

Wearable Exoskeleton: A Review

Çağatay ERSİN^{*}, a Mustafa YAZ^b

Çankırı Karatekin University, Vocational High School Çankırı/ Turkey^a

Bozok University Engineering and Architecture Faculty Electrical and Electronics Engineering Yozgat/ Turkey^b

Abstract: With the development of technology, considerable steps have been taken in the last few years on wearable technology. As a result of these studies, wearable technology products have become accessible to meet the needs of people in their daily lives. Wearable outer skeleton used as wearable technology products are wearable electromechanical structures that interact with human structures. These structures are used for people with walking disabilities or in older people, assisted structure, rehabilitation in paralyzed people and power increase in healthy people. The fact that the design and control of the exoskeleton robots is very close to the human body's biomechanical functioning and nerve-muscle control will maximize the performance of these wearable exoskeleton robots. Studies on wearable exoskeleton The structure and control of exoskeleton robots are listed and explained in this review. Furthermore, the development of wearable exoskeleton structures is also provided.

Keywords: Wearable Technology, Control, Robot, Servo, Emg Sensor, Microcontroller.

Wearable Exoskeleton: A Review

Özet: Teknolojinin gelişmesiyle beraber son birkaç yılda giyilebilir teknoloji konusunda oldukça büyük adımlar atılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda giyilebilir teknoloji ürünleri insanların günlük hayatlarındaki ihtiyaçlarını karşılamada ulaşılabilir bir hal almıştır. Giyilebilir teknoloji ürünü olarak kullanılan giyilebilir dış iskelet insan yapıları ile birlikte etkileşim halinde çalışan, giyilebilir elektromekanik yapılardır. Bu yapılar, yürüme engeli bulunan ya da yaşlı insanlarda yardımcı yapı, felçli insanlarda iyileştirme ve sağlıklı insanlarda güç artırımı amacı ile kullanılmaktadır. Dış iskelet robotların tasarımının ve kontrolünün insan vücudunun biyomekanik işleyişi ve sinir-kas kontrolü ile çok yakın olması bu giyilebilir dış iskelet robotlarının performansını en üst seviyelere çıkaracaktır. Giyilebilir dış iskelet ile ilgili çalışmalar dış iskelet robotlarının yapısı ve kontrolü bu derlemede listelenmiştir ve açıklanmıştır. Ayrıca giyilebilir dış iskelet yapılarının geliştirilebilirliği de ek olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Giyilebilir Teknoloji, Kontrol, Robot, Servo, Emg Sensörü, Mikrodenetleyici.

Reference to this paper should be made as follows (bu makaleye aşağıdaki şekilde atıfta bulunulmalı):
Ç. Ersin, M. Yaz, 'Wearable Exoskeleton: A Review', Elec Lett Sci Eng, vol. 15 no. 1, (2019), 1-11

1. Introduction

Producers who want to create difference with increasing competition after industrial revolution give more importance to technology element. Wearable technologies are innovative products created with the help of technology and it can be considered as one of the most important technological elements of the 21st century. These technologies, which are integrated with the clothing used and the accessories used, information and communication technology and the products that transfer data to the smart devices with the help of sensors in their systems. Wearable technology products and markets are developing with many disciplines. In addition to important areas such as health, education, production, and security, it is now taking place in almost all elements, even in an ordinary field such as performing daily activities [1].

Over the past few years, many attempts have been made the wearable exoskeleton system. The wearable exoskeleton integrates the human body and a mechanical robot as a single system. The user wears on the body of this skeletal system and this system works with the body. Today, wearable exoskeleton robots have begun to develop and become widespread in areas that can

^{*} Corresponding author; Tel+(90) 506 292 17 03, cagatyersin@karatekin.edu.tr

serve people. In addition, the application areas of these robots are increasing day by day. User-oriented robots can be used in the field of transport to transport load in the military areas that require power. In addition, these robots are also used in the healthcare field to provide physical support to direct the orbit of their movement to assist patients with movement loss [2]. In this article, wearable exoskeleton systems which are wearable technology products and their controls and utilization areas are examined.

2. Wearable Technology

Technology is constantly developing as a decisive factor in the lives of individuals and becomes an integral part of the daily experience of consumers. In the most general sense, there is a fact about daily devices that can send and receive data over the Internet. Among these new technologies, the most prominent technology group is wearable technologies. Today, when the existence of internet technologies of objects is examined, it is seen that the most widely used devices are wearable technology products. [3]. With the development of technology and contraction of the electronic circuits, not only computers and smartphones, but also the clothes and accessories used in daily life, sensors and hardware can be converted into a smart device and can communicate among themselves. For this reason, the user can easily perform data exchange and calculation without the need for larger computers, because the electronic circuits installed on his body or the clothes he can wear can gain the ability of calculation and communication. Integrating information and communication technologies into a garment or fabric is the most important goal in the development of wearable systems [6]. Since the 2000s, it has gained a prominent place among the smart textile, textile and apparel sectors [7]. Wearable technology is becoming more evident in the market and wearable technology products are now becoming part of everyday life [8]. Use of wearable technology; health, exercise, training, transportation, finance, play and music. The purpose of these devices is to incorporate functional, portable electronic devices and computers into their daily lives. Wearable devices are examined before entering the consumer market, have a major impact on military technology and health. These devices provide information such as the monitoring of physical functions and the acquisition of biological methods by technological methods [4]. In addition to developing sensor sizes (Micro Electro Mechanical Systems, MEMS), with the development of low-power connections and embedded operating systems, sensor technology has gained a new dimension and networks of sensors that collect information from different parts. [5]. While the process of creating wearable technology is a purely technical matter, it requires collaboration between end-users and professionals in many different fields, such as textile, electronics, fashion, design and manufacturing, and takes into account many aspects [15].

3. Wearable Exoskeleton

Determination of human walking movement has always been a difficult problem for medical professionals, engineers and mathematicians. Humanoid robots, which are wearable technology products in daily life, need to be kept close to human to help human activities. Due to its complexity, it is very difficult to develop a model of the lower extremity support system in which human walking patterns can be applied. To achieve this, it is necessary to simplify the high degree of freedom complex model of gait movement. To overcome these problems, many researchers have formed a biped robot model in their theoretical and experimental studies. In the design of the lower extremity support system, there are various constraints such as joint angle range limitation, limb kinematics, joint angle speed limitation, contact between the connections. The initial process of walking is examined by biomechanical analysis of mechanical recordings using pressure plates. Thus, the dynamics of human walking movement can be analyzed. Human

walking movement is composed of dynamic movements in the side, front and upright planes. To obtain a complete walking motion of the bipedal gait, gait analysis should be performed in two or more planes. The walking motion is mainly located in the sagittal plane. The bipedal gait pattern in the sagittal plane is similar to human gait. All biped robots have the most splices in this plane. [9]. Exoskeleton robot should have the same structure with human body, and therefore study of the mechanism of human lower limb movement is essential [20]. Analysis of the most common daily living activities are used in the construction of exoskeleton robots. By means of this analysis, the amount of force and movement limits that the wearable exoskeleton robot can produce is determined. These robots can perform daily living activities with 10 to 15 N of power and free movement [18]. In addition, these robots change the hardness and damping in the joints they are connected to provide a flexible and stable movement with minimal energy consumption [19]. With the developing technology, the size of sensors, actuators and control units used in the exoskeleton systems diminish and their power increases. Despite the rapid progress in the design and technology of the exoskeleton system, there is limited data on the human physiological response to its use. However, it is possible to determine the torque and power requirements by determining the desired kinematics and range of motion of the joints [9].

3.1. Purpose Of The Wearable Exoskeleton

Exoskeleton robots are wearable electromechanical structures that work in interaction with human limbs. These robots are now available in many areas. Military, health It is widely used in education and transportation areas. The sensors that are on the soldier and can be defined as wearable sensors are the group which includes personal health status, operational environment, combat field identification, sensors. Passive acoustic firing sensors, health monitoring sensors, directed energy threat sensors, positioning sensors, active camouflage sensors and shielded exoskeleton structure are the main examples of this group [12]. Wearable exoskeleton robots are also widely used in healthcare. Technologies in health care provide two ways to achieve better health outcomes. First of all, by improving the quality of life and prolonging the life span, it provides a direct improvement of health outcomes. Secondly, it plays an auxiliary and curative role in the movement of patients with mobility disabilities [14]. The exoskeleton robot is expressed as a structure that supports the user and protects it from the outside environment. Exoskeleton robots that can be worn by the user help increase the ability to provide support and load bearing to the user. Over the past few years, upper arm training devices have been developed to help patients rehabilitate and treat patients suffering from loss of arm movement or descending stroke [34]. In addition, these robots are used in walking disability or elderly persons for assistive limb, rehabilitation in paralyzed people and for increasing power in healthy individuals. The interaction forces between the human-exoskeleton robot must be minimized. For this purpose, the dynamic analysis and kinetics of the human lower limb joints with an exoskeleton robot should be performed appropriately [21]. The design and control of exoskeleton robots will be similar to the human body's biomechanical functioning and nerve-muscle control, which will maximize the performance of these robots. The nerve-muscle system of the human body provides a flexible and safe mobility with minimal energy consumption by continuously changing the stiffness of the joints. Nowadays, studies on hardness changeable actuator designs are continuing rapidly. The major ones of these designs are antagonistic and prestressed actuator designs. Exoskeleton robots are mobile systems that work with equipment such as batteries and should be energy efficient and the power requirements of the engines to be used in design should be kept to a minimum. [13]. Thus, an easier movement situation is provided [40].

The use of wearable exoskeleton robots in different sectors around the world is becoming widespread. In many countries, especially Japan, these robots are used in the construction sector. It is widely used in the transport of heavy loads and construction materials [24].

In biomechanical applications, human movements must be measured very precisely. Biomechanical disease is used to monitor physiological functions and to collect data related to them, in order to identify malfunctions resulting from aging, accidents, and stresses. On the other hand, it can be used in the treatment and rehabilitation of living systems, design of prosthesis and artificial organs, examination of anatomical structures and identification of functions [17].

3.2. Structure of Wearable Exoskeleton Robots

The human body's nerve-muscle system, stiffness-modifying actuators (soft actuators) have significant advantages in minimizing the impact of sudden high forces on energy storage / release, safe interaction with elements in their design. Nowadays, studies on the designs of smaller sizes are continuing. These actuators can be grouped when viewed. These are regulated actuators, controlled actuators, and mechanical actuators, which are regulated by antagonistic controlled actuators, equilibrium controlled actuators. It can be changed by changing the hardness of the actuators can be set [20]. In order to provide movement and power support, the skeleton body attached to the user from certain points must be compatible with human anatomy as well as adequate degree of freedom and range of motion in order not to cause any discomfort to the user. However, the skeleton body must be durable enough to carry the loads. The actuators providing the forces and moments required to achieve the desired movements at the desired speed should be as small and light as possible due to the design requirements. In some exoskeleton applications; electric motors, hydraulic cylinders, pneumatic cylinders etc. Many active actuators can be used such as spring; damper etc. passive actuators are also used [10]. In some of the studies, it was evaluated by walking analysis (CGA) which includes angles, torque and power graphs generated by measurements taken on human to obtain information about human joint movements, limb lengths and movement characteristics. The motion range and power requirements of each hinge were examined and preliminary preparation was made for the design phase. Large-capacity actuators are required for the foot joint due to the large torque requirement in the foot joint during the walk [22]. In the actuator design arranged by the transmission ratio, the stiffness of the actuator can be adjusted by changing the transmission ratio between the spring and the outlet and the balance position of the system can be controlled by a second motor. In this embodiment, no energy is required to change the hardness as no force is applied to the pedestrian at the equilibrium point. In this design, the position of the pivot and spring points on the movement arm mechanism is constant, and the position of the force application point can be controlled by adjusting the hardness. It is understood that it is more appropriate to use actuators regulated by the transmission rate in terms of minimum energy consumption and minimum power requirement in the exoskeleton robots supplied with energy needs [23]. In the different exoskeleton studies, "polycaprolactone" polymer material which does not contain any toxic substances, which is recyclable in nature (which is soluble in soil) and which can be resilient with heat is used. Dc servo motor (mini servo) as the actuator and the "Arduino Uno" card as the control card [16]. Many wearable exoskeleton robots were examined in the scanned literature. Another exoskeleton robot made in the structure of the user's back part of the user by powerful dc motor movements were performed. In this structure, the tendons of the robot transmit the torque generated by the motor. When the motor starts to rotate, it gives a torque to the connection points on the shoulders and the knees, and a single dc motor is located on the back and moves on the joints of the person [25].

3.3. Yield on Wearable Exoskeleton Robots

Performance in exoskeleton robots is an important concept. The availability and efficiency of these robots should be high. To achieve optimal performance in exoskeleton robots;

- ✚ Exoskeleton robots should be anthropomorphic and ergonomic not only in shape but also in function. The human lower limb should have a similar structure. Thus, the user should provide comfortable walking.
- ✚ The status of the common positions of human movements and the distribution of degrees of freedom should be examined and formed according to the data obtained.
- ✚ The number of actuators and sensors must be high enough. Thus, the movement will be more active.
- ✚ The cost of the exoskeleton robots should be low.
- ✚ The length of the limbs in the exoskeleton structure should be adjustable. Both the lower and upper parts of the robot should be set in a wide range, so users with different physical properties can use it.
- ✚ The exoskeleton should be firm and light. The structure of the metal exoskeleton must support heavy loads.
- ✚ The exoskeleton robot must have a stable control mechanism.
- ✚ The energy of the robot should be long-lasting and self-rechargeable [26].
- ✚ Perform the soft and continuous walking movement which is compatible with clinical gait analysis data and be able to meet the required speed and torque requirements
- ✚ It should be in a structure that will not harm the user in terms of the risks related to mechanical and electrical hazards and provide the necessary safety conditions. [11].

3.4. Wearable Exoskeleton Control

The control methods used in the exoskeleton applications vary according to the externals and the input signals available from the user. Input signals required for the controller; encoders, force sensors, pressure sensors, EMG sensors, accelerometers etc. many standard measuring elements. In some applications where standard measuring elements are not sufficient, specially designed sensors are used to measure the required input signals.

The use of a portable power unit is required to ensure that the power needs of the external frameworks, actuators and other electronic equipment, which are intended to be used in external environments, are sufficient for a sufficient period of time [10]. In the design of the exoskeleton systems, two control methods have been tried. The first one is the control method by ground response force (PTC) using PID controller. Another is the network-based fuzzy logic control method. It is calculated by the controller that the force should be applied to the cylinders according to the measured ground reaction force by means of force sensors placed in the shoe in the intended ETC control architecture. The force applied by the load cell connected to the

hydraulic cylinder shaft is measured by the controller and made error correction [22]. In an exoskeleton development, an effective control strategy and activation scheme is very important. A successful overall approach at the level of decision-making and execution should be applied to optimization of control efficiency. The hierarchical control scheme for the control of autonomous beeping has three stages. These stages are hiking planning, walking choice and walking synthesis [26]. The design of the exoskeleton should be appropriate to combine the skills of the human and the exoskeleton and to increase the exoskeleton activity, allowing each to perform tasks in a simplified manner. There are some basic requirements for control strategy. These;

- ✚ Optimized actuator, number of sensors and control scheme should be as simple as possible.
- ✚ Machine learning is necessary for adaptation to terrain and external conditions [27].

The movement of the muscle in the human body consists of three modes. These are active mode, passive mode and free mode. Active mode also produces muscle contraction. In passive mode, muscle relaxation occurs. In free mode, the muscular release oscillates. With the pressure sensors to be added to the user, the pressure signal cannot be measured in free mode and the exoskeleton can disturb the movement of the user. The joint angular velocity method is used to solve this problem in free mode. When the pressure sensor detects the contraction of the muscle, it transmits it to the motor via the control mechanism and starts operating from the motor joints [28]. The torque generated by the engine is transmitted through the joints [29]. Another important aspect of these robots is wearability and kinematic compatibility, testing. [35]. The exoskeleton was constructed using an exoskeleton made of aluminum sheets in a different exoskeleton study due to the fact that plastic and iron are not extremely heavy. Sensors (EMG) are located where muscle movements are evident [37]. A human body is divided into two main parts: the upper extremities and the lower extremities. In these regions, the upper extremities DOF (Degrees of Freedom); 1. DOF wrists, 2.DOF elbows, 3.DOF shoulder. Thus, the upper extremities have a total of 6-DOF The pluggable robot is connected to the human body through the exoskeleton, and the rotation centers of the wearable robot must be adapted to the human center rotation centers. In particular, it is difficult to adapt the shoulder joints of the exoskeleton to the rotational centers of the human body, because a human shoulder joint is spherical. And, it is difficult to generate the command signal in the robot, because the collective movement of the human arm has many DOFs. For the correct placement of the motor placement on the shoulders. it is necessary to select a specific motor placement parameter. [30]. If the force of the motors in the joints is not sufficient, additional torque control is required for stronger movement to these zones. [31, 32].

The emergency button is included in the wearable exoskeleton robots in case of emergencies or when out of control [33]. Another important aspect of these robots is wearability and kinematic compatibility testing. [35]. Modes are selected to enable the operator to control a robot. Thanks to these modes, torque is produced according to the required forces and energy efficiency is ensured. [36] The exoskeleton is constructed using aluminum sheets due to the fact that plastic and iron are not extremely heavy. Sensors (EMG) are located where muscle movements are evident [37]. In developed exoskeleton systems, free movement is allowed in cases where robot does not require active effort. [38] In these robots, muscle activity is derived from the bioelectric signals detected on the surface of the muscles, and the torque produced by the actuators is calculated from the estimated joint torque [39]. The local ELM algorithm can be applied to the

outer frame to determine the desired movements for the elbow joint [41]. The device needs to be compact and easy to wear. External Motors are small and fixed, the weight of the exoskeleton is reduced by structural optimization [42]. The robot should not give the user unbearable weight. The exoskeleton robot must produce natural movements. With the user does not feel any vibration in the upper limb, jerk or sudden movement change. Small-size high-torque actuators are required to develop such a high-power-to-weight ratio of exoskeleton systems [46]. The weight of the exoskeleton systems should be low. To ensure this, units such as sensors, actuators and power supplies used in exoskeleton systems must be light. It is possible to say that these units can be used more efficiently by reducing their size. Technological advances that will arise in the measurement sensitivity for sensors, the increase of the force / mass ratio for the actuators and the increase in the feed time / mass ratio for the power supplies will enable the development and expansion of the exoskeleton robots [44]. The traditional neuro-fuzzy control method was used to control the exoskeleton in different studies [43]. The design of the exoskeleton system is based on the suitability of the human to the anatomical structure in accordance with the biomechanical rules. Another important criterion is that the system can stand and the motors and electrical elements that will be used on the system during the movement do not affect [45].

4. Discussion and Conclusion

In the scanned literature, it was observed that many researchers from different countries were working on wearable exoskeleton system. These studies were carried out in different areas. Designed to be used in areas such as military, health construction, exoskeleton robots. In addition, only the arms, legs and whole body studies were determined in these studies. In the scanned literature, it was seen that wearable exoskeleton robot, which is a wearable technology product, performed in different control mechanisms. Structures such as PID control, Fuzzy logic, Neuro-fuzzy control method are used. It has been determined that different types of engines are used for different purposes in wearable exoskeleton structures. It is observed that servo motors are preferred in high power structures and dc motors are preferred in the exoskeleton robots that need to provide motion only. Microcontrollers such as arduino and pic have also been used to provide control. When the scanned literature is taken into consideration, the wearable exoskeleton robot can be worn for easy operation, lengthening of the length of the user according to the user, making it a light and durable material, having a long-lasting energy requirement and having a self-charging structure and using light and powerful motors the rate of movement should be high. In addition, wearable exterior framed robots can be designed to provide full body control in subsequent studies. A long-lasting structure can occur. Energy can be created with a structure that can renew itself. It can also be controlled by microcontrollers that can respond more quickly. In addition, these robots can be made of a lighter and more durable material, considering the application areas.

Referanslar

1. Çakır, S., F., Aytekin, A., Tüminçin, F., Nesnelerin İnterneti Ve Giyilebilir Teknolojiler (2018) I. Uluslararası Sosyal Araştırmalar Ve Davranış Bilimleri Sempozyumu, Antalya. Türkiye.
2. Viteckova, S. Kutilek,P. Jirina,M., Wearable Lower Limb Robotics: A Review (2013) Biocybernetics And Biomedical Engineering, Prague, Czech Republic.

3. Marangoz, M., Aydın, A., E., Tüketicilerin Giyilebilir Teknoloji Ürünlerinin Benimsemesinde Etkili Olan Faktörler: Akıllı Saatler Üzerine Bir Araştırma (2017) 22. Pazarlama Kongresi Muğla, Türkiye.
4. Sağbaş E.A, Ballı, S., Yıldız, T., Giyilebilir Akıllı Cihazlar: Dünü, Bugünü Ve Geleceği, 18. Akademik Bilisim Konferansı, Aydın Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye.
5. Bostancı, E., Medikal Alanda Kullanılan Giyilebilir Teknolojiler: Uygulamalar, Karşılaşılan Sorunlar Ve Çözüm Önerileri (2015) Www.Researchgate.Net Erişim Tarihi: 08.11.2018.
6. Yetmen, G. (2017). Giyilebilir Teknoloji. Ulakbilge, Www.Ulakbilge.Com 5 (9), S.275-289. Erişim Tarihi: 14.11.2018.
7. Giyilebilir Teknolojiler, Uludağ İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği Ar&Ge Şubesi Mayıs, 2017.
8. Özgüner Kılıç, H., Giyilebilir Teknoloji Ürünleri Pazarı Ve Kullanım Alanları (2017) Aksaray Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi Aksaray, Türkiye.
9. Toygar, E., M., Özkurt, A., Kırallı, Z., Çakmakçı, M., Kırallı, B., G., Şenol, Y., Akkan, T., Arman, Y., Olcay, T., Dağhan, N.M., Karagöz, M., İnsan Bacak Hareketleri İçin Prototip Dış İskelet Robotik Sisteminin Mekanik Tasarımı Ve Hareket Verilerinin Yapay Sinir Ağları İle Elde Edilmesi Www.Saujs.Sakarya.Edu.Tr Erişim Tarihi 17.11.2018.
10. Önen, Ü İnsan Yürüyüşünü Destekleyici Dış İskelet Tasarımı Ve Kontrolü, Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Haziran-2011 Konya.
11. Şahin, Y., Yük Taşıyan İnsan Yürüyüşünü Destekleyici Alt Ekstremitte Dış İskelet Geliştirilmesi, Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Kasım 2014 Konya Türkiye.
12. Karakoç, M., Giyilebilir Bilişim Sistemlerinin Askeri Uygulamalarının Tsk'da Tek Er Seviyesinde 2023 Yılı İçin Tanımlanması, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü Mayıs 2016 Ankara, Türkiye.
13. Kızılhan, H., Başer, Ö., Kılıç, E., Ulusoy, N., Dış İskelet Robot Eklemleri İçin Antagonistik Ve Öngerilmeli Tip Sertliği Değiştirilebilir Eyleyici Tasarımlarında Güç Gereksinimi Ve Enerji Sarfıyatı Karşılaştırması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2014 Isparta, Türkiye.
14. Demirci, Ş., Giyilebilir Teknolojilerin Sağlık Hizmetlerine Ve Sağlık Hizmet Kullanıcılarına Etkileri, Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 2018.
15. Aydan, S., Aydan, M., Sağlık Hizmetlerinde Bireysel Ölçüm Ve Giyilebilir Teknoloji: Olası Katkıları, Güncel Durum Ve Öneriler, Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi, 2016 Ankara, Türkiye.
16. Canlıdınç, M., Güleşen, M., Botsalı, F., M., İşaret Parmağı Hareketini Taklit Eden Eksik Tahrikli Dış İskelet Geliştirilmesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2018 Bilecik Türkiye.

17. Kurban, T., Beşdok, E., İnersiyal Algılayıcı Tabanlı Hareket Yakalama ,
Www.Researchgate.Net Erişim Tarihi;02.12.2018.
18. Iqbal, J., Nikos G. Tsagarakis, Darwin G. Caldwell, Design Of A Wearable Direct-Driven Optimized Hand Exoskeleton Device, ACHI 2011 : The Fourth International Conference On Advances In Computer-Human Interactions.
19. Demiray,M., A., Başer*,Ö., Kılıç, E., Alt Uzuv Dış İskelet Robot Eklemlerinde Kararlılık İçin Sönümlleme Katsayıları Ve Momentlerinin Hesaplanması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (2014).
20. Chen, C.,Vd., Flexible Design of a Wearable Lower Limb Exoskeleton Robot, International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) Shenzhen, China, December 2013.
21. Başer,Ö., Şekerci, B., Kızıllhan,H., Kılıç, E., İnsan Ve Alt Uzuv Dış İskelet Robotun Matlab Simmechanics Ortamında Modellenmesi Ve Etkileşim Kuvvetlerinin Minimize Edilmesi Kontrol Çalışması, Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi, 2018.
22. Şahin, Y., Botsal, F.,M., Kalyoncu, M.,Tıncır, M.,Önen, Ü., Yılmaz, N.,Çakan, A.,Baykan, Ö., K., Sirtında Yük Taşıyan Yayanın Yürüyüşünü Destekleyen Alt Ekstremitte Dış İskeletin Kontrolü Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, 14-17 Haziran 2015.
23. Kızıllhan, H., Başer, Ö., Kılıç, E., Ulusoy, N., Dış İskelet Robot Eklemleri İçin Antagonistik Ve İletim Oranı İle Düzenlenen Sertliği Değiştirilebilir Eyleyici Tasarımlarının Güç Gereksinimi Ve Enerji Sarfıyatı Açısından Karşılaştırılması, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, 14-17 Haziran 2015.
24. Umetani, Y., Yamada, Y., Morizono, T., Yoshida, T., Aoki., S, "Skil Mate", Wearable Exoskelton Robot,İeeexplore.İeee.Org Erişim Tarihi: 04:12:2018.
25. Naruse, K., Vd., Development Of Wearable Exoskeleton Power Assist System For Lower Back Support, Proceedings Of The 2003 IEEWRSJ Intl. Conference On Intelligent Robots And Systems Las Vegas, Nevada. 2003.
26. Yang,C.Y., Niu, B.,Chen, Y., Adaptive Neuro-Fuzzy Control Based Development Of A Wearable Exoskeleton Leg For Human Walking Power Augmentation, Proceedings Of The 2005 IEEE/ASME International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July, 2005.
27. Low, K. H Xiaopeng,L., Haoyong, Y., Development Of NTU Wearable Exoskeleton System For Assistive Technologies, Proceedings Of The IEEE International Conference On Mechatronics & Automation Niagara Falls, Canada • July 2005.
28. Kyoungchul, K., Doyoung,J., Design And Control Of An Exoskeleton For The Elderly And Patients, Ieee/Asme Transactions On Mechatronics, Vol. 11, No. 4, August 2006.
29. Rocon , E., One The Use Of An Active Wearable, Exoskeleton For Tremor Suppression Via Biomechanical Loading, Proceedings Of The 2006 IEEE International Conference On Robotics And Automation Orlando, Florida - May 2006.

30. Heedon, L., Vd., Development Of Human-Robot Interfacing Method For Assistive Wearable Robot Of The Human Upper Extremities, SICE Annual Conference August 20-22 2008 , The University Electro-Communications, Japan.
31. Ueda,J.,Vd., Individual Muscle Control Using An Exoskeleton Robot For Muscle Function Testing, IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING, VOL. 18, NO. 4, AUGUST 2010.
32. Ying Mao, Sunil K. Agrawal Wearable Cable-Driven Upper Arm Exoskeleton - Motion With Transmitted Joint Force And Moment Minimization, IEEE International Conference On Robotics And Automation Anchorage Convention District May 3-8, 2010, Anchorage, Alaska, USA.
33. Rahman, M., R., Cartesian Trajectory Tracking Of An Upper Limb Exoskeleton Robot, IEEE 2012.
34. Agrawal, S., Vd., Upper Arm Wearable Exoskeleton, United States Patent. 2 April 2013, USA.
35. Cempini, M., Vd., Kinematics And Design Of A Portable And Wearable Exoskeleton For Hand Rehabilitation, IEEE International Conference On Rehabilitation Robotics June 24-26, 2013 Seattle, Washington USA.
36. Folgheraiter, M., Measuring The Improvement Of The Interaction Comfort Of Awearable Exoskeleton, Int J Soc Robot (2012).
37. Tageldeen, M., K., I. Elamvazuthi Perumal, N., Motion Control For A Multiple Input Rehabilitation Wearable Exoskeleton Using Fuzzy Logic And PID, IEEE Advanced Motion Control April 22-24,2016 Auckland New Zealand.
38. Cappello, L., Vd., Design And Preliminary Characterization Of A Soft Wearable Exoskeleton For Upper Limb, 6th IEEE RAS/EMBS International Conference On Biomedical Robotics And Biomechatronics (Biorob) June 26-29, 2016. Utown, Singapore.
39. Hassan, M., Vd., Wearable Gait Measurement System With An Instrumented Cane For Exoskeleton Control, Sensors 2014.
40. Ko,C., Y., Vd., New Wearable Exoskeleton For Gait Rehabilitation Assistance Integrated With Mobility System, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing, JULY 2016.
41. Dinh, B., K., Cappello, L., Masia, L., Localized Extreme Learning Machine For Online Inverse Dynamic Model Estimation In Soft Wearable Exoskeleton, 6th IEEE RAS/EMBS International Conference On Biomedical Robotics And Biomechatronics (Biorob) June 26-29, 2016. Utown, Singapore.
42. Hsieh, H., C., Chien, L., Lan, C.,C., Mechanical Design Of A Gravity-Balancing Wearable Exoskeleton For The Motion Enhancement Of Human Upper Limb, 2015 IEEE International Conference On Robotics And Automation (ICRA) Washington State Convention Center Seattle, Washington, May 26-30, 2015.

43. Kiguchi, K., Esaki, R., Fukuda, T., Development Of A Wearable Exoskeleton For Daily Forearm Motion Assist, Advanced Robotics 2012.
44. Kocaoğlu, S., Akdoğan, E., Üst Uzuv Dış İskelet Rehabilitasyon Robotları Exoskeleton Robots For Rehabilitation Of The Upper Limb, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'2015, 10-12 Eylül 2015, Denizli.
45. Ülker, O., Tatar, Y., Kaplanoğlu, E., Yürüme Zorluğu Çeken İnsanlar İçin Bir Alt Ekstremitte Destek Sisteminin Mekanik Tasarımı Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'2015, 10-12 Eylül 2015, Denizli.
46. Gopura, R., , Kiguchi, K., Bandara, D., Brief Review On Upper Extremity Robotic Exoskeleton Systems, 2011 6th International Conference On Industrial And Information Systems, ICIIIS 2011, Aug. 16-19, 2011, Sri Lanka.

Solar Energy Potential in the World and Turkey, Current Status, Incentives, Installation Cost Analysis-Karabuk Province Sample

Ediz DELİHASANLAR^{1*}, Ersagun Kürşat YAYLACI¹, Adem DALCALI²

¹Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabuk University, Karabuk / Turkey

²Department of Electronics and Communication Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bandirma Onyedü Eylül University, Bandirma, Balıkesir / Turkey

Abstract: Increasing energy demand and environmental concerns resulting from the use of fossil fuels have increased the tendency towards renewable energy sources in electricity generation. Solar energy is one of the renewable energy sources and share of it's in energy production is increasing day by day. It has important potential in energy production. In this study, literature studies on the topic of solar energy have been examined and the studies have been classified according to their fields. The potential of solar energy has been examined and it has been evaluated in terms of Turkey and the World. In addition, future term forecasts for solar energy usage are emphasized in terms of Turkey and the World. The incentives related to solar energy in Turkey have been examined and cost analysis has been carried out for the installation of an unlicensed small-scale solar power plant for Karabuk. In the cost analysis, the changes in the amortization period have been evaluated before and after the change in the purchase prices in 2018.

Keywords: Solar power plant, cost analysis, Karabuk

Dünyada ve Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli, Mevcut Durumu, Teşvikleri, Kurulum Maliyeti Analizi-Karabük İli Örneği

Özet: Artan enerji talebi ve fosil yakıt kullanımından kaynaklanan çevresel kaygılar, elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan ve enerji üretimindeki payı gün geçtikçe artan güneş enerjisi, enerji üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, güneş enerjisi alanındaki literatür çalışmaları incelenerek, çalışmaların hangi alanlarda yoğunlaştığı belirlenmiştir. Güneş enerjisi potansiyeli incelenerek bu potansiyelin Dünya ve Türkiye'de ne kadar karşılık bulunduğu değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra güneş enerjisi kullanımına ilişkin Dünya ve Türkiye'deki gelecek dönem tahminleri üzerinde durulmuştur. Türkiye'deki güneş enerjisine ilişkin teşvikler incelenmiş ve Karabük ili için lisanssız küçük güçlü bir güneş enerjisi santralının kurulumu için maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Maliyet analizinde, 2018 yılında yapılan alım fiyatları değişikliğinin öncesi ve sonrası değerlendirilerek amorti süresinde meydana gelen farklılık ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerji santrali, maliyet analizi, Karabük,

Reference to this paper should be made as follows (bu makaleye aşağıdaki şekilde atıfta bulunulmalı):

E. Delihasanlar, E.K. Yaylacı, A. Dalcalı 'Solar Energy Potential in the World and Turkey, Current Status, Incentives, Installation Cost Analysis-Karabuk Province Sample', Elec Lett Sci Eng , vol. 15, no. 1 , (2019), 12-20

1. Giriş

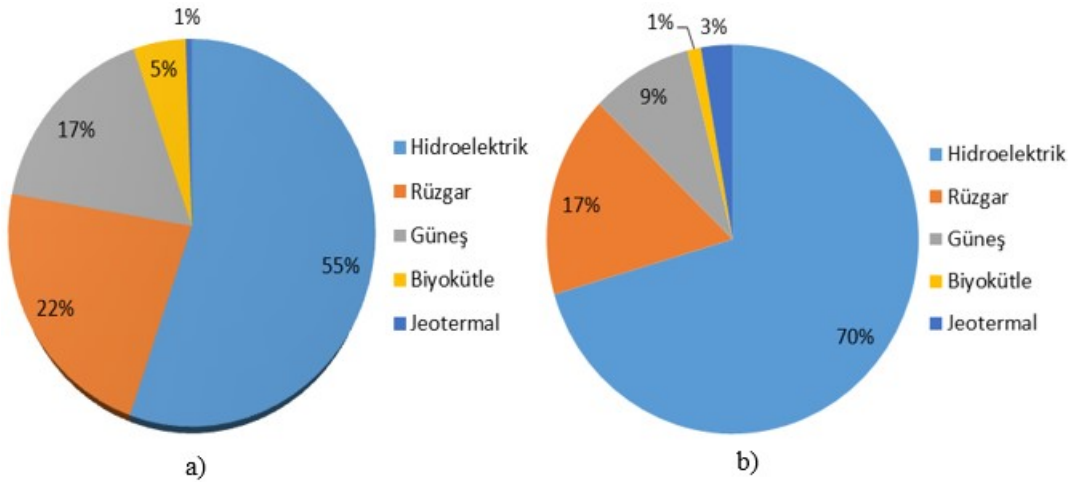
Azalan fosil yakıt kaynakları ve buna karşın artan çevresel endişeler nedeniyle elektrik enerjisinin arzı günümüzde en önemli konulardan birisi haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) bu sorunlar karşısında önemli bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürdürülebilir enerji diye de adlandırılan yenilenebilir enerji; zamanla kendi kendini yineleyen enerji olarak düşünülmektedir. Başlıca YEK'ler hidroelektrik, biyokütle, jeotermal, hidrojen, dalga, gelgit, güneş ve rüzgâr olarak verilebilir. 2017 yılsonu itibariyle dünyada YEK'ler Kurulu güçlerine göre Şekil-1a'da verilmiştir.

*Corresponding author; Tel.: 0 370 418 7050 edizdelihasanlar@karabuk.edu.tr

Şekil 1a'dan görüleceği üzere, YEK'ler arasında temel yaşam kaynağı olarak da bildiğimiz güneş enerjisi %17 ile önemli bir potansiyele sahiptir [1].

Çevresel kaygıların yanı sıra, enerji talebini büyük oranda ithalat ile gerçekleştiren Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için enerjide bağımsızlık önem arz etmekte ve ülkelerin kendi kendine yetebilme kabiliyetini büyük oranda belirleyebilmektedir. Bu anlamda değerlendirildiğinde Türkiye gibi ülkeler için YEK'ler büyük önem taşımaktadırlar. 2018 yılında Türkiye özelinde bu konu ile ilgili bir çalışma yapılmış ve detaylı bir inceleme sunulmuştur [2].

Geçtiğimiz on yılda Türkiye ekonomisi ortalama %5 oranında büyüme kaydetmiş ve bu durum enerji talebine de yansımıştır. Türkiye'de 1970-2017 yılları arasındaki elektrik üretimi incelendiğinde 2001 ve 2009 kriz yılları haricinde sürekli bir yükseliş eğiliminde olduğu görülmektedir. 2017 yılına ait üretim ise 295 TWs olarak gerçekleşmiştir. Ocak 2017-Temmuz 2018 döneminde gerçekleşen elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde doğalgaz %35, hidroelektrik %21, ithal kömür %18,3 ve rüzgârın %6,22 olduğu görülmektedir [3], [4]. Ayrıca 2017 yıl sonu itibarıyla Türkiye'de YEK'lerin kendi aralarında kümülatif kurulu güç paylaşım oranları Şekil-1b ile sunulmuştur.



Şekil-1. a) Dünya'da, b) Türkiye'de YEK'lerin kaynaklara göre kurulu güç paylaşım oranı

Hem Dünya hem de Türkiye açısından YEK'ler içerisindeki güneş enerjisinin önemi akademik çalışmalarda da karşılık bulmuştur. Literatürde yapılan 2018 yılı değerlendirme (review) çalışmalarına bakıldığında güneş enerjisi üzerine yapılan birçok çalışmanın olduğunu görmek mümkündür. Bu çalışmaları genel olarak; boyutlandırma ve fizibilite [5]–[7], depolama sistemleri [6]–[8], güneş ışınımı kestirimi [9]–[11], değişik tipteki güneş enerjisi uygulamalarının enerji ve ekserji analizleri [12]–[14], güneş takip sistemleri [15]–[19], politik çerçeveler ve gelecek beklentileri [7], [20]–[22], güneş enerjisi panellerinin verimleri [23]–[25] ve maksimum güç noktasının takibi [26] konuları olarak sınıflandırmak mümkündür.

Bu çalışmada güneş enerjisinin elektrik enerjisi olarak kullanımı göz önüne alınmış ve termal ya da diğer tip uygulamaları kapsam dışı tutulmuştur. Öncelikle, güneş enerjisinin potansiyeli incelenerek bu potansiyelin Dünya ve Türkiye'de ne kadar karşılık bulunduğu değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra güneş enerjisi kullanımına ilişkin Dünya ve Türkiye'deki gelecek dönem tahminleri üzerinde durulmuştur. Türkiye özelinde güneş enerjisine ilişkin teşvikler incelenmiş ve Karabük ili için lisanssız küçük güçlü bir güneş enerjisi santralının kurulumu için maliyet

analizi gerçekleştirilmiştir. Maliyet analizinde, 2018 yılında yapılan alım fiyatları değişikliğinin öncesi ve sonrası değerlendirilerek amorti süresinde meydana gelen farklılık ortaya konulmuştur.

2. Dünya’da ve Türkiye’de Mevcut Durum

Dünyada elektrik üretiminde fosil yakıtların kullanımı %76 iken YEK’lerin kullanımı %24 ile sınırlı kalmaktadır. Güneş enerjinin kullanımı ise bu %24’lük dilimin sadece %2’lik kısmını oluşturmaktadır [27]. Dünyada güneş enerjisi ile elektrik üretimi şebeke bağlantılı sistemler dikkate alındığında Çin Halk Cumhuriyeti 102470MW (Haziran 2017) kurulu gücü ile lider konumdadır. İkinci Japonya 42750MW (Aralık 2016) ve üçüncü Almanya 42710 MW (Ekim 2017) kurulu güce sahiptir. Türkiye ise 2246 MW (Kasım 2017) kurulu gücü ile 15. sırada yer almaktadır [28].

Türkiye’de mevcut ve devreye alınan güneş enerji santralleri ile elektrik üretimi artarak devam etmektedir. Güneş enerjisinden 2014 yılı Ocak-Mayıs döneminde 4,5 GWs üretim yapılırken 2015’in aynı döneminde 32,3 GWs, 2016’nın aynı döneminde 266,6 GWs ve 2017’nin aynı döneminde 844,56 GWs üretime ulaşılmıştır [29]. Güneş enerji santralleri sayısı incelendiğinde 2014 yılında işletmeye alınan santral sayısındaki büyüme oranı bir önceki yıla göre %223 olarak gerçekleşirken, bunların tamamı lisanssız üreticiler tarafından oluşmuştur [30]. 2018 yılı Mayıs ayı sonu itibariyle lisanssız elektrik kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı Çizelge 1’de verilmiştir [31].

Çizelge 1. Lisanssız elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı

Kaynak türü	Kurulu güç (MW)	Oran (%)
Güneş (Fotovoltaik)	4358,51	96,64
Doğalgaz	121,92	2,54
Biyokütle	79,18	1,65
Rüzgâr	46,20	0,96
Hidrolik	8,69	0,18
Güneş (Yoğunlaştırılmış)	1	0,02

Türkiye’de 2016 yılında cari açık 33,1 milyar dolar ve 2017 yılı cari açığı 47,1 milyar dolar olarak gerçekleşmiştir. Gerçekleşen bu cari açıkların büyük bir bölümünü enerji ithalatı oluşturmaktadır [32]. Ülkemizde enerji ithalatında kullanılan yakıtlar ise petrol, doğalgaz ve ithal kömür gibi fosil yakıtlardan oluşmaktadır. Diğer taraftan Türkiye’de karbondioksit yayılımları 1990 yılından bu yana %141,6 artmış ve büyük şehirlerde yerel hava kirliliğine neden olabilecek düzeylere ulaşmıştır [33]. Hem cari açığın azaltılması hem de karbon yayılımının azaltılması ülkemizde YEK’lerin kullanımını oldukça önemli kılmaktadır.

Ülkemizde, enerji sektöründe özel sektör tarafından gerçekleştirilen enerji üretim tesisleri sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Özel sektörün elektrik üretimindeki payı 2002’de %40,2 iken 2016 yılı sonunda yaklaşık %83 düzeyindedir [34]. Bu yatırımlarda verilen devlet teşviklerin payının büyük olduğu kaçınılmazdır. Bu yatırımlarla enerji kaynaklarındaki çeşitlilik artırılmış, enerji güvenliği sağlanmış ve enerji ithalatı önlenerek cari açığın daha fazla büyümesi engellenmiştir. Ülkemizde 2018 yılında gerçekleştirilen enerji yatırımları incelendiğinde yatırımların %55 civarında hidroelektrik santrallere, %15’nin rüzgâr enerjisine ve %0,54’nün de güneş enerjisi üzerine olduğu görülmektedir [35].

3. Güneş Enerjisinin Geleceği ve Türkiye'deki Teşvikler

Dünya Enerji Konseyi'nin öngörüsüne göre 2060 yılına kadar YEK'lerdeki gelişim; güneş ve rüzgârın liderliğinde elektrik enerjisi üretimini yönlendirecektir. İyimser senaryoya göre rüzgâr ve güneş sistemlerinden elektrik üretiminin payı %39, kötümser senaryoda ise %20 olarak öngörülmüştür [36].

Türkiye'nin mevcut jeopolitik konumu dikkate alındığında enerji sektöründe Avrupa ile Asya arasında önemli bir enerji kavşağı konumundadır. Dolayısıyla mevcut ekonomik büyümeyi sürdürebilmek, sanayisinin enerji ihtiyacını ve güvenliğini karşılamak için önemli reformlar gerçekleştirmek zorundadır. Bu bağlamda Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti Vizyon 2023 hedeflerini göz önünde bulundurarak 2013 yılında 6446 nolu kanunu çıkarmış ve yenilenebilir enerji yatırımlarının önünü açmıştır. Vizyon 2023'e göre Türkiye enerji alanında yerli enerji kaynaklarının teşvik edilmesini ve yenilenebilir enerjinin payını %30'a çıkarmayı hedeflemektedir [33]. Türkiye'nin 2017 yılı sonunda güneş enerjisi kurulu gücü 1700MW iken 2019 yılında 3000 MW ve 2023 yılında da toplam kurulu gücün 5000 MW çıkması hedeflenmektedir [37]. Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli düşünüldüğünde bu hedefin gayet gerçekçi olduğu aşikârdır. Fakat rüzgar, güneş vb. süreksiz enerji kaynaklarının şebeke entegrasyonu bir diğer problemdir. Bu sebeple artan yenilenebilir enerji üretiminin şebeke ile entegrasyonu konusunda dikkat edilmelidir.

2023 yılında Türkiye'nin enerji yoğunluğunun 2011 yılı değerine göre en az %20 azaltılması hedeflenmektedir. Bu amaçla Enerji ve Tabii Kaynaklar bakanlığının 2012-2023 Enerji Verimliliği Strateji Belgesinde belirtildiği üzere YEK'leri kullanan sürdürülebilir çevre dostu binaları yaygınlaştırmak stratejik amaç olarak belirlenmiştir [38]. Ayrıca Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planına göre, birincil enerji tüketiminin azaltılması ile 2033 yılına kadar sağlanacak kümülatif tasarruf 30,2 milyar ABD Doları olup bazı tasarrufların etkisinin 2040 yılına kadar devam etmesi öngörülmüştür [39]. Bu stratejik planlara uygun olarak daha önceden elektrik ihtiyacının büyük bir bölümünü kurduğu 300 kW gücündeki güneş enerji santralinden sağlayan İzmir/Bornova Belediyesi yenilenebilir enerji kaynağı kullanan binalardan her türlü belediye işlerinde %25 vergi indirimini sağlamaktadır [40]. Türkiye'de, YEK'lerin Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin kanun hükümlerince teşvik belgesinde KDV ve gümrük muafiyeti bulunmaktadır. Ek olarak, güneş tarlasının kurulacağı arazi konusunda da devlet teşviki bulunmaktadır. Ayrıca güneş enerjisinden üretilen elektriğin birim kWh için 0,133 \$ bedel ile devlet alım garantisi mevcuttur [30].

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, yerli ve milli üretim hedefleri doğrultusunda hem yerli kaynakların kullanımı hem de yerli üretim teknolojisine sahip olmak için yenilenebilir enerji kaynak alanları kullanım hakkı yarışmaları düzenlenmektedir. Bu yarışmalar ile güneş, rüzgâr gibi YEK'lerin kullanımı arttırılarak enerji arz güvenliği ve çeşitliliği sağlanması amaçlanmaktadır.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Karabük ili için 10 kW kurulu gücünde bir güneş enerjisi tesisinin maliyet analizi yapılmıştır. Aşağıda verilen hesaplamalar bakım maliyetleri göz ardı edilerek ve çok ince hesaplar ile karmaşıklığa neden olmamak için kabaca yapılmıştır. Avrupa Komisyonu fotovoltaiik coğrafi bilgi sistemi kullanılarak Karabük ili 10 kW'lık şebeke bağlantılı güneş enerjisi tesisi performans analizi alınmıştır ve Çizelge 2'de verilmiştir [41].

Çizelge 2. Güneş enerjisi üretim tahminleri

Hesaplaması Yapılan Enlem	41.206.037	En Uygun Eğim Açısı	33°
Hesaplaması Yapılan Boylam	32.659.209	Azimut Açısı	0°
PV Teknolojisi	Kristal Silikon	Yıllık PV Enerji Üretimi	13600 kWh
Kurulu Tepe PV Gücü [kWp]	10 kW	Yıllık Düzlem Radyasyon	1750 kWh/m ²
Sistem Kaybı	%14		

Karabük ili için sabit açılı PV sisteminden aylık enerji çıkışı (kWh) değerleri, aylık m² başına düşen ortalama güneş radyasyonu (kWh/m²) ve aylık yüzdesel standart sapma değerleri detaylı bir şekilde Çizelge 3'te verilmiştir [41].

Çizelge 3. Aylık PV enerjisi ve güneş radyasyonu

Aylar	Aylık Ortalama Elektrik Üretimi (kWh)	Aylık m ² Başına Düşen Ortalama Güneş Radyasyonu (kWh/m ²)	Aylık Standart Sapma (%)
Ocak	613	73,4	14,80
Şubat	820	99,6	20,00
Mart	1060	131	6,19
Nisan	1290	165	9,69
Mayıs	1410	185	7,59
Haziran	1420	190	9,15
Temmuz	1620	218	4,52
Ağustos	1600	215	5,06
Eylül	1320	173	10,76
Ekim	1020	130	15,69
Kasım	819	101	12,94
Aralık	586	70,5	13,48

Uluslararası yenilenebilir enerji ajansı tarafından yapılan çalışmada güneş enerji tesisi için gereken toplam yatırım bedelleri 2010 yılında 4394 \$/kW iken 2017 yılında 1388 \$/kW olarak hesaplanmıştır [42]. 2018 yılında panel hücreleri fiyatlarında yaklaşık %30 düşme meydana gelmiştir [43]. Gelişen teknolojiyle birlikte maliyetin daha da düşeceği öngörülmektedir. 10 kW güneş enerjisi tesisi için toplam yatırım maliyeti, yaklaşık %30 fiyat düşüşü dikkate alınarak hesaplanan 971,6 \$/kW bedel kullanılarak (1) denkleminde verildiği gibi hesaplanabilir.

$$10 \times 971,6 = 9716 \$ \quad (1)$$

Üretilen elektrik enerjisinin tüketim yapılmaksızın tamamının şebekeye verilmesi halinde; eskiden ödenen 0,133 \$/kWh alım bedeli ve Karabük ili yıllık PV enerji üretimi 13600 kWh değerine göre kurulacak sistemin yıllık geliri;

$$0,133 \times 13600 = 1808 \$ \quad (2)$$

olmaktadır. Fakat güneş enerji santrallerinin verimi; sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişmektedir. Üretilen elektrik enerjisi verimi, güneş modüllerinin ve dizilerinin bozulması ile azalmaktadır. Literatürde güneş panellerinin ilk 10 yıllık süreçte etiket değerlerinde belirtilen gücün %90'ı ve 10 yıldan sonra 25 yıla kadar da %80'i kadar güç ürettiği kabul edilmektedir [44]. İlk 10 yıl için %90 güç verimliliği esas alındığında yıllık gelir;

$$1808 \times 0,90 = 1627 \$ \quad (3)$$

elde edilmektedir. Buna göre Karabük ili için 10 kW gücünde bir güneş santrali düşünüldüğünde sistemin ürettiği elektrik enerjisinin tüketim olmaksızın sadece şebekeye aktarılması ile birlikte yatırım maliyetini çıkarması için gereken süre;

$$9716/1627=5,97 \quad (4)$$

yıl olarak hesaplanmıştır. 21.06.2018 Resmi Gazetede yayınlanan YEK'lere dayalı üretim faaliyeti gösteren tesisler için uygulanacak fiyat ve süreler ile yerli katkı ilavesine ilişkin kararname değişikliğe gidilmiştir. "Elektrik üretim tesislerinde üretilen ihtiyaç fazlası enerjisi için Enerji Piyasası Denetleme Kurumu (EPDK) tarafından ilan edilen kendi abone grubuna ait perakende tek zamanlı aktif enerji bedeli, tesisin işletmeye giriş tarihinden itibaren on yıl ile uygulanır" hükmüyle birlikte destek miktarı ve süresi değişmiştir. Yapılan değişikliklere göre yatırım maliyeti hesaplamasında EPDK tarafından onaylanan 01.01.2019 tarihinden itibaren uygulanacak faaliyet bazlı tarifeler bilgisi ve abone türüne göre hesaplamalar yapılmıştır. Üretilen elektrik enerjisinin tüketilmeden şebekeye aktarımı veya üretilen enerjinin yaklaşık olarak tamamının tüketilmesi şeklinde iki ayrı senaryo düşünülerek maliyet analizi yapılmıştır. İlk olarak üretilen elektrik enerjisinin üretici tarafından yaklaşık olarak hiç tüketim olmaksızın şebekeye verilmesi ve yeni yasa doğrultusunda güncellenen birim kWh alım bedeli dikkate alınarak abone türü bazında amortisman süresi Çizelge 4'te verilmiştir. Hesaplamalarda USD dönüşümü Türkiye Cumhuriyet Merkez bankası 07.03.2019 verileri baz alınarak yapılmıştır (1 USD =5,44 TL).

Çizelge 4. Abone Türüne Göre Üretilen Elektrik Enerjinin Sadece Şebekeye Verilmesi Durumunda Amortisman Süresi

Abone Türü	Bedeli (Kuruş)	USD Dönüşümü	İlk 10 Yıllık Gelir (USD)	10 Yıl Sonrası Yıllık Gelir (USD)	Tesis Maliyet (USD)	Amorti Süresi (Yıl)
Sanayi	38,0866	0,0700	856,95	761,73	9716	11,51
Ticarethane	41,5009	0,0763	933,77	830,02	9716	10,46
Mesken	27,9098	0,0513	627,97	558,20	9716	16,16
Tarımsal Sulama	37,4452	0,0688	842,52	748,90	9716	11,72

Diğer senaryoda ise üretilen elektrik enerjisinin tamamının üretici tarafından tüketilmesi durumu değerlendirilerek amortisman süresi hesaplanmış ve Çizelge 5 ile sunulmuştur.

Çizelge 5. Abone Türüne Göre Üretilen Enerjinin Tamamının Üretici Tarafından Tüketilmesi Durumunda Amortisman Süresi

Abone Türü	Bedeli (Kuruş)	Kullanım Miktarı Yıllık (kWh)	Yıllık Fatura Miktarı TL (Bütün vergiler ve eklentiler dahil)	USD Dönüşümü	Tesis Maliyet (USD)	Amorti Süresi (Yıl)
Sanayi	0,38087	13600	9072,57	1667,75	9716	5,83
Ticarethane	0,41501	13600	9664,28	1776,52	9716	5,47
Mesken	0,2791	13600	7308,71	1343,51	9716	7,23
Tarımsal Sulama	0,37445	13600	8961,30	1647,30	9716	5,90

Çizelge 5, üretilen enerjinin tamamının üretici kısmında tüketilmesi sebebiyle hem 2018 alım bedeli değişikliği öncesi hem de sonrası için geçerlidir. Yapılan tüm hesaplamalarda abone türü, vergiler ve bütün eklentiler dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

5. Sonuç

Bu çalışmada güneş enerjisi alanında yapılan akademik çalışmaların hangi alanda yoğunlaştığını belirlemek için literatürdeki birçok değerlendirme çalışmaları incelenmiş ve konu bazında çalışmalara değinilmiştir. Güneş enerjisinin elektrik enerjisi potansiyeli, Dünya’da ve Türkiye’de kurulu güç oranları ve gelecek dönem için güneş enerjisi kurulu gücünde meydana gelebilecek artış üzerinde incelemeler yapılmıştır. Ayrıca Karabük ili için lisanssız küçük güçlü bir güneş enerjisi santralının kurulumu için maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. 2018 yılında yapılan alım fiyatları değişikliğinin öncesinde yatırım için amorti süresi; üretilen enerjinin tamamının şebekeye satılması durumunda 5,97 yıl olarak hesaplanmıştır. Enerjinin tamamının üretici santral tarafında tüketilmesi durumunda ise abone türüne göre 5,47 ile 7,23 yıl amorti süresi olduğu bulunmuştur. Özellikle mesken abonelikleri için değişiklik öncesi üretilen enerjinin, tüketilmesinden ziyade şebekeye satılması durumunda amorti süresinin yaklaşık 1,26 yıl daha az olacağı hesaplanmıştır. 2018 yılında yapılan alım bedeli değişikliğinin ardından hesaplan amorti süresi ise tamamının şebekeye aktarılması durumunda abone türüne göre 10,46 ile 16,16 yıl olurken üretilen enerjinin tamamının üretici tarafından tüketilmesi durumunda ise 5,47 ile 7,23 yıl arasında olacağı belirlenmiştir. Dolayısıyla yapılan alım bedeli değişikliği sonrasında, amorti süresi bakımından üretilen enerjinin tamamının üretici tarafından tüketilmesi gibi bir zorunluluk ortaya çıkmıştır. Aksi halde amorti süresinin yatırımcı bakımından avantajını kaybedeceği görülmüştür.

Referanslar

- [1] (IRENA), I. R. E. A., “Renewable capacity statistics 2018”, Abu Dhabi, 2018.
- [2] Ozcan, M., “The role of renewables in increasing Turkey’s self-sufficiency in electrical energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2629–2639, 2018.
- [3] Tanbay, T., Kara, Y. A., Karademir, A., “Türkiye’nin Enerji Yapısı”, in *International Congress of Energy Economy And Security*, 2018, 159–177.
- [4] “<http://www.enerjiatlasi.com/elektrik-uretimi/>”, *Türkiye Elektrik Üretimi*, 2018.
- [5] Abdelrazik, A. S., Al-Sulaiman, F. A., Saidur, R., Ben-Mansour, R., “A review on recent development for the design and packaging of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95(December 2017), 110–129, 2018.
- [6] Settino, J., Sant, T., Micallef, C., Farrugia, M., Spiteri Staines, C., Licari, J., Micallef, A., “Overview of solar technologies for electricity, heating and cooling production”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 892–909, 2018.
- [7] Khan, F. A., Pal, N., Saeed, S. H., “Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 937–947, 2018.
- [8] Pandey, A. K., Hossain, M. S., Tyagi, V. V., Abd Rahim, N., Selvaraj, J. A. L., Sari, A., “Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 281–323, 2018.
- [9] Yıldırım, H. B., Çelik, Ö., Teke, A., Barutçu, B., “Estimating daily Global solar radiation with graphical user interface in Eastern Mediterranean region of Turkey”, *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews, 82, 1528–1537, 2018.
- [10] Jadli, U., Thakur, P., Shukla, R. D., “A new parameter estimation method of solar photovoltaic”, IEEE Journal of Photovoltaics, 8(1), 239–247, 2018.
- [11] Scolari, E., Sossan, F., Paolone, M., “Photovoltaic-model-based solar irradiance estimators: Performance comparison and application to maximum power forecasting”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 9(1), 35–44, 2018.
- [12] Sansaniwal, S. K., Sharma, V., Mathur, J., “Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 1576–1601, 2018.
- [13] Singh, B., Murshid, S., “A grid-interactive permanent-magnet synchronous motor-driven solar water-pumping system”, IEEE Transactions on Industry Applications, 54(5), 5549–5561, 2018.
- [14] Jia, Y., Alva, G., Fang, G., “Development and applications of photovoltaic–thermal systems: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 102, 249–265, 2019.
- [15] AL-Rousan, N., Isa, N. A. M., Desa, M. K. M., “Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2548–2569, 2018.
- [16] Benda, D., Chu, X., Sun, S., Quek, T. Q. S., Buckley, A., “PV cell angle optimisation for energy arrival-consumption matching in a solar energy harvesting cellular network”, IEEE International Conference on Communications, 2(1), 40–48, 2017.
- [17] Beniwal, N., Hussain, I., Singh, B., “Control and operation of a solar PV-battery-grid-tied system in fixed and variable power mode”, IET Generation, Transmission & Distribution, 12(11), 2633–2641, 2018.
- [18] Pandey, S. K., Kumar, S., Singh, B., “LCO-FLL control for single-phase utility integrated single-stage solar PV system”, IET Renewable Power Generation, 12(16), 1941–1948, 2018.
- [19] Hafez, A. Z., Yousef, A. M., Harag, N. M., “Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 754–782, 2018.
- [20] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., Kim, K. H., “Solar energy: Potential and future prospects”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 894–900, 2018.
- [21] Gökgöz, F., Güvercin, M. T., “Energy security and renewable energy efficiency in EU”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 96, 226–239, 2018.
- [22] Shahsavari, A., Akbari, M., “Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, 275–291, 2018.
- [23] Fathabadi, H., “Effect of external AC electric and magnetic fields on the power production of a silicon solar cell”, IEEE Journal of Photovoltaics, 8(6), 1408–1412, 2018.
- [24] Chen, Y., Altermatt, P. P., Chen, D., Zhang, X., Xu, G., Yang, Y., Wang, Y., Feng, Z., Shen, H., Verlinden, P. J., “From laboratory to production: Learning models of efficiency and manufacturing cost of industrial crystalline silicon and thin-film photovoltaic technologies”, IEEE Journal of Photovoltaics, 8(6), 1531–1538, 2018.
- [25] Husain, A. A. F., Hasan, W. Z. W., Shafie, S., Hamidon, M. N., Pandey, S. S., “A review of transparent solar photovoltaic technologies”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 779–791, 2018.
- [26] Ahmad, R., Murtaza, A. F., Sher, H. A., “Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 82–102, 2019.
- [27] Yildirim, B., Özdemir, M. T., “Turkey and World Trends 2017 in Photovoltaic Applications”, International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences, 2, 1–6, 2018.

- [28] “<http://www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-gunes-enerjisi.html>”, *Ülkelere Göre Güneş Enerjisi*.
- [29] “<http://www.enerjiatlası.com/haber/gunes-enerjisi-ile-elektrik-uretimi-3-kat-artti>”, *Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretimi*.
- [30] SEZAL, L., “Evaluation of the Solar Energy Investments in Turkey from Behavioral Finance”, *The Journal of International Social Research*, 10(51), 1117–1125, 2017.
- [31] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, “Elektrik Üretim Sektör Raporu”, Ankara, 2018.
- [32] Ertürk, O., Ertürk, A. E., “Türkiye’de Yenilebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretimi ve Cari Açık Üzerindeki Etkisi”, in *International Conference on Economic and Social Impacts of Globalization and Future of Turkey-EU Relations*, 2018, 103–113.
- [33] International Energy Agency, “Energy Policies of IEA Countries, Turkey”, 2016.
- [34] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü”, 2017.
- [35] “<http://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Enerji-Yatirimlari>”, 2018.
- [36] Onat, N., “Türkiye’de Yenilenebilir Kaynaklardan Elektrik Enerjisi Üretimi: Mevcut Durum ve Gelecek Beklentileri”, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 1(1), 8–15, 2018.
- [37] Alcan, Y., Demir, M., Duman, S., “Sinop province’s Solar Power Generation Potential in comparison with our country and Germany”, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 5(1), 35–44, 2018.
- [38] T.C. Yüksek Planlama Kurulu, *Enerji Verimliliği Strateji Belgesi*. Türkiye: Resmi Gazete, 2012, 1–15.
- [39] Enerji, M., “Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı”, Türkiye, 2018.
- [40] Belediyesi, B., “<https://www.bornova.bel.tr/yenilenebilir-enerji-kullananlar-belediye-ucetlerini-yuzde-25-indirimli-odeyecek/>”, 2018.
- [41] “https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html”, *Avrupa Komisyonu Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi*, 2019.
- [42] IRENA (2018), “Renewable Power Generation Costs in 2017”, Abu Dhabi, 2018.
- [43] “<https://www.seia.org/research-resources/solar-market-insight-report-2018-q4>”, *U.S. Solar Market Insight Executive Summary Q4*.
- [44] Mani, M., Pillai, R., “Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124–3131, 2010.

Investigation of Current-Force Relationship in an Electromagnetic Launcher

Adem DALCALI^{*}, Onursal ÇETİN¹, Feyzullah TEMURTAŞ¹

¹Department of Electronics and Communication Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bandırma Onyedli Eylül University, Bandırma, Balıkesir / Turkey

Abstract: In electromagnetic launchers, the projectile location information is required. Particularly in sequential winding systems, position information is provided by using additional devices for de-energizing a winding and energizing the next winding. In alternating current powered launcher systems, projectile position can be estimated from current changes without the need for an additional device. In this study, the design of coil and projectile suitable for use in electromagnetic launcher systems has been realized with the help of computer aided design programs. The projectile position is defined as variable and the change of force and winding current on the projectile is determined by finite element method. The relationship between the current difference and the force is determined according to the position.

Keywords: Electromagnetic launcher, position detection, finite element method

Bir Elektromanyetik Fırlatıcıda Akım-Kuvvet İlişkisinin İncelenmesi

Özet: Elektromanyetik fırlatıcılarda merminin konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle, ardışık bobinli sistemlerde bir bobinin enerjisinin kesilip sıradaki bobinin enerjilendirilmesi için ek düzenekler kullanılarak konum bilgisi sağlanmaktadır. Alternatif akım ile beslenen fırlatıcı sistemlerinde mermi konumu ek bir düzeneğe ihtiyaç kalmadan akım değişimlerinden kestirilebilir. Bu çalışmada, elektromanyetik fırlatıcı sistemlerinde kullanıma uygun bobin ve mermi tasarımı bilgisayarlı analiz programları yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Mermi konumu değişken olarak tanımlanmış ve üzerindeki kuvvet ve sargı akımı değişimi sonlu elemanlar metodu ile tespit edilmiştir. Konuma göre akım farkı ile kuvvet arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik fırlatıcı, konum tespiti, sonlu elemanlar metodu

Reference to this paper should be made as follows (bu makaleye aşağıdaki şekilde atıfta bulunulmalı):

A. Dalcalı, O. Çetin, F. Temurtaş 'Investigation of Current-Force Relationship in an Electromagnetic Launcher', Elec Lett Sci Eng , vol. 15 no. 1 , (2019), 21-27

1. Giriş

Elektromanyetik fırlatıcılar elektrik makinalarında olduğu gibi enerjinin bir formdan diğer bir forma dönüştürüldüğü sistemlerdir. Fırlatıcıya uygulanan elektrik enerjisi bobinde manyetik enerjiye sonrasında da hareket enerjisine dönüştürülür. Elektromanyetik fırlatıcılarda fırlatılacak nesne, sabit olan bir veya birden fazla sayıda bobinde oluşturulan manyetik alanı takip ederek hareket sağlanır. Klasik sistemlerde mermi hızı sınırlıdır. Elektromanyetik fırlatıcılarda mermi hızı, manyetik alanın hızında bir sınır olmadığından teorik olarak sınırlandırılmaz. Bu durum elektromanyetik fırlatıcıların popülerliğini arttırmaktadır. Elektromanyetik fırlatıcılar özellikle savunma sanayinde, robotik ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [1-3].

Literatürde manyetik fırlatıcıların hız, mermi kütlesi, stator uzunluğu, yüzey yıpranması, sarım sayısı ve stator akımı üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [4-11]. Mermi hızının incelendiği çalışmada, mermi ve stator bobininin ortak endüktansını belirleyen parametrelerin merminin hızında etkili olduğu tespit edilmiştir. Buna göre hızın artırılması için mermi boyunun kısa seçilmesi ve akı yoğunlaştırıcı tip stator bobini kullanılması önerilmiştir [12]. Le ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada çok kademeli bir manyetik fırlatıcının her bir kademesi için sarım sayısı ve tetikleme pozisyonlarını belirlemek için Taguchi metodunu kullanarak sistem

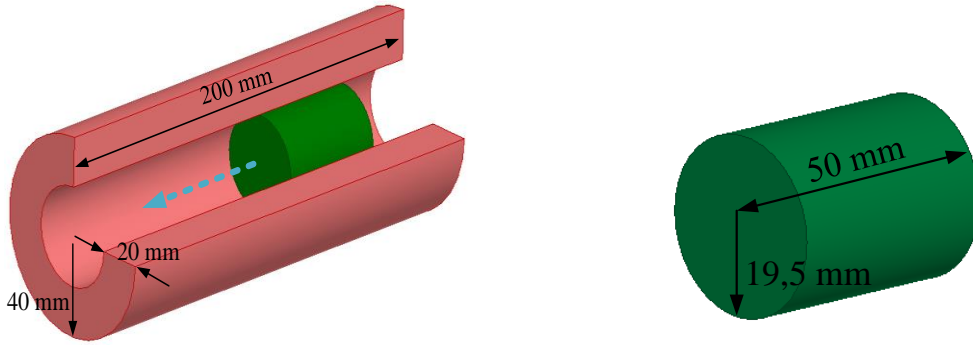
^{*} Corresponding author; Tel.: 0 266 717 0117 adalcali@bandirma.edu.tr

verimliliğini arttırmaya çalışmışlardır [13]. Verimin incelendiği diğer bir çalışmada sarmal tip bobinli elektromanyetik fırlatıcılarda bobinin sarım sayısının az olması durumunda verimin düştüğü ancak hızın arttığına değinilmiştir. Enerji dönüşüm verimliliğini arttırmak amacıyla genetik algoritma gibi optimizasyon yöntemlerinin kullanımı önerilmiştir [14].

Enerjinin kapasitör gruplarından sağlandığı sistemlerde şarj işlemi zaman kaybına neden olmaktadır. Alternatif akımın (AA) sürekli uygulanabilir olmasından dolayı bu çalışmada AA'nın elektromanyetik fırlatıcı bobinindeki davranışı incelenmiştir. Çalışmada, öncelikle bir elektromanyetik fırlatıcı sisteminde kullanılacak olan bobin ve merminin 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan modelin Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak manyetostatik ve zamana bağlı analizleri gerçekleştirilmiştir. Merminin sargıdan önce, sargı içerisinde ve sargıdan çıktığı süre boyunca üzerinde endüklenen manyetik alan, konuma göre akımdaki fark ve kuvvet değişimi profilleri çıkarılmıştır.

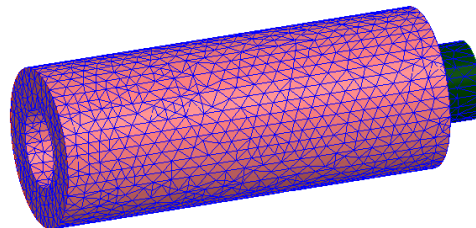
2. Tasarlanan Bobin ve Mermi Modeli

Elektromanyetik fırlatıcılar için tasarlanan bobin ve merminin 3 boyutlu modeli ve fiziksel boyutları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil-1 Bobin ve merminin 3 boyutlu modeli

Elektrik makinalarında SEM kullanılarak makinaya ait nüve kayıpları, kuvvet, manyetik akı yoğunluğu, akım yoğunluğu gibi parametreler bulunabilir [15]. Bu metodun kullanılması ile tasarımcılar yüksek doğruluk ile hızlı hesaplama gerçekleştirebilmektedir. SEM'de çözümü istenen kısım ağ denilen sonlu sayıda küçük bölgelere ayrılır. Aranılan büyüklüğün, bu küçük bölgelerde sürekli olduğu ve modellenen temel diferansiyel denkleminde, bölgedeki her bir elemanın üzerinde geçerli olduğu varsayılır. Bir noktadaki çözüm için, noktayı çevreleyen ağların noktaya olan etkisi dikkate alınır. Böylece elemanların ağ yapısındaki köşe noktalarına ait büyüklükler birbirine bağlanmış olur. Sonuçta, ağ sayısı kadar doğrusal denklem takımı çıkarılır ve istenilen büyüklükler bu denklem takımlarının çözümü ile elde edilir [16-17]. Tasarlanan sistemin ağ (mesh) yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil-2 Sistemin ağ yapısı

3. Analiz Sonuçları

Sistemde mermi malzemesi olarak demir tercih edilmiştir. Maxwell denklemleri kullanılarak mermi üzerindeki manyetik alan ifade edilebilir [17].

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{B} &= \nabla \times \vec{A}\end{aligned}\quad (1)$$

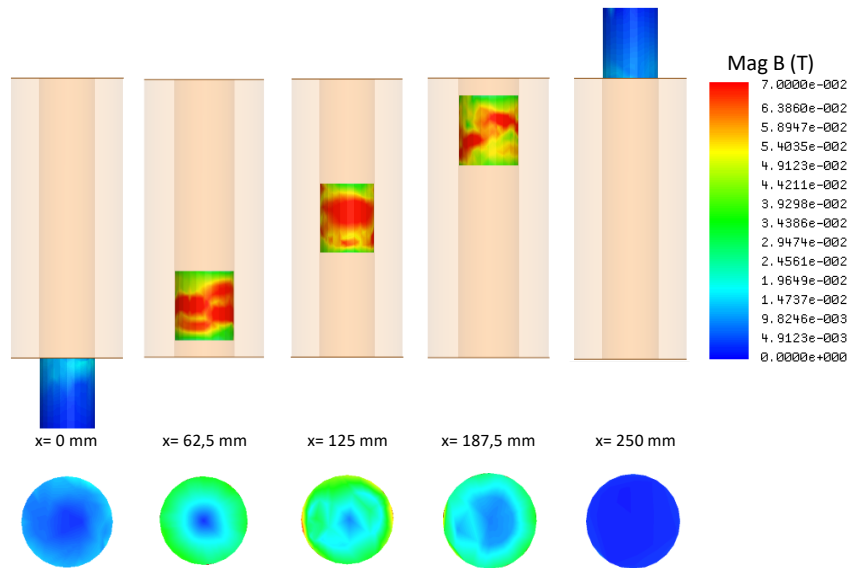
Denklem 1’de \vec{H} manyetik alan şiddetini, \vec{J} akım yoğunluğunu, \vec{E} elektrik alan şiddetini, \vec{B} manyetik akı yoğunluğunu ve \vec{A} manyetik vektör potansiyelini belirtmektedir. Denklem 2’de vektör potansiyelinin temel formülasyonu gösterilmiştir.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (2)$$

Burada, kullanılan malzemenin BH eğrisinin lineer olmamasından dolayı ν değişken geçirgenliği belirtmektedir. $\nu = \partial B / \partial H$ olarak ifade edilirse Şekil 3’te verilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları Denklem 3 ile hesaplanabilir [17].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -\vec{J} \quad (3)$$

Sargıya 10 V DA üzerine bindirilen 50 Hz’lik 5V AA gerilim uygulanmıştır. Merminin giriş pozisyonunda, 62,5 mm’de, 125 mm’de ve sargıdan tamamen çıktığı pozisyondaki akı dağılımları sonlu elemanlar analizleri ile elde edilmiştir. Şekil 3’te 5 farklı pozisyon için akı dağılımları verilmiştir. Şekilde hareket düzlemindeki kesit için mermi yüzeyinde elde edilen akı dağılımı da verilmiştir. Akı dağılımı incelendiğinde merminin üzerindeki akının bobin içerisinde yoğunlaştığı görülebilmektedir.

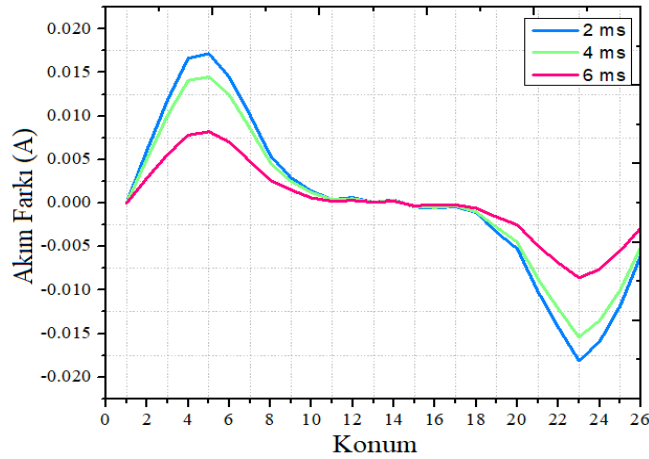


Şekil-3 Mermi üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Manyetostatik analizlerden sonra zamana bağılı analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sargı konumu 10 mm aralıklarla değiştirilerek toplam 26 konum ($0 \text{ mm} \leq x \leq 250 \text{ mm}$) için parametrik çözümler yapılmıştır. Akım farklarının belirlenmesi amacıyla 2 ms, 4 ms ve 6 ms referans alınarak belirlenen konumlarda akım değerlerinin farkları Denklem 4 kullanılarak belirlenmiştir.

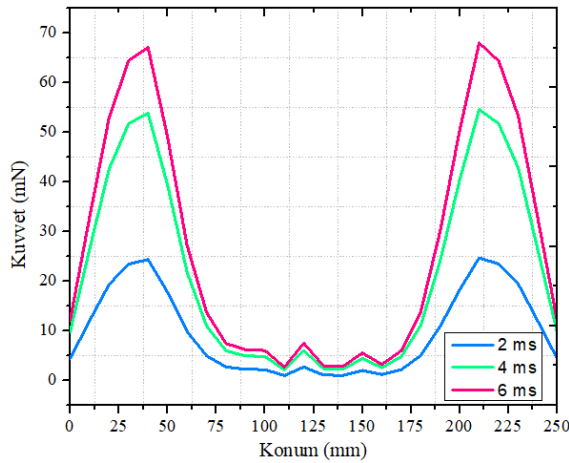
$$\Delta I = I_{i+1} - I_i \quad (4)$$

Burada ΔI akım farkını, I_i ilk konumdaki akım değerini ve I_{i+1} bir sonraki konumdaki akım değerini ifade etmektedir. Hesaplanan akım farklarının dalga formu Şekil 4'te verilmiştir



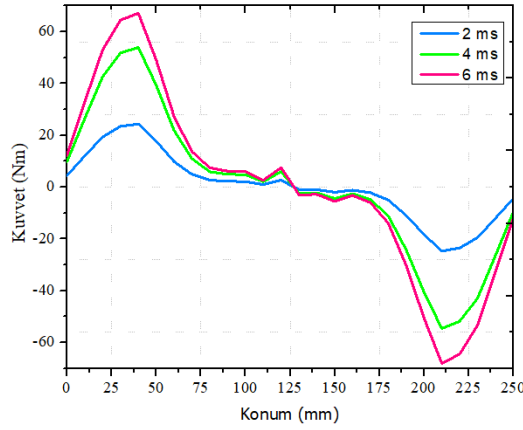
Şekil-4 Belirlenen zamanlardaki akım farkı değerleri

2 ms, 4 ms ve 6 ms'de mermi konumu 0-250 mm aralığında 10 mm hassasiyetle değiştirilerek mermi üzerindeki kuvvetlerin genliği çıkartılmıştır. Şekil 5'te kuvvetin genliğindeki değişimler sunulmuştur.



Şekil-5 Mermi üzerindeki kuvvet genliğinin konuma göre değeri

Merminin üzerindeki kuvvetin konuma göre değişimi ise Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde negatif kuvvet mermi üzerindeki kuvvetin yön değişimini göstermektedir.



Şekil-6 Mermiye etkiyen kuvvetin konuma göre değişimi

Şekil 4 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğine konuma göre akım farkı ile konuma göre kuvvet arasındaki ilişki açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra büyüklükler açısından akım fark genliği ile kuvvet genliği arasında ters orantısal bir ilişki vardır. Bu durum akımın fark değerinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

5. Sonuç ve Tartışma

Elektromanyetik fırlatıcılarda sargıya AA uygulanması durumunda analizlerden de görüldüğü gibi mermi üzerinde itme ve çekme kuvveti oluşmaktadır. AA beslenen fırlatıcı sistemlerinde mermi konumunun belirlenmesi sargıya uygulanan gerilimin zamanında kesilmesi açısından önemlidir. Sargı konumu AA'da ek bir düzeneğe ihtiyaç kalmadan akım değişimlerinden pozisyon kestirimine olanak vereceği değerlendirildiğinden bobine AA gerilim uygulanmıştır. Analizlerde kuvvet ile akım farkı arasında konuma göre belirli bir ilişki olduğu görülmüştür. Dolayısıyla akım farkından kuvvet kestirimi yapılabilir. Akım farkındaki değişimin negatif olduğu bölgelerde kuvvetin yönünün değiştiği, akım farkındaki değişiminin tepe değerine ulaştığı noktalarda kuvvetin de ileri ve ters yönlerde tepe değerine ulaştığı görülmektedir. Bütün bunlar değerlendirildiğinde merminin maksimum hızı sağlaması için akım fark değeri bilgisi yola çıkılarak, uygulanan gerilimin kesilme zamanı tespit edilebilir. Bu çalışma ile elektromanyetik fırlatıcılarda AA sistem uygulanarak mermi konumunun belirlenmesinin mümkün olabileceği görülmüştür. İleriki çalışmalarda makine öğrenmesi veya klasik öğrenme teknikleri kullanılarak mermi konumunun başarılı bir şekilde kestirilebileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BAP-18-MF-1003-003 proje numarası ile desteklenmiştir.

Referanslar

[1] Chandan, K.S., Rao, P. M., "A Mathematical Formulation of Inductance for Multipole Field Electromagnetic Launcher", International Journal of Pure and Applied Mathematics, 118(24), 1-13, 2018.

- [2] Sari, V., “Elektromanyetik Fırlatıcıların Farklı Manyetik Özellikteki Çekirdeklerle Performans Analizi”, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2015.
- [3] Fair, H. D., “Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters A New Era”, IEEE Transactions on Magnetics, 41(1), 158-164, 2005.
- [4] W. Luo, Y. Wang, Z. Gui, Z. Yan, and W. Chen, “Connection pattern research and experimental realization of single stage multipole field electromagnetic launcher”, IEEE Transactions on Plasma Science, 41(11), 3173–3179, 2013.
- [5] Engel, T. G., Nunnally, W. C., Neri, J. M., “High-efficiency, medium-caliber helical coil electromagnetic launcher”, IEEE Transactions on Magnetics, 41(11), 4299–4303, 2005.
- [6] Yuan, W., Yan, P., Sun, Y., Li, M., Liu, C., Li, J., Gui, Y., He, J., “Design and testing of a two-turn electromagnetic launcher”, IEEE Transactions on Plasma Science, 39(1), 198–202, 2011.
- [7] Skurdal, B. D., Gaigler, R. D., “Multi-mission electromagnetic launcher”, IEEE Transactions on Magnetics, 45(1), 458–461, 2009.
- [8] Crawford, M., Subramanian, R., Watt, T., Surls, D., Motes, D., Mallick, J., Barnette, D., Satapathy, S., Campos, J., “The design and testing of a large-caliber railgun”, 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Canada, 2008.
- [9] He, Y., Song, S., Guan, Y., Cheng, C., Dai, W., Qui, X., Li, Y., “An investigation into muzzle velocity repeatability of a railgun”, IEEE Transactions on Plasma Science, 43(5), 1647–1651, 2015.
- [10] Zhang, J., Gu, G., Xiang, Y., Zhao, X., Liu, X., “Research on a big multiturn rail electromagnetic launching system”, IEEE Transactions on Magnetics, 43(5), 2054–2058, 2007.
- [11] Dong, E., Cao, R., “The Inner Surface Profile Measurement Apparatus for an Electromagnetic Rail-Gun Launcher”, IEEE Sensors Journal, 18(10), 4269-4274, 2018.
- [12] Çoşkun, İ., Kalender, O., Ege, Y., “İndüksiyon Bobin Silahı İçin Uygun Stator Bobini Geometrisinin Araştırılması”, BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi, 8(2), 40-48, 2006.
- [13] Le, D. V., Go, B. S., Song, M. G., Park, M., Yu, I. K., “Design of an Electromagnetic Induction Coilgun Using the Taguchi Method”, IEEE Transactions on Plasma Science, 46(10), 3612- 3618, 2018.
- [14] Yang, D., Liu, Z., Shu, T., Yang, L., Ouyang, J., Zhi, S., “Transient simulation of helical coil electromagnetic launchers”, The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 37(1), 280-292, 2018.
- [15] Dalcalı, A., Akbaba, M., “Comparison of 2D and 3D magnetic field analysis of single-phase shaded pole induction motors,” Engineering Science and Technology, an International Journal, 19, 1–7, 2016.

[16] Akbaba, M., Fakhro, S. Q., "Field Distribution and Iron Loss Computation in Reluctance Augmented Shaded-Pole Motors Using Finite Element Method", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(2), 302–307, 1992.

[17] Akbaba, M., Fakhro, S. Q., "An Improved Computational Technique of the Inductance Parameters of the Reluctance Augmented Shaded-pole Motors Using Finite Element Method", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(2), 308–314, 1992.