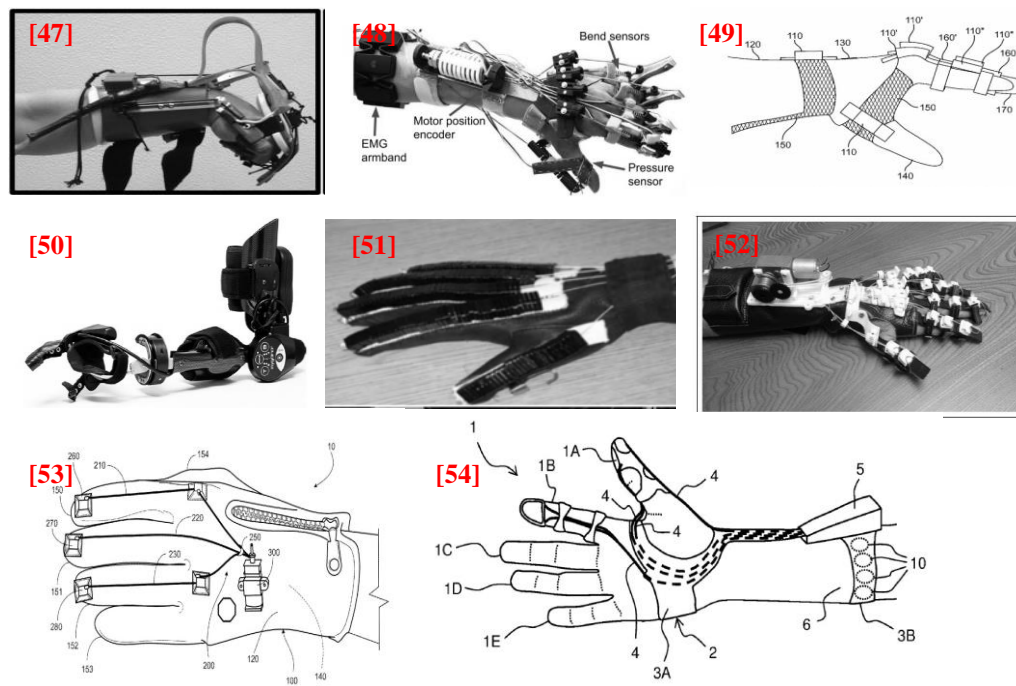


Figure 3: Diverse configurations of some EMG-controlled active hand orthoses

Dunaway et al. (2017) investigated the application of a myoelectric elbow–wrist–hand orthosis (MEWHO) in a chronic stroke survivor. The noninvasive orthosis, driven by EMG signals, provided powered assistance for elbow flexion/extension and grip. Over a series of outpatient sessions, the participant demonstrated increased range of motion, strength, and functional improvements, indicating the potential of custom myoelectric orthoses in neurological rehabilitation [50]. Fardipour et al. (2018) addressed the common post-stroke issue of finger extensor weakness, which was often overlooked in existing powered hand orthoses. They introduced a novel EMG-controlled glove-like orthosis aimed at actively restoring and training hand extension in stroke patients. Testing on two patients showed promising results, with significant improvements observed in functional tests after an 18-session training approach. The prototype demonstrated potential effectiveness in enhancing finger extension tasks and could have served as a valuable rehabilitation tool for individuals with paretic hands [51]. Park et al. (2018) proposed a multimodal sensing and interaction paradigm for an active hand orthosis. During the augmentation of a hand orthosis through multimodal sensing, the exo-tendonal system was augmented with an aluminum forearm splint, alongside the integration of 3D-printed fingertip components dedicated to cable routing. In the study conducted on four subjects, they found that the accuracy of two control methods with arm support was much closer [52]. Ciocarlic et al. (2019) designed a wearable hand orthosis for the purpose of providing support and assistance to individuals with hand impairment or injury. The device consisted of a fundamental component attached to the forearm and an exo-tendonal network attached to the hand. The exo-tendon had a longitudinally extending body that included a distal end and a proximal end. The hand component included support elements for fingers that could be adjusted according to the user's specific hand shape and size. In addition, the device also featured a control mechanism allowing the user to selectively activate or deactivate the finger support elements [53]. Woge et al. (2020) developed a hand orthosis that generates the necessary force for gripping objects. The orthosis had the capability to acquire EMG signals through a bioelectric sensor. Bioelectric sensors were used to estimate the applied force from force sensors [54].

5 Conclusions

In conclusion, that review provided a comprehensive overview of the recent advancements in active hand orthoses, focusing particularly on the utilization of dynamic actuators. The integration of EEG [55-56] and EMG [57-58] signals for the control of those dynamic actuators represented a paradigm shift in the field of biomechanics, offering innovative solutions for enhancing the functionality of active hand orthoses. The investigation of dynamic actuators showcased in that review underscored their pivotal role in enabling more natural and adaptive hand movements. Those actuators, characterized by their responsiveness to neural signals, contributed significantly to the development of sophisticated active hand orthoses capable of mirroring the intricate motions of the human hand. The amalgamation of cutting-edge technology and biomechanical principles paved the way for a new era in assistive devices, where users could experience a more intuitive and personalized interaction with their orthotic devices. Moreover, the incorporation of EEG and EMG signals for real-time control emerged as a transformative approach. By harnessing the power of neural signals, active hand orthoses became not only more responsive but also attuned to the user's intentions. This innovation held great promise for individuals with motor impairments, providing them with a means to regain dexterity and autonomy in their daily activities. As the realms of biomechanics and neuroengineering converged, the strides made in dynamic actuation and neural interfacing for active hand orthoses not only signified a transformative chapter but also illuminated the boundless possibilities awaiting the next wave of innovations in augmentative and rehabilitative technologies. Finally, researchers delving into active hand orthoses are advised to embrace interdisciplinary synergy, fostering innovative solutions through collaborative efforts and a steadfast commitment to user-centric design.

6 Declarations

6.1 Study Limitations

None.

6.2 Acknowledgements

Special thanks to the ArelMED-I members for their motivations, recommendations and feedback.

6.3 Funding Source

None.

6.4 Competing Interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

6.5 Authors' Contributions

Hamid ASADI DERESHGI provided supervision and guidance throughout the review process, ensuring the methodological rigor and integrity of the study. He participated in the conceptualization and design of the review, critically reviewed and revised the manuscript, and provided valuable intellectual contributions. He offered expertise in the field of active hand orthoses and contributed to the final approval of the manuscript.

Dilan DEMIR assisted in the conception and design of the review study, contributed to the selection and screening of relevant literature, and provided critical revisions to the manuscript for important intellectual content. She significantly contributed to synthesizing information from the reviewed papers, ensuring a cohesive narrative.

Sedanur YILMAZ contributed to the critical evaluation and synthesis of the reviewed literature, ensuring the accuracy and integrity of the information presented.

Aya ABDERRAHMANE contributed to the data collection process by identifying and retrieving relevant papers, and contributed to the development of figures included in the manuscript.

Belkis ABDERRAHMANE contributed to the data collection process by identifying and retrieving relevant papers, and contributed to the development of figures included in the manuscript.

References

- [1] Serbest, K., Cilli, M., & Eldogan, O. (2018). A dynamic virtual hand model for estimating joint torques during the wrist and fingers movements. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(6), 1665-1676.
- [2] Serbest, K., Ateş, S., & Stienen, A. H. (2016, November). Design of an exercise glove for hand rehabilitation using spring mechanism. In 2016 20th National Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT) (pp. 1-5). IEEE.
- [3] Mitra, R. (2022). *Principles of Rehabilitation Medicine*. McGraw Hill.
- [4] Kisner, C., Colby, L. A., & Borstad, J. (2017). *Therapeutic exercise: foundations and techniques*. Fa Davis.

- [5] Skirven, T. M., Osterman, A. L., Fedorczyk, J., Amadio, P. C., Felder, S., & Shin, E. K. (2020). *Rehabilitation of the Hand and Upper Extremity, E-Book*. Elsevier Health Sciences.
- [6] Baechle, T. R., & Earle, R. W. (Eds.). (2008). *Essentials of strength training and conditioning*. Human kinetics.
- [7] Graves, J. E., & Franklin, B. A. (2001). *Resistance training for health and rehabilitation*. Human Kinetics.
- [8] Gelsomino, M. J. (2000). Therapeutic Exercise: Moving Toward Function. *Physical Therapy*, 80(1), 97.
- [9] Reese, N. B., & Bandy, W. D. (2016). *Joint range of motion and muscle length testing-E-book*. Elsevier Health Sciences.
- [10] Peck, E., Chomko, G., Gaz, D. V., & Farrell, A. M. (2014). The effects of stretching on performance. *Current sports medicine reports*, 13(3), 179-185.
- [11] James, S. F. M. (2001). Contractures in orthopaedic and neurological conditions: a review of causes and treatment. *Disability and rehabilitation*, 23(13), 549-558.
- [12] Barnes, M. P., & Good, D. C. (Eds.). (2013). *Neurological rehabilitation*. Newnes.
- [13] Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (2007). *Motor control: translating research into clinical practice*. Lippincott Williams & Wilkins.
- [14] Houglum, P. A. (2016). *Therapeutic exercise for musculoskeletal injuries 4th edition*. Human Kinetics.
- [15] Downey, J. A., Myers, S. J., & Gonzalez, E. G. (Eds.). (2013). *The physiological basis of rehabilitation medicine*. Butterworth-Heinemann.
- [16] Portney, L. G., & Watkins, M. P. (2009). *Foundations of clinical research: applications to practice (Vol. 892, pp. 11-15)*. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.
- [17] Clarkson, H. M. (2000). *Musculoskeletal assessment: joint range of motion and manual muscle strength*. Lippincott Williams & Wilkins.
- [18] Wilson, F., Gormley, J., & Hussey, J. (Eds.). (2011). *Exercise therapy in the management of musculoskeletal disorders*. John Wiley & Sons.
- [19] Petty, N. J., & Barnard, K. (Eds.). (2017). *Principles of musculoskeletal treatment and management e-book: a handbook for therapists*. Elsevier Health Sciences.
- [20] Asadi Dereshgi, H., Dal, H., Demir, D., & Türe, N. F. (2021). Orthoses: A Systematic Review. *Journal of Smart Systems Research*, 2(2), 135-149.
- [21] Falkenstein, N., Weiss, S., & Weiss-Lessard, S. (1999). *Hand rehabilitation: a quick reference guide and review*. Mosby.
- [22] Serbest, K., Çilli, M., Yıldız, M. Z., & Eldoğan, O. (2017). İnme rehabilitasyonunda kullanılabilir kablo ve yay tahrikli giyilebilir bir el bileği egzersiz cihazı tasarımı. *Politeknik Dergisi*, 20(4), 953-959.
- [23] Serbest, K., Yıldız, M. Z., Çilli, M., Karayel, D., Tekeoğlu, İ., & Eldoğan, O. (2016, November). Development of a wearable exercise device for rehabilitation of hemiplegic hand. In *2016 20th National Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT)* (pp. 1-6). IEEE.
- [24] Serbest, K. (2017). *El kaslarının rehabilitasyonu için aktif dinamik el-el bileği ortezi tasarımı (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey))*.
- [25] Chui, K. C., Jorge, M., Yen, S. C., & Lusardi, M. M. (2019). *Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation E-Book*. Elsevier Health Sciences.
- [26] Jacobs, M. A., Austin, N. M., & Austin, N. M. (2013). *Orthotic intervention for the hand and upper extremity: splinting principles and process*. Lippincott Williams & Wilkins.

- [27] Lederman, E. (2010). *Neuromuscular rehabilitation in manual and physical therapy*. Edinburgh, UK: Churchill Livingstone.
- [28] Saunders, R., Astifidis, R., Burke, S. L., Higgins, J., & McClinton, M. A. (2015). *Hand and upper extremity rehabilitation: a practical guide*. Elsevier Health Sciences.
- [29] Radomski, M. V., & Latham, C. A. T. (Eds.). (2008). *Occupational therapy for physical dysfunction*. Lippincott Williams & Wilkins.
- [30] Manske, R. C., & Magee, D. J. (2020). *Orthopedic Physical Assessment-E-Book*. Elsevier Health Sciences.
- [31] Du Plessis, T., Djouani, K., & Oosthuizen, C. (2021). A review of active hand exoskeletons for rehabilitation and assistance. *Robotics*, 10(1), 40.
- [32] Ates, S., Mora-Moreno, I., Wessels, M., & Stienen, A. H. (2015, August). Combined active wrist and hand orthosis for home use: Lessons learned. In *2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)* (pp. 398-403). IEEE.
- [33] Becchi, F., Sale, P., Sieklicki, W., & Stellin, G. (2017). U.S. Patent Application No. 15/612,173.
- [34] Bos, R. A., Nizamis, K., Plettenburg, D. H., & Herder, J. L. (2018, August). Design of an electrohydraulic hand orthosis for people with Duchenne muscular dystrophy using commercially available components. In *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (Biorob)* (pp. 305-311). IEEE.
- [35] Ghassemi, M., Ochoa, J. M., Yuan, N., Tsoupikova, D., & Kamper, D. (2018, July). Development of an integrated actuated hand orthosis and virtual reality system for home-based rehabilitation. In *2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 1689-1692). IEEE.
- [36] Kamper, D., Triandafilou, K., & Ochoa, J. (2019). U.S. Patent No. 10,478,370. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [37] Gelanyi, L. (2019). U.S. Patent Application No. 16/480,380.
- [38] Abdelhafiz, M., Struijk, L. N. S. A., Dosen, S., & Spaich, E. G. (2022). U.S. Patent Application No. 17/620,337.
- [39] Toth, L., Schiffer, A., Nyitrai, M., Pentek, A., Told, R., & Maroti, P. (2020). Developing an anti-spastic orthosis for daily home-use of stroke patients using smart memory alloys and 3D printing technologies. *Materials & Design*, 195, 109029.
- [40] Muehlbauer, P., Schimbera, M., Stewart, K., & Pott, P. P. (2021, February). Twisted string actuation for an active modular hand orthosis. In *ACTUATOR; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021* (pp. 1-4). VDE.
- [41] Pfürtscheller, G., Guger, C., Müller, G., Krausz, G., & Neuper, C. (2000). Brain oscillations control hand orthosis in a tetraplegic. *Neuroscience letters*, 292(3), 211-214.
- [42] Diab, M. S., Hussain, Z., & Mahmoud, S. (2016, October). Restoring function in paralyzed limbs using EEG. In *2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)* (pp. 1-4). IEEE.
- [43] Osayande, E., Ayodele, K., & Komolafe, M. (2020). Development of a robotic hand orthosis for stroke patient rehabilitation.
- [44] Kina, S., & Higa, H. (2021, November). Brain-Computer Interface System for Hand Rehabilitation. In *2021 6th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)* (Vol. 6, pp. 47-50). IEEE.
- [45] Guger, C., & Edlinger, G. (2021). U.S. Patent No. 11,207,491. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [46] Bhugra, K., & Leuthardt, E. C. (2022). U.S. Patent Application No. 17/648,384.
- [47] Ochoa, J. M., Kamper, D. G., Listenberger, M., & Lee, S. W. (2011, June). Use of an electromyographically driven hand orthosis for training after stroke. In *2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics* (pp. 1-5). IEEE.

- [48] Loconsole, C., Leonardis, D., Barsotti, M., Solazzi, M., Frisoli, A., Bergamasco, M., ... & Castelli, V. P. (2013, April). An emg-based robotic hand exoskeleton for bilateral training of grasp. In 2013 World Haptics Conference (WHC) (pp. 537-542). IEEE.
- [49] Bryant, M. F. (2016). U.S. Patent No. 9,387,112. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [50] Dunaway, S., Dezsi, D. B., Perkins, J., Tran, D., & Naft, J. (2017). Case report on the use of a custom myoelectric elbow–wrist–hand orthosis for the remediation of upper extremity paresis and loss of function in chronic stroke. *Military medicine*, 182(7), e1963-e1968.
- [51] Fardipour, S., Bahramizadeh, M., Arazpour, M., Jafarpisheh, A. S., & Azimian, M. (2018). First prototype of EMG-controlled power hand orthosis for restoring hand extension in stroke patients. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 232(12), 1176-1181.
- [52] Park, S., Meeker, C., Weber, L. M., Bishop, L., Stein, J., & Ciocarlie, M. (2018). Multimodal sensing and interaction for a robotic hand orthosis. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 315-322.
- [53] Ciocarlic, M., & Stein, J. (2019). U.S. Patent Application No. 15/766,897.
- [54] Sofie, W. O. G. E., Gustafsson, R., Renmarker, P., & Kopfer, S. K. (2022). U.S. Patent Application No. 17/296,960.
- [55] Asadi Dereshgi, H., Abderrahmane, A., Abderrahmane, B., & Demir, D. (2023, January). Development of an electroencephalography-controlled servo-motor-actuated robotic wrist – hand orthosis for home rehabilitation. In V. International Halich Congress on Multidisciplinary Scientific Research (pp. 209–209). Istanbul.
- [56] Asadi Dereshgi, H., & Yilmaz, S. (2022, December). Design and development of a novel electroencephalography-controlled linear motor-based active wrist-hand orthosis for rehabilitation application. In Anadolu 11th International Conference on Applied Sciences (pp. 54–54). Diyarbakir.
- [57] dos Santos, L. T., Kugler, M., & Nohama, P. (2023). Signals, sensors and methods for controlling active upper limb orthotic devices: a comprehensive review. *Research on Biomedical Engineering*, 39(3), 759-775.
- [58] DiCicco, M., Lucas, L., & Matsuoka, Y. (2004, April). Comparison of control strategies for an EMG controlled orthotic exoskeleton for the hand. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 (Vol. 2, pp. 1622-1627). IEEE.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının ve Elektrikli Araçların Belirsizlikleri Göz Önüne Alınarak Dağıtım Sisteminin QPSO Yöntemi ile Yeniden Yapılandırılması

İbrahim Çağrı BARUTÇU¹ , Ali ERDUMAN^{2*} , Faruk AYGÜN³

¹ Elektrik ve Enerji Bölümü, Çölemerik MYO, Hakkari Üniversitesi, Türkiye. ibrahimcagribarutcu@hakkari.edu.tr

² Elektrik ve Enerji Bölümü, Sakarya MYO, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye.
alierduman@subu.edu.tr

³ Bilgisayar ve Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Lisansüstü Enstitüsü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye, 0750Y22106@subu.edu.tr

ÖZ

Bu çalışma kapsamında, IEEE 33 baralı test sistemi üzerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının ve elektrikli araçların kullanıldığı dağıtım besleyicisinin yeniden yapılandırması problemini çözmek için kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO) uygulanmıştır. Kullanılan yöntem ile QPSO parçacık uzunluğunu değiştirerek daha hızlı bir sürede en yakın çözümün bulunması sağlanmıştır. Optimizasyonun amaç fonksiyonu elektrik dağıtım sistemlerinde aktif güç kaybını en aza indirmektir. Optimizasyonun kısıtları arasında bara gerilimleri, dağıtım hattı taşıma kapasiteleri, üretim kaynaklarının minimum ve maksimum güç değerleri, aktif ve reaktif güç denge denklemleri eşitlik ve eşitsizlik kısıtları olarak alınmıştır. Çalışma kapsamında rüzgâr ve güneş enerji üretim santralleri ve elektrikli araç modellerini dikkate alarak dağıtım sistemi besleyicilerinin yeniden yapılandırılması araştırılmıştır. Dağıtık üretim kaynaklarından olan rüzgar ve güneş enerji santrallerin üretim belirsizliklerinin ve elektrikli araçların yük olarak tüketim belirsizliklerinin ayrı ayrı ve birlikte dikkate alındığı senaryolar oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: QPSO yöntemi, dağıtım sisteminde yeniden yapılandırma, yenilenebilir enerji belirsizlikleri, elektrikli araçlar

Restructuring The Distribution System With QPSO Method Considering The Uncertainties Of Renewable Energy Sources And Electric Vehicles

ABSTRACT

In this study, quantum particle swarm optimization (QPSO) is applied to solve the distribution feeder reconfiguration problem using renewable energy sources and electric vehicles on the IEEE 33-bus test system. With the method used, the closest solution is found in a faster time by changing the QPSO

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: alierduman@subu.edu.tr

particle length. The objective function of the optimization is to minimize the active power loss in electricity distribution systems. Busbar voltages, distribution line carrying capacities, minimum and maximum power values of generation sources, active and reactive power balance equations are taken as equality and inequality constraints. Within the scope of the study, the reconfiguration of distribution system feeders considering wind and solar power generation plants and electric vehicle models is investigated. Scenarios are created in which the production uncertainties of wind and solar power plants, which are distributed generation sources, and the consumption uncertainties of electric vehicles as load are taken into account separately and together.

Keywords: QPSO method, distribution system reconfiguration, renewable energy uncertainties, electric vehicles

1 Giriş

Yeniden yapılandırma problemi, radyal topolojinin sağlanması, hatlardaki ve trafo merkezlerindeki güç akışının kapasite sınırlarının altında olması, gerilim büyüklüklerinin sınırlar dahilinde olması ve tüm baraların birbirine bağlı olması gibi tüm elektrik sistemi kısıtlamaları karşılanırken, minimum güç kaybıyla yeni bir şebeke topolojisinin tanımlanmasından oluşmaktadır. Dağıtım sistemleri yatırım maliyetinin yanı sıra sistemin işletme maliyetini de düşürecek şekilde planlanmakta ve tasarlanmaktadır. Transformatörlerin ve hatların beklenmedik zorunlu kesintileri sırasında veya aşırı yüklemeler ve bakım sırasında sistem operatörlerinin yeni çalışma koşulları için sistem verimliliğini, güvenilirliğini ve işletme maliyetini iyileştirmek amacıyla farklı anahtarların durumunu kontrol ederek sistemi yeniden yapılandırmaları gerekmektedir. Çalışma koşullarına göre, dağıtım sistemleri, kayıpların azaltılması, yük dengeleme ve servis restorasyonu gibi amaçlar doğrultusunda yeniden yapılandırılmaktadır. Bu anlamda, yükün aşırı yüklü hat ve trafo merkezlerinden nispeten daha az yüklü hat ve transformatörlere aktarılması amacıyla bağlantı ve bölümlendirme anahtarlarının açık / kapalı durumları değiştirilerek dağıtım sistemlerinin verimli çalışması sağlanabilir. Hatlar ve trafo merkezleri üzerindeki yük seviyesinin azaltılmasıyla güç kayıpları azaltılır ve hatlar boyunca gerilim profili iyileştirilir. Bu nedenle, dağıtım sistemi yeniden yapılandırma problemi, tüm sistem kısıtlamaları karşılanırken, minimum güç kaybıyla yeni bir konfigürasyon belirleme görevi olarak kavramsallaştırılabilir. Bu problem, amacın büyük ölçekli bir dağıtım sistemindeki tüm anahtarların açık / kapalı son durumunu belirlemek olduğu kombinatoriyal bir optimizasyon problemidir.

Son yıllarda birçok araştırmacı dağıtım şebekelerinin yeniden yapılandırılmasını araştırmıştır. Torres vd., güç dağıtım sistemlerinin minimum kayıpla yeniden yapılandırılmasını optimize etmek için kenar pencere kod çözücü tekniğini temel alan genetik algoritma yöntemini önermişlerdir [1]. Saffar vd., bulanık değişkenlere sahip çok amaçlı bir fonksiyon kullanarak ve hatlardaki hem yük dengeleme hem de kayıp azaltma hedeflerini dikkate alarak optimal yeniden yapılandırma için karınca kolonisi arama tabanlı algoritma kullanmışlardır [2]. Mirhoseini vd., aktif güç kayıplarını en aza indirmek ve gerilim profilini iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş uyarlanabilir emperyalist rekabetçi algoritmaya dayanan bir yeniden yapılandırma yöntemi önermişlerdir [3]. Nguyen ve Nguyen, elektrik dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması problemi için geliştirilmiş bir guguk kuşu arama algoritması geliştirmişlerdir [4]. Karimianfard ve Haghghat, optimizasyon tabanlı veya yük akışı tabanlı programları kullanmadan dağıtım sistemi yeniden yapılandırma probleminin çözümlerini seçmek için basit ve hızlı bir strateji sunmuşlardır [5]. Cikan ve Kekezoglu, aktif güç kayıplarını azaltmak, gerilim büyüklüğünü artırmak ve güvenilirlik endekslerini iyileştirmek için güç dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılmasına denge optimize edici algoritmayı uygulamışlardır [6]. Nguyen ve Truong, aktif güç kaybını en aza indirmek ve gerilim profilini iyileştirmek için guguk kuşu algoritmasına dayalı bir yeniden yapılandırma yöntemi önermişlerdir [7].

Tran The vd., dağıtım sistemlerindeki güç kaybını en aza indirmek ve gerilim profilini iyileştirmek amacıyla yeniden yapılandırma problemini çözmek için kaotik bir stokastik fraktal arama algoritması yöntemi önermişlerdir [8]. Abdelaziz vd., güç kaybının en aza indirilmesi için optimal dağıtım sistemi yeniden yapılandırma probleminin çözümü için parçacık sürü optimizasyonu algoritmasını sunmuşlardır [9]. Home-Ortiz vd., karışık tamsayılı ikinci dereceden programlama formülasyonu kullanan ve radyal dağıtım sistemleri için planlamaya ilişkin bir çalışma sunmuşlardır [10]. Önerdikleri yöntem, hem sabit hem de anahtarlanabilir kapasitör bankalarında minimum genel yatırım ve işletme maliyetlerine ulaşmak amacıyla, besleyicilerin yeniden yapılandırılması ve kapasitör bankalarının tahsisi ile ilgili problemlerin eş zamanlı olarak çözülmesine yönelik bir modelden oluşmuştur. Dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması ve kapasitör yerleşimi, dağıtım sistemlerinde güç kayıplarını azaltmak ve gerilim profillerini izin verilen sınırlar içinde tutmak için uygulanan faydalı seçeneklerdir. Sedighzadeh ve Bakhtiary, radyal dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırma ve kapasitör yerleşimi yoluyla optimizasyonu için bir algoritma sunmuşlardır [11]. Salau vd., farklı yüklenme koşullarını dikkate alarak güç kaybının azaltılması ve gerilim profilinin iyileştirilmesi amacıyla bir güç dağıtım sistemindeki yeniden yapılandırma problemini optimize etmek için seçici parçacık sürü optimizasyonu yöntemini sunmuşlardır [12]. Aman vd., sistem yüklenebilirliğinin maksimuma çıkarılmasına dayanan şebekenin yeniden yapılandırılması için bir algoritma sunmuşlardır [13]. Maksimum yüklenebilirlik noktasını bulmak için sürekli güç akışı teoremini ve radyal dağıtım sistemi yük akışı analizini kullanmışlardır. Das, bulanık çok amaçlı yaklaşıma dayalı olarak şebekenin yeniden yapılandırılması için bir algoritma sunmuştur [14]. Tüm yüklerin enerjilendirilmesi gereken bir radyal şebeke yapısını sağlayarak, besleyiciler arasında yük dengeleme, bara gerilimlerdeki minimum sapma, güç kaybının en aza indirilmesi ve hat akımı kısıt ihlalinin azaltılması gibi amaçları göz önünde bulundurmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmalar dağıtım sisteminin yeniden yapılandırma probleminin çözümünde dağıtık enerji üretim sistemlerinin veya yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantılarını göz ardı etmişlerdir. Ayrıca, bu çalışmalarda sadece şebekenin orijinal yük seviyesi veya yük belirsizliği göz önünde bulundurulmuştur.

Literatüre bakıldığında, dağıtım şebekelerinde yeniden yapılandırma probleminin dağıtık enerji üretim sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynakları göz önünde bulundurulmuş ve uygulandığı önemli çalışmaların bulunduğu görülmektedir. Bu çalışmalardan bir kısmı sabit güçlü dağıtık enerji üretim sistemlerinin göz önünde bulundurulduğu çalışmalardır [15]–[24]. Lotfipour ve Afrakhte, dağıtık enerji üretiminin bulunduğu dağıtım şebekesinde güç kaybının en aza indirilmesi ve gerilim profilinin iyileştirilmesi amacıyla dağıtım sisteminin yeniden yapılandırılması için öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması sunmuşlardır [15]. Azizivadeh vd., dağıtık enerji üretim sistemlerinin bulunduğu dağıtım şebekelerinde güç kaybını, gerilim kararlılık endeksini ve anahtarlama sayısını hem çalışma hem de güvenlik beklentilerini karşılayabilecek amaç fonksiyonları olarak ele almışlardır [16]. İlgili problemi çözmek için karışık sıçrayan kurbağa algoritması ve parçacık sürü optimizasyonunun hibritleştirilmesine dayanan bir optimizasyon algoritması sunmuşlardır. Nguyen vd., aktif güç kaybını azaltmak amacıyla, eş zamanlı şebekenin yeniden yapılandırılması ve dağıtık enerji üretim yerleşimi problemi için çakalların sosyal yaşamından ilham alan çakal algoritmasına dayalı bir yöntem sunmuşlardır [17]. Sedighzadeh vd., eşzamanlı optimal şebekenin yeniden yapılandırılması ve dağıtık enerji üretim güç tahsisi için çok amaçlı bir yapı önermişlerdir [18]. Önerdikleri yöntemi, güç kayıpları, gerilim kararlılığı, dağıtık enerji üretim maliyeti ve sera gazı emisyonları fonksiyonlarını güç sisteminin operasyonel ve teknik kısıtlamalarına göre optimize ederek uygulamışlardır. Arandian vd., farklı şebeke yük seviyelerinde dağıtık enerji üretiminin güç üretim kontrolü ve kayıp azaltılması yoluyla dağıtım şirketi maliyetlerinin azaltılması için bir yöntem sunmuşlardır [19]. Wang vd., paralel balçık kalıp algoritmasına dayalı olarak dağıtık enerji üretimi ile dağıtım şebekesi yeniden yapılandırma problemi için bir çözüm önermişlerdir [20]. Rajaram

vd., değiştirilmiş bitki büyüme simülasyon algoritmasını kullanarak, dağıtık enerji üretiminin bulunduğu dağıtım şebekesinde yeniden yapılandırmayı uygulamışlardır [21]. Siahbalaee vd., geliştirilmiş karıştırılmış kurbağa sıçrama algoritmasını kullanarak tüm kısıtlamaları karşılarken minimum güç kaybı, minimum anahtarlama işlemi sayısı ve minimum bara gerilimi sapsması elde etmeyi amaçlayan, dağıtık üretimin bulunduğu şebekenin yeniden yapılandırma yöntemini önermişlerdir [22]. Shaheen vd., güç dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırılmasını dikkate alarak dağıtık jeneratör ve kapasitör tahsisi için yapay ekosistem optimize edici tekniğinin yeni bir uygulamasını geliştirmişlerdir [23]. Jafar-Nowdeh vd., güvenilirliği göz önünde bulundurarak ağırlık faktörü yöntemini kullanarak dağıtık enerji üretim sistemlerine sahip radyal dağıtım sistemlerinin optimal çok kriterli yeniden yapılandırılmasını sunmuşlardır [24]. Ancak, yenilenebilir enerji sistemlerindeki belirsizliklerin dikkate alınmadığı ve sadece sabit güçlü dağıtık enerji üretim sistemlerinin ele alındığı çalışmalar, pratik ortamda uygulanabilirlik açısından beklenen sonuçları vermeyebilir.

Dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırma probleminin yenilenebilir enerji kaynaklarındaki belirsizlikler göz önüne alınarak uygulandığı çalışmalar, bu problemin önemini artırmakla birlikte probleme yeni bir çerçeve kazandırmaktadır [25]–[31]. Kianmehr vd., stokastik çok amaçlı bir yeniden yapılandırma modeli önermiş olup, dağıtık üretim sahibinin karını maksimuma çıkarmayı ve dağıtım şirketinin maliyetlerini minimuma indirmeyi amaçlamışlardır [25]. Fathi vd., riskten kaçınma stratejisiyle birlikte bilgi açığı karar teorisi adı verilen bir yaklaşımı kullanarak, üretim ve yük belirsizliğini göz önünde bulundurarak, güvenilirliğin artırılması ve güç kayıplarının maliyetinin en aza indirilmesi amacıyla fotovoltaik paneller ve rüzgar türbinleri gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının optimal ve eş zamanlı tahsisi ve radial dağıtım şebekelerinin yeniden yapılandırılması için bir yaklaşım sunmuşlardır [26]. Zidan ve El-Saadany, yük değişiminin etkisini ve yenilenebilir dağıtık üretim ünitelerinin stokastik güç üretimini dikkate alarak dağıtım sistemi yeniden yapılandırma problemini araştırmak için genetik algoritmaya dayalı bir yöntem sunmuşlardır [27]. Monteiro vd., sistemin yeniden yapılandırılması yoluyla fotovoltaik dağıtık üretimin ve enerji depolama cihazının bulunduğu dağıtım şebekelerinde teknik güç kayıplarının azaltılmasını amaçlayan ikili parçacık sürü optimizasyonu tabanlı bir çözüm sunmuşlardır [28]. Hooshmand ve Rabiee, yenilenebilir enerji kaynaklarının, enerji depolama sistemlerinin, talep yanıtının ve yeniden yapılandırmanın enerjinin optimal paylaşımı üzerindeki etkisini gösteren bir çerçeve önermişlerdir [29]. Li vd., şebekenin yeniden yapılandırılmasını ve talep yanıt yöntemini koordine ederek rüzgar enerjisinin varlığında en uygun dağıtım sistemi çalışmasını tartışmışlardır [30]. De Oliveira vd., yük talebindeki ve rüzgar bazlı dağıtık üretimdeki belirsizlikleri göz önünde bulundurarak enerji kayıplarını en aza indirmek için elektrik dağıtım sistemlerinin optimal şekilde yeniden yapılandırılmasına yönelik bir yaklaşım sunmuşlardır [31]. Bununla birlikte, bu çalışmalarda QPSO yöntemi göz önünde bulundurulmamıştır. Guan vd., aktif güç kaybını en aza indirme hedefiyle farklı dağıtık enerji üretimi modellerini dikkate alarak dağıtım sistemi besleyicisinin yeniden yapılandırılmasına yönelik bir yöntem sunmuşlardır [32]. İlgili çalışmada, QPSO yöntemi göz önünde bulundurulmuş olsa da, farklı dağıtık enerji üretim sistemleri sabit güçlü olarak modellenmiş olup, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki ve yük taleplerindeki belirsizlikler göz önünde bulundurulmamıştır.

Literatürde yapılan değerlendirmeler sonucunda, müşterilere tutarlı ve istikrarlı gücün sağlanmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki ve yüklerdeki belirsizliklerin bulunduğu dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılmasının son derece önemli rol oynadığı açıktır. Ancak, yayınlanmış araştırmalarda farklı belirsizlik koşulları altında QPSO optimizasyon yöntemi çerçevesinde şebekenin yeniden yapılandırılması konusunda eksiklikler olduğu görülmektedir. Bunun ışığında, bu çalışma, güneş enerjisi sistemlerinin, rüzgar türbinlerinin ve elektrikli araçların belirsizliklerinin QPSO optimizasyon yaklaşımı ile dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılmasına etkilerinin araştırılmasına odaklanmaktadır.

Önerilen yaklaşım, Tablo 1’de bu çalışmada ele alınan konular dikkate alınarak literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tablo 1’de sunulduğu gibi, literatürde çeşitli kriterlere göre önemli eksiklikler gözlemlenmiştir. Bu kriterler, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki belirsizliklerin, yük belirsizliklerinin, QPSO yönteminin ve dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılmasının göz önünde bulundurulmasına göre sınıflandırılmıştır. Bu çalışmanın yeniliği literatürdeki eksiklikleri tamamlayarak önerilen yaklaşımda tüm bu kriterleri dikkate almasıdır.

Tablo 1: Önerilen yaklaşımın literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılması

Referanslar	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarındaki Belirsizlikler	Yük Belirsizlikleri	QPSO Yöntemi	Dağıtım Şebekesinin Yeniden Yapılandırılması
[1]	x	x	x	✓
[2]	x	✓	x	✓
[3]	x	x	x	✓
[4]	x	x	x	✓
[5]	x	x	x	✓
[6]	x	x	x	✓
[7]	x	x	x	✓
[8]	x	x	x	✓
[9]	x	x	x	✓
[10]	x	✓	x	✓
[11]	x	x	x	✓
[12]	x	✓	x	✓
[13]	x	✓	x	✓
[14]	x	x	x	✓
[15]	x	x	x	✓
[16]	x	x	x	✓
[17]	x	x	x	✓
[18]	x	x	x	✓
[19]	x	✓	x	✓
[20]	x	x	x	✓
[21]	x	x	x	✓
[22]	x	x	x	✓
[23]	x	✓	x	✓
[24]	x	x	x	✓
[25]	✓	✓	x	✓
[26]	✓	✓	x	✓
[27]	✓	✓	x	✓
[28]	✓	✓	x	✓
[29]	✓	✓	x	✓
[30]	✓	✓	x	✓
[31]	✓	✓	x	✓
[32]	x	x	✓	✓
Bu Çalışma	✓	✓	✓	✓

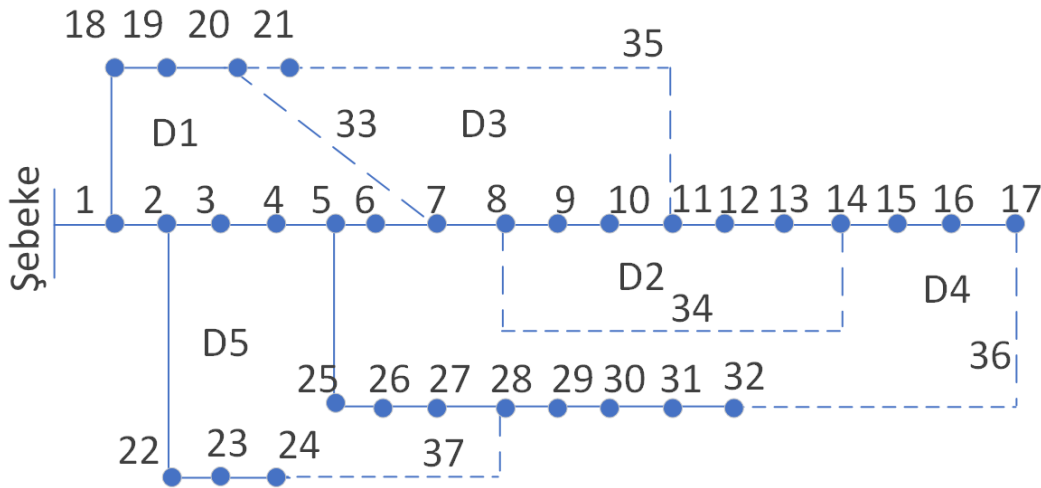
Bu çalışma kapsamında, IEEE 33 baralı test sistemi üzerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının ve elektrikli araçların kullanıldığı dağıtım besleyicisinin yeniden yapılandırılması problemini çözmek için kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO) uygulanmıştır. Kullanılan yöntem ile QPSO parçacık

uzunluğunu değiştirerek daha hızlı bir sürede en yakın çözümün bulunması sağlanmıştır. Optimizasyonun amaç fonksiyonu elektrik dağıtım sistemlerinde aktif güç kaybını en aza indirmektir. Optimizasyonun kısıtları arasında bara gerilimleri, dağıtım hattı taşıma kapasiteleri, üretim kaynaklarının minimum ve maksimum güç değerleri, aktif ve reaktif güç denge denklemleri eşitlik ve eşitsizlik kısıtları olarak alınmıştır. Çalışma kapsamında rüzgâr ve güneş enerji üretim santralleri ve elektrikli araç modellerini dikkate alarak dağıtım sistemi besleyicilerinin yeniden yapılandırılması araştırılmıştır. Dağıtık üretim kaynaklarından olan rüzgar ve güneş enerji santrallerin üretim belirsizliklerinin ve elektrikli araçların yük olarak tüketim belirsizliklerinin ayrı ayrı ve birlikte dikkate alındığı senaryolar oluşturulmuştur. Sonuç olarak her bir senaryoda ortaya çıkan farklı belirsizlikler ve bu belirsizlikler altında aktif güç kayıplarını en az yapan bağlantı konfigürasyonları bulunmuştur.

2 Metodoloji

2.1. IEEE 33 Baralı Dağıtım Sistemi

Dağıtım sistemlerinin analiz edilmesinde farklı test sistemleri kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında, Şekil 1’de verilen IEEE 33 baralı sistem kullanılmış olup test sisteminin jeneratör, bara ve hatlarına ilişkin detaylı bilgi [13]’te verilmiştir.



Şekil 1: IEEE 33 baralı test sistemi

Elektrik dağıtım sistemleri radyal ağ topoloji yapısındadır, ağdaki anahtarların açılması ve kapatılması ile oluşabilecek radyal topolojiler belirlenir. Uygun dağıtım ağı topolojisi için sistem bileşenleri optimizasyon ve güç akışı algoritmalarının birlikte çalıştırılması ile analiz edilmelidir. Ağ yapısını baralardaki anahtarlama elemanlarının bağlantı anahtarının kapatılması ile küçük bir döngü oluşturacaktır. Radyal topolojide, her döngüde bir bölümlenme şalteri açmamız gerekir. Bu nedenle, bir bağlantı şalteri bir döngüye karar verir, şalterin açılması ve kapanması tüm anahtarlar bir dağıtım ağı yeniden yapılandırmasını oluşturur. Ondalık döngü kodlama kurallarına göre tüm bağlantı anahtarlarını doğal sayılarıyla numaralandırılır. Ardından her bir döngüde ayrı ayrı 1'den her bir döngünün toplam sayısına kadar açılıp katılır. Böylece tüm seçenekleri güç sisteminde değerlendirilir. Elde edilen sonuçları neticesinde en iyi global ve lokal optimal sonuçlar hesaplanır. Bu global ve lokal optimal sonuçları veren parçacık değişkenleri algoritma ile hafızada tutulur. İşlem sonucunda belirlenen iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar veya sistemin önceden belirlenen hata değerine ulaşıncaya kadar tekrarlanır. Elde

edilen sonuçlar global ve lokal optimizasyon sonucu olarak tanımlanır. Çalışma kapsamında 33-baralı dağıtım sistemin üzerinde 5 adet göz ve bu gözlerin dikkate alındığı bara grupları Tablo 2’de belirtilmiştir.

Tablo 2: IEEE 33 baralı sistemdeki döngü grupları

Döngü	Bara Numaraları
D1	[2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 18 , 19 , 20]
D2	[8 , 9 , 10 , 11 , 21 , 33 , 35]
D3	[12 , 13 , 14 , 34]
D4	[15 , 16 , 17 , 29 , 30 , 31 , 32 , 36]
D5	[22 , 23 , 24 , 25 , 26 , 27 , 28 , 37]

3 Teori ve Hesaplama

3.1. Belirsizlik Fonksiyonları

3.1.1. Elektrikli Araçların Belirsizliği

Yük talebi verileri normal dağılım dikkate alınarak (1) üretilmiştir [33]. Yükün belirsizliğini gösteren dağılım fonksiyonu Denklem (1) aşağıda verilmiştir.

$$f(P_{Load,m}) = \left(\frac{1}{\sigma_{L,m}\sqrt{2\pi}} \right) \exp \left(-\frac{(P_{Load,m} - P_{Load,m,avg})^2}{2\sigma_{L,m}^2} \right) \quad (1)$$

Burada $P_{Load,m,avg}$ m barasındaki yük gücünün ortalaması, $P_{Load,m}$ m barasındaki yük gücü, $\sigma_{L,m}$ m barasındaki yük gücünün standart sapmasıdır.

3.1.2. Güneş Işımmının Belirsizliği

Bu çalışmada, uzun dönemli güneş ışınımı verileri beta dağılımı dikkate alınarak (2) oluşturulmuştur [34]. Beta dağılımını temsil eden olasılık dağılımı fonksiyonu Denklem (2) aşağıda verilmiştir.

$$f(SR_m) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} SR_m^{\alpha-1} (1 - SR_m)^{\beta-1} & 0 \leq SR_m \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2)$$

Burada SR_m dağıtım sisteminin m barasında PV sistemine düşen güneş radyasyonu, β (3) ve α (4) beta dağılım fonksiyonunun parametreleridir. Denklem (3) ve (4) aşağıda verilmiştir.

$$\beta = (1 - \mu) \left(\frac{\mu(1 - \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\mu\beta}{1 - \mu} \quad (4)$$

Burada μ ve σ sırasıyla ortalama ve standart sapma değerlerini göstermektedir. Güneş radyasyonuna bağlı olarak, PV aktif güçleri Denklem (5) aşağıda verilmiştir.

$$P_{PV,m} = P_{PV,rated}SR_m \quad (5)$$

Burada $P_{PV,m}$ m barasındaki PV'nin aktif gücü, $P_{PV,rated}$ $1000 W/m^2$ güneş radyasyonu için PV'nin nominal aktif gücüdür.

3.1.2. Rüzgar Hızının Belirsizliği

Rüzgar hızının uzun dönemli verileri Weibull dağılımı dikkate alınarak üretilmiştir [35]. Rüzgar hızını temsil eden dağılım fonksiyonu Denklem (6) aşağıda verilmiştir.

$$f(v_{WT,m}) = \left(\frac{2v_{WT,m}}{c^2}\right) \exp\left(-\left(\frac{v_{WT,m}}{c}\right)^2\right) \quad (6)$$

Burada $v_{WT,m}$ m barasındaki WT üzerindeki rüzgar hızıdır, c ise dağılım fonksiyonunun parametresidir. m barasındaki WT aktif gücü değeri Denklem (7) aşağıda verilmiştir.

$$P_{WT,m} = \begin{cases} \left(\frac{v_{cut-in} - v_{WT,m}}{v_{cut-in} - v_{WT-rated}}\right) P_{WT,rated} & v_{cut-in} \leq v_{WT,m} \leq v_{WT-rated} \\ P_{WT,rated} & v_{WT-rated} \leq v_{WT,m} \leq v_{cut-out} \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (7)$$

Burada $P_{WT,rated}$ WT'nin nominal aktif gücü, $v_{WT-rated}$ WT'nin nominal hızı, v_{cut-in} ve $v_{cut-out}$ sırasıyla WT'nin devreye girme ve devreden çıkma hızlarıdır.

3.2. Optimizasyon Yapısı

Bu çalışma kapsamında, bara gerilimleri ve hat akımları gibi kısıtlamalar göz önünde bulundurularak dağıtım sisteminin optimal konfigürasyonunun ve bu sistemdeki PV ve WT'lerin optimal kapasitelerinin belirlenmesi için QPSO yöntemi uygulanmıştır. Şebeke optimizasyon planlamasına ilişkin araştırmalar, hem PV hem de WT sistemlerinin kesikli güç yapılarının ve elektrik tüketimindeki belirsizliklerin dahil edilmesini gerektirmektedir. Çalışmada, farklı belirsizlik durumlarında kısıtlamalar dikkate alınarak enerji kayıpları minimize edilmektedir. Planlama çalışmasında belirsizlik etkileri dikkate alınarak enerji kayıplarının en aza indirilmesi ve şebeke teknik kısıtlarının ilgili sınırlar içerisinde tutulması temel amaçtır. Amaç fonksiyonu (8) aşağıda Denklem (8)'de gösterilmektedir:

$$E_{kayıp} = \sum_{st=1}^{Nst} \sum_{n=1}^{Nhat} P_{kayıp,n}^{st} \quad (8)$$

Burada $E_{kayıp}$ toplam güç şebekesi enerji kayıpları, Nst belirsizliklerdeki toplam durum sayısı, $P_{kayıp,n}^{st}$ $st.$ durum için güç sisteminin $n.$ hattındaki aktif güce karşılık gelen kayıp, $Nhat$ güç şebekesindeki toplam hat miktarıdır. Tekrarlı güç akışı analizinden değerlendirilen teknik durum değişkenleri, optimizasyon sürecinde kısıtlar olarak dikkate alınmıştır.

Bu kısıtlar QPSO algoritmasının Nst durumları için uygulanan güç akışı algoritmasından belirlenmiştir. Eşitsizlikleri temsil eden gerilim (9) ve Akım (10) kısıtları aşağıda Denklem (9) ve (10) aşağıda verilmiştir.

$$V_{m,min} \leq V_m^{st} \leq V_{m,max} \quad m = 1, \dots, NBUS \quad st = 1, \dots, Nst \quad (9)$$

$$I_{flow,n}^{st} \leq I_{flow,n,max} \quad n = 1, \dots, NLine \quad st = 1, \dots, Nst \quad (10)$$

Burada V_m^{st} $st.$ durum için güç şebekesinin m numaralı barasındaki gerilimin büyüklüğü, $I_{flow,n}^{st}$ $st.$ durum için güç sisteminin n numaralı hattındaki hat akımı, $V_{m,min}$ ve $V_{m,max}$, 0.9 pu ve 1.1 pu, m barasındaki gerilim büyüklüğünün alt ve üst sınırları, $I_{flow,n,max}$ n hattındaki hat akımının maksimum sınırı, $NBUS$ baraların toplam miktarıdır.

Aktif güç (11) ve reaktif güç (12) Eşitlikleri temsil eden kısıtlamalar Denklem (11) ve (12) aşağıda verilmiştir.

$$P_{gen,m} - P_{yük,m} - \sum_{l=1}^{NBUS} |V_m||V_l||y_{m,l}| \cos(\delta_{m,l} - \theta_m + \theta_l) = 0 \quad (11)$$

$$Q_{gen,m} - Q_{yük,m} - \sum_{l=1}^{NBUS} |V_m||V_l||y_{m,l}| \sin(\delta_{m,l} - \theta_m + \theta_l) = 0 \quad (12)$$

Burada $P_{yük,m}$ ve $Q_{yük,m}$ aktif ve reaktif güçlere karşılık gelen yükleri, $P_{gen,m}$ ve $Q_{gen,m}$ aktif ve reaktif güçlere karşılık gelen üretimleri, $|y_{m,l}|$ ve $\delta_{m,l}$ sırasıyla $m.$ satır ve $l.$ sütuna karşılık gelen admitans matrisinin büyüklük ve açı değerlerini, θ_m ise $m.$ baradaki gerilim açısını göstermektedir.

QPSO planlama sürecinin optimal çözümleri olan kontrol değişkenleri Denklem (13), Denklem (14), Denklem (15) ve Denklem (16), de verilmiştir.

$$X = \begin{pmatrix} OS_1, \dots, OS_i, \dots, OS_{NLOOP} \\ P_{PV,rated,1}, \dots, P_{PV,rated,m}, \dots, P_{PV,rated,NPV} \\ P_{WT,rated,1}, \dots, P_{WT,rated,m}, \dots, P_{WT,rated,NWT} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$OS_{i,min} \leq OS_i \leq OS_{i,max} \quad i = 1, \dots, NLOOP \quad (14)$$

$$P_{PV,m,min} \leq P_{PV,rated,m} \leq P_{PV,m,max} \quad m = 1, \dots, NPV \quad (15)$$

$$P_{WT,m,min} \leq P_{WT,rated,m} \leq P_{WT,m,max} \quad m = 1, \dots, NWT \quad (16)$$

Burada $P_{PV,rated,m}$ ve $P_{WT,rated,m}$ sırasıyla m barasındaki PV sistemin aktif güç kapasitesi ve m barasındaki WT sistemin aktif güç kapasitesidir. OS_i şebekenin her bir kapalı döngüsünde açılması gereken anahtarların bulunduğu hat numaralarını temsil etmektedir. $P_{PV,m,min}$ ve $P_{WT,m,min}$ sırasıyla PV ve WT aktif güçlerinin minimum sınırlarını temsil eder, $P_{PV,m,max}$ ve $P_{WT,m,max}$ ise sırasıyla PV ve WT aktif güçlerinin maksimum sınırlarını göstermektedir. $OS_{i,min}$ ve $OS_{i,max}$ şebekenin her bir kapalı döngüsünde açılması gereken anahtarların bulunduğu minimum ve maksimum hat numaralarını, NLOOP, NPV ve NWT şebekedeki kapalı döngülerin, PV ve WT sistemlerinin toplam miktarıdır.

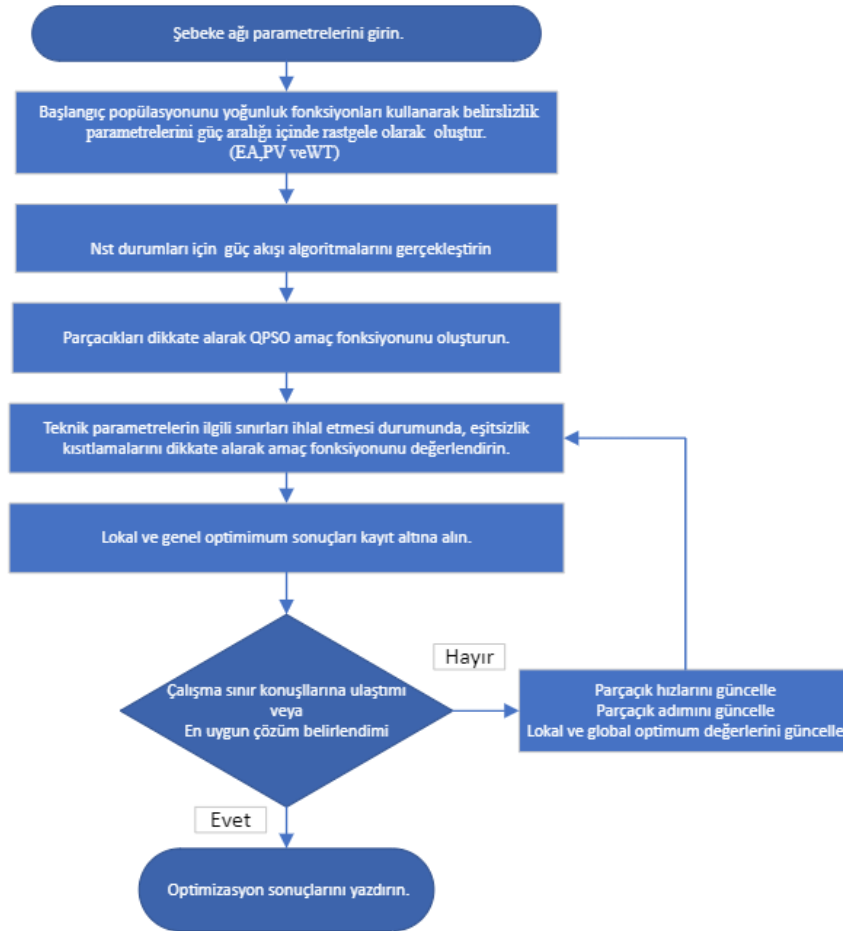
3.3. QPSO Yöntemi ve Probleme Uygulanması

QPSO, klasik Parçacık Sürü Optimizasyonunu kuantum mekaniği prensiplerine dayandıran bir yöntemdir [32]. QPSO, kuantum mekaniği prensiplerini kullanarak çözüm uzayında daha dinamik ve esnek bir arama yapabilir. Bu, özellikle karmaşık, çok boyutlu optimizasyon problemlerinde avantaj sağlayabilir. Kuantum bitleri (qubits) kullanımı, QPSO'nun bir dizi olasılık durumunu eş zamanlı olarak değerlendirmesini sağlar. Bu, birçok olası çözümü aynı anda inceleyerek daha hızlı yakınsama sağlayabilir [36]. QPSO, kuantum süperpozisyonu kavramını kullanarak paralel hesaplama yeteneği sunar. Bu, birçok potansiyel çözümün eşzamanlı olarak değerlendirilmesini ve en iyi çözüme daha hızlı yaklaşılmasını sağlayabilir. QPSO, kuantum çaprazlama operatörlerini kullanarak çözümleri birleştirme ve yeni çözümler oluşturma yeteneği ile çaprazlama süreçlerini iyileştirebilir. QPSO yönteminin ayrıntılı formülasyonu [32]'de verilmiştir. Belirsizlik tabanlı QPSO algoritması Şekil 2'de verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, QPSO planlama sürecinin adımları aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

1. Şebeke ağı parametrelerini girin.
2. Yoğunluk fonksiyonlarından elektrik tüketimi, güneş ışınımı ve rüzgar hızı durumlarını üretin.
3. Başlangıç popülasyonunu rastgele üretin.
4. Nst durumları için talep, PV sistemi ve WT sistemi aktif güçlerini hesaplayın ($st=1, \dots, Nst$).
5. Nst durumları için teknik parametreleri elde etmek için tekrarlayan güç akışı algoritmalarını gerçekleştirin.
6. Parçacıkları dikkate alarak amaç fonksiyonunun değerlerini belirleyin.
7. Teknik parametrelerin ilgili sınırları ihlal etmesi durumunda, eşitsizlik kısıtlamalarını dikkate alarak amaç fonksiyonunu değerlendirin.
8. PSO planlama sürecinin kriterlerinin karşılanıp karşılanmadığını değerlendirin.
9. Kriterler karşılanmıyorsa, adım 3'e gidin, aksi takdirde adım 10'a gidin.

10. Optimizasyon sonuçlarını yazdırın.



Şekil 2: Belirsizlik tabanlı QPSO algoritması

4 Bulgular ve Tartışma

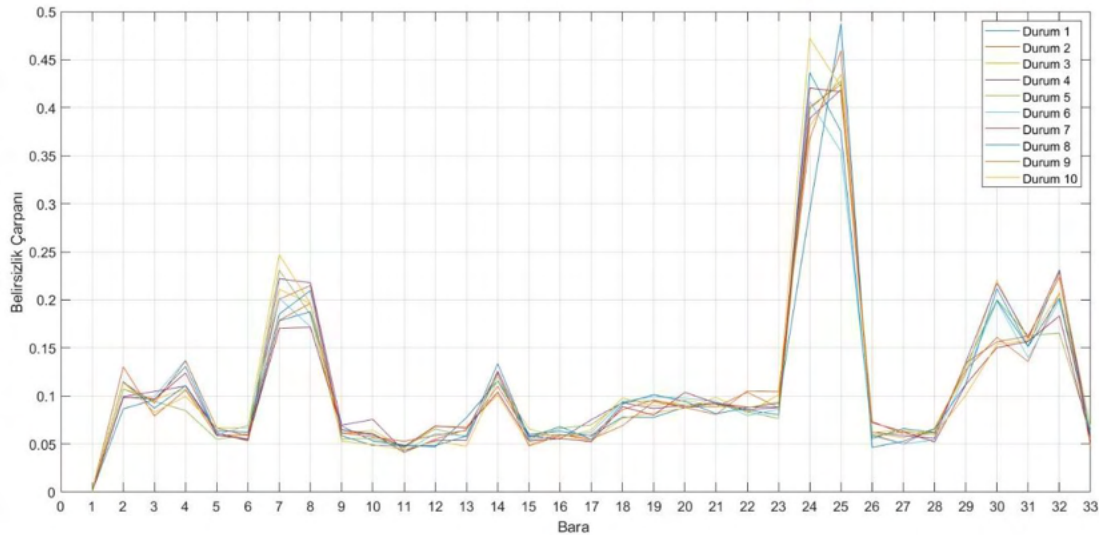
Bu makalede, planlama çalışmalarında teknik limitler dikkate alınarak, belirsizliklerin elektrik şebekesi üzerindeki enerji kayıpları üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesi için yük, güneş ışınımı ve rüzgar hızı değişkenliklerinden oluşan beş farklı senaryo ele alınmıştır. İlk olarak, şebekeye PV ve WT sistemleri kurulmadan yük belirsizliğinin elektrik şebekesi enerji kayıpları üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmuştur. İkinci olarak, kayıplar üzerindeki etkilerin incelenmesi için hem PV ve WT ünitelerinin kesintili özellikleri hem de elektrik tüketimlerinin belirsizlikleri dikkate alınmıştır. Bundan sonra, güneş ışınımı, talep ve rüzgar hızından biri sabit tutularak ve diğer iki değişkenin belirsizlikleri dikkate alınarak ek üç senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolar Tablo 3'te sunulmuştur.

Bu çalışmada, maksimum iterasyon ve popülasyon büyüklüğü olan QPSO parametreleri sırasıyla 200 ve 30 olarak seçilmiştir. Bu makalede, aktif güç sisteminde enerji kaybının minimizasyonu olan optimizasyon probleminin simülasyonlarını gerçekleştirmek için 2.80 GHz CPU'ya sahip PC kullanılmıştır. PV ve WT sistemlerinin nominal kapasiteleri, güç şebekesindeki entegre edildikleri baralarda 1 MW olarak kabul edilmiştir. 5, 14, 18 numaralı baralar WT sistemlerinin entegrasyonu için dikkate alınırken, PV sistemleri için sırasıyla 26, 30, 33 numaralı baralar dikkate alınmıştır.

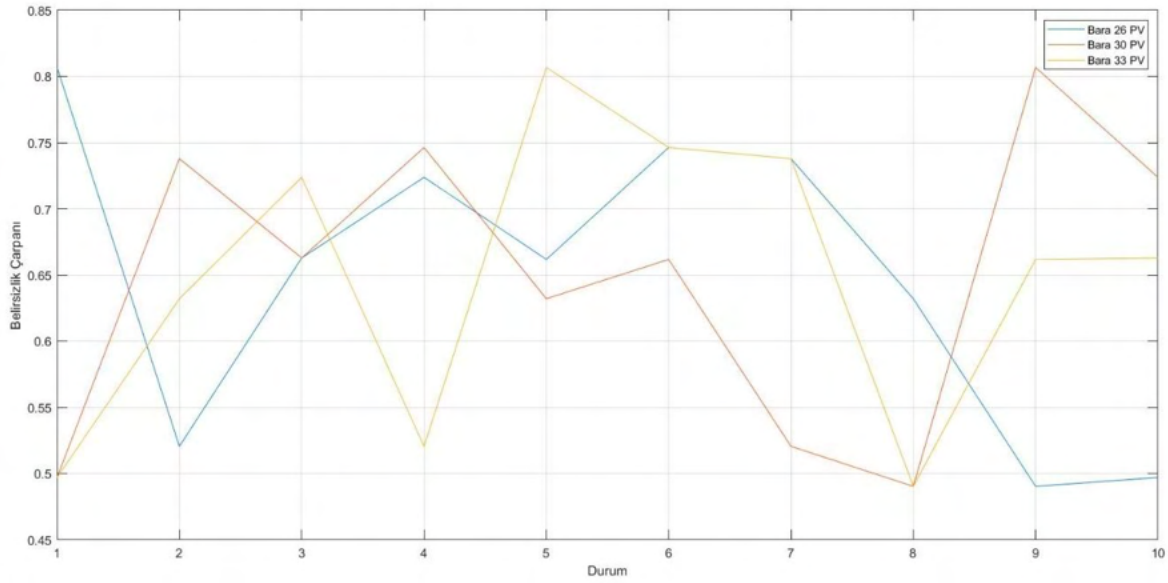
Tablo 3: Bu çalışmada ele alınan senaryolar

Senaryo	Belirsizlikler			Bilgi
	EA	PV	WT	
Senaryo 1	1	0	0	Sadece yük belirsizliği dikkate alınmıştır.
Senaryo 2	1	1	0	Rüzgar hızı 25 m/s olarak sabit tutulurken yük ve güneş ışınımı belirsizlikleri eş zamanlı olarak dikkate alınmıştır
Senaryo 3	1	0	1	Güneş ışınımı 1000 W/m ² olarak sabit tutulurken yük ve rüzgar hızı belirsizlikleri eş zamanlı olarak dikkate alınmıştır
Senaryo 4	0	1	1	Güneş ışınımı ve rüzgar hızı belirsizlikleri, elektrik şebekesinin orijinal yük profili göz önünde bulundurulurken aynı anda dikkate alınmıştır
Senaryo 5	1	1	1	Yük, güneş ışınımı ve rüzgar hızı belirsizlikleri aynı anda dikkate alınmıştır.

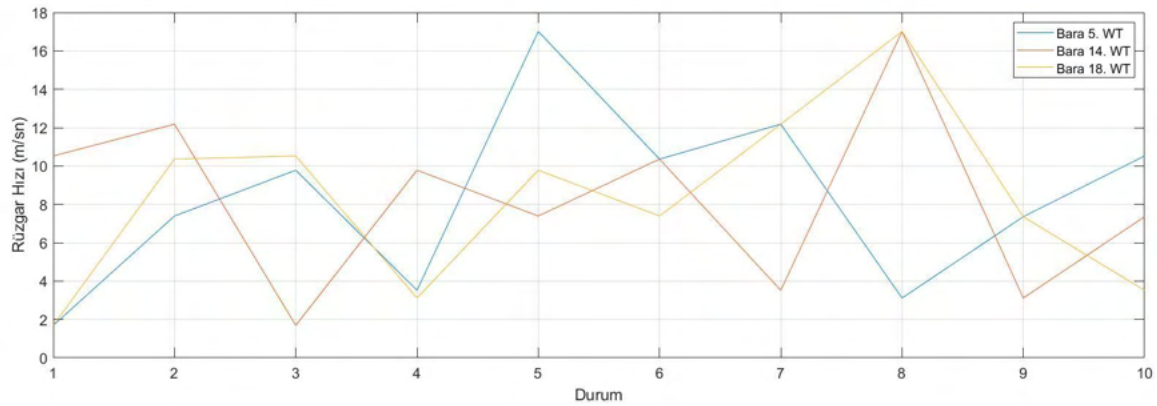
Elektrik şebekesindeki elektrikli araçların belirsizlik özelliği, normal olasılık dağılım ifadesi dikkate alınarak üretilmiştir. Talep durumlarının üretimi, ortalama değerlerin güç şebekesinin orijinal aktif yükleri olarak kabul edilmesi ve standart sapmanın % 10 olarak dikkate alınmasıyla sağlanmıştır. Şebekenin toplam aktif güç talebinin değişkenliği Şekil 3'te gösterilmektedir. PV sistemlere düşen güneş ışınımının durumları, α ve β parametreleri sırasıyla 7 ve 3 alınarak üretilmiştir. Bu durumlar, Şekil 4'te gösterilmektedir. WT'nin kesikli özelliklerini gösteren durumlar, devreye girme hızı 4 m/s, nominal hızı 16 m/s ve devreden çıkma hızı 25 m/s olarak dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu durumlar ise, Şekil 5'te gösterilmektedir. Yenilenebilir sistemlerin kesikli özellikleri ve elektrik yüklerinin değişkenliği, elektrik şebekesinin doğru planlama açısından değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Optimizasyon planlama sürecinde, elektrik tüketiminin, güneş ışınımının ve rüzgar hızının çeşitli durumları dikkate alınmış ve bu durumlar için tekrarlı güç akışı analizleri yapılmıştır.



Şekil 3: Güç şebekesindeki toplam yük belirsizliği



Şekil 4: Güneş ışınımı belirsizliği



Şekil 5: Rüzgar hızı belirsizliği

Planlama sürecinde QPSO uygulaması dikkate alınarak çeşitli belirsizlik senaryoları için optimizasyon sonuçları Tablo 4'te gösterilmektedir. Tablo 4'te görüldüğü gibi, şebeke konfigürasyonu, senaryolara göre değişiklik göstermiş olmakla birlikte senaryo 4 ve 5'te aynı kalmıştır. Diğer taraftan, PV ve WT sistemlerinin optimal çıkış güçlerine bakıldığında, şebekeye bağlanan optimal WT kapasitelerinin PV sisteme göre daha az olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle, senaryo 2 ve 3'te elde edilen sonuçlara göre şebekenin 18. barasındaki optimal WT kapasitelerinin alt limitlerine daha yakın olduğu gözlemlenmektedir. Optimizasyon planlama süreci, 2, 3, 4 ve 5 numaralı senaryolarda PV sistemlerin buldukları baralardaki optimal kapasitelerinin WT sistemlere göre daha fazla olmasına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, senaryo 2 ve 3'te şebekenin 33. barasındaki PV sistemin optimal kapasitelerinin nispeten daha az olduğu görülmektedir. Tüm senaryolarda, optimal şebeke konfigürasyonları, PV ve WT sistem çıkış güçleri, planlamada teknik parametreler sınırlar dahilinde tutularak belirlenmiştir.

Tablo 4: Optimizasyon sonuçları

Karar değişkenleri	Senaryolar				
	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4	Senaryo 5
OS_1	7	5	5	7	7
OS_2	9	9	35	9	9
OS_3	14	34	12	14	14
OS_4	37	28	28	28	28
OS_5	32	17	15	30	30
$P_{WT,5}$ (kW)	-	452.02	634.36	345.21	338.35
$P_{WT,14}$ (kW)	-	569.68	581.34	711.47	710.67
$P_{WT,18}$ (kW)	-	42.66	7.14	248.17	207.87
$P_{PV,26}$ (kW)	-	997.72	824.07	992.99	985.05
$P_{PV,30}$ (kW)	-	999.36	982.85	1000	1000
$P_{PV,33}$ (kW)	-	739.26	517.35	1000	1000

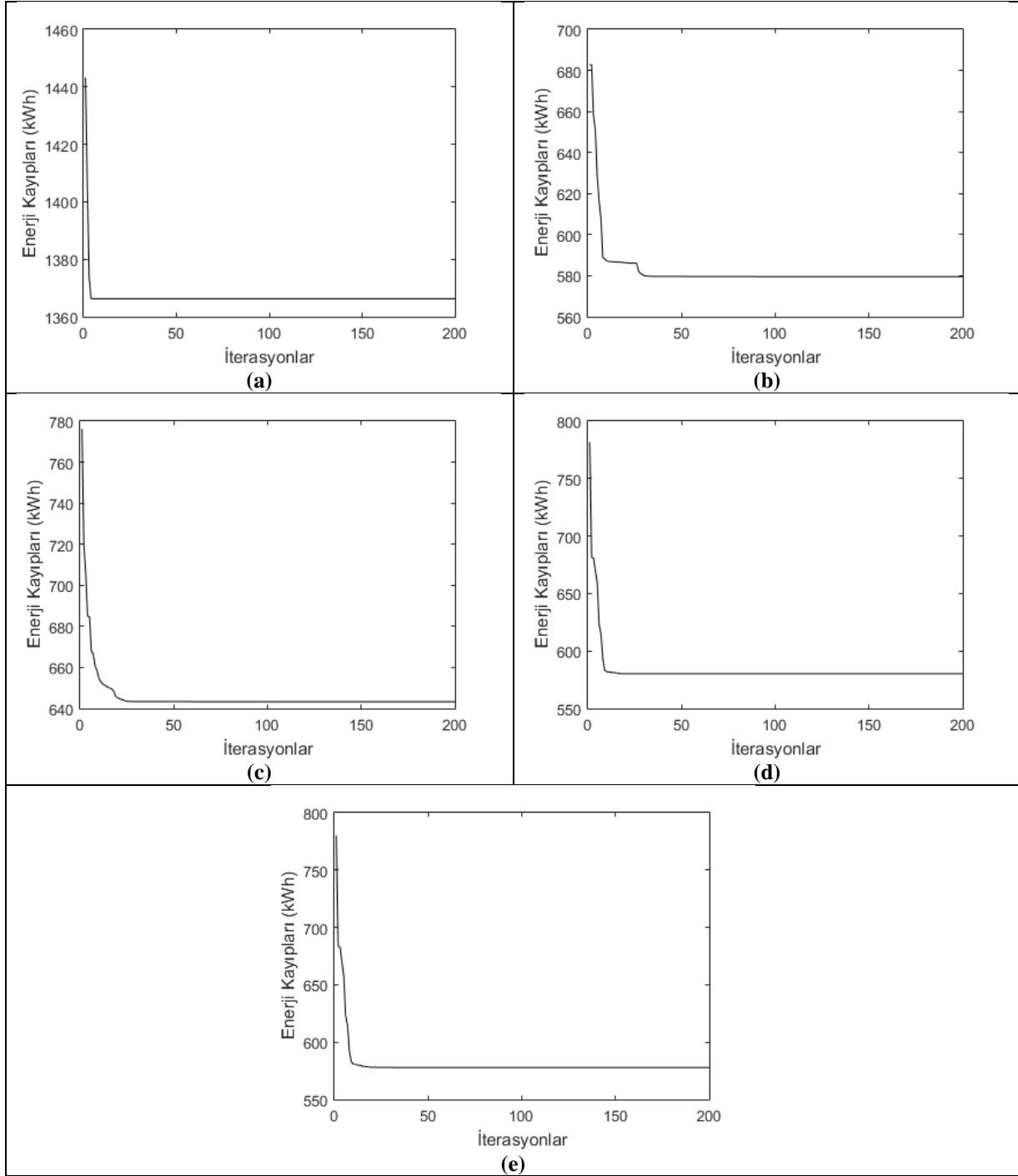
Tüm senaryolar için QPSO algoritması uygulandığında, hem amaç fonksiyonlarının yakınsamış optimal değerleri hem de simülasyon süreleri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5: Tüm senaryolarda QPSO yakınsaması

Senaryolar	Yakınsama	
	Zaman (s)	Amaç Fonksiyonu (kWh)
Senaryo 1	239.7406	1366.279
Senaryo 2	257.5295	579.571
Senaryo 3	253.2165	643.337
Senaryo 4	256.5862	580.248
Senaryo 5	250.6734	577.903

Toplam güç şebekesi enerji kayıpları olan amaç fonksiyonları, Şekil 6'da gösterilmektedir. Enerji kayıpları sırasıyla senaryo 1 için 1366.279 kWh, senaryo 2 için 579.571 kWh, senaryo 3 için 643.337 kWh, senaryo 4 için 580.248 kWh ve senaryo 5 için 577.903 kWh olarak minimize edilmiştir. Toplam şebeke kayıpları, senaryo 1'e göre sırasıyla senaryo 2'de % 57.58, senaryo 3'te % 52.91, senaryo 4'te % 57.53 ve senaryo 5'te % 57.70 oranında azaltılmıştır.

Teknik parametreler, tüm senaryolarda tekrarlı güç akışı analizi kullanılarak bütün yük, güneş ışınımı ve rüzgar hızı durumları için optimizasyon sonuçları test edilerek gözlemlenmiştir. Optimizasyon sonuçları test edilirken, optimizasyon işleminde ele alınan belirsizlik durumları tekrarlı güç akışı algoritmasında göz önünde bulundurulmuştur. Senaryo 5 için optimizasyon sonuçları test edildiğinde, bütün yük, güneş ışınımı ve rüzgar hızı belirsizlik durumları için dağıtım şebekesindeki bara gerilimleri Tablo 6'da gösterilmektedir. Bu çalışmada önerilen yaklaşım yardımıyla teknik parametrelerin limitleri içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Bütün senaryolarda, teknik limitler tüm durumlarda karar değişkenlerinin optimal değerleri için sağlanmıştır.



Şekil 6: (a) Senaryo 1, (b) Senaryo 2, (c) Senaryo 3, (d) Senaryo 4, (e) Senaryo 5 için iterasyonlara göre toplam enerji kayıpları

Tablo 6: Senaryo 5 için optimizasyon sonuçları test edildiğinde elde edilen bara gerilimleri

Bara	Durumlar									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.9986	0.9987	0.9986	0.9983	0.9989	0.9987	0.9986	0.9989	0.9984	0.9987
3	0.9940	0.9949	0.9950	0.9938	0.9964	0.9949	0.9958	0.9950	0.9943	0.9955

4	0.9939	0.9946	0.9952	0.9937	0.9972	0.9947	0.9964	0.9952	0.9940	0.9957
5	0.9942	0.9947	0.9958	0.9940	0.9983	0.9949	0.9975	0.9958	0.9942	0.9962
6	0.9955	0.9952	0.9970	0.9953	0.9997	0.9952	0.9993	0.9978	0.9948	0.9973
7	0.9950	0.9946	0.9963	0.9946	0.9991	0.9946	0.9988	0.9972	0.9942	0.9966
8	0.9765	0.9749	0.9754	0.9676	0.9792	0.9777	0.9711	0.9845	0.9705	0.9722
9	0.9751	0.9729	0.9751	0.9644	0.9790	0.9765	0.9695	0.9841	0.9691	0.9703
10	0.9801	0.9817	0.9701	0.9741	0.9771	0.9805	0.9678	0.9919	0.9670	0.9743
11	0.9802	0.9818	0.9702	0.9742	0.9772	0.9806	0.9679	0.9920	0.9671	0.9743
12	0.9805	0.9821	0.9705	0.9745	0.9775	0.9809	0.9682	0.9923	0.9674	0.9746
13	0.9814	0.9841	0.9680	0.9752	0.9768	0.9819	0.9657	0.9962	0.9648	0.9741
14	0.9820	0.9850	0.9673	0.9756	0.9767	0.9824	0.9650	0.9978	0.9640	0.9740
15	0.9723	0.9689	0.9744	0.9582	0.9784	0.9742	0.9665	0.9831	0.9663	0.9664
16	0.9720	0.9681	0.9748	0.9566	0.9789	0.9740	0.9661	0.9835	0.9659	0.9657
17	0.9707	0.9660	0.9748	0.9530	0.9791	0.9729	0.9646	0.9835	0.9645	0.9636
18	0.9711	0.9659	0.9758	0.9521	0.9803	0.9733	0.9647	0.9845	0.9647	0.9636
19	0.9973	0.9973	0.9970	0.9967	0.9976	0.9974	0.9969	0.9981	0.9966	0.9971
20	0.9871	0.9870	0.9845	0.9830	0.9874	0.9875	0.9827	0.9922	0.9823	0.9845
21	0.9841	0.9840	0.9809	0.9791	0.9844	0.9847	0.9787	0.9904	0.9782	0.9809
22	0.9825	0.9827	0.9775	0.9772	0.9819	0.9830	0.9753	0.9902	0.9746	0.9786
23	0.9898	0.9915	0.9912	0.9897	0.9929	0.9914	0.9922	0.9909	0.9908	0.9921
24	0.9814	0.9848	0.9837	0.9814	0.9858	0.9845	0.9851	0.9829	0.9837	0.9855
25	0.9764	0.9812	0.9794	0.9764	0.9821	0.9809	0.9814	0.9776	0.9799	0.9825
26	0.9962	0.9956	0.9976	0.9959	1.0004	0.9956	1.0001	0.9986	0.9952	0.9979
27	0.9959	0.9954	0.9973	0.9957	1.0002	0.9954	0.9998	0.9984	0.9950	0.9977
28	0.9954	0.9948	0.9968	0.9952	0.9997	0.9949	0.9994	0.9978	0.9944	0.9972
29	0.9749	0.9807	0.9785	0.9749	0.9814	0.9801	0.9807	0.9762	0.9792	0.9822
30	0.9750	0.9818	0.9791	0.9751	0.9823	0.9808	0.9815	0.9763	0.9801	0.9834
31	0.9697	0.9638	0.9745	0.9498	0.9793	0.9720	0.9628	0.9830	0.9630	0.9619
32	0.9701	0.9643	0.9750	0.9503	0.9798	0.9724	0.9633	0.9834	0.9635	0.9624
33	0.9715	0.9656	0.9764	0.9518	0.9811	0.9737	0.9646	0.9847	0.9650	0.9638

5 Sonuçlar

Bu makalede, PV ve WT kurulu güç şebekelerindeki toplam kayıpların ve optimal şebeke konfigürasyonlarının belirlenmesinde, çeşitli belirsizlik senaryolarının etkileri dikkate alınarak elektrik talebindeki değişkenlikler, güneş ışınımı ve rüzgar hızı ele alınmıştır. Yenilenebilir kaynakların güç sistemine entegrasyonu durumunda belirsizliklerdeki değişiklikler teknik konuları etkileyebilir. Bu çalışmada, yük tüketimlerdeki belirsizlikler ve PV ve WT kaynaklarındaki kesintiler ve güç kalitesi dikkate alınarak toplam şebeke kayıplarının en aza indirilmesi ve optimal şebeke konfigürasyonunun sağlanması amaçlanmaktadır. Bu nedenle enerji kayıplarında en önemli iyileşme güneş ışınımı, rüzgar hızı ve yük belirsizlikleri aynı anda dikkate alındığında gözlemlenmiştir. Bu bakımdan toplam güç sistemi enerji kayıplarının gözlemlenmesinin, planlamada teknik konuların belirsizlik dikkate alınarak değerlendirilmesi açısından hayati önem taşıdığını belirtmekte fayda vardır. Çalışma ile literatürün de yapılan çalışmaların karşılaştırmaları Tablo 1 de verilmiştir. Bu kapsamda çalışmada belirsizliklerin şebekede dikkate alınması durumunda konfigürasyonlarının değiştiği tespit edilmiştir. Yeniden yapılandırma planlamasında dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Sonuç olarak, elektrik yükleri gücü verimli bir şekilde tüketebilecektir. Elektrik şebekesinde toplam şebeke enerji kayıplarının teknik kısıtlamalarla birlikte doğru planlanmasının yapılması oldukça önemlidir. Simülasyon sonuçlarına göre, yenilenebilir enerji ünitelerinin dağıtım sistemlerine bağlanmasına bağlı olarak güç şebekesinin güvenlik sınırlarının önem kazanacağı düşünülmektedir.

6 Beyanname

6.1 Yazarların Katkıları

İbrahim Çağrı BARUTÇU: Makale için fikir geliştirme, sonuçlara ulaşma yöntemlerini planlama, sonuçların açıklanması ve sunumu için sorumluluk alma, literatür taraması sorumluluğunu alma, makalenin tamamının oluşturulmasında katkı sağlama.

Ali ERDUMAN: Makale için fikir geliştirme, sonuçlara ulaşma yöntemlerini planlama, sonuçların açıklanması ve sunumu için sorumluluk alma, literatür taraması sorumluluğunu alma, makalenin tamamının oluşturulmasında katkı sağlama.

Faruk AYGÜN: Makale için fikir geliştirme, sonuçlara ulaşma yöntemlerini planlama, sonuçların açıklanması ve sunumu için sorumluluk alma, literatür taraması sorumluluğunu alma, makalenin tamamının oluşturulmasında katkı sağlama

Kaynakça

- [1] J. Torres, J. L. Guardado, F. Rivas-Dávalos, S. Maximov, and E. Melgoza, "A genetic algorithm based on the edge window decoder technique to optimize power distribution systems reconfiguration," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 45, no. 1, pp. 28–34, 2013.
- [2] A. Saffar, R. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "A new fuzzy optimal reconfiguration of distribution systems for loss reduction and load balancing using ant colony search-based algorithm," *Appl Soft Comput*, vol. 11, no. 5, pp. 4021–4028, 2011.
- [3] S. H. Mirhoseini, S. M. Hosseini, M. Ghanbari, and M. Ahmadi, "A new improved adaptive imperialist competitive algorithm to solve the reconfiguration problem of distribution systems for loss reduction and voltage profile improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 128–143, 2014.
- [4] T. T. Nguyen and T. T. Nguyen, "An improved cuckoo search algorithm for the problem of electric distribution network reconfiguration," *Appl Soft Comput*, vol. 84, p. 105720, 2019.
- [5] H. Karimianfard and H. Haghghat, "An initial-point strategy for optimizing distribution system reconfiguration," *Electric Power Systems Research*, vol. 176, p. 105943, 2019.
- [6] M. Cikan and B. Kekezoglu, "Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 2, pp. 991–1031, 2022.
- [7] T. T. Nguyen and A. V. Truong, "Distribution network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 68, pp. 233–242, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.075.
- [8] T. Tran The, D. Vo Ngoc, and N. Tran Anh, "Distribution network reconfiguration for power loss reduction and voltage profile improvement using chaotic stochastic fractal search algorithm," *Complexity*, vol. 2020, pp. 1–15, 2020.
- [9] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohammed, S. F. Mekhamer, and M. A. L. Badr, "Distribution systems reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 11, pp. 1521–1530, 2009.
- [10] J. M. Home-Ortiz, R. Vargas, L. H. Macedo, and R. Romero, "Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in radial distribution systems considering voltage-dependent models," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 107, pp. 298–310, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.11.035.
- [11] M. Sedighzadeh and R. Bakhtiary, "Optimal multi-objective reconfiguration and capacitor placement of distribution systems with the Hybrid Big Bang–Big Crunch algorithm in the fuzzy framework," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 113–129, 2016.
- [12] A. O. Salau, Y. W. Gebru, and D. Bitew, "Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems," *Heliyon*, vol. 6, no. 6, 2020.

- [13] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Optimum network reconfiguration based on maximization of system loadability using continuation power flow theorem," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 54, pp. 123–133, 2014.
- [14] D. Das, "Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 5, pp. 331–338, 2006.
- [15] A. Lotfipour and H. Afrakhte, "A discrete Teaching–Learning–Based Optimization algorithm to solve distribution system reconfiguration in presence of distributed generation," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 82, pp. 264–273, 2016.
- [16] A. Azizvahed, H. Narimani, E. Naderi, M. Fathi, and M. R. Narimani, "A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration," *Energy*, vol. 138, pp. 355–373, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.102.
- [17] T. T. Nguyen, T. T. Nguyen, N. A. Nguyen, and T. L. Duong, "A novel method based on coyote algorithm for simultaneous network reconfiguration and distribution generation placement," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 665–676, 2021.
- [18] M. Sedighzadeh, M. Esmaili, and M. Esmaili, "Application of the hybrid Big Bang–Big Crunch algorithm to optimal reconfiguration and distributed generation power allocation in distribution systems," *Energy*, vol. 76, pp. 920–930, 2014.
- [19] B. Arandian, R. A. Hooshmand, and E. Gholipour, "Decreasing activity cost of a distribution system company by reconfiguration and power generation control of DGs based on shuffled frog leaping algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 61, pp. 48–55, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.03.001.
- [20] H.-J. Wang, J.-S. Pan, T.-T. Nguyen, and S. Weng, "Distribution network reconfiguration with distributed generation based on parallel slime mould algorithm," *Energy*, vol. 244, p. 123011, 2022.
- [21] R. Rajaram, K. Sathish Kumar, and N. Rajasekar, "Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 116–122, 2015, doi: 10.1016/j.egyr.2015.03.002.
- [22] J. Siahbalaee, N. Rezanejad, and G. B. Gharehpetician, "Reconfiguration and DG Sizing and Placement Using Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm," *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 16–17, pp. 1475–1488, 2019, doi: 10.1080/15325008.2019.1689449.
- [23] A. Shaheen, A. Elsayed, A. Ginidi, R. El-Schiemy, and E. Elattar, "Reconfiguration of electrical distribution network-based DG and capacitors allocations using artificial ecosystem optimizer: Practical case study," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 8, pp. 6105–6118, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.11.035.
- [24] A. Jafar-Nowdeh *et al.*, "Meta-heuristic matrix moth–flame algorithm for optimal reconfiguration of distribution networks and placement of solar and wind renewable sources considering reliability," *Environ Technol Innov*, vol. 20, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.101118.
- [25] S. Nikkhah and A. Rabiee, "Multi-objective stochastic model for joint optimal allocation of DG units and network reconfiguration from DG owner's and DisCo's perspectives," *Renew Energy*, vol. 132, pp. 471–485, 2019.
- [26] R. Fathi, B. Tousi, and S. Galvani, "A new approach for optimal allocation of photovoltaic and wind clean energy resources in distribution networks with reconfiguration considering uncertainty based on info-gap decision theory with risk aversion strategy," *J Clean Prod*, vol. 295, p. 125984, 2021.
- [27] A. Zidan and E. F. El-Saadany, "Distribution system reconfiguration for energy loss reduction considering the variability of load and local renewable generation," *Energy*, vol. 59, pp. 698–707, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.06.061.
- [28] R. V. A. Monteiro, J. P. Bonaldo, R. F. da Silva, and A. S. Bretas, "Electric distribution network reconfiguration optimized for PV distributed generation and energy storage," *Electric Power Systems Research*, vol. 184, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106319.
- [29] E. Hooshmand and A. Rabiee, "Energy management in distribution systems, considering the impact of reconfiguration, RESs, ESSs and DR: A trade-off between cost and reliability," *Renew Energy*, vol. 139, pp. 346–358, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.02.101.

- [30] Z. Li, S. Wang, Y. Zhou, W. Liu, and X. Zheng, "Optimal distribution systems operation in the presence of wind power by coordinating network reconfiguration and demand response," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 119, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105911.
- [31] L. W. De Oliveira, F. D. S. Seta, and E. J. De Oliveira, "Optimal reconfiguration of distribution systems with representation of uncertainties through interval analysis," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 83, pp. 382–391, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.04.020.
- [32] W. Guan, Y. Tan, H. Zhang, and J. Song, "Distribution system feeder reconfiguration considering different model of DG sources," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 68, pp. 210–221, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.023.
- [33] M. J. Sanjari and H. Karami, "Optimal control strategy of battery-integrated energy system considering load demand uncertainty," *Energy*, vol. 210, p. 118525, 2020.
- [34] S. Huang and O. Abedinia, "Investigation in economic analysis of microgrids based on renewable energy uncertainty and demand response in the electricity market," *Energy*, vol. 225, p. 120247, 2021.
- [35] T. M. Alabi, L. Lu, and Z. Yang, "Stochastic optimal planning scheme of a zero-carbon multi-energy system (ZC-MES) considering the uncertainties of individual energy demand and renewable resources: An integrated chance-constrained and decomposition algorithm (CC-DA) approach," *Energy*, vol. 232, p. 121000, 2021.
- [36] J. Sun, B. Feng, and W. Xu, "Particle swarm optimization with particles having quantum behavior," in *Proceedings of the 2004 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 04TH8753)*, IEEE, 2004, pp. 325–331.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).