

Simulation of Boost Type DC-DC Converter for Photovoltaic Systems

Fotovoltaik Sistemler için Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücünün Benzetimi

Elmin AHMADOV¹, Ertuğrul ADIGÜZEL¹, Tarık Veli MUMCU¹, Aysel ERSOY YILMAZ¹

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, İstanbul University.- Cerrahpaşa, İstanbul, Turkey

Abstract

Today, the use of renewable energy sources is increasing. Photovoltaic systems are also among the renewable energy sources. These systems are a direct current source and cannot produce energy when there is no sunlight. In this study, performance analysis of the Hard Switching (HS) DC-DC boost converter and Soft Switching (SS) DC-DC boost converter in the literature with PID controller were performed on the photovoltaic system. The performance of the converters, which were simulated in Matlab/Simulink software was 18 and 24 V output voltage for 12-13 V input voltage. According to the results obtained from the study, the most successful results for a photovoltaic system with PID controller produced Hard Switching DC-DC boost converter.

Keywords: DC/DC Converter, Hard Switching, Soft Switching, PID Controller

Öz

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı giderek artmaktadır. Fotovoltaik sistemler de yenilenebilir enerji kaynakları arasında bulunmaktadır. Bu sistemler bir doğru akım kaynağı olup güneş ışığının olmadığı zamanlarda enerji üretememektedir. Bu çalışmada literatürde yer alan Sert Anahtarlama DA-DA yükseltici konvertör ile Yumuşak Anahtarlama DA-DA yükseltici konvertörün fotovoltaik sistem üzerinde PID kontrolörlerle performans analizi yapılmıştır. Matlab/Simulink yazılımında benzetimi gerçekleştirilen konvertörlerin 12-13 V giriş gerilimine karşılık 18 ve 24 V çıkış gerilimindeki performansları izlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre PID kontrolörlü fotovoltaik bir sistem için en başarılı sonuçları Sert Anahtarlama DA-DA yükseltici konvertör üretmiştir.

Anahtar Kelimeler: DA/DA Dönüştürücü, Sert Anahtarlama, Yumuşak Anahtarlama, PID Kontrolör

I. INTRODUCTION

Solar cells in photovoltaic (PV) systems are an accurate source of current and different current-voltage values can be obtained by connecting these batteries serially or parallel. When converters are evaluated within the scope of power electronics, it is still seen that many researchers are among the research subjects [1]. With power electronics factors such as the desired amplitude, shape and frequency, etc. can be presented from energy sources to the user or other units. One of the converters is DC-DC converters in order to meet the need in these areas. DC-DC converters convert the current correct voltage to lower or higher values. DC-DC converters with high switching frequencies with ease of control, high power density and rapid response time are widely used in industrial applications. This situation allows the dimensions of circuit elements such as capacitors, coils and transformers used in converter circuits to be preferred as small. On the other hand, increasing switching frequency increases switching losses and electromagnetic interference (EMI) value [2].

Switching losses occurring in the converter are caused by the decrease in the voltage at the ends of the semiconductor element and the rise of the current passing through the semiconductor during transmission of the semiconductor element in the circuit. During transmission, the loss of energy in the parasitic capacitor discharge and the loss of energy that occurs during the reverse polarization process of the diode also occur as a loss of switching [3]. For this reason, converter circuits use Soft Switching (SS) instead of Hard Switching (HS). With the help of circuits expressed as suppression cells in SS, the switching frequency can be increased by reducing the losses that occur during switching [4].

Hua et al. (1994a) in their study, 1 kW power and 100 kHz frequency running converter designed with the active suppression cell the performance of the boost converter was able to increase from 93% to 97% as the base switcher went to cut together with the basic switch. [5].

Hua et al. (1994b) in their study, the basic key was transmitted with soft switching in this converter which can operate at a frequency of 600 W power and 300 kHz and performance of up to 98% from the converter were achieved [6].

Bodur and Bakan (2002) in their study, many problems were fixed using the active suppression cell model they designed to address some basic problems that occur in the source [6] and the performance of the converter increased from 91% to 97% [7]. In 2007, Das and Moschopoulos's research showed that it is the most efficient circuit that can be used in high-power applications than all other active suppression cell circuits examined [8].

Kofinas et al. in 2015, developed an expert Maximum Power Point Monitor (MPPT) model based directly on the basis of the artificial neural networks algorithm in partially overshadowed systems. In this study, it consists of a lowering converter and a load connected parallel to the PV source. Performance of the designed system's algorithm has been shown to produce better results than conventional algorithms with a change-eye [9], [10].

It is seen that many types of controllers are used in the literature for the boost DC-DC converter inspection. By constantly checking the margin of error between the actual output voltage and the converter reference, the controller corrects the converter's operating error to form the parameters of the expected system response. The closed cycle controller structure which uses traditional types of PID and PI controllers, is frequently used under the supervision of boost converters [11], [12], [13].

II. MATERIALS AND METHODS

In this study, two different DC-DC boost converter models were used to raise a PV system output voltage. When designing the system, the output voltage of the PV model is set to 12-13 V. This value was applied to the converter input and two different voltage values (18 and 24 V) were obtained from the converter output. In obtaining these voltage values, the determination of the switching signal was carried out by the PID controller. We use different frequencies to get two voltages on the exit. We use it in the system because the frequencies are the PID control that provides us with. The material and method used in the system are described in detail below.

2.1 Simulation of Photovoltaic System

The PV system simulation was theoretically calculated at the desired value ranges. Thus, it is modeled so that it can be integrated into all systems used in the industry. It is designed to obtain 12 V from the output of the system. The system's Matlab/Simulation diagram is shown in Figure 1.

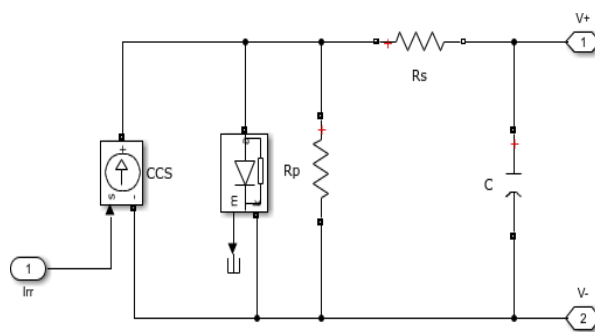


Figure 1. PV system simulation scheme.

The R_p , R_s and C values used in PV system simulation are 100Ω , 0.1Ω and 10mF , respectively. In addition, two different references were taken in solar radiation value when modeling the PV system. The change in the value of sunlight within 5 seconds occurs in 1.5 and 3.5 seconds in Figure 2.

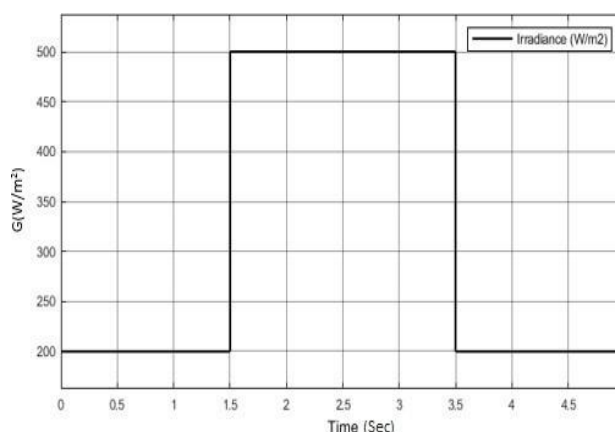


Figure 2. Solar radiation (Irradiance) exchange.

2.2. PID Simulation

Proportional-Integral-Derivative (PID) control, which is among traditional control methods, is a control system that combines the advantages of Proportional, Integral and Derivative control in a single system. PID control is now a widely used control method. PID is a widely used control system. It is a feedback system by calculating the difference between the output value and the desired value. There are actually block models in Matlab, but no model could meet the needs of this system. So this system is created especially for this work. P proportional and integral derivative coefficients obtained with a coefficient of 0.01-2.5-0, we made our output signal compatible with the PID control. PID control circuit is designed to provide the switching signal required for the voltage value to be obtained from the converter output. The simulation scheme for the commission is given in Figure 3. By applying the difference (error) of the V_{ref} and V_{out} voltages to the PID input, the switching signal is determined to obtain the desired voltage from the converter output. V_{ref} is determined as 18 and 24 V. Thus, the voltage applied to the converter input (PV system output: 12-13 V) is obtained as 18 and 24 V at the converter output.

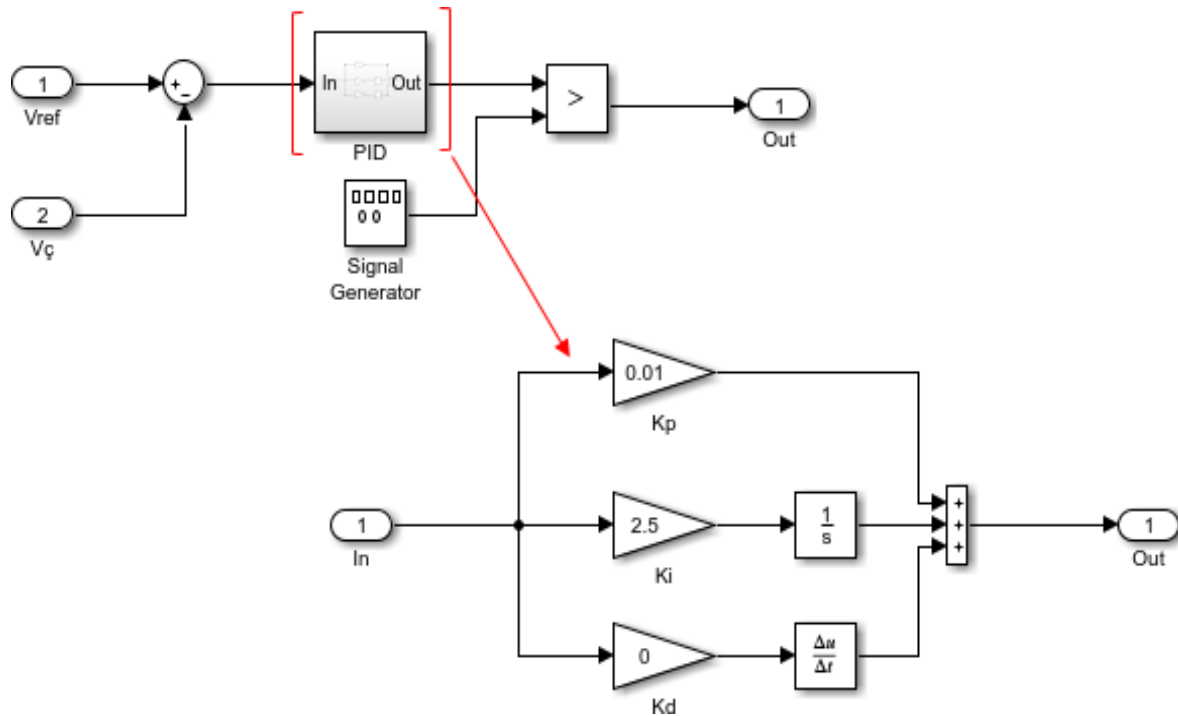


Figure 3. PID control simulation scheme

2.2 Simulation of DC-DC Converters

The voltage value obtained from the PV system output has been raised in two different converter models with hard and soft switching.

2.2.1. DC-DC converter simulation with hard switching

This converter is the traditional model used in industrial applications. The model's simulation diagram is shown in Figure 4.

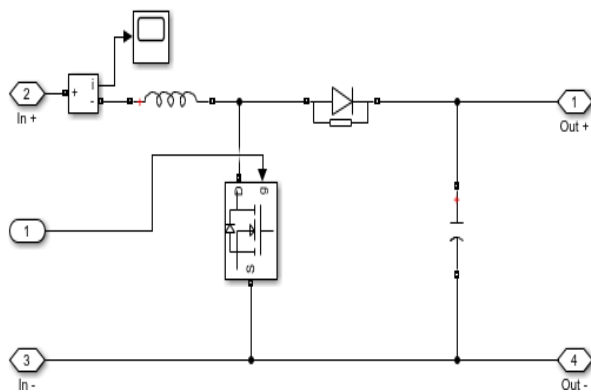


Figure 4. DC-DC converter simulation with HS

This traditional model uses MOSFET for switching; Inductance, Capacitance and Diode values were also determined as 0.3 mH, 250 uF and 0.8 V respectively.

2.2.1 DC-DC converter simulation with soft switching

The same parameter values were used to perform a comparative analysis of both models. This model is thought to be a soft switching insulated circuit and transformer was used in the part of the converter after MOSFET. The simulation diagram of this model is given in Figure 5.

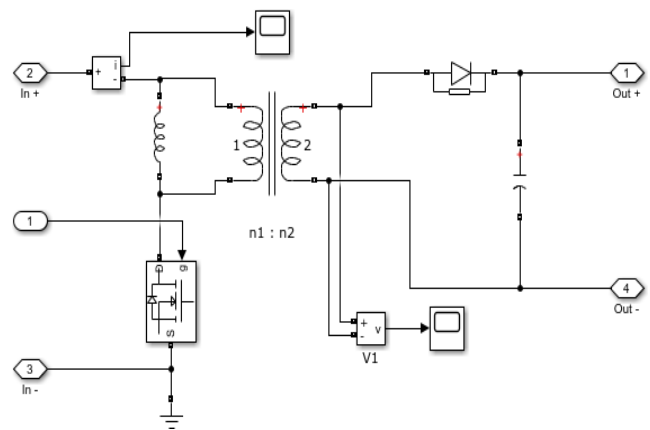


Figure 5. DC-DC converter simulation with SS The block diagram of both designed models are presented in Figure 6.

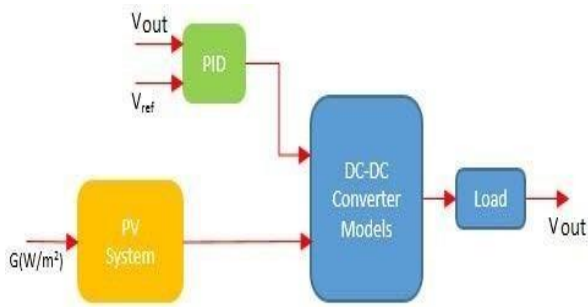


Figure 6. Block model of the system.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The performance of both models for 18 V is shown in Figure 19. When Figure 19 is examined, it is seen that the hard switching converter for 18 V gives better answers to the change in solar radiation values with PID controller in the aforementioned PV system. The performance of both models for 24 V is shown in Figure 20. When figure 20 is examined, it is seen that the hard switching converter for 24 V gives better answers to the change in solar radiation values with

PID controller in the aforementioned PV system.”

DC-DC converters with HS and SS respectively;

- Converter output 18 V and load fixed
- Converter output 24 V and load fixed
- Converter output voltage variable and load constant
- Converter output voltage variable and load increased by 100%
- Converter output voltage variable and load reduced by 50% results have been obtained in five different categories.

3.1. DC-DC converter results with hard switching

The graph obtained in case the desired voltage is 18 V and the load is constant is shown in Figure 7.

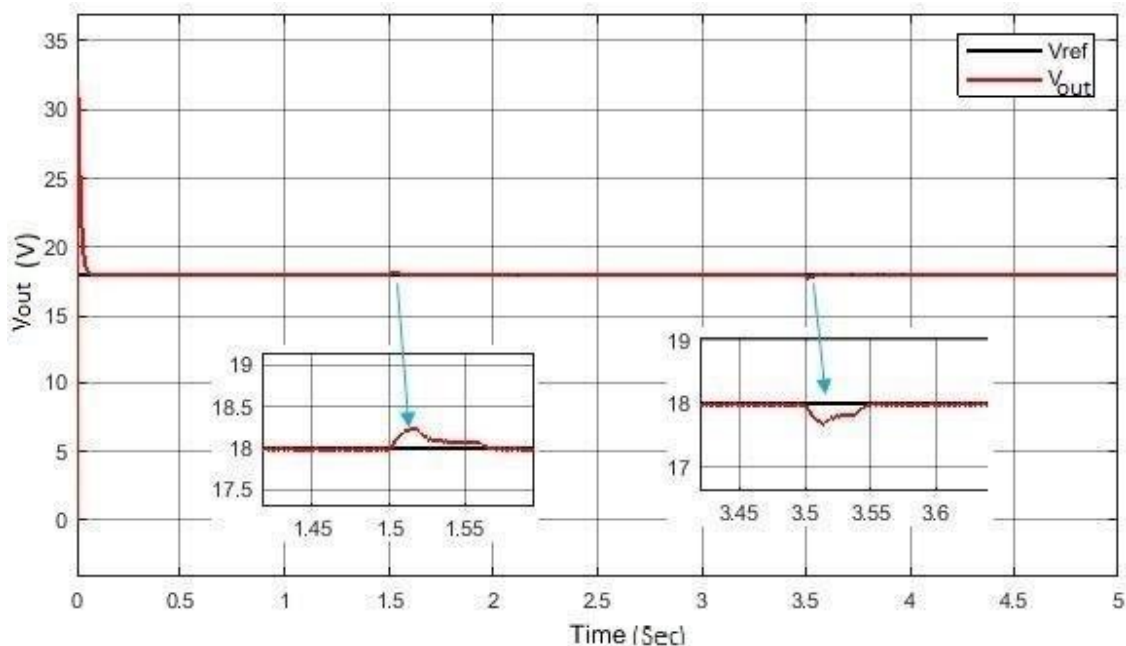


Figure 7. The graph obtained when the output voltage is asked to be 18 V

When obtaining this graph, the solar radiation change of the PV system varies as given in Figure 2. In addition, the load change is fixed. Converter output voltage values varied in the range of 17.98 to 18.01 V. When Figure 7 is examined, it is seen that there is a short-term instability in the output voltage value in 1.5 and 3.5 seconds. With PID controller the output

voltage is kept at the desired level by providing the necessary switching in a very short period of time. The controller makes approximately $\pm 0.12\%$ error in the output voltage value. The desired voltage at the converter output is 24 V and the resulting graph is shown in Figure 8 if the load is fixed.

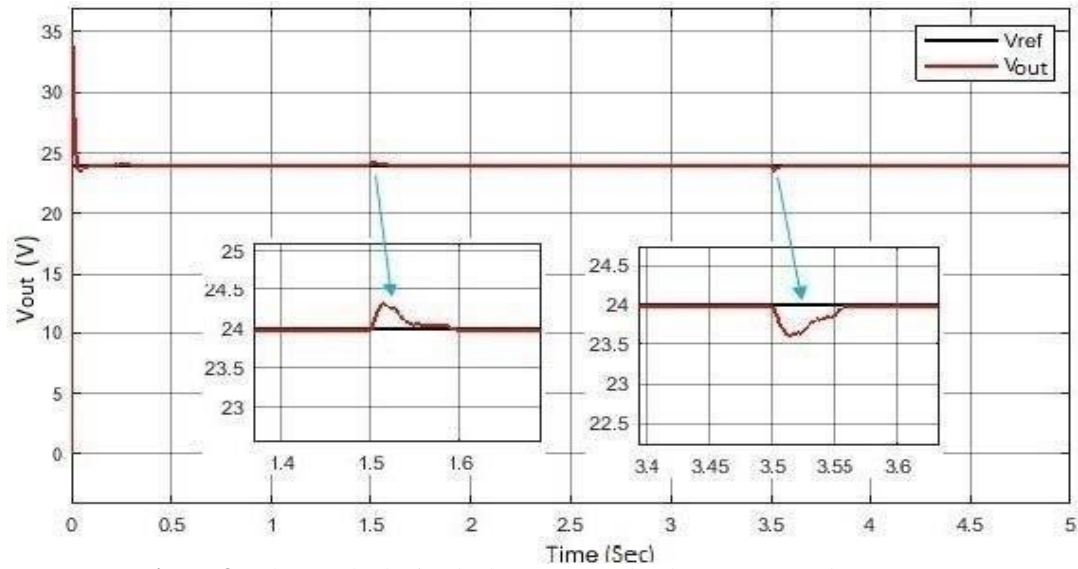


Figure 8. The graph obtained when prompted to have output voltage 24 V

When obtaining this graph, the solar radiation change of the PV system varies as given in Figure 2. In addition, the load change is fixed. Converter output voltage values vary in $v=23.99$ to 24.02 V range. When Figure 8 is examined, it is observed that there is a short-term imbalance in the output voltage value of 1.5 and 3.5 seconds. With a PID controller the output voltage is kept at the desired

level by providing the necessary switching in a very short period of time. The controller makes approximately $\pm 0.08\%$ error in output voltage value.

In this study, the output voltage value was changed from 18 V to 24 V and from 24V to 18 V and the results were given in Figure 9 and 10 respectively.

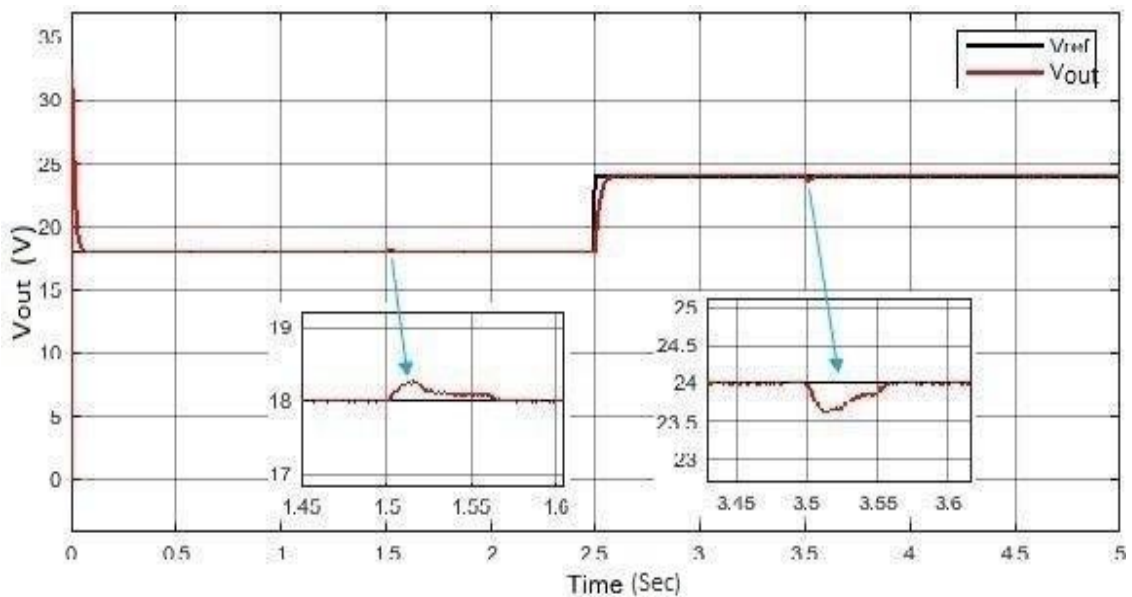


Figure 9. The graph obtained when output voltage rises from 18 V to 24 V

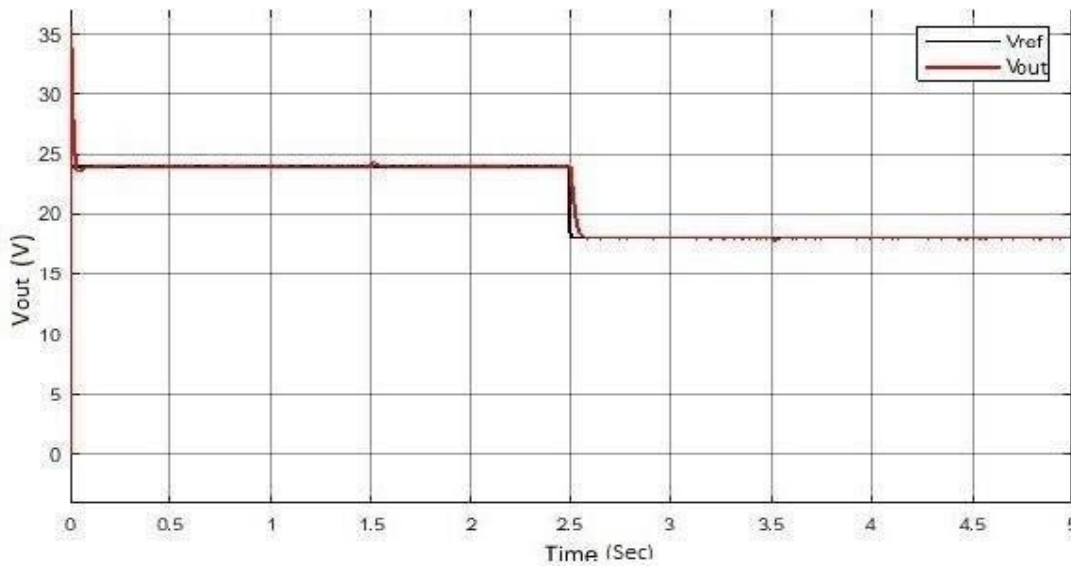


Figure 10. The graph obtained when output voltage drops from 24 V to 18 V

In this work, which is fixed with load change, the converter for 18 V output voltage produced voltage in the range of 17.98 - 18.01 V, 24 V to 23.99 to 24.02 V. The converter output voltage value was increased from 18 V to 24 V while the load increased by 100% and system performance was examined. The results are shown in Figure 11.

When the load is increased by 100% a stable output is achieved when the converter output value is 18 V while when the converter output is 24 V there is a negligent level of instability. The converter output voltage value was increased from 18 V to 24 V while the load was reduced by 50% and system performance was examined. The results are shown in Figure 12.

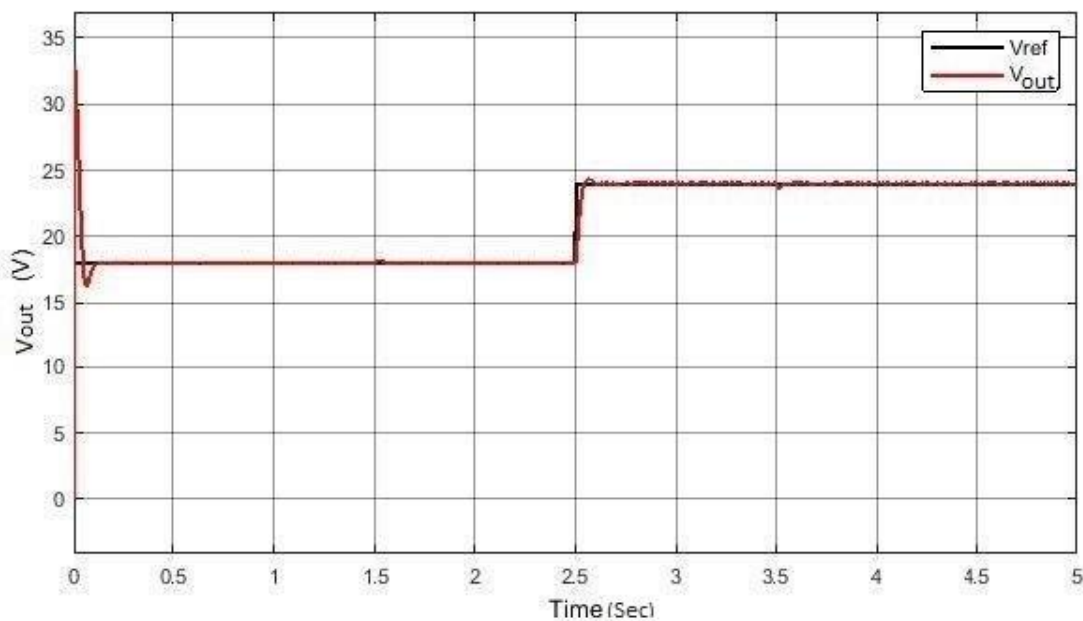


Figure 11. Results when the load is increased by 100%

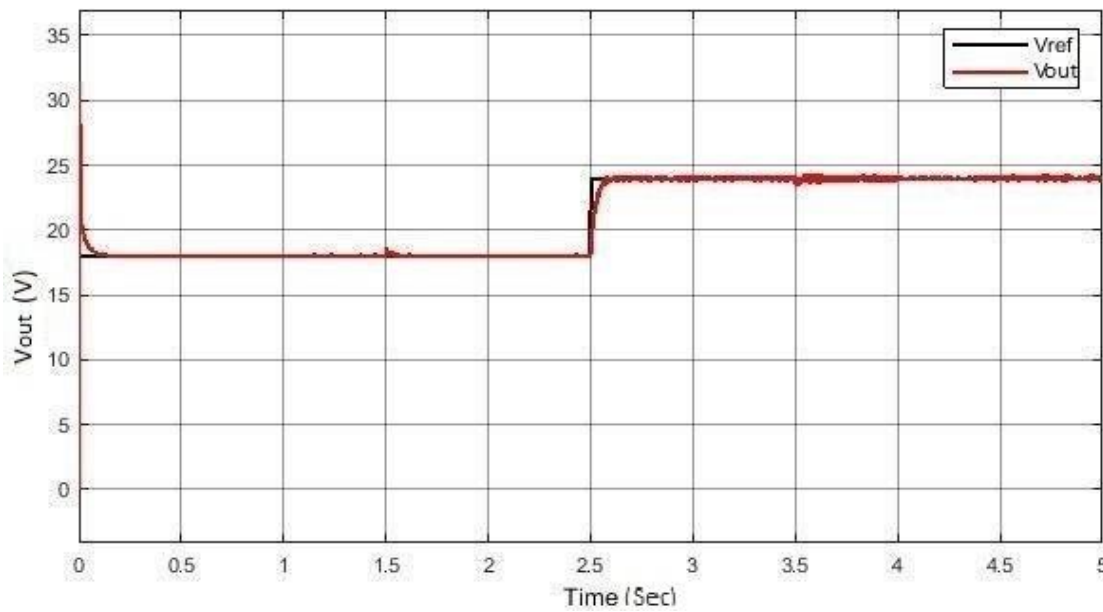


Figure 12. Results obtained when the load is reduced by 50%.

When Figure 12 is examined, it is seen that if the load is reduced by 50% the converter output produces the expected voltage value for 18 V. However, it is observed that the instability of the output voltage value for 24 V increases and even when time shows 3.5 the sun's radiation value changes and instability increases.

3.2. DC-DC converter results with soft switching

If the desired voltage at the converter output is 18 V and the load is constant, the resulting graph is shown in Figure 13. When obtaining this graph the solar radiation change of the PV system varies as given in Figure 2. Converter output voltage values varied in the range of 17.95 to 18.03 V.

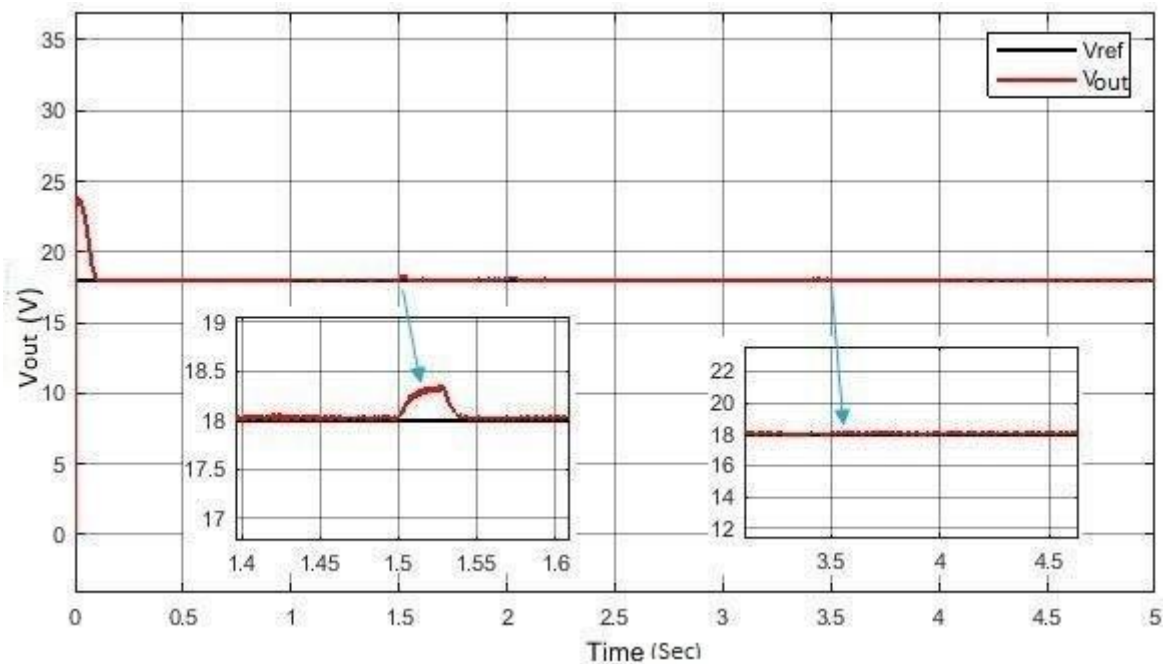


Figure 13. Results obtained when the output voltage is asked to be 18 V.

When Figure 13 is examined, it is seen that there is a short-term instability in the output voltage value in 1.5 and 3.5 seconds. With PID controller the output voltage is kept at the desired level by providing the necessary switching in a very short period of time. The controller makes approximately $\pm 0.28\%$ error in the output voltage value. The graph obtained in case the

desired voltage at the converter output is 24 V is shown in Figure 14. When obtaining this graph, the solar radiation change of the PV system varies as given in Figure 2. In addition, the load change is fixed. Converter output voltage values varied in the range of 23.50 to 24.50 V.

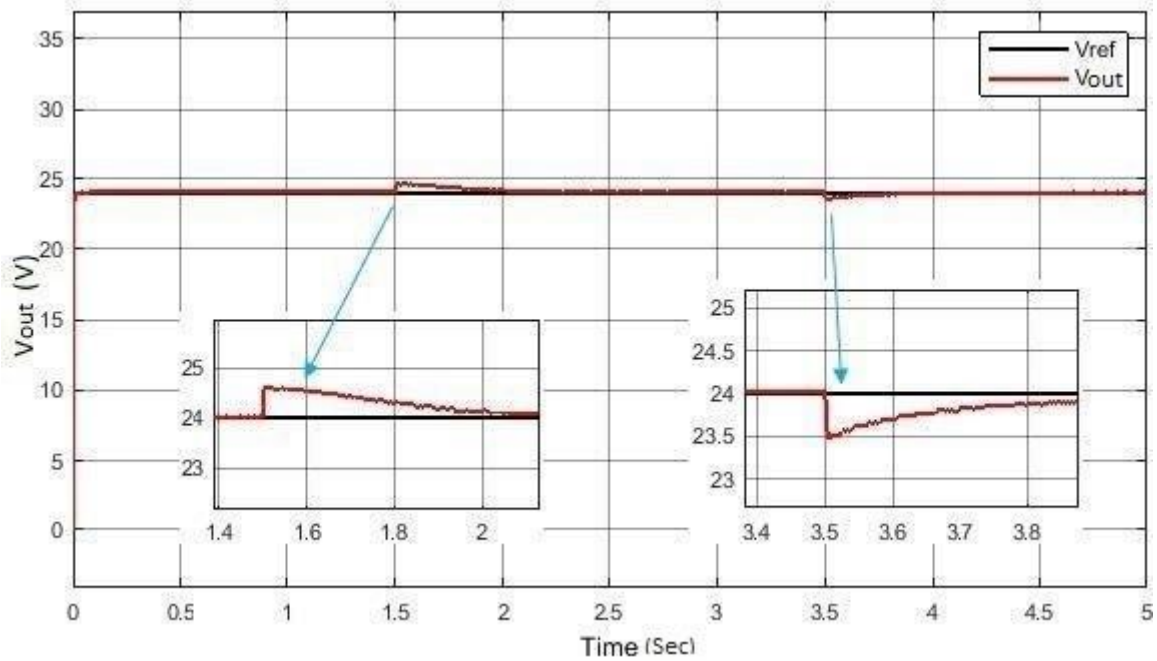


Figure 14. Results obtained when the output voltage is requested to be 24 V.

Although the converter output voltage is at the desired level, it is observed that the level of instability increased during the change in the amount of solar radiation and thus it is incorrect in the converter output voltage.

When the Figure is examined in 14, it is seen that there is a short-term instability in the output voltage value in 1.5 and 3.5 seconds. With PID controller the output voltage is kept at the desired level by providing the necessary switching in a very short period of time. The controller makes approximately $\pm 2.2\%$ error in the output voltage value.

The converter output voltage value has been changed from 18 V to 24 V and from 24V to 18 V and the results are given in Figure 15 and 16 respectively. Here, depending on the amount of solar radiation converter output voltage values are seen. When the Figure is examined 15, it is seen that the error was made albeit for a short period of time during the change of the sun's radiation value for 18 V but the desired voltage value was obtained in a short time with the PID controller. On the other hand, it is observed that there is a system error during the decrease of the solar radiation value for 24 V and the output voltage of the converter catches in approximately one second. A Similar change is seen in Figure 16.

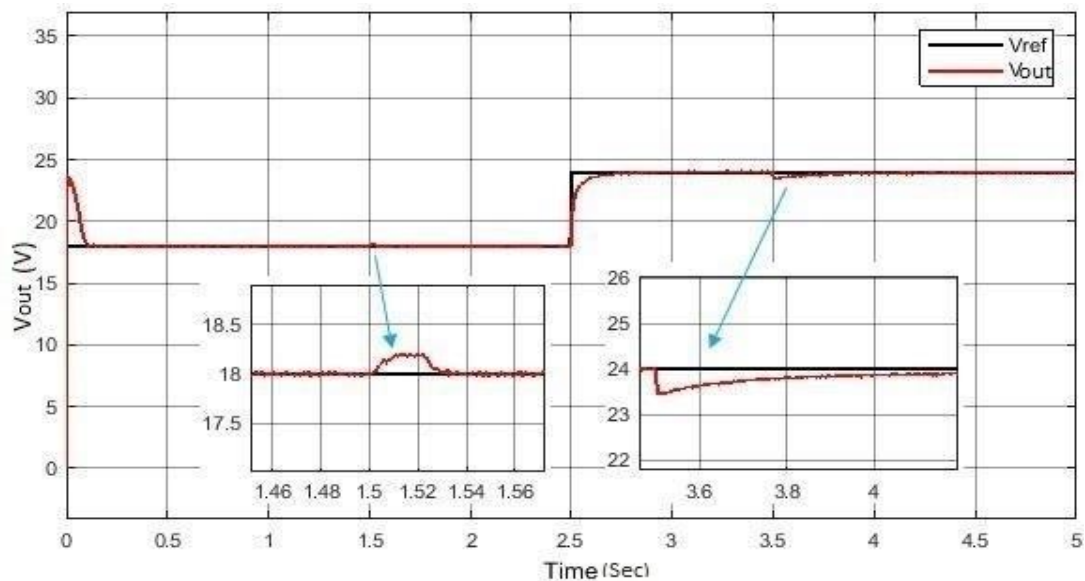


Figure 15. Graph obtained when output voltage increased from 18 V to 24 V

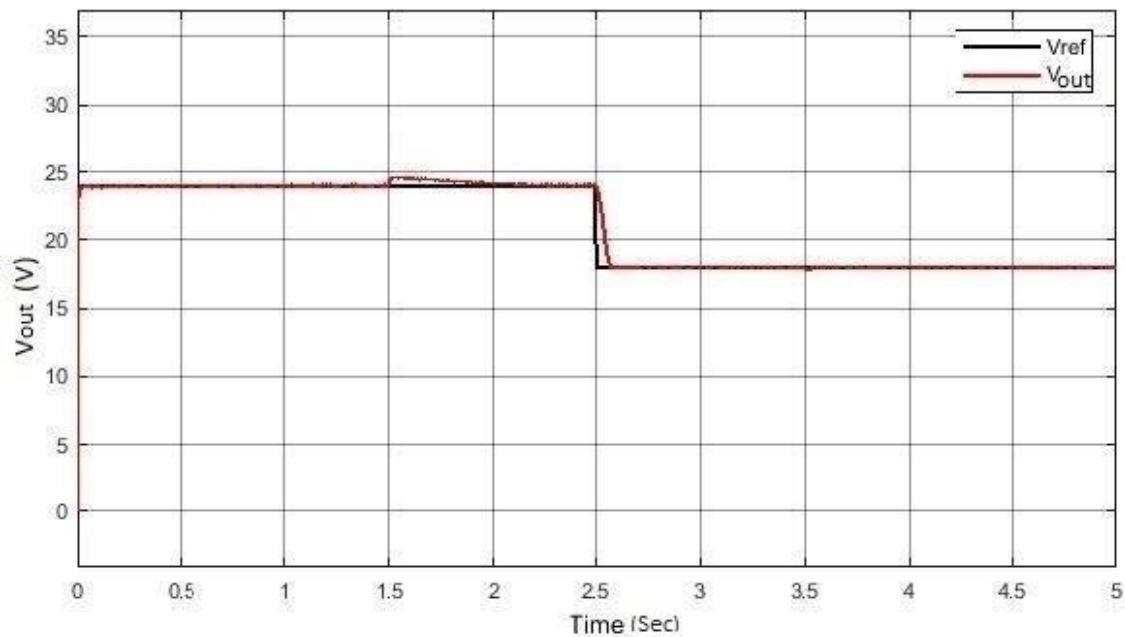


Figure 16. Graph obtained when output voltage drops from 24 V to 18 V.

The converter output voltage value was increased from 18 V to 24 V, while the load increased by 100% and system performance was examined. The results are shown in Figure 17.

When the system performance is examined when the load is increased by 100%, it is seen that the desired output voltage values for both 18 V and 24 V are

obtained from the converter output. It is observed that there is a small error during the change of the sun's radiation in the output voltage of 24 V but the desired voltage is obtained with the help of the PID controller. The converter for 18 V output voltage produced voltage in the range of 17.99 - 18.01 V, 24 V to 23.99 to 24.01 V.

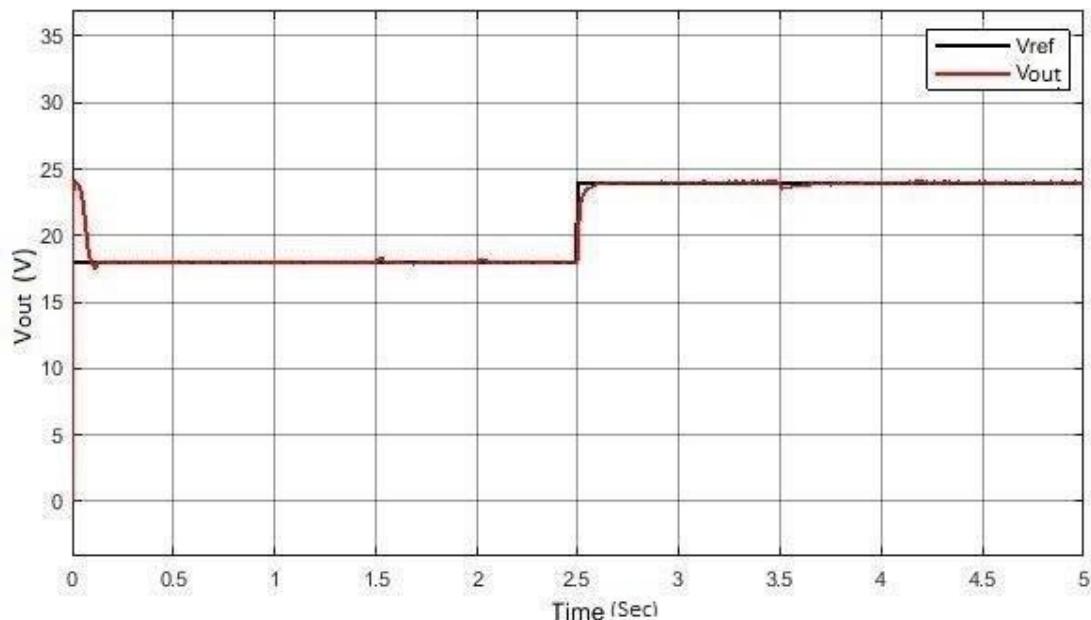


Figure 17. Results obtained when the load is increased by 100%

The converter output voltage value was increased from 18 V to 24 V while the load was reduced by 50% and system performance was examined. The results are shown in Figure 18.

For the 18 V output voltage the converter produced voltage between 17.85 - 18.18 V, 24 V for 23.75 -

24.25 V. The chart below shows that when seconds show 3.5, the sun's radiation drops from 500 w/m² to 200 w/m². From this moment on the PID converter is trying to keep the output voltage at the desired level. However, this situation deteriorated in the range of 4.5-5 seconds.

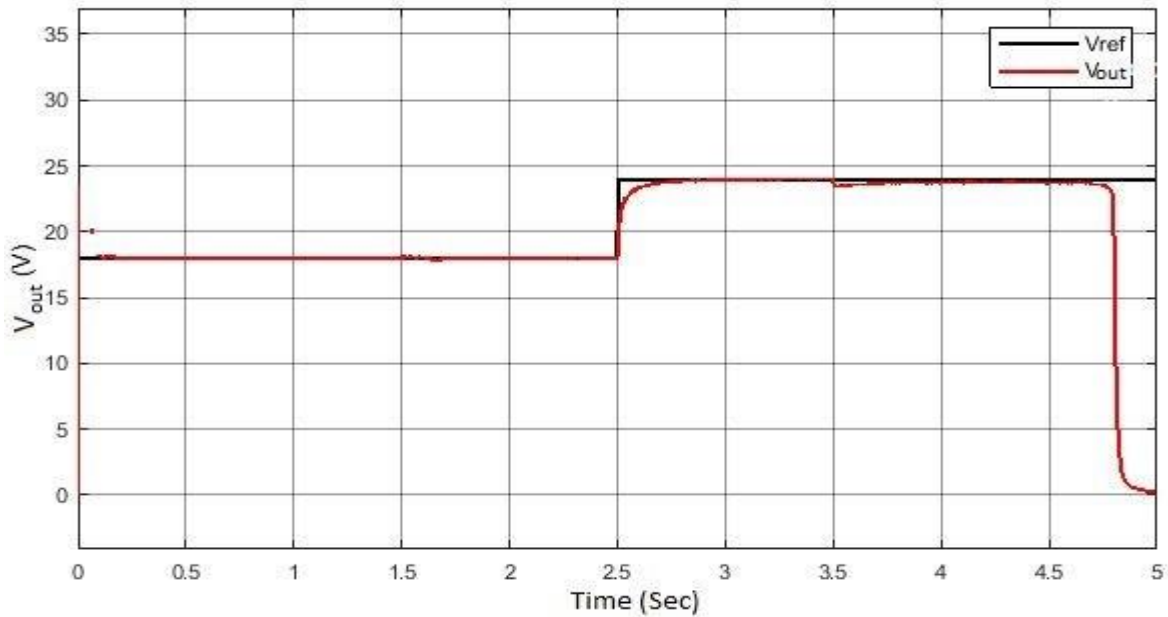


Figure 18. Results obtained when the load is reduced by 50%.

3.3. Comparative analysis results

In the case of converter output 18 and 24 V, comparative findings for both models are given in this section. Graphs:

VOUT1 : Hard switching (Uninsulated) DC-DC boost converter output
VOUT2 : Soft switching (Insulated) DC-DC boost

converter output *VREF* : Shows the desired voltage at the converter output.

The value of solar radiation in the system is as in referenced values. The load is fixed on the system.

The performance of both models for 18 V is shown in Figure 19. The red line(*VOUT1*) is more efficient than the blue line(*VOUT2*) because there were two breaks on the blue line. But this does not mean the second model (*VOUT2*) cannot be used. Only the first model (*VOUT1*) has a lower error rate. When Figure 19 is examined, it is seen that the hard switching converter for 18 V gives better answers to the change in solar radiation values with PID controller in the aforementioned PV system.

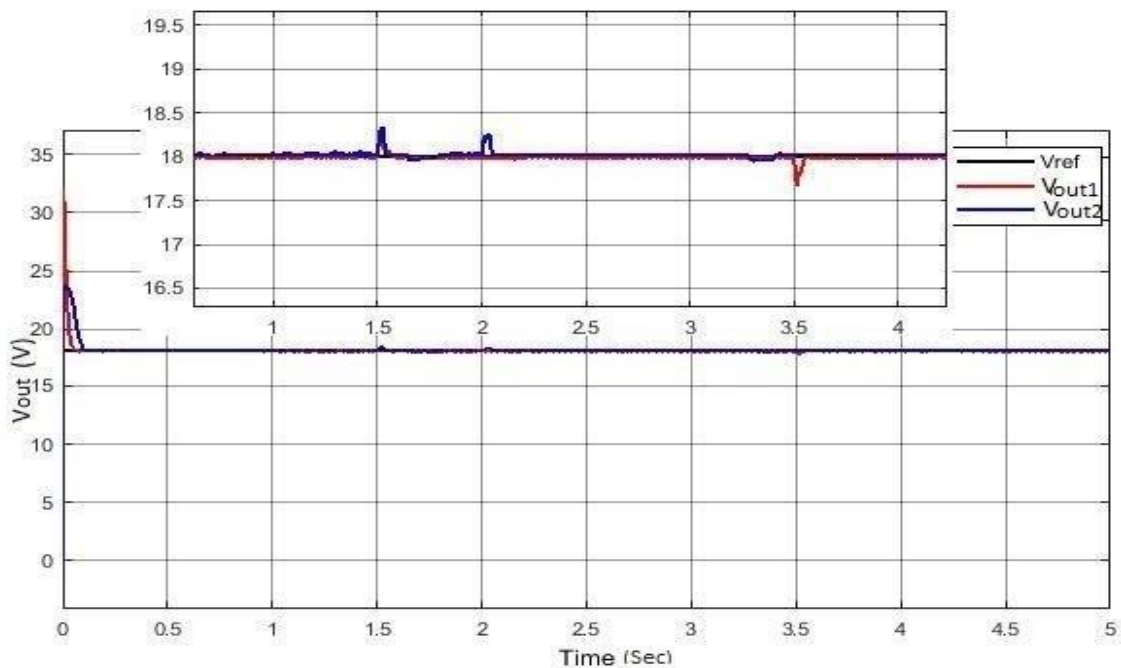


Figure 19. Comparative analysis findings for 18 V.

The performance of both models for 24 V is shown in Figure 20. Here again, there were breaks in both models, but the break of the blue line (V_{out2}) was a little too much. When figure 20 is examined, it is seen that the hard switching converter for 24 V gives better

answers to the change in solar radiation values with PID controller in the aforementioned PV system.

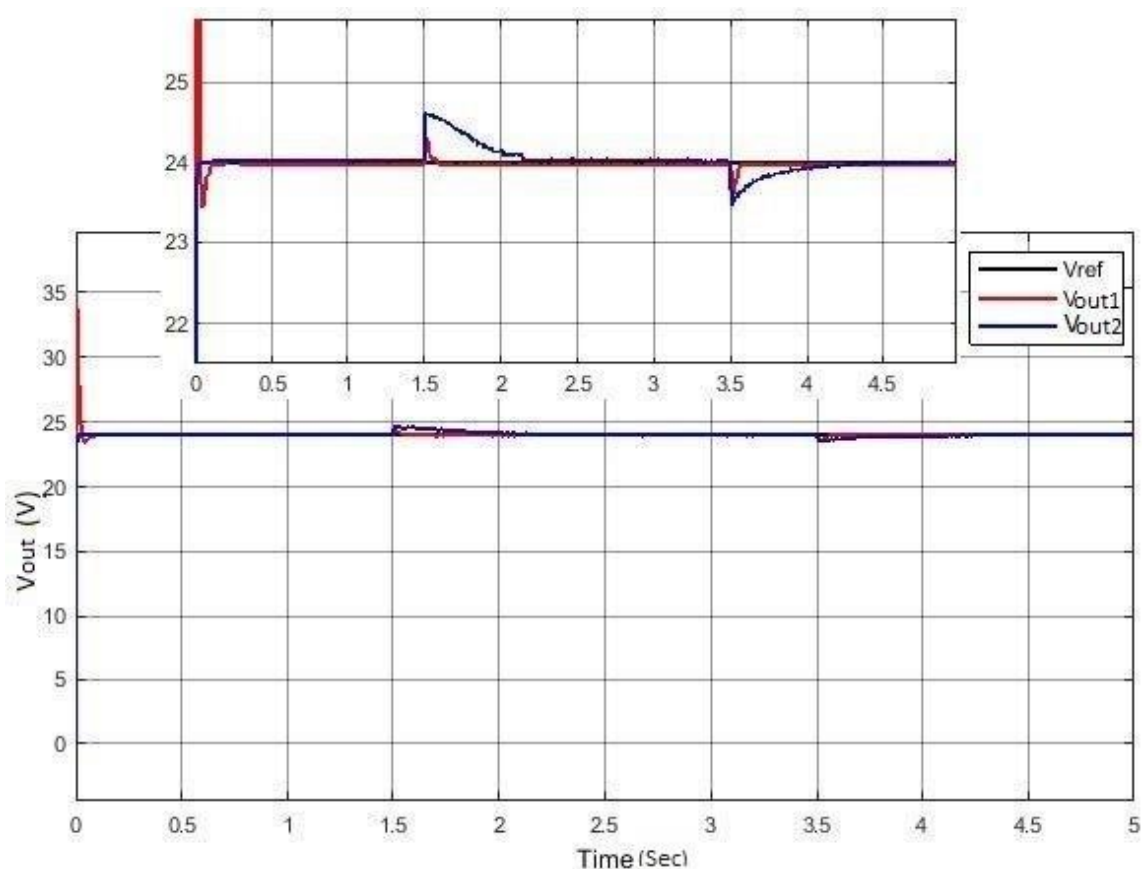


Figure 20. Comparative analysis findings for 24 V.

IV. CONCLUSION

In this study, the performance of DC-DC boost converters was investigated on a PV system and the desired voltages at the converter output were checked with PID controller and the evaluations of the system's performance were presented below:

- The PV system output produces 12-13 V voltage and this voltage is applied to the DC-DC converter input. The output of the PV system varies according to the solar radiation value.
- It adjusts the PID controller switching function according to the voltage value obtained from the output of the PV system and ensures that the desired voltages are obtained from the converter output.
- HS and SS converters produced high stability levels for 18 V. The output voltage error in the HS boost DC-DC converter was $\pm 0.12\%$ and the SS boost was $\pm 0.28\%$ in the DC-DC converter. In this case, the HS converter performed better.
- HS and SS converters produced high stability levels for 24 V. The output voltage error in the HS boost DC-DC converter was $\pm 0.08\%$ and the SS boost was $\pm 2.2\%$ in the DC-DC converter. In this case, the HS converter performed better.
- If the load increased by 100%, converters produced high stability levels when examined in Figure 11 (HS) and Figure 17 (SS). In detail, the HS boost DC-DC converter produced better results than any other.
- If the load is reduced by 50%, the converters' stability levels are better at 18 V when examined in Figure 12 (HS) and Figure 18 (SS). The performance of the 24 V HS converter is better than the SS converter. But 4-5 for 24 V the converter output with SS between seconds has failed. This can be said to be due to the drop of the sun's radiation at half-load and high output voltage.

In this context;

- On full load and 100% increased load, PID controlled HS boost converter can be said to produce better results and can be recommended for PV systems.
- The best results on the semi-load are achieved at the output voltage value of 18 V.
- It is understood that the HS converter produced the best results in switching with the PID controller.

ACKNOWLEDGMENT

This study was funded by Istanbul University – Cerrahpasa with the project number FYL-2019-33778.

REFERENCES

- [1] Lakshmi, M., & Hemamalini, S. (2019). Coordinated control of MPPT and voltage regulation using single- stage high gain DC–DC converter in a grid-connected PV system. *Electric Power Systems Research*, 169, 65-73.
- [2] Sheng, K., Williams, B. W., & Finney, S. J. (2000). A review of IGBT models. *IEEE transactions on Power Electronics*, 15(6), 1250-1266.
- [3] Bodur, H., Aksoy, I., & Akin, B. (2002). Soft switching techniques in DC-DC converters. *Source Electric*, 158, 100-108.
- [4] Kazimierczuk, M. K. (2015). *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. John Wiley & Sons.
- [5] Hua, G., Yang, E. X., Jiang, Y., & Lee, F. C. (1993, June). Novel zero-current-transition PWM converters. In *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialist Conference-PESC'93* (pp. 538-544). IEEE.
- [6] Hua, G., Leu, C., & Fred, C. (1992). Lee, ". *Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters" IEEE PESC*, 55-61.
- [7] Bodur, H., & Bakan, A. F. (2004). A new zvt-zct-pwm dc-dc converter. *IEEE transactions on power electronics*, 19(3), 676-684.
- [8] Das, P., & Moschopoulos, G. (2007). A comparative study of zero-current-transition PWM converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(3), 1319-1328.
- [9] Kondawar, S. S., & Vaidya, U. B. (2012). A comparison of two MPPT techniques for PV system in Matlab/Simulink. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2(7), 73-79.
- [10] Moubayed, N., El-Ali, A., & Outbib, R. (2009). A comparison of two MPPT techniques for PV system. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5(12), 770-779.
- [11] Arulselvi, S., Uma, G., & Chidambaram, M. (2004, August). Design of PID controller for boost converter with RHS zero. In *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004*. (Vol. 2, pp. 532-537). IEEE.
- [12] Dave, M. R., & Dave, K. C. (2012). Analysis of boost converter using PI control algorithms. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 3(2), 71-73.
- [13] Amirahmadi, A., Rafiei, M., Tehrani, K., Griva, G., & Batarseh, I. (2015). Optimum design of integer and fractional-order PID controllers for boost converter using SPEA look-up tables. *Journal of Power Electronics*, 15(1), 160-17

EEG Sinyallerinin Sınıflandırılmasında Evrimsel Öznitelik Seçim Metotlarının Kullanılması

Using Evolutionary Feature Selection Methods in Classification of EEG Signals

Ferda ABBASOĞLU¹, Ayla GÜLCÜ², Ulvi BAŞPINAR³

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli, Türkiye

² Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 34445, İstanbul, Türkiye

³ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

Öz

Elektroensefalografi beyindeki elektriksel akımın ölçülmesi ile elde edilen sinyallerdir. Bu sinyallerin sınıflandırılması özellikle beyin sinyalleri ile ilgili rahatsızlıkların teşhis, tanı ve tedavisine katkı sağladığı için önemlidir. Bu çalışmada bu alanda epilepsi hastalığının tanısı için en çok kullanılan veri kümesi olan Bonn Üniversitesi veri kümesi kullanılmıştır. Beş farklı denekten alınan sinyallerden oluşan bu veri kümesinden anlamlı sonuçlar elde edebilmek için öncelikle veri temizleme, öznitelik çıkarma ve öznitelik seçme yöntemleri kullanılmıştır. Daha sonra bu yöntemler sınıflandırma başarısına katkıları açısından kıyaslanmıştır. İlk olarak filtrelenen veriden Ayrık Dalgacık Dönüşümü metodu ile istatistiksel özellikler çıkarılmış, ardından Diferansiyel Evrim Algoritması kullanılarak en iyi sınıflandırma sonucunu veren öznitelik alt kümesi seçilmiştir. Seçilen özniteliklere sahip veri kümesinin sınıflandırma başarısı Destek Vektör Makineleri ile test edilmiştir. Kullanılan yöntem ile bazı sınıfların ayrılmasında literatürdeki benzer çalışmalardan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bazı ikili ve üçlü kümelerin sınıflandırılmasında sırasıyla 0,98 ve 0,94 doğruluk oranları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektroensefalografi sinyal analizi, Diferansiyel Evrim Algoritması, Öznitelik Çıkarımı, Öznitelik Seçimi.

Abstract

Electroencephalography signals are obtained by measuring the electrical current in the brain. The classification of these signals are especially important, as they contribute to the diagnosis, and treatment of disorders related to brain signals. In this study, the data set of the University of Bonn, which is the most widely used data set for the diagnosis of epilepsy, was used in this field. In order to obtain meaningful results from this data set consisting of signals from five different subjects, firstly, data filtering, feature extraction and feature selection methods have been used first. Later, these methods were then compared in terms of their contribution to classification success. First, statistical properties were extracted from the filtered data by the Discrete Wavelet Transform method, and then the subset of the features that gave the best classification result was selected using the Differential Evolution Algorithm. The classification success of the data set with the selected features has been tested with the Support Vector Machines. With the method used, better results were obtained than similar studies in separating some classes. In the classification of some double and triple sets, accuracy rates of 0.98 and 0.94, respectively, were obtained.

Keywords: Electroencephalography signal analysis, Differential Evolution Algorithm, Feature Extraction, Feature Selection.

I. GİRİŞ

Beyin çalışması esnasında elektriksel akım üretmektedir. Beyin Bilgisayar Arayüzü (BBA) ile beyinde üretilen elektriksel akım ölçülebilir ve bilgisayarlar tarafından yorumlanabilir. BBA sayesinde felçli dolayısıyla kas hareketlerini sağlayamayan kişilerin yaşamlarını kolaylaştırabilecek araçlar geliştirilebilmektedir.

Elektroensefalogram (EEG), beyindeki elektriksel akımın oluşturduğu sinyallerin kişinin kafasına bağlanan elektrotlar yardımıyla bilgisayar ortamı gibi sayısal bir ekrana aktarılmasıyla elde edilen bir BBA türüdür. EEG kullanılarak geliştirilen çeşitli cihazlarla kişinin zihinsel elektrik akımı ölçülmektedir. Ölçülen bu akımla o anda gerçekleştirilmek istenen hareket tespit edilmektedir. Bu tespitle birlikte mekanik kol, mekanik ayak gibi insan yaşamını kolaylaştıran aletler üretilebilmektedir.

EEG aynı zamanda kişinin nörolojik yapısının anlaşılması ile ilgili bilgiler de içermektedir. EEG verisi kullanılarak kişinin uyku bozukluğuna sahip olup olmadığı belirlenebilmekte, psikolojik rahatsızlıklarının ve epilepsi gibi beyin kaynaklı hastalıklarının tanı ve tedavisi yapılabilmektedir.

Bu çalışmada EEG sinyallerinin sınıflandırma başarısını arttırabilmek için Bonn Üniversitesi'nin veri kümesi [1] kullanılmıştır. Bu veri kümesinde 5 adet denekten alınmış veriler bulunmaktadır. Farklı fiziksel özelliklere sahip

bu deneklerden elde edilen sinyaller farklı sınıflara ait veri kümesini oluşturmaktadır. Sağlıklı denekten gözleri açık iken kayit edilen EEG verisi A sınıfını, sağlıklı ancak gözleri kapalı olan denekten alınan sinyaller B sınıfını oluşturmaktadır. Epilepsi hastası olduğu bilinen ancak nöbet halinde olmayan iki farklı denekten alınan veriler de C ve D sınıfını oluşturmaktadır. C ve D sınıfının farklılığı EEG sinyalleri okunurken elektrotların kafada takıldıkları alanın farklı olmasıdır. Son olarak epilepsi nöbeti geçiren kişiden alınan sinyaller E sınıfını oluşturmaktadır. Bu veri kümesine öncelikle öznitelik çıkarım yöntemleri, ardından öznitelik seçim yöntemleri uygulanmıştır. Bu yöntemler sonucu boyutu küçültülen veri kümesi sınıflandırıcı yardımıyla sınıflandırılmış ve başarı oranı ölçülmüştür.

Literatürde EEG sinyallerinin sınıflandırılması üzerine birçok bilimsel çalışma görülmektedir. Bu çalışmalarda en yaygın olarak tercih edilen veri kümesi Bonn Üniversitesi'nin veri kümesidir[1]. 2020 yılında Zhang G. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [2] Bonn Üniversitesi'nin verisi kullanılmıştır. Bu çalışmada EEG sinyal tespiti sağlamak için çok ölçekli yerel olmayan bir ağ önerilmiştir. Ağ sınıflandırma performansını iyileştirmek için iki özel katman içeren 1D evrişimli sinir ağı kullanılmıştır. Bütün kümeler E kümesiyle karşılaştırarak sınıflandırılmış; A ve E kümesi sınıflandırması için %99,93 doğruluk bulunmuştur.

2019 yılında D. Lu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [3] Bonn Üniversitesi'nin verisine [1] ilk olarak filtreleme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra sinyal evrişimli sinir ağı yapısından geçirilerek sınıflandırılmıştır. Ancak sınıflandırma işlemi için veri kümesi 3 sınıfa ayrılmıştır. Sağlıklı kişilerden alınan A ve B sınıfları 0 ile, hasta kişilerden alınan C ve D sınıfları 1 ile nöbet halindeki kişilerden alınan E sınıfı ise 2 ile etiketlenmiştir. Bu şekilde oluşturulan üç sınıf için sınıflandırma %99 doğruluk oranı ile elde edilmiştir.

2018 yılında D. Kaya ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [4] yine Bonn Üniversitesi'nin verisi kullanılmıştır. Bu çalışmada temel bileşen analizinin sinyalin sınıflandırma başarısına etkisi incelenmiştir. Sınıflandırma işleminde k en yakın komşu algoritması uygulanmış, deneyler sonucunda %87,5 doğruluk oranı elde edilmiştir.

2019'da S. Ramakrishnan ve ekibi ilki Bonn Üniversitesi'nin veri kümesi, [1] ikincisi ise Boston Çocuk Hastanesi verisi [5] olmak üzere iki farklı veri kümesi üzerinde çalışma [6] yapmışlardır. Her iki veri kümesinden dalgacık katsayısı elde edebilmek için Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) uygulanmıştır. Dalgacıklar dördüncü seviyeye kadar ayrılmıştır. Ayrım sonucunda elde edilen her bir alt banttan katsayılar elde edilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak veriyi temsil eden

istatistiksel özellikler çıkarılmıştır. Daha sonra sınıflandırma yapabilmek için verinin yarısı eğitim yarısı test için kullanılmıştır ve sonuçta %95 doğruluk oranı elde edilmiştir.

2017'de Z. Lasefr ve arkadaşları da Bonn Üniversitesi'nin verisini kullanarak bir çalışma yapmışlardır [7]. Bu çalışmada sağlıklı gözü açık denek ile (A) epilepsi nöbeti geçiren (E) denekten elde edilen sinyaller kıyaslanmıştır. Bunun için veriye ilk olarak Chebyshev filtresi uygulanmış, daha sonra filtrelenen veriye ADD uygulanmıştır. ADD ile veri alt bantlarına ayrılmıştır ve her alt banttan katsayılar elde edilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak dalgalara ait enerji değerleri hesaplanmıştır. Son olarak, destek vektör makineleri (DVM) ve yapay sinir ağları (YSA) ile veri sınıflandırılmış ve sınıflandırma başarısı ölçülmüştür. Buna göre, en yüksek doğruluk oranı %98 olarak YSA ile edilmiştir. DVM ile en fazla %96 oranı elde edilmiştir.

2017'de Md. Rashid ve ekibi yaptıkları çalışmada [8] sinyal verisine ADD uygulamıştır. Bunun için Daubechies dalgacık ailesinden Daubechies-4 (db4) dalgacığı kullanılmıştır. Dalgacıklar 5. Seviyeye kadar ayrılmıştır. Bu ayırmadan elde edilen dalgacık katsayıları kullanılarak 10 adet istatistiksel özellikler çıkarılmıştır. Sınıflandırma yapılırken veri kümesi bir sınıfa karşı diğer sınıf kıyaslanarak ikili ve üçlü kümeler olarak düşünülüp ölçülmüştür. En yüksek %100 en düşük %79,3 doğruluk oranları elde edilmiştir.

2017'de A. Ahmadi ve arkadaşları sinyali 17 alt parçaya bölerek bir çalışma [9] yapmışlardır. Bölünme sonucu elde edilen her parça ADD ile dalgacık katsayılarına dönüştürülmüştür. Dönüşümde bior2.4, rbio2.2, Daubechies4, bior1.1, sym4, db6 ve Daubechies2 gibi dalgacık aileleri kullanılmıştır. Veriyi temsil eden bu dalgacık katsayıları kullanılarak sınıflandırma işlemi yapılmıştır ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Sınıflandırma işlemi iki şekilde yapılmıştır. İlki bir sınıfla öteki sınıf kümelenecek toplamda iki sınıfın kıyaslanması (AxE), diğeri ise bir sınıfa karşı diğer bütün sınıfların kümeleneceği iki sınıfın karşılaştırılmasıdır (ABCDxE). DVM ile farklı sayılarda k-katlamalı çapraz doğrulama ile sınıflandırılmıştır.

2017 yılında M.Baig ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [10] EEG verisine [11] ortak uzamsal örüntüler uygulanmış ve elde edilen özniteliklere diferansiyel evrim algoritması uygulanarak en yüksek doğruluk oranını veren öznitelik kümeleri seçilmeye çalışılmıştır. Sınıflandırma için k en yakın komşu, DVM kullanılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

2014'de N. Ahammad ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [12] Bonn verisi kullanılmıştır. Bu veriye dalgacık dönüşümü uygulanmıştır. Dalgacık dönüşümü için ADD kullanılmıştır. Dalgacıklar dördüncü

seviyeye kadar ayrılmıştır. Elde edilen alt bantlardan ilgili alt bant alt kümesi seçilmiştir (D3, D4 ve A4). Bu alt bantlardan veriyi temsil eden istatistiksel özellikler çıkarılmıştır. Bu özellikler kullanılarak kümeler sınıflandırılmıştır. D ve E sınıfları kıyaslanmış ve başarı oranı %84,2 olarak bulunmuştur.

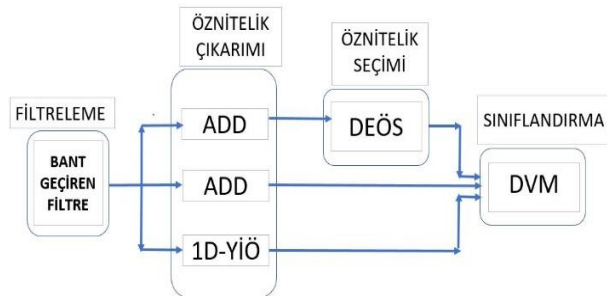
2014 yılında O. Salem ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmada [13] yine Bonn verisi kullanılmıştır. Veriye dalgacık dönüşümü uygulanmıştır. Elde edilen alt bantlardan özellikler çıkarılıp Karınca Kolonisi Algoritması kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Sınıflandırma işleminde diğer deneklere karşı nöbet halindeki denek kümesi oluşturulmuştur. Hata oranı %9 olarak bulunmuştur.

2011 yılında Bonn verisinin kullanıldığı K. Mahajan ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmada [14] veri alt bantlarına ayrılmıştır. Verinin boyutunu azaltmak ve sınıflandırma başarısını arttırabilmek için temel bileşen analizi ve bağımsız bileşen analizi yöntemleri kullanılmıştır. Epilepsi rahatsızlığı olan deneklerle sağlıklı denekler kıyaslanmış ve yapay sinir ağları ile sınıflandırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan yöntemler temel olarak 4 kısma ayrılmıştır. İşlem adımları Şekil 1'deki gibidir. İlk olarak veri ön işleme tabii tutularak filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonra filtrelenen veriden veriyi temsil edebilecek özellikler oluşturabilmek için veriye öznelik çıkarım yöntemleri uygulanmıştır. Bu çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) ve Bir Boyutlu Yerel İkili Örüntü (1D-YİÖ) öznelik çıkarımı yöntemleri kullanılmıştır. Öznelik çıkarımı sonucu elde edilen öznelik matrisinden sınıflandırma doğruluk oranını arttıracak öznelikler seçilmek istenmiştir. Bunun için öznelik seçim yöntemlerinden diferansiyel evrim tabanlı öznelik seçimi (DEÖS) kullanılmıştır. Son olarak elde edilen öznelik matrisi DVM ile test edilmiş ve doğruluk oranları karşılaştırılmıştır.

Çalışmada yapılan deneyler için Python 3 programlama dilinde yazılmış Numpy (versiyon 1.16.4), Pandas (versiyon 0.24.2) ve SciKit-Learn (versiyon 0.21.1) kütüphaneleri kullanılmıştır.



Şekil 1. Kullanılan yöntemler

2.1. Veri Kümesi ve Ön İşleme Adımları

Bu aşamada kullanılacak verilerin detaylı tanımlanması yapılmıştır ve verilere uygulanan ön işlemler açıklanmıştır. Bu çalışmada Bonn Üniversitesi'nin Epilepsiyi inceleyen biriminde yayınlanan kullanılabilir halka açık verisi [1] kullanılmıştır. Bu veri seti 5 denekten alınan EEG sinyallerinden oluşmaktadır. 5 denek 5 sınıfı temsil etmektedir. A sınıfı sağlıklı ve gözleri açık haldeyken beyin sinyalleri kaydedilen denegi temsil etmektedir. B sınıfı ise A gibi sağlıklı fakat gözleri kapalı haldeyken sinyalleri kaydedilen veriyi temsil etmektedir. C ve D epilepsi hastalarının verileridir. C'nin D'den farkı EEG sinyalleri kaydedilirken elektrotların beyin farklı bölgelerine takılması ile elde edilmiş olmasıdır. E ise hem epilepsi hastası hem de hasta nöbet geçirirken kaydedilen veriyi temsil etmektedir. Tablo 1'de veri sınıflarının açıklamaları gösterilmiştir.

Tablo 1. Bonn Verisi Özeti

Denek	Sınıf İsimleri	Kişilerin Durumu	Elektrot Yerleştirme
Sağlıklı Denek	A	Gözler Açık	Uluslararası 10-20 sistem
	B	Gözler Kapalı	Uluslararası 10-20 sistem
Hasta Denek	C	Hasta ve Nöbet Halinde değil	Epileptojenik bölgenin karşısı
	D	Hasta ve Nöbet Halinde değil	Epileptojenik bölge
	E	Hasta ve Nöbet Halinde	Epileptojenik bölge

Bu verilere literatürde de benzer çalışmalar da rastlanan bant geçiren filtresi uygulanmıştır. Bu filtre kullanılarak gürültülü verinin elenmesi amaçlanmıştır. Şekil 2'de Filtrelemeden önce ve filtrelemeden sonra elde edilen sinyallerin frekans aralığı gösterilmiştir.



Şekil 2. Orijinal ve filtrelenmiş sinyalin frekans aralığı

Şekil 2'de filtreleme uygulandıktan sonra değişen frekans aralıkları gösterilmiştir. Bant geçiren filtre kullanılarak belirlenen üst ve alt limit haricindeki diğer

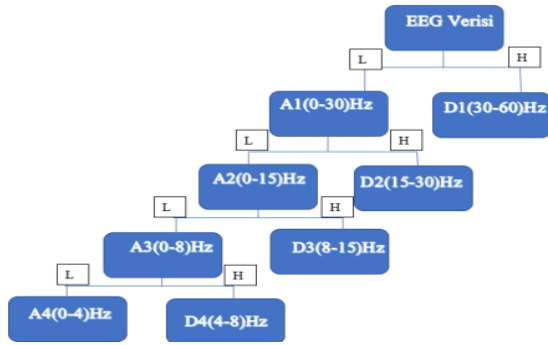
sinyaller bastırılmıştır. Bütün veri kümesine (A, B, C, D, E) üst sınırı 40 Hz ve alt sınırı 0,53 Hz olarak belirlenen bant geçiren filtresi uygulanmıştır.

2.2. Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Sinyal verisinden anlamlı bilgiler çıkarabilmek için zaman frekans araçlarına başvurulmuştur. Dalgacık analizi bu işlemlerden biridir. Fourier yöntemleri durağan olmayan sinyaller için uygun olmadığından dalgacık dönüşümü metotları alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır [15]. Ayrık dalgacık dönüşümü sinyale belirlenen seviye kadar tekrarlı analiz filtresinin uygulanmasıdır [16]. Dalgacık dönüşümü matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de a değeri dalgacığın ölçekleme parametresini; b dönüşüm parametresini; ψ ana dalgacığı; $W(a, b)$ işaretin sürekli dalgacık dönüşümünü belirtir. Dalgacık dönüşümü uygulanırken dalgacığın kaçınıcı seviyeye kadar ayrıldığı Şekil 3'te gösterilmektedir.



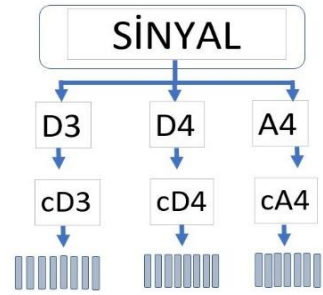
Şekil 3. EEG 4. seviye dalgacık ayrışması

Şekil 3'te gösterildiği gibi sinyal verisine hem alçak hem yüksek geçiren filtre uygulanmıştır. Sinyale alçak geçiren filtre uygulandıktan sonra elde edilen değerler sinyalin önemli özelliklerini taşımaktadır. Sinyale yüksek geçiren filtre uygulandıktan sonra elde edilen değerler sinyalin gürültülü verisini taşımaktadır. Dolayısıyla alçak geçiren filtre uygulanan kısma tekrar filtre uygulanıp dördüncü seviyeye kadar inilmektedir. Her uygulanan filtre bir seviyeyi temsil etmektedir. Dördüncü seviyeye inildiğinde elde edilen katsayılar; D1, D2, D3, D4 ve A4 'dür. Sınıflandırma için literatürde de kullanılan dalgalar alfa, teta ve delta olarak belirlenmiştir [6] [7].

Tablo 2. Dalgaların frekans aralıkları

Dalga Adı	Frekans Aralığı
Delta	0-4
Teta	4-8
Alfa	8-16
Beta	16-32
Gama	32-64

Bu dalgaları temsil eden katsayılar bulunmaktadır. Tablo 2'de gösterildiği üzere Deltayı A4, alfayı D3 ve tetayı D4 temsil etmektedir. Dalgacık dönüşümü üçüncü seviyeye kadar inseydi, A4 yani delta aralığı net elde edilemeyecekti. Beşinci seviyeye inseydi A4 aralığına tekrar filtre uygulanacaktı. Delta iki farklı dalgacık katsayısına dağılmış olacaktı. Bu sebeple literatürde de yaygın olarak kullanılan dördüncü seviye dalgacık ayrımı uygulanmıştır. Ayrıca literatürde S. Ramakrishnan ve ekibinin yaptığı çalışmada [6], N. Ahammad ve ekibinin yaptığı çalışmada [12] ve O. Salem ve ekibinin yürüttüğü çalışmada [13] dalgacıkların dördüncü seviyeye kadar ayrımı gözlenmiştir.

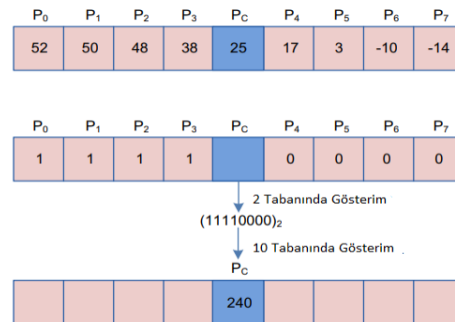


Şekil 4. ADD ile öznelik çıkarımı

Şekil 4'de gösterildiği gibi seçilen alt bantların (D3, D4, A4) her birisinden alt bant katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak dalgayı tanımlayan istatistiksel özellikler çıkarılmıştır. Bu çalışmada her banttan çıkarılan istatistiksel özellikler; standart sapma, maksimum, varyans, çarpıklık, enerji, basıklık, minimum ve ortalamadır. 1 alt banttan 8 istatistiksel özellik çıkarılmıştır. Toplamda veriyi temsil eden 24 öznelik elde edilmiştir.

2.3. 1D-Yerel İkili Örüntü

1D-Yerel İkili Örüntü (1D-YİÖ) bu çalışmada öznelik çıkarım metoduna alternatif olarak eklenmiştir. YİÖ Ojala ve arkadaşları [17] tarafından bulunan yöntemdir. 1D-YİÖ yerel komşularda genel bir doku tanımından türetilen gri ölçekli bir doku ölçüsüdür [18]. 1D-YİÖ'da her pikselin çevredeki 8 komşusuyla kıyaslanması sonucu bir değer almasıyla oluşturulur.



Şekil 5. 1D sinyale YİÖ uygulanması [18]

Şekil 5'te görüldüğü gibi ortadaki piksel değeri sekiz komşusunun ortadaki değeri ile kıyaslanır. Eğer

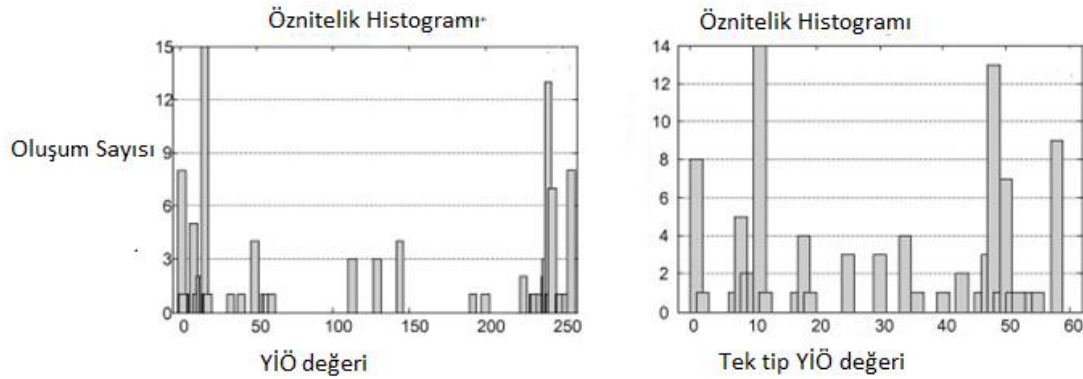
ortadaki komşudan büyük değerler ise o değeri temsilen 1 yazılır. Eğer ortadaki komşusundan küçükse o değeri temsilen 0 yazılır. Bu dönüşüm sonucunda 1 ve 0'lardan oluşan bir sayı bulunmuş olur. (x_i) merkezdeki değer i 'nci komşusu ($i = 1, 2, \dots, 8$), $G(x)$ ise merkezdeki değeri ifade eder. Anlatılan dönüşüm aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$t = G(x_i) - G(x) \quad (2)$$

$$YiÖ(x) = \sum_{i=0}^p s(t). 2^i, \quad s(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3)$$

1 ve 0'lerden oluşan sayı elde edebilmek için **Eşitlik (2)** ve **(3)** kullanılır. Her bir kanal için 256 özellik elde edilir. Bir kanal için 256 özelliğin fazla olması sebebiyle veri boyutu düşürülür. Veri boyutunun azaltılması için elde edilen 8 bitlik sayının düzenli olup

olmamasına göre ayırım yapılır. 8 bitlik sayının düzenli olup olmaması şu şekilde hesaplanır; eğer sayıda 1'ler görülüp 0'a rastlanırsa bu bir değişimdir. Aynı şekilde 0'lar varken 1'e rastlanması da bir başka değişimdir. Bir sayıda değişim sayısı 2'den fazla ise düzensizdir. 2'den az ise düzenlidir. Bu işlem sonunda 58 adet düzenli sayı bulunmuştur. Her bir düzenli sayı 0-58 aralığına yerleştirilmiştir. Bulunan bütün düzensiz sayılar da 59. sütuna eklenmiştir. Daha önce 256 olan veri boyutu 59'a düşmüştür. Kullandığımız veri tek kanallı olduğu için öznitelik sayısı 59, veri boyutu da 100 örnek için 100x59 olmuştur. Veri boyutunun düşürülmesi veriyi daha anlamlı hale dönüştürmüştür ve karmaşıklığını azaltmıştır. 1D-YiÖ kullanılan başka çalışmalarda veri boyutunun azaltıldığı gözlenmiştir [19] [20].



Şekil 6. Benzer çalışmada öznitelik oluşturulup veri boyutunun küçültülmesi [19]

Literatürdeki çalışmada sinyal verisi 8 bitlik alınıp, 1ve 0'lara dönüştürülmüştür. Şekil 6'daki gibi 256 öznitelik oluşturulmuştur. Veri boyutunun büyüklüğü sebebiyle düzenli ve düzensiz olarak ayrılmıştır. 58 adet düzenli bulunmuştur. Diğer düzensizler bir sütuna eklenmiştir. Bu sayede 59 öznitelik bulunmuştur. 2014'de Y. Kaya ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [19] veri boyutunun azaltılmasının oluşturulan kümelerde doğruluk oranını arttırdığı görülmüştür. Doğruluk oranını arttırdığı için bu çalışmada da öznitelik boyutu azaltılmıştır.

2.4. Diferansiyel Evrim Algoritması ile Öznitelik Seçimi

ADD ile elde edilen 24 öznitelikten sınıflandırma başarısını olumlu yönde etkileyecek özellikler Diferansiyel Evrim Algoritması ile Öznitelik Seçimi (DEÖS) yöntemi ile belirlenmiştir. Kullanılan Diferansiyel Evrim algoritmasında amaç fonksiyonu olarak Destek Vektör Makineleri (DVM) ile elde edilen sınıflandırma doğruluk oranı kullanılmıştır. Bu sayede Diferansiyel Evrim (DE) metodu ile tüm öznitelikler içinden en yüksek sınıflandırma başarısı verecek öznitelik alt kümesinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Diferansiyel Evrim (DE) algoritması Storn ve Price tarafından bulunmuştur [21]. Bu algoritmada

popülasyon NP adet bireyden oluşmaktadır. Popülasyon içerisinde ise her bir birey D gerçek değerli parametre içermektedir. Diferansiyel evrim algoritması NP tane D boyutlu vektörden oluşmaktadır. Popülasyon **Eşitlik (4)** ve **(5)**'deki gibi tanımlanmıştır.

$$P_{x,g} = (x_i, g), i = 0, 1, \dots, NP-1 \quad g = 0, 1, \dots, g_{max} \quad (4)$$

$$x_{i,g} = (x_{j,i,g}), j = 0, 1, \dots, D-1 \quad (5)$$

Eşitlik (4) ve **(5)**'de $g = 0, 1, \dots, g_{max}$ vektörün hangi nesilden geldiğini belirtmektedir. $i = 0, 1, \dots, (NP-1)$ popülasyon içindeki bireyi temsil eder. $j = 0, 1, \dots, (D-1)$ birey içerisinde hangi parametrenin kullanıldığını belirtmektedir. D boyutlu b_j^L ve b_j^U olarak tanımlanan iki vektör için L alt sınırı U ise üst sınırı göstermektedir. Vektörlerin parametrelerine **Eşitlik (6)**'daki gibi üst ve alt sınırlar arasında değerler atanılmıştır.

$$X_{j,i,g} = rand(0,1) (b_j^U - b_j^L) + b_j^L \quad (6)$$

Eşitlik (6)'da rastgele sayı üretimi temsil edilmektedir. Mutasyon işlemi için r_0 temel olarak alınan vektörü, r_1 ve r_2 ise rastgele seçilmiş vektörleri temsil etmektedir.

$$v_{i,g} = x_{r_0,g} + F * (x_{r_1,g} - x_{r_2,g}) \quad (7)$$

Eşitlik (7)'deki F ifadesi $[0,1)$ arasında bir değer almaktadır. Yeni popülasyon aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} P_{v,g} &= (v_{i,g}), \quad i = 0,1, \dots, N_{p-1}, \\ g &= 0,1, \dots, g_{max}, \quad v_{i,g} = v_{i,g} = (v_{j,i,g}), \\ j &= 0,1, \dots, D - 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Eşitlik (8)'deki ara popülasyon $P_{v,g}$, NP adet mutasyon sonucu oluşmuş vektör $v_{i,g}$ 'yi içermektedir. Daha sonra Diferansiyel evrim operatörlerinden biri olan çaprazlama işlemine geçilmektedir. Bu işlem sonucu deneme vektörü oluşturulmaktadır. Bu vektörlerin parametrelerinin mutasyon sonucu oluşmuş vektörden mi yoksa popülasyondan mı geleceğine karar verilmektedir.

$$u_{j,i,g} = \begin{cases} V_{j,i,g}, & \text{if } (rand_j(0,1) \leq C_r \wedge j = j_{rand}) \\ X_{j,i,g}, & \text{if } (rand_j(0,1) > C_r \vee j = j_{rand}) \end{cases} \quad (9)$$

Eşitlik (9)'da gösterilen C_r çaprazlama olasılığını temsil etmektedir. Eşitlikte gösterildiği gibi rastgele üretilen sayı çaprazlama faktörüyle kıyaslanmaktadır. Eğer çaprazlama faktörü büyükse deneme faktörünün parametresi olarak mutasyon sonucu oluşan vektörün parametresi alınmaktadır. Çaprazlama faktörü küçükse popülasyonun parametresi alınmaktadır. Bu işlem sonucu deneme vektörleri oluşturulmuştur. Bu aşamadan sonra hangisinin seçileceği amaç fonksiyonuna en büyük katkının hangisi tarafından yapıldığına bağlı olarak değişmektedir.

DEÖS parametrelerinden biri olan iterasyon sayısı için 100, 1000 ve 10000 kullanılmıştır. 24 öznitelik içinden doğruluk oranını arttıran 10, 15 ve 20 elemanlı öznitelik kümeleri oluşturulmuştur. Çaprazlama oranı (C_r) değeri için 0,7;0,5 ve 0,3 kullanılmıştır.

2.5. EEG Verisinin Sınıflandırılması

Literatürde EEG verisini sınıflandırmak için farklı yöntemler tercih edilmiştir. Zhang G. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [2] ve D. Lu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [3] evrişimli sinir ağıyla sınıflandırma başarısı ölçülmüştür. O. Salem ve ekibinin yürüttüğü çalışmada [13] Karınca Kolonisi Algoritması kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. D. Kaya ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [4] sınıflandırma işleminde k en yakın komşu algoritması uygulanmıştır. Z. Lasefr ve arkadaşları yaptığı çalışmada [7] veriyi Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanarak sınıflandırmışlardır. A. Ahmadi ve ekibinin yaptığı çalışmada [9] DVM ile farklı sayılarda k-katlamalı çapraz doğrulama ile sınıflandırılmıştır.

DVM'nin tarihi 1936 yılında örüntü tanıma problemlerine çözüm arayan R.A.Fisher'a dayanmaktadır [22]. 1950 de ise Aronszajn DVM'nin

parçası olan çekirdeği ortaya çıkarmıştır [23]. 1963'e gelindiğinde Vapnik ve Lerner DVM'nin temeli sayılabilecek algoritmayı üretmişlerdir [24]. 1992'de Vapnik ve ekibi maksimum marjlı hiperplanlara çekirdek kuralı uygulayarak lineer olmayan bir sınıflandırıcı ürettiler [25]. 1995 marj sınıflandırıcı geliştirilmiştir [26].

DVM büyük boyutlu sınıflandırma problemlerinde kullanılan önemli bir öğrenme algoritmalarından biridir. DVM ile sınıflandırmada amaç sınıflara ait örneklerin, eğitim verisi ile elde edilen bir karar fonksiyonu yardımıyla birbirinden ayrılmasıdır. Söz konusu karar fonksiyonu kullanılarak eğitim verisini en uygun şekilde ayırabilecek hiper-düzlem bulunmaktadır. Bahsedilen sınıfları ayırabilecek birçok hiper düzlem çizilebilir fakat DVM'nin amacı kendisine en yakın noktaların arasındaki uzaklığı maksimuma çıkaran hiper düzlemi bulmaktır.

Bu çalışmada ayrıca literatürde sıklıkla kullanılan gözetimli öğrenme algoritmalarından Doğrusal Diskriminant Analizi ve DVM kullanılmıştır, ancak daha iyi sonuçlar elde edildiğinden sadece DVM sonuçları raporlanmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada epilepsi verisinin sınıflandırma başarısını arttırmak için farklı öznitelik çıkarım yöntemleri ve evrimsel tabanlı öznitelik seçim yöntemi uygulanmıştır. İlk olarak bu veri kümelerine bant geçiren filtresi uygulanmıştır. Filtrelenen verilerden ADD VE 1D-YİÖ ile öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Daha sonra DEÖS ile öznitelik seçimi yapılmıştır. Seçilen özniteliklerin doğruluk oranları ölçülmüştür. Daha önceki çalışmalar incelenerek Bonn verisinin sınıfları arasında farklı kümeler oluşturulmuştur. Bu farklı kümelerin sınıflandırma doğruluk oranları denenmiştir. Bu kümeler ikili (AxB, AxC, AxD, AxE) ve üçlü (AxBxC, AxBxD, AxCxE, BxDxE) olmak üzere sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Kümelerin başarı oranları kıyaslanmıştır. Bütün kümelemeler denenmiştir. Bu çalışmada ise 2'li 3'lü ve 5'li kümelerin sonuçları gösterilmektedir. Sonuçları gösterilen kümeler açıklamalarıyla Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Oluşturulan Kümeler ve Açıklamaları

Küme Adı	Açıklaması
AxE	Sağlıklı ve Gözler Açık x Epileptik Nöbet
BxE	Sağlıklı ve Gözler Kapalı x Epileptik Nöbet
AxBxC	Sağlıklı ve Gözler Açık x Sağlıklı ve Gözler Kapalı x Hasta Nöbet Öncesi
AxBxD	Sağlıklı ve Gözler Açık x Sağlıklı ve Gözler Kapalı x Hasta Nöbet Öncesi
AxBxE	Sağlıklı ve Gözler Açık x Sağlıklı ve Gözler Kapalı x Epileptik Nöbet
AxDxE	Sağlıklı ve Gözler Açık x Hasta Nöbet Öncesi x Epileptik Nöbet

AxCxE	Sağlıklı ve Gözler Açık x Hasta Nöbet Öncesi x Epileptik Nöbet
BxDxE	Sağlıklı ve Gözler Kapalı x Hasta Nöbet Öncesi x Epileptik Nöbet
BxCxE	Sağlıklı ve Gözler Kapalı x Hasta Nöbet Öncesi x Epileptik Nöbet

Tablo 4’de ikili kümelerin sınıflandırma sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 4’de görüldüğü üzere AE kümesi için literatürde 1D-YİÖ ile ulaşılabilen değere bu çalışmada ADD kullanarak ulaşılmıştır. Tablo 5’te üçlü kümelerin sınıflandırma sonuçları ve literatürdeki en iyi sonuçlar

gösterilmektedir.

Tablo 5’de gösterildiği üzere AxBxC ile AxBxE’nin doğruluk oranları karşılaştırıldığında E sınıfı içeren kümenin içermeyene oranla daha yüksek doğruluk oranına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü en farklı sınıf E (epilepsi nöbeti halindeki denekten alınmış veri) sınıfıdır. Bu durumda bir kümede E deneğinin olması sınıflandırmada oluşturulan diğer kümelere göre daha yüksek doğrulukla sınıflandırma yapılmasına olanak vermektedir. Bütün sınıfların bulunduğu kümenin başarı oranı tek bir tabloda kıyaslanmıştır. Tablo 6’da sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 4. İkili kümelerin sınıflandırma doğruluk oranı

Çalışma	Öznitelik Seçim Yöntemi	Sınıflayıcı	Küme	Doğruluk Oranı	Özgüllük Oranı	Duyarlılık Oranı
Bu çalışma	ADD	DVM	AxE	0,9875	0,98	1,0
	1D-YİÖ		AxE	0,8	0,8	1,0
			BxE	0,8125	0,81	0,88
	ADD		BxE	0,9812	0,99	1,0
Y.Kaya	1D-YİÖ	DVM	AxE	0,985	-	-

Tablo 5. Üçlü kümelerin sınıflandırma doğruluk oranları

Çalışma	Öznitelik Seçim Yöntemi	Küme	Doğruluk Oranı	Özgüllük Oranı	Duyarlılık Oranı
Bu çalışma	ADD (4. Seviye, db2)	AxBxC	0,9041	0,92	0,92
		AxBxD	0,891	0,91	0,90
		AxBxE	0,9166	0,90	0,92
		AxDxE	0,92	0,92	0,95
		AxCxE	0,929	0,92	0,95
		BxDxE	0,9458	0,95	0,97
		BxCxE	0,95	0,92	0,97
Md. Rasih v.d.	ADD (db4)	AxCxE	0,80	-	-
		BxCxE	0,787	-	-
		AxDxE	0,80	-	-
		BxDxE	0,793	-	-
S.Ramakrishnan v.d.	ADD (4. Seviye)	AxDxE	0,98	-	-

Tablo 6. Beşli kümelerin sınıflandırma doğruluk oranları

Öznitelik Seçimi	Küme	Doğruluk Oranı	Kesinlik	Duyarlılık
ADD	AxBxCxDxE	0,7975	0,80	0,82
1D-YİÖ		0,555	0,52	0,59
ADD+DEÖS		0,8225	0,82	0,85

Tablo 6’dan elde edilen sonuçlara göre 5’li küme oluşturulduğunda en yüksek doğruluk ADD ile elde edilen öznitelik kümesinden DEÖS ile sınıflandırma başarısını arttıran özniteliklerin seçilmesi sonucu elde edilmiştir. Sınıflandırma için DVM kullanılmıştır.

Bu kısımda çalışmamızda bulunan sonuçlar kendi içerisinde kıyaslanmış ve açıklanmıştır. Bonn verisi özellikle tek kanallı olması sebebiyle işlenmesi oldukça kolay bir veri kümesidir. Bu sebeple literatürde bu

veriyle ilgili pek çok çalışma vardır. Elde edilen doğruluk oranları hem literatürde hem de bu çalışmada oldukça yüksektir.

ADD ile üçlü kümelerin varlığında yapılan çalışmada ise bilinen birçok çalışmanın doğruluk oranlarının geçildiği görülmüştür. Literatürde görülen AxCxE kümelerinin kıyaslanmasında elde edilen en yüksek doğruluk oranı %80 iken bu çalışmada %92’lere kadar çıkmıştır. Aynı şekilde bir başka üçlü küme olan

BxCxE ile yapılan deneyde literatürde elde edilen en yüksek doğruluk oranı %78,7 iken bu çalışmada %95 gibi yüksek bir doğruluk oranı bulunmuştur. Ayrıca BxDxE kümesi için bilinen doğruluk oranı %79,3 iken bu çalışmadan %94 elde edilmiştir.

5 sınıflı kümede (AxBxCxDxE) ADD ile elde edilen öznelik kümesine sınıflandırma başarısını arttıracak şekilde öznelik seçimi DEÖS ile uygulandığında elde edilen doğruluk oranı %79'dur. DEÖS parametrelerinde iyileştirmeler yapıldığında (çaprazlama oranı 0,7 ve iterasyon sayısı 1000 seçildiğinde) doğruluk oranının %82'ye çıktığı görülmektedir.

1D-YİÖ yöntemi bir örüntü tanıma işlemidir. Bu çalışmada ADD'ye eşdeğer bir yöntem olarak uygulanmıştır. Daha önce yapılan çalışmaya benzer sonuçlar bulunmuştur. Fakat ADD ile kıyaslanınca başarı oranını daha az arttırdığı görülmektedir. Ayrıca ADD'ye göre daha büyük öznelik kümesi elde edilmiştir. Bu da veri kümesinin daha hantal olmasına sebep olmuştur. 1D-YİÖ'nün daha etkili kullanılabilmesi için çeşitli ön işleme adımları ile 5'li kümenin üzerinde çalışılması gerektiği gelecek çalışmalar için düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Andrzejak, R. (2005). BONN UNIVERCITY EEG time series download page. (10 2019) tarihinde, http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=193&lang=3 adresinden alındı.
- [2] Zhang, G., Yang, L., Li, B., Lu, Y., Liu, Q., Zhao, W., & ... & Che, W. (2020). MNL-Network: A Multi-Scale Non-local Network for Epilepsy Detection From EEG Signals. *Frontiers in Neuroscience*, 14.
- [3] Lu, D., & Triesch, J. (2019). Residual deep convolutional neural network for eeg signal classification in epilepsy. *arXiv preprint arXiv:1903.08100*.
- [4] Kaya, D., Türk, M., & Kaya, T. (2018). En Yakın Komşu Algoritması Kullanılarak EEG Sinyallerine Boyut Azaltmanın Etkilerinin İncelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, s. 5.2: 591-595.
- [5] Physio Bank. (2018). 11 12, 2018 tarihinde (<http://physionet.org/cgi-bin/atm/ATM> adresinden alındı).
- [6] Ramakrishnan, S., & Murugavel, A. M. (2019). Epileptic seizure detection using fuzzy-rules-based sub-band specific features and layered multi-class SVM. *Pattern Analysis and Applications*, 16.
- [7] Lasefr, Z. A. (2017). Epilepsy seizure detection using EEG signals. In 2017 IEEE 8th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference (UEMCON) (pp. 162-167), IEEE. IEEE.
- [8] Or Rashid, M. M., & Ahmad, M. (2017). Epileptic Seizure Classification using Statistical Features of EEG Signal. In 2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE) (pp. 308-312). IEEE.
- [9] Ahmadi, A. S. (2017). A New Method for Epileptic Seizure Classification in EEG Using Adapted Wavelet Packets. İstanbul, Turkey: IEEE.
- [10] Baig, M. Z., Aslam, N., Shum, H. P., & Zhang, L. (2017). Differential evolution algorithm as a tool for optimal feature subset selection in motor imagery EEG. *Expert Systems with Applications*, 2017, 90: 184-195.
- [11] Intelligent Data Analysis Group Klaus-Robert Müller, B. B.-U. (2004, Aralık 12). BCI competition III dataset IVa. 12 10, 2020 tarihinde http://www.bbci.de/competition/iii/desc_IVa.html adresinden alındı
- [12] Ahammad, N. F. (2014). Detection of epileptic seizure event and onset using EEG. *BioMed research international* 2014, 2014(7).
- [13] Salem, O., Naseem, A., & Mehaoua, A. (2014). Epileptic Seizure Detection From EEG Signal using Discrete Wavelet Transform and Ant Colony classifier *Communications (ICC). IEEE International Conference on. IEEE*, 2014, 3529-3534.
- [14] Mahajan, K., Vargantwar, M. R., & Rajput, S. M. (2011). Classification of EEG using PCA, ICA and Neural Network. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 1(80-83).
- [15] Siuly, S., Li, Y., & Zhang, Y. (2016, 11). EEG signal analysis and classification. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, s. 141-4.
- [16] Subasi, A. (2007). EEG signal classification using wavelet feature extraction and a mixture of expert model. *Expert Systems with Applications*, s. Cilt 4, 1084-1093.
- [17] Ojala, T., Pietikäinen, M., & Mäenpää, T. (2000). Gray scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *European Conference on Computer Vision*. Springer, Berlin, Heidelberg, s. 404-420.
- [18] Burçin, K., & Vasif, N. V. (2011). Down syndrome recognition using local binary patterns and statistical evaluation of the system. *Expert Systems with Applications*. 38 2011, Cilt 7, s. 8690-8695.
- [19] Kaya, Y., Uyar, M., Tekin, R., & Yıldırım, S. (2014). 1D-local binary pattern based feature extraction for classification of epileptic EEG signals. *Applied Mathematics and Computation*, s. 243: 209-219.

-
- [20] Tiwari, A. K., Pachori, R. B., Kanhangad, V., & Panigrahi, B. K. (2016). Automated diagnosis of epilepsy using key-point-based local binary pattern of EEG signals. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, s. 21(4), 888-896.
- [21] Price, K., Storn, R. M., & Lampinen, J. A. (2006). *Differential Evolution A Practical Approach to Global Optimization*. Springer Science & Business Media.
- [22] Fisher, R. A. (1936). The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of eugenics*, 7(2), 179-188.
- [23] Aronszajn, N. (1950). Theory of reproducing kernels. *Transactions of the American mathematical society*, 68(3), 337-404.
- [24] Vapnik, V., & Lerner, A. Y. (1963). Recognition of patterns with help of generalized portraits. *Avtomat. i Telemekh*, 24(6), 774-780.
- [25] Boser, B. E., Guyon, I. M., & Vapnik, V. N. (1992, July). A training algorithm for optimal margin classifiers. *In Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory* (pp. 144-152).
- [26] Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.

Manyetik Kaçak Akı İşaret Gürültüsü İçin Dalgacık Dönüşümü ve Tekrarlı Gauss Filtreleme Yöntemlerinin İncelenmesi

Investigation on Wavelet Transform and Iterative Gaussian Filtering Methods for Denoising Signal of Magnetic Flux Leakage

Okan KARA¹ , Hasan Hüseyin ÇELİK² 

¹Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Astsubay Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 77720, Yalova, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

Öz

Manyetik kaçak akı (MKA) yöntemi, ferromanyetik özellikteki materyallerde oluşan çatlak, delik, korozyon gibi kusurları algılama amaçlı kullanılan tahribatsız test yöntemlerinden biridir. MKA sensörlerinden alınan işaretler test edilen materyal yapısında oluşan kusurları tanımlamakla birlikte gürültü bileşenlerini de içermektedir. Gürültü miktarı ve niteliği ise test sistemi ve materyal yapısına göre farklılıklar göstermektedir. Uygun olmayan bir filtreleme işlemi sonucunda, kusurları temsil eden işaretler, gürültü içerisinde kaybolmakta veya bozularak anlamını kaybetmektedir. Bu çalışmada MKA yöntemi ile alınan işaretler üzerinde dalgacık dönüşümü ve tekrarlı Gauss filtreleme yöntemlerinin etkinliği incelenmektedir. MKA işaretlerini üretmek amacıyla, ANSYS Maxwell benzetim ortamında manyetik test sistemi tasarlanmıştır. Test materyali olarak, üzerinde farklı büyüklükte 3 yapay kusur bulunan bir çelik plaka kullanılmıştır. Manyetik sistemden alınan işaretler üzerinde, ayrık dalgacık dönüşümü ve tekrarlı Gauss filtreleri uygulanmıştır. Filtrelenen işaretler üzerinde oluşan işaret bozulmaları ve simetri bozukluğu ele alınarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, MKA işaretleri üzerinde, tekrarlı Gauss filtresinin dalgacık dönüşümü yöntemlerinden daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Manyetik Kaçak Akı, Kusur Tespiti, Gürültü Filtreleme, Dalgacık Dönüşümü, Tekrarlı Gauss filtre.

Abstract

Magnetic flux leakage (MFL) method is one of the non-destructive testing methods used to detect defects such as cracks, holes, and corrosion within ferromagnetic materials. Signals produced by MFL sensors, identify the defects occurred in structure of tested material also include noise components. The amount and property of the noise varies according to the test system and material structure. As a result of improper filtering, signals representing defects are lost in noise or distorted and become meaningless. In this study, the effectiveness of wavelet transform and iterative Gauss filtering methods on the signals obtained by applying MFL method was examined. In order to generate MFL signals, magnetic test system were designed in ANSYS Maxwell simulation environment. As a test material, a steel plate with 3 different size defects was used. Discrete wavelet transform methods and iterative Gauss filter were applied on the signals produced by the magnetic system. Signal distortions and symmetry disturbances which occurred on the filtered signals were examined. According to experimental results, it is seen that iterative Gaussian filter produces more successful results than wavelet transform methods on MFL signals.

Keywords: Magnetic Flux Leakage, Defect Detection, Denoising, Wavelet transformation, Iterative Gaussian filter.

I. GİRİŞ

Teknolojik öneme sahip endüstriyel materyallerin yapılarında zamanla oluşabilen çatlak, aşınma, korozyon gibi bozulmalar önemli oranda can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Üretim kusuru, ağır aşınma veya yıpranma kaynaklı olan bu bozulmaların yol açtığı kayıpları önlemek için, kritik öneme sahip materyallerin test edilmesinde periyodik olarak tahribatsız test yöntemlerine ait çeşitli teknikler kullanılmaktadır [1,2]. Tahribatsız test yöntemlerinden biri olan Manyetik Kaçak Akı (Magnetic Flux Leakage) yöntemi, ferromanyetik materyallerin yapısında oluşan çatlak, metal kaybı, korozyon gibi kusurları tespit eden etkin ve güvenilir bir yöntemdir [3,4]. Manyetik Kaçak Akı (MKA) yöntemi ile petrol ve gaz boruları, tank zeminleri, çelik halatlar, tren yolları ve gemi yapımında kullanılan ferromanyetik metal saclar gibi kritik yapı materyaller üzerinde periyodik hata testleri yapılmaktadır. Yöntemi önemli hale getiren, materyalin temassız bir şekilde muayenesinin sağlanması ve gözle görülemeyen iç kusurların tespit edilebilmesi gibi özelliklere sahip olmasıdır [5,6].

MKA yöntemi test işleminde, materyalin iç yapısına nüfuz edecek şekilde manyetik alan uygulanır ve yüzeyden yansıyan manyetik alan değişimleri ölçülür. Materyalin kusurlu bölgelerinde oluşan manyetik kaçak akılar, alınan işaretler üzerinde farklı genlikli değişimler üreterek kusurlu bölgelerin tespit edilmesini sağlar [7]. Bununla birlikte,

materyal yüzeyi boyunca küçük değişimler gösteren manyetik geçirgenlik ve yüzey pürüzlülüğü gibi nedenlerle MKA işaretleri üzerinde gürültüler oluşmaktadır. Bu oluşan gürültüler, MKA işaretlerinin yorumlanması ve kusur niteliklerinin çıkartılması aşamasında olumsuz etkiler meydana getirir. Örneğin, küçük kusur işaretleri ile benzer seviyelerdeki gürültü işaretleri, küçük kusur sinyallerinin kaybolmasına veya işaretin anlamlı ayrıntılarının bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu yüzden MKA işaretlerinin gürültü filtreleme işlemi önemli bir aşama olarak kabul edilir.

Fourier dönüşüm yöntemi, işaret işleme teknikleri içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. İşaretlerin frekans düzlemindeki davranışları Fourier yöntemi ile zamandan bağımsız olarak gözlenebilir. Bu özellik filtre tasarım aşamasında önemli bir klavuz özelliği göstermektedir [8]. Dalgacık dönüşüm yöntemleri ise farklı dalgacık fonksiyonları kullanarak, işaretin frekans düzlemindeki değişiminin, zaman domeni ile ilişkilendirilmesini sağlar. Bu yüzden dalgacık dönüşüm yöntemleri, bir işaretin analizi ve filtrelenmesi gibi işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [9,10].

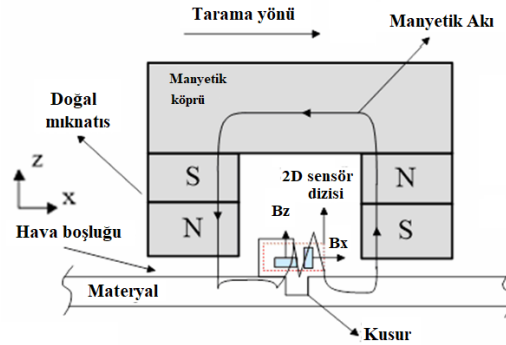
Literatürde MKA sinyallerinin işlenmesi ve Dalgacık dönüşüm yöntemleri ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde [11] literatürde tanımlı gelen-yansıyan-iletilemiş güç bileşenlerinin, geleneksel Fourier dönüşümüne alternatif olarak dalgacık paket dönüşümü kullanılarak hesaplanması önerilmiştir. Çalışmada sonuç olarak; önerilen hesaplama tekniğinin etkinliği ve doğruluğu, gerçekleştirilen uygulamalarla gösterilmiştir. Dalgacık dönüşüm yöntemleri ile ilgili gerçekleştirilen bir diğer çalışmada [12], wavelet analiz tekniği ve uygulama alanları hakkında detaylı bir bilgi verilmiştir. W. Han ve Que P. gerçekleştirdikleri çalışmada [13] MKA sinyali gürültüsünü temizlemek için geliştirilmiş dalgacık dönüşümü tabanlı adaptif FIR filtresi algoritması tasarlamışlardır. Gerçekleştirilen bu algortima sonucu MKA sinyalinde bulunan kusur sinyal bölgelerinin tespit edilebilirliği yüksek derecede artırılmıştır.

Bu çalışmada, ANSYS Maxwell [14] benzetim ortamında MKA sistemi tasarlanarak, test materyaline ait MKA işaretleri elde edilmiştir. Alınan işaretler, aynı zamanda manyetik alan gürültüsü içeren bileşenleri de taşımaktadır. Matlab [15] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen gürültü ayıklama aşamasında ise, sayısal işaret üzerinde dalgacık dönüşümü ve tekrarlı Gauss filtresi yöntemleri uygulanarak, bunlara ilişkin sonuçlar, işaret gürültü oranı (SNR) ve işaret simetri bozulmaları temelinde ele alınarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tekrarlı Gauss filtresinin, MKA sistemi işaretlerinin karakterini daha fazla koruduğu ve incelenen dalgacık filtreleme yöntemlerine göre daha az işaret bozulmasına yol açtığı görülmüştür.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

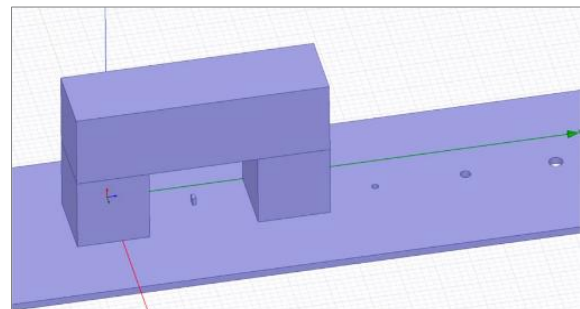
2.1. MKA Yöntemi

MKA yöntemi ferromanyetik materyallerin yapılarında oluşabilecek kusurların tespit edilmesini sağlayan tahribatsız bir test yöntemidir. Bu yöntem ile test edilen materyal üzerinde oluşan yüzey /yüzey altı korozyon ve çatlak gibi kusurların tespiti sağlanmaktadır. Bu yöntemde ferromanyetik materyalin test bölgesine güçlü bir manyetik alan uygulanarak malzemenin manyetik doyuma ulaştırılması gerekir. Manyetik doyuma ulaştırılmayan materyal üzerinde gerçekleştirilen test sonuçları kararsız ve düşük hassasiyette elde edilmektedir. MKA sistemi materyal üzerinde tarama yönü boyunca ilerletilerek alan etkili sensör dizisi ile ölçümler gerçekleştirilir. Materyalin kusur bulunan bölgelerinden havaya doğru kaçak akılar oluşur. Oluşan bu kaçak akılar, alan etkili sensörler tarafından algılanarak işaretlere dönüştürülür. Elde edilen işaretlerin yerel maksimum genlikli bölümleri materyalin kusurlu bölgelerini temsil etmektedir. MKA sistemi karşılıklı iki ters yönlü mıknatıs, bu iki mıknatıs arası bağlantıyı sağlayan manyetik köprü ve algılayıcı olarak alan etkili sensör bileşenlerinden oluşmaktadır. Materyal test aşamasında kullanılan MKA sistemi ve kusur bölgesinde oluşan kaçak akılar Şekil 1'de görülmektedir. Bu çalışmada, gerekli MKA sistemi ANSYS Maxwell benzetim programı üzerinde tasarlanarak oluşturulmuştur.



Şekil 1. Üzerinde kusur bulunan materyal için MKA sistemi davranışı

Bir metal plaka üzerinde 1, 2 ve 3 mm çaplı yapay kusurlar oluşturularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de ANSYS Maxwell ortamında oluşturulan MKA sistem modeli görülmektedir.



Şekil 2. ANSYS Maxwell MKA sistem modeli

2.2. Dalgacık Dönüşüm Yöntemleri

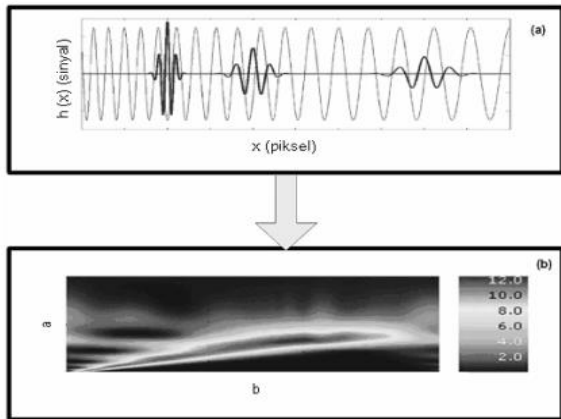
Dalgacık dönüşüm yöntemleri Fourier yönteminden farklı olarak sinyalin frekans ve zaman düzlemindeki özelliklerinin birlikte değerlendirilebilmesini sağlar. Küçük dalgacık modelleri ile tanımlı ana fonksiyonlar ile bir işaretin bileşenlerine ayrılarak analiz edilmesi sağlanır. Dalgacık dönüşüm yöntemleri başta ses ve görüntü işaretleri olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

2.2.1. Sürekli dalgacık dönüşüm Yöntemi

Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD), dalgacıkların öteleme ve ölçek dönüşüm parametrelerine zamana göre değişmesine olanak sağlayarak sinyalin frekans-zaman uzaylarında analiz edilmesini sağlayan yöntemdir. Eşitlik (1) SDD formülünü tanımlar.

$$X_w(a,b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de $a > 0$, $b \in \mathcal{R}$ ve $\bar{\psi}(t) \in L^2(\mathcal{R})$ şartını sağlamak kaydıyla, a ölçekleme ve b dönüşüm veya öteleme parametrelerini ifade eder. $\bar{\psi}(t)$ sinyalinin SSD yöntemi ile gösterimini $X_w(a,b)$ olarak Eşitlik (1)'de gösterilmiştir. SSD yöntemi ile zamana göre frekansı değişen sinyallerin analizi gerçekleştirilerek sinyalin zaman-frekans diyagramı elde edilir [16]. SSD yöntemi ile dalgacık fonksiyonu sinyali x eksenini boyunca belirli bir ölçek parametresi a değeri için konumu b parametresine bağlı olacak şekilde tarar ve bu işlem her a değeri için tekrarlanır. Şekil 3 sinyal üzerinde dalgacık ilerlemesini ve sonuç matrisini göstermektedir.



Şekil 3. (a) Üç farklı b değeri için, x eksenini boyunca sinyal üzerinde ilerleyen analiz dalgacığı; (b) $b \times a$ boyutlu SDD sonuç matrisi [16].

2.2.2. Ayrık dalgacık dönüşüm yöntemleri

Sürekli Dalgacık dönüşümünde kullanılan ölçekleme ve öteleme işlemleri, ikinin üsleri şeklinde oluşturularak Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) elde edilir ve sayısal işaretlere uygulanabilir [17]. ADD

yönteminde kullanılan ayrık fonksiyon $f(n)$ ve ADD formülleri, Eşitlik (2) ve (3) ile tanımlanmıştır.

$$c(a,b) = c(j,k) = \sum_{n \in \mathcal{Z}} f(n) y_{j,k}(n) \quad (2)$$

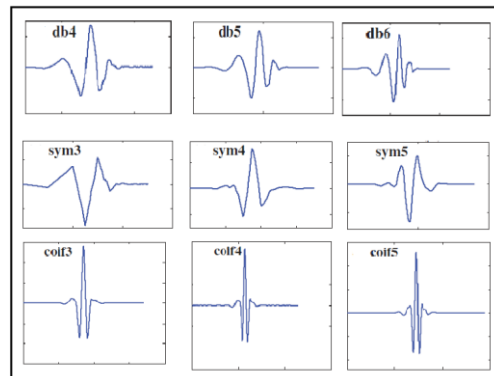
$$y_{j,k}(n) = 2^{-j/2} y(2^{-j}n - k) \quad (3)$$

Coiflet, Daubechies ve Symlet, dalgacık dönüşüm yöntemleri sinyal işlemedeki etkinlikleri sebebi ile en yaygın kullanılan ADD yöntemleridir [18]. Şekil 4'de ayrık $x[n]$ işaretine ait 2 seviyeli ADD ayrışım ağacı ve bu ayrışımın sonucu oluşan frekans bantları verilmiştir.



Şekil 4. ADD yöntemi ayrışım ağacı çizimi [11]

Haar, Daubechies, Coiflets, Symlets, dalgacık aileleri olmak üzere pratik uygulamalarda kullanılan birçok ayrık dalgacık ailesi bulunmaktadır. Gürültü filtrelemede yüksek derecede etkinliğinden dolayı [18], bu çalışmada Daubechies4 (db4), Daubechies5 (db5), Daubechies6 (db6), Symlet3 (sym3), Symlet4 (sym4), Symlet5 (sym5), Coiflet3 (coif3), Coiflet4 (coif4) ve Coiflet5 (coif5) dalgacık modelleri tercih edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan dalgacık modelleri Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Kullanılan Dalgacık Modelleri [18]

2.3. Tekrarlı gauss filtreleme yöntemi

Tekrarlı Gauss filtresi, filtre uzunluğu 3 olan ve $c(-1): 0.2236$, $c(0): 0.5477$ ve $c(1): 0.2236$ katsayıları ile uygulanan sayısal bir filtredir [19]. Bu katsayılar ile tekrarlı olarak gerçekleştirilen filtreleme işleminde, ilerleyen adımlarla ve toplam etki bakımından yüksek boyutlu Gauss filtresi ile yapılan filtreleme işlemine en iyi yakınsama sağlanmakla birlikte, yüksek boyutlu filtrenin oluşturduğu bozulma etkileri de en aza indirgenmektedir. Bu şekilde filtreleme işleminde temel problem olan eksik veya aşırı filtreleme etkileri giderilebilir. Tekrarlı filtreleme yönteminde, filtre boyunun belirlenmesi problemi tekrar sayısının uygun seçilmesine dönüşmektedir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

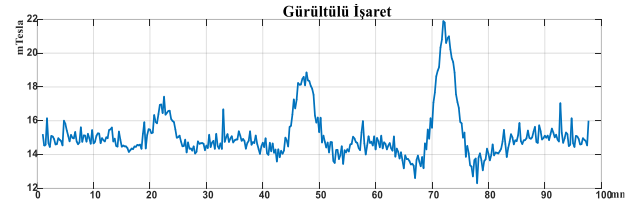
Deneysel çalışmalarda ANSYS Maxwell ortamında hazırlanan ve yapısında 3 farklı kusur bulunan bir metal plaka oluşturulmuştur. Metal plaka parametrik olarak manyetik tarama işleminden geçirilerek MKA işaretleri elde edilmiştir. Bu aşamadaki tarama işlemlerinde, referans işaretini üretmek amacıyla öncelikle yüksek çözünürlüklü ve düşük gürültüye sahip tarama örnek işaretleri elde edilmiştir. Daha sonra, sistem çözünürlüğü düşürülerek daha yüksek gürültülü işaret örnekleri alınmıştır. Bu şekilde doğal manyetik ortam gürültüsü doğrultusunda yüksek gürültü oranına sahip örnek işaretlerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım, yapay gürültü ekme şeklinde gerçekleştirilen test yöntemlerine bir alternatif olarak belirlenmiştir. Çünkü istatistiksel değişkenler ile modüle edilen yapay gürültü ekme işlemlerinde, alan ve uygulamaya özgü doğal gürültü karakteri elde edilememektedir. Bu çalışmada düşük gürültülü işaret referans işaret olarak kabul edilmiş ve filtrelerin değerlendirilmesi bu referans işaret üzerinden göreceli olarak gerçekleştirilmiştir.

Filtreleme işlemlerinde genel olarak, filtrelenen işaret üzerinde kaçınılmaz bozulmalar meydana gelmektedir. Bu bozulmaların en aza indirgenmesi, seçilen filtre türleri ve bunlara ilişkin uygun parametrelerin seçimine bağlıdır. Bu bağlamda filtreleme işleminin uygulamaya yönelik olarak seçilmesi kritik önem kazanmaktadır. Filtreleme işleminin performansını ölçmek amacıyla, sinyal gürültü oranı (SNR) değeri sıklıkla referans alınmaktadır. SNR değeri, işaretin tamamı üzerinden hesaplanan bir göstergedir. Ancak MKA işaretlerinde, işaretin tamamından daha çok kusur bölgeleri ön plana çıkmaktadır. Çünkü fiziksel kusuru niteleyen bilgiler, bu işaret bölgelerinden elde edilir. Yerel tepe noktaları kusur derinliğini, tepe noktasının sağ ve sol taraflarındaki ilk minimum noktalar arasındaki mesafe ise kusur çapını belirlemekte kullanılır. Filtreleme sonucu bu bölgelerde oluşan ve özellikle işaretin genlik ve genişlik değerlerinde oluşan bozulmalar, kusurların niteliği hakkında hatalı verilerin çıkartılmasına neden olacaktır.

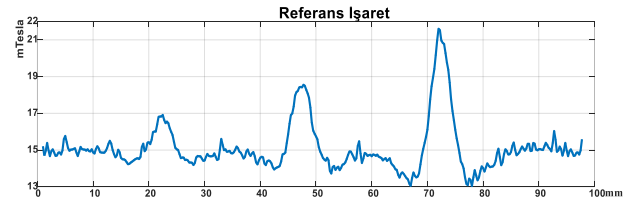
Bu çalışmada MKA işaretleri üzerindeki filtreleme işlemlerinin başarısı, sinyal gürültü oranı yerine, kusur bölgelerindeki bozulmalar ve bu bozulmayı en iyi temsil eden simetri kayması üzerinden incelenmiştir. Değerlendirmelerde mutlak simetri değerleri yerine, referans işaretin sahip olduğu simetri değerleri referans alınmıştır. Bu çalışmadaki şekil ve tablolarda s : dalgacık seviyesi ve n : tekrar katsayısı parametrelerini ifade etmektedir.

Şekil 6 (a) ve (b)'de kusurlu metal plaka için sistemden alınan düşük ve yüksek gürültülü tarama işaretleri görülmektedir. Şekil 6 (a) ve (b)'de yer alan yüksek genlikli tepe bölgeleri dışındaki alanlarda yer alan gürültüler ise yüzeye ait manyetik akı gürültüsünü yansıtır. Deneysel çalışmalar, yüksek gürültülü işaretler üzerinde farklı filtre yöntemlerinin uygulanması ve düşük gürültülü referans işaret ile kıyaslanması şeklinde yürütülmüştür. Kıyaslama işlemleri sadece kusur bölgeleri için gerçekleştirilmiş ve bu bölgelerdeki simetri bozunumu oranları incelenmiştir. Şekil 7 (a) ve (b)'de kusur1 ve kusur2 için simetri bozulmasına ilişkin işaretler görülmektedir.

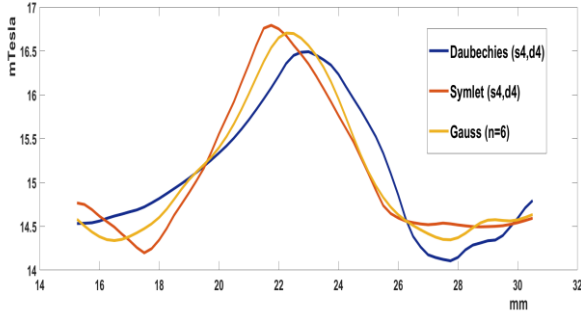
Simetri bozunumu katsayısı, her bir kusur işaretinin maksimum genlik noktasına göre sağ ve sol yarısındaki alanların birbirine oranı şeklinde hesaplanmıştır. Daha sonra 3 farklı kusura ait toplam hata ve referans işarete ait toplam hata değerleri ile kıyaslanarak hata miktarları elde edilmiştir.



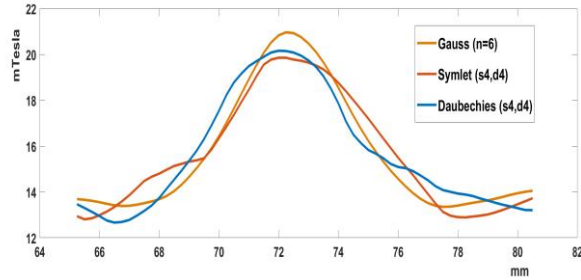
Şekil 6 (a). Gürültülü işaret



Şekil 6 (b). Yüksek çözünürlüklü referans işaret



Şekil 7 (a). Kusura 1 için filtreleme sonucu simetrisi bozulmuş örnek işaretler



Şekil 7 (b). Kusura 2 için filtreleme sonucu simetrisi bozulmuş örnek işaretler

Filtreleme aşamasında MKA işareti üzerinde, db4, db5, db6, sym3, sym4, sym5, coif3, coif4 ve coif5 dalgacık yöntemleri ve bunlara ait farklı seviyeler uygulanmıştır. Daha sonra aynı işaret, tekrarlı Gauss filtresi ile 12 tekrar adımına kadar ayrı ayrı filtelenmiştir. Tüm filtreleme işlemleri sonunda her bir filtreye ait SNR değerleri hesaplanmıştır. Dalgacık filtreleme yöntemleri ve Gauss filtresi arasında sağlıklı bir kıyaslama yapılabilmesi için, Gauss filtresinin tekrar sayısının uygun olarak belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla dalgacık yöntemlerinden elde edilen SNR değerlerine en yakın sonuçları üreten Gauss filtresi adımları kıyaslama amaçlı olarak seçilmiştir. Seçilen filtre, diğer dalgacık modellerinden elde edilen en iyi sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Tablo 1 'de gürültülü işaret, az gürültülü referans işareti ile gürültülü işaret üzerine uygulanan filtreleme işlemlerine ait SNR ve simetri katsayıları ile tanımlanan sonuçlar görülmektedir. Tablo 2' de ise elde edilen sonuçlardan derlenen hata miktarları yer almaktadır.

Tablo1. Filtreleme sonucu SNR ve simetri katsayıları

Filtre ve İşaret Türleri	SNR (Tüm İşaret)	Yerel Kusura İşareti Simetri Katsayıları		
		kusur1	kusur2	kusur3
Gürültülü işaret	18.09	--	--	--
Referans işaret	19.26	1.005	1.021	0.997
Gauss (n=10)	20.1	1.004	1.016	0.997
Gauss (n=6)	19.42	1.001	1.013	0.998
coif4 (s:2)	19.22	1.017	1.012	1.006

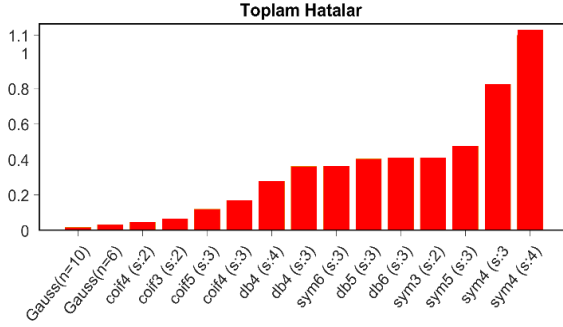
coif3 (s:2)	19.22	1.017	1.006	1.003
coif5 (s:3)	19.39	1.112	1.025	1.005
coif4 (s:3)	19.38	0.987	1.172	0.998
db4 (s:4)	21.52	0.994	1.246	1.04
db4 (s:3)	19.46	1.014	1.337	1.033
sym6 (s:3)	19.4	1.09	0.898	1.151
db5 (s:3)	19.45	1.098	0.892	1.178
db6 (s:3)	19.41	0.891	1.163	0.844
sym3 (s:2)	19.23	0.892	0.884	0.837
sym5 (s:3)	19.46	0.817	1.006	0.725
sym4 (s:3)	19.49	1.378	1.041	1.428
sym4 (s:4)	22.87	1.13	1.729	0.699

Tablo 2 incelendiğinde her bir kusur bölgesi için farklı dalgacık modellerinin göreceli üstünlükleri görülmektedir. Aynı değerlendirme tekrarlı Gauss filtresi için de geçerlidir. Bu farklılıklar, yerel kusur işaretlerinin yapısal özellikleri ve aynı zamanda gürültünün küçük genlikli işaretler üzerinde oluşturduğu bozulma oranlarından kaynaklanmaktadır. Ancak 3 kusur için toplam simetri hatası dikkate alındığında, tekrarlı Gauss filtresinin diğerlerinden daha düşük hata ürettiği görülmektedir. Şekil 8'de görülen analiz sonuçları, tekrarlı Gauss filtresinin bu tür uygulamalarda daha yüksek filtreleme kalitesi sağladığını göstermektedir. Ayrıca SNR oranlarının, simetri bozulmasını esas alan bir yaklaşım ile paralel sonuçlar sağlamadığı görülmektedir. Bunun nedeni SNR oranının tüm işaret için hesaplanması gerekliliği gösterilebilir. Kıyaslamada bölgesel SNR hesaplama alternatif bir yaklaşım gibi görünmesine rağmen, bu uygulama bölge tespiti filtreleme işlemi gerektirmektedir. Aksi halde gürültülü işaret üzerinde yerel maksimum ve minimum noktalar sağlıklı olarak tespit edilemeyecektir.

Tablo2. Referans işarete göre simetri hataları

	SNR	kusur1 hata	kusur2 hata	kusur3 hata	Toplam hata
Gauss (n=10)	19.42	0.001	0.005	0	0.006
Gauss (n=6)	20.1	0.004	0.008	0.001	0.013
coif4 (s:2)	19.22	0.012	0.009	0.009	0.03
coif3 (s:2)	19.22	0.012	0.015	0.006	0.033
coif5 (s:3)	19.41	0.107	0.004	0.008	0.119
coif4 (s:3)	19.4	0.018	0.151	0.001	0.17
db4 (s:4)	19.39	0.011	0.225	0.043	0.279
db4 (s:3)	19.38	0.009	0.316	0.036	0.361
sym6 (s:3)	19.45	0.085	0.123	0.154	0.362
db5 (s:3)	21.52	0.093	0.129	0.181	0.403

db6 (s:3)	19.23	0.114	0.142	0.153	0.409
sym3 (s:2)	19.46	0.113	0.137	0.16	0.41
sym5 (s:3)	19.46	0.188	0.015	0.272	0.475
sym4 (s:3)	22.87	0.373	0.02	0.431	0.824
sym4 (s:4)	19.49	0.125	0.708	0.298	1.131



Şekil 8. Filtreleme yöntemleri toplam hata sonuçları

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, temassız metal muayene alanında kullanılan MKA işaretleri üzerinde, dalgacık filtreleme ve tekrarlı Gauss filtreleme yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yöntemlerin başarısı, filtreleme sonucu kusur bölgelerinde oluşan simetri bozulmaları açısından değerlendirilmiştir. Bu amaçla ANSYS Maxwell benzetim ortamında, 3 farklı büyüklükteki delik kusurların algılanmasını sağlayan bir deney sistemi tasarlanmıştır. Sistemden az ve çok gürültülü olmak üzere iki tür işaret alınmıştır. Az gürültülü işaret filtreleme yeteneğini ölçmek amacıyla referans işaret olarak kullanılmıştır. Çok gürültülü MKA işaretleri üzerine, tekrarlı Gauss ve dalgacık filtreleme yöntemleri uygulanarak bu yöntemlerin filtreleme başarısı incelenmiştir. Filtreleme işlemlerinin başarısı, SNR değeri ile birlikte işaretin kusur bölgelerinde oluşan simetri bozunumu hesaplanarak değerlendirilmiştir. Çünkü kusur işaretinin doğal hali simetriklik özelliği taşımakta ve kusur bölgelerindeki noktasal kaymalar bu özelliği genellikle olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden tüm işaret için hesaplanan SNR değeri yerel bozulmaları tanımlamakta tek başına yetersiz kalabilmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre tekrarlı Gauss filtresinin, kusur bölgesine ait işaret karakterini daha fazla koruduğu ve incelenen dalgacık filtreleme yöntemlerine göre daha az işaret bozulmasına yol açtığı görülmektedir. Özellikle işaretin küçük kusurlara ait bölümlerinin, filtreleme sonucu oluşan bozulmalardan daha fazla etkilendiği görülmektedir. Bu durumun sebebi, manyetik algılama sisteminde var olan gürültünün, küçük kusurlar üzerinde daha yüksek oranda oluşmasıdır. Ayrıca, yerel maksimum ve minimum noktalarına örtüşen gürültü genliği de kusur işaretinin yapısını önemli ölçüde bozduğu deneysel çalışmalarda görülmüştür. Sözü edilen etkiler, MKA

işaretinden hatalı sonuçların üretilmesine yol açmakta ve kullanılacak filtre seçimini daha önemli hale getirmektedir. Tekrarlı Gauss filtresi yöntemi ile bir yandan Gauss eğrisi tabanlı filtreleme etkisi sağlanırken diğer yandan ilerleyen filtre adımları ile oluşan bozulma etkilerinin izlenmesi sağlanabilmektedir. Tekrarlı Gauss filtresi yönteminin bu kabiliyeti, MKA ve benzeri yerel özelliklerin öne çıktığı uygulamalarda, filtre parametrelerinin optimizasyonunu sağlamakta önemli bir araç olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] LiYing, S., YiBo, L., LiBo, S. ve LingGe, L. (2012). Comparison of Magnetic Flux Leakage (MFL) and Acoustic Emission (AE) techniques in corrosion inspection for pressure pipelines”, *In Control Conference (CCC)*, Chinese, 5375-5378.
- [2] Baskaran, R. ve Janawadkar, M.P. (2008). Defect localization by orthogonally projected multiple signal classification approach for magnetic flux leakage fields, *NDT&E International*, 41, 416– 419.
- [3] Coughlin, C. R., Clapham, L. ve Atherton, D. L. (2000). Effects of stress on MFL responses from elongated corrosion pits in pipeline steel, *NDT & E International*, 33(3), 181-188.
- [4] Ravan, M., Amineh, R. K., Koziel, S., Nikolova, N. K., ve Reilly, J. P. (2010). Sizing of 3-D arbitrary defects using magnetic flux leakage measurements, *IEEE transactions on magnetics*, 46(4), 1024-1033.
- [5] Li, C., Li, Z., ve Jia, W. (2019). Theoretical study on the characteristics of self-magnetic flux leakage signals from pipeline defects. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 61(9), 536-541.
- [6] Xiao-meng L., Hong-sheng, D. ve Shi-wu, B. (2014). Research on the stress-magnetism effect of ferromagnetic materials based on three-dimensional magnetic flux leakage testing, *NDT&E International*, 62, 50–54.
- [7] Atzlesberger, J. ve Zagar, B. (2010). Magnetic flux leakage measurement setup for defect detection, *Procedia Engineering*, 5, 1401-1404.
- [8] Nur, Y., Muzafir, I., Haziha, H., Mohd, R. A., Mohamad, N. K. H. R., Chai, C. Y. ve Nurul, N. A. (2016). Denoising Technique for Partial Discharge Signal: A Comparison Performance between Artificial Neural Network, Fast Fourier Transform and Discrete wavelet transform, *IEEE International Conference on Power and Energy*, 311-316.
- [9] Daniel, J., Mohanagayathriand, R. ve Abudhahir, A. (2014). Characterization of Defects in Magnetic Flux Leakage (MFL) Images using Wavelet Transformand Neural Network, *International Conference on*

- Electronics and Communication Systems*. 1-5.
- [10] Kaya, M. ve Guldemir, H. (2007). Dalgacık Dönüşümü İle En Düşük Anlamli Bit Filigran Ekleme Yöntemlerinin Kaynaştırılması, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 5 (4), 4-8.
- [11] Vatansever, F., 2020, Güç bileşenlerinin dalgacık dönüşümü tabanlı Hesaplanması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25 (2), 679-692.
- [12] Öner, V. İ., Yeşilyurt, K. M., Yılmaz, Yılmaz, Ç., E., (2017), Wavelet analiz tekniği ve uygulama alanları, *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.* 7(1), 42-56.
- [13] Han, W., Que, P., 2006, A modified wavelet transform domain adaptive FIR filtering algorithm for removing the SPN in the MFL data, *Measurement*, 39, 621–627.
- [14] ANSYS, (2021), ANSYS Maxwell, <https://www.ANSYS.com/products/electronics/ANSYS-maxwell>.
- [15] Mathworks (2021), MATLAB, www.mathworks.com.
- [16] Türkkkan, L., (2015), Sürekli Dalgacık Dönüşümü İle Yüzey Ölçümü, Yüksek Lisans Tezi.
- [17] Yang, Z., Dai, G., Zhao, H. ve Jiang, Y. (2009). Research of Magnetic Flux Leakage Signal Processing Based on Wavelet Denoising and EMD”, 2nd International Congress on Image and Signal Processing, 1-4.
- [18] Ou Z. ve Xueye W., (2019), De-noising of Magnetic Flux Leakage Signals Based on Wavelet Filtering Method, *Research In Nondestructive Evaluation*, 30 (5), 269–286, <https://doi.org/10.1080/09349847.2018.1476745>.
- [19] Ray, B., ve Ray, K. (1995). Corner Detection Using Iterative Gaussian Smoothing With Constans Window Size, *Pattern Recognition*, 28 (11), 1765-1781.

Inhibition of *Pseudomonas aeruginosa* Biofilm Formation and Quorum Sensing System by Extracts of *Prunus avium* Stalk

Prunus avium Sapından Elde Edilen Özütlele *Pseudomonas aeruginosa* 'ya ait Quorum Sensing Sisteminin ve Biyofilm Oluşumunun İnhibisyonu

Ayla YILDIZ¹ , Arhun Ali BALKAN¹ , Didem BERBER^{2,3} 
Barış GÖKALSIN¹ , N. Cenk SESAL² 

¹Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Biology Department, İstanbul, Turkey.

²Marmara University, Faculty of Arts and Sciences, Biology Department, İstanbul, Turkey.

³Maltepe University, Fine and Arts Faculty, Gastronomy and Culinary Department, Marmara Eğitim Koyu, İstanbul/Turkey.

Abstract

Recently, misuse or overuse of antibiotics has led to antibiotic resistance problem, a global healthcare problem. Most virulence factors and biofilm formation in *Pseudomonas aeruginosa* are controlled by quorum sensing (QS). The inhibition of QS system by inhibitor molecules has been suggested as a novel alternative antivirulence approach in which no need to kill the bacteria. In the present study, QS and biofilm inhibitory potentials of the methanol and acetone extracts of *Prunus avium* stalk against *P. aeruginosa* were evaluated. The extracts were tested at the concentrations of 240, 120, and 60 µg/ml. *lasB-gfp*, *rhlA-gfp*, *pqsA-gfp* biosensor strains and *P. aeruginosa* PAO1 were used to monitor QS and biofilm inhibition, respectively. Fluorescence and absorbance measurements were performed on Cytation 3 multimode microplate reader. QS inhibition ratios for *las*, *rhl*, and *pqs* systems and biofilm inhibition ratios of the acetone extracts were recorded as 70.43%, 47.25%, 76.31%, and 47.76% ($\pm 6,60$) and of the methanol extracts as 74.96%, 40.10%, 71.89%, and 38.54% ($\pm 3,56$) at a certain concentration of 240 µg/ml, respectively. As a result, anti-QS and anti-biofilm properties of acetone extracts were better than that of methanol extracts. Further investigations are needed to discover inhibitor compounds of *P. avium* and also their effects on human cells and then these compounds may be used in new drug discoveries.

Keywords: *Pseudomonas aeruginosa*, quorum sensing, biofilm, quorum quenching, *Prunus avium* stalk, sweet cherry.

Öz

Son zamanlarda, antibiyotiklerin yanlış veya aşırı kullanımı, küresel bir sağlık sorunu olan antibiyotik direnci sorununa yol açmıştır. *Pseudomonas aeruginosa*'da çoğu virülans faktörü ve biyofilm oluşumu, quorum sensing (QS) ile kontrol edilir. QS sisteminin inhibitör moleküller tarafından inhibisyonu, bakterileri öldürmeye gerek olmayan yeni bir alternatif antivirulens yaklaşımı olarak önerilmiştir. Bu çalışmada, *Prunus avium* sapından elde edilen metanol ve aseton özütlelerinin *P. aeruginosa*'ya karşı QSI (QS inhibitörleri) ve anti-biyofilm potansiyellerini değerlendirdik. Ekstraktlar 240, 120 ve 60 µg/ml'lik konsantrasyonlarda test edilmiştir. QS ve biyofilm inhibisyonunu izlemek için *lasB-gfp*, *rhlA-gfp*, ve *pqsA* biyosensör suşları ve *P. aeruginosa* PAO1 kullanıldı. Floresans ve absorbans ölçümleri Cytation 3 çok modlu mikropilaka okuyucu üzerinde gerçekleştirildi. 240 µg/ml konsantrasyonunda aseton özütlelerinin *las*, *rhl* ve *pqs* sistemleri üzerine QS ve biyofilm inhibisyon oranları sırasıyla % 70.43, % 47.25, % 76.31 ve % 47.76 ($\pm 6,60$) ve metanol özütlelerinin sırasıyla % 74.96, % 40.10, % 71.89 ve % 38.54 ($\pm 3,56$) olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak, aseton özütlelerinin anti-QS ve anti-biyofilm özellikleri metanol özütlelerinden daha başarılı olmuştur. *P. avium*'un inhibitör bileşikleri ve bu bileşiklerin insan hücreleri üzerindeki etkilerini keşfetmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır ve daha sonra bu bileşikler yeni ilaç keşiflerinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: *Pseudomonas aeruginosa*, quorum sensing, biyofilm, quorum quenching, *Prunus avium* stalk, sweet cherry.

I. INTRODUCTION

Bacterial pathogenicity is defined as the potential of an organism to cause any disease. As known, the production of virulence factors by microorganisms has great importance in the clinical course of a disease. These factors may cause damages on the host immune system due to failure in the balance between bacterial pathogenicity and host resistance (1). Unfortunately, antibiotics are not sufficiently efficient in the treatment of bacterial infections. Therefore, an antivirulence approach has been proposed to treat infections. By this approach, expressions or

activities of virulence properties can be prevented and bacteria cannot colonize the host. Furthermore, it has been assumed that there is probably less evolutionary pressure to develop resistant clones than conventional antibiotics because this strategy does not directly kill bacteria but prevent bacterial infections and damages to their host. These anti-virulent drugs can potentially be used in combination with synergistically established or new antimicrobials to prolong the life of these drugs (2, 3).

The World Health Organization (WHO) declared the priorities of antibiotics for pathogens as critical, high, and medium highlighting the need for new antibiotics. According to this list, *Pseudomonas aeruginosa* is categorized as critical for the discovery of new antibiotics (4). *P. aeruginosa* can cause nosocomial infections such as cystic fibrosis, especially in immunocompromised patients. In 2004, the U.S. Cystic Fibrosis Foundation Patient Registry reported that *P. aeruginosa* was identified in 57.3% of all respiratory cultures (5). The data from newborn screening programs showed that the total number of cystic fibrosis (CF) patients in sixteen European countries, CF adults and CF children in 2025 would rise by 50%, 75%, 20% respectively (6). The clinical importance of this opportunistic pathogen attributed to its resistance to multiple antimicrobial agents, its quorum sensing mediated virulence factors (exoproteases, siderophores, exotoxins and, rhamnolipids, etc.), and ability to form biofilm formation resulting in the community- or hospital-acquired infections (7-9).

Bacteria communicate via quorum sensing system (QS) which allows controlling their social behaviors. A high density of bacterial population in the surrounding environment trigger QS system for intra-species, inter-species, or inter-kingdom interactions (10, 11). Autoinducers (AIs), small molecules that can easily diffuse across inner and outer membranes, are secreted into bacterial local milieu. Gram-negative bacteria utilize homoserine lactones (HSLs). It is well documented that *P. aeruginosa* has *las*, *rhl*, *pqs* and *iqs* systems for interspecies communication (12). Approximately a tenth of the total *P. aeruginosa* genes are coordinated by QS. These genes are responsible for many virulence factors, antibiotic resistance, regulation of metabolic pathways under stress and biofilm structure of *P. aeruginosa* (13). The critical importance of biofilm structures in chronic infections has been emphasized in the literature. Biofilms are sessile community complexes in which bacterial cells attach onto various surfaces in an exopolysaccharide matrix. Biofilm forms are more resistant to antibiotics compared to planktonic forms (14).

Most researchers have focused on an alternative antivirulence approach to combat bacterial antibiotic resistance by disrupting the QS system, called quorum quenching (QQ) (15). In this way, several compounds

and enzymes with quorum sensing inhibitory (QSI) potential have been identified to quench the QS mechanism. The criteria for QSI molecules are notified as high specificity, efficiency, stability, having low-molecular-weight (16).

Since ancient times, different parts of plants have traditionally been used in the treatment of various disorders. Nowadays, they are globally valuable resources of new drugs not only in developing countries but also in modern countries (17). For this reason, compounds with QSI properties are investigated especially in plants and anti-QS potentials of plant species collected from different localities are investigated as direct extracts or based on the substances they contain (18).

Prunus avium L., (sweet cherry) is a member of *Rosaceae* family and is distributed around the world with a temperate climate but especially in Europe, North Africa, South Australia, New Zealand, USA, Canada, Argentina and Chile (19, 20). *P. avium* has several beneficial effects on various illnesses such as cancer, cardiovascular disease, diabetes, Alzheimer's disease, neurodegenerative diseases and, other inflammatory diseases as well as being consumed as food (21, 22). Different parts of *P. avium* such as its fruit, stem, and bark are used for medicinal and therapeutic purposes (20). Furthermore, its antibacterial, antioxidant, and anti-inflammatory activities have been demonstrated (23- 29).

To our knowledge, there is no study investigating the QSI and anti-biofilm potentials of *P. avium* stalk against *P. aeruginosa*. In the view of an urgent need for new alternative approaches that can solve the global health problem due to the current antibiotic resistance, the potential impact of *P. avium* (sweet cherry) stalk was investigated to inhibit the QS system and biofilm formation of *P. aeruginosa*. For this purpose, QSI potentials of acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples were tested on the biosensor strains of *P. aeruginosa*, *lasB-gfp*, *rhlA-gfp* and *pqsA-gfp*, and anti-biofilm activities were tested on the *PAOI* wild type strain.

II. MATERIAL AND METHODS

2.1. Sample Collection and Extraction of *P. avium* Stalk Samples by Acetone and Methanol Solvents

Following the washing and drying of *P. avium* stalk samples, ten grams of each sample were weighed and pulverized. Acetone and methanol solvents were added into sterile bottles including the samples and stored in a dark place for 3 days. They were evaporated in a rotary evaporator at 40 °C and 100 rpm. The acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples were weighed again to obtain the weight of crude extracts. To evaluate the anti-QS and anti-biofilm properties, a

stock concentration of these extracts was prepared as 16 mg/ml and then dissolved in 100% DMSO. Finally, these extracts were diluted with a physiological saline solution.

2.2. Monitor Strains

lasB-gfp, *rhlA-gfp*, and *pqsA-gfp* were used as QS monitor strains of *P. aeruginosa* (30-32). These monitor strains included *lasR*, *rhlR*, *pqsR* regulated promoters and a gene for an unstable green fluorescent protein (*gfp*). In the present study, M9 minimal media supplemented with 2.5 mg/l thiamine, 0.5% (wt/vol) glucose, and 0.5% (wt/vol) casamino acids were used for the growth of the test bacteria.

2.3. QSI Screening

QSI potentials of the acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples were examined in 96-well black microplates (Nunc, Thermo Scientific) (33). 100 μ l of the prepared growth medium given above was added to each well. The test extracts were then diluted three-fold to obtain final concentrations of tested extracts as 240, 120 and 60 μ g/ml in 96-well black microplates. The total volume in each well was then adjusted to 200 μ l by adding overnight cultures of the *lasB-gfp*, *rhlA-gfp* and *pqsA-gfp* monitor strains with an OD 450 nm of 0.1. The positive and negative control groups were also tested. The experiments were performed in three replicates. The bacterial growth and *gfp* expressions were measured every 15 minutes using Cytation 3 multimode microplate reader (Biotek) for 16 h. The measurements of fluorescence were recorded at 485 nm excitation and 535 nm emission wavelengths.

2.4. Biofilm Experiments

P. aeruginosa PAOI strain was incubated overnight in a prepared M9 growth medium at 37°C. In 96-well microplates, the acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples were tested at the concentrations of 240, 120 and 60 μ g/ml, respectively. The experiments included positive and negative controls. Three replicates were made for the tests. The biofilm forms were stained with 0.1% crystal violet and measured at OD 590 nm in the microplate reader (Cytation 3-BioTek).

III. RESULTS

Three concentrations (240, 120 and 60 μ g/ml) of acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples were tested on *lasB-gfp*, *rhlA-gfp* and *pqsA-gfp* monitor strains of *P. aeruginosa*. Since azithromycin was reported to reduce the transcription of *lasI* by 80% and of *rhlI* by 50% in the literature (34), azithromycin was also tested as a positive control to inhibit tested QS systems (*las*, *rhl* and *pqs*). We determined that azithromycin was significantly able to inhibit *gfp* production of tested monitor strains (The data was not shown). In our experiments, maximum QS inhibition ratios on *las*, *rhl* and *pqs* systems were detected at a certain concentration of 240 μ g/ml for acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples. The acetone extracts of *P. avium* stalk at a concentration of 240 μ g/ml inhibited *las*, *rhl* and *pqs* systems of *P. aeruginosa* in ratios of 70.43%, 47.25%, and 76.31% respectively. The related dose-response curves of *lasB-gfp*, *rhlA-gfp* and *pqsA-gfp* monitor strains of *P. aeruginosa* treated with the acetone extracts of *P. avium* stalk at certain concentrations of 240, 120 and 60 μ g/ml were given in Figure 1A-C.

On the other hand, QS inhibitory potentials for *las*, *rhl* and *pqs* systems of methanol extracts of *P. avium* stalk were recorded as 74.96%, 40.10%, and 71.89%, respectively Figure 2.

Anti-biofilm properties of acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples were tested against PAOI strain. The inhibition percentages for biofilm formation belonging to the extracts of *P. avium* stalk samples at a dose of 240 μ g/ml were found to be slightly different and recorded as 47.76% (\pm 6.60) and 38.54% (\pm 3.56), respectively. Biofilm inhibition ratios of the acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk at the concentrations of 240, 120, 60 μ g/ml against PAOI strain were given in Figures 3-4. These results indicate that acetone extracts have a more pronounced effect in comparison to methanol extracts.

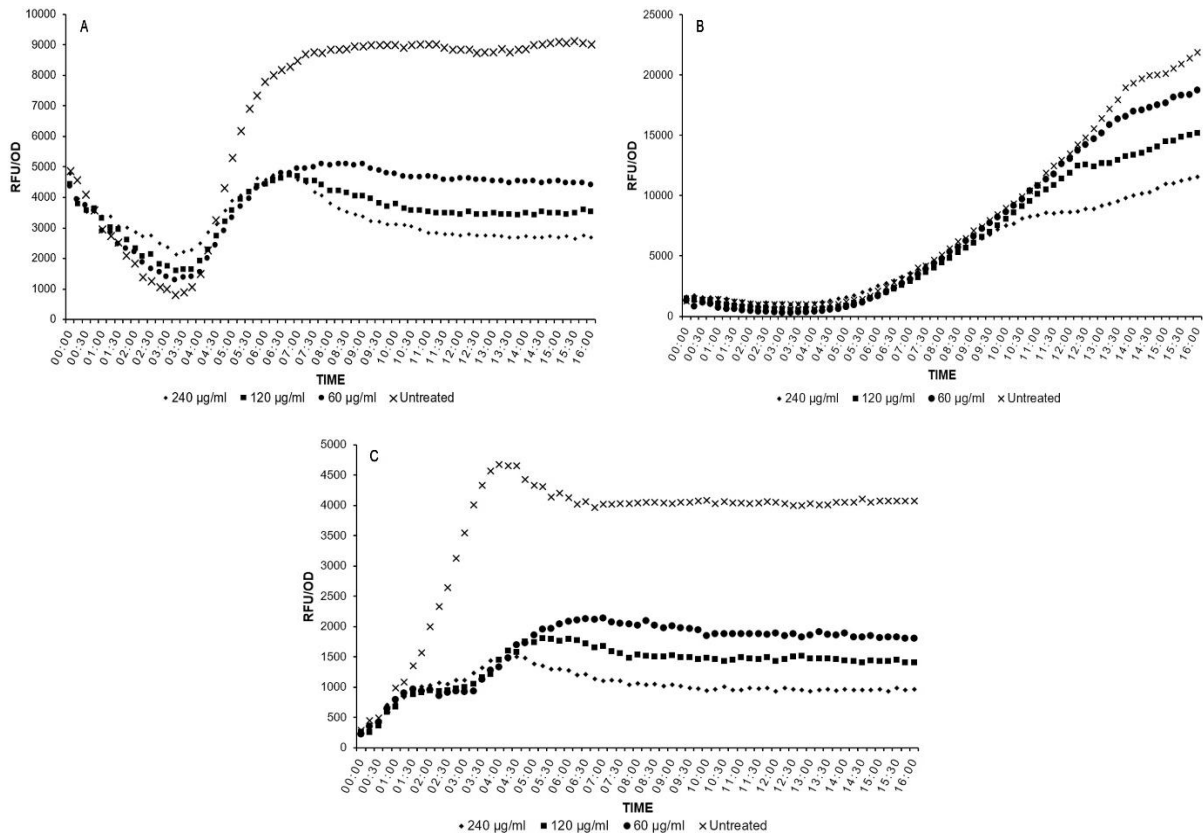


Figure 1. Dose-response curves of biomonitor strains of *P. aeruginosa* treated with the acetone extracts of *P. avium* stalk at certain concentrations of 240, 120 and 60 µg/ml. Data are shown as relative fluorescence unit over OD 450 nm.

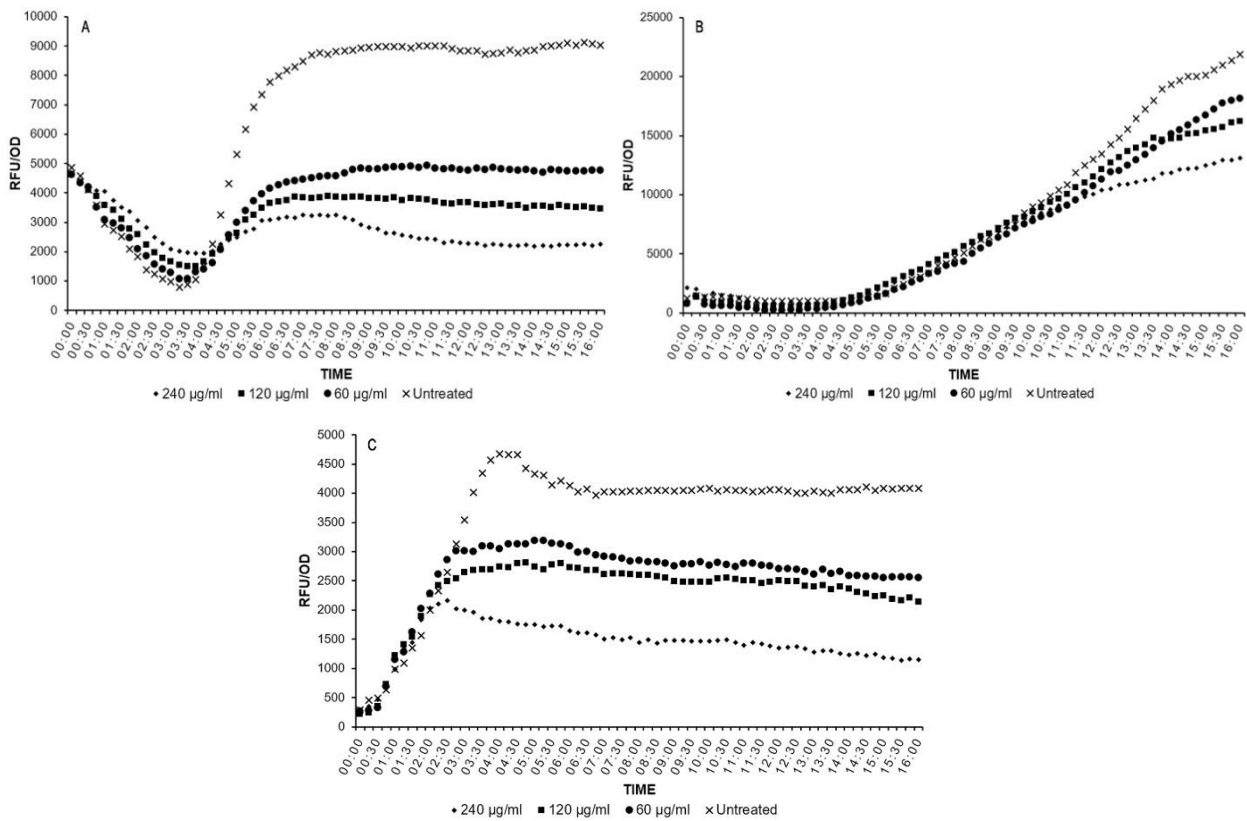


Figure 2. Dose-response curves of biomonitor strains of *P. aeruginosa* treated with the methanol extracts of *P. avium* stalk at the certain concentrations of 240, 120 and 60 µg/ml. Data are shown as relative fluorescence unit over OD 450 nm.

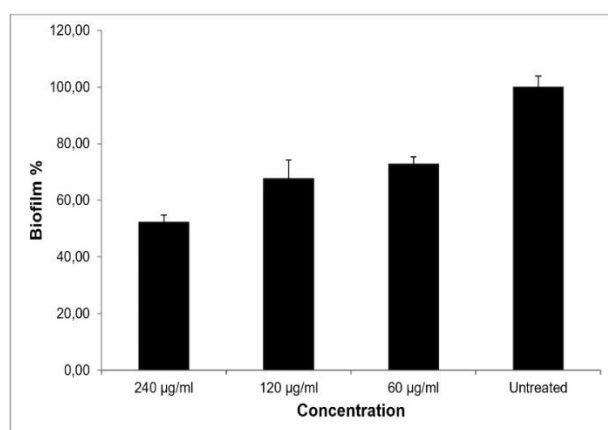


Figure 3. The percentage of anti-biofilm properties of the acetone extracts of *P. avium* stalk at concentrations of 240, 120, 60 µg/ml against *PAO1* strain.

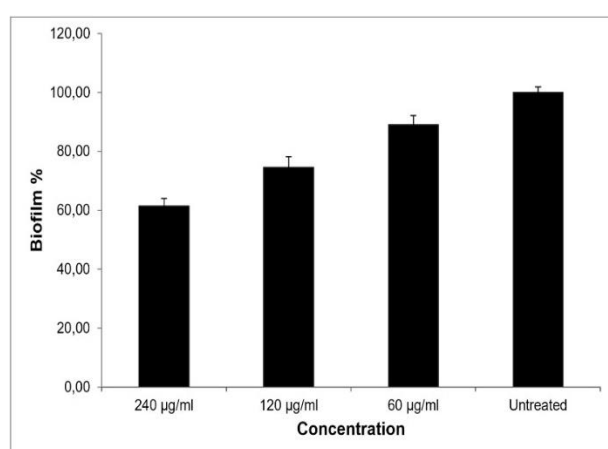


Figure 4. The percentage of anti-biofilm properties of the methanol extracts of *P. avium* stalk at the concentrations of 240, 120, 60 µg/ml against *PAO1* strain.

IV. DISCUSSION

As known, antibiotic misuse or overuse led to the problem of antibiotic resistance as a global healthcare problem. *P. aeruginosa* controls its virulence factors and biofilm formation by QS mechanism. Alternatively, QS system and biofilm formation can be inhibited by inhibitor molecules as an antivirulence approach without killing bacteria. To the best of our knowledge, anti-QS and anti-biofilm effects of *P. avium* stalk samples against *P. aeruginosa* have not been studied yet. In this study, we demonstrated the potential inhibitory properties of acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples on QS mechanisms and biofilm formation.

It has been well documented that the different parts (fruit, seed, stem bark and roots) of *P. avium* (sweet cherry) has several bioactive compounds (35-39). Several chemical compounds such as flavonoids, phenolics, polyphenols, alkaloids, tannins were reported in *P. avium* (37, 40-42). There are many studies in the literature focusing on the antibacterial activities of extracts or fractions of different parts of *P.*

avium obtained by different solvents or of its' fruit juice. Rovčanin *et al.* (2015), reported that ethanol extracts of *P. avium* petiole had an antibacterial effect against multiple antibiotic-resistant *Escherichia coli* and they detected also high concentrations of phenols and flavonoids in the ethanol extracts (26). Accordingly, the inhibitory activities of leaf and stem bark ethanol extracts of *P. avium* were found to be more effective against Gram-negative compared to the Gram-positive bacteria. In this study, researchers detected that the stem bark extracts were more potent when compared to the leaf extracts (39).

On the other hand, it was demonstrated that ethyl acetate and butanol fractions of *P. avium* had high antibacterial activity against *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, and *Salmonella typhimurium* but the extracts and fractions had no inhibitory effect against *P. aeruginosa* (23). *Propionibacterium acnes*, acne-inducing bacteria, was also inhibited by the juice of *P. avium*. The juice and/or methanol extracts of *P. avium* inhibited the growth of *Streptococcus pyogenes* and *P. acnes* but not *Staphylococcus epidermidis* (24). The reason for differences in the sensitivity of Gram-positive and Gram-negative bacteria might be dependent on variables in the pattern including the cell wall such as peptidoglycan structure or high levels of lipopolysaccharides (39). Taken together, *P. avium* has noticeable antibacterial potentials against Gram-positive, or Gram-negative bacteria depending on the species. Nevertheless, studies about the antibacterial properties of *P. avium* against *P. aeruginosa* are scarce. To our knowledge, there is no study investigating the QSI and anti-biofilm potentials of *P. avium* stalk against *P. aeruginosa*. As mentioned before, quorum quenching, by other words quorum sensing inhibition, is a novel approach to overcome bacterial antibiotic resistance. In this meaning, plant-based QSIs with fewer side effects, considerable bioavailability, low costs and no toxicity may serve alternatively promising treatment strategies individually or along with conventional antibiotics. The stalk parts of *P. avium* are generally discarded. The evaluation of stalk parts of this plant that will be disposed may provide highly possible add value to the country's economy since *P. avium* stalk may ensure beneficial effects in terms of health without any cost. Therefore, there are many positive aspects of utilization of *P. avium* stalk in healthcare because they are plant-based material and have cost-effectiveness as well as their potential therapeutic effects. Besides the evaluation of the material to be discarded can be achieved.

Considering the extract concentrations that we applied in our biofilm experiments, we can suggest that all our three concentrations (240, 120, and 60 µg/ml) are considerably low according to other studies testing the anti-biofilm properties of extracts from various plants. For example, Ravichandiran *et al.* (2013) reported that *Melia dubia* bark extracts reduced biofilm formation by

84% and QS system by 75% in *E.coli* at a concentration of 30 mg/ml (43). In another study, it was shown that *Capparis spinosa* extract inhibited biofilm formation of some pathogen Gram-negative bacteria at a concentration of 2 mg/ml (44). Sandasi *et al.*, demonstrated that *Rosmarinus officinalis*, *Mentha piperita*, and *Melaleuca alternifolia* exhibited anti-biofilm activity against *Listeria monocytogenes* at a 1 mg/ml (45). Trentin *et al.* (2011) tested the antibiofilm properties of several medicinal plants from the Caatinga in Brazil at the concentration of 0.4 mg/mL and 4.0 mg/mL against *S. epidermidis* (46).

In other respects, QS inhibition is usually assessed by the detection of AHL-related inhibitory activity based on the violacein pigment production in *Chromobacterium violaceum* strain CV026, which is unable to synthesize its AHL in the literature. Fluorescence-based biosensor strains have more advantages to evaluate QS response of bacterial cells due to their ability for screening directly QS-related gene expressions. Because we tested our samples on biomonitor strains, we could easily observe the inhibition rates by gene expression levels. According to our results, both extracts of *P. avium* stalk inhibited the *las* and *pqs* system but they provided less inhibition on *rhl* system of *P. aeruginosa*. Anti-biofilm properties of *P. avium* stalk extracts were tested against *PAOI* strain. The inhibition percentages for biofilm formation belonging to the acetone and methanol extracts of *P. avium* stalk samples at a concentration of 240 µg/ml were found to be slightly different and recorded as 47.76% (±6,60) and 38.54% (±3,56), respectively. Accordingly, to the QS experiments, our acetone extracts were found to be more effective on biofilm inhibition in contrast to methanol extracts.

From this point, taken into consideration of ethnobotanical importance and bioactive potential of *P. avium* stalk, antibiotic resistance problems may be solved by interrupting the QS system as an alternative strategy. Further detailed studies about the bioactive compounds of this plant should be performed. These compounds may be used in the manufacture of new drugs or alternatively in combination with antibiotics in drug discovery.

REFERENCES

- [1] Peterson, J.W. (1996). Bacterial pathogenesis. In Medical microbiology 4th edition, S. Baron (ed.), University of Texas Medical Branch, Galveston.
- [2] Rasko, D.A. and Sperandio, V. (2010). Anti-virulence strategies to combat bacteria-mediated disease. *Nat. Rev. Drug Discov.*, 9(2): 117-128.
- [3] Dickey, S.W., Cheung, G.Y. and Otto, M. (2017). Different drugs for bad bugs: Antivirulence strategies in the age of antibiotic resistance. *Nat. Rev. Drug Discov.*, 16: 457-471.
- [4] World Health Organization (2017). Prioritization Pathogens Infographic. <http://www.who.int/medicines/prioritization-pathogens-infographic.pdf?ua=1>.
- [5] Driscoll, J.A., Brody, S.L. and Kollef, M.H. (2007). The epidemiology, pathogenesis and treatment of *Pseudomonas aeruginosa* infections. *Drugs*, 67: 351-368.
- [6] Schwarz, C., Bouchara, J.P., Buzina, W., Chrenkova, V., Dmeńska, H., de la Pedrosa, E.G.G., Canton, R., Fiscarelli, E., Le Govic, Y., Kondori, N., Matos, T., Romanowska, E., Ziesing, S. and Sedlacek, L. (2018). Organization of patient management and fungal epidemiology in cystic fibrosis. *Mycopathologia*, 183: 7-19.
- [7] Singh, P.K., Schaefer, A.L., Parsek, M.R., Moninger, T.O., Welsh, M.J. and Greenberg, E.P. (2000). Quorum-sensing signals indicate that cystic fibrosis lungs are infected with bacterial biofilms. *Nature*, 407(6805): 762-764.
- [8] Smith, R.S. and Iglewski, B.H. (2003). *Pseudomonas aeruginosa* quorum sensing as a potential antimicrobial target. *J. Clin. Invest*, 112(10): 1460-1465.
- [9] Rasmussen, T.B. and Givskov, M. (2006). Quorum-sensing inhibitors as anti-pathogenic drugs. *Int. J. Med. Microbiol.*, 296(2-3): 149-161.
- [10] Rutherford, S.T. and Bassler, B.L. (2012). Bacterial quorum sensing: its role in virulence and possibilities for its control. *Cold Spring Harb. Perspect. Med.*, 2(11):a012427.
- [11] Khan F., Javaid, A., Kim, Y.M., (2019). Functional diversity of quorum sensing receptors in pathogenic bacteria: Interspecies, intraspecies and interkingdom level. *Curr. Drug Targets*, 20(6): 655-667.
- [12] Lee, J. and Zhang, L. (2015). The hierarchy quorum sensing network in *Pseudomonas aeruginosa*. *Protein & Cell*, 6(1): 26-41.
- [13] Moradali, M.F., Ghods, S. and Rehm, B.H. (2017). *Pseudomonas aeruginosa* lifestyle: a paradigm for adaptation, survival, and persistence. *Front. Cell Infect. Microbiol.*, 7:39.
- [14] Olson, M.E., Ceri, H., Morck, D.W., Buret, A.G. and Read, R.R. (2002). Biofilm bacteria: formation and comparative susceptibility to antibiotics. *Can. J. Vet. Res.*, 66(2): 86.
- [15] Tang, K. and Zhang, X.H. (2014). Quorum quenching agents: resources for antivirulence therapy. *Mar. Drugs*, 12: 3245-3282.
- [16] Kalia, V.C. (2013). Quorum sensing inhibitors: an overview. *Biotechnol. Adv.*, 31(2):224-245.
- [17] Fowler, M.W. (2006). Plants, medicines and man. *J. Sci. Food Agric.*, 86 (12): 1797-1804.
- [18] Koh, C.L., Sam, C.K., Yin, W.F., Tan, L., Krishnan, T., Chong, Y. and Chan, K.G. (2013). Plant-derived natural products as sources of anti-quorum sensing compounds. *Sensors*, 13(5): 6217-6228.
- [19] Al-Moghrabi, R.S., Abdel-Gaber, A.M. and Rahal, H.T. (2018). A comparative study on the inhibitive effect of *Crataegus oxyacantha* and

- Prunus avium* plant leaf extracts on the corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution. *Int. J. Ind. Chem.*, 9(3):255-263.
- [20] Ademović, Z., Hodžić, S., Zahirović, Z.H., Husejnagić, D., Džananović, J., Šarić-Kundalić, B. and Suljagić, J. (2017). Phenolic compounds, antioxidant and antimicrobial properties of the wild cherry (*Prunus avium L.*) stem. *Acta Period. Technol.*, 48: 1-13.
- [21] Kim, D.O., Heo, H.J., Kim, Y.J., Yang, H.S. and Lee, C.Y. (2005). Sweet and sour cherry phenolics and their protective effects on neuronal cells. *J. Agric. Food Chem.*, 53(26): 9921-9927.
- [22] McCune, L.M., Kubota, C., Stendell-Hollis, N.R. and Thomson, C.A. (2010). Cherries and health: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 51: 1-12.
- [23] Ahn, S.M., Ryu, H.Y., Kang, D.K., Jung, I.C. and Sohn, H.Y. (2009). Antimicrobial and antioxidant activity of the fruit of *Prunus avium L.* *Microbiology and Biotechnology Letters*, 37(4): 371-376.
- [24] Ördögh, L. (2010). Antioxidant and antimicrobial activities of fruit juices and pomace extracts against acne-inducing bacteria. *Acta Biol. Szeged.*, 54(1): 45-49.
- [25] Hussain, M.A. (2011). Isolation and identification of an anthocyanin compound from cherry fruit (*Prunus avium L.*) and study of its antibacterial activity. *Tikrit Journal of Pure Science*, 16(2): 26-30.
- [26] Rovčanin, B.R., Čebović, T., Stešević, D., Kekić, D. and Ristić, M. (2015). Antibacterial effect of *Herniaria hirsuta*, *Prunus avium*, *Rubia tinctorum* and *Sempervivum tectorum* plant extracts on multiple antibiotic resistant *Escherichia coli*. *Bioscience Journal*, 31(6): 1852-1861.
- [27] Gonçalves, B., Landbo, A.K., Let, M., Silva, A.P., Rosa, E. and Meyer, A.S. (2004). Storage affects the phenolic profiles and antioxidant activities of cherries (*Prunus avium L.*) on human low-density lipoproteins. *J. Sci. Food Agr.*, 84(9): 1013-1020.
- [28] Serrano, M., Guillén, F., Martínez-Romero, D., Castillo, S. and Valero, D. (2005). Chemical constituents and antioxidant activity of sweet cherry at different ripening stages. *J. Agric. Food Chem.*, 53(7): 2741-2745.
- [29] Zhang, Y., Neogi, T., Chen, C., Chaisson, C., Hunter, D.J. and Choi, H.K. (2012). Cherry consumption and decreased risk of recurrent gout attacks. *Arthritis & Rheumatism*, 64(12): 4004-4011.
- [30] Hentzer, M., Riedel, K., Rasmussen, T.B., Heydorn, A., Andersen, J.B., Parsek, M. and Kjelleberg, S. (2002). Inhibition of quorum sensing in *Pseudomonas aeruginosa* biofilm bacteria by a halogenated furanone compound. *Microbiology*, 148(1): 87-102.
- [31] Yang, L., Barken, K.B., Skindersoe, M.E., Christensen, A.B., Givskov, M. and Tolker-Nielsen, T. (2007). Effects of iron on DNA release and biofilm development by *Pseudomonas aeruginosa*. *Microbiology*, 153(5): 1318-1328.
- [32] Yang, L., Rybtke, M.T., Jakobsen, T.H., Hentzer, M., Bjarnsholt, T., Givskov, M. and Tolker-Nielsen, T. (2009). Computer-aided identification of recognized drugs as *Pseudomonas aeruginosa* quorum-sensing inhibitors. *Antimicrob. Agents Chemother.*, 53(6): 2432-2443.
- [33] Bjarnsholt, T., Van Gennip, M., Jakobsen, T.H., Christensen, L.D., Jensen, P.Ø. and Givskov, M. (2005). Garlic blocks quorum sensing and promotes rapid clearing of pulmonary *Pseudomonas aeruginosa* infections. *Microbiology*, 151(12): 3873-3880.
- [34] Tateda, K., Comte, R., Pechere, J.C., Köhler, T., Yamaguchi, K. and Van Delden C. (2001). Azithromycin inhibits quorum sensing in *Pseudomonas aeruginosa*. *Antimicrob. Agents Chemother.*, 45(6): 1930-1933.
- [35] Di Cagno, R., Surico, R.F., Minervini, G., Rizzello, C.G., Lovino, R., Servili, M., Taticchi, A., Urbani, S. and Gobbett, M. (2011). Exploitation of sweet cherry (*Prunus avium L.*) puree added of stem infusion through fermentation by selected autochthonous lactic acid bacteria. *Food Microbiology*, 28: 900-909.
- [36] Bursal, E., Köksal, E., Gülçin, İ., Bilsel, G. and Gören, A.C. (2013). Antioxidant activity and polyphenol content of cherry stem (*Cerasus avium L.*) determined by LC-MS/MS. *Food Res. Int.*, 51(1): 66-74.
- [37] Basanta, M.F., Plá, M.F.E., Raffo, M.D., Stortz, C.A. and Rojas, A.M. (2014). Cherry fibers isolated from harvest residues as valuable dietary fiber and functional food ingredients. *J. Food Eng.*, 126: 149-155.
- [38] Aires, A., Dias, C., Carvalho, R. and Saavedra, M.J. (2017). Analysis of glycosylated flavonoids extracted from sweet-cherry stems, as antibacterial agents against pathogenic *Escherichia coli* isolates. *Acta Biochim. Pol.*, 64(2): 265-271.
- [39] Oyetayo, A.M. and Bada, S.O. (2017). Phytochemical screening and antibacterial activity of *Prunus avium* extracts against selected human pathogens. *J. Altern. Complement Med.*, 1-8.
- [40] Duarte, A.P. and Silva, B.M. (2014). Nutritional and phytochemical potential of *Prunus avium L.* In *Natural Products: Research Reviews*, V.K. Gupta (ed.), Daya Publishing House, India, 185-202.
- [41] Petković, B., Matoš, S., Gorgi, N. and Kukrić, Z. (2014). Analysis of antioxidant activity of different species of wild cherry (*Prunus avium L.*). *Glo. Adv. Res. J. Agric. Sci.*, 3(5): 128-135.
- [42] Bastos, C., Barros, L., Dueñas, M., Calheta, R.C., Queiroz, M.J.R., Santos-Buelga, C. and Ferreira,

- I.C. (2015). Chemical characterisation and bioactive properties of *Prunus avium L.*: The widely studied fruits and the unexplored stems. *Food Chem.*, 173: 1045-1053.
- [43] Ravichandiran, V., Shanmugam, K. and Princy Solomon A. (2013). Screening of SdiA inhibitors from *Melia dubia* seeds extracts towards the hold back of uropathogenic *E. coli* quorum sensing-regulated factors. *Medicinal Chemistry*, 9(6): 819-827.
- [44] Abraham, S.V.P.I, Palani, A., Ramaswamy, B.R., Shunmugiah, K.P. and Arumugam, V.R. (2011). Antiquorum sensing and antibiofilm potential of *Capparis spinosa*. *Arch. Med. Res.*, 42(8): 658-668.
- [45] Sandasi, M., Leonard, C.M. and Viljoen, A.M. (2010). The *in vitro* antibiofilm activity of selected culinary herbs and medicinal plants against *Listeria monocytogenes*. *Let. Appl. Microbiol.*, 50(1): 30-35.
- [46] da Silva Trentin, D., Giordani, R.B., Zimmer, K.R., da Silva, A.G., da Silva, M.V., dos Santos Correia, M.T, Baumvol I.J.R. and Macedo A.J. (2011). Potential of medicinal plants from the Brazilian semi-arid region (Caatinga) against *Staphylococcus epidermidis* planktonic and biofilm lifestyles. *J. Ethnopharmacol.*, 137(1): 327-335.

Otonom Araçların Yaygınlaşmasının Önündeki Zorluklar

Difficulties in the Proliferation of Autonomous Vehicles

Yahya TAŞTAN¹ , Habib KAYMAZ^{1,2} 

¹ Marmara Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, 34722, İstanbul, Türkiye

² Mercedes Benz Türk A.Ş., Otobüs Geliştirme, 34722, İstanbul, Türkiye

Öz

Endüstri devriminin en etkin sonuçlarından biri ulaşım ve taşımacılık alanında içten yanmalı motora sahip otomobillerdir. Günümüzde bir milyarı aşkın sayıdaki konvansiyonel araç, insanoğlunun temel ihtiyaçlarında biri olan hareketlilik ihtiyacını karşılamasına rağmen neden olduğu çevresel etkiler ve trafik kazalarının yol açtığı can ve mal kayıpları sebebiyle halen endüstriyel ve akademik araştırmaların en temel konularından birini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, otomotivde Endüstri 4.0'ın doğal sonucu olarak gelişen araç teknolojilerinden biri olan otonom araçların yaygınlaşmasının önündeki zorlukların yanında otonom araçları oluşturan sensör, donanım, yazılım bileşenlerinden bahsedilerek otonominin nasıl çalıştığı araştırılmıştır. Bu araçların yaygınlaşmasının önündeki zorluk; teknik yetersizlikler, yüksek geliştirme maliyetleri, satın alma ve işletme maliyetleri, trafik güvenliği ve emniyeti, altyapı yetersizliği, ulaşım fiyatlandırması, durak ve park planlaması ile yolculuk beklentilerinde değişim başlıkları altında irdelenmiştir. Seviye 4 otonom araçların, yüksek maliyet ve sınırlı performansıyla birlikte günümüzde bazı ülkelerde yasal ve ticari araç olarak kullanılmaya başlamıştır. Seviye 5 otonom araçların 2030'larda olgunlaşması beklenirken 2040'larda yaygın ve uygun fiyatlı hale geleceği ve insan güdümlü araçların kullanımının yasaklanabileceği tahmin edilmektedir. Birçok ulaşım ve şehir planlamacısı, araştırmacı ve siyasetçi araç otomasyonunun teknik yapısı ve faydasına inansa da, ortaya çıkacak etki veya sorumlu olanların eylemleri hakkında fikir birliği henüz sağlanmamıştır. Bu çalışmanın sonuç kısmında otonom araçların yaygınlaşmasının önündeki zorlukların üstesinden gelebilmek için bazı önermelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Otonom Araç, Araç Teknolojisi, RADAR, Kamera, LIDAR, Yapay Zekâ.

Abstract

One of the most effective results of the industrial revolution is automobiles with internal combustion engines in the field of transportation. Today, more than one billion conventional vehicles, although they meet the mobility need, which is one of the basic needs of human beings, still constitute one of the most fundamental subjects of industrial and academic research due to the environmental effects and loss of life and property caused by traffic accidents. In this study, in addition to the difficulties in the proliferation of autonomous vehicles, which is one of the developing vehicle technologies as a natural result of Industry 4.0 in automotive, the sensor, hardware and software components that make up autonomous vehicles and how autonomy works are mentioned. Level 4 autonomous vehicles have started to be used as legal and commercial vehicles in some countries with their high cost and limited performance. While Level 5 autonomous vehicles are expected to mature in the 2030s, it is predicted that they will become common and affordable in the 2040s and the use of human-guided vehicles may be banned. While many transport and urban planners, researchers and politicians believe in the technical nature and usefulness of vehicle automation, there is no consensus yet on the impact that will occur or the actions of those responsible. In the conclusion of this study, some suggestions have been made to overcome the difficulties in the proliferation of autonomous vehicles.

Keywords: Autonomous Vehicle, Vehicle Technology, RADAR, Camera, LIDAR, Artificial Intelligence.

I. GİRİŞ

Trafikte güvenlik endişeleri, maddi hasarlı ve ölümlü kaza sayılarının yüksekliği, çevresel etkiler, teknolojik gelişmeler ve konfor beklentisinin yükselmesi gibi nedenlerin sebep olduğu etkiler gündelik hayatımızda önemli bir yer tutan kişisel ulaşım araçlarında devrimsel nitelikte değişikliğe yol açmaktadır. Bu kapsamda günlük hayata girmeye başlayan akıllı araçlar, sahip olduğu kontrol üniteleri ve sensörlerin yardımıyla bulunduğu ortamı algılayarak sürücünün daha güvenli ve daha rahat sürüş yapmasını sağlayan araçlardır. Akıllı araçlar ile konvansiyonel araçlar arasındaki en önemli fark akıllı aracın sürücüyü araç kontrolü ve kumandası konusunda desteklemesi veya tamamen kontrolü almasıdır. Akıllı araçlar bunu yaparken sadece sahip olduğu kontrol üniteleri ve sensörlerini değil kablosuz iletişim ağları, uydular, diğer araç ve şehrin altyapısı ile haberleşme imkânlarını da kullanmaktadırlar. Konvansiyonel araçlardan akıllı araçlara geçişte son evreyi temsil eden otonom araçlardan üç temel beklenti vardır;

1. Araç sahibi, yolcu veya kontrol merkezi isteklerinin doğru bir şekilde alınması (İnsan-Makine Etkileşimi, HMI (Human-Machine Interface))

2. Araç altyapısının (manevra, hız ve fren gibi işlemlerin olması istendiği gibi yapılması için sürüş ve güç kontrol sistemleri ile tüm mekanik ve elektriksel donanımların) eksiksiz sevk ve idaresi
3. Dinamik tam çevre (yol, trafik ve çevresinde bulunan nesnelerin belirlenmesi, sınıflandırılması, hareketlerinin tahmini ile) kontrolü

Otonom araçlarda ilk iki beklenti tam anlamıyla yapılmakta iken üçüncü beklentide halen ciddi eksikler bulunmaktadır. Otonom araçların normal koşullarda güvenilir bir şekilde seyahat edebilmesi için birçok teknik sorunun çözülmesi gerekir [1]. Her kesim tarafından da kullanılabilmesi için milyonlarca kilometreyi bulan test sürüş çalışmalarının başarılı olması gerekmektedir. Piyasadaki araçlar, sağlam ve yüksek güvenli yapılmıştır, bu nedenle yeni araç teknolojilerinin bu özelliklere sahip olup olmadığının tespiti için yıllar süren test ve süreçlerden geçmesi gerekmektedir.

Otonom araçların önemli ekonomik sonuçları olacaktır [2]. Otonom araçların güvenli sürüş yapılabilmesi için trafik alt yapısının düzenlenmesinden dolayı diğer yatırımlardan daha fazla olması gerekmektedir. Örneğin, birçok otonom araç trafik sıkışıklığı ve kirliliği azaltma, trafik hızını ve yolcu konforunu en üst düzeye çıkarmak veya diğer hedef kullanıcılar için gecikmeyi ve riskleri en aza indirmek için özel şerit gerektirmektedir.

İkinci bölümde otonom araçların çalışma mantığı ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Üçüncü bölümde otonom araçların yaygınlaşmasının önündeki zorluklar anlatılmıştır. Sonuçlar bölümünde ise otonom araçların önündeki bu zorlukları aşabilmek için bazı önermelerde bulunulmuştur.

II. OTONOM ARAÇLAR

Otonom araç, çevresini algılama kabiliyeti sayesinde, herhangi bir insan müdahalesi olmadan kendini çalıştırabilen ve gerekli müdahaleleri gerçekleştirebilen bir araçtır. Bir sürücü olmadan seyahat etmek için sensörler, kameralar, RADAR (RAdio Detection And Ranging) ve yapay zekayı kullanır. Bazen, özerk (autonomous) yerine otomatik (automated) terimi kullanılmaktadır. Çünkü özerklik kelimesinin elektromekanik anlamından ziyade kendi seçimlerini yapabilen anlamı vardır. Örneğin, “beni işe götür” denildiğinde araba kendi kararını verip markete götürebilmektedir. Tam otomatik bir araba ise ancak emirleri takip eder ki o da kendisini sürmektir. Kendinden sürüş (self-driving) terimi ise araba normal koşullarda çalışabilir ancak acil bir durumda insan müdahalesine ihtiyaç duyabilir anlamına gelmektedir.

2.1. Otonom Araçların Tarihçesi

Sürücüsüz bir gelecek çok yakın görünüyor, ancak o noktaya gelmek uzun ve zorlu bir yolculuk olacaktır. Otonom araçların rüyası neredeyse otomobil kadar eskidir. İlk olarak 1925'te Francis Udina,

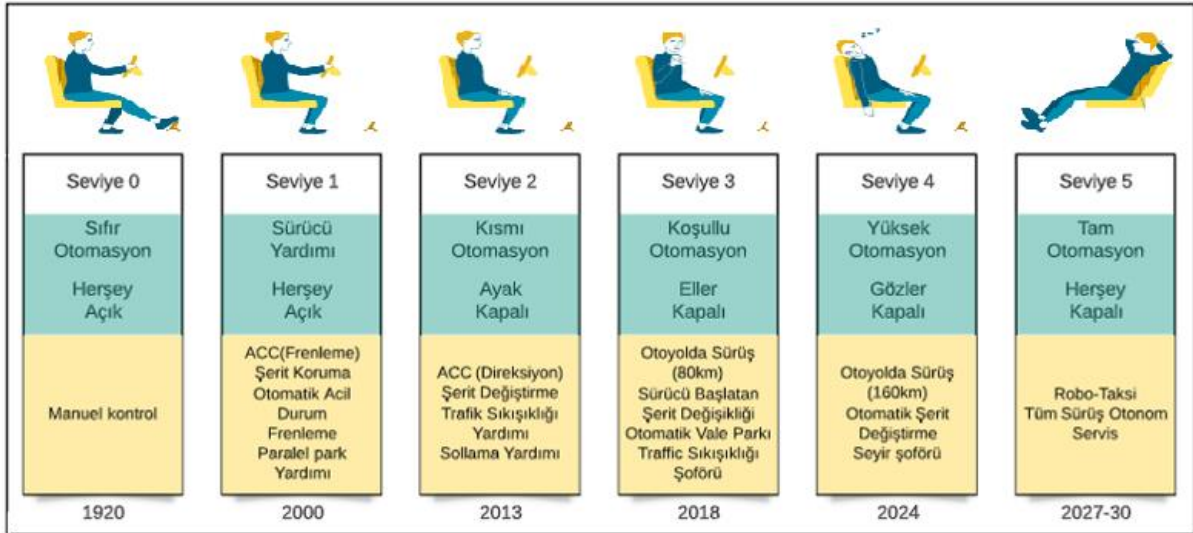
uzaktan kumandalı arabayı icat etti. GM (General Motors) 1956'da otonom bir araba tanıtım videosu çekti. Videoda GM, insanların otoyoldaki kontrolü devraldığını, stressiz bir sürüşün tadını çıkardığını ve yolcuların araba ile sesle etkinleşen kontrol özelliklerini gösterdi. 1986'da Ernst Dickens ve Münih Üniversitesi'nden gelen ekip, trafik olmadan tamamen özerk bir şekilde sürülebilen robotik minibüse öncülük etti ve 1987'de saatte 60 kilometreye kadar hız yaptı [3]. 1990'ların başında, bu ekip Eureka Prometheus projesinde bilgisayar vizyonunu kullanarak çevrede önemli noktalara odaklanan otonom bir binek araç geliştirdi. 1986'da ilk otonom araç olan Navlab1, birden fazla güneş paneli kullanılarak saatte 30 kilometre yol aldı. Daha sonra 1990'da Navlab2, her yolda otonom olarak çalışabilen yenilenmiş bir Humvee, yolda saatte 110 kilometrelik hızlara ulaştı. UC Berkeley yolu projesi, özel şeritlerde çalışan araçların otonom takımlarının başarılı çalışmalarıyla ön plana çıktı. Proje aynı zamanda otonom araç endüstrisinde RADAR sistemleri ve araç-araç iletişimi kullanımını iyi bir şekilde sağlamış ve uyarlanabilir hız sabitleme ve acil frenleme gibi ilerlemelere yol açmıştır [4,5]. İlk olarak 2004'te DARPA (The Defense Advanced Research Projects Agency) Mojave Çölü'nde saatte 200 kilometre yol alabilen otonom bir araç gerçekleştirenlere bir milyon dolarlık bir ödül sundu. 2012 yılında, Nevada Motorlu Taşıtlar Departmanı, Google'a ilk kamu otonom araç test lisansını yayınladı. Bu da artık kamu yollarında otonom bir araç test edebilecekleri anlamına geliyordu [6]. Tesla 2015 yılı sonunda, oto pilot olarak adlandırılan otonom özellikli yazılım paketini tanıttı. 2016 yılına kadar, oto pilotun kendi kendine park edebileceğini ve bir düğme ile nasıl çağrılacağını göstermişti. Google, Tesla gibi birçok yeni ve köklü şirket, 2030 gibi yakın bir tarihte tam otonom otomobilleri piyasaya sürmeyi planlamaktadır.

2.2. Otonom Araç Sınıflandırması

Şekil 1'de altı otonom sürüş seviyesi tanımlanmaktadır. Tümü insan algısı, planlama ve kontrolü ile başlayan kısma seviye 0 denir. Bu seviyede, hiç sürüş otomasyonu yoktur [2]. Her şey sürücü tarafından yapılmaktadır. Eğer otonom bir sistem sürücüye uzunlamasına kontrol görevlerini yerine getirerek yardımcı oluyorsa seviye 1 durumudur. Uyarlanabilir hız sabitleyici birinci seviye için iyi bir örnektir. ACC (Adaptif cruise control) sistem, aracın istenilen hızda gitmesini sağlamaktadır. Ancak direksiyon hareketleri için sürücüye ihtiyacı vardır. Böylece boyuna kontrol yapabilir, ancak yanal kontrol yapmak için insana ihtiyaç duyar. Benzer şekilde, şeritte tutma destek sistemleri de seviye 1'dir. Şeritte tutma yardımıyla, sistem şeridin içinde kalmaya ve sınırlara doğru sürüldüğünde sürücüyü uarmaya yardımcı olmaktadır [6]. Seviye 2'de sistem, belirli sürüş senaryolarında yanal ve uzunlamasına kontrol görevlerini yerine getirmektedir. Seviye 2 özelliklerden bazı örnekler GM Super Cruise ve Nissan's Pro Pilot yardımcısıdır. Bunlar hem yan hem

de uzunlamasına hareketi kontrol edebilir, ancak sürücünün sistemi her zaman izlemesi gerekmektedir. Seviye 3 veya koşullu otomasyon seviyesinde, sistem kontrol görevlerine ek olarak belli bir dereceye kadar yanıt olarak nesne ve olay algılama yapabilir [4,5]. Ancak, problem durumunda kontrol sürücü tarafından alınmalıdır. Seviye 2 ve 3 arasındaki en önemli fark, araç belirli bir durumda sürücünün dikkat etmesinin gerekmemesidir, çünkü araç, sürücüyü müdahale etmek için zamanında uyarabilmektedir. Bu otonom sisteminin ne zaman bir arıza olduğunu bilmesi her zaman mümkün olmadığından tartışmalı bir otomasyon seviyesidir. Üçüncü seviye sistemlere örnek olarak, yavaş trafikte navigasyon yapabilen Audi A Luxury Sedan verilebilir. Dördüncü seviye sistemler acil durumları kendi başlarına halledebilir ancak yine de gereksiz yere yolun kenarına çekilmelerini önlemek için sürücülerin aracı devralmalarını isteyebilmektedir. Bu seviyede, yolcular telefonlarını kontrol edebilir veya sistemin

acil durumları kaldırdığını ve yolcuları güvende tutabildiğini bilerek bir film izleyebilmektedir [3]. Google çatısı altında sürücüsüz araç teknolojileri geliştiren Waymo şirketi, 2015'te dünyanın ilk seviye 4 aracını tamamladı. Firefly isimli araba deney ve öğrenme için yapılmıştı fakat seri üretim için bir prototip olarak tasarlanmamıştı. 2018 sonbaharı itibarıyla, sadece Waymo bu düzeyde özerkliğe sahip toplu taşıma araçlarında kullanmıştır. Son olarak, beşinci seviyede sistem tamamen otonomdur. Bu, gerekli her koşulda çalışabileceği anlamına gelmektedir. Beşinci seviye, toplumun büyük değişime uğradığı noktadır [7]. Sürücüsüz taksilerin, ihtiyaç duyduğu yerden insanları alması planlanmaktadır. Beşinci seviye için henüz bir örnek yoktur. Öngörülen faydaların çoğu, her koşulda çalışan, güvenli bir şekilde insan veya mal taşıyabilen seviye 5'i gerektirmektedir. Bu çalışmada bahsedilen zorluklar özellikle seviye 5 kastedilmektedir.



Şekil 1. Otonom sürüş seviyeleri [7]

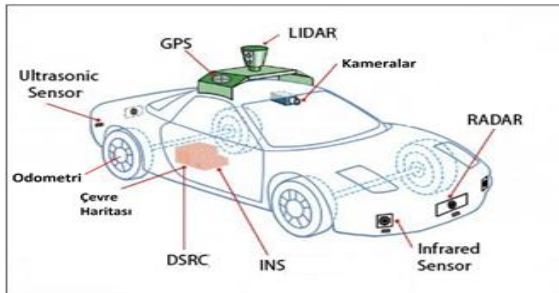
2.3. Algı Gereksinimleri

OEDR, nesne veya olay algılama ve yanıtı (Object and Event Detection and Response) olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir sürüş görevi bir çeşit OEDR gerektirir, yani etraftaki nesnelere tanımlamak, yakınlarda meydana gelen olayları tanımak ve daha sonra buna yanıt vermek için bir yola ihtiyaç vardır. Başka bir deyişle, otonom bir araç yapılmak isteniyorsa, OEDR yapabilmek gerekmektedir. Özellikle, yoldaki herhangi bir eleman için öncelikle ne olduğunu tanımlamak gerekir; bir araba, bir bisikletçi, bir otobüs, vs. İkinci olarak, onun hareketini anlamak gerekmektedir.

İnsanlar belli olayları anlamada gerçekten iyidir. Bununla birlikte, bilgisayar sistemlerinin çevredeki aynı olayları insan kadar çabuk tanıyabilmesi hala zordur [7].

İlk olarak, statik elemanları tanımlamak gerekmektedir. Bunlar yol ve şerit işaretleri, yollarda yaya geçişleri gibi bölgeleri ayıran unsurlar ve okul önleri gibi önemli unsurlardır. Sonra, yol sınırlarını tanımlayan kaldırımlar diğer bir önemli unsurdur [4,5]. İleri veya sola veya sağa gitmeye veya sadece durmaya izin verilip verilmediğini düzenli olarak değiştiren ve bildiren karayolu trafik sinyalleri vardır. Ayrıca hız sınırını söyleyen, yönü gösteren yol işaretleri, bir hastane veya bir okul olduğunu belirten trafik tabelaları vardır. Son olarak, yol engelleri, inşaatın gerçekleştiğini veya barikat kenarı olduğunu söyleyen dinamik öğeler vardır. Bunlar, bilinçli sürüş kararları vermek için hareketini tahmin etmek gereken unsurlardır. Yoldaki diğer araçları tanımlamak gerekmektedir [6]. Bunlar; kamyonlar, otobüsler, arabalar dört tekerlekli; motosikletler, bisikletler gibi iki tekerlekli hareketini tanımlamak ve tahmin etmek

gerekmektedir. Bunlar fazla özgürlüğe sahip hareketli sistem olduklarından dolayı tahmin edilmesi daha zordur. Ayrıca etraftaki yayaların hareketlerini tanımlayabilmeli ve tahmin edilebilmelidir. İnsanların hareket ettikleri yoldaki doğal özgürlük nedeniyle araçlardan çok daha düzensiz oldukları bilinmektedir [3]. Algı için nerede bulunduğu ve herhangi bir zamanda nasıl hareket edileceği tahmin edilebilmelidir. Konum hareket tahmini için kullanılan veriler GPS (Global Positioning System), IMU (Inertial measurement unit) ve kilometre sayacı sensörlerden gelir ve konumun tutarlı bir resmini oluşturmak için bir araya getirilmesi gerekmektedir. İlk olarak, doğru algıyı gerçekleştirmek büyük bir zorluktur. Algılama ve sınıflamaya modern makine öğrenimi yöntemleri ile yaklaşılabilir, ancak insan seviyesi yeteneğine ulaşmak için güvenilirliği ve performansı artırmak için çok sayıda araştırmaya ihtiyaç vardır [4,5]. Büyük veri kümelerine erişim bu çaba için kritik öneme sahiptir. Daha fazla eğitim verisi ile, algılama ve sınıflama daha iyi ve daha doğru performans gösterir, ancak tüm araç tipleri, hava koşulları ve yol yüzeyleri için veri toplamak ve etiketlemek çok pahalı ve zaman alıcı bir işlemdir. İkincisi, algı, sensör belirsizliğine karşı bağışık değildir. Görünürlük zor olabilir veya GPS ölçümleri bozulabilir veya LIDAR (Light Detection and Ranging veya Laser Imaging Detection and Ranging) ve RADAR dönümlerinin konum değerleri açısından gürültülü olabilir. Bu sensörlere dayanan her alt sistem belirsiz ölçümleri hesaba katmalıdır [6]. Bu nedenle, her algılama görevinde sensör belirsizliği ve bozuk ölçümleri barındırmayan alt sistemler tasarlamak kesinlikle çok önemlidir [3]. Ardından kamera veya LIDAR verilerinde emme ve yansıma gibi etkiler vardır. Bunlar, algılama yöntemlerini, nesne konumlarının doğru tahminlerine çözüm bulmakta zorlanan belirsiz bilgilerle karıştırabilmektedir. Sert aydınlatma değişiklikleri ve mercekle parlaması veya bazı sensör verilerinin tamamen kullanılamaz hale geldiği GPS kesintileri ve tüneller gibi olaylar da vardır [8]. Algılama yöntemlerinde sensör veri kaybının üstesinden gelmek için Şekil 2'de gösterilen algılama teknolojilerine birden fazla yedek bilgi kaynağı gerekmektedir. Son olarak, sensörlerden gelen giriş verilerinin kalitesini olumsuz yönde etkileyebilecek hava ve yağış vardır. Bu nedenle, farklı hava koşullarına, örneğin RADAR'la birlikte uyumlu çalışabilen en azından birkaç sensöre sahip olmak çok önemlidir.



Şekil 2. Otonom araç algılama teknolojileri [20]

ABD'de otonom sürüş için özel kısa mesafe iletişim sistemi kısaca DSRC (Dedicated Short-Range Communications), araçtan araca kısaca V2V (vehicle to vehicle) ve araçtan her şeye kısaca V2X (vehicle-to-everything) iletişiminin uygulanması için teknolojik bir çözüm olarak kabul edilirken, Avrupa'da otonom sürüş işlevlerini uygulayabilecek belirli bir teknoloji henüz görülmemektedir. Avrupa'da 5G'nin, nesnelerin interneti ve otonom sürüş bağlamında bağlantılı sürüş de dahil olmak üzere akıllı endüstrinin çeşitli yönlerini geliştirebilen anahtar teknoloji olduğu varsayılmaktadır. Operasyonel açıdan bakıldığında 5G teknolojisi henüz emekleme aşamasındadır.

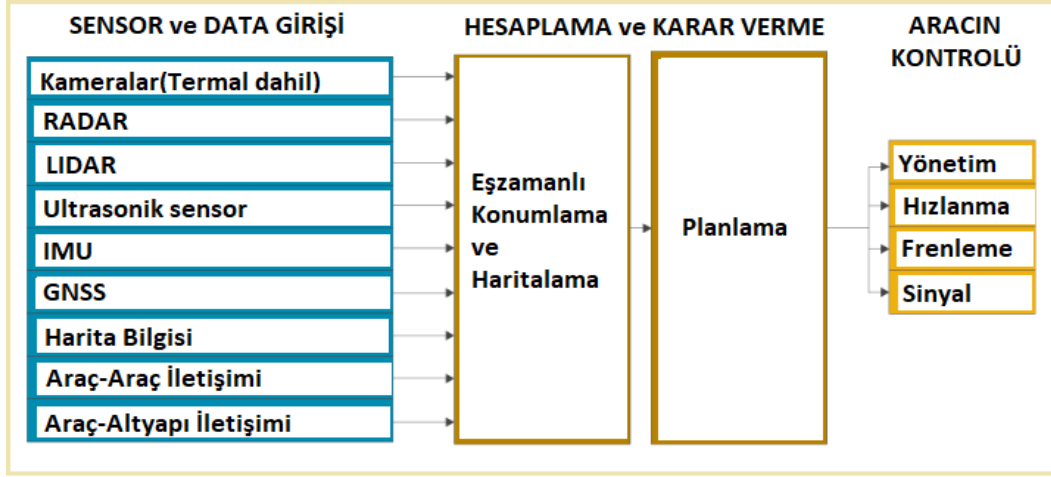
Kapsamlı bir 5G ağının teknik uygulamasının çeşitli yönleri hala iyi miktarda araştırma ve geliştirme gerektirmektedir. Halen düzenleyici bir çerçevesi olmayan 5G'nin mevcut teknolojiye kıyasla potansiyel avantajları fazladır. 5G, gerçek zamanlı bilgi aktarımına izin veren bin kata kadar daha yüksek iletim kapasitesi, on kat daha yüksek hız ve on kat daha düşük gecikme süresinin yanı sıra enerji kullanımında bir azalma beklenmektedir. Buna, öngörülen tam erişilebilirlik kapsamının eşlik etmektedir. DSRC'nin savunucuları, DSRC'nin bugün zaten tüm istenen ve gerekli V2V'nin yanı sıra V2X iletişimine izin verdiğini iddia etmektedir. Bununla birlikte 5G'nin teknolojik kapasitelerinin büyük olasılıkla DSRC teknolojisini geçeceği ve geçerli olacağı yönündedir. Otonom araç bağlantısını sağlamada çok çeşitli teknolojiler rol oynamaktadır. Her teknolojinin avantaj ve dezavantajları vardır ve diğer teknolojilerin performansını düşürmeden otonom arabada hepsi birlikte çalışmalıdır. Otomotiv ekosistemi, güvenlik bilincini geliştirmek ve araçlar arasında otonom sürüşün yolunu açmak için, yol kenarı altyapısıyla ve genel çevre ile iletişim kurmak için V2X'i kullanacaktır. 5G bağlantısı, araç operasyonlarını uzaktan teşhis etmek ve izlemek, kablosuz yazılım güncellemeleri yapmak, tele operasyon gerçekleştirmek ve paylaşılan otonom bir filo çalıştırarak araç sahipliğini yeniden tanımlamak için kullanılabilir.

2.4 Sürüş Kararları ve Eylemi

Sürüş kararları verdiğimizde, genellikle üç tür karar alınır. Birinci tip; Zonguldak'tan Sivas'a nasıl gidileceği uzun vadeli bir planlama kararıdır. Bugün kullanılan harita uygulamaları hangi yolların kullanılacağını bildirebilmektedir [7]. Ancak araba kullanmak bundan çok daha fazlasına ihtiyaç duymaktadır. İkinci tip; anlık şerit değiştirme veya kavşakta sola dönme kısa süreli bir sürüş kararıdır. Araç sürmek için bazı acil kararlara veya tepkilere de ihtiyaç vardır. Hızlanmalı mı yoksa fren mi yapmalı eğer öyleyse, ne kadar gibi kararlar verilmelidir. Bu sürüş süresince, tüm senaryolar için sağdan sürüş yapılacağı unutulmamalıdır. Eve giderken bir kavşağa yaklaşıldığı varsayılırsa uzun vadeli planlama aşaması bu kavşaktan sola dönmeyi gerektirmektedir. Burada alınması gereken orta ve kısa vadeli kararlara bakılırsa ilk olarak, trafik ışıklarının

kontrol edilmelidir. Sola dönmek için, sola dönüş şeridine şerit değiştirme yapmanın gerekip gerekmediğini tanımlamak gerekmektedir [2]. Ardından, bu kavşağa yaklaşırken, yolcuların rahatsız olmaması için yavaşlamayı sorunsuz bir şekilde yapmak gerekmektedir. Daha sonra durma çizgisinden hemen önce, bir yaya geçidinden önce durmak gerekmektedir. Şerit değişikliklerine ve durma yerlerine ilişkin bu kararların tümü kısa vadeli planlama kararlarıdır. Ayrıca, yol boyunca ortaya çıkan durumları düşünmek ve bunlara yanıt vermek gerekmektedir [7]. Arkada başka araçlar varsa veya

kavşakta durduysa, ani sola dönüş yapma kararı normal sürüşte hızla ortaya çıkabilecek olası senaryolara göre acil karar kategorisine girer ve planlama sisteminden güvenli tepkiler gerektirmektedir. Sonuç, basit bir sola dönüş senaryosu için bile, farklı zaman ölçeklerinde alınması gereken birçok olası karar vardır. Bu, aynı kavşak geçişi veya farklı durum senaryoları için de konuşmak anlamına gelmektedir. Her senaryoda, gerçek zamanlı olarak değerlendirmek ve sahne hakkında yeni bilgiler elde edildikçe güncellenmek için tutarlı bir dizi seçeneğe ihtiyaç vardır [9].



Şekil 3. Otonom araç hesaplama ve karar verme çalışma mantığı [25]

Ayrıca, şerit değiştirme kararları nereye gidileceğini ve hangi araçların konumu göreceli olarak düzenleyeceğini etkilediğinden, görünüşte basit bir sürüş senaryosu bile üç veya dört seviye karar gerektirir ve daha sonra dikkatli araç kontrolü ile yürütülmelidir. Bu örnekler gerçekten sadece hareket planlaması için gereken sürekli karar akışının hatlarını çizmektedir [10]. Çok düzeyli karar alma zorluklarını aşmanın bir yolu reaktif planlamadır [2]. Reaktif planlamada, konum aracının ve çevredeki diğer nesnelerin mevcut durumunu dikkate alan ve acil eylemler üreten kural kümelerini tanımlanmaktadır. Yani, bunlar sadece mevcut durumu dikkate alan kurallardır gelecekteki durumlar için tahmin değildir. Öngörülü planlamada, ortamdaki araçlar ve yayalar gibi diğer elemanların zaman içinde nasıl hareket edeceği konusunda tahminlerde bulunur. Bu mevcut durumu ve tahmin bilgilerini tüm kararları tanımlamak için kullanılmaktadır. Öngörülü planlamadaki bazı örnekler şunlardır: "O araba son 10 saniye durdu, muhtemelen birkaç saniye duracak yani onu güvenle geçebilmenin bir yolu var" ya da "yaya dolaşiyor, onlara yaklaştığı zaman şeride girecekler, yavaşlamak ve yolu geçmeleri için bir şans vermek gerekir". Görüldüğü gibi, bu düşünmenin daha doğal bir yoludur ve insanların araçları nasıl kullandıklarıyla yakından ilgilidir. Kararları vermeden önce yolda başka nesnelerin nerede olacağını tahmin etmek gerekmektedir. Bununla

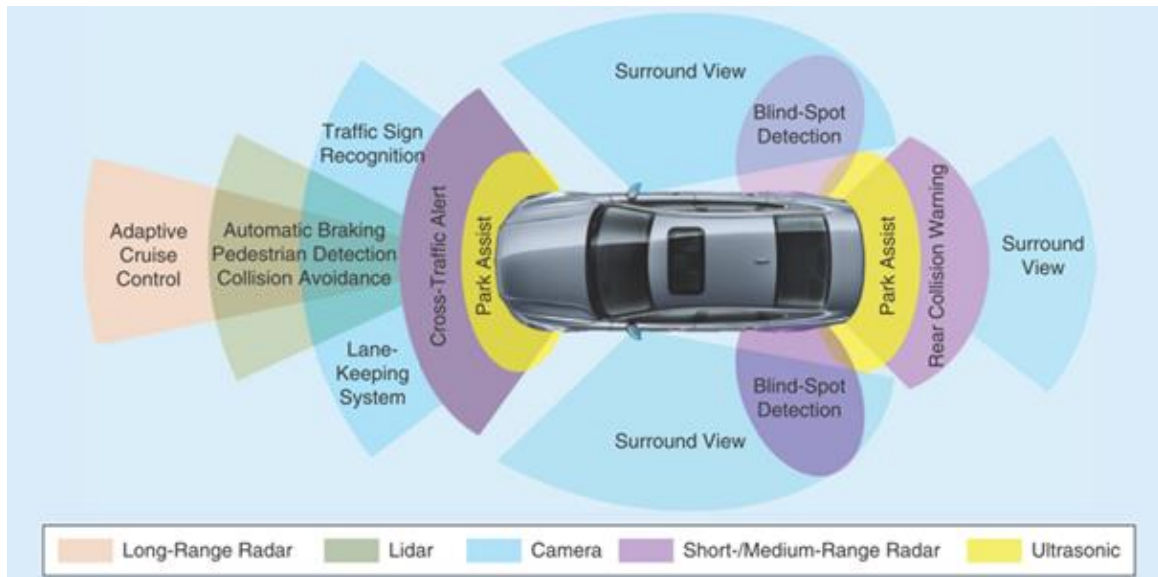
birlikte, bu tür planlama, ortamdaki diğer aktörlerin eylemlerinin doğru tahminlerine dayanır ve bu da algılama görevlerine önemli bir karmaşıklık katmanı eklemektedir. Bununla birlikte, bir aracın güvenli bir şekilde çalışacağı senaryoları büyük ölçüde genişlettiği için öngörülü planlama, otonom araçlar için baskın yöntemdir.

2.5. Sensörler ve Kontrol Üniteleri

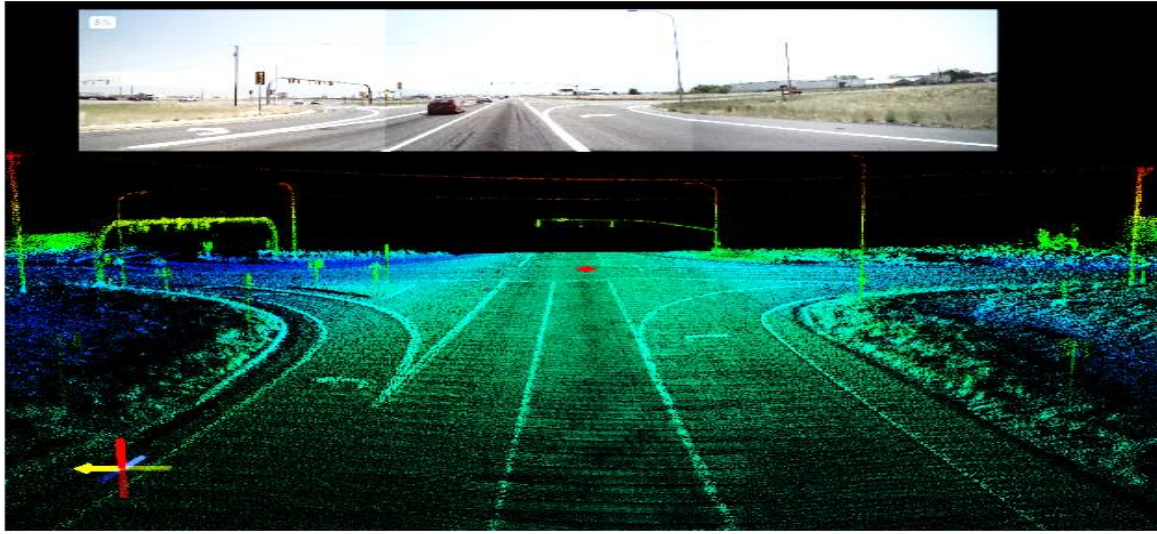
Algılama yazılımlarının başarısı Şekil 4'te gösterilen sensör füzyonunun kalitesi ile sınırlıdır. Doğru sensör füzyonu, algılama görevindeki hata oranını azaltacaktır. Sensör, ortamın bazı özelliklerini ölçen veya tespit eden veya zaman içinde bu özellikte değişiklik yapan herhangi bir cihazdır. Şekil 3'te çalışma mantığı verilen otonom araçlar için gerekli sensörler genellikle dahili ve harici sensörler olmak üzere iki gruba ayrılır: Konum, hız, hızlanma, motor tork gibi dahili sensörler cihazın kendisi hakkında bilgi alırlar. Kameralar, menzil sensörleri (kırmızı ışık sensörü, lazer mesafe bulucu ve ultrasonik sensör), yakınlık sensörleri (foto diyot detektörü, dokunma) ve kuvvet sensörleri gibi harici sensörler çevredeki bilgileri toplamaktadır [12]. Otonom sürüşte en yaygın kullanılan sensör kameradır [4,5]. Kameralar, otonom bir aracın çevresini tam anlamıyla görselleştirmesini sağlamaktadır. Otonom araçlarda kullanılan kameralar çok yüksek çözünürlüğüne sahiptir. Kamera ve bilgisayar, görme yazılımı tarafından işlenen veriler aracın çevresiyle ilgili ayrıntılı bilgileri tanımlamaya

yardımcı olmaktadır. Bazı üreticiler araçlarında şimdilik otonom sürüş için sadece kameraları kullanmaktadırlar. Ancak mevcut kamera teknolojisiyle seviye 5 henüz mümkün değildir. Kameralar hakkında konuşurken, genellikle üç önemli karşılaştırma metriğinden söz edilmektedir. Çözünürlük, bir görüntü içindeki nokta veya piksellerin sayısını belirten değerdir. Çözünürlük, görüntünün kalitesini belirlemenin bir yoludur [4, 5]. Görüş alanı, sabit bir noktadan bakıldığında gözlerin hem tam önünde hem de etrafında gördükleridir. Bu özellik lens seçimi ve yakınlaştırma ile değiştirilebilmektedir. Bir diğer önemli metrik dinamik aralık, bir görüntüde en parlak ve en karanlık alanlar arasındaki ışık farkı olarak ifade edilmektedir. Dinamik aralığın geniş olması, özellikle gece sürüşlerinde karşılaşılan farklı aydınlatma koşullarında otonom araçlar için görüntünün algılanmasını kolaylaştırmaktadır. Görüş alanı ve çözünürlük seçimi arasında yer alan kameralar ve lens seçimi konusunda önemli bir orantı vardır. Geniş görüş alanı arttırmak istendiğinde belirli bir nesneden ışığı emen daha az piksel sayısından dolayı, aynı kalitede algılayabilmek için çözünürlüğü artırmak gerekmektedir [3]. Kameraların algı kalitesini etkileyen odak uzaklığı, alan derinliği ve kare hızı gibi özellikleri de vardır. Üst üste binen görüş alanlarına ve hizalanmış görüntü düzlemlerine sahip iki kamera kombinasyonuna stereo kamera denir. Stereo kamera,

bir kişinin bir nesneyi görüntüleme prensibi ile aynı şekilde stereo kamera (iki gözlü kamera) kullanarak bir nesneyi birden fazla farklı yönden aynı anda fotoğraflayan bir kameradır. Kameranın pikselinin konum bilgisinden derinlik yönünde bilgi ölçülebilen bir kameradır. Sonra ışık algılama ve değişen sensör anlamına gelen LIDAR kullanılmaktadır [8]. LIDAR sensörleri, bir alanı kaplamak ve geri dönen sinyalleri 3D nokta bulutuna derlemek için saniyede 50.000-200.000 darbe göndermektedir. Şekil 5'te gösterildiği gibi ardışık algılanan nokta bulutlarındaki farkı karşılaştırarak, nesnelere ve hareketleri, 250 metreye kadar bir 3D harita oluşturulacak şekilde tespit edilebilmektedir [13]. LIDAR kendi ışık kaynaklarına sahip aktif bir sensör olduğundan zayıf veya değişken aydınlatma koşullarında çalışırken kameralarla aynı zorluklarla karşılaşmaz [6]. Saniye başına toplanan nokta sayısı ne kadar çok olursa, 3D nokta bulutu o kadar ayrıntılı olabilir. 3D nokta bulutlarının hızlı güncellenmesi dönme hızıyla doğru orantılıdır. Işık kaynağının gücü, tespit aralığını belirlemektedir [7]. Görüş alanı, LIDAR sensörü tarafından görülebilen açılal boyuttur. Yüksek çözünürlüklü katı hal LIDAR'ları son derece düşük maliyetli ve güvenilir hale gelmektedir. Uygun fiyatlı olmaları otonom sürüşün geleceği için önemli gelişmelerin önünü açacaktır.



Şekil 4. Otonom araçlarda sensör füzyonu [8]



Şekil 5. Toplanan LIDAR görüntüsü ve ilgili fotoğraf görüntüsü [2]

RADAR, mesafe ölçümü için radyo dalgalarını kullanmaktadır. Radyo dalgaları ışık hızında hareket eder ve elektromanyetik spektrumun en düşük frekansına sahiptir. RADAR uzun mesafeleri kapsar ve ortamdaki büyük nesnelere iyi bir şekilde algılamaktadır. Manyetik dalgaları kullandığı için yağış ve kar gibi olumsuz havalardan etkilenmez. RADAR, algılama aralığı, görüş alanı, konum ve hız ölçüm

doğruluğu gibi temel özelliklere göre seçilir [7]. RADAR 'da geniş açılı görüş alanı istenirse menzilin kısa olması ya da tam tersi dar bir görüş alanı ancak daha uzun bir menzil anlamına gelmektedir. Bir sonraki sensör düşük maliyetli ultrasonik veya sonar kısa menzilli sensör oldukları için park senaryoları ve aracın diğer arabalara çok yakın hareketler yapmasında kolaylıklar sağlamaktadır.

Tablo 1. Otonom araçlarda kullanılan çeşitli sensörlerin karşılaştırılması [9]

Sensör	Ölçü Aralığı (m)	Fiyat (\$)	Data oranı (Mbps)
Kamera	0-250	4-200	500-3500
Ultrasound	0,02-10	30-400	< 0.01
RADAR	0,2-300	30-400	0,1-15
LIDAR	250'ye kadar	1.000-75.000	20-100

RADAR ve LIDAR gibi aydınlatma ve yağış koşullarından etkilenmezler. Tablo 1.'de gösterildiği gibi sonar ölçebilecekleri maksimum menzil, görüş alanı tespiti ve maliyetlerine göre seçilir.

Aracın yerel ortamdaki göreceli konumunu bilmenin yanı sıra, kullanıcının hedefine doğru bir yol belirleyebilmek için Dünya üzerindeki küresel konumunu da bilmesi gerekmektedir [14]. Varsayılan coğrafi konum belirleme yöntemi, aracın gezegendeki yeri için genel bir referans çerçevesi sağlayan GNSS'dir. GNSS, birkaç metre kadar büyük bir hataya sahip olabileceğinden, konum bilgisi atalet sensörü ve kameranın bilgisiyle kaynaştırılarak iyileştirilebilir. Bu şekilde, konumlandırma bilgisi çok daha kesin olacaktır. [9]. IMU, uzayda hareket halindeki bir cismin üstünde oluşan 3 eksen ivme ve 3 eksen dönme kuvvetini ölçmek için iki tip sensörden oluşur. IMU sistemin ivmelenmesini, açısal hızlanmasını ve dönüklüklerini ölçerek bu verileri sistemin anlık konum verilerine dönüştürmektedir. Son olarak tekerlek

kilometre sayacı (Odometri) hareket sensörlerinden gelen bilgileri kullanarak aracın pozisyonun tahmin edilmesi işlemini gerçekleştirmektedir. Araç tekerleklerinde bulunan sensör vasıtasıyla tekerleklerin dönüş sayısı, hızı bilinerek aracın nerede olacağı tahmin edilebilmektedir.

Otonom araçlar için tüm algoritmaları ve süreçleri yürütmek, önemli hesaplamaları yapmak için güçlü işlemciler gerektirmektedir. Tam bir otonom araç, şimdiye kadar oluşturulan herhangi bir yazılım platformundan veya işletim sisteminden daha fazla kod satırı içermektedir. Bilgisayarlar ile hızlı bilgi işleme şu anda endüstri standardıdır [15]. Çoğu şirket, sensörlerine ve algoritmalarına uyan kendi bilgisayar sistemlerini tasarlamayı tercih etmektedir. Bununla birlikte, otonom sürüş için gerekli yapay zekâ destekli yazılımları çalıştıran hazır donanım seçenekleri Nvidia'nın Drive PX/AGX ve Intel & Mobileye EyeQ 'dur. Otonom sürüş için herhangi bir bilgisayar beyninin hem seri hem de paralel hesaplama

modüllerine ihtiyacı vardır. Bunlar için belirli bir hesaplama yapmak için özel donanım olan GPU, (Graphic processing unit) FPGA (field-programmable gate array) ve özel ASIC (Application Specific Integrated Circuit) kullanılmaktadır. EyeQ'larda hem görüntü işleme hem de sinir ağı çıkarımı gibi paralelleştirilebilir hesaplama görevlerini hızlandırmak için FPGA'lar vardır. Sistemin verimli çalışması için bütün bileşenlerin doğru şekilde senkronize etmek önemlidir [8]. GPS, son derece hassas zamanlama mevcut olduğunda uygun bir referans saati görevi görebilmektedir. Sensör füzyonunun doğru bir şekilde çalışması için sensör ölçümleri senkron olmalıdır.

2.6. Donanım Yapılandırma Tasarımı

Bölünmüş bir otoyolda, araçlar tek yönde gittikleri için izlenecek az şerit fakat hızlı hareket eden ve yüksek yoğunluklu trafik vardır [16]. Bir otoyol sürüşün diğer önemli noktası, eğimin ve virajın az olması fakat dikkate alınması gereken çıkışlar ve birleşmelerin çok olmasıdır. Öte yandan, kentsel durumda, daha az şeritli, orta hacimli ve orta hızlı trafik var, ancak trafik özellikle kavşaklardan her yöne hareket etmektedir [4,5]. Yapılan tüm manevralar için, uzun menzilli algılama için dar açısız görüş alanı sensörlerine ve orta ile kısa menzilli algılama için ise geniş açısız görüş alanı sensörlerine ihtiyaç vardır. Senaryolar daha karmaşık hale geldikçe, yaklaşık 50 metreye kadar kısa ölçekte tam 360 derece sensör kapsama ihtiyacına ve uzunlamasına yönde çok daha uzun menzile gerek vardır. Ayrıca, park senaryolarında yararlı olan sonar gibi daha kısa menzilli sensörler de vardır [17]. Son konfigürasyon seçimi ayrıca çalışma koşulları, arızalar nedeniyle sensör yedekliliği ve bütçeye de bağlıdır. Otonom bir otomobil için hangi sensörlere ihtiyaç duyulduğu konusunda tek bir cevap yoktur. Karayolu ve şehir içi sürüş için hem uzunlamasına hem de yanal durumlar için sensör kapsamı analizi yaparak bir donanım yapılandırmasına göre seçilmelidir.

2.7. Yazılım Mimarisi

Araçlar, çevreyi algılamak için bir dizi sensöre, giriş işleme ve aracın yolunu belirlemek için gelişmiş yazılıma, kararlar üzerinde harekete geçmek için bir dizi aktüatöre ihtiyaç duymaktadır. Ham sensör ölçümleri, otomobilin çevresindeki ortamı anlamak için Şekil 6'da gösterildiği gibi ayrılmış iki modüle aktarılır [7]. Çevre algılama modülünün iki temel sorumluluğu vardır: Otonom aracın uzaydaki mevcut yerini tanımlamak ve sürüş görevi için çevrenin önemli unsurlarını sınıflandırmak ve bulmaktır [4,5]. Bu

unsurlar diğer arabalar, bisikletler, yayalar, hayvanlar, yoldaki çukurlar, yol ve yol işaretleri, sürüş hareketini doğrudan etkileyen her şey olabilmektedir. Çevre haritalama modülü, arabalar için sürekli güncellenen ve desimetreye kadar doğru olan etraflarındaki ortamın üç boyutlu bir sunumunu karşılamaktadır. Yüksek kaliteli haritalar, ağaçların, kaldırımların veya ortamdaki diğer fiziksel nesnelere konumu da dahil olmak üzere yol yüzeyinin ve çevrenin görüntüleri gibi şeyler içermektedir [18]. Hareket planlama modülü, algılama ve haritalama modülleri tarafından sağlanan tüm bilgilere dayanarak hangi eylemlerin gerçekleştirileceği ve nereye götürüleceğine dair tüm kararları almaktadır.

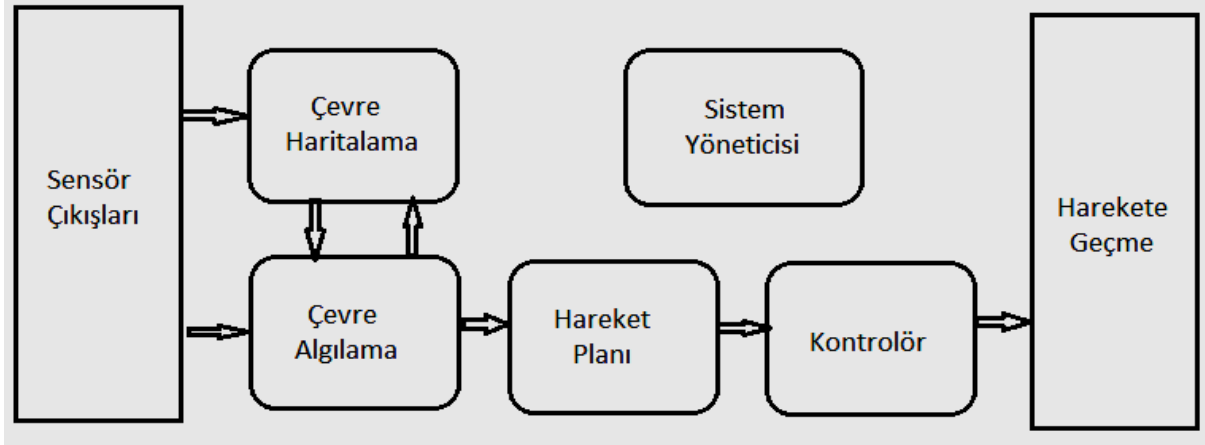
Hareket planlama modülünün ana çıktısı, aracı hedefe doğru hareket ettiren güvenli, verimli ve konforlu bir planlanmış yoldur. Kontrolör modülü aracın, planlanmış yolda ve trafik durumuna göre istenen hızda seyri gerçekleştirir.

Aracın direksiyon sistemine monte edilmiş step, servo veya hidrolik motorlar yardımı ile de aracın yönlendirilmesi gerçekleştirilmektedir. Sistem yöneticisi, bütün modüller arasındaki kontrol ve koordinasyonu sağlamaktadır. Sistem sorumlusu, sistemde bulunan herhangi bir sorun ile karşılaştığında güvenlik sürücüsüne hatayı bildirmektedir.

2.8. Çevre Haritalama

Yerleştirme haritası, araba çevrede hareket ettikçe sürekli bir dizi LIDAR noktası veya kamera görüntüsü özellikleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu harita daha sonra lokalizasyon modülü tarafından GPS, IMU ve tekerlek kilometre sayacı ile birlikte kullanılmaktadır.

Yeni LIDAR, kamera verileri alındıkça, yerleştirme haritasıyla karşılaştırılır ve yeni verilerin mevcut harita ile hizalanmasıyla araçların konumunun bir ölçümü oluşturulur [6]. Bu ölçüm daha sonra kuşbakışı tahmin etmek için diğer sensörler ile birleştirilir ve sonuçta aracı kontrol etmek için kullanılmaktadır. Doluluk ızgara haritası tüm statik veya sabit engellerin yerini gösteren bir ortam haritası oluşturmak için sürekli bir LIDAR noktası seti kullanılmaktadır. Bu harita, otonom araç için güvenli, kazasız yollar planlamak için kullanılmaktadır [7]. Ayrıntılı yol haritası hedefe rota planlamak için tüm düzenleyici unsurlar, düzenleyici özellikler ve şerit işaretleri için ayrıntılı pozisyonlar içermektedir.



Şekil 6. Yazılım mimarisi [7]

2.9. Otonom Araçlar için Güvenlik Güvencesi

2018 başlarında yaya ölümüne yol açan Uber, güvenlik sürücülerini otonom yazılımını izleyerek kapsamlı bir test programına sahipti. Olay gece geniş, çok şeritli bölünmüş yolda meydana geldi ve burada bir yaya bisikletini işaretlenmemiş bir alanda yol boyunca yürümekteydi. Ön soruşturma, olaya yol açan birden fazla eksiklik olduğunu ortaya koydu. Birincisi, güvenlik sürücüsünde gerçek zamanlı kontroller yoktu. Bu durumda, güvenlik şoförü dikkatsizdi ve o sırada kazazedeyi izlediği iddia edildi. Güvenlik şoförü herhangi bir şey yapıyor olabilirdi ve Uber'in sürücülerinin dikkatini değerlendirmek için araçta bir kontrol yoktu. İkincisi, yazılım algılama sisteminde önemli bir karışıklık vardı. Son altı saniyede ilk tespitin ardından, mağdur önce bilinmeyen bir nesne olarak sınıflandırıldı, daha sonra bir araç olarak yanlış sınıflandırıldı ve daha sonra bir bisiklet olarak yanlış sınıflandırıldı [4,5]. Sonunda, otonom yazılımı tarafından alınan karar, muhtemelen çok güvenilmez oldukları için tespitleri görmezden geldi [9]. Algı sınıflandırmaları aracı böyle bir nesneyi tamamen görmezden gelmemelidir. Son olarak, çarpışmadan 1,3 saniye önce, Volvo acil fren sistemi yayayı tespit etti ve darbe hızını azaltmak için potansiyel olarak kazazedenin hayatını kurtarmak için frenleri hızla uygulardı. Bununla birlikte, test sırasında aynı anda birden fazla çarpışma önleme sisteminin çalışması güvenli değildir, bu nedenle Uber, otonom moddayken Volvo sistemini devre dışı bırakmıştı [6]. Sonuçta, otonom araç yaya yoluna tepki vermedi ve dikkatsiz sürücü çarpışmayı önlemek için yeterince hızlı tepki veremedi. Güvenlik konusunda titiz ve kapsamlı yaklaşımlara ihtiyacı olduğu açıktır ve hem endüstri hem de düzenleyiciler güvenlik sorunuyla başa çıkmak zorundadırlar.

Otonom araç tehlikesi mekanik olabilir, örneğin erken arızaya neden olan bir fren sisteminin yanlış montajı olabilir. Elektriksel tehlikeler hatalı iç kablolar gösterge aydınlatmasının kaybına yol açmaktadır. Otonom yazılımından kaynaklanan hatalar otonom sürüş için kullanılan donanım yongalarının hesaplamalarında yanlışlıklara neden olabilmektedir.

Bu hatalara kötü, gürültülü sensör verileri veya yanlış algılama neden olabilmektedir. Yanlış planlama veya karar verme nedeniyle de tehlikeler ortaya çıkabilir, belirli bir senaryo için yanlışlıkla tehlikeli eylemleri seçme neden olabilmektedir [7]. İnsan sürücüsüne geri dönüşün, sürücüye sorumluluğu sürdürmesi için yeterli uyarı vermemesi veya belki de otonom bir aracın kötü niyetli bir varlık tarafından saldırıya uğraması nedeniyle başarısız olması da mümkündür [3].

Mekanik, elektrik, bilgi işlem donanımı, yazılım, algılama, planlama, sürüş görevi geri dönüşü ve siber güvenlik Şekil 7'de gösterilen düzenli olarak dikkate alınan ana tehlike kategorileridir. Bu tehlikelerin her biri, genel sistem güvenliğini değerlendirirken farklı yaklaşımlar gerektirmektedir. ABD'de, Ulusal Karayolu Taşımacılığı Güvenlik İdaresi veya NHTSA, (National Highway Traffic Safety Administration) otonom sürüş için güvenlik değerlendirmesini yapılandırmak için on iki parçalı bir güvenlik çerçevesi tanımlamıştır. Bu çerçeve sadece bir başlangıç noktasıdır. Sektörde halihazırda birden fazla mevcut yöntem ve standardı birleştiren farklı yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Bu çerçeve, 2017 yılında takip edilmesi zorunlu olmayan bir çerçeve olarak önerilmişti [10]. Çerçevenin kendisi, herhangi bir otonom sürüş şirketinin odaklanması gereken veya daha çok odaklanmaya teşvik edilen on iki alan veya unsurdan oluşmaktadır.



Şekil 7. Başlıca tehlike kaynakları [10]

İlk olarak, gerçekten tüm çerçeve belgesine nüfuz eden güvenliğe yönelik bir sistem tasarımı yaklaşımı benimsenmelidir. İyi planlanmış ve kontrollü yazılım geliştirme süreçleri esastır ve ilgili yerlerde otomotiv, havacılık ve diğer ilgili endüstrilerden mevcut SAE (Society of Automotive Engineers) ve ISO (The International Organization for Standardization) standartları uygulanmalıdır [4,5]. Otonom yazılım yığımına belirli bileşenlerin dahil edilmesini ve dikkate alınmasını gerektiren otonom tasarımı ve otonom işlevlerinin test edilmesine yönelik yaklaşımları ve arızaların olumsuz etkilerini azaltmanın yollarını kapsayan test ve çarpışma azaltma, onlardan öğrenme sıralanabilir. NHTSA, iyi tanımlanmış bir işlemsel tasarım alanını teşvik ederek tasarımcılar bunun kusurları ve sistemin sınırlamalarından haberdar olmakta ve test veya dağıtımdan önce hangi senaryoların desteklendiğini ve güvenli olduğunu değerlendirebilmektedirler. Daha sonra, algı ve çarpışmadan kaçınma için kritik olan iyi test edilmiş bir nesne ve olay algılama ve yanıt sistemini teşvik etmektedir. Ardından, sürücünün uyarıldığı veya otomobilin güvenli bir şekilde güvenli hale getirildiği güvenilir ve kullanışlı bir geri dönüş mekanizmasına sahip olmasını teşvik etmektedir. Sürücünün dikkatsiz olabileceğini akılda tutarak bu mekanizmayı geliştirmek şarttır [3]. Yani, bazı düşünceler, bu durumda sistemin asgari risk durumuna nasıl getirileceğine bakmalıdır. Sürüş sistemi ayrıca tüm trafik yasalarına uygun ve bunlara uyulacak şekilde tasarlanmalıdır [7]. Daha sonra, çerçeve tasarımcıları siber güvenlik tehditleri ve sürüş sistemini kötü niyetli ajanlardan nasıl koruyacaklarını düşünmeye tavsiye etmektedir. Son olarak, insan makine ara yüzünün işlevsel ve anlaşılır olmalıdır. Çünkü, araç, makinenin durumunu herhangi bir zamanda yolculara veya sürücüye iyi bir şekilde aktarabilmelidir. Görüntülenebilecek durum bilgilerinin önemli örnekleri, tüm sensörlerin çalışır durumda olup olmadığı, mevcut hareket planlarının ne olduğu, ortamdaki nesnelerin sürüş davranışını nasıl etkilediği gibi bilgiler verilmelidir. Her şeyden önce NHTSA, halk için herhangi bir hizmet başlatılmadan önce güçlü ve kapsamlı bir test programı önermektedir. Bu test üç ortak sütuna dayanabilir; simülasyon, yakın parkur testi ve halka açık yol sürüşü. Daha sonra, bir çarpışma olayı sırasında meydana gelen yaralanma veya hasar miktarını azaltmak için yöntemleri dikkatle değerlendirmek gerekmektedir. Çarpışmalar, kaza enerjisini en aza indirebilecek ve sınırlamalar, hava yastıkları ve çarpışma şiddetine göre yolcu güvenliği standartlarını aşabilecek kamuya açık yol sürüşü ve otonomi sistemlerinin bir gerçeği olmaya devam etmektedir. Ardından, kilitlenme sonrası durum için destek olmalıdır. Otomobil, hızlı bir şekilde, güvenli bir duruma geri döndürülmelidir. Ayrıca, otomatik bir veri kayıt fonksiyonu veya kara kutu kaydedici olmalıdır. Gelecekte belirli bir çarpışmadan kaçınabilecek sistemleri analiz etmek, tasarlamak ve olay sırasında neyin yanlış gittiğini, kimin hata yaptığını sormak için

bu çökme verisine sahip olmak çok yararlıdır [11]. Son olarak konuşlandırılmış otonom sistemin yeteneklerini ve sınırlarını daha iyi anlamaları için iyi tanımlanmış tüketici eğitimi ve öğretimi olmalıdır. Bu son adım, otomasyondaki doğal aşırı güveni sağlamak için gereklidir, erken benimseyenler tarafından gereksiz tehlikelere yol açmaz [10]. Bu şartlar zorunlu değil ama herhangi bir şirketin üzerinde çalışması gereken önerilen alanlardır. NHTSA'nın temel amacı, inovasyonu aşırı derecede kısıtlamadan, otonom giden otomobiller üreten şirketlere rehberlik etmektir. Pazara giriş ortaya çıkmaya başladığında, güvenlik değerlendirmesi için daha kesin gereksinimlerin de ortaya çıkması muhtemeldir.

2.10. Güvenlik ve Testi için Endüstriyel Yöntemler

Google çatısı altında sürücüsüz araç teknolojileri geliştiren Waymo şirketi, sistemlerini ilk olarak davranış düzeyinde güvenli sürüş sağlamak için tasarlamıştı. Bu, trafik kurallarına uyan, içinde çok çeşitli senaryoları ele alabilen ve araç güvenliğini onunla koruyabilen kararları içermektedir [20]. İkincisi, Waymo sistemlerin yedekli olmasını sağlamaktadır. Bu, bir kaza veya arıza meydana gelse bile araç, arızaların ciddiyetini en aza indirmek ve aracı güvenli bir duruma döndürerek mümkünse sürücüyü devam ettirmek için ikincil bir bileşene veya yedekleme işlemine geçebilmektedir. Daha sonra Waymo, NHTSA tarafından önerilen bir çarpışma durumunda araç içindeki insanlara en az zararı veren sistemleri tasarlamaktadır. Sistem güvenliğini koruyacak şekilde yolcuların araç üzerinde belirli bir düzeyde kontrole sahip olmasına izin vermektedir. Bu, sistemle bir şekilde etkileşime girebilecek sistem tasarımlarını, ilk müdahale ekiplerini, mekaniği, donanım mühendislerini için problemi en aza indirmektedir [3]. Bu esas, Waymo'nun tasarım sistemi tarafından güvenliği oluşturur ve sistemin hedeflerinin her bileşen tarafından karşılandığından emin olmak için kapsamlı bir gereksinim tanımı, tasarım yinelemesi ve test sistemine yol açmaktadır. Başlangıçta, Waymo ekibi mümkün olduğunca çok sayıda tehlike senaryosu tanımlamakta ve her biri için olası azaltma stratejilerini, yani bir tehlike oluştuğunda aracın hala güvenli bir duruma ulaşmasını garanti etmektedir. Daha sonra, daha spesifik güvenlik gereksinimlerini tanımlamak için bir tehlike değerlendirme yöntemi kullanmaktadır. Kullandıkları çeşitli yöntemler olası güvenlik riskinin ön analizi, dinamik sürüş görevi açısından yukarıdan aşağıya doğru çalışan bir arıza ağacı tehlike değerlendirmesi ve aşağıdan yukarıya doğru etkiyi değerlendiren bazı tasarım arıza modları ve efekt analizleridir. En sonunda, gereksinimlerin karşılandığından emin olmak için çok sayıda test gerçekleştirmektedir. İlk olarak, simülasyondaki tüm yazılım değişikliklerini günde 17 milyon km simülasyon seviyesinde test edilmiştir [11]. Bu, sistemin güvenlik gereksinimlerinde beklenen gelişmeleri onaylamak için sürekli çalışan muazzam bir bilgi işlem çabasını temsil etmektedir [4,5]. Bunu

yapmak için, zorlu senaryolar için tüm yol deneyimlerini benimser ve diğer araçların ve yayaların konum ve hız parametrelerini rastgele değiştiren sistematik senaryo bulanıklığı yapar, böylece aracın güvenli bir şekilde davranıp davranmadığını test edilir. Daha sonra yazılımlarını özel yollarda test ettikleri kapalı saha testi yapmaktadır [21]. UC Berkeley çalışması tarafından tanımlanan 28 temel senaryo ve Waymo'nun eklediği 19 ilave senaryolar, arka, kavşak, yoldan ayrılma ve şerit değiştirme gibi en yaygın dört kaza tipinden kaçınmak üzere düzenlenmiştir. Bu kategorilerin her birinin birçok çeşidi vardır, ancak birlikte tüm kazaların yüzde 84'ünden fazlasını oluşturmaktadır. Son olarak, ana Google kampüsünün hemen yakınındaki Mountain View California da dahil olmak üzere ABD'deki birçok farklı şehrin sokaklarında düzenli olarak görülen gerçek dünya testleri yapılmıştır [4,5]. Bu test, sıra dışı olan ve öncelikle test sırasında insanların otonom yazılımını izlemesini sağlayan dinamik sürüş görevi geri dönüş stratejisine dayanan daha fazla vakayı belirlemelerine olanak tanımaktadır.

III. OTONOM ARAÇLARIN YAYGINLAŞMASININ ÖNÜNDEKİ ZORLUKLAR

Otonom otomobillerin yakın gelecekte eşi benzeri görülmemiş bir ekonomik, sosyal ve çevresel bir değişime yol açacağı düşünülmektedir. Ancak otonom araçların yaygınlaşmasının önünde bazı zorluklar vardır. Bunlar; teknik yetersizlikler, yüksek geliştirme maliyetleri, satın alma ve işletme maliyetleri, trafik güvenliği ve emniyeti, altyapı yetersizliği, ulaşım fiyatlandırması, durak ve park planlaması ile yolculuk beklentilerinde değişimdir.

3.1. Teknik Yetersizlikler

Otonom aracın, tüm yol, hava ve trafik koşullarında tüm sürüş senaryolarına uyarlanabilmesi için tasarlanması en büyük teknik zorluktur. Belki de tamamen otonom bir sürüş deneyimi sağlamada kamera teknolojisinin temel kısıtlarından biri, insan beyninin görülmeyen şey hakkında bir belirleme yapması yerine kameraların sinir ağlarından karmaşık tahminlere dayanmasıdır. Bu, araç içi bilgisayar sistemiyle doğal

olarak sınırlı iki faktör olan önemli miktarda eğitim ve işleme gücü gerektirmektedir. 24 GHz RADAR sensörleri sadece sınırlı bir çözünürlük sunabilmektedir. Otomobilin dünyayı görmesini sağlarlar, ancak gerçekte boyanmış resim biraz bulanıktır ve çok sayıda spesifik tehlikeyi tanımlamak ve bunlara tepki vermek sorunlara yol açmaktadır.

LIDAR teknolojisi başlangıç olarak, saniyede bir milyon ölçüm yapabilmektedir. Bu ölçümleri eyleme dönüştürülebilir veri setleri haline getirmek büyük miktarda işlem gücü gerektirmektedir. LIDAR karmaşıktır ve çoğu hareketli parçalardan dolayı hasarlanmalara karşı daha savunmasız haldedir. Mevcut kablosuz teknoloji hala bazı teknik engeller sunarken, bu sistemlerin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak zor olabilir. Daha önce belirtildiği gibi 5G teknolojisinin iletişimdeki gecikme ve güvenilirlik gibi birçok önemli zorluğun üstesinden gelmesi beklenmektedir. Tablo 2'te gösterildiği gibi otonom araçta bulunan sensörlerin bazı sınırları aşağıda sıralanmıştır:

- Aşırı hava koşulları (şiddetli yağmur, kar veya sis): Kameraların, LIDAR'ın maksimum menziline ve sinyal kalitesini azaltır (görme keskinliği, kontrast, aşırı görme karmaşası). Otonom görme sistemleri kısa menzil iletişim aktarımlarını az da olsa etkilemektedir.
- Araçta aşırı kir veya fiziksel engeller (kar veya buz gibi): Kameralar, LIDAR, RADAR için maksimum aralık ve sinyal kalitesi (keskinlik, kontrast, görüş alanının fiziksel tıkanması) azalmaktadır.
- Karanlık veya düşük aydınlatma: Kamera sistemlerinin maksimum menzilin azalması veya karışması, sinyal kalitesini (keskinliği, kontrast, harici ışık kaynaklarından olası parlama) azaltmaktadır.
- Büyük fiziksel engeller (binalar, arazi, sık bitki örtüsü, vb.): Kameralar, RADAR, LIDAR için görüş hattını, küçük engeller ise iletişim için maksimum sinyal aralığını azaltabilir.
- Yoğun trafik: Kameralar, RADAR, LIDAR için görüş hattına müdahale eder veya azaltır. Aşırı miktarda sinyal/ mesaj nedeniyle iletişime de müdahale edebilmektedir.

Tablo 2. Her sensörün otonom araçlar için geçerli olduğu temel çalışma özelliklerinin özeti [11]

Performans ölçütü	İnsan	Otonom Araçlar		
		RADAR	LIDAR	Kamera
Nesne algılama	İyi	İyi	İyi	Orta
Nesne sınıflandırması	İyi	Kötü	Orta	İyi
Mesafe tahmini	Orta	İyi	İyi	Orta
Kenar algılama	İyi	Kötü	İyi	İyi
Şerit takibi	İyi	Kötü	Kötü	İyi
Görüş alanı	İyi	İyi	Orta	Orta
Kötü hava performansı	Orta	İyi	Orta	Kötü
Karanlık veya düşük aydınlatma performansı	Kötü	İyi	İyi	Orta
Trafikteki diğerleri ile iletişim kurabilme ve altyapı	Kötü	Yok	Yok	Yok

3.2. Yüksek Geliştirme Maliyetleri

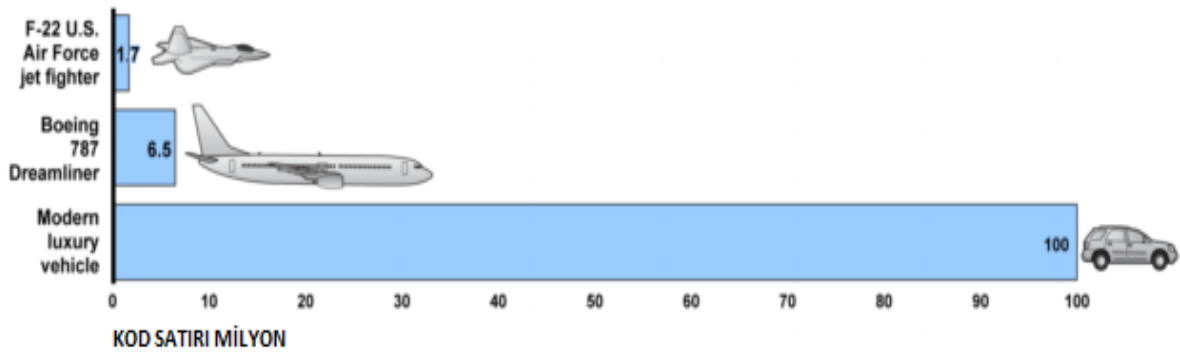
Satışa sunulan araçlarda seyir kontrolü, tehlike uyarısı ve otomatik paralel park etme gibi Seviye 2 ve 3 teknolojileri bulunmaktadır. Tesla'nın Autopilot'u 2016 yılında ölümcül bir çarpmaya neden olduktan sonra ertelenmesine rağmen, sınırlı koşullarda otomatik direksiyon ve hızlanma sunmaktadır [17]. Mevcut en gelişmiş otonom araç Waymo seviye 4 geliştirme ve test aşamasındadır. Birçok şirket, belirli koşullarda otonom araçları test eden Seviye 4 pilot projelere sahiptir [25]. Ancak bu ilerlemeye rağmen, araçların tüm normal koşullar altında otonom olarak çalışabilmesi için birçok teknik iyileştirmeye ihtiyaç vardır [26].

Her ne kadar mevcut teknolojiler araçların otoyollarda bağımsız olarak çalışmasına izin verse de, iyi havalarda %95 çalışabilirlik sağlamak zor olacaktır. %99,9 kullanılabilirlik elde etmek (özellikle yıl boyunca nadir gidilen yerler) çok daha zor olacaktır [28]. Bir aracı yollarda kullanmak, araçlar, yayalar, bisikletliler, hayvanlar, trafik işaretleri, yol çizgileri ve çukurlar da dahil olmak üzere diğer nesnelere tespiti ve olayını algılamak zordur. Bu zorluk nedeniyle, Şekil 8'de gösterildiği gibi otonom araçlar uçaktan en az 4 kat fazla kod satırına sahip olacaktır. Böyle bir yazılım üretmek, test etmek, onayını almak zaman alıcı, zor ve maliyetlidir. Başarı oranını arttırmak için sürekli yeni

bilgilere ihtiyaç duymaktadır. Otonom araç pazarının gelişmesi teknolojik ilerlemeye ve arz talep ilişkisine bağlıdır. Anketlerde ortaya çıkan önemli tüketici endişelerinin giderilmesi gerekmektedir [27]. Araçlarının istenen tüm noktalara ulaşamaması halinde yolcular erişim endişesiyle karşılaşacaklardır [3].

3.3. Satın Alma ve İşletme Maliyetleri

Otonom araçlar Tablo 3'te özetlenmiş çeşitli ekipman ve hizmetler gerektirmektedir. Şu anda, Seviye 2 ve Seviye 3 için gerekli özellikler genellikle birkaç bin dolara mal olmaktadır. Navigasyon ve güvenlik hizmetlerine yıllık abone ücretleri 150-750 dolar gibi ek masraf gerektirmektedir. Otonom araçlarda bir arıza oluşması ciddi sonuçlara neden olacağından otonom araçların uzmanlar tarafından kurulan sağlam ve yedekli elemanlara ihtiyaç olacaktır. Mevcut gelişmiş sürücü destek sistemi sensörleri (kameralar, RADAR ve ultrason) hassas oldukları için yaklaşık çarpışma hasarı iki kat maliyeti getirmektedir. Bu tür ufak hasarlar bile en az 3.000\$ masraf gerektirdiği için otonom araçların araç onarım maliyetlerini artıracaklarını göstermektedir. Yeni çıkan her teknoloji gibi otonom araçlar çok yüksek fiyatlı olacaktır. Belki düşük fiyatlı modellerde standart hale gelmesi yıllar sonra olacaktır [22]. Otonom araçlar diğer araçlardan birkaç bin dolar ve yıllık servis, bakım ve onarım maliyetlerinde de yüzlerce dolar daha fazla pahalı olacaktır.



Şekil 8. Uçak ve otomobil yazılım kodları karşılaştırması [3]

Tablo 3. Otonom araç ekipmanları ve servis gereksinimleri

Tüm Otonom Araçlar için	Toplu Taşıma Otonom Araçları için
<ul style="list-style-type: none"> *İnsan-Makine etkileşimi (HMI) *Sensörler (optik, kızılötesi, RADAR, lazer vb.). *Otomatik kontrol (direksiyon, fren, sinyal) *Yazılım, sunucular ve güç kaynakları. *Kısa menzilli araç-araç iletişimi ağlar, ayrıca haritalar, güncellemeler ve yol raporları. *Navigasyon GPS sistemleri ve özel haritalar. *Kritik eleman bakımı, onarımı ve testi. 	<ul style="list-style-type: none"> *Sevkiyat ve filo yönetimi. *İşletme ve sigorta. *İşletme giderleri. *Güvenlik. *Sık temizlik ve onarımlar. *Yolcu yüklemesi için gecikmeler ve boş araç km.

3.4. Trafik Güvenliği ve Emniyeti

İyimserler, insan hatası kazaların %90'ına sebep olduğundan, otonom araçların kaza oranlarını ve sigorta maliyetlerini %90 oranında azaltacağı iddialarına karşın yeni riskler göz ardı edilmektedir:

- Risk almanın artışı: Yolcular kendilerini daha güvende hissettiklerinde daha fazla risk alma eğilimindedirler. Örneğin, otonom araç yolcuları emniyet kemeri kullanımını azaltabilir ve diğer yol kullanıcıları aşırı güvenli teknoloji olarak tanımlayarak daha az ihtiyatlı olabilirler [11].
- Artan toplam araç seyahati: Konforu artırarak otonom araçlar toplam araç seyahatini ve dolayısıyla çarpışma riskini artırabilir [4,5].
- Geleneksel güvenlik stratejilerine daha az yatırım, gelecekteki sürücü güvenliği teknolojisinin de gelişmesine engel olabilir [7].

Bu yeni riskler otonom araçların çalışmasına engel olursa, tahmin edilen %90'lık kaza azaltma oranına ulaşamayacaktır. Sivak ve Schoettle, en gelişmiş otonom araçlar ile normal bir sürücünün çarpışma oranlarının aynı olacağı ve otonom ve insan güdümlü araçlar karıştığında toplam kazaların artabileceğini iddia etmektedir [27]. Groves ve Kalra, sadece kaza oranlarını %10 azaltsalar bile otonom operasyonun toplam araç yolculuğunu artırması durumunda toplam kazaların artacağını

söylemektedirler. Otonom araçlar dışarıdan gelecek saldırılara karşı korumalı değildir. Bir deneyde, araştırmacılar yol kenarındaki trafik işaretlerinde küçük bir oynamanın yazılımın yanlış okumasına neden olduğunu gösterdi. Bilgisayar korsanları ve yazılım tasarımcıları arasında otonom araçların kontrolü üzerinde maliyet ve risk artıracak bir silahlanma yarışı olacaktır.

3.5. Altyapı Yetersizliği

Otonom araçların sürüşü için gerekli yol işaretleri, tünel gibi yerlerde iletişimin kesilmemesi için transponderler gibi ek altyapılara ihtiyaç duyabilirler [7]. Otonom sürüş, daha dar trafik şeritlerine izin verebilir, ancak kamyon ve otobüsleri gidebilmesi için bu şeritler uygun değildir. Şekil 9'de gösterildiği gibi otonom araçlarla birlikte tüm araç trafiğinin otonom olduğu bölgelerde trafik ışıklarına olan ihtiyaç ortadan kalkabilir [19].

3.6. Ulaşım Fiyatlandırması

Otonom araçlar, yatay mimari teşvik ederek ve boş araç seyahatini artırarak araç hareketini ve trafik sorunlarını, %10-30 oranında artabildiği gibi tam tersi seyahat süresini ve araç işletme maliyetlerini azaltarak trafik sorunlarını %10-30 oranında azaltabilir [29]. Şu anda hiçbir yol kullanım ücreti ödemeyen otonom araçların sayısının artmasıyla bu ücretler alınacaktır [26].



Şekil 9. Otonom araç planlama ihtiyaç zaman çizelgesi [9]

3.7. Durak ve Park Planlaması

Toplu taşımayı kolaylaştırmak için, şehirlerin uygun yolcu yükleme ve boşaltmalarını sağlayacak durakların yapılması gerekmektedir [18,20]. Bu durakların iş yapılabilmesi için caddelerde olması ve yakınında genellikle uygun boş bir alan bulunması gerekmektedir. Elektrikli otonom araçlar için enerji ihtiyaçlarını karşılayabilecekleri şarj istasyonları ve araç temizleme ve bakım hizmetleri içeren özel alanlara ihtiyaç duyacaktır [30]. Özel araçtan toplu taşımaya geçiş, toplam araç sayısını ve park ihtiyaçlarını azaltabilir ve özel araç sahipleri, araçlarını yolcuları bıraktıktan sonra eve dönecek şekilde programlayabilir ancak bu, trafik sorunlarını artıracak ve yolcuların ne zaman geleceği konusunda gecikmeler belirsizlik katacaktır.

Çoğu yolcu park yerinin yakın olmasını isteyecektir, bu da durak noktalarından bir veya iki kilometre içinde park yeri gerektirecektir. Bu, daha fazla park alanı sunarak kentsel park taleplerini azaltır, ancak ortadan kaldırmaz.

3.8. Yolculuk Beklentilerinde Değişim

Otonom araç seyahatinin etkilerini üzerine yapılan bir ankette, birçok kişinin otonom araçların seyahatlerini önemli ölçüde etkilemesini beklememesine rağmen değişiklik öngörüsünün düşüştürme ziyade seyahatleri arttıracığı yönündedir [15]. Fleming ve Schoettle, sürücülerin toplu taşıma yerine özel araç kullanmasının trafikteki araç sayısına %11 ekleme yapacağını tahmin etmektedir [16].

Trommer, otonom araçların 2035 yılına kadar toplam araç seyahatini %3-9 oranında artıracığını tahmin etmektedir [4]. Taiebat, Stolper ve Xu, otonom araçların sadece zengin ailelerde özel araç seyahatini %2-47 oranında artıracığını tahmin etmektedir [23]. Mevcut kurallarla, otonom araçların da trafığe çıkmasıyla trafik sıkışıklığı, karayolu altyapı maliyetleri, kaza olayları ve kirlilik emisyonları sonucunda trafikte geçen süreyi en az %10-30 artıracığını göstermektedir. [21]. Geleneksel fosil yakıtlı otomobil sahipleri genellikle yaklaşık 16.000 km yol alıyorlar ve elektrikli otomobil sahiplerinin düşük yakıt maliyetleri nedeniyle biraz daha fazla araba kullanmaları muhtemeldir [22]. Elektrikli otonom araç sahipleri, düşük fiyatlı elektrik yakıtından dolayı daha çok otomobil seyahati yapmak isteyeceklerdir. Miller ve Kang göre kamu politikaları değiştirilerek toplu taşıma otonom araçların uygun fiyatlı ve yolların özel şeritli olması trafikteki araç sayısı azaltacaktır [24].

Bireysel seyahati azaltma teşvikleri uygulanmadığı sürece, toplam araç seyahati ve trafik sorunları artabilir. Yolda kalma süresi artarsa, kazalar ve kirlilik emisyonları artabilir. Toplu taşıma araçların gerekli ihtiyaçlarının giderilmesi için park istasyonlarına ve yolcu indirme ve bindirme için duraklara ihtiyacı olacaktır [20,30]. Takım halinde sürüş için bazı faydalar maliyetlidir ve yalnızca otoyollarda mümkün olan özel şeritler gerektirmektedir.

İşgücü toplu taşıma maliyetlerinin çoğunu temsil ettiğinden, özerk teknolojiler transit hizmet sağlama maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Belirli bir bütçeyle, toplu taşıma firmaları daha küçük araçlar ve yolcuları hedeflerine daha yakın teslim eden yollar kullanarak daha çok hizmet verebilirler.

Daha ucuz taksi hizmetleri, kapıdan kapıya veya otobüs duraklarına ve tren istasyonlarına uygun hareketlilik sağlayabilir. Bu özellikle, toplu taşımanın yaygın olmadığı kırsal alanlarda etkili olmalıdır. Gelir, maliyet verimliliği ve politik desteği azaltarak geleneksel hizmet talebini azaltabilir ve servis kalitesinin düşmesine neden olabilirler. Toplu taşıma araçlarından otonom araçlara geçişlerin trafik sıkışıklığını, kazaları ve kirlilik emisyonlarını artıracığı düşünülmektedir.

IV. SONUÇLAR

Endüstri devriminin yaşantımıza kattığı otomobillerin neden olduğu çevresel etkiler, trafik kazalarının yol açtığı can ve mal kayıplarını azaltma çabaları konfor beklentisinin eklenmesiyle otonom araçları kaçınılmaz kılmaktadır. Birçok insanın kısa sürede uygulamaya girmesini umduğu bu teknolojinin yaygın hale gelmesinin önünde halen teknik yetersizlikler, yüksek geliştirme maliyetleri, satın alma ve işletme maliyetleri, trafik güvenliği ve emniyeti, altyapı yetersizliği, ulaşım fiyatlandırması, durak ve park planlaması, yolculuk beklentilerinde değişim gibi üstesinden gelinmesi gereken ciddi zorluklar mevcuttur.

Aşağıdaki verilenler etkin stratejiler, otonom araç avantajlarını en üst düzeye çıkarmaya ve sosyal maliyetlerini en aza indirmeye yardımcı olabilir.

- Ulaştırma sistemi verimliliği ve eşitlik gibi sosyal hedefleri vurgulama.
- Güvenlik ve verimlilik için yeni teknolojileri test etme ve düzenlemenin teşvik edilmesi.
- Araç test ve kazaları gibi önemli verilerin sorumlu bir şekilde toplanmasını, saklanmasını ve paylaşılmasını sağlama.
- Otonom araçların etik ve topluluk hedeflerine göre programlanmasını zorunlu kılma.
- Trafikte etkin fiyatlandırma ve araç önceliği gibi araç trafiğini en uygun seviyelere getirmek için politikalar uygulama.
- Toplu taşıma otonom hizmetlerin uygun fiyatlı olmasını sağlamak ve özel ihtiyaçları olan insanlara yardım etmek.
- Toplu taşıma istasyonlarını çok modlu ulaşım sistemlerine entegre etme.
- Sokakları yeniden tasarlamak ve kentsel yaşana bilirliliği artırmak için araç trafiğini azaltma.
- Toplu taşıma araçlardan yararlanmak için otopark ihtiyacını ve halka açık otoparkı azaltma.
- Kentsel yoğunlukları ve yeşil alanı artırmak için park etme gereksinimlerini azaltma.

KAYNAKLAR

- [1] Smith, W., (2012), Automated Vehicles are Probably Legal in the United States, Center for Internet and Society, Stanford, CA.
- [2] Bhise, V. D. (2012). Ergonomics in the automotive design process, Boca Raton. FL: Taylor&Francis Group, LLC.
- [3] Grush, B. (2016), Driverless Cars Ahead: Ontario Must Prepare for Vehicle Automation. Residential and Civil Construction Alliance of Ontario (RCCAO).
- [4] Trommer S., Autonomous Driving: The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour, Institute of Transport Research www.ifmo.de, (2016).
- [5] WSJ ,Why Your Next Car May Look Like a Living Room, Wall Street Journal, www.wsj.com, (2017).
- [6] AAA (annual reports), Your Driving Costs, American Automobile Association <https://publicaffairsresources.aaa.biz>
- [7] Lawson, S., (2018), Tackling the Transition to Automated Vehicles, Roads that Cars Can Read Report III, European Road Assessment Association
- [8] Montemerlo, M. (2008), Junior: the Stanford entry in the urban challenge. J. Field Robot. 25,569-597.
- [9] Bacha, A. (2008). Odin: Team VictorTango's entry in the DARPA Urban Challenge. J. Field Robot. 25, 467-492.
- [10] Frehse, G. (2008), PHAVer: algorithmic verification of hybrid systems past HyTech. Int. J. Softw. Tools Technol. Transfer 10, 263-279.

- [11] Ackerman, E., (2017). Toyota's Gill Pratt on Self-Driving Cars and the Reality of Full Autonomy. Spectrum, International Institute of Electrical Engineers www.ieee.org
- [12] CPUC (2020), Autonomous Vehicle Pilot Permits Issued, California Public Utilities Commission (www.cpuc.ca.gov/avciissued)
- [13] Dickey, S. (2008). Development of hardware in the loop simulation and paramics/VS-PLUS integration. Technical report UCB-ITS-PRR-2008-29, California PATH research report
- [14] Eykholt, K. Robust Physical-World Attacks on Deep Learning Models. Cryptography and Security, <https://arxiv.org/abs/1707.08945>, (2018).
- [15] Fleming, K., Singer, M. Energy Implications of Current Travel and the Adoption of Automated Vehicles, National Renewable Energy Laboratory; at www.nrel.gov/docs/fy19osti/72675.pdf, (2019).
- [16] Groves, D., Kalra, N. Enemy of Good: Autonomous Vehicle Safety Scenario Explorer, Rand Corporation at www.rand.org/pubs/tools/TL279.html. (2017).
- [17] Hyatt, K. Toyota had the Most Autonomous Vehicle Disengagements, Road Show at www.cnet.com/roadshow/news/2019-california-self-driving-disengagement-report-baidu-waymo-cruise. (2020).
- [18] Knight, W., Snow and Ice Pose a Vexing Obstacle for Self-Driving Cars. Wired Magazine, at www.wired.com/story/snow-ice-pose-vexing-obstacle-self-driving-cars. (2020).
- [19] Litman, T., (2020), Autonomous Vehicle Implementation Predictions Implications for Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute, 24 March 2020
- [20] Marsden, G., Iain Docherty, I., Robyn Dowling, R., (2020), Parking Futures: Curbside Management in the Era of New Mobility' Services, Land Use Policy, Vol. 91
- [21] Millard-Ball, A., (2016), Pedestrians, Autonomous Vehicles, and Cities, Journal of Planning Education and Research, pp. 1-7
- [22] M Ktrakazas C, Quddus M, Chen WH, Deka L. Real-time motion planning methods for autonomous road driving: Most advanced and future research directions. Transp Res Bölüm C: Emerg Technol. 2015; 60: 416-442.
- [23] Morteza Taiebat, M., Stolper S., Xu M., (2019), Forecasting the Impact of Connected and Automated Vehicles on Energy Use: A Microeconomic Study of Induced Travel and Energy Rebound, Applied Energy, Vol. 247, pp 297-308
- [24] Papa, E., ve Ferreira A. (2018), Sustainable Accessibility and the Implementation of Automated Vehicles: Identifying Critical Decisions. Urban Science, Vol. 2, No. 1.
- [25] Naik G, Choudhury B, Park JM. IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Development of Radio Access Technologies for V2X Communication. IEEE Erişimi. 2019. s. 70169-70184.
- [26] Autonomous Vehicles, University Of Toronto <https://www.coursera.org/specializations/self-driving-cars>, (2020)
- [27] Schoettle, B., Sivak, M. (2014), A Survey Of Public Opinion About Autonomous And SelfDriving Vehicles In The U.S., The U.K., And Australia, Report UMTRI-2014-21, Transportation Research Institute, University of Michigan
- [28] Owsley, C. ve McGwin, G., Jr. (2010), Vision and driving. Vision Research, 50(23), 2348-2361
- [29] Urmson, C. (2008), Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge. J.Field Robot. 25, 425-466.
- [30] Zhang, W., Kaidi Wang, K. (2020), Parking Futures: Shared Automated Vehicles and Parking Demand Reduction Trajectories in Atlanta, Land Use Policy, Vo. 91

OD/GA Sistemlerinde D/GA Makinesi Bekleme Noktasının Simülasyon ile Analizi: Rassal Depo İçi Atama Politikası Durumu

Analysis of S/R Machine Dwell Points in AS/RS using Simulation: Random Storage Assignment Policy Case

Sema DEĞİRMEN-BEKTAŞ¹ , Fatih ÇAVDUR¹ 

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Bursa, Türkiye

Öz

Otomatik Depolama ve Geri-Alma (OD/GA) sistemleri için kurulum aşamasında performans analizlerinin yapılması sistem tasarımının optimize edilmesi açısından önemlidir. Bununla birlikte, OD/GA sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilirken, fiziksel tasarım parametrelerine ek olarak kontrol parametrelerinin de dikkate alınması gerekliliği karmaşık bir optimizasyon probleminin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu problemin ele alınmasında farklı parametre kombinasyonlarını içerecek şekilde esnek bir çözüm sistematizasyonunun geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada OD/GA sistemlerinin performans analizi için bir simülasyon modeli önerilmektedir. Önerilen model kullanılarak rassal depo içi atama politikası için farklı bekleme noktalarının (giriş, orta ve çıkış) dikkate alındığı senaryolar gerçekçi boyutlarda bir sistem için simüle edilerek sistem performansı ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama zaman, D/GA makinesinin ortalama seyahat süresi ve D/GA makinesi kullanım oranlarına göre incelenmektedir. Ele alınan örnekte, ürünlerin sistemde geçirdiği ortalama zaman ile D/GA makinesinin ortalama seyahat süresi açısından anlamlı farklılıkların oluşmadığı görülmektedir. Öte yandan, ele alınan örnek için D/GA makinesi bekleme noktası giriş konumundayken makine kullanım yüzdesinin daha düşük olduğu, dolayısıyla söz konusu konumlandırmanın daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Otomatik Depolama ve Geri-Alma (OD/GA) sistemleri, bekleme noktası, rassal depo içi atama politikası, simülasyon, modelleme

Abstract

It is important to make a performance analysis of the system during installation of the Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) for achieving an optimal design. Yet, it is quite a complex issue to deal simultaneously with physical design and control parameters in the design of AS/RS. It is thus necessary to maintain an adjustable design that contains variety of parameter combinations in solution of the problem. This study proposes a simulation model for performance analysis of AS/RS. By using the proposed model, the study examines system performance via simulating scenarios that considers a variety of dwell points (input, middle, and output) for random storage assignment policies for a realistically-sized system by considering the average time spent by the system performance products in the system, average travel time of the S/R machine and the percentage of the use of the S/R machine. The findings obtained by the present example are that there is no considerable difference between the average travel time of the S/R machine and the average time spent by the products in the system. But, the percentage of the use of machine is lower when the S/R machine is in the input position. It is thus concluded that the input point provides a better performance compared to other dwell points.

Keywords: Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS), dwell point, random storage assignment policy, simulation, modelling

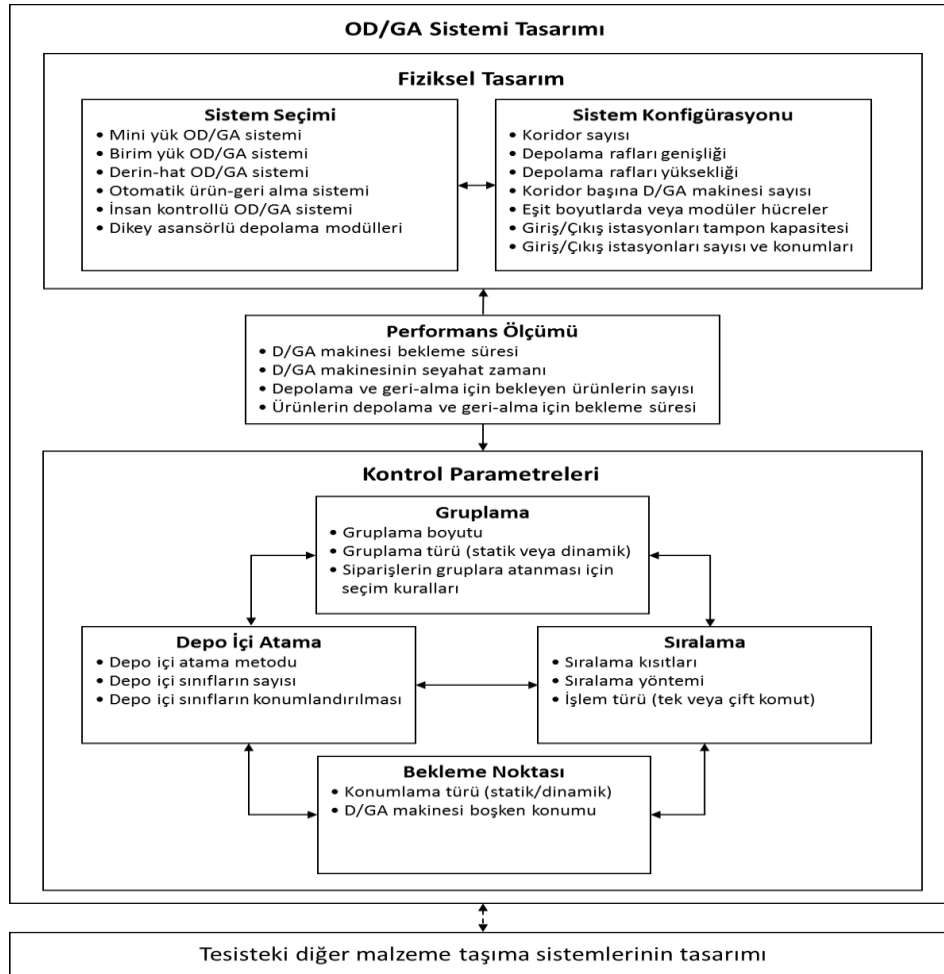
I. GİRİŞ

Modern üretim ve dağıtım sistemlerinde ürün kullanılabilirliğini artırırken işçilik maliyetini, gerekli kat alanını ve hata oranını düşüren yüksek stok seviyeli Otomatik Depolama ve Geri-Alma (OD/GA) sistemleri, 1950'lerden beri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bir OD/GA sistemi genel olarak raflar, Depolama ve Geri-Alma (D/GA) makineleri, koridorlar, giriş/çıkış noktaları ve bazı sistemlerde mevcut olan toplama pozisyonlarından oluşmaktadır. OD/GA sistemlerinin tasarımında dikkate alınan unsurlar genel olarak, sistemin fiziksel tasarımıyla ilişkili olan *fiziksel tasarım* ve sistem tarafından gerçekleştirilen operasyonlarla ilişkili olan *kontrol* parametreleri olmak üzere ikiye ayrılabilir. Fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkileri ve bu unsurlara ait bazı örnekler Şekil 1'de yer almaktadır.

Fiziksel tasarım parametreleri genel olarak sistemin görünümünü belirleyen sistem seçimi ve sistem yapılandırılmalarını içeren sistem konfigürasyonundan meydana gelmektedir. Sistem tarafından gerçekleştirilen operasyonlar ile ilgili olan kontrol parametreleri ise genel olarak depo içi atama, gruplama, sıralama ve bekleme noktası değişkenlerinden oluşmaktadır. Kısaca özetlemek gerekirse, depo içi atama politikaları, depolama raflarına

ürünlerin depolanması için kullanılan yöntemlerden (örneğin, atanmış, rassal, sınıf-tabanlı depo içi atama politikaları vs.) oluşmaktadır. Gruplama, bir dizi siparişin olduğu durumlarda siparişlerin birleştirilerek D/GA makinesi tarafından tek turda toplanması için belirlenen kurallardan oluşurken; sıralama, ürünlerin geri-alınma sıralarının teslim zamanlarının dikkate alınarak belirlenmesini içeren kurallardır. Bekleme noktası ise D/GA makinesi hiçbir işlem gerçekleştiriyorken beklediği konuma karşılık gelmektedir. D/GA makinesinin bir ürünü depolamak veya geri-alınmak için geçirdiği sürenin (travel time) değerlendirilmesi de optimal bir tasarım için gereklidir

ve bu süre, farklı fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerine göre değişebilmektedir [2]. Kontrol parametrelerinden olan bekleme noktasının seçimi de ürünlerin depolanması ve geri-alınması için hem ürünlerin sistemde geçirdikleri süreyi hem de D/GA makinesinin bir sonraki ürün talebini gerçekleştirmek için geçireceği süreyi etkilemektedir. İyi bir bekleme noktasının seçimi ile toplam işlem tamamlanma süreleri kısaltılabilmekte ve böylece toplam işlem süresi azaltılabilmektedir [3]. Dolayısıyla, bekleme noktası probleminin literatürde çok çalışıldığı [4] hem analitik hem de simülasyon modellerinin problemin çözümü için kullanıldığını görmekteyiz.



Şekil 1. OD/GA sistemi tasarımı (Roodbergen ve Vis [1] tarafından yapılan çalışmadan değiştirilerek alınmıştır)

Genel bir ifade ile OD/GA sistemi, malzemeleri belirli bir otomasyon derecesinde hassas, doğru ve hızlı bir şekilde işleyen, depolayan ve geri-alan ekipman ve kontrollerin birleşimidir. OD/GA sistemlerinde amaç, bilgisayar kontrolünde hızlı yük erişimi ile yüksek yoğunlukta depolama sağlamaktır. Bu sistemler, daha hızlı depolama ve ürün alma, depolama alanını verimli kullanma, yüksek güvenilirlik ve ürün hasarlarındaki azalma gibi avantajlara sahipken; yüksek başlangıç yatırımları ve depo tasarımının değiştirilmesinin zorluğu gibi ekonomik faktörleri içeren dezavantajlara da sahiptir. İmalat, depolama ve dağıtım merkezlerinde kullanılan OD/GA sistemlerinin hem verimli çalışması

hem de ürünlerin depolanması ve geri-alınması için hızlı tepki verecek şekilde tasarlanması beklenmektedir. Aynı zamanda depo tasarımı, hem araştırmacılar hem de endüstriyel uygulayıcılar için çok önemli bir sorun olarak bilinmektedir. Depolama sistemlerine ilişkin verimlilik ve lojistik maliyetleri, tasarım kararlarından büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu kararlar, sistemin uzun vadeli genel yapı tasarımından günlük operasyonel kontrolüne kadar geniş bir dizi konu içermektedir [5]. Dolayısıyla, yüksek verimli ve yüksek esneklikte otomatik depolama sistemleri geliştirilirken, yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle sistemlerin performans

tahminleri pratikte ve teorik açıdan önem kazanmaktadır.

OD/GA sistemlerinde fiziksel tasarım, kontrol parametreleri ve müşterilerden gelen istek ve kısıtların yanında sistem ile ilgili belirsizliklerin de olması (örneğin; talep dalgalanmaları vb.) sistem tasarımını etkilemektedir. Bu doğrultuda, OD/GA sisteminin planlanması, tasarımı, inşası, analizi ve yönetimi karmaşık bir problem haline gelmektedir. Bu tür karmaşık bir optimizasyon probleminin çözümü için genel olarak söz konusu problemi daha dar kapsamda ve çeşitli varsayımlar altında ele almak amacıyla analitik modellerin kullanılması uygun görülmektedir. Ancak sistem ile ilgili belirsizlik içeren koşulların ele alınması, hem tasarım hem kontrol parametrelerinin bütünlük olarak dikkate alındığı kapsamlı bir formülasyonun geliştirilmesinin zorluğu gibi nedenlere bağlı olarak, söz konusu problemin analitik modeller ile incelenmesini zorlaştırabilmektedir. Böyle karmaşık bir problemin incelenmesinde analitik modellerin yanında, sistemin performans tahmini, analizi ve çeşitli kurgularının/senaryolarının incelenebilmesi için daha esnek bir yapı sağlayan simülasyon modelleri de sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, OD/GA sistemlerinin simülasyon ile modellenmesi ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında, simülasyon modelinin alt yapısının oluşturulması için bir yaklaşım önerilmiş olup ilgili yaklaşımın örneklendirilmesi amacıyla örnek bir depo oluşturulmuştur. Ele alınan örnekte, rassal depo içi atama politikası ile farklı bekleme noktaları kombinasyonları ayrı ayrı dikkate alınmış olup ilgili politikalar sistem performansı açısından karşılaştırılarak hangi bekleme noktasının rassal depo içi atama politikası altında daha iyi sonuç verdiği analiz edilmiştir.

II. KAYNAK ARAŞTIRMASI

OD/GA sistemlerinin farklı fiziksel tasarım ve/veya çeşitli kontrol parametreleri altında hem analitik modeller ile hem de simülasyon modelleri ile incelenmesi konusu literatürde de geniş yer kaplamaktadır. Literatürde birçok çalışmanın yer alması literatür tarama çalışmalarını da beraberinde getirmiştir. Roodbergen ve Vis [1], OD/GA sistemlerinin son 30 yıldaki literatürüne genel bir bakış sunmuşlardır. Gagliardi vd. [6], OD/GA sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalarda ele alınan özel araştırma soruları ile ilgili sistemleri değerlendirmek amacıyla tasarlanmış ve çeşitli modeller için kullanılan varsayımlara odaklanmışlardır. Vasili vd. [7] tarafından yapılan çalışmada ise son 40 yıldaki OD/GA sistemleri literatürüne genel bir bakış sunulmaktadır.

Çalışmanın 'Giriş' bölümünde de belirtildiği gibi OD/GA sistemlerinin performans analizi için birçok analitik model literatürde yer almaktadır. Ancak, hem müşterilerden gelen kısıtlar ve belirsizliklerden kaynaklanan stokastik koşulların dikkate alınması hem

de OD/GA sistemlerinin etkileşimde olduğu diğer sistemleri etkilemesi, fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerinin doğru bir şekilde seçimi için bütünlük olarak büyük bir formülasyonun geliştirilmesi gerekliliğini doğurmaktadır. Dolayısıyla, OD/GA sistemlerinin analizi ve sistem ile ilgili çeşitli kurguların/senaryoların incelenebilmesi için analitik modellerin yanında veya analitik modeller ile birlikte simülasyon modellerinin de sıklıkla kullanıldığını görmekteyiz. Örneğin, Potrc vd. [8], tekli ve çoklu-mekik OD/GA sistemlerinin analizi için hem analitik modeller hem de simülasyon modeli kullanmışlardır. Yazarlar, D/GA makinesinin hızının değişken olduğu durumlarda tek ve çift komut çevrimleri için kullanılan temel analitik modelleri, dörtlü komut çevrimi (bir çevrimde iki depolama ve iki geri-alma) ve altılı komut çevrimi (bir çevrimde üç depolama ve üç geri-alma) için genişletmişlerdir. Ancak, analitik modellerin yeterli doğruluğu sağlayamadığı, sadece mevcut duruma yaklaştığı sonucuna vararak, simülasyon modeli geliştirmiş ve çalışma kapsamında önerilen depolama stratejisinin performansını değerlendirmişlerdir. Eldemir vd. [9], birim-yük OD/GA sistemlerinde çift komut ile tek komut çevrimlerinin oranını tahmin etmek için alternatif analitik yaklaşımları kullanmış olup, ilgili yaklaşımlarda yer alan modelleri simülasyon ile karşılaştırmışlardır. Lerher vd. [10] tarafından yapılan çalışmada, çok-koridorlu OD/GA sistemleri için analitik seyahat süresi modelleri önerilmiş ve önerilen modellerin performanslarını karşılaştırmak için simülasyon modeli geliştirilmiştir. Guo ve Liu [11], tekli ve ikili-mekik OD/GA sistemlerinin maliyet ve performanslarını karşılaştırmak için simülasyon kullanmışlardır. Yan ve Lee [12], simülasyon modelini, bir OD/GA sisteminde maliyeti tahmin etmek ve verimliliği arttırmak için kullanmışlardır. Lerher vd. [13] tarafından yapılan çalışmada, çift derinlikli, birim-yük OD/GA sistemlerinde çevrim zamanlarının hesaplanması için sundukları yeni analitik seyahat zamanı modellerinin performanslarını simülasyon modeli geliştirerek karşılaştırmışlardır. Tang vd. [14], bir üretim işletmesinde kullanılacak olan OD/GA sistemi için genel süreci ve ayrıntılı adımları analiz etmiş ve sistemin dar boğazlarını tanımlamak amacıyla simülasyon kullanmışlardır. Gagliardi vd. [15] tarafından yapılan çalışmada, birim-yük OD/GA sistemleri için fiziksel tasarım kararlarını operasyonel kararlardan ayırarak, OD/GA sistem dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasını ve modeldeki esnekliği arttırmayı mümkün kılan ve birçok ilginç senaryonun temsil edilmesini sağlayan nesne tabanlı simülasyon modeli (object oriented simulation model) sunulmuştur. Bahrami vd. [16] tarafından yapılan çalışmada, farklı fiziksel tasarım ve kontrol politikalarını analiz etmek ve sonuçları karşılaştırmak için koridor-sonu OD/GA sistemi simülasyonu sunulmuştur. Fan vd. [17] ise çok-derinlikli OD/GA sisteminde D/GA makinesinin seyahat süresini simülasyon yöntemlerine dayalı olarak araştırmışlardır.

OD/GA sistemleri hem yüksek maliyetli olması hem de etkileşimde bulunduğu diğer sistemlerin performansını da etkilemesi sistem tasarımını daha önemli bir hale getirdiği daha önce belirtilmişti. Fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerinin seçimini içeren sistem tasarımının doğru bir şekilde belirlenmesi, sistem kurucular tarafından istenmektedir. D/GA makinesi bekleme noktası seçiminin de sistem performansını etkilediği bilinmektedir. Öte yandan, bu parametrenin diğer parametrelerle (örneğin, depo içi atama politikası) olan ilişkisinin sistem performansı üzerinde olan etkisi de literatürde incelenen konular arasındadır. D/GA makinesi bekleme noktası politikalarının sistem performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi için de yine analitik modellerin yanında simülasyon modelleri de kullanılmaktadır. Örneğin, Van Den Berg ve Gademann [18], çeşitli kontrol politikaları altında depo içi atama politikalarını simülasyon ile incelemişlerdir. Meller ve Mungwattana [19], OD/GA sisteminde en iyi bekleme noktası stratejisini belirleme amaçlayarak sektörde kullanılan bekleme noktası seçim politikalarından literatürde önerilen daha gelişmiş politikalara kadar değişen çeşitli bekleme noktası stratejilerini simülasyon ile araştırmışlardır. Manzini vd. [20], OD/GA sistemlerinde sınıf-tabanlı depo içi atama stratejisi ile ürün-toplayıcı depolama sisteminin (product-to-picker storage system) çoklu-parametrik (multi-parametric) dinamik modelini sunmuşlardır. Alternatif tasarım ve işlem konfigürasyonlarının beklenen sistem performansı üzerindeki etkisini ölçmek ve sistemin tepkisine (response of the system) etki eden faktörlerin en kritiklerini ve bunların kombinasyonlarını tanımlamak için binlerce eğer-ise (what-if) senaryolarını simüle etmişlerdir. Zhou ve Mao [21] yaptıkları çalışmada, depo içi atama için matematiksel model oluşturup çözdükten sonra simülasyon ile depo içi atama tasarımını ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Gagliardi vd. [22], bir gıda endüstrisindeki OD/GA sisteminin özelliklerini doğru bir şekilde belirlemek için tasarlanmış olan ayrık-olay simülatorü sunmuş ve farklı depo içi atama politikaları altında sistemin performansını karşılaştırmak için çeşitli senaryolar oluşturmuşlardır. Meneghetti ve Monti [23], OD/GA sistemine enerji odaklı bakmış ve OD/GA sistemi rafındaki her hücreyi D/GA makinesinin kendisine ulaşması için tükettiği enerjiyle ilişkilendirerek depolama ve geri-alma politikalarını enerji performansları açısından değerlendirmişlerdir. Yazarlar, bekleme noktası politikalarını da bu perspektiften incelemiş olup, depo içi atamalar arasındaki enerji tüketimini karşılaştırmak için geri-alma işlemlerinin simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Regattieri vd. [4], farklı kurallar arasında bekleme noktası politikası için en iyi çözümü bulmak ve böylece depolama/istifleme makinelerinin (stacker cranes) seyahat süresini ve mesafesini en aza indirmeyi amaçlayan bir model geliştirmişlerdir. Yazarlar, önerilen modelin bilgisayar simülasyonlarıyla doğrulanması için de bir yazılım

platformu (software platform) geliştirmişlerdir. Schenone vd. [24] yaptıkları çalışmada, farklı kullanım alanlarındaki OD/GA sistemlerini dikkate alarak, sınıf-tabanlı depo içi atama politikası altında bir OD/GA sisteminin seyahat süresini hesaplamak için simülasyon yaklaşımına dayanan uygun bir metodoloji geliştirmeyi amaçlamışlardır.

Bu çalışmada, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak OD/GA sistemlerinin simülasyon ile modellenmesi amacıyla bir yaklaşım önerilmektedir. Yapılan literatür taramalarında böyle bir çalışmaya rastlanmamış olup, benzer çalışmalarda ise mevcut paket programların kullanıldığı ve sistemin bu paket programlar ile simüle edildiği görülmektedir.

III. METODOLOJİ

Bu çalışmada, OD/GA sistemi simülasyonu için bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımda, ayrık-olay simülasyon modelinin oluşturulması için kullanılan unsurlar bu bölümde özetlenmiştir. Simülasyon modeli oluşturulurken kullanılan i ve j indisleri, sırasıyla, koridor ve ilgili koridora depolamak ve geri-almak için gönderilen ürün grubunu ifade etmektedir. Burada indis sınırları $i = 1 \dots n$ ve $j = 1 \dots m_i$ olarak tanımlanmakta olup; n toplam koridor sayısına; m_i ise i . koridora gönderilen toplam ürün grubu sayısına karşılık gelmektedir. Simülasyon modelinde kullanılan varlıklar, en genel şekliyle Tablo 1'de yer aldığı gibi sanal varlıklar ve diğer varlıklar olarak ikiye ayrılabilir. Burada sanal varlıklar, problem içinde standart bileşenlerle ele alınamayan karmaşıklıkta unsurların modellenmesi amacıyla, simülasyonun başlatılması ve ürün gruplarının depolanacakları koridorlara gönderilmesi için kullanılan çeşitli kukla varlıklar şeklinde tanımlanmakta; diğer varlıklar ise hücrelerde depolanacak olan ürün gruplarını ifade etmektedir.

Tablo 1. Varlıklar

Varlık Tanımı	Varlık
Sanal Varlıklar	: $Storage_Demand$ $Storage_Demand_i$
Diğer Varlıklar	: $Product_Groups_{ij}$

Simülasyon modelinde kullanılan lokasyonlar, depolama, geri-alma veya başka bir faaliyet (taşıma, bekleme) için varlıkların yönlendirildiği konumlara karşılık gelmektedir. Modelde yer alan lokasyonlar, giriş ve çıkış noktaları, koridorlara ait kuyruklar ve konveyörler ile birlikte, OD/GA sisteminde ürünlerin depolanması ve geri-alınması için kullanılan ve raflarda yer alan hücrelerden oluşmakta olup Tablo 2'deki gibi özetlenebilir. Burada da varlıklarda yer alan sanal varlık tanımlarına benzer şekilde, simülasyonu başlatmak için sanal varlığının sisteme giriş yaptığı sanal bir lokasyon kullanılmıştır. $Storage_Demand$ sanal varlığı, sanal lokasyondan sonra, öncelikle $Storage_Demand_i$ sanal varlığı olarak, daha sonra ise $Storage_Demand_i$ sanal varlığı

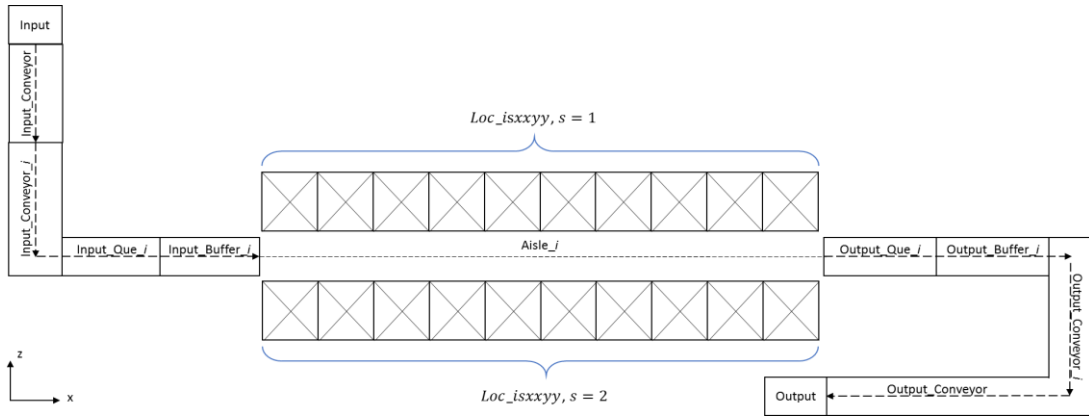
$Product_Groups_{ij}$ ürün grupları olarak giriş noktasına gönderilmektedir. Ürün gruplarının, i . koridordaki hücrelere depolanmak üzere giriş, geri-alınan ürünlerin ise çıkış yapabilmeleri amacıyla kullanılan koridor kuyruklarına ürünler gönderilmeden önce, ilgili kuyruğa ait konveyörler bulunmaktadır. i . koridordaki hücrelere depolanmak için gelen ürünler ile hücrelerden geri-alınan ürünler, kuyruklardaki olası doluluğa karşı oluşabilecek darboğazları engellemek amacıyla tampon bölgelerde beklemektedirler. Giriş lokasyonundan sonra konveyöre, sonra ilgili kuyruğa ve tampon bölgeye gelen ürün grupları, depo içi atama politikaları dikkate alınarak hücrelere depolanmakta ve daha sonra geri-alma talebi olan ürün grupları alınarak çıkış noktasından sistemden çıkarılmaktadır.

Tablo 2. Lokasyonlar

Lokasyon Tanımı	Lokasyon
Sanal Lokasyon	: $Dummy_Location$
Giriş ve Çıkış Noktaları	: $Input$ $Output$
Konveyörler	: $Input_Conveyor$ $Input_Conveyor_i$ $Output_Conveyor_i$ $Output_Conveyor$

Kuyruklar	: $Input_Que_i$ $Output_Que_i$
Tampon Bölgeleri	: $Input_Buffer_i$ $Output_Buffer_i$
Hücreler	: Loc_{isxxyy}

Çalışmanın “Giriş” bölümünde belirtildiği gibi sistemde yer alan koridorlar, raflar arasındaki boşlukları ifade etmektedir. Dolayısıyla, iki raf bölümünden oluşan bir koridorda bulunan D/GA makinesi, her iki raf bölümünde yer alan hücrelere hizmet vermektedir. Hücreler tanımlanırken, hücrenin hangi koridorda, hangi raf bölümünde olduğu ve ilgili raf bölümü için hangi koordinatta yer aldığı dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, Loc_{isxxyy} olarak ifade edilen hücre lokasyonunda i , daha önce belirtildiği gibi koridoru; s , ilgili koridorda karşılıklı olarak yer alan raf bölümlerini ($s = 1, 2$); xx , hücrenin bulunduğu lokasyonun x koordinatını; yy ise hücrenin bulunduğu lokasyonun y koordinatını ifade etmektedir. Lokasyonlara ait örnek bir gösterim Şekil 2’de yer almaktadır.

**Şekil 2.** Lokasyonların gösterimi

Simülasyon modelinde kullanılan değişken ve nitelikler tanımları ile birlikte Tablo 3 ve 4’te yer almaktadır.

Tablo 3. Değişkenler

Değişken Tanımı	Değişken
Giren/Çıkan Ürün Sayısı	: $Var_Input_Product_Groups_{ij}$ $Var_Output_Product_Groups_{ij}$
Giren/Çıkan Toplam Ürün Sayısı	: $Var_InputQue_i$ $Var_OutputQue_i$
Isınma Periyodu	: Var_WT Var_WTC_{ij} $Var_WTC_{ic_i}$ Var_WT_{ij} $Var_WT_{ic_i}$
Depolama Süresi	: Var_ST Var_STC_{ij} $Var_STC_{ic_i}$ Var_ST_{ij} $Var_ST_{ic_i}$

Tablo 4. Nitelikler

Nitelik Tanımı	Nitelik
Olasılık Dağılımları Ataması	: Att_SA Att_SPT_i
Isınma Periyodu	: Att_WT
Depolama Süresi	: Att_ST

Çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon modelinde dikkate alınması gereken bir diğer unsur da simüle edilen sistemin başlangıç koşullarıdır. Bu çalışmada dikkate alınan sistemin kararlı durum koşullarını model yansıtabilme amacıyla, sistemin başlangıçta belirli bir miktarda doluluğa sahip olduğu varsayılmıştır. Söz konusu başlangıç koşullarının oluşturulabilmesi için depoda geri-alma talebi olmadan belli bir süre boyunca sadece depolama işleminin gerçekleştirilmesi şeklinde bir modelleme yaklaşımı öngörülmüştür. Ürün

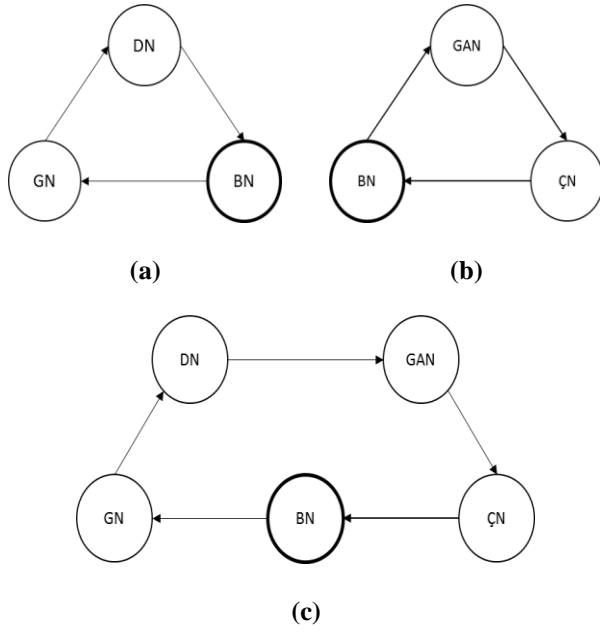
çeşitliliği ve depolama politikalarıyla birlikte ele alındığında ısınma periyodunun belirlenmesi bu yaklaşımın kapsamlı olarak tasarlanmasını gerektirmekte olup, uygulanan yaklaşımın detayları izleyen paragrafta sunulmuştur.

Başlangıç koşullarının oluşturulmasını sağlamak amacıyla farklı koridorlarda farklı ürün gruplarının çeşitli depo içi atama politikaları altında depolanma olasılıklarını da dikkate alarak ısınma periyodunun (warm-up time) belirlenmesi önerilmektedir. Isınma periyodunu oluşturmak amacıyla Tablo 3 ve 4'te yer alan ve ısınma periyodu ile ilgili olan değişken ve niteliklerden yararlanılmıştır. Bu amaçla, öncelikli olarak farklı koridorlardaki hücelere depolanmak üzere gelen ürün gruplarına ait ortak/genel bir çarpan olan Var_WT değişkeni tanımlanmıştır. Ürün gruplarının depolama politikalarına ve talep edilme olasılıklarına bağlı olarak depoya geliş sıklıkları farklılık gösterebilmektedir. Dolayısıyla, ürün gruplarının geri-alma talepleri olmadan (başlangıç durumunda) belirli bir süre ilgili hücelere depolanması için ısınma periyotlarının da ürün gruplarına ya da ürün sınıflarına göre farklılık göstermesi gerekmektedir. Aksi durumda, daha sık frekanslarla depoya gelen ürün grupları, başlangıç durumunda ısınma periyodu boyunca beklerken darboğazlara neden olabilir. Bu durumun giderilmesi için i . koridordaki hücelere depolanan j . ürün grubuna ait ısınma periyodu katsayıları Var_WTC_{ij} değişkeni ile tanımlanmıştır. Bu değişkenin (Var_WTC_{ij}), genel ısınma periyodu (Var_WT) ile çarpılmasıyla da i . koridordaki hücelere depolanan j . ürün grubuna ait Var_WT_{ij} değişkeni ile tanımlanan ısınma periyodu belirlenmiş olmaktadır. Diğer bir yandan, sınıf-tabanlı depo içi atama politikasının da depoda kullanılması söz konusu olabilir. Dolayısıyla burada, her bir ürün grubu yerine farklı sınıflara ait ürün grupları için farklı ısınma periyotlarının belirlenmesi gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi aksi durumda, talep edilme olasılığı yüksek olan sınıflar ile talep edilme olasılığı düşük olan sınıfların depolanacağı hücre sayıları ve depoya geliş sıklıkları farklılık göstereceğinden, ürünlerin aynı ısınma periyodu süresince beklemeleri sistemde darboğazlara neden olabilir. Bu sorunu gidermek amacıyla, eğer varsa, sınıf-tabanlı depo içi atama politikası altında depolanan ürün grupları için de $Var_WTC_{ic_i}$ değişkeni katsayı oluşturmak üzere tanımlanmıştır. Bu katsayı değişkeninin, genel ısınma periyodu katsayısıyla (Var_WT) çarpılması ile de $Var_WT_{ic_i}$ değişkeni ile tanımlanan sınıf-tabanlı depo içi atama politikası altında depolanan ürün gruplarına ait sınıfların, ısınma periyotları belirlenmiş

olmaktadır. Burada, c_i değeri, i . koridorda sınıf-tabanlı depo içi atama politikası altında depolanan ürün gruplarının sınıf sayısını temsil etmekte ve sınıf sayısına göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin, birinci koridorda ($i = 1$), üç farklı sınıf yer alıyorsa $c_1 = 3$ olmaktadır. Son olarak, belirlenen ısınma periyodu değişkenleri (Var_WT_{ij} ve $Var_WT_{ic_i}$), Att_WT niteliğine eşitlenerek ilgili ürün grupları için başlangıç bekleme süreleri oluşturulmuş olmaktadır.

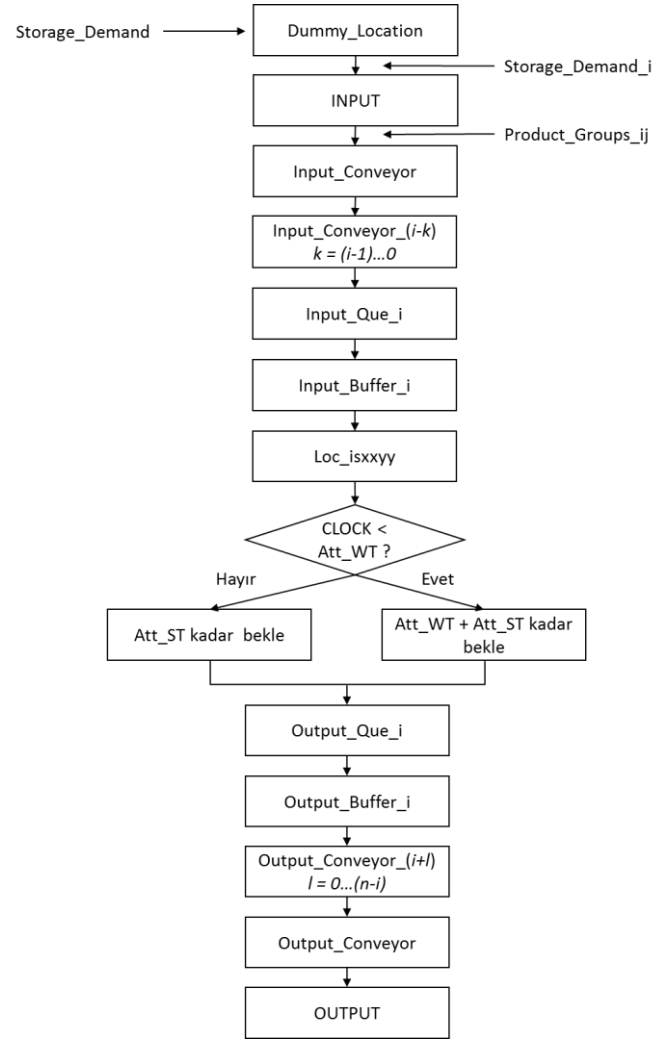
Isınma periyodunun belirlenmesinden sonra ürün gruplarının depolama sürelerinin de oluşturulması gerekmektedir. Başlangıç durumunda ısınma periyodu kadar bekleyen ürün grupları, depolama süreleri boyunca da bekledikten sonra geri-alma sürecine geçilmektedir. Depolama süresi, ürün grupları sisteme giriş yapıp ilgili koridordaki hücreye depolandıktan sonra başlamaktadır. Depolama süreleri belirlenirken yine ısınma periyoduna benzer bir süreç izlenmektedir. Genel bir depolama süresi Var_ST değişkeni ile belirlendikten sonra, bu değişken yine depo içi atama politikasına göre Var_STC_{ij} veya $Var_STC_{ic_i}$ (sınıf-tabanlı ise) değişkeni ile tutulan katsayılar ile çarpılarak Var_ST_{ij} veya $Var_ST_{ic_i}$ değişkenleri elde edilmektedir. Elde edilen değişkenler, Att_ST niteliği ile tutularak her ürün grubuna veya sınıfa ait depolama süreleri oluşturulmaktadır.

Simülasyon modelinin oluşturulması için kullanılan model bileşenleri dışında bir diğer unsur da D/GA makinesinin çevrim sürecidir. Önerilen yaklaşımda Şekil 3'te verildiği gibi üç çevrim düşünülmektedir. Depolama çevriminde (Şekil 3-(a)), bekleme noktasında (BN) bekleyen D/GA makinesi, giriş noktasından (GN) depolanacak ürünü alıp depolama noktasına (DN) götürdükten sonra bekleme noktasına geri dönmektedir. Geri-alma çevriminde (Şekil 3-(b)), yine bekleme noktasında bekleyen D/GA makinesi, geri-alma noktasından (GAN) ürünü alıp çıkış noktasına (ÇN) götürdükten sonra bekleme noktasına geri dönmektedir. Şekil 3-(c) ile gösterildiği gibi ikili çevrimde ise hem depolama hem de geri-alma taleplerinin aynı zaman diliminde var olduğu düşünülmektedir. İkili çevrimde, bekleme noktasında bekleyen D/GA makinesi, depolama talebini gerçekleştirdikten sonra geri-alma konumundan geri-alınacak ürünü almaktadır. Alınan ürünün çıkış noktasına bırakılmasından sonra yine bekleme noktasına geri dönmektedir. Burada belirlenen bekleme noktası, giriş veya çıkış noktası olabileceği gibi başka bir lokasyon (örneğin, orta nokta) olarak da belirlenebilir.



Şekil 3. D/GA makinesi bekleme noktası çevrimi (Her çevrim bekleme noktasından başlamaktadır)
(a. Depolama çevrimi **b.** Geri-alma çevrimi **c.** İkili çevrim)

Yukarıda anlatılan model bileşenlerinden yola çıkılarak genel süreç adımları Şekil 4'te verilmektedir. Bu doğrultuda, simülasyon, tanımlanan sanal varlığın (*Storage_Demand*) sanal lokasyona (*Dummy_Location*) gönderilmesi ile başlamaktadır. Hangi ürün grubunun hangi koridora gideceğini belirlemek amacıyla Tablo 4'te verilen nitelik *Att_SA* ile ilişkilendirilen *SAD* olasılık dağılımı kullanılarak, sanal varlıklar (*Storage_Demand_i*) giriş lokasyonuna (*Input*) gönderilmektedir. Sanal varlıklar *Input* lokasyonuna gönderildikten sonra, *i*. koridordaki hücrelere depolanacak olan ürün gruplarının da ilgili konveyör, kuyruk ve tampon bölgelerine gönderilmesi gerekmektedir. Sanal varlıklardan ürün gruplarına geçiş de yine ürün gruplarının *Input* lokasyonuna, talep edilme olasılığı olan ve Tablo 4'te verilen nitelik *Att_SPT* ile ilişkilendirilen *SPTD_i* olasılık dağılımına göre gönderilmesiyle sağlanmaktadır. Ana giriş konveyöründe (*Input_Conveyor*) bulunan ürün grupları, *i*. koridora ait konveyör, kuyruk ve tampon bölgelerine gönderilmekte ve depo içi atama politikaları ile talep edilme olasılıklarının da göz önüne alınmasıyla belirlenen depolama sürelerine göre ilgili koridordaki hücrelere depolanmaktadırlar. Depolanan ürün grupları, başlangıçta "ısınma periyodu + depolama süresi" kadar; aksi halde, depolama süresi kadar bekletildikten sonra geri-alma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Ürün grupları, giriş işleminde olduğu gibi çıkış işlemleri için de ilgili kuyruk, tampon bölge ve konveyörlere gönderildikten sonra sistemden çıkarılmaktadır.



Şekil 4. Simülasyon modeli için genel süreç adımları

Yapılan çalışmada, önerilen yaklaşımın örneklenmesi amacıyla örnek bir depo ProModel ortamında modellenmiştir. Sistem modelinin doğru çalışıp çalışmadığını tespit edebilmek amacıyla yazılımın yeteneklerinden yararlanılmıştır. Hem sisteme giren ve çıkan ürün sayılarının tutulması ile sistemdeki mevcut ürün sayıları (work-in-process) takip edilerek hem de ProModel ortamında animasyonunun farklı hızlarda çalıştırılmasıyla, modelin doğru bir şekilde çalıştığı gözlemlenerek verifikasyonu sağlanmıştır. Buna ek olarak, yine kullanılan yazılımın özellikleri kullanılarak, varlıkların sisteme giriş ve çıkışları arasında geçen süreç takip edilmiş ve modelin doğru bir şekilde çalıştığı sonucuna ulaşılmıştır. Modelin validasyonu için ise hem model geliştiricilerin hem de uzman görüşünden yararlanarak, modelin gerçek hayatta oluşturulabilecek sistemi yeterli seviyede temsil edebilecek şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, uzman görüşünden yararlanarak, geliştirilen modelin farklı koşullar altında ürettiği çıktılar, benzer bir gerçek sistemden elde edilen çıktılarla uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

IV. SAYISAL ÖRNEK

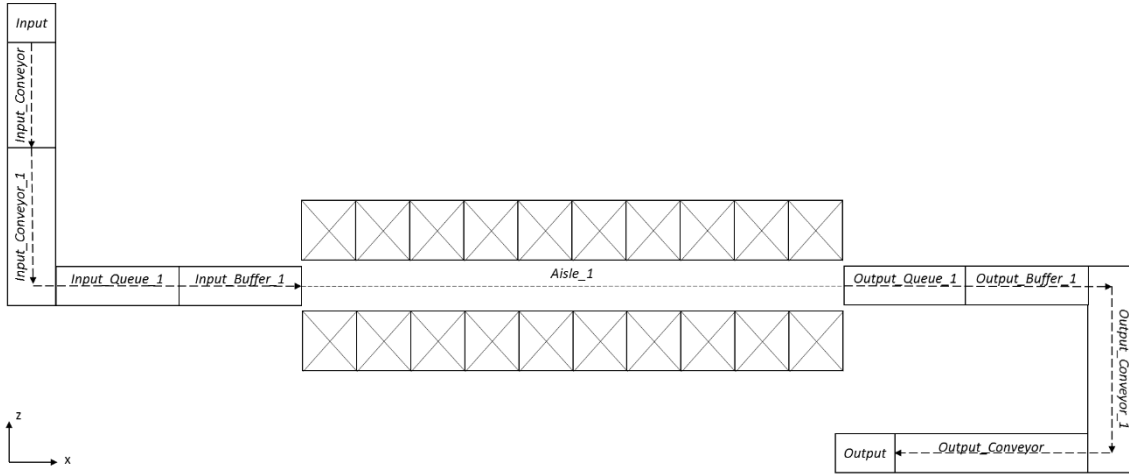
Metodoloji bölümünde detayları açıklanan yaklaşımın örneklendirilmesi amacıyla örnek bir depo ele alınmıştır. Oluşturulan örnek depoya ait bilgiler Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5. Deponun fiziksel tasarım ve kontrol parametreleri

Parametre	Değer
Depo Boyutları	: 20x10
Toplam Hücre Sayısı	: 400
Koridor Sayısı (i)	: 1
D/GA Makinesi Sayısı	: 1
Toplam Ürün Grubu Sayısı	: 8
Depo İçi Atama Politikası	: Rassel

Geri-Alma Politikası	: FIFO
D/GA Makinesi Bekleme Noktası ($\forall i$)	: Giriş, Orta, Çıkış

Bir koridor ve koridora hizmet eden bir D/GA makinesinden oluşan depoda toplamda 400 hücre (200 hücre/raf bölümü) bulunmakta olup, geri-alma politikası olarak FIFO kullanılmıştır. Ele alınan depo, rassal depo içi atama politikası altında üç farklı bekleme noktası politikası uygulanarak simüle edilmiştir. Böylelikle, hangi bekleme noktasının rassal depo içi atama politikası altında daha iyi sonuç verdiği analiz edilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda, D/GA makinesi için belirlenen giriş, çıkış ve orta bekleme noktaları rassal depo içi atama politikası altında incelenmiştir. Örneğe ait depo tasarımları ise Şekil 5 ve 6'da yer almaktadır.



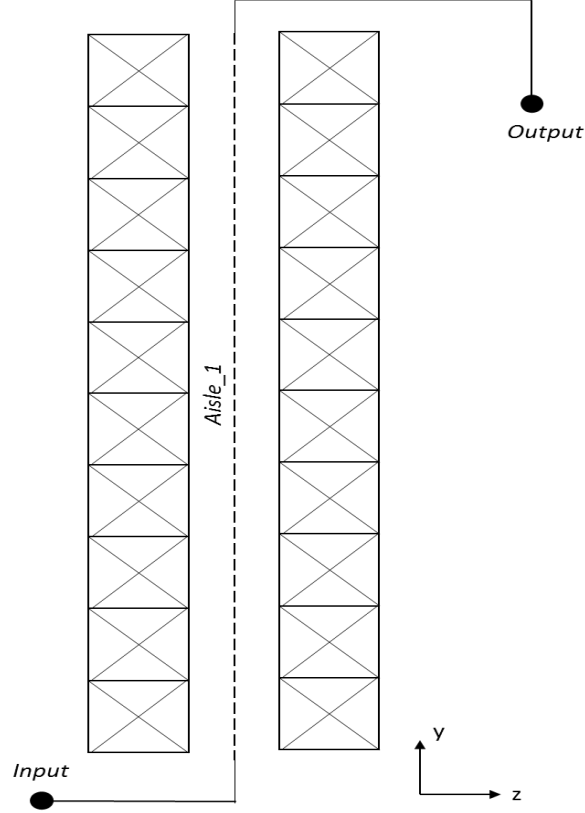
Şekil 5. Depo tasarımı (x-z eksenleri)

Tablo 5'te bazı fiziksel tasarım ve kontrol parametreleri verilen örnek depo; bir koridor ($n = 1$), 20x10 hücre/raf bölümü (toplam 400 hücre) ve bir D/GA makinesinden oluşmaktadır. Bununla birlikte, depoda bulunan bir koridorda toplam 8 farklı ürün grubunun ($m_i = 8, i = 1$) sistemde depolandığı varsayılmaktadır. Çalışmanın amacı, rassal depo içi atama altında bekleme noktası politikalarının sistem üzerindeki etkisini incelemek olduğundan, ele alınan örnekte rassal depo içi atama politikasının uygulandığı ve D/GA makineleri için de farklı bekleme noktalarının olduğu varsayılmaktadır. Rassal depo içi atama politikası uygulanan ve iki raf bölümünden oluşan raflara yerleştirilen ürün gruplarının simetrik bir yerleşimi olmamakla birlikte, Şekil 7'de rafların iki bölümü de yer almaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken unsur, rassal depo içi atama politikası dışındaki politikalar için (sınıf-tabanlı, atanmış vb.) aynı ürün gruplarının (ya da sınıfların) simetrik olarak yerleştirilebilmesi sağlamak amacıyla 2-boyutlu düzlemde dikkate alınan x ve y eksenlerinin yönleridir.

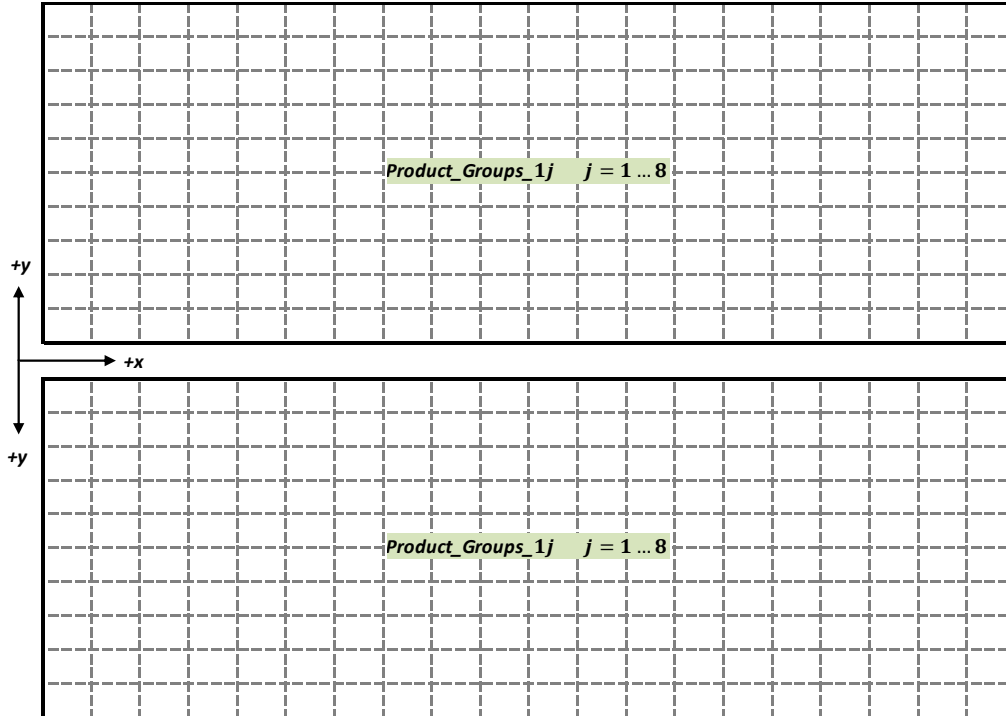
D/GA makinesinin, karşılıklı olarak yerleştirilen ürün gruplarına (ya da sınıflara) olan uzaklığının eşit olmasını sağlamak için simülasyon modelinde oluşturulan raf yerleşiminde, x eksen değeri her iki raf bölümü için de aynı yönde artarken, y eksen değerlerinin zıt yönlerde doğru arttığı varsayılmaktadır. Böylelikle, D/GA makinesinin bulunduğu bir noktadan karşılıklı olarak yerleştirilen ürün gruplarına (ya da ürün gruplarının buldukları hücrelere) olan uzaklık, diğer bir deyişle, ilgili ürün gruplarına ulaşma süresi eşit olmaktadır. Modellenen sistemler için varsayımlar genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Toplam 400 hücreden oluşan tek koridorlu depoda 8 farklı ürün grubu bulunmaktadır.
- Depoda bir D/GA makinesi bulunmakta olup, makine bekleme noktası olarak giriş, orta ve çıkış noktaları belirlenmiştir.
- Ürünler, rassal depo içi atama politikası altında depolanmaktadır.
- Talep edilen ürünler için geri-alma politikası olarak FIFO kullanılmaktadır.

- D/GA makinesinin ve sistemin çalışmasını sağlayan diğer bileşenlerin çalışmasında bir aksama olmayacağı (arıza vb.) varsayılmaktadır.
- D/GA makinesinin bütün ürünleri aynı hızda depolayıp-geri alabildiği (tüm ürünlerin yaklaşık eşit ağırlıkta olduğu) varsayılmaktadır.



Şekil 6. Depo tasarımı (y-z eksenleri)



Şekil 7. Rassal depo içi atama politikası için ürün grubu-hücre atamaları

V. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Önerilen yaklaşımın örneklendirilmesi amacıyla ele alınan örnekte simülasyon, sanal varlığın (*Storage_Demand*) sanal lokasyona (*Dummy_Location*) $E(30)$ frekansıyla birer birer sınırsız sayıda gönderilmesi ile başlamaktadır. Bununla birlikte, ürün gruplarının sisteme gelme olasılıkları ile *Storage_Demand_i* varlıklarının ilgili koridor, konveyör ve kuyruklara gönderilme olasılıklarının, “Metodoloji” bölümünde detayları verilen ilgili nitelikler ile tutulduğu belirtilmiştir. Bu doğrultuda, başlangıç durumunda *Att_SA* niteliği ile tutulan ve *Storage_Demand_i* varlıkları için kullanılan, *i*. koridora ürün gönderme olasılığı olan *SAD*, tek bir koridor olduğu için %100 olarak belirlenmiştir. Öte yandan, rassal depo içi atama politikası altında depolanan tüm ürün gruplarının talep edilme olasılıklarının (sisteme gönderilme olasılıklarının) eşit olduğu varsayılmıştır. Diğer bir deyişle, *i*. koridordaki hücrelere depolanmak üzere gelen sekiz (8) farklı ürün grubunun talep edilme olasılıklarını oluşturan ve *Att_SPTD_i* niteliği ile tutulan *SPTD_i* dağılımında, her ürün grubu için talep edilme olasılığı %12,5 olarak belirlenmiştir.

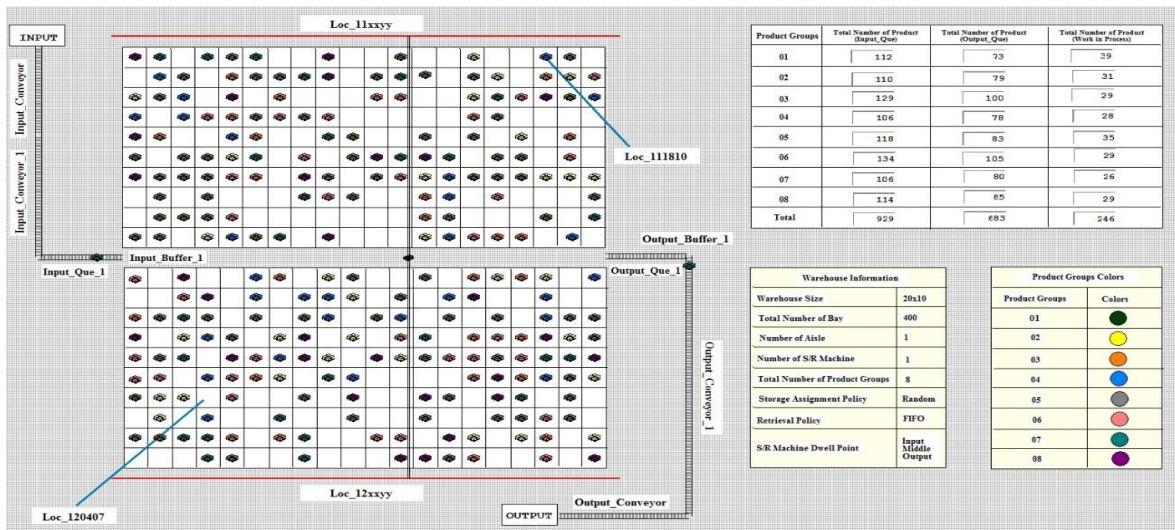
Önerilen yaklaşımda, simülasyonun başlatılması ve ürün gruplarının ilgili hücrelere depolanmak üzere gönderilmesinden sonra geri-alma sürecine geçilmektedir. “Metodoloji” bölümünde belirtildiği gibi depo başlangıçta belirli bir oranda dolduktan sonra geri-alma işlemlerinin başlaması için ısınma periyodunun tanımlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda, genel ısınma periyodu çarpanı olan *Var_WT* için 1000 zaman birimi (dakika) değeri belirlenmiştir. Koridordaki hücrelerin belirli bir doluluk seviyesine ulaşabilmesini sağlamak için koridor bazlı ısınma periyotları belirlenirken kullanılan *Var_WTC_ij* katsayısına ise ürün gruplarının talep edilme olasılıklarının eşit olduğu göz önüne alınarak her bir ürün grubu için beş (5) değeri verilmiştir. Diğer bir yandan, rassal depo içi atama politikası altında

depolanan ürün gruplarının talep edilme olasılıkları eşit alındığından ısınma periyodunda olduğu gibi depolama süreleri de eşit kabul edilmiştir. *Var_ST* değişkeni ile tutulan genel depolama süresi $E(7200)$ olarak belirlenmiş olup bu süre, bir (1) katsayısı ile çarpılarak doğrudan kullanılmıştır. Bir koridor ($i = 1$), sekiz ürün grubundan oluşan örnek depo için ısınma periyodu ve depolama süresi değişken değerleri Tablo 6’da verilmektedir.

Tablo 6. Isınma periyodu ve depolama süreleri (dakika) değişkenleri

Değişken	Değer
Var_{WT}	: 1000
$Var_{WTC_{1j}, \forall j}$: 5
$Var_{WT_{1j}, \forall j}$: 5000
Değişken	Değer
Var_{ST}	: $E(7200)$
$Var_{STC_{1j}, \forall j}$: 1
$Var_{ST_{1j}, \forall j}$: $E(7200)$

Çalışma kapsamında önerilen simülasyon modeli, yukarıda detayları yer alan örnek bir depo için 30 replikasyon ile 1300 saat/replikasyon (çalıştırma süresi 1000, ısınma periyodu 300 saat) çalıştırılmıştır. Burada, simülasyon çalıştırılırken kullanılan ısınma periyodu (300 saat), istatistik verilerinin alınmayacağı süreyi ifade etmektedir. Simülasyon çalışırken herhangi bir zaman diliminde elde edilen ekran görüntüsü ise Şekil 8’de yer almaktadır. Simülasyon modeli oluşturulurken 2-boyutlu depo ürün yerleşimi dikkate alındığından, şekilde yer alan simülasyon ekran görüntüsünde rafların x ve y eksenleri görülmektedir.



Şekil 8. Rassal depo içi atama politikası için simülasyon modeli çalışma anı ekran görüntüsü

Çalışma kapsamında, elde edilen sonuçlar yorumlanırken sistem performansını etkileyen parametreler dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, her bekleme noktası için ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama zaman (dakika), D/GA makinesinin ortalama seyahat süresi (saat) ve D/GA makinesi kullanım oranları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama süreler Tablo 7’de yer almaktadır. Farklı bekleme noktalarında ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama süreler arasında anlamlı bir farkın oluşup oluşmadığını analiz edebilmek amacıyla, 30 replikasyon sonucunda elde edilen veriler kullanılarak t-testi uygulanmıştır. Bekleme noktaları, ikili (Giriş-Orta, Giriş-Çıkış, Orta-Çıkış) olarak karşılaştırılmış olup örnek bir test sonucu *Product_Groups_01* için Tablo 8’de verilmiştir. Tablo 8’de yer alan veriler doğrultusunda, %5 anlamlılık düzeyinde, farklı bekleme noktaları için ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama süreleri arasında anlamlı bir farklılık olmadığı görülmektedir. Öte yandan, yine *Product_Groups_01* için Şekil 9’a bakıldığında, belirlenen farklı bekleme noktalarında ortalama süreler için güven aralıklarının çakıştığı, dolayısıyla anlamlı bir farkın oluşmadığının grafiksel kontrolü de yapılabilmektedir. Benzer şekilde, diğer ürün grupları için de farklı bekleme noktalarında, ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama süreler arasında da anlamlı farkların oluşmadığı hem t-testleri sonucunda, hem de grafiksel olarak gözlemlenmiştir.

Örnek depo oluşturulurken, ürün gruplarının sisteme giriş olasılıkları (talep edilme olasılığı) eşit olarak alındığından ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama sürelerin de birbirine yakın olması beklenen bir durum olup, elde edilen sonuçlarda da görülmektedir. Öte yandan, bu sonuç ele alınan örnek durum için geçerli olup, gerçek hayatta tipik bir şekilde karşılaşılabilecek olan çok farklı talep dağılımları için farklı sonuçlar alınması söz konusu olabilir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon modeli, söz konusu farklı durumlarda kullanılacak esnek bir simülasyon altyapısı sağlamaya yönelik olarak sunulmuş olup, farklı talep dağılımları modele kolaylıkla girdi olarak sunulurken, elde edilen sonuçlar benzer şekilde yorumlanabilir.

D/GA makinesinin kullanımdayken seyahat ettikleri süreler ile makine kullanım yüzdesi de çalışma kapsamında dikkate alınan performans parametreleri olup, Tablo 9 ve 10’da sonuçlar sırasıyla yer almaktadır.

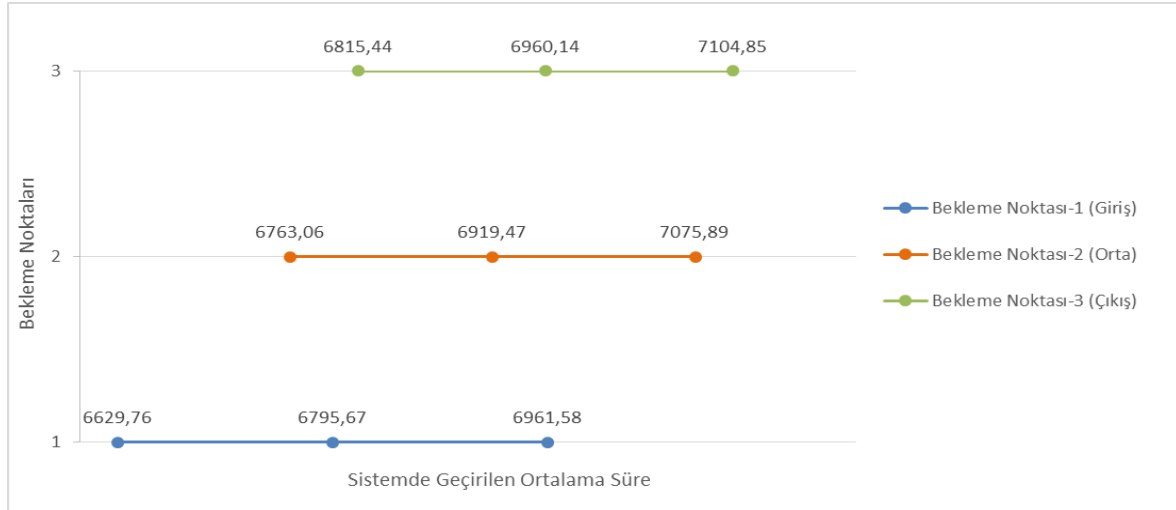
Tablo 7. Ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama süre (dakika)

Ürün Grubu	Replikasyon	Bekleme Noktası		
		Giriş	Orta	Çıkış
01	Ortalama	6795,67	6919,47	6960,14
	Minimum	6021,90	5996,70	6101,64
	Maksimum	8065,29	7778,31	7765,42
	S. Sapma	444,32	418,89	387,54
	95% G.A. Düşük	6629,76	6763,06	6815,44
	95% G.A. Yüksek	6961,58	7075,89	7104,85
02	Ortalama	6953,42	7034,30	6940,60
	Minimum	6282,96	5845,39	6343,35
	Maksimum	8152,14	7821,64	7863,82
	S. Sapma	375,39	447,34	358,66
	95% G.A. Düşük	6813,25	6867,26	6806,68
	95% G.A. Yüksek	7093,60	7201,35	7074,53
03	Ortalama	6940,15	6978,69	6975,00
	Minimum	6251,60	6294,24	6295,07
	Maksimum	7884,17	8061,16	8044,89
	S. Sapma	469,91	430,22	423,87
	95% G.A. Düşük	6764,68	6818,04	6816,72
	95% G.A. Yüksek	7115,62	7139,34	7133,27
04	Ortalama	7069,23	6996,39	6934,13
	Minimum	5910,63	5861,49	5882,18
	Maksimum	7840,87	8172,07	7842,13
	S. Sapma	430,91	532,26	444,92
	95% G.A. Düşük	6908,33	6797,64	6767,99
	95% G.A. Yüksek	7230,14	7195,14	7100,26
05	Ortalama	6890,21	7093,74	6963,89
	Minimum	6009,16	6367,04	6288,54
	Maksimum	7619,30	7841,76	7580,79
	S. Sapma	409,92	391,07	371,51
	95% G.A. Düşük	6737,15	6947,71	6825,17
	95% G.A. Yüksek	7043,28	7239,77	7102,61
06	Ortalama	6994,43	6946,41	6878,50
	Minimum	6189,66	6369,51	5865,03
	Maksimum	7869,24	7869,71	7870,52
	S. Sapma	429,94	399,23	431,85
	95% G.A. Düşük	6833,88	6797,33	6717,25
	95% G.A. Yüksek	7154,97	7095,49	7039,76
07	Ortalama	6823,55	6865,30	6856,36
	Minimum	6076,28	6344,19	6297,54
	Maksimum	7411,17	7519,86	7524,71
	S. Sapma	364,15	338,91	304,27
	95% G.A. Düşük	6687,58	6738,75	6742,75
	95% G.A. Yüksek	6959,53	6991,85	6969,98
08	Ortalama	7037,86	6933,71	7057,93
	Minimum	6020,39	5902,02	6139,66
	Maksimum	7777,56	8087,14	8066,78
	S. Sapma	417,51	573,25	454,47
	95% G.A. Düşük	6881,96	6719,65	6888,23
	95% G.A. Yüksek	7193,76	7147,76	7227,63

S.Sapma: Standart Sapma, G.A: Güven Aralığı

Tablo 8. Ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama süreler için t-testi sonucu (*Product_Groups_01* için)

	<i>Giriş</i>	<i>Orta</i>	<i>Giriş</i>	<i>Çıkış</i>	<i>Orta</i>	<i>Çıkış</i>
Ortalama	6795,67	6919,47	6795,67	6960,14	6919,47	6960,14
Varyans	197416,70	175466,27	197416,70	150186,12	175466,27	150186,12
Gözlem	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Öngörülen Ortalama Farkı	0,00		0,00		0,00	
df	58,00		57,00		58,00	
t Stat	-1,11		-1,53		-0,39	
P(T<=t) iki-uçlu	0,27		0,13		0,70	

**Şekil 9.** Ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama süreler için %95 güven aralıkları (*Product_Groups_01* için)**Tablo 9.** D/GA makinesinin kullanımdayken seyahat ettiği ortalama süre (saat)

	Bekleme Noktası (<i>Giriş</i>)	Bekleme Noktası (<i>Orta</i>)	Bekleme Noktası (<i>Çıkış</i>)
Ortalama	0,01	0,01	0,02
Minimum	0,01	0,01	0,02
Maksimum	0,01	0,01	0,02
Standart Sapma	~0	~0	~0
95% G.A. Düşük	0,01	0,01	0,02
95% G.A. Yüksek	0,01	0,01	0,02

Tablo 10. D/GA makinesinin kullanım yüzdesi (%)

	Bekleme Noktası (<i>Giriş</i>)	Bekleme Noktası (<i>Orta</i>)	Bekleme Noktası (<i>Çıkış</i>)
Ortalama	8,51	9,84	12,36
Minimum	7,88	9,38	11,80
Maksimum	8,85	10,23	12,94
Standart Sapma	0,23	0,20	0,25
95% G.A. Düşük	8,42	9,76	12,26
95% G.A. Yüksek	8,59	9,91	12,45

Elde edilen sonuçlarda, farklı bekleme noktalarına göre makinenin seyahat ettiği ortalama sürelerin birbirlerinden çok farklı olmadığı gözlemlenmektedir. Hatta tablodaki sonuçlardan da görüldüğü gibi iki basamaklı ondalık hassasiyet seviyesinde herhangi bir farklılık oluşmadığı, yaklaşık olarak makinenin seyahat sürelerinin birbirlerine eşit olduğu görülmektedir.

Önceki durumda olduğu gibi bu sonuçların da oluşturulan örnek depo için ürün gruplarının sisteme giriş olasılıklarının (talep edilme olasılığı) eşit olduğu ve yaklaşık olarak deponun homojen bir şekilde bu ürünlerle doldurulacak şekilde bir tasarımın oluşturulduğu örnek durum için geçerli olduğu görülmektedir. Bu nedenle, böyle bir tasarım için

seyahat sürelerinin yaklaşık olarak eşit olması beklenen bir sonuç olmakla birlikte, gerçek hayatta ortaya çıkabilecek olan farklı durumlarda seyahat sürelerinin farklılaşması söz konusu olabilir. Geliştirilen simülasyon modeli ile söz konusu farklı durumların kolay bir şekilde modele girdi olarak sunulabilmesi mümkün olmaktadır.

Diğer bir yandan, makine kullanım yüzdelerinde anlamlı farkların olduğu Tablo 10'da görülmekle birlikte, istatistiksel olarak anlamlılığını göstermek için t-testi uygulanmış olup test sonuçları Tablo 11'de, güven aralıklarını gösteren grafiksel sonuçlar ise Şekil 10'da yer almaktadır. Belirlenen farklı bekleme noktaları için D/GA makinesi kullanım yüzdeleri

sonuçlarının yer aldığı Tablo 11'de, %5 anlamlılık düzeyinde, farklı bekleme noktaları için D/GA makinesi kullanım yüzdeleri arasında anlamlı farklılıklar olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 10'da, %95 güven aralığı için söz konusu anlamlı farklılıkların olduğu gözlenmektedir. Bu durumda, farklı bekleme noktaları ile çalıştırılan simülasyon modelinde, sisteme giren ve çıkan ürün sayılarının da yaklaşık olarak eşit olduğu tutulan değişkenler ile bilinmekte olduğundan, makine kullanım yüzdesi düşük olan bekleme noktasının daha iyi performansla sahip olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlara göre de makine bekleme noktası giriş konumundayken kullanım yüzdesinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 11. D/GA makinesinin kullanım yüzdesi için t-testi sonucu

	<i>Giriş</i>	<i>Orta</i>	<i>Giriş</i>	<i>Çıkış</i>	<i>Orta</i>	<i>Çıkış</i>
Ortalama	8,51	9,84	8,51	12,36	9,84	12,36
Varyans	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,06
Gözlem	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Öngörülen Ortalama Farkı	0,00		0,00		0,00	
df	57,00		58,00		56,00	
t Stat	-23,77		-62,03		-42,69	
P(T<=t)	0,00		0,00		0,00	



Şekil 10. D/GA makinesi kullanım yüzdesi için %95 güven aralıkları

VI. SONUÇLAR

Hem üretim hem dağıtım ortamlarında, ürünlerin depolanması ve geri-alınması için kullanılan OD/GA sistemleri, malzemeleri belirli bir otomasyon derecesinde hassas, doğru ve hızlı bir şekilde işleyen, depolayan ve geri-alan ekipman ve kontrollerin bileşimi olarak tanımlanabilir. OD/GA sistemleri, ürünlerin depolanması ve geri-alınması için verimli çalışacak ve hızlı tepki verecek şekilde tasarlanmalıdır. Ancak, OD/GA sistemini kullanacak olan müşterilerden gelen istek ve kısıtların, fiziksel tasarım ve kontrol parametrelerinin belirlenmesinde rol

oynamasının yanında, sistem ile ilgili belirsizliklerin de olması OD/GA sistemi tasarımını karmaşık bir hale getirmektedir. Tüm bu unsurlar dikkate alındığında, OD/GA sistemi tasarımı karmaşık bir optimizasyon problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Problem genel olarak daha dar kapsamda ele alındığında, bu tür bir optimizasyon probleminin çözümü için analitik modellerin kullanıldığı görülmektedir. Ancak, problem karmaşıklığı arttığında, en uygun çözümü geleneksel yöntemler ve deneyimlerle bulmak zorlaştığı gibi böyle bir problemi çözme süreci de uzun zaman almaktadır. Dolayısıyla, analitik modellerin yanında, karmaşık

problemlerin çözümü için sıklıkla simülasyon modellerinin de kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada, genel olarak OD/GA sistemlerinin simülasyon ile modellenmesi üzerinde durulmuştur. Çalışmada, OD/GA sistemlerinin simülasyon ile modellenmesi için bir altyapı oluşturulmaya çalışılmış ve bu amaçla bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın örneklendirilmesi amacıyla bir koridor, bir D/GA makinesi ve ayrı giriş ve çıkış noktalarından oluşan bir depo oluşturulmuştur. Depoda, sekiz farklı ürün grubunun, eşit talep edilme olasılıkları dikkate alınarak depoya geldiği ve rassal depo içi atama politikası altında depolandığı varsayılmıştır. Senaryo parametresi olarak D/GA makinesi için üç farklı bekleme noktası (giriş, orta ve çıkış) belirlenmiştir. Böylece, farklı bekleme noktalarının sistem performansı üzerindeki etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ürünlerin sistemde geçirdikleri ortalama zaman, D/GA makinesinin ortalama seyahat süresi ve D/GA makinesi kullanım yüzdesi olarak belirlenen sistem performansı açısından incelenmiştir. Ele alınan örnekte, ürünlerin sistemde geçirdiği ortalama zaman ile D/GA makinesinin ortalama seyahat süresi açısından anlamlı farklılıkların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, ele alınan örnek için D/GA makinesi bekleme noktası giriş konumundayken makine kullanım yüzdesinin daha düşük olduğu, dolayısıyla söz konusu konumlandırmanın daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Gelecek çalışmalarda, geliştirilen simülasyon modelinin altyapısı kullanılarak farklı stratejilerin dikkate alınması ve bunların kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. (2009). A Survey of Literature on Automated Storage and Retrieval Systems. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343-362.
- [2] Ghomri, L., & Sari, Z. (2015). Mathematical Modeling of Retrieval Travel Time for Flow-Rack Automated Storage and Retrieval Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1906-1911.
- [3] Park, B. C. (2001). An Optimal Dwell Point Policy for Automated Storage/Retrieval Systems with Uniformly Distributed, Rectangular Racks. *International Journal of Production Research*, 39(7), 1469-1480.
- [4] Regattieri, A., Santarelli, G., Manzini, R., & Pareschi, A. (2013). The Impact of Dwell Point Policy in an Automated Storage/Retrieval System. *International Journal of Production Research*, 51(14), 4336-4348.
- [5] Bortolini, M., Accorsi, R., Gamberi, M., Manzini, R., & Regattieri, A. (2015). Optimal Design of AS/RS Storage Systems with Three-Class-Based Assignment Strategy under Single and Dual Command Operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(9-12), 1747-1759.
- [6] Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2012a). Models for Automated Storage and Retrieval Systems: A Literature Review. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7110-7125.
- [7] Vasili, M. R., Tang, S. H., & Vasili, M. (2012). Automated Storage and Retrieval Systems: A Review on Travel Time Models and Control Policies. *Warehousing in the Global Supply Chain*, 159-209.
- [8] Potrc, I., Lerher, T., Kramberger, J., & Sraml, M. (2004). Simulation Model of Multi-Shuttle Automated Storage and Retrieval Systems. *Journal of Materials Processing Technology*, 157, 236-244.
- [9] Eldemir, F., Graves, R. J., & Malmborg, C. J. (2003). A Comparison of Alternative Conceptualizing Tools for Automated Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Production Research*, 41(18), 4517-4539.
- [10] Lerher, T., Sraml, M., Kramberger, J., Potrc, I., Borovinsek, M., & Zmazek, B. (2006). Analytical Travel Time Models for Multi Aisle Automated Storage and Retrieval Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(3-4), 340-356.
- [11] Guo, S. M., & Liu, T. P. (2008). Simulation Evaluation of Single Shuttle and Twin Shuttle AS/RS. *IJEBM*, 6(2), 106-115.
- [12] Yan, B., & Lee, D. (2009). AS/RS Simulation and Optimization Based on Flexsim. *Intelligent Systems and Applications, International Workshop*, 23-24 Mayıs, Wuhan, China.
- [13] Lerher, T., Sraml, M., Potrc, I., & Tollazzi, T. (2010). Travel Time Models for Double-Deep Automated Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Production Research*, 48(11), 3151-3172.
- [14] Tang, X. Y., Yang, L. L., Zhang, J. J., Shi, J., & Chen, L. C. (2013). Research on AS/RS Simulation Based on Flexsim. *Applied Mechanics and Materials*, 347, 406-410.
- [15] Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2014). A Simulation Modeling Framework for Multiple-Aisle Automated Storage and Retrieval Systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(1), 193-207.
- [16] Bahrami, B., Aghezzaf, E. H., & Limere, V. (2014). Simulation Based Performance Analysis of an End-Of-Aisle Automated Storage and Retrieval System. *3rd International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES 2014)*, 334-341.
- [17] Fan, W., Dongfen, G., Shujuan, T., Hong, H., & Xiao, C. (2015). Travel Time Model Of The Storage/Retrieval Machine For Multi-Deep AS/RS Based On Flexsim. *Open Cybernetics & Systemics Journal*, 9, 1833-1839.

-
- [18] Van Den Berg, J. P., & Gademann, A. J. R. M. (2000). Simulation Study of an Automated Storage/Retrieval System. *International Journal of Production Research*, 38(6), 1339-1356.
- [19] Meller, R. D., & Mungwattana, A. (2005). AS/RS Dwell-Point Strategy Selection at High System Utilization: A Simulation Study to Investigate the Magnitude of the Benefit. *International Journal of Production Research*, 43(24), 5217-5227.
- [20] Manzini, R., Gamberi, M., & Regattieri, A. (2006). Design and Control of an AS/RS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7-8), 766-774.
- [21] Zhou, G., & Mao, L. (2010). Design and Simulation of Storage Location Optimization Module in AS/RS Based on FLEXSIM. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2(2), 33.
- [22] Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2012b). On Storage Assignment Policies for Unit-Load Automated Storage and Retrieval Systems. *International Journal of Production Research*, 50(3), 879-892.
- [23] Meneghetti, A., & Monti, L. (2013). Sustainable Storage Assignment and Dwell-Point Policies for Automated Storage and Retrieval Systems. *Production Planning & Control*, 24(6), 511-520.
- [24] Schenone, M., Mangano, G., & Grimaldi, S. (2016). A Simulation Approach for Computing Travel Times of Warehousing Systems: Application for AS/RS in a Class-Based Storage Configuration. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 7(4), 79-94.

Gerçek Zamanlı Enerji İzleme ve Tüketici Farkındalığı için LabVIEW™ Programı ile Otomatik Sayaç Okuma

Automatic Meter Reading with LabVIEW™ Program for Real-Time Energy Monitoring and Consumer Awareness

Bilal KARAMAN¹ , Sezai TAŞKIN² , Mert TOKAY³ 

^{1,2}Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye

³Luna Elektrik Elektronik San. Tic. A.Ş. ARGE Merkezi, 35620, İzmir, Türkiye

Öz

Akıllı sayaç; kayıp-kaçak oranını azaltma, uzaktan okuma, kontrol etme (açma-kesme) ve faturalandırmanın yanı sıra farklı zaman dilimleri için enerji tüketimi hesaplama ve böylece yük öteleme teşviki sağlama gibi özellikleri sayesinde akıllı şebekelerin önemli birer bileşenidir. Bu çalışmada, RS-485 haberleşmesi ve TCP/IP protokolü üzerinden erişim sağlanan bir akıllı sayaç verileri NI LabVIEW™ programında tasarlanan bir arayüz üzerine aktarılmıştır. Böylece, her bir sayaca ait anlık akım, gerilim, aktif-reaktif güç değerleri, aktif - reaktif tüketim ile güç katsayısı değerlerinin hem nümerik hem de grafiksel olarak görüntülenmesi, tüketiciye raporlanması ve enerji tarife dilimlerine göre fiyatlandırılması yapılmıştır. Geliştirilen kullanıcı arayüzüne uzaktan erişim sağlanarak sayaca ait tüketim verilerinin ilgili elektrik dağıtım şirketi ve tüketici tarafından anlık izlenmesi sağlanmıştır. Çalışmada sunulan yöntem, mevcut akıllı sayaç sistemlerine yeni bir ilave maliyet getirmedikten akıllı şebeke çözümlerine dolaylı olarak bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, tüketicilerin tüketim verilerini sadece fatura dönemlerinde değil sürekli olarak izlemelerine imkan verdiğinden hem enerji tasarrufu hem de puant zaman dilimindeki enerji birim fiyatlandırma politikasından dolayı şebeke üzerindeki yükün daha dengeli dağılımına da katkı sağlayabilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Yeni Nesil Akıllı Elektrik Sayacı, Uzaktan İzleme, Akıllı Şebekeler.

Abstract

Smart meter; it is an important component of smart grids thanks to its features such as reducing electricity theft and non-technical losses, remote reading, controlling (remote on-off) and billing. In addition, it provides incentives in customer side such as load shifting for different periods. In this study, smart meter data are transferred to an interface designed in NI LabVIEW™ program by using the RS-485 and TCP/IP protocol. Hence, the parameters including instantaneous current and voltage, total active and reactive consumption and power factor can be both numerically and graphically monitored over the developed user interface. The method indirectly provides a contribution to smart grid solutions without requiring any additional investment for the existing smart meter systems. Moreover, since it allows consumers to continuously monitor consumption data not only during billing periods, it can also contribute to a more balanced distribution of the load on the grid due to the energy pricing policy in both energy savings and peak time periods.

Keywords: Smart Meter, Remote Monitoring, Smart Grids.

I. GİRİŞ

Akıllı elektrik şebekeleri kavramı ile birlikte, kayıpların azaltılması, tedarik sürekliliğinin iyileştirilmesi, bütünsel yük yönetimi, manuel süreçlerin asgari seviyeye indirilmesi, kullanıcıların gerçek zamanlı olarak tüketim bilgilerine erişimleri ve piyasaya katılımlarının sağlanması, dinamik tarife uygulamaları, gerçek zamanlı talep takibi, gelişmiş talep tarafı yönetimi gibi mevcut şebeke işleyiş yapısının ötesinde kavramlar oluşmuştur [1]. Akıllı sayaç sistemleri, enerji tüketim noktalarındaki ölçü sistemleri ile merkezi veri sistemi arasında uzaktan iletişim kurarak güvenli bir şekilde veri iletimini gerçekleştiren donanım, yazılım ve haberleşme altyapılarından oluşmaktadır [2]. Akıllı sayaç altyapısı ve veri yönetimi, çift yönlü iletişim ile birlikte enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtım aşamalarında kolaylıklar sağlamaktadır. Puant zaman dilimindeki ortalama yük değerini aşan talebin enerji birim fiyatı teşvikleri ile puant olmayan zamanlara kaydırılması, şebeke yükünün daha dengeli yayılmasına katkı sağlayabilmektedir. Bunun yanı sıra akıllı şebekelerin en önemli bileşenleri arasında yer alan akıllı sayaç sistemlerinin getirdiği; gerçek zamanlı ücretlendirme ve yük kontrolü gibi uygulamalar sayesinde son kullanıcılar belirlenen enerji tarife dilimlerine uygun olarak tüketimlerini gerçekleştirebilmekte ve bu sayede de dolaylı olarak enerji tasarrufuna yönlenebilmektedirler [3,4].

Mevcut durumda ülkemizde ve dünyanın çeşitli ülkelerinde uygulamaları bulunan Otomatik Sayaç Okuma Sistemleri-OSOS (Automatic Meter Reading-AMR) haberleşmenin tek yönlü olduğu, sayaç verilerinin kısa dönem aralıklı (saatlik veya daha az) periyotlarla merkezi sisteme iletiildiği sistemlere verilen bir isimlendirmedir. Akıllı sayaç sistemi ise haberleşmenin çift yönlü olduğu, sayaç verilerinin toplanmasının yanı sıra, ölçme sistemlerine uzaktan erişim sağlanarak gelişmiş teknolojik uygulamalara imkan veren sistemlerdir [2]. Akıllı sayaçların uzaktan okuma, açma-kapama gibi sağladığı teknik özellikler özellikle kayıp kaçak oranının yüksek olduğu bölgeler için daha bir önem arz etmektedir [5-7].

Ülkemizde akıllı şebekeler konusunda yapılan çalışmaların temelini OSOS çalışmaları oluşturmaktadır. Türkiye’de faaliyet gösteren 21 Elektrik Dağıtım Şirketinin her biri, yıllık bazda belirli bir tüketim limitinin üzerinde yer alan abonelerini OSOS kapsamına almıştır. Mevcut durumda, bir elektrik sayacının damga süresi 10 yıl olarak kabul edilmektedir ve bu 10 yıllık süre sonunda damga süresi dolan sayaçların yenileri ile değiştirilmesi ya da kalibrasyonlarının yapılması şeklinde işleyiş sürdürülmektedir. Ülkemizde yaygın uygulama olarak damga süresi dolan sayaçların akıllı sayaçlar ile değiştirilmesi uygulaması ile akıllı sayaç dönüşümü başlatılmıştır [8,9].

Tüm elektrik dağıtım şirketlerinin temel hedeflerinden birisi de teknik ve teknik olmayan kayıpların azaltılmasıdır. Bu kapsamda akıllı sayaçlar kritik önem arz etmektedir [10]. Nitekim ülkemizdeki akıllı sayaç pilot uygulamalarında kayıp kaçak kullanımının azaltılmasında %35’lere varan başarı oranları sağlanmıştır [11].

Literatürde, sayaçların uzaktan okunabilmesi amacıyla çeşitli haberleşme teknolojileri yer almaktadır. Sayaçlarla haberleşme tek yönlü ya da çift yönlü olarak gerçekleştirilebilmektedir. Sayaçların endeks bilgilerinin okunmasının yanı sıra abonelere bildirim gönderme, otomatik faturalandırma ve sayaçların uzaktan açma-kesme uygulamaları da yapılabilmektedir. Son zamanlarda, mevcut enerji dağıtım hatları üzerine daha yüksek frekanstaki bilginin bindirilmesiyle sağlanan Power Line Carrier (PLC) haberleşmesi konusunda çalışmalar sürdürülmektedir [12]. Bu haberleşme yönteminde mevcut sisteme ilave kablolu veya kablosuz herhangi bir donanım gereksinimi yoktur. Haberleşme mevcut enerji hattı üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde tek bir trafo altındaki yüzlerce sayacın endeks bilgilerinin okunması ve cihazların yönetilmesi sağlanabilmektedir. Radio Frequency (RF) haberleşmesi yönteminde ise yüksek frekans dalga bandında akıllı sayaçlar ile veri toplayıcı üniteler arasında iletişim kurulmaktadır [13]. Sinyal gücüne ve kullandıkları frekans bandına bağlı olarak Bluetooth,

Wi-Fi ve Zigbee gibi haberleşme protokolleri de RF teknolojisi altında sınıflandırılabilir [14]. Şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerdeki akıllı sayaç uygulamaları için RF haberleşme teknolojisi bir çözüm olarak değerlendirilebilmektedir. M-Bus standardı (EN 13757-3) farklı üreticilerin ısı, gaz, su ve elektrik sayaçlarını uzaktan okumak için kullanılan kablolu çözümdür. Kablosuz M-Bus standardı (EN 13757-4) ise RF teknolojisi kullanarak sayaçların verilerinin okunması için kullanılan ekonomik bir çözümdür [15]. Public Switched Telephone Network (PSTN) haberleşme teknolojisinde ise temel katman olarak telekomünikasyon altyapısı kullanılmaktadır. Ancak, PLC yöntemindeki elektriksiz gürültü gibi etkenler söz konusu olmamasına rağmen işletme maliyetlerinin yüksek olması bu sistemin bir dezavantajıdır. GSM/GPRS teknolojisi ise ülkemizde sayaçların uzaktan okunmasında yaygın olarak kullanılan teknolojilerin başında gelmektedir. İlk yatırım maliyetlerinin düşük olmasına karşın işletme maliyetleri yüksektir [2]. GSM/GPRS teknolojisi, özellikle dağınık bir şekilde konumlandırılmış ve belirli tüketim değerini aşan abonelerin sayaçlarının uzaktan okunmasında tercih edilmektedir.

Elektrik perakende şirketlerinin elektrik sayaçlarının okunması ve müşterilerin faturalandırılması süreçlerinde yaşadığı bazı sıkıntılar arasında; abonelerden borçlarını tahsil edememe, bazı abonelere ulaşılamaması nedeniyle sayaçların okunamaması ve uzak noktalardaki abonelere ulaşım maliyetleri yer almaktadır.

Mevcut işleyişte ay sonu faturalandırma şeklinde bir yöntem kullanılmakta ve bu faturalandırma neticesinde borç durumuna göre abonelerin enerjisi kesilerek borçlarını tahsil etme yoluna gidilmektedir. Akıllı elektrik sayaçlarının kullanılmaya başlanması ile birlikte dağıtım şirketleri sayaca yapılan ve/veya yasal olmayan tüm müdahaleleri tespit etme, uzaktan açma-kapama işlemlerini yönetme ve sayaçların endeks bilgilerine anlık olarak erişebilme gibi imkanlara kavuşmuşlardır.

Bu çalışmada, tüketicilerin enerji tarife dilimlerine uygun olarak tüketim planlamalarını yapabilmeleri, toplam tüketim ve güncel fatura bilgilerini izleyebilmeleri amacıyla LabVIEW™ grafiksel programında akıllı sayaç verilerine erişebilen bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulama ile akıllı sayaca RS-485 portu üzerinden doğrudan erişim sağlanarak ya da sayacın RS-485 portuna bağlanan bir Wi-Fi modülü ile birlikte TCP/IP haberleşmesi üzerinden sayaca uzaktan erişim sağlanarak sayacın seri numarası, aktif - reaktif endeks bilgileri, aktif - reaktif güç bilgileri, akım, gerilim ve güç katsayısı bilgileri okunarak tüketiciye ve dağıtım şirketine raporlanmaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada deneysel araç olarak RS-485 haberleşme portuna sahip LUNA marka LSM10 modeli 1 fazlı aktif-reaktif akıllı elektronik elektrik sayacı kullanılmıştır [16]. Akıllı sayaçlar düşük güç tüketimli bir mikrokontrolöre (MCU) sahip olup elektriksel ölçümler için gerekli yeteneklere sahip olarak donatılmışlardır. Akıllı sayacın temel seviye katmanında, gerilim ve akım ölçüm katları yer almaktadır. Nötr akımını ölçmek için de ayrı bir akım ölçüm katı kullanıldığından akım ölçümü 2 ayrı kısımdan oluşmaktadır. Bu ölçüm katlarından alınan veriler enerji ölçüm entegresine girilerek UART, I2C, SPI gibi haberleşme protokollerinden birisi ile MCU'ya iletir [17,18]. Aynı zamanda, sayaç üzerindeki röle ile uzaktan açma-kesme işlemleri yapılabilmektedir. Şekil 1'de bir akıllı sayaca ait genel mimari yapı gösterilmiştir.

Uygulama materyali olarak kullanılan akıllı sayaçta akım, gerilim ve güç ölçümleri 4096 S/s (Sample/second) örnekleme alınarak gerçekleştirilir. Akıllı sayaçta akım ve gerilim ölçümü Eşitlik (1) ve (2)

kullanılarak hesaplanmaktadır [19].

$$V_{RMS} = K_v \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v^2(n)}{N}} \quad (1)$$

$$I_{RMS} = K_i \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N i^2(n)}{N}} \quad (2)$$

Burada;

V_{RMS} : Gerilimin etkin değeri

I_{RMS} : Yük akımının etkin değeri

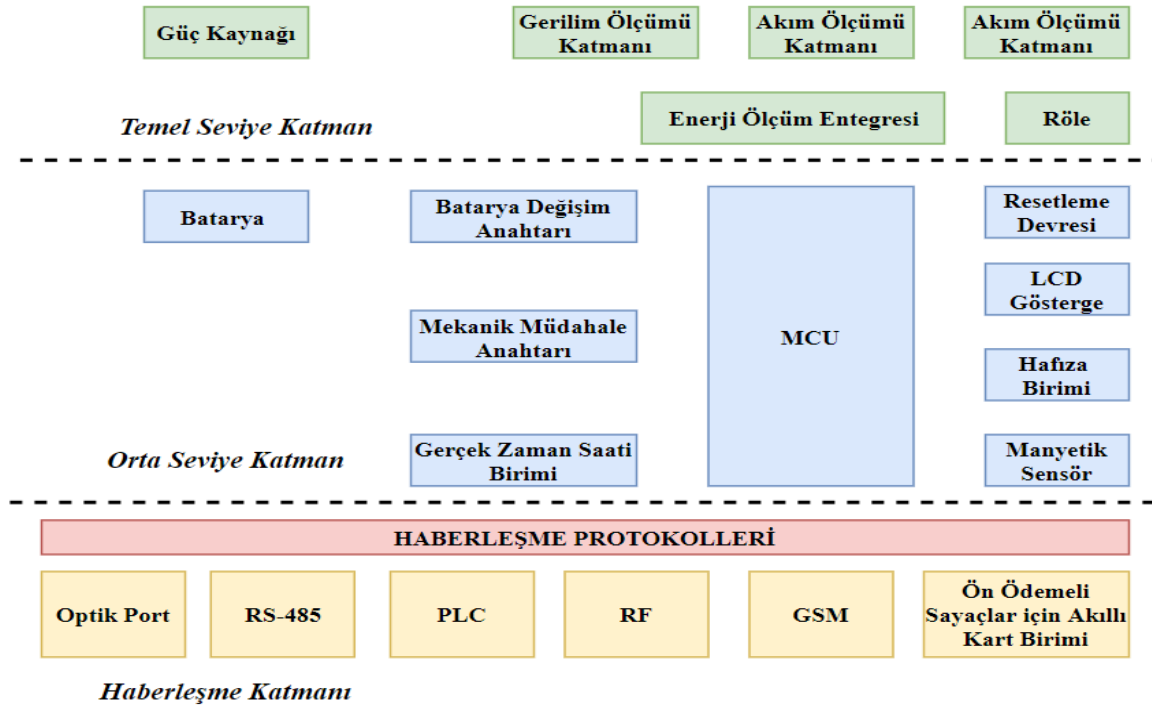
K_v : Gerilimin kazanç çarpanı

K_i : Akımın kazanç çarpanı

N : 1 saniyede örneklenen sinyal sayısı

$v(n)$: 1 saniyedeki n. gerilim değeri

$i(n)$: 1 saniyedeki n. akım değeri



Şekil 1. Akıllı sayacın genel mimarisi

Aktif ve reaktif güçler ise, ölçülen akım ve gerilim örnekleme verilerinden yola çıkılarak Eşitlik (3) ve (4) kullanılarak hesaplanmaktadır [19].

$$P_{ACT} = K_p \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v(n) \cdot i(n)}{N}} \quad (3)$$

$$P_{REACT} = K_p \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v_{90}(n) \cdot i(n)}{N}} \quad (4)$$

Burada;

P_{ACT} : Aktif güç değeri

P_{REACT} : Reaktif güç değeri

K_p : Güç için kazanç çarpanı

N : 1 saniyede örneklenen sinyal sayısı

$v_{(90)}$: Örnekleme anındaki gerilim ve akım arasındaki 90 derece faz farkı.

Akıllı sayacın orta seviye katmanında, MCU'da hesaplanan değerler LCD ekranda gösterilir ve sayacın hafızasında saklanır. Manyetik sensör ve mekanik müdahale anahtarı sayesinde sayaca yapılan müdahalelerin tespit edilip raporlanması sağlanır [20]. Akıllı sayaçların haberleşme katmanlarında ise çeşitli haberleşme protokolleri yer alabilmektedir. Müşteri tarafından talep edilen haberleşme protokollerinden bir veya bir kaç sayacın tarafından desteklenmektedir. Bu çalışmada ilk olarak, akıllı sayacın RS-485 portundan direkt olarak geliştirilen kullanıcı arayüzü üzerinden haberleşmenin sağlanabilmesi için RS-485 Okuyucu kullanılmıştır. RS-485 Okuyucu, 300-230400 baudrate aralığındaki hızları desteklemektedir. Ayrıca ikinci bir opsiyon olarak ise TCP/IP haberleşme protokolü ile akıllı sayaç verilerinin uzaktan okunabilmesi için sayacın RS-485 portuna Espressif firmasının ESP8266 modelindeki Wi-Fi modülü bağlanmıştır. Bu yapıda, kullanıcılar geliştirilen arayüz ve raporlama sistemine kullanıcı adı ve şifre bilgileri ile giriş yaparak, sayaca erişim metodunu RS-485 veya TCP/IP olarak seçebilmekte ve bu sayede sayaç endekslerini ve tüketim bilgilerini anlık olarak izleyebilmektedirler.

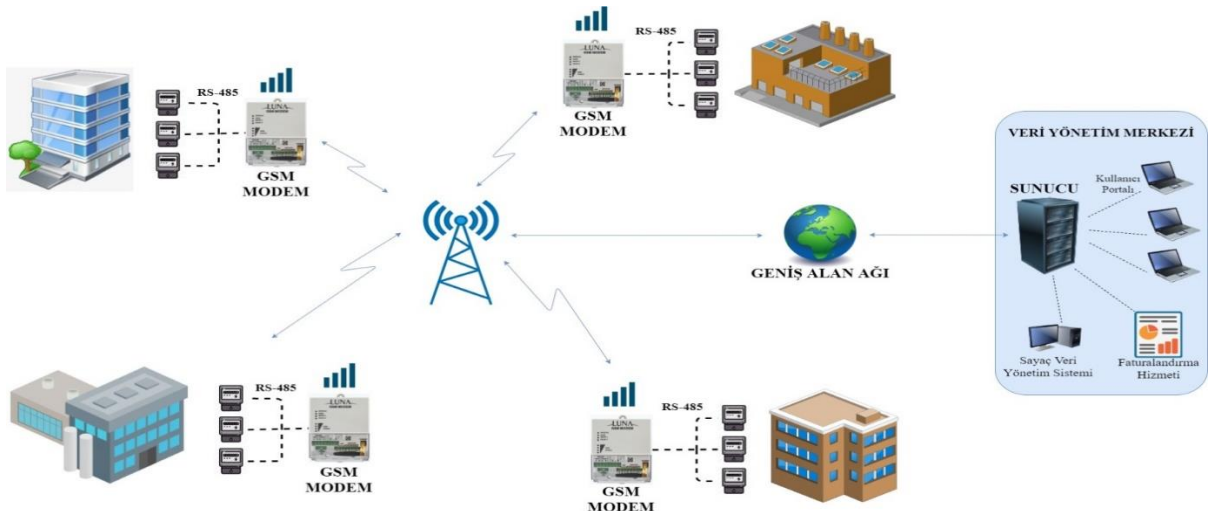
2.1. RS-485 Portu ile Akıllı Sayaçların Haberleşmesi
RS-485, seri iletişim sistemlerinde kullanılan haberleşme standardıdır. Akıllı sayaç verilerinin haberleşmeyi sağlayan modemler tarafından ya da elektronik cihazlar vasıtasıyla okunabilmesi için IEC 62056-6-1:2017 standardına göre OBIS (Object Identification System - Ortak Asgari Kodlama Yapısına) kodlamasına uyulması gerekmektedir. OBIS Kodları ile akıllı sayaçların üretici firmalarına ya da modellerine bağlı olmaksızın, her bir verinin standart olarak belirlenmiş özel kodlar ile sorgulanması ve okunması sağlanmaktadır. Bu çalışmada akıllı sayaçtan okunan verilere ait OBIS kodları Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Akıllı sayaç ortak asgari kodlama yapısı (OBIS KOD tablosu)

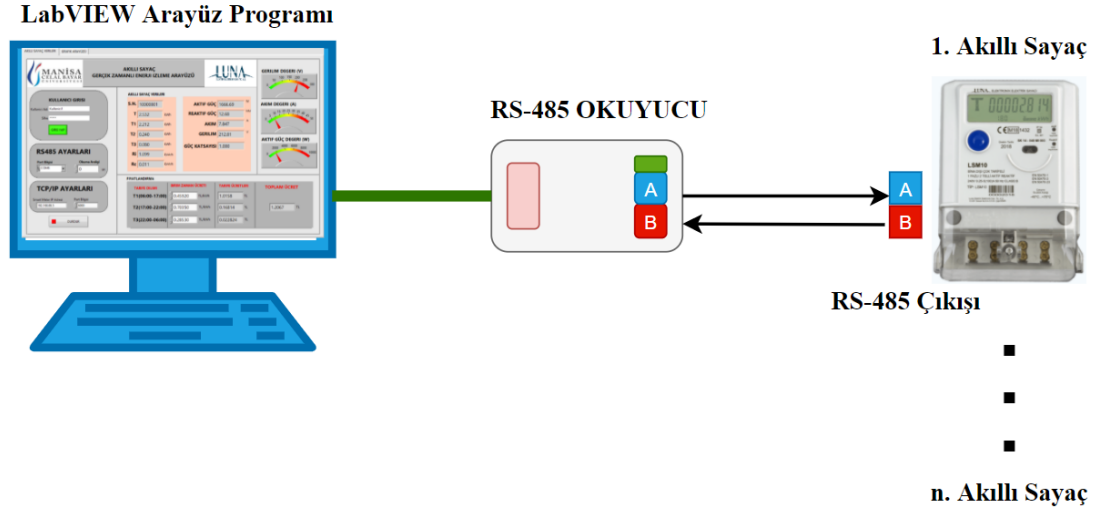
OBIS Kodu	Açıklama	Veri Formatı
0.0.0	Sayaç seri numarası	
1.8.0	Kümülatif aktif enerji	(123456.789)
1.8.1	Gündüz tarifesi toplam enerji	(123456.789)
1.8.2	Puant tarifesi toplam enerji	(123456.789)
1.8.3	Gece tarifesi toplam enerji	(123456.789)
5.8.0	Reaktif endüktif	(123456.789)
8.8.0	Reaktif kapasitif	(123456.789)
33.7.0	Güç katsayısı	(1.23)
32.7.0	Gerilim değeri	(123.4)
31.7.0	Akım değeri	(123.4)

Mevcut OSOS uygulamalarında GSM haberleşme teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Sayaç verilerinin RS-485 haberleşme portu üzerinden GSM modemlere aktarılması sayesinde merkezi veri sistemleriyle iletişim kurulmaktadır. Bu sayede enerji yönetimi, enerji kayıplarının ve kaçak kullanımın tespiti, otomatik arıza tespiti ve otomatik faturalandırma gibi avantajlar elde edilmektedir. OSOS sistem mimarisi Şekil 2'de verilmiştir. Bu yapıda, bir GSM modem üzerinden maksimum 64 sayaca kadar okuma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Sayaçlardaki RS-485 haberleşmesi uygulamalarına bir diğer örnek ise PLC haberleşme teknolojisidir. Bu sistemde apartmanlar, iş merkezleri, alışveriş merkezleri gibi alanlarda PLC haberleşmesi uygulamaları için her bir sayacın kendi üzerinde PLC modülü bulundurmasına da ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu tür sayaçlar, RS-485 portu ile tek bir PLC modeme seri bağlanarak haberleşmektedir [10].

NI LabVIEW™ ortamında geliştirilen program ile akıllı sayacın RS-485 portu üzerinden haberleşme yöntemi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. OSOS sistem mimarisi

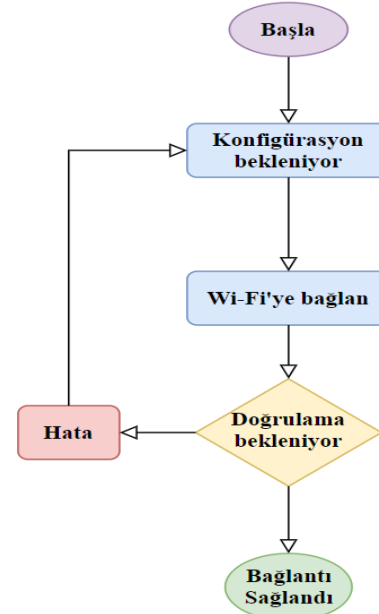


Şekil 3. RS-485 portu üzerinden akıllı sayaç ve NI LabVIEW™ programı haberleşmesi

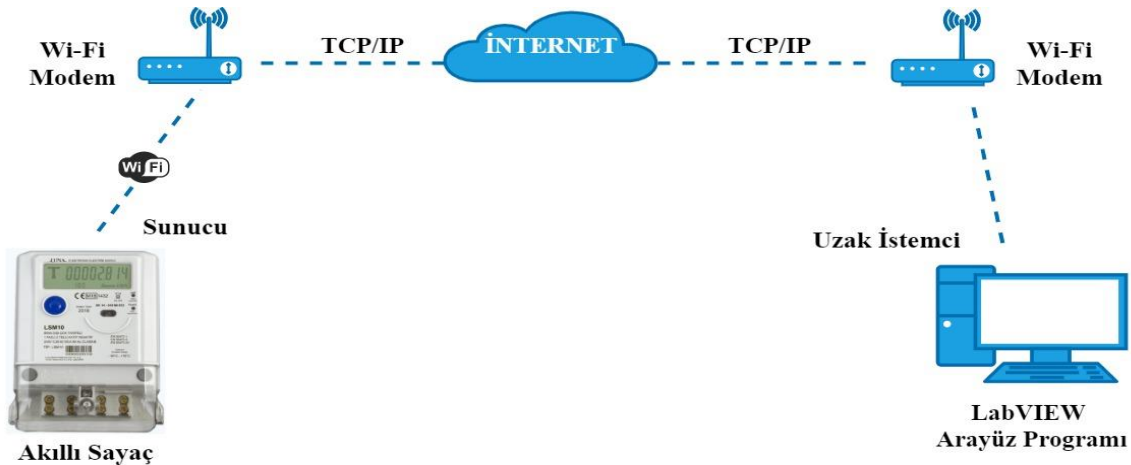
2.2. TCP/IP Protokolü ile Sayaç Verilerinin Görselleştirilmesi

NI LabVIEW™ ortamında geliştirilen program ile akıllı sayaca uzaktan erişimin sağlanabilmesi için akıllı sayaca bir Wi-Fi modülü ilave edilmiştir. Sayacın RS-485 portuna, RS485-TTL UART Converter vasıtasıyla Wi-Fi modülü bağlanmıştır. Bu işlem için Espressif firmasının ESP8266 modelindeki Wi-Fi ürünü tercih edilmiştir. ESP8266 Wi-Fi modülü, 32-bit düşük güç tüketimli işlemciye ve TCP/IP stack desteğine sahiptir. 2.4 GHz frekans bandında çalışan bu modül, IEEE 802.11 b/g/n protokollerini desteklemektedir [21].

Bu modül sayesinde, sayaç bir sunucu görevi görmektedir. Bu modülün bağlandığı Wi-Fi modemde port yönlendirilmesi yapılarak sayacın uzaktan erişiminin açık hale getirilmesi sağlanmıştır. Wi-Fi modülünün konfigürasyonlarının yapılabilmesi için izlenen akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Akıllı Sayaç Wi-Fi modülü konfigürasyonu akış diyagramı



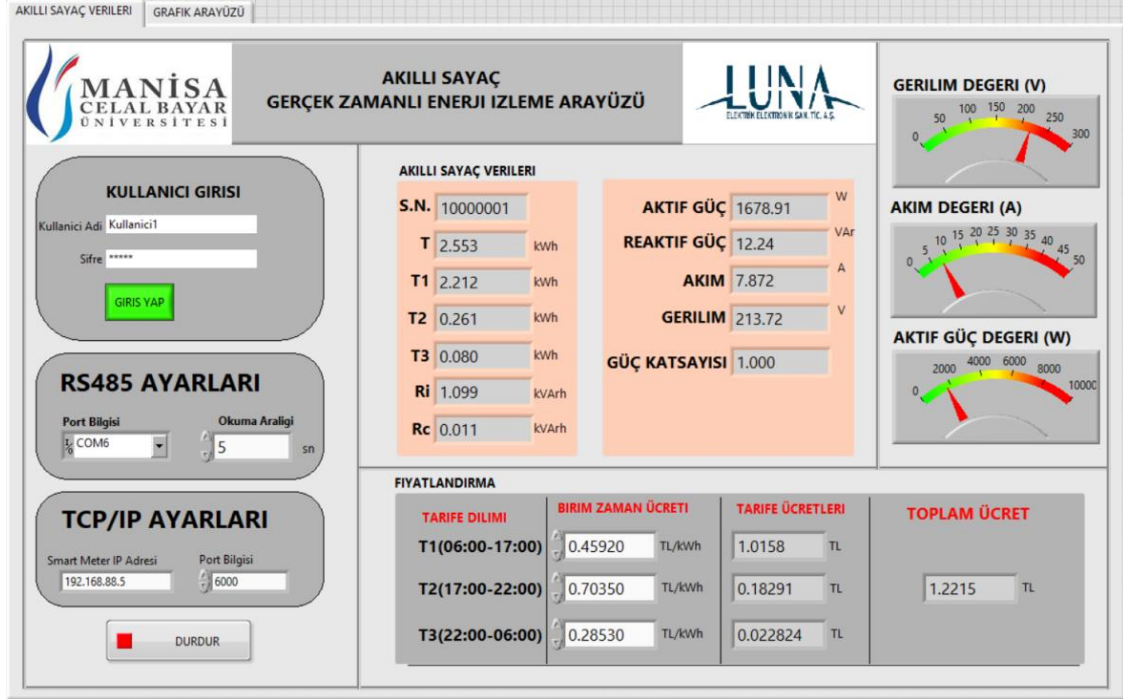
Şekil 5. TCP/IP Protokolü ile sayacın uzaktan okunması

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

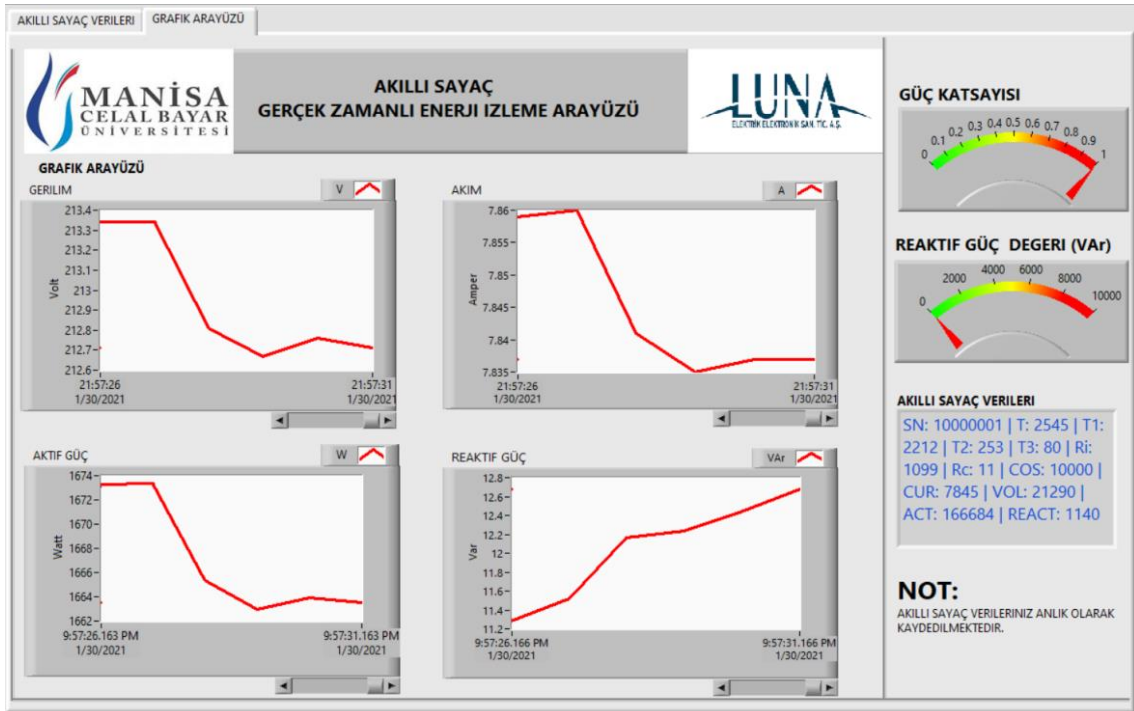
Akıllı sayaçlar 60, 30 ve 15 dakikalık periyodlar ile uzaktan okunabilmektedir. Bu çalışmada, akıllı sayaç verilerine erişim TCP/IP haberleşme protokolü üzerinden 5 S/s olarak seçilmiştir. Fakat, izleme arayüzünde örnekleme hızı kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Şekil 6'da geliştirilen kullanıcı arayüzü, Şekil 7'de ise sayaç verilerinin grafiksel

olarak gösterildiği arayüz ekranı verilmiştir.

Sayaçtan okunan veriler sırasıyla; sayaç seri numarası, toplam tüketim, T1, T2, T3 zaman dilimindeki enerji tüketimleri, reaktif-endüktif ve reaktif-kapasitif güç değerleri, güç katsayısı, akım, gerilim, aktif tüketim ile reaktif anlık güç değerlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, sayaç verilerinin Excel formatında zamana göre kaydedilmesine ait veri ekranı Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 6. TCP/IP haberleşmesi ile sayaca uzaktan erişim arayüzü



Şekil 7. Akıllı sayaç verilerinin grafiksel olarak izlenmesi

Tablo 2. Akıllı sayaç verilerinin Excel formatında anlık olarak raporlanması

Tarih ve Saat	Sayaç Seri No	T (kWh)	T1 (kWh)	T2 (kWh)	T3 (kWh)	Ri (kVah)	Rc (kVah)	Güç Katsay.	AKIM (A)	GERİLİM (V)	AKTİF GÜÇ (W)	REAKTİF GÜÇ (VA)	T1 ÜCRET	T2 ÜCRET	T3 ÜCRET	TOPLAM ÜCRET (TL)
1/30/2021 21:56	10000001	2.524	2.212	0.232	0.08	1.099	0.011	1	7.465	214.61	1507.94	11	1.016	0.163	0.023	1.201
1/30/2021 21:56	10000001	2.524	2.212	0.232	0.08	1.099	0.011	1	7.465	214.61	1507.94	11	1.016	0.163	0.023	1.201
1/30/2021 21:56	10000001	2.524	2.212	0.232	0.08	1.099	0.011	1	7.465	214.61	1507.94	11	1.016	0.163	0.023	1.201
1/30/2021 21:56	10000001	2.524	2.212	0.232	0.08	1.099	0.011	1	7.465	214.61	1507.94	11	1.016	0.163	0.023	1.201
1/30/2021 21:56	10000001	2.524	2.212	0.232	0.08	1.099	0.011	1	7.465	214.61	1507.94	11	1.016	0.163	0.023	1.201
1/30/2021 21:56	10000001	2.524	2.212	0.232	0.08	1.099	0.011	1	7.465	214.61	1507.94	11	1.016	0.163	0.023	1.201
1/30/2021 21:56	10000001	2.529	2.212	0.237	0.08	1.099	0.011	1	7.859	212.93	1669.99	12.32	1.016	0.163	0.023	1.202
1/30/2021 21:56	10000001	2.529	2.212	0.237	0.08	1.099	0.011	1	7.854	212.9	1668.73	12.36	1.016	0.167	0.023	1.202
1/30/2021 21:56	10000001	2.53	2.212	0.238	0.08	1.099	0.011	1	7.852	212.88	1668.13	12.36	1.016	0.167	0.023	1.205
1/30/2021 21:57	10000001	2.531	2.212	0.239	0.08	1.099	0.011	1	7.855	213	1669.87	11.92	1.016	0.167	0.023	1.206
1/30/2021 21:57	10000001	2.531	2.212	0.239	0.08	1.099	0.011	1	7.854	212.97	1669.28	12.32	1.016	0.168	0.023	1.206
1/30/2021 21:57	10000001	2.532	2.212	0.24	0.08	1.099	0.011	1	7.847	212.81	1666.69	12.68	1.016	0.168	0.023	1.207
1/30/2021 21:57	10000001	2.532	2.212	0.24	0.08	1.099	0.011	1	7.845	212.76	1665.69	12.68	1.016	0.169	0.023	1.207
1/30/2021 21:57	10000001	2.533	2.212	0.241	0.08	1.099	0.011	1	7.844	212.78	1665.73	11.84	1.016	0.169	0.023	1.207
1/30/2021 21:57	10000001	2.533	2.212	0.241	0.08	1.099	0.011	1	7.847	212.88	1667.08	11.64	1.016	0.17	0.023	1.207
1/30/2021 21:57	10000001	2.534	2.212	0.242	0.08	1.099	0.011	1	7.856	213.09	1670.73	12.08	1.016	0.17	0.023	1.208
1/30/2021 21:57	10000001	2.534	2.212	0.242	0.08	1.099	0.011	1	7.853	213.09	1670.02	12.08	1.016	0.17	0.023	1.208
1/30/2021 21:57	10000001	2.535	2.212	0.243	0.08	1.099	0.011	1	7.85	212.97	1668.47	11.92	1.016	0.17	0.023	1.209
1/30/2021 21:57	10000001	2.535	2.212	0.243	0.08	1.099	0.011	1	7.847	212.95	1667.72	12.08	1.016	0.171	0.023	1.209

IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada; tüketicilerin akıllı sayaç verilerini anlık olarak izleyebilmelerine imkan tanıyan bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Akıllı sayaç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan RS-485 haberleşmesine sahip bir elektrik sayacına erişim sağlanarak elektriksel parametreler okunmuş ve LabVIEW™ programı ile geliştirilen kullanıcı arayüzü üzerinden anlık izleme ve geçmişe dönük tüketim verilerinin raporlanması sağlanmıştır.

Bunun yanı sıra, akıllı sayaçın RS-485 haberleşme portuna bir Wi-Fi modülü eklenerek, sayaç verilerine mobil cihazlar üzerinden erişilebilmesi için gerekli donanımsal altyapı oluşturulmuştur. Böylece, tüketicilerin tüketim verilerini kolaylıkla izlemesi ve analiz etmesi mümkün hale gelecektir. Verilerin enerji tarife dilimlerine göre fiyatlandırılması, tüketicilerin daha bilinçli bir tüketim davranışına yönlendirilmesine ve aynı zamanda farklı zaman dilimleri için tanımlanan enerji birim fiyatı teşviklerinden dolayı dağıtım şebekesindeki yük talebinin daha dengeli bir dağılım göstermesine katkı sağlayabilecektir. Ayrıca, bu çalışmada sunulan yöntem, Wi-Fi tabanlı yeni nesil akıllı sayaç uygulamalarının geliştirilmesi için de bir zemin oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Akıllı Şebekeler 2023 Vizyon ve Strateji Belirleme Projesi, ELDER, EPDK., <https://www.akillisebekelerturkiye.org/>, (Haziran 2020).
- [2] Deloitte, "Deloitte Türkiye Yayınları, Akıllı Sayaç Sistemleri: Avrupa uygulamaları analizi ve Türkiye uygulamaları üzerine düşünceler," <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/tr/Documents/energy-resources/akilli-sayac-sistemleri.pdf>, (Haziran 2020).
- [3] Dileep, G. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 146, 2589-2625.
- [4] Bayindir, R., Colak, I., Fulli, G., & Demirtas, K. (2016). Smart grid technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 499-516.
- [5] Alahakoon, D., & Yu, X. (2015). Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(1), 425-436.
- [6] BAYINDIR, R., & DEMİRTAŞ, K. (2014). Akıllı Şebekeler: Elektronik Sayaç Uygulamaları. *Politeknik Dergisi*, 17(2), 75-82.
- [7] Sun, Q., Li, H., Ma, Z., Wang, C., Campillo, J., Zhang, Q., ... & Guo, J. (2015). A comprehensive review of smart energy meters in intelligent energy networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(4), 464-479.
- [8] Özemür, M., & Soysal, B. (2013). Akıllı Şebekeler Yolunda Akıllı Sayaçlar. *Akıllı Şebekeler Sempozyumu*.
- [9] Dağıtım Şirketlerince Kurulacak Osos Kapsamına Dahil Edilecek Sayaçların, Haberleşme Donanımının ve İlave Teçhizat ve Altyapının Ortak Asgari Teknik Özellikleri, <https://www.epdk.org.tr/>, (Haziran 2020).
- [10] Colak, I., Bayindir, R., Fulli, G., Tekin, I., Demirtas, K., & Covrig, C. F. (2014). Smart grid opportunities and applications in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 344-352.
- [11] Kocaman, B. Teknik Olmayan Enerji Kayıplarının Azaltılmasında PLC Sayaçlarının Önemi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 220-230.
- [12] Galli, S., & Lys, T. (2015). Next generation narrowband (under 500 kHz) power line communications (PLC) standards. *China Communications*, 12(3), 1-8.
- [13] Usta, O., Sonsuz, K., & Eksi, S. (2008). Akıllı Sayaç Okunma Sistemleri için Alternatif İletişim Ağlarının Değerlendirilmesi, 13. *Ulusal Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Kongresi, Ankara*.
- [14] Khalifa, T., Naik, K., & Nayak, A. (2010). A survey of communication protocols for automatic meter reading applications. *IEEE communications surveys & tutorials*, 13(2), 168-182.
- [15] Carratù, M., Ferro, M., Paciello, V., Pietrosanto, A., & Sommella, P. (2017). Performance analysis of wm-bus networks for smart metering. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 7849-7856.

-
- [16] LUNA Akıllı Sayaçlar, <https://www.lunatr.com/>, (Haziran 2020).
- [17] Abate, F., Carratù, M., Liguori, C., & Paciello, V. (2019). A low cost smart power meter for IoT. *Measurement*, 136, 59-66.
- [18] Al-Turjman, F., & Abujubbeh, M. (2019). IoT-enabled smart grid via SM: An overview. *Future Generation Computer Systems*, 96, 579-590.
- [19] Implementation of a Single-Phase Electronic Watt-Hour Meter Using the MSP430F6736 (A), <http://www.ti.com/lit/an/slaa517e/slaa517e.pdf>, (Haziran 2020).
- [20] Barai, G. R., Krishnan, S., & Venkatesh, B. (2015, October). Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid-a review. In *2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)* (pp. 138-145). IEEE.
- [21] ESP8266 Series Development Boards, <https://www.espressif.com/en/products/hardware/development-boards>, (Haziran 2020).

Kendinden Tahrikli Yükseltilebilen Seyyar İş Platformlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Analizi

Analysis of Occupational Health and Safety in Self-propelled Mobile Elevating Work Platforms

Murat Ramazan İLTAR¹ , Ayhan ONAT² 

¹Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

²Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

Öz

Yüksekte yapılan çalışmalarda gerek toplu koruma tedbirlerinin alınmaması gerekse de uygun iş ekipmanı ve kişisel koruyucu donanımların kullanılmaması yüzünden yüksekte düşme sebepli iş kazaları çok sık yaşanmaktadır. Bu sebeple yüksekte yapılan çalışmalarda kullanılan klasik iskele, merdiven vb. kullanmak yerine yükseltilebilen seyyar iş platformları (YSİP)'nin kullanımının arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada sektörün ana paydaşları olan üretici/distribütör ve YSİP kiralama firması, YSİP kiralayan firmalar, YSİP operatörleri ve sektörde çalışan iş güvenliği uzmanlarını kapsayan bir anket çalışmasıyla, iş sağlığı ve güvenliği açısından YSİP sektörü ve çalışanlarının mevcut durumunun analiz edilmesi amaçlanmıştır. Anket soruları için Likert'in 5'li ölçek tipi kullanılmış olup, SPSS istatistik paket programı vasıtasıyla verilen cevaplar değerlendirilerek Cronbach's Alpha güvenilirlik analizi yapılmıştır. Verilen cevaplara göre YSİP üreticileri, distribütörleri ve kiralamasını yapan firmalar için "Yeni alacağımız ekipmanlarda teknolojik üstünlükleri karşılaştırırım" ve "Yeni alacağımız ekipmanlarda mekanik üstünlükleri karşılaştırırım" sorularına verilen cevaplar en yüksek ortalamalı cevaplar olurken; iş güvenliği uzmanları için "İskelede, merdivende vb. çalışmak yerine YSİP'ler üzerinde çalışmak daha güvenlidir." sorusuna verilen cevap en yüksek ortalamalı cevap olmuştur. Operatörlerin "YSİP'lerde çalışırken karşılaştığım risk ve tehlikeler hakkında bilgim vardır." sorusuna verdikleri cevap ile en yüksek değerli cevap olurken YSİP kullanan firmaların "Operatörlerin iskelede, merdivende vb. çalışması yerine YSİP üzerinde çalışması daha güvenlidir." sorusuna verdikleri cevap en yüksek ortalamalı cevap olmuştur. Ayrıca çalışma gruplarına acil durum tatbikatlarını faydalı bulup bulmadıkları, çalışan temsilcisi/iş güvenliği uzmanının faydalı olup olmadığı, YSİP'lerle çalışırken yüksekte düşme hakkındaki fikirleri ve iskele, merdiven vb. çalışmak yerine YSİP üzerinde çalışmanın daha güvenli bulup bulmadıkları gibi bazı sorular ortak sorulmuş olup, karşılaştırmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yükseltilebilen Seyyar İş Platformu, Kendinden Tahrikli Yükseltilebilen Seyyar İş Platformu, İş Sağlığı ve Güvenliği, Yüksekte Çalışma, İş Kazası

Abstract

Occupational accidents caused by falling from height are very common due to not taking collective protection measures and not using appropriate work equipment and personal protective equipment during work at heights. For this reason, instead of using classical scaffolding, stairs etc., it has been observed that using of mobile elevating work platforms (MEWP) has increased. In this study, it is aimed to analyze the current situation of the MEWP sector and MEWP manufacturers / distributors and MEWP leasing companies, companies which rent MEWP, MEWP operators and occupational safety experts who works in terms of occupational health and safety. The questionnaire questions are prepared Likert's 5-scale scale type and evaluated through by SPSS statistical package program. Also Cronbach's Alpha reliability analysis was performed. According to the answers given by MEWP manufacturers, distributors and companies which making leasing that. "I compare the technological superiorities in the equipment we will buy new" and "I compare the mechanical advantages in the equipment we will buy" are the highest average answers. According to the answers given by occupational safety experts that "it is safer to work on MEWPs instead of on the scaffolding or on the stairs, etc." is the highest average answer. As reported by the answers given by MEWP operators that "I have information about the risks and dangers while working in MEWP." is the highest average answer. In accordance with the answers given by the companies which use MEWP that "It is safer to work on MEWP instead of on the scaffolding or on the stairs, etc." is the highest average answer. In addition to this, some questions are asked jointly and compared. For instance; whether they find emergency drills useful, whether the employee representative / occupational safety experts are useful, what they think about falling from height while working with MEWP, what they think about working MEWP safer instead of scaffolding, stairs, etc.

Keywords: Mobile Elevating Work Platform, Self-propelled Mobile Elevating Work Platform, Occupational Health and Safety, Working at Height, Occupational Accident

I. GİRİŞ

Ülkemizde 30.06.2012 tarih ve 28339 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile iş yerlerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve mevcut sağlık ve güvenlik şartlarının iyileştirilmesi için işveren ve çalışanların görev, yetki, sorumluluk, hak ve yükümlülüklerini düzenlemektedir. Yüksekte çalışmalarda iş güvenliği açısından yapılan en önemli değişiklik de yine ilgili kanununun 30. maddesine atıf yapılarak hazırlanan ve 05.10.2013 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğidir. Bu yönetmeliğin Ek-4 a.1 maddesinde yüksekte çalışma tanımlanmıştır. Bu maddeye göre yüksekte çalışma; “Seviye farkı bulunan ve düşme sonucu yaralanma ihtimalinin oluşabileceği her türlü alanda yapılan çalışma; yüksekte çalışma olarak kabul edilir.” şeklinde yeniden tanımlanmıştır [1,2]. Yüksekte çalışmalarda geleneksel olarak kullanılan iskelelerde gerek zemin kaynaklı sebepler gerekse de statik problemler sebebiyle yaşanan iş kazalarının olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla yükseltilebilen seyyar iş platformları (YSİP)’nin kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. İskelelere göre daha güvenli bir çalışma ortamı sunan YSİP’lerin de kendi içlerinde barındırdıkları riskler mevcuttur. Örneğin; yüksekten düşme, devrilme, sıkışma vb. riskler YSİP’lerde karşılaşılabilen risklerdendir. Yüksekte yapılan çalışmalarda en sık kullanılan ekipman olarak iskele ve merdiven yerine ilk kez 1944 yılında Jay Eitel tarafından icat edilen ve o dönem kiraz toplamak amacıyla kullanıldığı için Cheery Picker olarak adlandırılan, günümüzde ise yükseltilebilen seyyar iş platformu olarak tanımlanan bu iş ekipmanlarının kullanımı çalışanların hem daha yüksek seviyelerde hem de daha güvenli bir ortamda çalışmalarını sağlamaktadır [3]. Ercan, A., çalışma hayatında karşılaşılan iş kazası ve meslek hastalıklarının çeşitli faktörlerden meydana geldiğini ifade etmiş ve bu faktörleri çeşitli kategorilere ayırmıştır. Bunlardan fiziksel faktörler; sıcaklık, nem, gürültü vb., kimyasal faktörler; katı, sıvı, gaz halinde bulunan kimyasal ve patlayıcı maddeler vb., biyolojik faktörler; bakteri, virüs, mikrop vb., psikolojik faktörler; insan ilişkileri sırasında karşılaşılan olumsuz durumlar ve uyuşmazlıklar, kişisel faktörler; kurallara riayet etmeme, kişisel koruyucu donanım kullanmama, yapılan işle ilgili eğitimsizlik, karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı bilinçsizlik vb. olarak sıralanmıştır [4]. Delahunt, A., tarafından hazırlanan bir yayında, yüksekte çalışmalarda en çok karşılaşılan olumsuz durumların genellikle çalışanların düşmesi ya da elektrik hattı veya tavana çarpması gibi durumlar sebebiyle meydana geldiği belirtilmektedir. İş ekipmanlarının kumandası platform yerine şasi üzerinde olduğu zaman aşağıda çalışan personel yukarıdakinin çalışma ortamını bilemeyeceğinden yukarıda çalışan kişiyi tehlikeye atabilmekte ve hatta ölümüne sebep olabilmektedir. Kullanılacak iş platformunun da

yapılacak işe uygun olması gerekmektedir. Eğer ekipman için izin verilen çalışma yüksekliği, çalışılacak ortamın yüksekliğinden azsa yine düşme riski devam etmektedir. Bu sebeple çalışılacak ortama göre ekipman seçilmesi gerektiği tavsiye edilmektedir [5]. Dong, R.G., ve arkadaşları tarafından yayınlanan makaslı çalışma platformları üzerine yapılan bir çalışmada bu tip iş platformlarında tasarımda esnekliğin artırılması, bu araçlarda devrilme potansiyelini arttırdığını görülmüştür. Bu tür ekipmanlarda çalışanlar için platform en yüksek seviyede uzun süren tekrarlı davranışlardan veya zemine paralel dengeyi bozabilecek durumlardan kaçınılması tavsiye edilmiştir [6]. Bir diğer çalışmada ise Palani S., ve arkadaşları kendinden tahrikli yükseltilebilen seyyar iş platformlarında 10° eğimli yüzeyde ve 65° sepet eğiminde çalışma yapılabileceği belirtilmiştir [7]. Bos’njak, S., ve arkadaşları, yükseltilebilen seyyar iş platformu çeşitlerinden olan araç üstü kaldırma platformlarında yapılan bir çalışmada araç üstü uzatma kolları bağlantı yerlerinde meydana gelen kaynak deformasyonları sonucu kopma sebepleri incelemiş, aşırı yüklenme yapılması ve üretim esnasında kalitesiz kaynak işçiliği sebebiyle kaynak deformasyonlarına neden olduğu belirtilmiştir [8]. Solazzi, L., tarafından yapılan çalışmada platform üzerinde çalışma (budama) yaparken yüksekten düşmeyle sonuçlanan bir iş kazası incelenmiş bu çalışma sonucunda yük ve operatörler için güvenli ekipmanların standartlarında güncelleme yapılması tavsiye edilmiştir [9]. Pan, C.S., ve diğerleri tarafından yayınlanan bir diğer akademik çalışmada ise yüksekte çalışmalarda çoğunlukla yaşanan devrilme/düşme durumlarında zeminle olan mesafenin 3 metre üzeri ve 9 metre altı arasında olduğunu, yaşanan devrilmelerin ise %44 ile %46 oranında bomlu platformlarda, % 56 ile %54 oranında ise makaslı platformlarda meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Karşılaşılan bu devrilmelerin ise en çok inşaat ve tadilat işlerinin yapıldığı sırada meydana geldiğini belirtmişlerdir [10]. Yapılan bu çalışmada ise YSİP türlerinden olan kendinden tahrikli yükseltilebilen seyyar iş platformları ele alınmış olup, YSİP üreticisi/distribütörü ve kiralama firmaları, sektörde çalışan iş güvenliği uzmanları, bu platformlarda görev alan operatörler ve işletmelerinde YSİP kullanan firmaların iş sağlığı ve güvenliği açısından mevcut durumlarının tespit edilmesi ve analizinin yapılması amaçlanmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kendinden tahrikli yükseltilebilen seyyar iş platformları özelinde, bu platformların üretici/distribütörler ve kiralama firmalarının, sektörde çalışan iş güvenliği uzmanlarının, platformları kullanan operatörlerin ve platformları kiralarak kullanan kiracı firmaların iş sağlığı ve güvenliği açısından mevcut durumları ve iş sağlığı ve güvenliği konusundaki bakış açıları her gruba ayrı

anket soruları hazırlanarak paylaşılmış, gelen sonuçlara göre mevcut durum SPSS istatistik paket programı vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Tablo 1’de çalışma gruplarına göre katılımcı ve soru sayıları verilmiştir.

Tablo 1. Çalışma gruplarının katılımcı sayıları

Çalışma grubu	Katılımcı sayısı	Soru Sayısı
YSİP Üretici/Distribütörleri, kiralama firmaları	19	44
İş güvenliği uzmanları	30	32
YSİP kullanan operatörler	20	49
YSİP kiralayan firmalar	20	31

Sorular Likert’in 5’li ölçek yöntemiyle hazırlanmış olup, 1-Kesinlikle katılmıyorum, 2-Katılmıyorum, 3-Fikrim yok, 4-Katılıyorum, 5-Kesinlikle katılıyorum olarak numaralandırılmıştır [11]. Sorulardan elde edilen ortalamalara göre yorumlamalar yapılmış olup, ortalama değeri; 0-1,49 arasında ise hiç önemli değil, 1,50-2,49 arasında ise önemli değil, 2,50-3,49 arasında ise kararsız, 3,50-4,49 arasında ise önemli ve 4,50 üzerinde ise çok önemli olduğu şeklinde yorumlanmıştır [12]. Cevapların dağılımını görmek için standart sapma değeri hesaplanmıştır. Standart sapma; çalışma grubunda yer alan her bir verinin ortalamaya yakınlığı-uzaklığı, başka bir ifade ile dağılımıdır [13]. Hazırlanan Likert’in 5’li ölçek yönteminin güvenilirliğini belirlemek için Cronbach’s Alpha güvenilirlik analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu

yöntem, anket içi sayıdamlığı incelemek ve açıklamak için kullanılır. Cronbach’s Alpha güvenilirlik ölçüğü R2 ile gösterilmektedir. Buna göre R2 değeri; $0 < R2 < 0,40$ aralığında ise anketin güvenilir olmadığını, $0,40 < R2 < 0,60$ aralığında ise anketin düşük güvenilirlikte olduğunu, $0,60 < R2 < 0,80$ aralığında ise anketin oldukça güvenilir olduğunu, $0,80 < R2 < 1,00$ aralığında ise anketin yüksek güvenilirlikte olduğunu ifade etmektedir [14]. Ayrıca çalışma gruplarına acil durum tatbikatlarını faydalı bulma, çalışan temsilcisi/iş güvenliği uzmanını faydalı bulma, YSİP’lerle çalışırken yüksekte düşülmeyeceğini düşünme ve iskele, merdiven vb. çalışmak yerine YSİP üzerinde çalışmanın daha güvenli olduğunu düşünme gibi bazı sorular ortak sorulmuştur.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. YSİP Üreticileri/Distribütörleri ve Kiralama Firmalarına Yönelik Analiz

YSİP sektöründe çalışan YSİP üretici/distribütörleri ve kiralama firmaları özelinde yapılan anket çalışmasına 19 firma katılmış olup, katılımcıların verdikleri cevaba göre analizler yapılmıştır. Bu çalışma grubuna Tablo 2’de verilen sorular sorulmuş olup, gelen cevaplara göre ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmış ve yorumlamaları yapılmıştır. Üretici/distribütör ve YSİP kiralama firmalarına uygulanan anketin güvenilirlik oranı Cronbach Alpha güvenilirlik analizine göre % 86,7 çıkmıştır.

Tablo 2. Üretici/distribütör ve YSİP kiralama firmalarına yönelik anket soruları

Anket soruları	Ort.	σ
Müşterilerimiz YSİP’lerin kullanım alanlarını yeterince biliyorlar.	3,05	1,18
Müşterilerimize YSİP’lerin kullanım alanlarını yeterince anlatıyoruz.	4,05	0,85
Hizmet vermeden önce YSİP’lerin çalışacağı yerde/alanda keşif yapılması faydalı olur.	4,53	0,51
Hizmet vermeden önce YSİP’lerin çalışacağı yerde/alanda keşif yapıyoruz.	4,06	0,87
Müşterilerimiz doğru iş için doğru makine kullanımı konusunda yeterince bilinçlidir.	2,63	1,21
Kiralama hizmeti verirken, servis hizmetini de bizim vermimiz daha faydalıdır.	4,33	1,14
Kiralama hizmeti verirken, servis hizmetini dışarıdan almak daha faydalıdır.	1,72	1,18
Kiralama sözleşmesi yapmadan kiralama hizmeti verilmemelidir.	4,68	0,82
Makine parkındaki tüm YSİP’lerin sigortaları mevcuttur.	3,89	1,20
Kiralama filo yönetimi için bir yazılım kullanmak faydalıdır.	4,37	0,90
Kiralama filo yönetimi için kullandığımız yazılım işlerimizi kolaylaştırıyor.	3,79	1,03
Operatörlü ekipman kiralamak şirketimiz için daha kolaydır.	2,26	0,87
Operatörsüz ekipman kiralamak şirketimiz için daha kolaydır.	3,79	0,85
Şehir dışına kiralama hizmeti vermekte zorlanmıyoruz.	3,47	1,26
Yurtdışına kiralama hizmeti vermekte zorlanmıyoruz.	3,37	1,07
Çalıştırdığımız tüm operatörlerin mevzuatlara uygun olarak alınmış belgeleri vardır.	4,06	0,87
Sektördeki mevcut operatörlerin eğitimi, becerisi yeterlidir.	2,37	0,83
YSİP operatörlerine mesleki yeterlilik belgesi zorunluluğu faydalı olacaktır.	3,68	1,38
Sektördeki mevcut operatör sayısı yeterlidir.	2,21	0,98
Kiralayanların/Çalışanların platform üzerinde istedikleri yeni talepleri standartlara uygunsuz dikkate alırız.	4,11	0,74
Firmamızda platformda karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı yapılan acil durum tatbikatı düzenli yapılıyor.	3,67	1,08
Platformda karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı yapılan acil durum tatbikatları faydalı oluyor.	4,12	0,86
İşyerimizde iş güvenliği uzmanı görevlendiriyoruz.	4,35	1,22
İşyerimizde çalışanlarla ilgilenen çalışan temsilcisi vardır.	4,29	1,05
Çalışanlarımızın iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yaşadığı sorunları, öneri ve isteklerini çalışan temsilcisi/iş güvenliği uzmanı her zaman bizimle paylaşıyor.	4,47	0,80
Çalışan temsilcisinin/iş güvenliği uzmanının sorunların çözümüne katkısı olduğuna inanıyorum.	4,35	0,86
Çalışanların işe başlamadan önce sağlık kontrolleri eksiksiz yapılıyor.	4,47	0,72

Çalışanların periyodik sağlık kontrolleri yapılıyor	4,53	0,62
Çalışanlarımıza ilkyardım eğitimi verildi.	4,35	0,86
Çalışanlarımız acil durumda gereken ilkyardımları yapabilirler.	3,88	0,99
Çalışanlarımıza kişisel koruyucu donanımları eksiksiz verildi.	4,59	0,62
Kişisel koruyucu donanımların yenileme süresi yeterlidir.	4,41	0,62
Çalışanlarımızın iş sağlığı ve güvenliği anlamında eksikliği tespit edilirse uyarılırlar.	4,41	0,87
İşyerimizde ramak kala formu düzenlenir.	3,88	1,32
Yeni alacağımız ekipmanlarda teknolojik üstünlükleri karşılaştırırım.	4,71	0,59
Yeni alacağımız ekipmanlarda mekanik üstünlükleri karşılaştırırım.	4,71	0,59
Yeni alacağımız ekipmanlarda tasarımsal üstünlükleri karşılaştırırım.	4,59	1,00
Yeni alacağımız ekipmanlarda ekonomik üstünlükleri karşılaştırırım.	4,65	0,61
Sektörde diğer rakip firmaların teknolojik üstünlükleri sebebiyle rekabet etmekte zorlanıyorum.	2,06	1,03
Sektörde diğer rakip firmaların mekanik üstünlükleri sebebiyle rekabet etmekte zorlanıyorum.	1,94	0,90
Sektörde diğer rakip firmaların tasarım üstünlükleri sebebiyle rekabet etmekte zorlanıyorum.	1,88	1,02
Sektörde diğer rakip firmalarla ekonomik sebeplerden dolayı rekabet etmekte zorlanıyorum.	3,06	1,34
İş güvenliği için harcadığımız bütçe gereksizdir.	1,33	0,59
İş güvenliğini geliştirmek için ar-ge (sanal gerçeklik vb.) çalışmaları yaparız.	3,18	1,24
Genel Ort.	3,69	0,43

Firmaların ankete verdiği cevaplara göre; hizmet sundukları firmalara YSİP'lerin kullanım alanlarını yeterince anlattıkları anlaşılmaktadır. Firmalara hizmet verilmeden önce keşif yapılmasının gerekli ve yapılan keşiflerin de faydalı olduğu düşünülmektedir. Katılımcılar, kiralama ve servis hizmetinin bir arada sunulmasının önemli olduğunu düşünmektedir. Ayrıca sözleşme yapılmadan hizmet sunulmamasının gerektiğini vurgulamaktadırlar. Filo yönetim yazılımı kullandıklarını ve kullanılmasını faydalı buldukları da öne çıkan sonuçlardandır. Firmaların verdikleri cevaplara göre, operatörsüz kiralama hizmeti sunulmasının daha kolay olduğu, mevcut operatörlerin mevzuata uygun belgelerinin bulunduğu, operatörlere MYK belgesinin zorunlu olmasının faydalı olacağı ve mevcut operatör sayısının yetersiz olduğunu düşünülmektedir. Hizmet sunulan firmalardan ve çalışanlardan gelen standartlara uygun yenilikçi taleplere açık oldukları da önemli çıkan sonuçlardandır. Firmalar ayrıca iş sağlığı ve güvenliği konusunda acil durum tatbikatlarını düzenlediklerini ve düzenlenen tatbikatların faydalı olduğunu, iş güvenliği uzmanı ve çalışan temsilcisi görevlendirdiklerini, çalışan-ış güvenliği uzmanı-çalışan temsilcisi arasında paylaşım olduğunu ve iş güvenliği uzmanı ile çalışan temsilcisinin sorunların çözümünü konusunda faydalı olduğunu düşünmektedirler. Katılımcıların verdikleri cevaplara göre çalışanların ilk giriş sağlık muayenesi ve periyodik sağlık kontrollerinin yapıldığı, çalışanlara ilk yardım eğitimi verildiği ve çalışanların acil durumda ilk yardım yapabileceklerini düşündükleri sonucu da çıkmaktadır. Ayrıca firmalar tarafından çalışanlara KKD'lerin eksiksiz verildiği ve verilen KKD'lerin yenileme sürelerinin yeterli

olduğu düşünülmektedir. Katılımcılar iş sağlığı ve güvenliği anlamında eksikliği tespit edilen personelin uyarıldığını, ramak kala formlarının düzenlendiğini ifade etmişlerdir. Firmalar yeni ekipman alımı sırasında teknolojik ve mekanik üstünlükleri diğer kriterlere göre daha önemli buldukları, bu kıyaslamalardan sonra ekonomik üstünlüğe baktıklarını ifade etmişlerdir. Sektörde rekabet ederken en çok ekonomik sebeplerle rekabet etmekte zorlandıkları, teknolojik ve mekanik sebeplerle rekabet etmekte zorlanma yaşamadıklarını belirtmişlerdir. Firmaların iş sağlığı ve güvenliği için ayrılan bütçeyi gereksiz bulmadıklarını belirtmişlerdir. Likert'in 5'li ölçeğine göre bu çalışma grubunda en yüksek ortalama değer 4,71 ile "Yeni alacağımız ekipmanlarda teknolojik üstünlükleri karşılaştırırım" ve "Yeni alacağımız ekipmanlarda mekanik üstünlükleri karşılaştırırım" sorularına olmuştur. Ayrıca en düşük değer 1,33 ile "İş güvenliği için harcadığımız bütçe gereksizdir." sorusuna verilen cevap olmuştur. Firmaların bu soruya katılmadığı dolayısıyla iş güvenliğine önem verdikleri ve iş sağlığı ve güvenliği için gereken bütçeyi ayırdıkları anlaşılmaktadır. Böylece çalışanlarına daha güvenli bir çalışma ortamı hedefledikleri düşünülmektedir.

3.2. İş Güvenliği Uzmanlarına Yönelik Analiz

İş güvenliği uzmanlarına yönelik yapılan anket çalışmasına 30 kişi katılmış olup, bu çalışma grubuna sorulan sorular Tablo 3'de verilmiştir. Gelen cevapların ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır. İş güvenliği uzmanlarına yönelik anketin güvenilirlik oranı Cronbach Alpha güvenilirlik analizine göre % 95 çıkmıştır.

Tablo 3. İş güvenliği uzmanlarına yönelik anket soruları

Anket soruları	Ort.	σ
YSİP'ler hakkında yeterli bilgi ve tecrübeye sahibim.	3,54	0,96
YSİP'leri güvenli şekilde kullanabileceğime inanıyorum.	3,32	1,19
Operatörlere YSİP'lerde yapılacak işle ilgili işe başlamadan önce risk ve tehlikeler hakkında bilgi verilir.	3,96	1,17
Operatörlerin YSİP'lerle çalışırken karşılaştacağı risk ve tehlikeler hakkında yeterli bilgisi vardır.	2,93	1,12
YSİP'leri kullanan çalışanlara yüksekte çalışma eğitimi verildi.	3,79	1,03

YSİP’lerde çalışanlar yüksekte çalışma eğitimi aldıktan sonra güvenle çalışabilir.	3,32	1,22
YSİP’lerde çalışanlar yüksekte çalışma esnasında emniyet kemeri kullanması gerektiğini bilir.	3,61	1,07
Mevcut operatörlerin eğitimi, becerisi yeterlidir.	2,96	1,04
İskelede, merdivende vb. çalışmak yerine YSİP’ler üzerinde çalışmak daha güvenlidir.	4,07	1,05
YSİP’lerde çalışanların korkuluklardan düşmeyeceğine inanıyorum.	2,86	1,08
YSİP’leri çevreleyen ara korkuluklar arası mesafe çalışanların düşmemesi için yeterlidir.	3,43	1,10
Çalışanlar gevşek zeminlerde güvenli mesafede YSİP kurulumu hakkında eğitim aldı./bilgileri yeterlidir.	2,89	1,07
Operatörler YSİP’lerde karşılaşılabilecek acil durumlar hakkında eğitim aldı./bilgileri yeterlidir.	3,07	1,22
YSİP’lerde karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı yapılan acil durum tatbikatı faydalı oldu.	3,04	1,26
Çalışanlar YSİP üzerindeki uyarı levhalarının hepsinin anlamını bilirler.	3,25	1,11
Çalışanlar iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yaşadıkları sorunları, öneri ve isteklerini İGU ile paylaşırlar.	3,57	1,20
Çalışan temsilcisinin ve/veya iş güvenliği uzmanının sorunların çözümüne katkısı olduğuna inanıyorum.	3,75	1,14
Çalışanlar YSİP’lerden aşağı sarkarak çalışmak zorunda kalmazlar.	3,14	1,15
Çalışanlar YSİP’leri amaçları dışında kullanmazlar.	3,11	1,20
Operatörler her yükseklikte çalışabilirler.	2,43	1,10
YSİP’lerin periyodik kontrolleri yönetmelik ve standartlara uygun yapılıyor.	3,64	1,06
YSİP’lerin periyodik kontrolleri olmadan çalışmasına izin verilmiyor.	3,75	1,14
Çalışanların işe başlamadan önce sağlık kontrolleri yapıldı.	3,82	1,25
Periyodik sağlık kontrolleri yapılıyor.	3,79	1,23
Çalışanların ilk yardım eğitimleri vardır.	3,39	1,20
Çalışanlar acil durumda ilkyardımları yapabilir.	2,86	1,18
Çalışanların KKD’leri eksiksiz verilir.	3,82	1,12
Kişisel koruyucu donanımların yenileme süresi yeterlidir.	3,57	1,03
Operatörlerin kişisel koruyucu donanımlarının kullandıklarını kontrol edilir.	3,68	1,16
Ramak kaza olayları düzenli olarak raporlanmaktadır.	3,14	1,30
İş sağlığı ve güvenliği kurulu toplantıları faydalı olmaktadır.	3,82	1,02
İşyerinde tespit ettiğim olumsuz durumları, eksiklikleri işverene çekinmeden raporlarım.	3,79	1,17
Genel Ort.	3,41	1,13

İş güvenliği uzmanları iskelede, merdivende vb. çalışmak yerine YSİP’ler üzerinde çalışmayı daha güvenli bulmaktadırlar. İş güvenliği uzmanları, operatörlere YSİP’lerde yapılacak işle ilgili işe başlamadan önce risk ve tehlikeler hakkında bilgi verdiklerini, çalışanların işe başlamadan önce sağlık kontrollerinin yapıldığını ve KKD’lerinin eksiksiz verildiğini belirtmişlerdir. Katılımcılar, iş sağlığı ve güvenliği kurulu toplantılarının faydalı olduğunu ve YSİP’leri kullanan çalışanlara yüksekte çalışma eğitiminin verildiğini ifade etmişlerdir. İş güvenliği uzmanları, çalışanların periyodik sağlık kontrollerinin yapıldığını ve işyerinde tespit ettikleri olumsuz durumları/eksiklikleri işverene çekinmeden raporladıklarını belirtmişlerdir. Katılımcılar, çalışan temsilcisinin ve/veya iş güvenliği uzmanının sorunların çözümüne katkısı olduğuna inandıklarını, YSİP’lerin periyodik kontrolleri olmadan çalışmasına izin verilmediğini, operatörlerin kişisel koruyucu donanımlarını kullanımını kontrol edildiğini de ifade etmişlerdir. İş güvenliği uzmanları YSİP’lerin periyodik kontrollerinin yönetmelik ve standartlara uygun olarak yapıldığını, YSİP’lerde çalışanların yüksekte çalışma esnasında emniyet kemeri kullanması gerektiğini bildiklerini belirtmişlerdir. Ayrıca, çalışanların iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yaşadıkları sorunları, öneri ve isteklerini iş güvenliği

uzmanı ile paylaştıklarını ve kişisel koruyucu donanımların yenileme süresini yeterli bulduklarını ifade etmişlerdir. Likert’in 5’li ölçeğine göre bu çalışma grubunda en yüksek ortalama değer 4,07 ile “İskelede, merdivende vb. çalışmak yerine YSİP’ler üzerinde çalışmak daha güvenlidir.” sorusuna verilen cevap olmuştur. İş güvenliği uzmanları bu soruya verdikleri cevapla, yüksekte çalışmanın YSİP’lerle yapılmasını önemli bulduklarını anlaşılmaktadır. Ayrıca en düşük değer 2,43 ile “Operatörler Her Yükseklikte Çalışabilirler.” sorusuna verilen cevap olmuştur. Bu cevapla YSİP’lerde çalışacak operatörlerin her yükseklikte çalışamayacağını düşündükleri anlaşılmaktadır.

3.3. YSİP Kullanan Operatörlere Yönelik Analiz

Sektörde YSİP kullanan operatörlere yönelik yapılan anket çalışmasına 20 kişi katılmış olup, bu çalışma grubuna iki tür soru sorulmuş olup, Tablo 4 ve Tablo 5’de ayrı ayrı verilmiştir. Tablo 4’de verilen sorular evet/hayır şeklinde cevaplandırılmıştır. Yorumlama yapılırken soruya ait ortalama değer 1 ile 1,49 arasında ise evet, 1,51 ile 2 arasında ise hayır olduğu değerlendirilmiş ve buna göre yorumlama yapılmıştır. Eğer soruya ait ortalama değer 1,50 ise evet/hayır cevapları eşit değerdedir.

Tablo 4. Operatörlere yönelik anket soruları-1

Anket Soruları	Ort.	σ
YSİP'leri kullanmadan önce kullanıcı eğitimi aldınız mı?	1,20	0,41
MEB onaylı operatörlük belgesine sahip misiniz?	1,50	0,51
YSİP'ler üzerinde çalışırken platformun aşırı sallanması sebebiyle işi bırakmayı düşündünüz mü?	1,84	0,37
YSİP'lerde karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı acil durum tatbikatına katıldınız mı?	1,32	0,48
YSİP üzerinde rüzgar hızı ölçümü için anemometre var mı?	1,68	0,48
Anemometre kullanımı hakkında bilginiz var mı?	1,53	0,51
YSİP'lerde çalışmaya başlamadan önce yapılması gerekenlerle ilgili kontrol listesi var mı?	1,26	0,45
Kontrol listesi varsa kontrol listesini gözden geçirdikten sonra mı çalışıyorsunuz?	1,32	0,48
Kontrol listesi yoksa olmasının faydalı olacağına inanıyor musunuz?	1,11	0,32
Yeni başlayacaklara operatörlüğü tavsiye eder misiniz?	1,42	0,51
Yüksekte çalışma eğitimi aldınız mı?	1,68	0,48
Yüksek çalışma esnasında emniyet kemeri kullanıyor musunuz?	1,25	0,44
İşe başlamadan önce sağlık muayenesiz çalışacağınız işe uygun yapıldı mı?	1,26	0,45
Periyodik sağlık kontrolleriniz yapılıyor mu?	1,58	0,51
YSİP'ler kapalı konumdayken hareket halinde karşılaşılan iş kazası oldu mu?	1,84	0,37
İlkyardım eğitimi aldınız mı?	1,37	0,50
Hiç acil durdurma butonunu kullanmak zorunda kaldınız mı?	1,47	0,51
YSİP kaynaklı iş kazası yaşadınız mı?(Yanlış üretim, tasarım, bakım/kontrol eksikliği vb.)	1,79	0,42
YSİP'lerin çalıştığı ortamdan kaynaklı(zemin, hava koşulları vb.) iş kazası yaşadınız mı?	1,68	0,48
Hareket sırasında araç ve 3.kişileri uyarı için korna vb. var mı?	1,16	0,37
Yürüyüş sırasında araç ve 3.kişileri uyarı için korna vb. çalışıyor mu?	1,05	0,22
YSİP'ler üzerinde aşırı yüklenme sınırı levhası var mı?	1,11	0,32
YSİP'ler aşırı yüklemeye uyarı veriyor mu?	1,32	0,48
İşyerinizde çalışan temsilcisi var mı?	1,47	0,51
İşyerinde çalışan temsilcisiniz kim olduğunu biliyor musunuz?	1,53	0,51
Ramak kala olayı yaşandı mı?	1,53	0,51
Ramak kala olayı hakkında bilginiz var mı?	1,53	0,51

Operatörler, YSİP kullanmadan önce eğitim aldıklarını, YSİP'lerle çalışmalarını sırasında karşılaşılabilecek risk ve tehlikelere karşı acil durum tatbikatlarına katıldıklarını, çalışmaya başlamadan önce YSİP'ler üzerinde bulunan kontrol listelerini kullandıklarını ve sonra çalışmaya başladıklarını, hazırlanan kontrol listesini faydalı bulduklarını ifade etmişlerdir. Katılımcılar ayrıca operatörlüğü diğer kişilere tavsiye ettiklerini, yüksekte çalışma eğitimi almadıklarını, yüksekte çalışırken emniyet kemeri kullandıklarını da belirtmişlerdir. Operatörler, işe giriş sağlık muayenelerinin yapıldığını ama periyodik sağlık muayenelerinin yapılmadığını, ilkyardım eğitimi aldıklarını, çalışırken acil durdurma butonunu kullanmak zorunda kaldıklarını, YSİP'ler üzerinde 3. kişileri uyarıcı korna bulunduğunu, YSİP'lerin aşırı yüklenme durumunda uyarı verdiğini, işyerinde çalışan

temsilcisi olduğunu ama kim olduğunu bilmediklerini de ifade etmişlerdir. Tablo 5'de en yüksek ortalama değer 1,84 ile "YSİP'ler üzerinde çalışırken platformun aşırı sallanması sebebiyle işi bırakmayı düşündünüz mü?" sorusuna verilen cevap olmuştur. Operatörlerin aşırı sallanma nedeniyle işi bırakmayı düşünmedikleri dolayısıyla iş sağlığı ve güvenliği açısından riskli davranışta buldukları düşünülmektedir. Ayrıca en düşük değer 1,05 ile "Yürüyüş sırasında araç ve 3.kişileri uyarı için korna vb. çalışıyor mu?" sorusuna verilen cevap olmuştur. YSİP'lerde uyarı sistemlerinin çalıştığı ve kullanıldığı düşünülmektedir. Tablo 5'de Likert'in 5'li ölçeği kullanılmış olup soruların ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanarak yorumlamalar yapılmıştır. Operatörlere yönelik anket sorularının Cronbach Alpha güvenilirlik oranı ise %97,6 çıkmıştır.

Tablo 5. Operatörlere yönelik anket soruları-2

Anket soruları	Ort.	σ
YSİP'lerde çalışırken karşılaşılabilecek risk ve tehlikeler hakkında bilgim vardır.	3,79	1,13
YSİP'lerde çalışırken aşağı sarkarak çalışmak zorunda kalmadım.	3,05	1,51
Çalışma sırasında yüksekte korkuyorum.	2,26	1,15
Aldığım eğitim ve bilgiler sonucunda kendimi YSİP'ler üzerinde çalışmaya yeterli görüyorum	3,42	1,17
Sensörler ve diğer önleyici sistemler uyarı verdiğinde çalışmayı bırakıyorum.	3,68	1,29
YSİP'lerde çalışırken aşağı sarkmadan kaynaklı düşme tehlikesi yaşamadım.	3,74	1,33
YSİP'ler üzerinde bulunan güvenlik sensörleri (sesli/ışıklı uyarı) her zaman çalışıyor.	3,32	1,25
YSİP'ler üzerinde bulunan hareket sensörleri (sesli/ışıklı uyarı) her zaman çalışıyor.	3,21	1,40
YSİP'ler üzerinde bulunan arıza göstergeleri her zaman çalışıyor.	3,00	1,20
YSİP'ler üzerinde bulunan güvenlik paneli görülecek yerdedir.	3,47	1,22
YSİP'ler üzerinde bulunan butonlar ve panel üzerinde etiket vardır.	3,11	1,33
YSİP'ler üzerinde bulunan butonlar ve panel üzerinde etiket okunuyor.	2,95	1,31
İskelede, merdivende vb. çalışmak yerine YSİP'ler üzerinde çalışmak daha güvenlidir.	3,74	1,59
YSİP'leri çevreleyen korkuluklardan düşmeyeceğime inanıyorum.	3,63	1,46
YSİP'leri çevreleyen ara korkuluklar arası mesafe yeterlidir.	3,63	1,30

Gevşek zeminlerde güvenli mesafede YSİP kurulumu hakkında eğitim aldım	3,11	1,41
YSİPlerde karşılaşılabilecek acil durumlar hakkında eğitim aldım.	3,33	1,41
YSİPlerde karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı yapılan acil durum tatbikatı faydalı oldu.	3,44	1,15
YSİPlerde çalışma güzergâhını işe başlamadan önce kontrol ederim.	3,32	1,25
YSİPler üzerindeki uyarı levhalarının hepsinin anlamını biliyorum.	3,37	1,26
İş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yaşadığım sorunları, öneri ve isteklerimi çalışan temsilcisi ile paylaşıyorum.	3,32	1,29
Çalışan temsilcisinin ve/veya iş güvenliği uzmanının sorunların çözümünde faydası olduğunu düşünüyorum.	3,32	1,11
Ortalama	3,33	1,06

Operatörler YSİP’lerde çalışırken karşılaştıkları risk ve tehlikeler hakkında bilgilerinin olduğunu, sensörler ve diğer önleyici sistemler uyarı verdiğinde çalışmayı bıraktıklarını, YSİP’lerde çalışırken aşağı sarkmadan kaynaklı düşme tehlikesi yaşamadıklarını ifade etmişlerdir. Katılımcılar iskelede, merdivende vb. çalışmak yerine YSİP’ler üzerinde çalışmayı daha güvenli bulduklarını belirtmişlerdir. Operatörler YSİP’leri çevreleyen korkuluklardan düşmeyeceklerini, YSİP’leri çevreleyen ara korkuluklar arası mesafenin yeterli olduğunu da ifade etmişlerdir. Likert’in 5’li ölçeğine göre bu çalışma grubunda en yüksek ortalama değer 3,79 ile “YSİP’lerde çalışırken karşılaştığım risk ve tehlikeler hakkında bilgim vardır.” sorusuna verilen cevap olmuştur. Operatörler YSİP’lerle çalışırken

karşılaşılabilecek risk ve tehlikeler karşısında bilgili ve donanımlı olduğunu, bu problemler karşısında bilinçli olduklarını düşünmektedirler. En düşük ortalama değer ise 2,26 ile “Çalışma sırasında yüksekte korkuyorum.” sorusuna verilen cevap olmuştur. Operatörlerin yüksekte çalışmaktan çekinmedikleri düşünülmektedir.

3.4. YSİP Kiralayan Firmalara Yönelik Analiz

Sektörde YSİP kiralayıp çalışmalarında kullanan firmalara yönelik yapılan anket çalışmasına 20 firma katılmış olup Tablo 6’de gösterilen sorulara gelen cevaplara göre ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır. YSİP kiralayan firmalara yönelik anket sorularının Cronbach Alpha güvenilirlik oranı ise % 80,2 çıkmıştır.

Tablo 6. YSİP kiralayan firmalara ait anket soruları

Anket soruları	Ort.	σ
Operatörlerimize YSİPlerde karşılaştıkları risk ve tehlikeler hakkında yeterli bilgi/egitim verildi.	3,95	0,76
Operatörlerimiz iş güvenliği bilincine sahiptir.	3,80	0,83
Mevcut operatörlerin eğitimi, becerisi yeterlidir.	3,79	0,79
YSİP operatörlerine mesleki yeterlilik belgesi zorunluluğu faydalı olacaktır.	3,95	0,89
Mevcut operatör sayısı yeterlidir.	2,65	1,09
Operatörlerin iskelede, merdivende vb. çalışması yerine YSİP üzerinde çalışması daha güvenlidir.	4,55	0,76
Operatörlerin YSİPleri çevreleyen korkuluklardan düşmeyeceğine inanıyorum.	3,80	0,89
YSİPleri çevreleyen ara korkuluklar arası mesafe operatörlerin/çalışanların düşmemesi yeterlidir.	3,80	0,83
Operatörlerin YSİPler üzerinde istedikleri yeni talepler üretici/distribütör/kiralayan tarafından standartlara uygunsa dikkate almıyor.	3,35	0,59
Firmamızda YSİPlerde karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı yapılan acil durum tatbikatı düzenli yapılıyor.	3,21	0,79
YSİPlerde karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı yapılan acil durum tatbikatları faydalı oluyor.	3,55	0,69
YSİPle çalışma daha güvenlidir ve daha verimlidir.	4,30	0,86
Operatörlerimiz çalışma alanında bulunan uyarı ve ikaz levhalarının anlamını bilirler.	3,70	0,66
İşyerimizde çalışanlarla ilgilenen çalışan temsilcisi vardır.	3,78	0,65
Operatörlerin iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yaşadığı sorunları, öneri ve isteklerini çalışan temsilcisi/iş güvenliği uzmanı her zaman bizimle paylaşıyor.	3,70	0,80
İş güvenliği uzmanının/çalışan temsilcisinin sorunların çözümüne katkısı olduğuna inanıyorum.	3,70	0,66
YSİPlerin periyodik kontrolleri standart ve yönetmeliklere uygun yapılıyor.	2,95	1,19
YSİPlerin periyodik kontrolleri olmadan çalışmasına izin verilmiyor.	2,95	1,00
Operatörlerin işe giriş muayenesi eksiksiz yapılıyor.	3,35	0,81
Operatörlerin periyodik sağlık kontrolleri yapılıyor	3,45	0,69
Operatörlerimize ilkyardım eğitimi verildi.	3,25	0,55
Operatörlerimiz acil durumda gereken ilkyardımları yapabilirler.	3,10	0,85
Operatörlere kişisel koruyucu donanımlar eksiksiz veriliyor.	3,75	0,79
Operatörlerin kişisel koruyucu donanımlarının yenileme süresi yeterlidir.	3,50	0,76
Operatörlerin kişisel koruyucu donanımlarının kullandıklarını kontrol edilir.	3,55	0,83
Operatörler iş sağlığı ve güvenliği konusunda eksikliği tespit edilirse uyarılıyorlar.	3,75	0,55

İşyerimizde ramak kala formu düzenlenir.	3,50	0,89
İş sağlığı ve güvenliği konusunda eksikliği tespit edilen personele ceza veriliyor.	3,35	0,93
YSİP kiralarken önceliğim maliyettir.	3,60	1,23
YSİP kiralarken önceliğim kalitedir.	3,50	0,61
YSİP kiralarken önceliğim satış sonrası hizmettir.	3,45	0,60
Genel Ort.	3,57	0,35

YSİP kiralaması yapan firmalar operatörlere YSİP'lerde karşılaşılabilecek risk ve tehlikeler hakkında yeterli bilgi/egitimin verildiğini, operatörlerin iş güvenliği bilincine sahip olduklarını, mevcut operatörlerin eğitiminin, becerisinin yeterli olduğunu, YSİP operatörlerine mesleki yeterlilik belgesi zorunluluğunun faydalı olacağını, mevcut operatör sayısının yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Katılımcılar operatörlerin iskelede, merdivende vb. çalışması yerine YSİP üzerinde çalışmasının daha güvenli olduğunu düşünmektedir. Firmalar, operatörlerin YSİP'leri çevreleyen korkuluklardan düşmeyeceğine inandıklarını, YSİP'leri çevreleyen ara korkuluklar arası mesafe operatörlerin/çalışanların düşmemesi yeterli olduğunu, YSİP'lerde karşılaşılabilecek tehlike ve risklere karşı yapılan acil durum tatbikatlarının faydalı olduğunu düşünmektedirler. Katılımcılar, YSİP'le çalışmanın daha güvenli ve daha verimli olduğunu, operatörlerin çalışma alanında bulunan uyarı ve ikaz levhalarının anlamını bildiklerini ifade etmişlerdir. Firmalar, işyerinde çalışanlarla ilgilenen çalışan temsilcisinin olduğunu, operatörlerin iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yaşadığı sorunları, öneri ve isteklerini çalışan temsilcisinin/iş güvenliği uzmanının her zaman firmalarıyla paylaştığını ve iş güvenliği uzmanının/çalışan temsilcisinin sorunların çözümüne katkısı olduğuna inandıklarını da belirtmişlerdir. Firmalar operatörlere kişisel koruyucu donanımların eksiksiz verildiğini, operatörlerin kişisel koruyucu donanımlarının yenileme süresinin yeterli olduğunu, operatörlerin kişisel koruyucu donanımlarının kullanımının kontrol edildiğini düşünmektedirler. Ankete katılanlar ayrıca operatörlerin iş sağlığı ve güvenliği konusunda eksikliği tespit edilirse uyarıldığını, işyerinde ramak kala formu düzenlendiğini, YSİP kiralarken önceliklerinin maliyet ve kalite olduğunu ifade etmişlerdir. Likert'in 5'li ölçeğine göre bu çalışma grubunda en yüksek ortalama değer 4,55 ile "Operatörlerin iskelede, merdivende vb. çalışması yerine YSİP üzerinde çalışması daha güvenlidir." sorusuna verilen cevap olmuştur. Firmaların YSİP'lerle çalışmayı diğer iş ekipmanlarına göre daha güvenli buldukları düşünülmektedir. En düşük ortalama değer ise 2,65 ile "Mevcut operatör sayısı yeterlidir." sorusuna verilen cevap olmuştur. Firmalar mevcut operatör sayısının yetersiz olduğunu düşünmektedirler.

3.5. Çalışma Gruplarının Karşılaştırılması

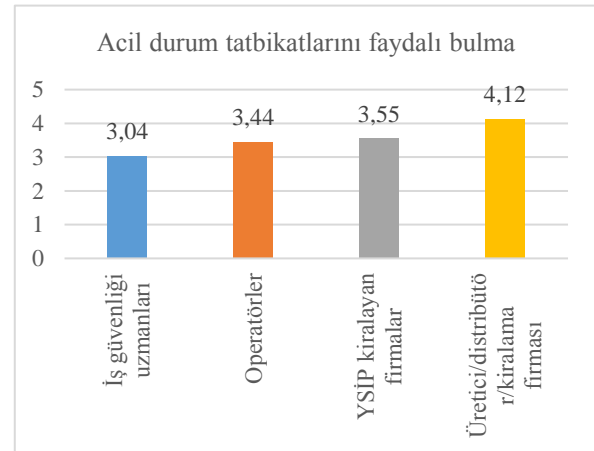
Bu çalışma 4 farklı çalışma grubundan toplam 89 katılımcı ile hazırlanmıştır. Çalışma gruplarına sorulan soruların güvenilirlik oranlarının karşılaştırması Tablo 7'de gösterilmiş olup, en yüksek oran güvenilirlik oranı

% 97,6 ile operatörlere yönelik anket çalışmasında, en düşük güvenilirlik oranı da % 80,2 ile YSİP kiralayan firmalara yönelik anket çalışmasında elde edilmiştir.

Tablo 7. Çalışma gruplarının güvenilirlik oranları

Çalışma grubu	Soru sayısı	Güvenilirlik oranı
Üretici/distribütör ve kiralama firmaları	44	0,867
İş güvenliği uzmanları	32	0,950
Operatörler (2.Bölüm)	22	0,976
YSİP kiralayan firmalar	31	0,802

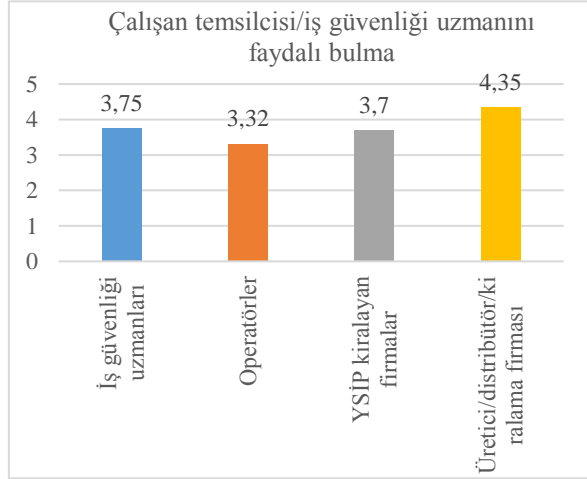
Çalışma gruplarına bazı sorular ortak sorulmuştur. Örneğin; acil durum tatbikatlarının faydalı bulunup bulunmadığı, çalışan temsilcisi/iş güvenliği uzmanının faydalı olup olmadığı, iskele ya da merdivende çalışmak yerine YSİP ile çalışmanın daha güvenli olup olmadığı ve YSİP ile çalışırken yüksekte düşme yaşayıp yaşanılmayacağı hakkında düşünceleri bunlara örnek verilebilir.



Şekil 1. Acil durum tatbikatlarını faydalı bulma

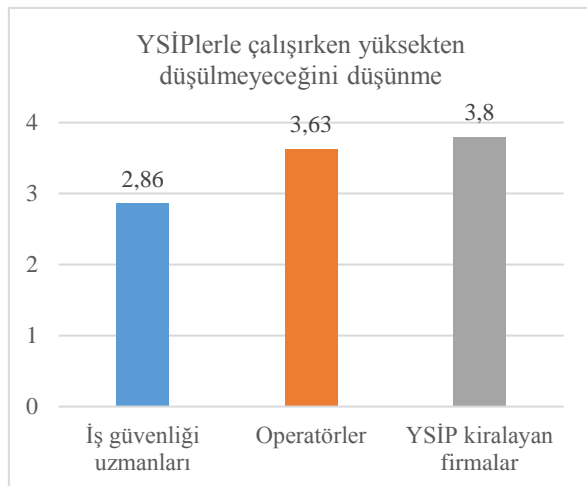
Karşılaştırma yapılırken Likert'in 5'li ölçeği kullanılmıştır. Şekil 1'de çalışma gruplarına acil durum tatbikatlarının faydalı olup olmadığı sorulmuş olup en çok olumlu geri bildirim ortalama 4,12 ile üretici/distribütör/kiralama firmalarından alınmıştır. En düşük ortalama ise 3,04 ile iş güvenliği uzmanları tarafından alınmıştır. İş güvenliği uzmanları beklenilenin aksine acil durum tatbikatlarını faydalı görmemiştir. Dört çalışma grubuna da ortak olarak yöneltilen bir diğer soru da çalışan temsilcisi/iş güvenliği uzmanını faydalı bulup bulmadıkları sorusudur. Şekil 2'de bu soruya verilen cevaplara göre, bütün çalışma gruplarından ortalama değerlere yakın ve

üzerinde sonuçlar elde edilmiştir. Çalışan temsilcisi/iş güvenliği uzmanını en faydalı bulan çalışma grubu ortalama 4,35 değeri ile üretici/distribütör/kiralama firmaları olmuştur. Bu soruya en düşük oranlı cevap ise 3,32 değeri ise operatörlerden gelmiştir.



Şekil 2. Çalışan temsilcisi/iş güvenliği uzmanını faydalı bulma

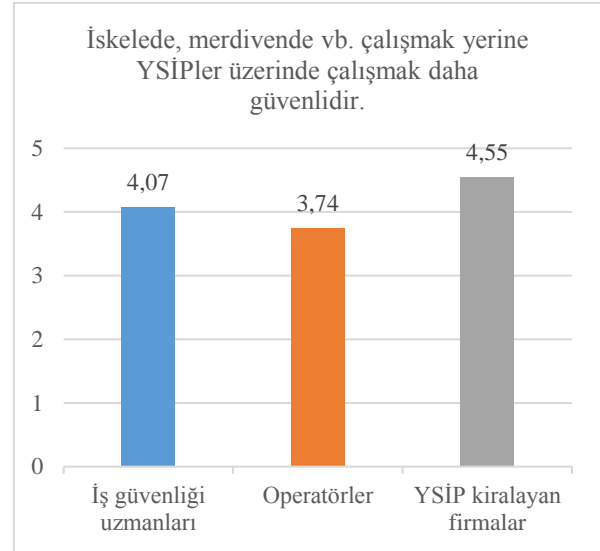
Sahada aktif olarak çalışma yapan operatör, iş güvenliği uzmanı ve kiracı firmalara yönelik olarak hazırlanan ortak sorulardan olan YSİP ile çalışırken yüksekte düşülmeyeceğini düşünme oranları Şekil 3'de gösterilmiştir. Verilen cevaplara göre en yüksek oran ortalama 3,8 değeri ile YSİP kiralayan firmalardan gelmiştir. Verilen bu cevaba göre YSİP kiralayıp kullanan firmaların iş güvenliği bilincine sahip, çalışanlarının güvenliğini ön planda tutan firmalar olduğu çıkarımı yapılabilir. Bu soruya en düşük oranlı cevap ise 2,86 değeri ile iş güvenliği uzmanları tarafından verilmiştir.



Şekil 3. YSİP'lerle çalışırken yüksekte düşülmeyeceğini düşünme

Sahada YSİP ile çalışan çalışma gruplarına yönelik hazırlanan anket sorularından ortak olan bir diğeri de

Şekil 4'de görüleceği üzere iskele, merdiven vb. ile çalışmak yerine YSİP ile çalışmanın daha güvenli olup olmadığı sorusudur. Bu soruya 3 çalışma grubundan da yüksek oranda olumlu cevaplar verilmiştir. En yüksek oran YSİP ortalama 4,55 değeri ile kiralayan firmalardan gelmiş olup, firmaların iş güvenliğini ön planda tutarak çalışmalarını sürdürdüklerini düşündürmüştür. En düşük oran ise ortalama 3,74 değeri ile operatörler tarafından verilmiştir.



Şekil 4. İskele, merdiven vb. çalışmak yerine YSİP üzerinde çalışmanın daha güvenli olduğunu düşünme

IV. SONUÇLAR

Makaslı çalışma platformu olarak da bilinen kendinden tahrikli yükseltilebilen seyyar iş platformları üzerine yapılan bu çalışmada, sektörün ana paydaşları olan YSİP üreticileri, distribütörleri, YSİP kiralama şirketleri, sektörde çalışan iş güvenliği uzmanları, çalışmalarını sırasında YSİP kullanan operatörler ve işleri sebebiyle firmalarına YSİP kiralayıp çalışanlarının kullanımına sunan firmalara ulaşılmış olup, her çalışma grubu için ayrı ayrı hazırlanan anket soruları taraflarla paylaşılmıştır. Anketlerin güvenilirliği Cronbach's Alpha güvenilirlik analizi yöntemiyle tespit edilmiştir.

YSİP üretici/distribütör ve kiralama firmalarına yönelik yapılan çalışmada en yüksek ortalama değer 4,71 ile "Yeni alacağımız ekipmanlarda teknolojik üstünlükleri karşılaştırırım" ve "Yeni alacağımız ekipmanlarda mekanik üstünlükleri karşılaştırırım" sorularına olmuştur. En düşük değer ise 1,33 ile "İş güvenliği için harcadığımız bütçe gereksizdir." sorusuna verilen cevap olmuştur. Firmaların bu soruya katılmadığı dolayısıyla iş güvenliğine önem verdikleri ve iş sağlığı ve güvenliği için gereken bütçeyi ayırdıkları anlaşılmaktadır. Böylece çalışanlarına daha güvenli bir çalışma ortamı hedefledikleri düşünülmektedir. İş güvenliği uzmanlarına yönelik yapılan çalışmada en yüksek ortalama değer 4,07 ile "İskelede, merdivende vb. çalışmak yerine YSİP'ler üzerinde çalışmak daha

güvenlidir.” sorusuna verilen cevap olmuştur. İş güvenliği uzmanları bu soruya verdikleri cevapla, yüksekte çalışmanın YSİP’lerle yapılmasını önemli buldukları anlaşılmaktadır. En düşük değer ise 2,43 ile *“Operatörler Her Yükseklikte Çalışabilirler.”* sorusuna verilen cevap olmuştur. Bu cevapla YSİP’lerde çalışacak operatörlerin her yükseklikte çalışamayacağını düşündükleri anlaşılmaktadır. Operatörlere yönelik yapılan çalışmanın birinci bölümünde (Tablo 5) en yüksek ortalama değer 1,84 ile *“YSİPler üzerinde çalışırken platformun aşırı sallanması sebebiyle işi bırakmayı düşündünüz mü?”* sorusuna verilen cevap olmuştur. Operatörlerin aşırı sallanma nedeniyle işi bırakmayı düşünmedikleri dolayısıyla iş sağlığı ve güvenliği açısından riskli davranışta buldukları düşünülmektedir. En düşük değer ise 1,05 ile *“Yürüyüş sırasında araç ve üçüncü kişileri uyarı için korna vb. çalışıyor mu?”* sorusuna verilen cevap olmuştur. YSİP’lerde uyarı sistemlerinin çalıştığı ve kullanıldığı düşünülmektedir. Çalışmanın ikinci bölümünde (Tablo 6) ise en yüksek ortalama değer 3,79 ile *“YSİP’lerde çalışırken karşılaşacağım risk ve tehlikeler hakkında bilgim vardır.”* sorusuna verilen cevap olmuştur. Operatörler YSİP’lerle çalışırken karşılaşılabilecek risk ve tehlikeler karşısında bilgili ve donanımlı olduğunu, bu problemler karşısında bilinçli olduklarını düşünmektedirler. En düşük ortalama değer ise 2,26 ile *“Çalışma sırasında yüksekte korkuyorum.”* sorusuna verilen cevap olmuştur. Operatörlerin yüksekte çalışmaktan çekinmedikleri düşünülmektedir. YSİP kiralayan firmalara yönelik anket çalışmasında en yüksek ortalama değer 4,55 ile *“Operatörlerin iskelede, merdivende vb. çalışması yerine YSİP üzerinde çalışması daha güvenlidir.”* sorusuna verilen cevap olmuştur. Firmaların YSİP’lerle çalışmayı diğer iş ekipmanlarına göre daha güvenli buldukları düşünülmektedir. En düşük ortalama değer ise 2,65 ile *“Mevcut operatör sayısı yeterlidir.”* sorusuna verilen cevap olmuştur. Firmalar mevcut operatör sayısının yetersiz olduğunu düşünmektedirler.

TEŞEKKÜR

Anket çalışmasının sektör paydaşlarına ulaştırılmasında desteklerini esirgemeyen PLATFORM-DER Genel Sekteri Abdullah TUNCER’e ve ankete katılım gösteren dernek üyelerine çok teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

[1] İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, Resmi Gazete Yayınlanma Tarihi:30.06.2013, Sayı:28339

[2]Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, Resmi Gazete Yayınlanma Tarihi:05.10.2013, Sayı:28786

[3]<https://www.liftandaccess.com/content/cherry-picker-founder-passes-away> (03.10.2019)

[4] Ercan, A. (2010). Türkiye’de Yapı Sektöründe İşçi Sağlığı ve Güvenliğinin Değerlendirilmesi. Politeknik Dergisi, 13(1) 49-53.

[5] Delahunt, A., (2019) Preventing MEWP Accidents by Sharing Analysis. IPAF Elevating Safety (2019) 22-25,

<https://issuu.com/forconstructionpros.com/docs/ipaf2019> (03.10.2019)

[6] Dong, R.G., Pan, C.S., Hartsell, J.J., Welcome, D.E., Lutz, T., Brumfield, A., Harris, J.R., Wu J.Z., Wimer, B., Mucino V., Means, K., (2012). An Investigation on the Dynamic Stability of Scissor Lift. Open Journal of Safety Science and Technology, 2, 8-15.

[7] Palani, S., Shanmugan, S., Selvam, M., Harish, K.A., (2017). Stability Analysis of Self-propelled Aerial Man Lift Vehicles. International Journal of Vehicle Structures & Systems, 9(5), 276-279.

[8] Bos’njak, S., M., Gnjatovic’, N.B., Momc’ilovic’, D.B., Milenovic’, I.L.J., Gas’ic’, V.M., (2015). Failure analysis of the mobile elevating work platform. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 3, 80–87.

[9] Solazzi, L., (2017). Experimental and analytical study on elevating working platform. [Procedia Engineering](https://doi.org/10.1016/j.procedia.2017.05.002), 199, 2597-2602.

[10] Pan, C. S., Hoskin, A., McCann, M., Lin, M.-L., Fearn, K., Keane, P. (2007). Aerial lift fall injuries: A surveillance and evaluation approach for targeting prevention activities. Journal of Safety Research, 38(6), 617–625.

[11] Turan, İ., Şimşek, Ü., Aslan H., (2015). Eğitim Araştırmalarında Likert Ölçeği ve Likert-Tipi Soruların Kullanımı ve Analizi. Sakarya Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 2015; (30): 186-203.

[12] Palaz, S., Boz, İ. (2008). Üniversite Mezunu Yetişkinlerin Farklı Organizasyonlarda Gönüllü Hizmet Vermesini Etkileyen Faktörler. Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 11(19): 95-106.

[13] Özbek, H., Keskin, S., (2007). Standart Sapma mı Yoksa Standart Hata mı?. Van Tıp Dergisi:14 (2):64-67.

[14] Yıldız, D., Uzunsakal, E., (2018). Alan Araştırmalarında Güvenilirlik Testlerinin Karşılaştırılması ve Tarımsal Veriler Üzerine Bir Uygulama. Uygulamalı Sosyal Bilimler Dergisi, 2 (1), 14-28.

Üçlü Ters Parabolik Kuantum Bariyer Çift Kuyu Potansiyelinde Enerji Seviyeleri ile Elektron Geçişinin Yapı Parametreleri ve Yoğun Lazer Alanına Bağlılığının İncelenmesi

Investigation of Relation of Electron Transmission and Energy State to Structure Parameters and The Intense Laser Field in The Triple Inverse Parabolic Quantum Barrier Double Well Potential

Mehmet BATI¹ 

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fizik Bölümü, 53100, RİZE

Öz

Bu çalışmanın amacı, yoğun lazer alanı altında GaAs/AlGaAs lardan oluşan üçlü ters parabolik kuantum bariyer çift kuyu potansiyelinde elektronik iletimi ve enerji seviyelerinin bariyer genişlikleri, lazer alanı giydirme parametresine bağlılığını araştırmaktır. Çalışmada Denge-dışı Green fonksiyonları yöntemi kullanılarak iletim olasılıkları ve rezonans enerji seviyeleri tespit edilmiştir. Lazer alanının ve yapı parametrelerinin rezonans tünellemeyi oldukça etkilediği, enerji seviyelerinin yerlerinin kontrolünün bu parametrelerle yapılabildiği görülmüştür. Lazer alanının artmasıyla enerji seviyelerinin daha yüksek enerjilerde ortaya çıktığı görülmüştür. Yapının rezonans tünelleme özelliğinin kontrolü işlevsel nano-aygıt yapımında oldukça önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Denge-Dışı Green Fonksiyonu, Yoğun Lazer Alanı, Rezonans Tünelleme, Çift Kuyu Potansiyeli, Ters Parabolik Bariyer.

Abstract

The aim of this study is to investigate the dependence of the transmission properties and energy state of the triple inverse parabolic quantum barrier double well potential structure made up of GaAs/AlGaAs under the intense laser field with the well and barrier widths and the laser field dressing parameter. In our work, In the study, transmission probabilities and resonance energy levels were determined using the Non-Equilibrium Green functions method. It has been observed that laser field and structure parameters affect resonance tunneling and control of the location of energy levels can be done with these parameters. It has been observed that energy levels emerge at higher energies as the laser field increases. The control of the resonance tunneling feature of the structure is very important in the production of functional nano-devices.

Keywords: Non equilibrium Green function, Intense Laser Field, Resonant Tunneling, Double Well Potential, Inverse Parabolic Barrier.

I. GİRİŞ

Kuantum yapıların iletim özellikleri özellikle rezonans tünelleme olayı yeni fonksiyonel nano cihazların üretimi nedeniyle büyük ilgi görmüştür [1-4]. Örneğin, rezonans tünel diyotları (RTD'ler) ve rezonans tünelleme transistörleri (RTT'ler) tera hertz görüntüleme sistemi [5], yüksek hızlı anahtarlama ve yüksek hızlı mantık uygulamaları [6] olarak araştırılmıştır. Nano-fabrikasyon teknolojisindeki son gelişmeler, çok çeşitli potansiyel şekilleri olan rezonans tünelleme yapılarının üretilmesini mümkün kılmıştır. Düşük-boyutlu yarı iletken yapı üretimindeki son gelişmeler nano-yapılara dayalı elektronik cihazların karakteristiklerinin belirlenmesinde önem arz eden elektron taşınımının kontrol edilebilirliği için yeni olanaklar sağlamaktadır. Düşük-boyutlu yarıiletken yapılarda boyut azalmasıyla baskın hale gelen kuantum mekaniksel etkiler külçe yapılara göre farklı fiziksel olayların görülmesine neden olmaktadır. Son yıllarda, farklı potansiyel profillerinde elektronik iletim incelenmiştir. [7-10]. Birçok çalışma tek kuantum-kuyu ve çift bariyer rezonans tünelleme yapıları üzerine odaklanmıştır [11-17] ancak rezonans tünelleme olayı üçlü bariyer rezonans tünelleme yapılarında da tanımlanmıştır. Potansiyel uygulanabilirlik (alan etkili transistörler, kuantum kuyuları, lazerler, elektro-optik modülatörler ve kuantum kuyu kızılötesi foto detektörleri) nedeniyle, çift kuyu üçlü bariyer rezonans tünel yapıları ilgi çekmiştir [18-21]. Üçlü bariyer RTD' leri ağırlıklı olarak, bellek uygulamalarında yüksek oranda kullanılan çoklu negatif diferansiyel direnç (NDR) bölgelerine sahip cihazın elektrik özelliklerinde çoklu tepe noktaları oluşturmak için kullanılmaktadır [22-24].

Yoğun bir lazer alanının düşük boyutlu yarı iletkenlerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri, yüksek güçlü, uzun dalga boylu, doğrusal polarize lazer kaynaklarının ortaya çıkması nedeniyle dikkate değer bir konudur. Bu durum lazer alanı ile ilişkili ilginç fiziksel olayların keşfini başlatmıştır [25-34]. Yoğun lazer ışığının madde ile etkileşmesini inceleyen çalışma THz darbelerinin yönlendirilmesi, odaklanması, yeniden şekillendirilmesi ve teşhisine yönelik mevcut yaklaşımları içermektedir [32]. GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs kuantum kuyularında farklı hapsedilme potansiyeline sahip kuantum kuyularında bant içi geçişler üzerindeki yoğun lazer alanı etkileri Niculescu ve ark. tarafından incelenmiştir [33]. Yoğun lazer alanları altındaki asimetric GaAs/GaAlAs çift kuantum kuyularında elektrik ve manyetik alanların optik özellikler üzerindeki etkileri teorik olarak Yesilgul ve ark. [34] tarafından çalışılmıştır. Saczuk ve arkadaşları, çift bariyer yapılarından elektronların rezonans iletiminin yoğun lazer alanları ile önemli ölçüde değiştirilebildiğini ve kontrol edilebildiğini göstermiştir [35]. Aktaş ve ark. simetrik ve asimetric çift bariyer yapısında yoğun lazer alanının elektron iletimine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmalar, sistemin yoğun bir lazer alanı ile aydınlatıldığında, sistemin iletim özelliklerindeki kayda değer değişikliklerin meydana geldiğini göstermektedir [36].

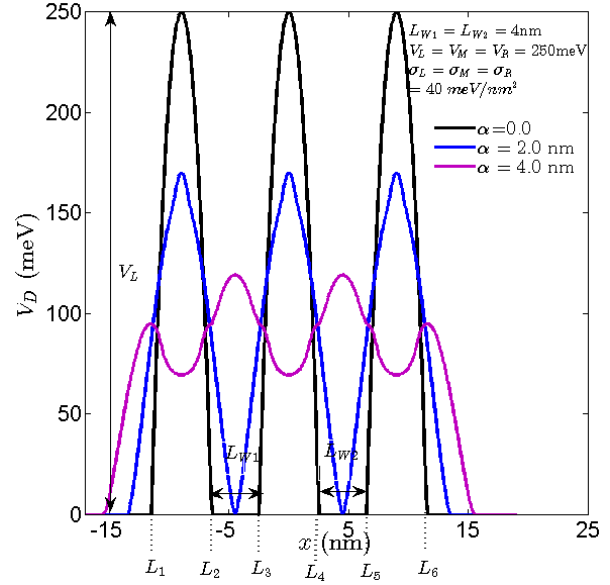
Yoğun bir lazer alanının farklı yapılar üzerindeki etkilerinin araştırılmasına büyük ilgi gösterilmesine rağmen, yoğun lazer alanı altındaki üçlü ters parabolik bariyer çift kuyu (PBÇK) yapısının elektronik özellikleri şu ana kadar incelenmemiştir. Parabolik bariyerler, gerçek bir bariyerin gerçekçi bir şekilde temsil edilmesinden dolayı fizik ve kimyada özel bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, yoğun lazer alanının simetrik PBÇK yapısında bir elektronun geçiş olasılığı ve enerji durumları üzerindeki etkisini inceleyeceğiz. Enerji durumlarını ve iletim katsayısını bulmak için denge dışı Green fonksiyonu (NEGF) yöntemini kullanıyoruz. NEGF yöntemi, açık kuantum sistemlerde taşıyıcı dinamikleri tanımlamak için en etkili ve genel yaklaşımlardan biridir [37].

II. MATERYAL VE METOT

Bu Etkin kütle yaklaşımında, yoğun lazer alanının varlığında bir elektron için zamana bağlı Schrödinger denklemi aşağıdaki gibi verilir [15,26].

$$\left[\frac{(\vec{P} + e\vec{A})^2}{2m^*} + V_0(x) \right] \psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) \quad (1)$$

m^* elektron etkin kütlesi, $V_0(x)$ sonlu kuşatma potansiyeli, \vec{A} vektör potansiyeli ve \vec{P} momentum operatörüdür.



Şekil 1. PBÇK yapısına lazer alanının etkisi

Şekil 1 de verilen PBÇK potansiyelin lazer alanı yokluğundaki fonksiyonel formu

$$V_0(x) = \begin{cases} -\sigma_L(x - x_{mL})^2 + V_L, & L_1 \leq x \leq L_2, \\ -\sigma_M(x - x_{mM})^2 + V_M, & L_3 \leq x \leq L_4, \\ -\sigma_R(x - x_{mR})^2 + V_R, & L_5 \leq x \leq L_6, \\ 0, & \text{Diğer yerlerde.} \end{cases} \quad (2)$$

Şeklinde [38]. Burada $\sigma_L = 2V_L/(L_1 - x_{mL})^2 + (L_2 - x_{mL})^2$, $\sigma_M = 2V_M/(L_3 - x_{mM})^2 + (L_4 - x_{mM})^2$ ve $\sigma_R = 2V_R/(L_5 - x_{mR})^2 + (L_6 - x_{mR})^2$ dir. V_L, V_M ve V_R , sırasıyla sol, orta ve sağ bariyer yüksekliğidir. Şekil 1 de, L_i (i: 1...6), yapıyı oluşturan her bölgenin konumunu belirtirken, bariyer maksimumları $x_{mL} = (L_1 + L_2)/2$, $x_{mM} = (L_3 + L_4)/2$ ve $x_{mR} = (L_5 + L_6)/2$ konumlarıdır. Sol kuyu genişliği $L_{W1} = |L_3 - L_2|$, ve sağ kuyu genişliği $L_{W2} = |L_5 - L_4|$ olmak üzere çalışma boyunca simetrik yapı incelenmiştir ($L_{W1} = L_{W2} = L_W$ ve $V_L = V_M = V_R = V = 250$ meV).

Sisteme uygulanan, monokromatik lineer polarize rezonant olmayan yüksek-frekanslı yoğun lazer alanı yarı-klasik olarak pertürbatif olmayan çerçevede ve $A(x, t) \approx A(t)$ dipol yaklaşımı kullanılarak ele alınmıştır. Sistemi tanımlayan zamana-bağlı Schrödinger denklemi [26,40];

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dx^2} + V(x + \vec{a}(t)) \right] \Phi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Phi(x, t) \quad (3)$$

Lazer alan radyasyonu tarafından oluşturulan vektör potansiyeli $\vec{A}(t) = A_0 \sin(\omega t)\hat{i}$. Lazer alanının PBÇK üzerindeki etkisi altında hareket eden bir elektron için zamana bağlı Schrödinger denklemi, Kramers-Henneberger üniter dönüşümü uygulanarak dönüştürülmüştür [26,31]. Bu eşitlikte, $\vec{a}(t) = \alpha \cos(\omega t)\hat{i}$ parçacığın polarizasyon yönü boyunca salınım merkezinden olan uzaklığını betimleyen

vektördür. Burada $\alpha = \frac{eA_0}{m^*\omega}$ lazer giydirmeye parametresidir.

Sistemi tanımlayan zamana-bağlı Schrödinger denklemi Kramers-Henneberger dönüşümü ve Fourier-Floquet seri açılımı kullanılarak (yüksek frekans limitinde), lazer giydirilmiş (laser-dressed) potansiyeli içeren zamandan-bağımsız formda [26-40],

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dx^2} + V_D(x + \alpha)\right] \Phi(x) = E\Phi(x) \quad (4)$$

elde edilir. Burada $V_D(x + \alpha)$ lazer giydirilmiş potansiyeldir ve

$$V_D(x + \alpha) = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} V(x + \alpha(t)) dt \quad (5)$$

ile verilir. Sayısal kolaylık açısından Schrödinger eşitliğini etkin Bohr yarıçapı (a_0^*) ve Hartree enerjisi (E_H^*) ölçeklendirirsek

$$-\frac{1}{2} \frac{d^2}{d\tilde{x}^2} + \tilde{V}_D(\tilde{x}, \tilde{\alpha})\Phi = \tilde{E}\Phi \quad (6)$$

Elde edilir. Buradaki \sim sembol boyutsuz parametreler (ölçeklendirilmiş parametreler) için kullanılmıştır. Eşitlik (6) ya sonlu farklar metodu uygulanırsa [37]

$$-\tilde{t}\Phi_{n-1} + (2\tilde{t} + \tilde{V}_{Dn}) - \tilde{t}\Phi_{n+1} = E\Phi_n \quad (7)$$

burada $\tilde{t} = \frac{1}{2\Delta\tilde{x}^2}$ sıçrama parametresidir ve en yakın komşu bölgeler arasındaki etkileşimi temsil etmektedir. $\tilde{V}_{Dn} = \tilde{V}_D(\tilde{x}_n)$ olarak kısaltılmıştır. Öz enerji terimleri eklenerek Eşitlik (7) matris formda Eşitlik (8) şeklinde tanımlanır [37].

$$[\tilde{E}I - \tilde{H} - \tilde{\Sigma}_L - \tilde{\Sigma}_R]\{\Phi\} = \{\tilde{S}\} \quad (8)$$

Eşitlik (8) de $[\tilde{H}]$ Hamiltonyen matrisi, $[I]$ birim matris, $\{\Phi\}$ dalga fonksiyonu vektörü ve $\{\tilde{S}\}$ saçılma terimi vektörüdür. $\tilde{\Sigma}_L$ ve $\tilde{\Sigma}_R$ sırasıyla sağ ve sol kontakın öz enerji terimleridir. Böylece

$$[\tilde{H}] = \begin{pmatrix} 2\tilde{t} + \tilde{V}_{D1} & -\tilde{t} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\tilde{t} & 2\tilde{t} + \tilde{V}_{D2} & -\tilde{t} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\tilde{t} & 2\tilde{t} + \tilde{V}_{D3} & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & -\tilde{t} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & -\tilde{t} & 2\tilde{t} + \tilde{V}_{D_{N-1}} & -\tilde{t} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -\tilde{t} & 2\tilde{t} + \tilde{V}_{DN} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Formunda yazılabilir. \tilde{k}_L ve \tilde{k}_R sağ ve sol kontak düzlem dalga fonksiyonu dalga vektörleri olmak üzere; öz enerji terimleri $[\Sigma_L]$, $[\Sigma_R]$ ve saçılma terimi $\{S\}$

$$[\tilde{\Sigma}_L] = \begin{pmatrix} -\tilde{t}e^{i\tilde{k}_L\Delta\tilde{x}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$[\tilde{\Sigma}_R] = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\tilde{t}e^{i\tilde{k}_R\Delta\tilde{x}} \end{pmatrix},$$

$$\{\tilde{S}\} = \begin{pmatrix} -\tilde{t}(e^{i\tilde{k}_L\Delta\tilde{x}} - e^{-i\tilde{k}_L\Delta\tilde{x}}) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

olarak elde edilir. Kuantum sisteminin Green fonksiyonunu matris formda aşağıdaki gibi tanımlanır [37].

$$[G^r] = [(\tilde{E} + i\lambda)I - \tilde{H} - \tilde{\Sigma}_L - \tilde{\Sigma}_R]^{-1} \quad (11)$$

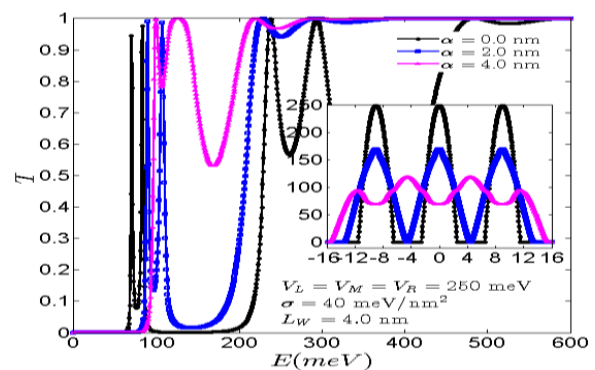
Burada λ sonsuz küçük pozitif bir sayıdır. Geçiş olasılığı (T)

$$T = \text{Tr}[\tilde{\Gamma}_L G^r \tilde{\Gamma}_R G^{r+}] \quad (12)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada $\tilde{\Gamma}_L = i[\tilde{\Sigma}_L - \tilde{\Sigma}_L^+]$ ve $\tilde{\Gamma}_R = i[\tilde{\Sigma}_R - \tilde{\Sigma}_R^+]$ genişleme (broadening) fonksiyonlarıdır.

III. BULGULAR

Çalışmamızda sistemin etkin kütlesi yapı boyunca $m^* = 0,067m_e$, $m_e = 9,1094 \cdot 10^{-31}$ kg serbest elektron kütlesi, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 12,7$, etkin Bohr yarıçapı $a_0^* = 10,1061$ nm, etkin Hartree enerjisi $E_H^* = 11,2193$ meV alınmıştır [17]. Bu değerler GaAs temelli yarıiletkenlerin parametreleridir. Şekil 2 de iletim olasılığının gelen elektron enerjisi ile değişimi gösterilmektedir. Bu grafikte kuyu genişlikleri $L_w = 4.0$ nm, bariyer genişlik parametresi $\sigma = 40$ meV/nm² seçilmiş olup üç farklı lazer giydirmeye parametresi ($\alpha = 0.0, 2.0$ ve 4.0 nm) için çizilmiştir. Şekil 2 de içerisine eklenen küçük şekilde lazer giydirmeye parametresinin potansiyel profiline etkisi görülmektedir. Sisteme uygulanan yoğun lazer alan şiddeti α ile orantılı olup, α 'nın artması ile PBÇK potansiyel formunun değiştiği gözlemlenmiştir ve buna bağlı olarak rezonans tünelleme geçiş katsayısında oluşan rezonans pikin biraz daha yüksek enerji değerlerinde ortaya çıktığı görülmüştür. Rezonans tünelleme pikleri kuyu içerisinde kalan kuyu enerji seviyesi ile gelen elektronun enerjilerinin aynı olduğu değerlerde oluşmaktadır. Bu enerji seviyelerine rezonans enerji (E_{res}) seviyeleri adı verilir. Şekil 2 de elektronun enerjisine (E) bağlı olarak geçiş olasılığı (T) değişimi verilmiştir.



Şekil 2. Geçiş olasılığının elektron enerjisine bağlı değişimi

meV mertebesinde olan elektronik enerji seviyeleri aralıkları, THz mertebesinde foton frekansına karşılık gelmektedir. Güçlü alan THz darbeleri kullanılarak potansiyel yapısının değişimi sağlanabilmektedir. Bu durum, manyetik düzen, süperiletken karakter veya ferroelektrik polarizasyon gibi malzeme özelliklerini değiştiren yapı geometrisinin kontrolünü sağlar [35-38]. Bu tip nano yapılar terahertz bant genişliği sinyallerini üretmek ve tespit etmek için kullanılabilen yüksek hızlı anahtarlama yapıları için kullanılabilecek bazı kuantum cihazları yapılabilmeye olanak sağlamaktadır [2,17].

Rezonans enerji seviyesindeki geçiş olasılığı rezonans pik şiddeti ($T_{E_{res}}$) olarak isimlendirilmektedir. Lazer alanı uygulanmamış haldeki potansiyel yüksekliği olan $V=250$ meV değerinden düşük enerji seviyeleri ele alınmıştır.

Tablo 1. PBÇK yapısında rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyeler denk gelen elektron enerjilerinde geçiş olasılığı ($\sigma = 40$ meV/nm², $\alpha = 0$, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV)

L_W (nm)	E_{res1} meV	E_{res2} meV	E_{res3} meV	E_{res4} meV	$T_{E_{res1}}$	$T_{E_{res2}}$	$T_{E_{res3}}$	$T_{E_{res4}}$
0	185	-	-	-	0.9998	-	-	-
2.0	109.9	138.1	-	-	0.997	0.9993	-	-
4.0	69.67	82.88	237.8	-	0.9453	0.9758	0.9998	-
6.0	47.45	54.05	171.8	203	0.8548	0.8298	0.9965	1
8.0	34.23	37.84	128.5	146.5	0.9753	0.3183	0.9997	1
10.0	25.83	28.23	99.1	109.9	0.6764	0.972	0.9343	1
12.0	21.02	21.62	78.08	85.29	0.01695	0.395	0.95	1

Tablo 1 de sisteme lazer alanı uygulanmayan ($\alpha = 0$) durumda kuyu genişliğine bağlı olarak enerji seviyelerinin yeri ve bu seviyelere denk enerjide gelen elektronların yapıdan geçme olasılıkları verilmiştir. Genişlik parametresi $\sigma = 40$ meV/nm² olarak seçilmiştir. $E_{res1}, E_{res2} \dots$ geçiş olasılığını maksimum yapan (bazı durumlarda 1 yapan) sırasıyla 1. 2. ... rezonans enerji seviyeleridir. Kuyu genişliği arttıkça rezonans enerji seviyesi daha düşük enerjilere (kırmızıya kayma) doğru kaymakta ve enerji seviyeleri arasındaki fark (ΔE) azalmaktadır. Kuyu genişliği arttıkça 1. Rezonans enerjisinde geçiş olasılığı azalmaktadır. Bunun nedeni kuyular genişledikçe gelen elektronların kuyularda lokalize olmaya başlamalarıdır. Düşük enerji seviyelerinde bariyerin parabolik yapısından ötürü tünelleme olasılığı azalır.

Tablo 2. PBÇK yapısında rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyeler denk gelen elektron enerjilerinde geçiş olasılığı ($\sigma = 40$ meV/nm², $\alpha = 2$ nm, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV)

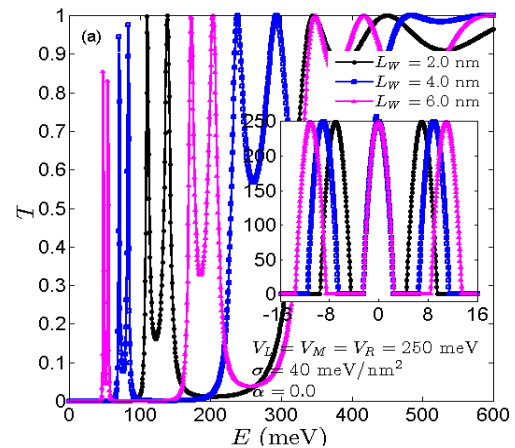
L_W (nm)	E_{res1} meV	E_{res2} meV	E_{res3} meV	E_{res4} meV	$T_{E_{res1}}$	$T_{E_{res2}}$	$T_{E_{res3}}$	$T_{E_{res4}}$
0.0	192.8	-	-	-	0.9999	-	-	-
2.0	129.1	165.8	-	-	1	0.9996	-	-
4.0	88.89	106.9	228.2	-	0.9901	0.9871	1	-
6.0	61.26	69.67	175.4	213.8	0.9998	0.9204	1	1
8.0	43.84	48.05	138.7	162.2	0.2585	0.9999	1	1
10.0	32.43	34.83	110.5	124.9	0.06738	0.3292	1	1
12.0	24.62	25.83	88.89	97.9	0.09848	0.03311	1	1

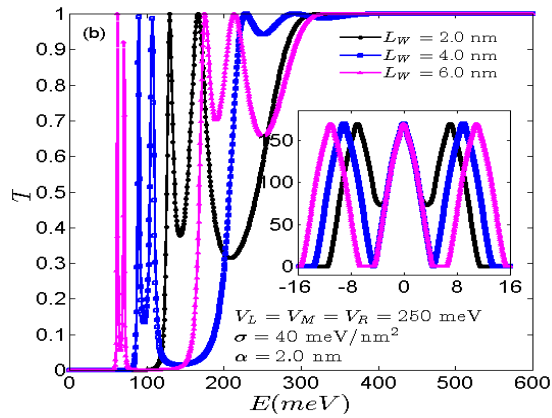
Tablo 2 de lazer giydirme parametresinin $\alpha=2.0$ nm iken kuyu genişliğine bağlı olarak enerji seviyelerinin yeri ve bu seviyelere denk enerjide gelen elektronların yapıdan geçme olasılıkları verilmiştir. Tablo 3 te lazer giydirme parametresinin $\alpha = 4.0$ nm olduğu durumda kuyu genişliğine bağlı olarak enerji seviyelerinin yeri ve bu seviyelere denk enerjide gelen elektronların yapıdan geçme olasılıkları verilmiştir. Genişlik parametresi $\sigma = 40$ meV/nm² olarak seçilmiştir. Lazer alanı uygulandığında yapının potansiyel yüksekliğinin azaldığı görülmektedir. $L_W = 4.0$ nm için alan yokken 1. Rezonans enerjisinin $E_{res1} = 69.67$ meV iken lazer alanı $\alpha = 2.0$ nm de $E_{res1} = 88.89$ meV, $\alpha = 4.0$ nm de $E_{res1} = 99.1$ meV değerinde olduğu görülmektedir. Yani lazer alanı enerjide maviye kaymaya neden olmaktadır. α parametresinin değeri arttıkça kuyu tabanı yükselmekte ve kuyular yer değiştirmektedir. Bu durum rezonans enerjilerinin yüksek enerjilerde gözlemlenmesine neden olur.

Tablo 3. PBÇK yapısında rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyeler denk gelen elektron enerjilerinde geçiş olasılığı ($\sigma = 40$ meV/nm², $\alpha = 4.0$ nm, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV)

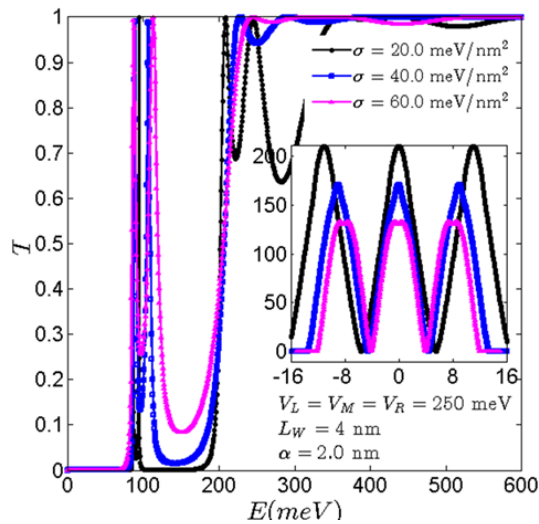
L_W (nm)	E_{res1} meV	E_{res2} meV	E_{res3} meV	E_{res4} meV	$T_{E_{res1}}$	$T_{E_{res2}}$	$T_{E_{res3}}$	$T_{E_{res4}}$
0.0	239	-	-	-	1	-	-	-
2.0	153.8	-	-	-	1	-	-	-
4.0	99.1	124.3	127.9	219.2	0.9983	1	1	1
6.0	80.48	99.1	131.5	159.2	0.9999	0.9993	1	1
8.0	63.06	72.07	126.7	157.4	0.9985	0.9982	1	1
10.0	47.45	52.25	108.7	128.5	0.5093	0.9864	1	1
12.0	36.04	38.44	94.89	109.9	0.07531	0.1018	1	1

Şekil 3 te elektronun enerjisine bağlı olarak farklı kuyu genişlikleri ($L_W = 2.0, 4.0, 6.0$ nm) için yapıdan geçme olasılığı görülmektedir. Şekil 3(a) da lazer alanı yokluğunda ($\alpha = 0.0$) kuyu genişledikçe enerji seviyelerinin düşük enerjiye kaydığı görülmektedir. Şekil 3(b) de görüldüğü gibi lazer alanı uygulandığında ($\alpha = 2.0$ nm) ise bariyer yükseklikleri azalmaktadır. Ayrıca şekillerdeki yakın ikili pikler kuyu çiftlenimi nedeniyle oluşmaktadır. Enerji seviyeleri lazer alanı uygulanmamış duruma kıyasla daha yüksek enerjilerde oluşmaktadır. Yine kuyu genişlikleri arttıkça enerji seviyeleri daha düşük enerjilere doğru kaymaktadır.





Şekil 3. Geçiş olasılığının farklı kuyu genişlikleri için ($L_W=2.0, 4.0, 6.0$ nm) elektron enerjisine bağlı değişimi. (a) lazer alanı yokluğunda ($\alpha=0$), (b) lazer alanı varlığında ($\alpha=2.0$ nm) çizilmiştir



Şekil 4. Geçiş olasılığının farklı genişlik parametreleri için ($\sigma=20, 40, 60$ meV/nm²) elektron enerjisine bağlı değişimi.

Şekil 4 te yapıya gelen elektronların enerjisine göre farklı genişlik parametreleri ($\sigma = 20, 40, 60$ meV/nm²) için elektronların geçme olasılıkları görülmektedir. Grafikteki küçük şekilde ise lazer alanı var iken genişlik parametresinin potansiyel yapıya etkisi görülmektedir. Genişlik parametresi arttıkça lazer alanının bariyerler yüksekliklerini küçülttüğü görülmektedir. Tablo 4, 5 ve 6 da sırasıyla $\alpha = 0.0, 2.0$ ve 4.0 nm olduğu durumlarda enerji seviyeleri verilmiştir. Şekil 4 ve Tablo 4, 5 ve 6 daki enerjilere bakıldığında lazer alanı yokluğunda veya düşük değerlerinde σ arttığında enerji seviyeleri aralığı (ΔE) da artmaktadır. $\alpha = 4.0$ nm durumunda enerji seviyeleri aralığında σ nın artmasıyla önce artış daha sonra ise azalma gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, lazer alanının şiddetli olması durumunda kuyu yerleri ve yüksekliklerinin değişmesidir. Yoğun lazer alanı, yapıda büyük yapısal değişikliklere yol açmaktadır.

Tablo 4. PBÇK yapısında rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyeler denk gelen elektron enerjilerinde geçiş olasılığı $L_W = 4$ nm, $\alpha = 0$ nm, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV

σ meV/nm ²	E_{res1} meV	E_{res2} meV	E_{res3} meV	E_{res4} meV	T_{Eres1}	T_{Eres2}	T_{Eres3}	T_{Eres4}
11.0803	63.06	-	197	212.6	0.1674	-	1	1
20.4082	67.27	72.67	214.4	245.6	0.3303	0.7901	1	1
40.0000	69.67	82.88	237.8	-	0.9453	0.9758	1	-
51.6529	69.67	87.09	248.6	-	0.9513	0.984	1	-
62.5000	69.67	90.09	-	-	0.9916	0.9979	-	-
81.6327	69.07	94.29	-	-	0.9941	0.9999	-	-

Tablo 5. PBÇK yapısında rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyeler denk gelen elektron enerjilerinde geçiş olasılığı $L_W = 4$ nm, $\alpha = 2$ nm, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV

σ meV/nm ²	E_{res1} meV	E_{res2} meV	E_{res3} meV	E_{res4} meV	T_{Eres1}	T_{Eres2}	T_{Eres3}	T_{Eres4}
10	78.68	80.48	193.4	210.8	0.04263	0.865	1	1
20.4082	86.49	94.29	209	246.2	0.9991	0.7618	1	1
40.0000	88.89	106.3	228.2	-	0.9901	0.9875	1	-
51.6529	88.29	110.5	237.8	-	0.9876	0.9993	1	-
62.5000	87.09	113.5	246.2	-	0.9997	0.9985	1	-
81.6327	85.29	116.5	259.5	-	0.9942	0.9997	1	-

Tablo 6. PBÇK yapısında rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyeler denk gelen elektron enerjilerinde geçiş olasılığı $L_W = 4$ nm, $\alpha = 4$ nm, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV

σ meV/nm ²	E_{res1} meV	E_{res2} meV	E_{res3} meV	E_{res4} meV	T_{Eres1}	T_{Eres2}	T_{Eres3}	T_{Eres4}
10	112.3	118.3	179	-	0.9208	0.6396	1	-
20.4082	111.1	126.7	165.2	236.6	0.9923	0.9986	1	1
40.0000	99.1	124.3	127.9	219.2	0.9983	1	1	1
51.6529	94.29	119.5	-	233.6	0.9987	0.998	-	1
62.5000	91.29	115.9	-	245.6	1	0.9982	-	1
81.6327	87.09	109.9	-	-	0.9998	0.9997	-	-

IV. TARTIŞMA VE SONUÇ

Düşük boyutlu kuantum sistemlerinde rezonans tünelleme karakteristiklerinin ve enerji seviyelerinin dış alanlara (elektrik, manyetik veya lazer) ve yapının geometrik parametrelerine bağlılığının anlaşılması ve kontrol edilebilirliğinin sağlanması teknolojik açıdan oldukça önemlidir. Kuyu genişliği ve bariyer yükseklikleri enerji seviyesinin yerinin belirlenmesinde etkili yapısal parametrelerdir. Çalışmamızda yoğun lazer alanı altında üçlü ters parabolik kuantum bariyer çift kuyu potansiyelinde elektronik iletim ve enerji seviyelerinin bariyer genişlikleri, lazer alanı giydirme parametresine bağlılığı araştırılmıştır. Hesaplama yöntemi olarak denge-dışı Green fonksiyonları kullanılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, yüksek-frekanslı yoğun lazer alanının potansiyel profilini oldukça etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, tünelleme geçiş katsayısının kuyu genişliğine, bariyerlerin genişlik parametresi ile uygulanan lazer alanının şiddetine oldukça bağlı olduğu görülmüştür. Enerji seviyeleri ile iletim katsayısının, başka bir kontrol mekanizması olmaksızın lazer alan şiddetinin değiştirilmesi ile kontrol edilebildiği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Tsu, R. ve Esaki, L. (1973). Tunneling in a finite superlattice, *Appl. Phys. Lett.*, 22, 562-564.
- [2] Levi, A.F.J. (2006). Applied Quantum Mechanics, Cambridge University Press.
- [3] Mizuta, H. ve Tanoue, T. (1995). Physics and Applications of Resonant Tunneling Diodes, Cambridge University Press.
- [4] Aktas, S., Kes, H., Boz, F.K. ve Okan, S.E. (2016). Control of a resonant tunneling structure by intense laser fields, *Superlattices and Microstruct.*, 98, 220-227.
- [5] Miyamoto, T., Yamaguchi, A. ve Mukai, T. (2016). Terahertz imaging system with resonant tunneling diodes, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 032201.
- [6] Rong, T., Yang, L.-A., Yang, L. ve Hao, Y. (2018). Theoretical investigation into negative differential resistance characteristics of resonant tunneling diodes based on lattice-matched and polarization-matched AlInN/GaN heterostructures, *J. Appl. Phys.*, 123, 045702.
- [7] Shen, W.P. ve Rustgi, M.L. (1993). Two coupled parabolic wells under an electric field, *J. Appl. Phys.*, 74, 4006-4014.
- [8] Ohmukai, M. (2005). Triangular double barrier resonant tunneling, *Mater. Sci. Eng. B*, 116, 87-90.
- [9] Wang, H., Xu, H. ve Zhang, Y. (2006). A theoretical study of resonant tunneling characteristics in triangular double-barrier diodes, *Phys. Lett. A*, 355, 481-488.
- [10] Karmakar, R., Biswas, A., Mukherjee, S. ve Deyasi, A. (2011). Calculating Transmission Coefficient of Double Quantum Well Triple Barrier Structure having Parabolic Geometry using Propagation Matrix Method, *IJEAT*, 1, 37-41.
- [11] Chang, L.L., Esaki, L. ve Tsu, R. (1974). Resonant tunneling in semiconductor double barriers, *Appl. Phys. Lett.*, 24, 593-595.
- [12] Nutku, F. (2014). Quasi-bound levels, transmission and resonant tunneling in heterostructures with double and multi rectangular, trapezoidal, triangular barriers, *J. Comput. Electron.*, 13, 456-465.
- [13] Bati, M., Sakiroglu, S., Sokmen, I. (2016). Electron transport in electrically biased inverse parabolic double-barrier structure, *Chin. Phys. B*, 25, 057307.
- [14] Bati, M. (2018). Resonant tunneling properties of inverted Morse double quantum barrier, *Chin. J. Phys.*, 56, 593-597.
- [15] Davies, J.H. (1998). The Physics of Low-dimensional Semiconductors. An Introduction, Cambridge University Press.
- [16] Bati, M. (2019). Electronic Transport and Resonant Tunneling Properties of Hyperbolic Pöschl-Teller Double-Barrier Structures, *J. Comput. Theor. Transp.*, 48:2, 66-76.
- [17] Ferry, D.K., Goodnick, S.M. ve Bird, J. (2009). Transport in Nanostructures, Cambridge University Press, Cambridge.
- [18] Martinz, S.D.G. ve Ramos, R.V. (2016). Double quantum well triple barrier structures: analytical and numerical results, *Can. J. Phys.*, 94(11), 1180-1188.
- [19] L.D. Macks, S.A. Brown, R.G. Clark, R.P. Starrett, M.A. Reed, M.R., Deshpande, C.J.L. Fernando ve W.R. Frensley, (1996). Resonant tunneling in double-quantum-well triple-barrier heterostructures, *Phys. Rev. B*, 54 4857-4862.
- [20] Peralta, X.G., Allen, S.J., Wanke, M.C., Harff, N.B., Simmons, J.A., Lilly, M.P., Reno, J.L., Burke, P.J. ve Eisentein, J.P. (2002). Terahertz photoconductivity and plasmon modes in double-quantum-well field-effect transistors, *Appl. Phys. Lett.*, 81, 1627-1629.
- [21] Wecker, T., Callsen, G., Hoffmann, A., Reuter, D. ve As, D.J. (2018). Correlation of the Carrier Decay Time and Barrier Thickness for Asymmetric Cubic GaN/Al_{0.64}Ga_{0.36}N Double Quantum Wells, *Phys. Status Solidi (b)*, 255, 1700373.
- [22] Waho, T., Chen, K. ve Yamamoto, M. (1996). A novel multiple-valued logic gate using resonant tunneling devices, *IEEE Electron Device Lett.*, 17, 223-225.
- [23] Lee, J., Lee, J. ve Yang, K. (2012). A low-power 40-gb/s 1: 2 demultiplexer ic based on a resonant tunneling diode, *IEEE Trans Nanotechnol.*, 11, 431-434.
- [24] Singh, M.M ve Siddiqui, M.J. (2016). Effect of Si-delta doping and barrier lengths on the performance of triple barrier GaAs/AlGaAs resonant tunneling diode, IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), Hong Kong, 30-34.
- [25] Markelz, A.G. ve Asmar, N.G. (1996). Interband impact ionization by terahertz illumination of InAs heterostructures, *Appl. Phys. Lett.*, 69, 3975.
- [26] Lima, F.M.S., Amato, M.A., Nunes, O.A.C., Fonseca, A.L.A., Enders, B.G. ve da Silva, E.F. (2009). Unexpected transition from single to double quantum well potential induced by intense laser fields in a semiconductor quantum well, *J. Appl. Phys.*, 105, 123111.
- [27] Eseau, N., Niculescu, E.C. ve Burileanu, L.M. (2009). Simultaneous effects of pressure and laser field on donors in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs quantum wells, *Physica E*, 41, 1386-1392.
- [28] Eseau, N. (2011). Intense laser field effect on the interband absorption in differently shaped near-surface quantum wells, *Phys. Lett. A*, 375(6), 1036-1042.
- [29] Chakraborty, T., Manaselyan, A., Barseghyan, M. ve Laroze, D. (2018). Controllable continuous evolution of electronic states in a single quantum ring, *Phys. Rev. B*, 97, 041304.

- [30] Ungan, F., Mora-Ramos, M.E., Barseghyan, M.G., Pérez, L.M. ve Laroze, D. (2019). Intersubband optical properties of a laser-dressed asymmetric triple quantum well nanostructure, *Physica E*, 114, 113647.
- [31] Barseghyan, M.G., Baghramyan, H.M., Kirakosyan, A.A. ve Laroze, D. (2020). The transition from double to single quantum dot induced by THz laser field, *Physica E*, 116, 113758.
- [32] Salén, P., Basini, M., Bonetti, S., Hebling, J., Krasilnikov, M., Nikitin, A.Y., Shamuilov, G., Tibai, Z., Zhaunerchyk, V. ve Goryashko, V. (2019). Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology, *Phys. Rep.*, 836-837, 1-74.
- [33] Niculescu, E.C., Eseanu, N. ve Spandonide, A. (2015). Laser Field Effects on The Interband Transitions in Differently Shaped Quantum Wells, *U.P.B. Sci. Bull., Series A*, 77.
- [34] Yesilgul, U., Al, E.B., Martínez-Orozco, J.C., Restrepo, R.L., Mora-Ramos, M.E., Duque, C.A., Ugan, F. ve Kasapoglu, E. (2016). Linear and nonlinear optical properties in an asymmetric double quantum well under intense laser field: Effects of applied electric and magnetic fields, *Opt. Mater.*, 58, 107-112.
- [35] Saczuk, E. ve Kamiński, J. Z. (2003). Resonant tunneling in the presence of intense laser fields, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 240, 273-284.
- [36] Aktas, S., Bilekkaya, A., Boz, F.K. ve Okan, S.E. (2015). Electron transmission in symmetric and asymmetric double-barrier structures controlled by laser fields, *Superlatt. and Microstruct.*, 85, 266-273.
- [37] Datta, S. (2005). *Quantum Transport: Atom to Transistor*, Cambridge University Press, Cambridge
- [38] Bati, M., (2020) The effects of the intense laser field on the resonant tunneling properties of the symmetric triple inverse parabolic barrier double well structure, *Physica B*, 594, 412314.
- [39] Marinescu, M. ve Gavrilă, M. (1996). First iteration within the high-frequency Floquet theory of laser-atom interactions, *Phys. Rev. A*, 53, 2513-2521.
- [40] Boz, F.K., Aktas, S., Bekar, B. ve Okan, S.E. (2012). Laser field-driven potential profiles of double quantum wells, *Phys. Lett. A*, 376, 590-594.

Eşlenmiş Lie Grupları Üzerindeki Lagrange Fark Denklemleri

Discrete Lagrangian Dynamics on Matched Pair Lie Groups

Oğul ESEN¹ , Mahmut KUDEYT² , Serkan SÜTLÜ³ 

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Matematik Bölümü, 41400 Gebze-Kocaeli, Türkiye

² Gebze Teknik Üniversitesi, Matematik Bölümü, 41400 Gebze-Kocaeli, Türkiye

³ Işık Üniversitesi, Matematik Bölümü, 34980 Şile-İstanbul, Türkiye

Öz

Bu makalede, kesikli (discrete) dinamiğin Lagrange formülasyonu eşlenmiş (matched pair) Lie grupları üzerinde çalışılmıştır. Sonuç olarak, karşılıklı etkileşim altındaki iki sistemin kolektif davranışını belirleyen eşlenmiş (Lagrange) fark denklemleri elde edilmiştir. İki örnek verilmiştir. İlki, bir Lie grubunun tanjant grubu üzerindeki fark denklemleri, ikincisi ise Heisenberg grubu üzerindeki fark denklemleridir.

Anahtar kelimeler: (Lagrange) fark denklemleri; eşlenmiş Lie grubu; tanjant grubu; Heisenberg grubu.

Abstract

In this work, discrete Lagrangian dynamics is studied on matched pairs of Lie groups. Accordingly, the *matched discrete (Lagrange) equations* are introduced. These equations govern the collective motion of two mutually interacting discrete models. The theory is illustrated both on the tangent group of a Lie group, and on the Heisenberg group.

Key words: Discrete Lagrange equations; matched pair of Lie groups; tangent group; Heisenberg group.

I. GİRİŞ

Fark denklemlerini (difference equations) konfigürasyon uzayı Lie grubu olan fiziksel sistemler için de yazmak mümkündür [1]. Bu formülasyon, özellikle integrasyon ve nümerik çözümler için zengin geometrik/cebirselsel bir yapı vadetmektedir [2]. G ile göstereceğimiz bir Lie grubu üzerinde tanımlı, reel değerli Lagrange fonksiyonu \mathcal{L} için, 2-adımlı olan (Euler-)Lagrange fark denklemleri

$$\mu_{k+1} = \text{Ad}_{g_k}^* \mu_k, \quad \mu_k = T_e^* R_{g_k} d\mathcal{L}(g_k) \quad (1)$$

şeklinde yazılır [1,3,4]. Burada, k bir pozitif tam sayıdır. μ_k ve μ_{k+1} , Lie cebiri \mathfrak{g} 'nin dual uzayı \mathfrak{g}^* 'in elemanlarıdır. Ad^* Lie grubu G 'nin dual uzay \mathfrak{g}^* üzerine koadjoint etkisidir. e birim elemanı göstermek üzere $T_e^* R_{g_k}$ ise sağ öteleme dönüşümünün dualidir.

Bu makaledeki amacımız, konfigürasyon uzayı Lie grubu olan ve dinamiği fark denklemleri formunda yazılan, etki tepki içindeki iki sistemin, beraber hareketini kontrol edecek kolektif bir denklem takımı yazmaktır. Diğer bir ifade ile, problemimiz, farklı Lie grupları üzerinde tanımlı ve (1) formunda verilen iki hareket denklemini, Lie grupları birbirine karşılıklı etki ederken, birleştirip tek bir sistem olarak ifade etmektir. Bu, elbette, bireysel hareketleri veren denklemleri yan yana getirmek ile başarılamaz. Karşılıklı etki nedeniyle, beraber hareketi betimleyen fark denklemleri, bütünü oluşturan iki sistemin fark denklemlerinin dışında terimler de içerecektir. Bu ekstra terimleri belirlemek için, karşılıklı etki içindeki iki Lie grubunun nasıl birleştirilip tek bir Lie grubu yapılabileceği sorusunun cevaplanması gerekir. Bu teorik eşik, eşlenmiş (matched pair) Lie grubu tanımı [5,6,7] ile aşılabacaktır. Bu terminolojiden yararlanarak, eşlenmiş Lie grubu üzerinde elde ettiğimiz kolektif denklemlere *eşlenmiş fark denklemleri* adını vereceğiz. Yaklaşımımız geometrik/cebirselsel bir inşa süreci içereceğinden, uyumluluk şartını sağlayan tüm sistemler için, bu makalemizde sunacağımız *eşlenmiş fark denklemlerini* kullanmak mümkün olacaktır. Biz de uygulama alanının genişliğini vurgulamak adına, elde ettiğimiz denklemleri biri teorik, tanjant grubu, diğeri ise daha somut, Heisenberg grubu, üzerinde çalışacağız.

Bu çalışmamız iki ana bölümden oluşmuştur. Bunların ilki, teorik olarak problemimize yaklaşımımızı sunduğumuz ve problemimizin çözümünü temel tanımlar ışığında verdiğimiz bölümdür. Eşlenmiş fark denklemleri bu bölümde sunulacaktır. Üçüncü bölümde ise teorik sonuçlarımızı özel örnekler üzerinde tartışacağız. İlk uygulama olarak, tanjant grubu üzerinde tanımlanan fark denklemlerinin, eşlenmiş fark denklemleri olarak ifade edilebileceği gösterilecektir. Diğer örnekte ise karşılıklı etki içindeki iki 3 boyutlu Heisenberg grubunun üzerindeki fark denklemlerinin eşlenmesi gerçekleştirilecektir.

II. LIE GRUBU ÜZERİNDE FARK DENKLEMLERİ VE EŞLENMELERİ

2.1. Lie Grubu ve Lie Cebiri

İlk olarak, G ile göstereceğimiz bir türetilebilir katmanı (manifold) göz önüne alalım. Bu katman, bir grup yapısına sahip olsun ve grup operasyonları – grup çarpımı ve ters alma işlemi – türevlenebilir olsun. Bu durumda, G katmanı, bir Lie grubu adını alır [9,13,22]. Bir Lie grubu G üzerindeki grup işlemini şu şekilde gösterelim:

$$G \times G \rightarrow G, \quad (g, \tilde{g}) \mapsto g\tilde{g}. \quad (2)$$

Grubun birim elemanını e ile, bir g elemanının tersini ise g^{-1} ile göstereceğiz. Bu grup üzerinde, L ve R ile göstereceğimiz sol ve sağ ötelemeler mevcuttur:

$$L_g(\tilde{g}) = R_{\tilde{g}}(g) = g\tilde{g}. \quad (3)$$

Denklemin en sağ tarafındaki çarpım, G üzerindeki grup çarpımıdır.

Bir Lie grubu G 'ye karşılık gelen Lie cebiri \mathfrak{g} 'yi, birim elemana teğet olan $T_e G$ uzayı olarak tanımlayalım. Lie cebiri \mathfrak{g} üzerinde, ters-simetrik ve Jacobi eşitliğini sağlayan iki-lineer bir çerçeve mevcuttur:

$$[\bullet, \bullet]: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}, \quad (\xi, \tilde{\xi}) \mapsto [\xi, \tilde{\xi}]. \quad (4)$$

Bu operasyon Lie çerçevesi adıyla anılır. Bu çerçeveyi, Denklem (2)'de belirlediğimiz grup çarpımından hareketle elde etmemiz mümkündür. Bunun için, öncelikle, bir $\xi \in \mathfrak{g}$ vektörü için, bu vektöre karşılık gelen sol değişmez vektör alanı

$$\tilde{\xi}: G \rightarrow TG, \quad g \mapsto T_e L_g(\xi), \quad (5)$$

olarak tanımlanır. Burada sol ötelemenin tanjant dönüşümü (Jakobyeni) TL , sağ ötelemenin tanjant dönüşü TR ile değiştirilerek, sağ değişmez vektör alanı

$$\tilde{\xi}: G \rightarrow TG, \quad g \mapsto T_e R_g(\xi) \quad (6)$$

tanımlanır. Sol değişmez vektör alanlarını kullanarak, $\xi, \tilde{\xi} \in \mathfrak{g}$ ve $g^{-1} \in G$ için, Lie cebiri \mathfrak{g} üzerinde Denklem (4) ile belirlediğimiz Lie çerçevesi

$$[\xi, \tilde{\xi}] = TL_{g^{-1}} [\tilde{\xi}, \tilde{\xi}]_{JL} \quad (7)$$

şeklinde hesap edilir. Burada eşitliğin sağ tarafında JL altsimgesi ile belirlenen çerçeve, vektör alanları üzerindeki klasik Jacobi-Lie çerçevesidir. Benzer şekilde, Denklem (6)'da verilen sağ-değişmez (right-invariant) vektör alanları ile de çerçeveyi tanımlamak mümkündür. Bu şekilde elde edilecek Lie çerçevesi, Denklem (7)'deki Lie çerçevesinin eksi ile çarpılmış hali olacaktır.

Adjoint ve Koadjoint Temsiller. Bir Lie grubu G 'nin, Lie cebiri \mathfrak{g} üzerine sol adjoint etkisi

$$\text{Ad}: G \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}, \quad (g, \xi) \mapsto \text{Ad}_g \xi = TL_g \circ TR_{g^{-1}}(\xi) \quad (8)$$

olarak tanımlanır. Bu etkinin türevi ise Lie cebirinin kendisi üzerine sonsuz küçük (infinitesimal) adjoint etkisini verecektir. Bu türevi hesaplamak için, Lie grubu G üzerinde x_t ile göstereceğimiz bir eğri alalım. Bu eğri, $t = 0$ 'da birim elemanı e 'den geçsin ve bu noktadaki, yani $t = 0$ 'daki, türevi $\xi \in \mathfrak{g}$ vektörü olsun. Bu seçimler ışığında, sonsuz küçük adjoint etki

$$\text{ad}: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}, \quad (\xi, \tilde{\xi}) \mapsto \text{ad}_\xi \tilde{\xi} := \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \text{Ad}_{x_t} \tilde{\xi} \quad (9)$$

olarak tanımlanır. Dikkatli bir gözlem, Denklem (9)'da tanımladığımız etki ve Denklem (7)'de tanımladığımız Lie çerçevesinin aynı olduğunu, diğer bir ifade ile, $\text{ad}_\xi \tilde{\xi} = [\xi, \tilde{\xi}]$ eşitliğini verecektir. Biz, metin içinde, bu eşitlikten yararlanarak, iki gösterimi de uygunluk durumlarına göre birbirleri yerine kullanacağız.

Lie cebiri \mathfrak{g} bir vektör uzayıdır ve her vektör uzay gibi, \mathfrak{g} 'nin de bir lineer cebirsel dual uzayı bulunmaktadır. Dual uzayı \mathfrak{g}^* ile göstereceğiz. Lie grubu G 'nin, dual uzay \mathfrak{g}^* üzerine sol koadjoint etkisi

$$\text{Ad}^*: G \times \mathfrak{g}^* \rightarrow \mathfrak{g}^*, \quad \langle \text{Ad}_g^* \mu, \xi \rangle = \langle \mu, \text{Ad}_{g^{-1}} \xi \rangle, \quad \forall \xi \in \mathfrak{g} \quad (10)$$

eşitliği aracılığıyla Denklem (10)'da, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ile gösterdiğimiz, Lie cebiri \mathfrak{g} ve duali \mathfrak{g}^* arasındaki doğal eşleme (pairing) olarak tanımlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken, dual operatör Ad_g^* 'nin $\text{Ad}_{g^{-1}}$ 'in duali olduğudur. Bu tercihi, Ad^* ile gösterdiğimiz koadjoint etkinin sol etki olmasını garanti etmek için yaptık. Lie cebiri \mathfrak{g} 'nin duali \mathfrak{g}^* üzerine sonsuz küçük koadjoint etkisi ise

$$\text{ad}^*: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g}^* \rightarrow \mathfrak{g}^*, \quad \langle \text{ad}_\xi^* \mu, \tilde{\xi} \rangle = -\langle \mu, \text{ad}_\xi \tilde{\xi} \rangle, \quad \forall \tilde{\xi} \in \mathfrak{g} \quad (11)$$

eşitliğiyle tanımlanır. Tanımdaki eksi işareti sayesinde, sonsuz küçük koadjoint etki ad^* 'da sol etki olmuş ve de Denklem (10)'da verilen koadjoint etki Ad^* 'ın türevi

olarak ifade edilebilir hale gelmiştir.

2.2. Karşılıklı Etki İçindeki İki Lie Grubunun Eşlenmesi

G ve H iki Lie grubu olsun. H grubunun G üzerine soldan etkisi

$$\triangleright: H \times G \rightarrow G, \quad (h, g) \mapsto h \triangleright g, \tag{12}$$

ve G grubunun H üzerine sağdan etkisi

$$\triangleleft: H \times G \rightarrow H, \quad (h, g) \mapsto h \triangleleft g \tag{13}$$

verilsin. Kartezyen çarpım uzayında $G \times H$ üzerinde Denklem (12) ve (13)'de verilen karşılıklı etkileri de muhafaza eden bir çarpım tanımlamak mümkündür:

$$(g, h)(\tilde{g}, \tilde{h}) = (g(h \triangleright \tilde{g}), (h \triangleleft \tilde{g})\tilde{h}). \tag{14}$$

Bu çarpımın bir grup çarpımı olabilmesi, diğer bir ifade ile, $G \times H$ uzayının bir Lie grubu olabilmesi için (14) işleminin birleşme özelliğini sağlaması gerekir. Bu, ancak ve ancak, aşağıdaki koşulların sağlanması ile mümkündür:

$$h \triangleright (g\tilde{g}) = (h \triangleright g)((h \triangleleft g) \triangleright \tilde{g}), \tag{15a}$$

$$(h\tilde{h}) \triangleleft g = (h \triangleleft (\tilde{h} \triangleright g))(\tilde{h} \triangleleft g). \tag{15b}$$

Bu şartlar altında tanımlanmış ve Denklem (14)'de verilen grup çarpımını taşıyan Kartezyen çarpım uzayını $G \bowtie H$ notasyonu ile göstereceğiz ve eşlenmiş Lie grubu adını vereceğiz [6,10,12,16]. Eşlenmiş Lie grubu $G \bowtie H$ 'nin birim elemanı, G 'nin birim elemanı e_G ve H 'nin birim elemanı e_H olacak şekilde gösterilirse, (e_G, e_H) ikilisi ile verilecektir. Aşağıdaki önerme eşlenmiş Lie grubu kavramını, bir Lie grubun aşikar kesişen iki Lie altgrubuna dekompozisyonu olarak belirlemekte ve eşlenme kavramını daha net olarak ortaya koymaktadır. İspat için [10] nolu kaynağı işaret edebiliriz.

Önerme 2.1: S bir Lie grubu olsun. G ve H ile S 'nin iki Lie altgrubu gösterilsin ve de S üzerindeki grup işlemi $S \cong G \times H$ izomorfizması ile üretilsin. Bu durumda S Lie grubu $G \bowtie H$ eşlenmiş Lie grubuna eşyapılıdır. Bu durumda herhangi bir $g \in G$ ve $h \in H$ için karşılıklı etkiler

$$hg = (h \triangleright g)(h \triangleleft g) \tag{16}$$

işlemi ile üretilir. Burada, G ve H gruplarının S içine gömülmeleri

$$G \rightarrow S: g \mapsto (g, e), \quad H \rightarrow S: h \mapsto (e, h) \tag{17}$$

olarak tanımlanır.

Karşılıklı etkilerin türevleri. Bu kısımdaki amacımız Denklem (12) ve (13)'de verilen karşılıklı etkilerin türevlerini hesap etmek ve bu şekilde etkilerin sonsuz

küçük versiyonlarına ulaşmaktır. Bunun için, bir eşlenmiş Lie grubu belirleyecek şekilde karşılıklı olarak etki eden G ve H Lie gruplarını ve, sırasıyla, bu gruplara karşı gelen Lie cebirleri \mathfrak{g} ve \mathfrak{h} 'yi göz önüne alalım.

İlk olarak Denklem (12)'de verilen Lie grubu H 'nin Lie grubu G üzerine sol etkisi ile başlayalım.

- i. Türev işlemini gerçekleştirebilmek için, H Lie grubu içinde, $t = 0$ 'da grubun e_H birim elemanından geçen ve $t = 0$ 'daki türevi $\eta \in \mathfrak{h}$ vektörü olan bir y_t eğrisi ele alalım. Bu eğriyi, Denklem (12)'de verilen sol etkide grup elemanı $h \in H$ yerine yazalım ve görüntünün $t = 0$ 'da türevini alarak, Lie cebiri \mathfrak{h} 'nin Lie grubu G üzerindeki sonsuz küçük (infinitesimal) sol etkisini tanımlayalım:

$$\begin{aligned} \triangleright: \mathfrak{h} \times G &\rightarrow TG, \\ (\eta, g) &\mapsto \eta \triangleright g := \frac{d}{dt}(y_t \triangleright g)|_{t=0}. \end{aligned} \tag{18a}$$

- ii. Benzer şekilde, Lie grubu G içinde, $t = 0$ 'da grubun e_G birim elemanından geçen ve $t = 0$ 'daki türevi $\xi \in \mathfrak{g}$ vektörü olan bir x_t eğrisini tanımlayalım. Denklem (12)'de verilen sol etkide $g \in G$ elemanı yerine x_t eğrisini alalım ve $t = 0$ 'da türevini alarak, Lie grubu H 'nin Lie cebiri \mathfrak{g} üzerine sol etkisini tanımlayalım:

$$\begin{aligned} \triangleright: H \times \mathfrak{g} &\rightarrow \mathfrak{g}, \\ (h, \xi) &\mapsto h \triangleright \xi := \frac{d}{dt}(h \triangleright x_t)|_{t=0}. \end{aligned} \tag{18b}$$

Denklem (18a-18b)'de iki farklı etki elde ettik ve Denklem (12)'de kullandığımız \triangleright notasyonunu kullanmaya devam ettik. Bu seçimleri metni daha fazla notasyona boğmamak için yaptık. Metin içinde dönüşümleri görünür ve takip edilebilir kılmak için ise, elemanların

$$g \in G, h \in H, \xi \in \mathfrak{g} \text{ ve } \eta \in \mathfrak{h}$$

seçimlerini sabit tutacağız. Bu şekilde, daha rahat bir takibin mümkün olacağını umuyoruz. Şimdi, Denklem (18a-18b)'de verilen dönüşümlerin dual etkilerini hesap etmeye çalışalım. Bunun için Denklem (18a)'daki dönüşümle başlayalım, $g \in G$ grup elemanı sabitleyelim ve

$$\mathfrak{b}_g: \mathfrak{h} \rightarrow T_g G, \quad \mathfrak{b}_g(\eta) := \eta \triangleright g \tag{19}$$

lineer operatörü tanımlayalım. Benzer şekilde, Denklem (18b)'deki dönüşümde $h \in H$ elemanını sabitleyerek, \mathfrak{g} üzerinde bir lineer dönüşüm elde edelim. Bu sayede, Denklem (18a-18b)'deki operatörlerin duallerini sırasıyla

$$\begin{aligned} \mathfrak{b}_g^*: T_g^* G &\rightarrow \mathfrak{h}^*, \\ \langle \eta, \mathfrak{b}_g^*(\mu_g) \rangle &= \langle \mathfrak{b}_g(\eta), \mu_g \rangle = \langle \eta \triangleright g, \mu_g \rangle, \quad \forall \eta \in \mathfrak{h}, \end{aligned} \tag{20a}$$

$$\begin{aligned} \triangleleft: \mathfrak{g}^* \times H &\rightarrow \mathfrak{g}^*, \\ \langle \xi, \mu \triangleleft h \rangle &= \langle h \triangleright \xi, \mu \rangle, \quad \forall \xi \in \mathfrak{g} \end{aligned} \quad (20b)$$

olarak hesap edilir. Burada, \mathfrak{h}^* ile Lie cebiri \mathfrak{h} 'nin lineer cebirsel duali gösterilmektedir.

Şimdi de Denklem (13)'de verilen, Lie grubu G 'nin Lie grubu H üzerine sağ etkisine yoğunlaşalım.

- iii. Üstte tanımladığımız, Lie grubu G içinde bulunan, $t = 0$ 'da grubun birim elemanından geçen ve o noktada $\xi \in \mathfrak{g}$ vektörüne teğet olan x_t eğrisini, Denklem (13)'de verilen sağ etkide, grup elemanı $g \in G$ yerine yerleştirelim. Bu durumda görüntünün $t = 0$ 'daki türevi bize Lie cebiri \mathfrak{g} 'nin, Lie grubu H üzerindeki sonsuz küçük etkisini verecektir. Bu etki de sağ etkidir:

$$\begin{aligned} \triangleleft: H \times \mathfrak{g} &\rightarrow TH, \\ (h, \xi) &\mapsto h \triangleleft \xi := \frac{d}{dt}(h \triangleleft x_t)|_{t=0}. \end{aligned} \quad (21a)$$

- iv. H Lie grubu içindeki, $t = 0$ 'da birim elemandan geçen ve bu noktadaki türevi $\eta \in \mathfrak{h}$ olan y_t eğrisini ise Denklem (13)'de verilen sağ etkide grup elemanı $h \in H$ yerine yerleştirip, görüntünün $t = 0$ 'da türevini alalım. Böylece, Lie grubu G 'nin Lie cebiri \mathfrak{h} üzerinde sağ etkisine ulaşırız:

$$\begin{aligned} \triangleleft: \mathfrak{h} \times G &\rightarrow \mathfrak{h}, \\ (\eta, g) &\mapsto \eta \triangleleft g := \frac{d}{dt}(y_t \triangleleft g)|_{t=0} \end{aligned} \quad (21b)$$

Şimdi Denklem (21a-21b)'de sunduğumuz etkilerin duallerini elde etmeye çalışalım. Denklem (21a)'daki ilk etkide $h \in H$ grup elemanı sabitlenirse,

$$\alpha_h: \mathfrak{g} \rightarrow T_h H, \quad \alpha_h(\xi) = h \triangleleft \xi \quad (22)$$

lineer operatörüne ulaşılır. Denklem (21b)'deki dönüşümde ise $g \in G$ elemanını sabitleyerek \mathfrak{h} üzerinde bir temsil elde ederiz. Bu sayede, Denklem (21)'deki operatörlerin dualleri sırasıyla

$$\begin{aligned} \alpha_h^*: T_h^* H &\rightarrow \mathfrak{g}^*, \\ \langle \xi, \alpha_h^*(v_h) \rangle &:= \langle \alpha_h(\xi), v_h \rangle = \langle h \triangleleft \xi, v_h \rangle, \quad \forall \xi \in \mathfrak{g}, \end{aligned} \quad (23a)$$

$$\begin{aligned} \triangleright: G \times \mathfrak{h}^* &\rightarrow \mathfrak{h}^*, \\ \langle \eta, g \triangleright \mu \rangle &= \langle \eta \triangleleft g, \mu \rangle, \quad \forall \eta \in \mathfrak{h} \end{aligned} \quad (23b)$$

olarak elde edilir.

2.3. Lie Grubu Üzerinde Fark Denklemleri

Elimizde, bir Lie grubu G ve onun Lie cebiri \mathfrak{g} olsun. G grubu üzerinde tanımlı reel değerli bir (Lagrange) fonksiyonunu $\mathcal{L}: G \rightarrow \mathbb{R}$ göz önüne alalım. G^N , G Lie grubunun N kere kendisi ile Kartezyen çarpımı olmak üzere, bir \mathcal{L} Lagrange fonksiyonu için etki

$$\mathcal{L}\Omega: G^N \rightarrow \mathbb{R}, \quad (g_1, \dots, g_N) \mapsto \sum_{k=1}^N \mathcal{L}(g_k) \quad (24)$$

olarak tanımlanır. Hamilton fark prensibini hatırlayalım [11]. (g_1, \dots, g_N) dizisinin Lagrange sisteminin bir çözümü olması için gerek ve yeter koşul bu dizinin (24) denkleminin kritik noktası olmasıdır. Böylece, herhangi bir $\xi \in \mathfrak{g}$ vektörü ve $g_k, g_{k+1} \in G$ noktaları için, Lagrange fark denklemleri

$$\sum_{k=1}^{N-1} [\vec{\xi}_k(g_k)(\mathcal{L}) - \overleftarrow{\xi}_k(g_{k+1})(\mathcal{L})] = 0 \quad (25)$$

olarak elde edilir. Burada $\vec{\xi}$ ve $\overleftarrow{\xi}$ ile gösterilen, G üzerinde $\xi \in \mathfrak{g}$ tarafından üretilen sırasıyla sol değişmez (5) ve sağ-değişmez (6) vektör alanlarıdır. Ayrıca $\vec{\xi}_k(g_k)(\mathcal{L})$ notasyonu, \mathcal{L} fonksiyonunun g_k noktasında $\vec{\xi}_k$ vektör alanı yönündeki türevini göstermektedir.

Özel olarak, $N = 2$ ve her $\xi \in \mathfrak{g}$ vektörü için, Lagrange fark denklemleri

$$\vec{\xi}(g_k)(\mathcal{L}) - \overleftarrow{\xi}(g_{k+1})(\mathcal{L}) = 0 \quad (26)$$

olarak hesap edilecektir. (26) denkleminin sol tarafı

$$\begin{aligned} \langle d\mathcal{L}(g_k), \vec{\xi}(g_k) \rangle - \langle d\mathcal{L}(g_{k+1}), \overleftarrow{\xi}(g_{k+1}) \rangle \\ = \langle d\mathcal{L}(g_k), T_e L_{g_k}(\xi) \rangle - \langle d\mathcal{L}(g_{k+1}), T_e R_{g_{k+1}}(\xi) \rangle \\ = \langle T_e^* L_{g_k}(d\mathcal{L}(g_k)), \xi \rangle - \langle T_e^* R_{g_{k+1}}(d\mathcal{L}(g_{k+1})), \xi \rangle \\ = \langle T_e^* L_{g_k}(d\mathcal{L}(g_k)) - T_e^* R_{g_{k+1}}(d\mathcal{L}(g_{k+1})), \xi \rangle \end{aligned} \quad (27)$$

işlemi nedeniyle, rasgele seçilen ξ için, Lagrange fark denklemlerini

$$T_e^* L_{g_k}(d\mathcal{L}(g_k)) - T_e^* R_{g_{k+1}}(d\mathcal{L}(g_{k+1})) = 0 \quad (28)$$

olacak şekilde belirler [8]. Burada, d operatörü G grubu üzerinde tanımlı dış (exterior) türevdir [13]. $T_e^* R_{g_k} d\mathcal{L}(g_k)$ dual uzay \mathfrak{g}^* 'ın bir elemanıdır. Biz bu terimi μ_k ile gösterelim. Sonuç olarak, (28) denklemleri

$$\begin{aligned} T_e^* L_{g_k}(d\mathcal{L}(g_k)) - T_e^* R_{g_{k+1}}(d\mathcal{L}(g_{k+1})) \\ = T_e^* L_{g_k}(d\mathcal{L}(g_k)) - \mu_{k+1} \\ = T_e^* L_{g_k} \circ T_e^* R_{g_k}^{-1} \circ T_e^* R_{g_k} d\mathcal{L}(g_k) - \mu_{k+1} \\ = T_e^* L_{g_k} \circ T_e^* R_{g_k}^{-1}(\mu_k) - \mu_{k+1} = \text{Ad}_{g_k}^*(\mu_k) - \mu_{k+1} \end{aligned}$$

hesabı ile literatürdeki formuna

$$\mu_{k+1} = \text{Ad}_{g_k}^*(\mu_k), \quad \mu_k = T_e^* R_{g_k} d\mathcal{L}(g_k) \quad (29)$$

kavuşur [1,4,14,15].

2.4. Lie Grubu Üzerindeki Fark Denklemlerinin Eşlenmesi

Makalemize konu ettiğimiz ana problemimizi, bu noktaya kadar biriktirdiğimiz terminoloji ışığında, tekrar ifade etmeye çalışalım. Öncelikle, G ve H ile göstereceğimiz iki Lie grubunu göz önüne alalım. Bu grupların Lie cebirlerini sırasıyla \mathfrak{g} ve \mathfrak{h} ile gösterelim.

Altbölüm 2.2’deki notasyonu kullanalım ve bu iki grup üzerinde Lagrange fark denklemlerini Denklem (29)’da verildiği formda sırasıyla

$$Ad_{g_k}^* \mu_k = \mu_{k+1}, \quad Ad_{h_k}^* \nu_k = \nu_{k+1}$$

olarak yazalım. Şimdi, Denklem (12) ve (13)’de verilen karşılıklı etkilerin varlığını kabul edelim ve elimizdeki bu iki fark denklemini özel durum olarak kabul edecek ve de karşılıklı etkileri de yoksaymayacak şekilde toplam uzay üzerinde dinamik denklemlerine ulaşmaya çalışalım.

Bir önceki paragrafta anlattığımız hedef için Altbölüm 2.2’de inşasını verdiğimiz eşlenmiş Lie grubu tanımına geri döneceğiz. Bu grubun tanımına dikkat edilirse, aranan kolektif hareket için uygun bir geometrik altyapı sunduğu kolaylıkla görülecektir. O zaman, fark denklemlerinin eşlenme problemi için yapmamız gereken eşlenmiş Lie grubu $G \bowtie H$ üzerindeki Lagrange fark denklemlerini yazmak olacaktır. Bu amaçla, $G \bowtie H$ eşlenmiş Lie grubu ve üzerinde tanımlanan (14) işlemini gözönüne alalım. Bu denklemleri elde etmek için, ilk olarak Denklem (14)’te verilen $G \bowtie H$ üzerindeki grup çarpımının türevlerini alarak sol L ve sağ R ötelemelerinin tanjant dönüşümlerini aşağıdaki gibi hesap edelim:

$$T_{(g_2, h_2)} L_{(g_1, h_1)}(X_{g_2}, Y_{h_2}) = \begin{pmatrix} T_{h_1 \triangleright g_2} L_{g_1}(h_1 \triangleright X_{g_2}), \\ T_{h_1 \triangleleft g_2} R_{h_2}(h_1 \triangleleft X_{g_2}) + T_{h_2} L_{(h_1 \triangleleft g_2)} Y_{h_2} \end{pmatrix}, \quad (30a)$$

$$T_{(g_1, h_1)} R_{(g_2, h_2)}(X_{g_1}, Y_{h_1}) = \begin{pmatrix} T_{g_1} R_{(h_1 \triangleright g_2)} X_{g_1} + T_{h_1 \triangleright g_2} L_{g_1}(Y_{h_1} \triangleright g_2), \\ T_{h_1 \triangleleft g_2} R_{h_2}(Y_{h_1} \triangleleft g_2) \end{pmatrix}. \quad (30b)$$

Burada, $i = 1, 2$ için, (g_i, h_i) ikilileri $G \bowtie H$ grubunun elemanları, (X_{g_i}, Y_{h_i}) ikilileri ise $T_{(g_i, h_i)}(G \bowtie H)$ tanjant uzayında vektörlerdir. Böylece, bir $(\xi, \eta) \in \mathfrak{g} \times \mathfrak{h}$ vektörü tarafından üretilen sol ve sağ değişmez vektör alanlarını

$$\overline{(\xi, \eta)}(g, h) = T_{(e_G, e_H)} L_{(g, h)}(\xi, \eta) = (\overline{h} \triangleright \xi(g), h \triangleleft \xi + \tilde{\eta}(h)), \quad (31a)$$

$$\overline{(\xi, \eta)}(g, h) = T_{(e_G, e_H)} R_{(g, h)}(\xi, \eta) = (\tilde{\xi}(g) + \eta \triangleright g, \overline{\eta} \triangleleft \overline{g}(h)) \quad (31b)$$

olarak hesaplayabiliriz. (31a) ve (31b) denklemlerinin sağ tarafında Denklem (5-6)’da verilen sol ve sağ değişmez vektör alanı tanımları kullanılmıştır. Eşlenmiş Lie grubu $G \bowtie H$ üzerinde tanımlı bir $\mathcal{L}: G \bowtie$

$H \rightarrow \mathbb{R}$ Lagrange fonksiyonunu kullanarak, herhangi $\xi \in \mathfrak{g}$ ve $\eta \in \mathfrak{h}$ vektörleri ve $g_k, g_{k+1} \in G$ ile $h_k, h_{k+1} \in H$ noktaları için aşağıdaki hesap yapılabilir:

$$\begin{aligned} & \left(d\mathcal{L}(g_k, h_k), \overline{(\xi, \eta)}(g_k, h_k) \right) - \left(d\mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), \overline{(\xi, \eta)}(g_{k+1}, h_{k+1}) \right) \\ &= \left(d\mathcal{L}(g_k, h_k), (\overline{h} \triangleright \xi(g_k), h_k \triangleleft \xi + \tilde{\eta}(h_k)) \right) \\ & \quad - \left(d\mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), (\tilde{\xi}(g_{k+1}) + \eta \triangleright g_{k+1}, \overline{\eta} \triangleleft \overline{g_{k+1}}(h_{k+1})) \right) \\ &= \left((d_1 \mathcal{L}(g_k, h_k), d_2 \mathcal{L}(g_k, h_k)), \right. \\ & \quad \left. \left(\overline{h} \triangleright \xi(g_k), h_k \triangleleft \xi + \tilde{\eta}(h_k) \right) \right) \\ & \quad - \left((d_1 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), d_2 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1})), \right. \\ & \quad \left. \left(\tilde{\xi}(g_{k+1}) + \eta \triangleright g_{k+1}, \overline{\eta} \triangleleft \overline{g_{k+1}}(h_{k+1}) \right) \right) \\ &= \langle d_1 \mathcal{L}(g_k, h_k), \overline{h} \triangleright \xi(g_k) \rangle + \langle d_2 \mathcal{L}(g_k, h_k), h_k \triangleleft \xi + \tilde{\eta}(h_k) \rangle \\ & \quad - \langle d_1 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), \tilde{\xi}(g_{k+1}) + \eta \triangleright g_{k+1} \rangle \\ & \quad - \langle d_2 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), \overline{\eta} \triangleleft \overline{g_{k+1}}(h_{k+1}) \rangle \\ &= \langle d_1 \mathcal{L}(g_k, h_k), T_{e_G} L_{g_k}(h_k \triangleright \xi) \rangle \\ & \quad + \langle d_2 \mathcal{L}(g_k, h_k), h_k \triangleleft \xi + T_{e_H} L_{h_k} \eta \rangle \\ & \quad - \langle d_1 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), T_{e_G} R_{g_{k+1}} \xi + \eta \triangleright g_{k+1} \rangle \\ & \quad - \langle d_2 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), T_{e_H} R_{h_{k+1}}(\eta \triangleleft g_{k+1}) \rangle \\ &= \langle T_{e_G}^* L_{g_k} \cdot d_1 \mathcal{L}(g_k, h_k), h_k \triangleright \xi \rangle + \langle d_2 \mathcal{L}(g_k, h_k), h_k \triangleleft \xi \rangle \\ & \quad + \langle T_{e_H}^* L_{h_k} \cdot d_2 \mathcal{L}(g_k, h_k), \eta \rangle \\ & \quad - \langle T_{e_G}^* R_{g_{k+1}} \cdot d_1 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), \xi \rangle \\ & \quad - \langle d_1 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), \eta \triangleright g_{k+1} \rangle \\ & \quad - \langle T_{e_H}^* R_{h_{k+1}} \cdot d_2 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}), \eta \triangleleft g_{k+1} \rangle \\ &= \left\langle \xi, \left(T_{e_G}^* L_{g_k} \cdot d_1 \mathcal{L}(g_k, h_k) \right) \triangleleft h_k + \alpha_{h_k}^* d_2 \mathcal{L}(g_k, h_k) \right\rangle \\ & \quad - \left\langle T_{e_G}^* R_{g_{k+1}} \cdot d_1 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}) \right\rangle \\ & \quad + \left\langle \eta, T_{e_H}^* L_{h_k} \cdot d_2 \mathcal{L}(g_k, h_k) - \beta_{g_{k+1}}^* d_1 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}) \right\rangle \\ & \quad - \left\langle -g_{k+1} \triangleright T_{e_H}^* R_{h_{k+1}} \cdot d_2 \mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}) \right\rangle = 0. \quad (32) \end{aligned}$$

Şimdi, (32) hesabı adım adım inceleyelim. Hesaptaki ilk satırda iki eşleme (pairing) bulunmaktadır. Bu eşlemelerden ilki, (g_k, h_k) noktasında kotanjant ve tanjantları arasındadır. İkinci eşleme ise (g_{k+1}, h_{k+1}) noktasındaki kotanjant ve tanjant uzayı arasındadır. Her iki eşleme reel değerli sonuç vereceğinden ilk satırdaki toplam mümkündür. (32)’de verilen hesabın ilk eşitliğinde Denklem (31a-31b)’de verilen sol ve sağ değişmez vektör alanlarını kullandık. İkinci ve üçüncü eşitliklerde eşlemenin iki-lineer olma özelliğinden yararlanarak eşlemeyi toplama işlemi üzerine dağıttık. İkinci eşitlikteki,

$$d_1 \mathcal{L} = \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta g}, \quad d_2 \mathcal{L} = \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta h}$$

notasyonları ile Lagrange fonksiyonu \mathcal{L} ’nin sırasıyla birinci ve ikinci bileşenlerine göre kısmi türevlerini gösterdik. Dördüncü eşitlikte, Denklem (5) ve (6)’da verilen tanımları kullandık. Beşinci eşitlikte, sol ve sağ

ötelemelerin TL ve TR ile gösterilen tanjant dönüşümlerinin, duallerini kullandık. Son iki satırdaki dual operasyonlar, sırasıyla, Denklem (20a)'da verilen \triangleleft dual etkisi, Denklem (23b)'de verilen dual dönüşüm $\alpha_{h_k}^*$, Denklem (20b)'de verilen $\flat_{g_{k+1}}^*$ ve de Denklem (23a)'da verilen \triangleright operatörüdür.

Sonuç olarak rasgele seçilmiş $\xi \in \mathfrak{g}$ ve $\eta \in \mathfrak{h}$ için

$$\begin{aligned} (T^*L_{g_k} \cdot d_1\mathcal{L}(g_k, h_k)) \triangleleft h_k + \alpha_{h_k}^* d_2\mathcal{L}(g_k, h_k) \\ - T^*R_{g_{k+1}} \cdot d_1\mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T^*L_{h_k} \cdot d_2\mathcal{L}(g_k, h_k) - \flat_{g_{k+1}}^* d_1\mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}) \\ - g_{k+1} \triangleright T^*R_{h_{k+1}} \cdot d_2\mathcal{L}(g_{k+1}, h_{k+1}) = 0 \end{aligned}$$

denklemleri elde edilir. Aşağıdaki önermede bulduğumuz bu sonucu not edelim.

Önerme 2.2: $G \bowtie H$ eşlenmiş Lie grubu olsun. Aşağıdaki tanımlanan kovektörleri gözönüne alalım:

$$\begin{aligned} T_{e_G}^* R_{g_k} \cdot d_1\mathcal{L}(g_k, h_k) &= \mu_k \in \mathfrak{g}^*, \\ T_{e_H}^* R_{h_k} \cdot d_2\mathcal{L}(g_k, h_k) &= \nu_k \in \mathfrak{h}^*. \end{aligned} \quad (33)$$

Böylece, $G \bowtie H$ eşlenmiş Lie grubu üzerindeki eşlenmiş (Lagrange) fark denklemleri

$$\mu_{k+1} = Ad_{g_k}^* \mu_k \triangleleft h_k + \alpha_{h_k}^* T^*R_{h_k}^{-1} \nu_k, \quad (34a)$$

$$g_{k+1} \triangleright \nu_{k+1} = Ad_{h_k}^* \nu_k - \flat_{g_{k+1}}^* T^*R_{g_{k+1}}^{-1} \mu_{k+1} \quad (34b)$$

olarak yazılır.

Yarı-direkt Çarpım Teorisi. Eşlenmiş fark denklemlerinde karşılıklı etkilerden birini aşikar kabul ederek yarı-direkt çarpım (semi-direct product) teorisi elde edilir. Bu özel durumları inceleyelim. Eğer Lie grubu G 'nin H üzerine sağ etkisi aşikar ise (34a-34b) denklemleri, (33) tanımları ile birlikte, $G \bowtie H$ Lie gruplarının yarı-direkt çarpım uzayı üzerindeki

$$\mu_{k+1} = Ad_{g_k}^* \mu_k \triangleleft h_k, \quad (35a)$$

$$\nu_{k+1} = Ad_{h_k}^* \nu_k - \flat_{g_{k+1}}^* T^*R_{g_{k+1}}^{-1} \mu_{k+1} \quad (35b)$$

denklemlerine dönüşür. Diğer yandan, eğer Lie grubu H 'nin G üzerine sol etkisi aşikar ise bu durumda (33) tanımlamaları ile birlikte, $G \bowtie H$ Lie gruplarının yarı-direkt çarpım uzayı üzerindeki

$$\mu_{k+1} = Ad_{g_k}^* \mu_k + \alpha_{h_k}^* T^*R_{h_k}^{-1} \nu_k, \quad (36a)$$

$$g_{k+1} \triangleright \nu_{k+1} = Ad_{h_k}^* \nu_k \quad (36b)$$

denklemlerine ulaşılır. Eğer, her iki etki de aşikar ise (33) ile birlikte

$$\mu_{k+1} = Ad_{g_k}^* \mu_k, \quad \nu_{k+1} = Ad_{h_k}^* \nu_k \quad (37)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (37), bu altbölümün başlangıcında sergilediğimiz G ve H üzerindeki bireysel hareket denklemleridir. Karşılıklı etkiler aşikar olduğunda bireysel hareketler korunmaktadır.

III. UYGULAMALAR

3.1. Tanjant Grubu Üzerinde Fark Denklemleri

G bir Lie grubu olsun. Her zamanki gösterimimize devam edelim ve Lie cebirini \mathfrak{g} ile gösterelim. G katmanının TG tanjant demeti üzerindeki grup yapısını elde edeceğiz. Bunun için $g(t)$ ve $\tilde{g}(t)$ aşağıdaki özelliklere sahip G üzerinde iki eğri alalım:

$$\begin{aligned} g(0) = g, \quad \tilde{g}(0) = \tilde{g}, \quad \frac{d}{dt}g(t)|_{t=0} = X_g \in T_g G, \\ \frac{d}{dt}\tilde{g}(t)|_{t=0} = Y_{\tilde{g}} \in T_{\tilde{g}} G. \end{aligned} \quad (38)$$

Bu iki eğrinin G grubu üzerindeki çarpımını $t = 0$ 'da türetelim. Bu durumda

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}g(t)\tilde{g}(t)|_{t=0} = \left(\frac{d}{dt}g(t)|_{t=0}\right)\tilde{g}(0) \\ + g(0)\left(\frac{d}{dt}\tilde{g}(t)|_{t=0}\right) = TR_{\tilde{g}}X_g + TL_gY_{\tilde{g}} \end{aligned} \quad (39)$$

elde edilir. Burada, TL_g ve $TR_{\tilde{g}}$, sırasıyla Denklem (3)'de verilen sol ve sağ ötelemelerinin tanjant dönüşümleridir. Böylece, aşağıda tanımlanan işlem ile TG bir Lie grup yapısına sahip olur [17,18,19]:

$$TG \times TG \rightarrow TG, \quad (X_g, Y_{\tilde{g}}) \mapsto X_g * Y_{\tilde{g}} = TR_{\tilde{g}}X_g + TL_gY_{\tilde{g}}. \quad (40)$$

Burada, görüntüdeki vektörün $T_{g\tilde{g}}G$ uzayında yer aldığına dikkat ediniz. Grubun birim elemanı, $\mathfrak{g} \cong T_e G$ uzayının sıfır vektörüdür. Ayrıca bir X_g elemanının grup çarpımına göre tersi

$$X_g^{-1} = -T_g(L_{g^{-1}} \circ R_{g^{-1}})X_g \in T_{g^{-1}}G \quad (41)$$

vektörüdür.

Trivializasyon. Bir Lie grubu G 'nin tanjant demeti TG , global bir sağ trivializasyon (trivialization) ihtiva eder [20, 21]:

$$tr: TG \rightarrow \mathfrak{g} \times G, \quad X_g \mapsto (TR_{g^{-1}}X_g, g). \quad (42)$$

Bu trivializasyon sayesinde TG üzerinde tanımladığımız (40) işlemi $\mathfrak{g} \times G$ çarpım uzayına taşıyabiliriz. Bunun için, $X_g \in T_g G$ ve $Y_{\tilde{g}} \in T_{\tilde{g}} G$ olacak şekilde iki vektör alalım ve bu vektörlerin cebir üzerine çekildiklerinde $TR_{g^{-1}}X_g = \xi$ ve $TR_{\tilde{g}^{-1}}Y_{\tilde{g}} = \tilde{\xi}$ ile gösterildiklerini kabul edelim. Bu durumda, Denklem (40)'da verilen grup çarpımının görüntüsüne Denklem (42)'de verilen trivializasyonu uygulayalım:

$$\begin{aligned}
 \text{tr}(X_g * Y_g) &= \text{tr}(TR_g X_g + TL_g Y_g) \\
 &= (TR_{(g\tilde{g})^{-1}}(TR_{\tilde{g}} X_g + TL_g Y_g), g\tilde{g}) \\
 &= (TR_{(g^{-1}g^{-1})}(TR_{\tilde{g}} X_g + TL_g Y_g), g\tilde{g}) \\
 &= (TR_{(g^{-1}g^{-1})} \circ TR_g X_g + TR_{(g^{-1}g^{-1})} \circ TL_g Y_g, g\tilde{g}) \\
 &= (TR_{g^{-1}} \circ TR_{g^{-1}} \circ TR_{\tilde{g}} X_g + TR_{g^{-1}} \circ TR_{g^{-1}} \circ TL_g Y_g, g\tilde{g}) \\
 &= (TR_{g^{-1}} \circ X_g + TR_{g^{-1}} \circ TL_g \cdot \xi, g\tilde{g}) \\
 &= (\xi + TR_{g^{-1}} \circ TL_g \cdot \xi, g\tilde{g}) \\
 &= (\xi + \text{Ad}_g \xi, g\tilde{g}). \tag{43}
 \end{aligned}$$

Burada, Ad ile G grubunun \mathfrak{g} Lie cebiri üzerine Denklem (8)'de verilen adjoint etkisi gösterilmiştir. Böylece $\mathfrak{g} \rtimes G$ trivalizasyonu aşağıda verilen işlemle bir Lie gruptur:

$$(\mathfrak{g} \rtimes G) \times (\mathfrak{g} \rtimes G) \rightarrow \mathfrak{g} \rtimes G, \tag{44}$$

$$((\xi, g), (\tilde{\xi}, \tilde{g})) \mapsto (\xi, g) * (\tilde{\xi}, \tilde{g}) = (\xi + \text{Ad}_g \tilde{\xi}, g\tilde{g}).$$

Bu grubun birim elemanı $(0, e)$, bir $(\xi, g) \in \mathfrak{g} \rtimes G$ elemanının tersi ise $(-\text{Ad}_{g^{-1}} \xi, g^{-1})$ 'dir.

Yarı-direkt Çarpım Yapısı. Denklem (44)'de verilen grup çarpımının Denklem (14)'te verilen eşlenmiş Lie grubu çarpımının özel durumu olduğuna dikkat çekmek isteriz. Lie grubu $\mathfrak{g} \rtimes G$ 'nin eşlenmiş bir Lie grubu olarak ifadesi için Altbölüm 2.2'deki geometride sol etkiyi yapan Lie grubu H , Lie grubu G ile değiştirmek, diğer yandan da sağ etkiyi yapan Lie grubu G , toplama işlemi ile değişmeli bir Lie grubu olarak kabul edeceğimiz, \mathfrak{g} ile değiştireceğiz.

$$H \rightarrow G, \quad G \rightarrow \mathfrak{g}.$$

Bu seçimler ile, $\mathfrak{g} \rtimes G$ grubunu bir eşlenmiş Lie grubu uygulaması olarak görelim ve dikkatli bir şekilde Altbölüm 2.2'deki denklemleri sırasıyla elde edelim. Denklem (12) ve Denklem (13)'deki sol etki adjoint temsil ve sağ etki ise aşikar etkidir:

$$\begin{aligned}
 \triangleright: G \times \mathfrak{g} &\rightarrow \mathfrak{g}, & (g, \xi) &\mapsto \text{Ad}_g \xi, & (45a) \\
 \triangleleft: G \times \mathfrak{g} &\rightarrow G, & (g, \xi) &\mapsto g. & (45b)
 \end{aligned}$$

Sol etki (45a)'dan yararlanarak, Denklem (18a-18b)'deki sol etkiler sırasıyla

$$\begin{aligned}
 \triangleright: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} &\rightarrow T\mathfrak{g}, & (\xi, \tilde{\xi}) &\mapsto (\xi, \text{ad}_{\tilde{\xi}} \xi), & (46a) \\
 \triangleright: G \times T_0\mathfrak{g} &\rightarrow T_0\mathfrak{g}, & (g, \xi) &\mapsto \text{Ad}_g \xi & (46b)
 \end{aligned}$$

olarak hesap edilir. Burada, $T_0\mathfrak{g} = \mathfrak{g}$, $T\mathfrak{g} \cong \mathfrak{g} \times \mathfrak{g}$ eşitliklerinin kullanıldığına dikkat çekmek isteriz. Denklem (46a)'dan elde edilecek $\mathfrak{b}_{\xi}: \mathfrak{g} \rightarrow T_{\xi}\mathfrak{g}$ dönüşümü sonsuz küçük adjoint temsil olacak, bu sayede de (20a) ve (20b)'de verilen dualler sırasıyla

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{b}_{\xi}^*: T_{\xi}^* \mathfrak{g} &\rightarrow \mathfrak{g}^*, & \mu &\mapsto \text{ad}_{\xi}^* \mu, & (47a) \\
 \triangleleft: T_0^* \mathfrak{g} \times G &\rightarrow T_0^* \mathfrak{g}, & (\mu, g) &\mapsto \mu \triangleleft g = \text{Ad}_{g^{-1}}^* \mu & (47b)
 \end{aligned}$$

olacaktır. Burada, $T_{\xi}^* \mathfrak{g} \cong T_0^* \mathfrak{g} \cong \mathfrak{g}^*$ eşitlikleri kabul edilmiştir. Şimdi de, sağ etki (45b)'den yararlanarak (21a) ve (21b)'yi hesap edelim:

$$\begin{aligned}
 \triangleleft: G \times T_0\mathfrak{g} &\rightarrow T\mathfrak{g}, & (g, \xi) &\mapsto 0, & (48a) \\
 \triangleleft: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} &\rightarrow \mathfrak{g}, & (\xi, \tilde{\xi}) &\mapsto \tilde{\xi}. & (48b)
 \end{aligned}$$

Denklem (48a)'da bir g elemanını sabit tutarak elde ettimiz \mathfrak{a}_g lineer dönüşümü sıfır fonksiyonu olacaktır. Bu sayede (23a) ve (23b)'de tanımlanmış dual dönüşümler bu bölümdeki özel seçimlerimiz neticesiyle sırasıyla sıfır dönüşümü ve aşikar temsil olacaktır:

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{a}_g^*: T_g^* G &\rightarrow T_0^* \mathfrak{g}, & \mu_g &\mapsto 0, & (49a) \\
 \triangleright: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g}^* &\rightarrow \mathfrak{g}^*, & (\xi, \mu) &\mapsto \mu. & (49b)
 \end{aligned}$$

Son olarak da, tüm bu tanımları Önerme 2.2'de yerlerine yerleştirerek aşağıdaki önermeye ulaşırız.

Önerme 3.1: Tanjant grubu $\mathfrak{g} \rtimes G$ üzerinde tanımlı bir Lagrange fonksiyonu $\mathfrak{L} = \mathfrak{L}(\xi, g)$ için denklem (33)'de verilen tanımlar

$$\begin{aligned}
 d_1 \mathfrak{L}(\xi_k, g_k) &= \mu_k \in \mathfrak{g}^*, \\
 T_e^* R_{g_k} \cdot d_2 \mathfrak{L}(\xi_k, g_k) &= \tilde{\mu}_k \in \mathfrak{g}^*. \tag{50}
 \end{aligned}$$

şeklinde, (34a) ve (34b)'de verilen eşlenmiş fark denklemleri ise

$$\begin{aligned}
 \mu_{k+1} &= \text{Ad}_{g_k}^* \mu_k, & (51a) \\
 \tilde{\mu}_{k+1} &= \text{Ad}_{g_k}^* \tilde{\mu}_k - \text{ad}_{\xi_{k+1}}^* \mu_{k+1} & (51b)
 \end{aligned}$$

olarak hesap edilir.

3.2. Heisenberg Grubu Üzerinde Fark Denklemi

G ve H sırasıyla köşegenleri 1 olan, sırasıyla, üst ve alt üçgensel matris grupları olsun. Bu gruplara literatürde Heisenberg grubu adı verilir [22].

İlk olarak G Lie grubu ile başlayalım. Lie cebiri \mathfrak{g} , köşegen elemanları 0 olan 3×3 üst üçgensel matrislerden oluşur. Lie cebiri \mathfrak{g} üzerinde iz operatörü yardımıyla tanımlayacağımız bir iç çarpım mevcuttur:

$$\langle \xi, \tilde{\xi} \rangle = \text{iz}(\xi^T \tilde{\xi}) \tag{52}$$

iç çarpımın varlığı ile dual uzay $\mathfrak{g}^* \cong \mathfrak{g}$ alınabilir. Hesaplarımızda kullanacağımız matrisleri aşağıdaki gibi sabitleyelim:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{pmatrix} 1 & x & y \\ 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in G, & \xi &= \begin{pmatrix} 0 & a & b \\ 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \in \mathfrak{g}, \\
 \mu &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ p & 0 & 0 \\ r & s & 0 \end{pmatrix} \in \mathfrak{g}^*. \tag{53}
 \end{aligned}$$

Lie grubu G 'nin Lie cebiri üzerine adjoint etkisini tanımlayalım ve dual uzayı üzerine koadjoint etkisi

$$\begin{aligned} \text{Ad}_A \xi &= A \xi A^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & a & b - za + xc \\ 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ \text{Ad}_A^* \mu &= (A^{-1})^T \mu A^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ p & 0 & 0 \\ r - pz + sx & s & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (54)$$

olarak elde edilir. $(A^{-1})^T$ ile A^{-1} ters matrisinin transpozesi gösterilmektedir. G grubu üzerindeki $\mathfrak{L}: G \rightarrow \mathbb{R}$ Lagrange fonksiyonu ile üretilen Lagrange fark denklemleri

$$\begin{aligned} p_{k+1} &= p_k = p, \\ r_{k+1} &= r_k + sx_k - pz_k, \quad s_{k+1} = s_k = s, \end{aligned} \quad (55a)$$

$$\begin{aligned} p_k &= d_1 L(x_k, y_k, z_k), \quad r_k = d_2 L(x_k, y_k, z_k) \\ + x_k d_3 L(x_k, y_k, z_k), \quad s_k &= d_3 L(x_k, y_k, z_k), \end{aligned} \quad (55b)$$

olarak hesap edilir.

Şimdi H alt üçgensel matris grubunu, bu grubun Lie cebiri \mathfrak{h} ve dual uzay \mathfrak{h}^* için elemanları şu şekilde belirleyelim:

$$\begin{aligned} B &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \ell & 1 & 0 \\ m & n & 1 \end{pmatrix} \in H, \quad \eta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 \\ e & f & 0 \end{pmatrix} \in \mathfrak{h}, \\ v &= \begin{pmatrix} 0 & u & v \\ 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \in \mathfrak{h}^*. \end{aligned} \quad (56)$$

Eşlenmiş Lie grubu $G \bowtie H$ üzerindeki Lagrange fark denklemlerini hesap edelim. Öncelikle, (53) ve (56)'da verilen notasyonlar ışığında bu iki matris grubunun karşılıklı etkisini tanımlayalım:

$$\begin{aligned} \triangleright: H \times G &\rightarrow G, \\ B \triangleright A &= I + (B^{-1})^T (A - I) = \begin{pmatrix} 1 & x & y - lz \\ 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (57a)$$

$$\begin{aligned} \triangleleft: H \times G &\rightarrow H, \\ B \triangleleft A &= I + (B - I)(A^{-1})^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \ell & 1 & 0 \\ m - xn & n & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (57b)$$

Sol etki sayesinde hesap ettiğimiz ve ifadelerini Denklem (18a) ve (18b)'de sunduğumuz etkiler sırasıyla şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \triangleright: H \times \mathfrak{g} &\rightarrow \mathfrak{g}, \\ (B, \xi) &\mapsto B \triangleright \xi = (B^{-1})^T \xi = \begin{pmatrix} 0 & a & b - \ell c \\ 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (58a)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{h} \times G &\rightarrow TG, \\ (\eta, A) &\mapsto \eta \triangleright A = \mathfrak{b}_A(\eta) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -zd \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (58b)$$

Bu dönüşümlerin de dualleri sırasıyla

$$\begin{aligned} \triangleleft: \mathfrak{g}^* \times H &\rightarrow \mathfrak{g}^*, \\ (\mu, B) &\mapsto \mu \triangleleft B = (B^{-1})\mu = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ p & 0 & 0 \\ r - pn & s & 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (59a)$$

$$\mathfrak{b}_A^*: T_A^* G \rightarrow \mathfrak{h}^*, \quad \mu \mapsto \mathfrak{b}_A^* \mu = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -sx \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (59b)$$

olarak elde edilir. Sağ etki ile elde edilen ve tanımları ifadelerini Denklem (21a) ve (21b)'de verdiğimiz etkiler sırasıyla

$$\begin{aligned} \triangleleft: H \times \mathfrak{g} &\rightarrow TH, \\ (B, \xi) &\mapsto \alpha_B(\xi) = B \triangleleft \xi = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -an & 0 & 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (60a)$$

$$\begin{aligned} \triangleleft: \mathfrak{h} \times G &\rightarrow \mathfrak{h}, \\ (\eta, A) &\mapsto \eta \triangleleft A = \eta(A^{-1})^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 \\ e - xf & f & 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (60b)$$

dual dönüşümler ise

$$\alpha_B^*: T_B^* H \rightarrow \mathfrak{g}^*, \quad v \mapsto \alpha_B^* v = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\ell w & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (61a)$$

$$\triangleright: G \times \mathfrak{h}^* \rightarrow \mathfrak{h}^*, \quad v \mapsto A \triangleright v = \begin{pmatrix} 0 & u & v - zu \\ 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (61b)$$

olarak hesaplanır. Eşlenmiş hareket denklemleri (34a) ve (34b) ise aşağıdaki formda elde edilir:

$$\begin{aligned} p_{k+1} &= p_k, \\ r_{k+1} &= r_k - (z_k + n_k)p_k + s_k x_k - \ell w_k, \quad s_{k+1} = s_k, \end{aligned} \quad (62a)$$

$$\begin{aligned} u_{k+1} &= u_k, \\ v_{k+1} &= z_{k+1} u_{k+1} + v_k - \ell w_k + u_k n_k \\ + s_{k+1} x_{k+1}, \quad w_{k+1} &= w_k. \end{aligned} \quad (62b)$$

Dizi elemanlarının Lagrange fonksiyonu ile ifadesi ise $L = L(x_k, y_k, z_k, \ell_k, m_k, n_k)$ için

$$\begin{aligned} p_k &= d_1 L, \quad r_k = d_2 L + x_k d_3 L, \quad s_k = d_3 L, \\ u_k &= d_4 L, \quad m_k = d_5 L + l_k d_6 L, \quad n_k = d_6 L \end{aligned} \quad (63)$$

olacaktır.

V. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu makalede, kesikli (discrete) hareket için eşlenme problemi çalışılmıştır. Elde edilen temel teorik sonuç Önerme 2.2'de verilen eşlenmiş fark denklemleridir. Bu denklemler, karşılıklı etki içindeki iki Lie grubu üzerindeki Lagrange fark denklemlerinin, karşılıklı etkileri muhafaza edecek şekilde, tek bir sistem olarak yazımını göstermektedir. Bu, fiziksel olarak birbirine etki eden iki sistemin kolektif davranışını betimler. Bu teorik sonuç, tanjant grubu üzerinde ve Heisenberg grupları için eşlenmiş fark denklemleri yazmak için kullanılmıştır.

Bu çalışmamız, [16] ve [23] nolu çalışmalarımızı bütünlüyle nitelikte ve fakat farklı bir direksiyondadır. [16] nolu çalışmamızda sürekli (fark denklemi değil diferansiyel denklem olan) iki Lagrange sistemi eşlenmiş, [23] nolu çalışmamızda ise bu tartışma yüksek mertebeden tanjant grupları için çalışılıp yüksek mertebeden türevler içeren sürekli iki Lagrange sisteminin kolektif hareketi analiz edilmiştir. Bu tip bir genelleştirme, halihazırdaki çalışmamız için de uygun bir genelleştirme fikridir. İleriki yayınlamamızda bu nokta üzerine de değinmeyi planlamaktayız. Diğer bir paralel çalışma ise Lie grubu yerine tüm bu analizlerin Lie grupoid için yapılmasıdır. Bu durum da [8] nolu çalışmamızda incelenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma OE ve SS'nin "Lagrange ve Hamilton Sistemlerinin Eşlenmesi (Matched pairs of Lagrangian and Hamiltonian Systems)" adlı ve 117F426 kodlu TÜBİTAK projesi kapsamındadır. Yazarlar TÜBİTAK'a desteği için teşekkürü bir borç bilir. Metnin bu halini almasında değerli hakemlerin görüş ve önerileri önalıcı olmuştur. Kendilerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] Marrero, J. C., Martín de Diego, D. ve Martínez, E. 2006. Discrete Lagrangian and Hamiltonian mechanics on Lie groupoids. *Nonlinearity*, 19(6):1313–1348.

[2] Hairer, E., Lubich, C. ve Wanner, G. (2006). *Geometric numerical integration*, volume 31 of *Springer Series in Computational Mathematics*. Springer-Verlag, Berlin, second edition. Structure-preserving algorithms for ordinary differential equations.

[3] Lee, T., Leok, M. ve McClamroch, N.H. (2007). Lie group variational integrators for the full body problem. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 196(29-30):2907–2924.

[4] Marsden, J. E., Pekarsky, S. ve Shkoller, S. (1999). Discrete Euler-Poincaré and Lie-Poisson equations. *Nonlinearity*, 12(6):1647–1662.

[5] Lu, J.-H. and Weinstein, A. (1990). Poisson Lie groups, dressing transformations, and Bruhat decompositions. *J. Differential Geom.*, 31(2):501–526.

[6] Majid, S. (1990). Matched pairs of Lie groups associated to solutions of the Yang-Baxter equations. *Pacific J. Math.*, 141(2):311–332.

[7] Takeuchi, M. (1981). Matched pairs of groups and bismash products of Hopf algebras. *Comm. Algebra*, 9(8):841–882.

[8] Esen, O. ve Sütlü, S. (2018). Matched pairs of discrete dynamical systems. *Arxiv preprint arxiv:1809.00521*.

[9] Knapp, A. W. (1988). *Lie groups, Lie algebras, and cohomology*, volume 34 of *Mathematical Notes*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

[10] Majid, S. (1995). *Foundations of quantum group theory*. Cambridge University Press, Cambridge.

[11] Weinstein, A. (1996). Lagrangian mechanics and groupoids. In *Mechanics day (Waterloo, ON, 1992)*, volume 7 of *Fields Inst. Commun.*, pages 207–231. Amer. Math. Soc., Providence, RI.

[12] Esen, O. (2017). Dinamik sistemlerin eşlenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 21(3):469–480.

[13] Şuhubi, E. (2013). *Exterior analysis: Using applications of differential forms*. Elsevier.

[14] Bobenko, A. I. ve Suris, Y. B. (1999). Discrete Lagrangian reduction, discrete Euler-Poincaré equations, and semidirect products. *Lett. Math. Phys.*, 49(1):79–93.

[15] Marsden, J. E., Pekarsky, S. ve Shkoller, S. (2000). Symmetry reduction of discrete Lagrangian mechanics on Lie groups. *J. Geom. Phys.*, 36(1-2):140–151.

[16] Esen, O. ve Sütlü, S. (2017). Lagrangian dynamics on matched pairs. *J. Geom. Phys.*, 111:142–157.

[17] Hindeleh, F. Y. (2006). *Tangent and cotangent bundles, automorphism groups and representations of Lie groups*. ProQuest LLC, Ann Arbor, MI.

[18] Kolář, I., Michor, P. W. ve Slovák, J. (1993). *Natural operations in differential geometry*. Springer-Verlag, Berlin.

[19] Michor, P. W. (2008). *Topics in differential geometry*, volume 93. American Mathematical Soc.

[20] Vizman, C. (2013). The group structure for jet bundles over Lie groups. *Journal of Lie Theory*, 23.

[21] Yano, K. ve Ishihara, S. (1973). *Tangent and cotangent bundles: differential geometry*, volume 16. Dekker.

[22] Hall, B. C., (2003). *Lie groups, Lie algebras, and representations*. Springer-Verlag, New York.

[23] Esen O., Kudeyt, M. ve Sütlü, S. (2021) Second order Lagrangian dynamics on double cross product groups. *Journal of Geometry and Physics*, 159, 1-18.

Doğrusal Olmayan Tekil Sınır Değer Problemlerinin Chebyshev Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü

Solution of Nonlinear Singular Boundary Value Problems using Chebyshev Finite Difference Method

Soner AYDINLIK¹ , Ahmet KIRIŞ² 

¹Doğuş Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 34775, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Matematik Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

Öz

Doğrusal olmayan tekil sınır değer problemlerinin çözümü için Chebyshev Sonlu Farklar Yöntemi (CSFY) kullanılmıştır. Yöntemin hata ve yakınsama analizi verilmiştir. Yöntemin yakınsaklığını ve etkinliğini göstermek için, termal patlama, küresel bir hücrede kararlı hal oksijen difüzyonu ve izotermal gaz kürelerinin dengesi gibi mühendislik problemleri incelenmiştir. Sonuçlar problemi alt aralıklara bölmeksizin ve farklı sınır koşulları için değişiklik yapmaksızın, sunulan yöntemin doğruluğu yüksek ve çözüme oldukça hızlı yakınsadığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Chebyshev Sonlu Farklar Yöntemi, Chebyshev Polinomları, Doğrusal olmayan Tekil Sınır Değer Problemi, Lane-Emden denklemi.

Abstract

Chebyshev Finite Difference Method (CFDM) is used for solving nonlinear singular boundary value problems. Error and convergence analysis of the method are given. To show the applicability and efficiency, some engineering problems such as thermal burst, steady-state oxygen diffusion in a spherical cell, and equilibrium of isothermal gas spheres are studied. The results show that without dividing the problem into sub-ranges and any changes for different boundary conditions, the presented method has high accuracy and converges to the solution rapidly.

Keywords: Chebyshev finite difference method, Chebyshev Polynomials, Nonlinear singular boundary value problems, Lane-Emden equation.

I. GİRİŞ

Doğrusal olmayan tekil sınır değer problemi

$$\begin{cases} (g(x) y'(x))' = g(x)F(x, y(x)), \\ y'(0) = 0, \quad a y(1) + b y'(1) = c, \end{cases} \quad (0.1)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $a > 0, b \geq 0$ ve c gerçel sayılar, $F(x, y(x))$ ve $F_y(x, y(x))$ negatif olmayan sürekli fonksiyonlardır. $g(x)$ fonksiyonu $g(x) \geq 0$ in $(0,1]$, $g(x) \in C^1[0,1]$ (kendisi ve birinci mertebeye türevi sürekli olan fonksiyonlar uzayı) ve $\frac{1}{g(x)} \in L^1(0,1)$ (integrallenebilir fonksiyonlar uzayı) özelliklerini sağlamaktadır.

Bu tür problemlerin analitik çözümlerini elde etmek tekillik nedeniyle zordur, hatta bazı sayısal yöntemlerle de yaklaşık çözümler elde edilemediğinden dolayı, bu zorluğun üstesinden gelmek için klasik olmayan bazı yöntemler önerilmektedir [1-12]. Chebyshev polinomları belirli bir aralıkta, bir ağırlık fonksiyonuna göre ortogonal olmalarından ve aynı mertebeden diğer polinom yaklaşımlarına göre belirli bir aralıkta maksimum hatayı minimum yapmalarından dolayı [13], Sunulan CSFY doğrusal olmayan tekil sınır değer problemlerinin çözümü için yukarıda bahsedilen yöntemlerden çok daha avantajlıdır.

Bu çalışmada, (1.1) 'de verilen problemin çözümünü elde etmek için CSFY tabanlı efektif bir sayısal yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntemin hata ve yakınsaklık analizleri incelenmiş ve doğrusal olmayan dört gerçek mühendislik problemi çözülmüştür. Literatürdeki diğer çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar, önerilen yöntemin verilen aralığın her noktasında geçerli, hatası diğer yöntemlere göre daha düşük mertebeden ve hızlı yakınsayan bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

II. CHEBYSHEV SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Birinci cins Chebyshev polinomları

$$T_n(x) = \cos(n\theta), \quad x = \cos \theta, \quad \theta \in [0, \pi], \quad (1.1)$$

$$\forall n \geq 0, \quad x \in [-1, 1].$$

olarak tanımlanmaktadır ve $x \in [-1, 1]$ aralığında

$$x_k = \cos\left(\frac{2k-1}{2n}\pi\right), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1.2)$$

noktalarında kökleri ve

$$\tilde{x}_k = \cos\left(\frac{k\pi}{n}\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (1.3)$$

noktalarında ekstremumları bulunmakta olup, $w(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ ağırlık fonksiyonuna göre

ortogonaldirler. Chebyshev polinomlarının en önemli özelliği ekonomikleştirme (economization property) adıyla bilinir ve aşağıdaki teoremdedir [13].

Teorem 2.1. \tilde{P}_n , n . dereceden tüm monik polinomlar kümesi olmak üzere, monik Chebyshev polinomları $\tilde{T}_n(x) = \frac{T_n(x)}{2^{n-1}}$ ile tanımlanı ve

$$\frac{1}{2^{n-1}} = \|\tilde{T}_n(x)\|_\infty \leq \|P_n(x)\|_\infty \quad (1.4)$$

eşitsizliği $\forall P_n(x) \in \tilde{P}_n$ geçerlidir, burada eşitlik sadece $P_n(x) \equiv \tilde{T}_n(x)$ durumunda sağlanmaktadır. CSFY' nde, verilen bir başlangıç veya sınır değer problemi için çözüm Chebyshev polinomlarının bir seri açılımı [14],

$$y(x) \approx \sum_{n=0}^N a_n T_n(x), \quad (1.5)$$

olarak önerilmektedir. Burada toplam üzerindeki (") işareti birinci ve sonuncu terimlerin yarısının alınacağını, N ise yaklaşım polinomunun derecesini göstermektedir. Chebyshev polinomlarının ortogonalite özelliği kullanılarak, a_n katsayıları

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N y(x_j) T_n(x_j). \quad (1.6)$$

şeklinde elde edilebilir. $y(x)$ çözümünün m . mertebe

türevinin x_k noktalarındaki değeri

$$y^{(m)}(x_k) = \sum_{j=0}^N d_{k,j}^{(m)} y(x_j) \quad (1.7)$$

ile verilir. Burada

$$d_{k,j}^{(m)} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^N T_n(x_j) T_n^{(m)}(x_k) \quad (1.8)$$

dir. (1.8) katsayılarının ilk ikisi [15] de,

$$d_{k,j}^{(1)} = \frac{4\theta_j}{N} \sum_{n=0}^N \sum_{\substack{l=0 \\ (n+1) \text{ tek}}}^{n-1} \frac{n\theta_n}{c_l} T_n(x_j) T_l(x_k), \quad (1.9)$$

$$k, j = 0, 1, \dots, N$$

$$d_{k,j}^{(2)} = \frac{2\theta_j}{N} \sum_{n=0}^N \sum_{\substack{l=0 \\ (n+1) \text{ çift}}}^{n-2} \frac{n(n^2-l^2)\theta_n}{c_l} T_n(x_j) T_l(x_k), \quad (1.10)$$

$$k, j = 0, 1, \dots, N$$

şeklinde verilmektedir, ayrıca

$$\left. \begin{aligned} \theta_0 = \theta_n = 1/2, \quad \theta_j = 1 \\ c_0 = 2, \quad c_i = 1 \end{aligned} \right\} \quad j = 1, 2, \dots, N-1, \quad i \geq 1. \quad (1.11)$$

dir. Böylece verilen diferansiyel denklem, başlangıç veya sınır koşulları ile birlikte Gauss-Lobatto noktalarında ($x_j, j = 0, 1, \dots, N$) hesaplanarak, $y(x_j)$ bilinmeyenlerini içeren cebirsel bir denklem sistemine indirgenerek çözüme ulaşılır.

III. YAKINSAKLIK VE HATA ANALİZİ

CSFY' nin yakınsaklık ve hata analizi ile ilgili aşağıda verilen teoremlerin ispatları yazarların [16] çalışmasında bulunabilir.

Teorem 3. 1. (Yakınsaklık)

$y(x) \in L_w^2(-1, 1)$ ve $|y''(x)| \leq C$ ise (1.5) Chebyshev açılımı, $N \rightarrow \infty$ durumunda $y(x)$ fonksiyonuna düzgün yakınsar.

Teorem 3. 2. $d_{k,j}^{(1)}$ ve $d_{k,j}^{(2)}$ terimlerinin yuvarlama hataları

$$\begin{cases} d_{k,j}^{(1)*} - d_{k,j}^{(1)} \leq 4\theta_j (\delta - O(\frac{1}{N^2}\delta)) (\frac{N^2}{3} + \frac{1}{6}) \\ d_{k,j}^{(2)*} - d_{k,j}^{(2)} \leq \frac{4\theta_j}{3} (\delta - O(\frac{1}{N^2}\delta)) (\frac{N^4}{5} - \frac{1}{5}) \end{cases} \quad (3.1)$$

şeklinde sınırlıdır [17].

Teorem 3.3. $y(x)$ fonksiyonunun yaklaşım polinomu

$$P_N y = \sum_{m=0}^N a_m T_m \text{ olmak üzere, } \forall y(x) \in H_w^m(-1,1),$$

$m \geq 0$, için kesme hatası

$$\|y - P_N y\|_{L_w^2(-1,1)} \leq C N^{-m} \|y\|_{H_w^m(-1,1)} \quad (3.2)$$

dır.

IV. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde dört doğrusal olmayan tekil sınır değer problemi CSFY ile çözülmüştür. Tüm problemler için verilen $x \in [a, b]$ aralığı

$$x = \frac{(b-a)}{2}t + \frac{(b+a)}{2}. \quad (4.1)$$

dönüşümü ile $t \in [-1, 1]$ aralığına taşınmıştır.

Örnek 1: İlk olarak

$$\begin{cases} y''(x) + \frac{1}{x} y'(x) = -e^{y(x)}, & 0 < x < 1 \\ y'(0) = 0, & y(1) = 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

tekil sınır değer problemi incelenmiştir. Gerçek

$$\text{çözümü } y(x) = 2 \ln\left(\frac{4-2\sqrt{2}}{(3-2\sqrt{2})x^2+1}\right) \text{ olan} \quad (4.2)$$

probleminin $N = 8$ için CSFY ile sayısal çözümü;

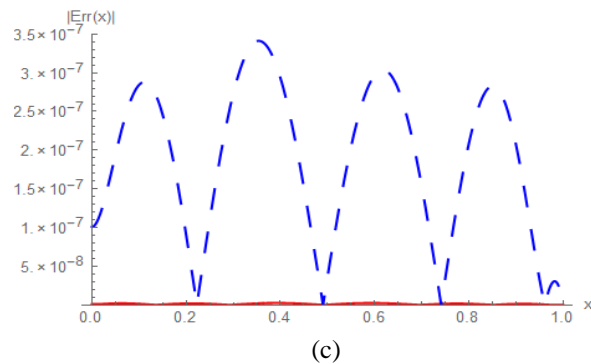
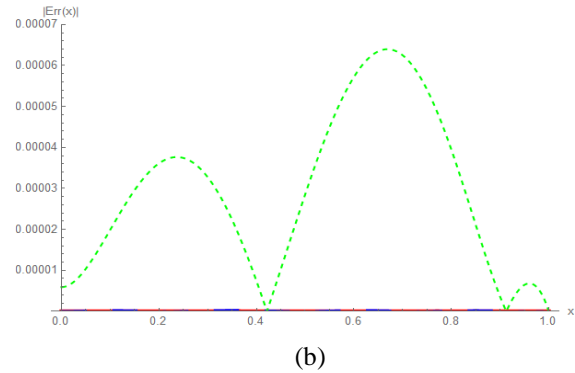
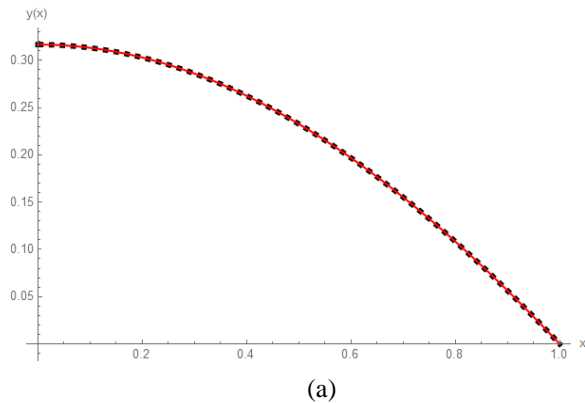
$$\begin{aligned} y(x) = & 0.31669 - 2.66453 \times 10^{-15} x - 0.34314 x^2 \\ & + 2.32483 \times 10^{-5} x^3 + 2.92804 \times 10^{-2} x^4 \\ & + 5.23403 \times 10^{-4} x^5 - 4.32272 \times 10^{-3} x^6 \\ & + 9.50569 \times 10^{-4} x^7 - 2.33492 \times 10^{-6} x^8 \end{aligned} \quad (4.3)$$

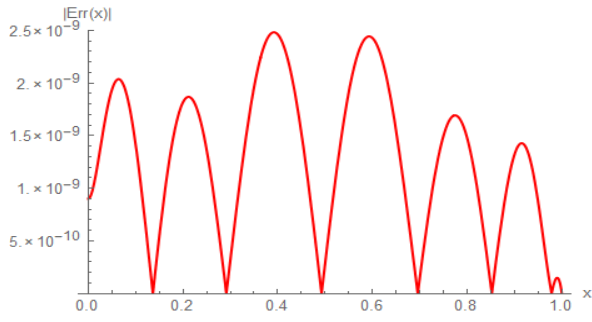
olarak elde edilmektedir. Sayısal sonuçlar “Wolfram Mathematica” ile elde edilmiş olup, varsayılan işlem hassasiyeti 10^{-16} dır ancak bu çalışmada kısaltma amacıyla tüm basamaklar verilmemiştir. CSFY ile [1, 6, 9, 18, 19] da verilen diğer yöntemlerin karşılaştırılması Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. CSFY ile diğer yöntemlerin maksimum mutlak hatalarının karşılaştırılması.

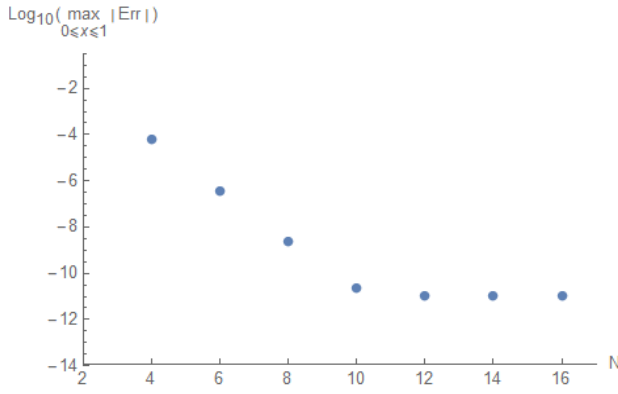
N	CSFY	n	[6]	[9]	[18]	n	[19]	n	[1]
4	$6.25E-05$	4	-	-	$5.67E-05$	12	$4.01E-04$	20	$3.16E-05$
6	$2.96E-07$	6	$3.93E-04$	$5.44E-07$	$3.14E-06$	16	$2.54E-05$	40	$7.87E-06$
8	$2.46E-09$	8	$6.95E-05$	$9.20E-09$	$6.35E-07$	20	$2.10E-06$	60	$3.50E-06$

Burada, N yaklaşım polinomunun derecesini, n ise alt aralık sayısını göstermektedir. CSFY'nin diğer yöntemlere nazaran problemi alt aralıklara bölmeksizin daha yüksek doğruluk sağladığı açıkça görülmektedir. Şekil 1.a $N = 8$ için CSFY çözümünü ve analitik çözümü birlikte göstermekte olup, Şekil 1.b,c,d ise sırasıyla $N = 4, 6, 8$ için CSFY ile analitik çözüm arasındaki mutlak hatayı göstermektedir.





(d)



(e)

Şekil 1. a) $N = 8$ için CSFY çözümü ve analitik çözüm. b) $N = 4$, c) $N = 6$ ve d) $N = 8$ için CSFY ve analitik çözüm arasındaki mutlak hata farkı. e) $N = 4, 6, \dots, 16$ için maksimum mutlak hata.

Örnek 2: Küresel bir hücrede kararlı durum oksijen difüzyonu çalışmasında ortaya çıkan doğrusal olmayan tekil sınır değer problem

$$\begin{cases} y''(x) + \frac{\alpha}{x} y'(x) = \frac{\delta y(x)}{y(x) + \mu}, & \delta > 0, \mu > 0 \\ y'(0) = 0, \quad 5y(1) + y'(1) = 5 \end{cases} \quad (4.4)$$

şeklinde. Burada $\delta = 0.76129$, $\mu = 0.03119$ ve $\alpha = 2$. (4.4) probleminin CSFY ile sayısal çözümü;

$$\begin{aligned} y(x) = & 0.82848 + 3.62210 \times 10^{-15} x + 0.12227 x^2 \\ & - 6.76668 \times 10^{-10} x^3 + 1.96442 \times 10^{-4} x^4 \\ & - 4.51380 \times 10^{-8} x^5 - 1.30042 \times 10^{-5} x^6 \\ & - 3.06715 \times 10^{-7} x^7 + 1.45908 \times 10^{-6} x^8 \\ & - 2.86035 \times 10^{-7} x^9 + 5.11063 \times 10^{-9} x^{10}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

olarak elde edilmektedir. Bu denklemin analitik çözümü bilinmediğinden dolayı

$$R_n(x) = \left| y_n'(x) + \frac{2}{x} y_n'(x) - \frac{\delta y_n(x)}{y_n(x) + \mu} \right|, \quad 0 < x < 1. \quad (4.6)$$

şeklinde tanımlanan mutlak artık hata (absolute residual error) formülü kullanılmıştır.

CSFY ile [18, 20] de verilen diğer yöntemlerin mutlak artık hatalarının karşılaştırılması Tablo 2 de verilmektedir.

Tablo 2. Mutlak artık hataların karşılaştırılması.

N	CSFY	n	[18]	[20]
4	6.36E-05	4	4.25E-05	4.84E-04
6	9.64E-07	6	6.14E-06	6.78E-05
8	1.11E-08	8	1.38E-06	9.45E-06
10	3.48E-10	10	8.39E-07	1.31E-06

Örnek 3: Standart Lane Emden denklemi

$$\begin{cases} y''(x) + \frac{2}{x} y'(x) + y'''(x) = 0, & x \geq 0 \\ y(0) = 1, \quad y'(0) = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

olarak verilmektedir. (4.7) denkleminin $m = 0$, $m = 1$ ve $m = 5$ için analitik çözümleri sırasıyla

$$y(x) = 1 - \frac{1}{6} x^2, \quad y(x) = \frac{\sin x}{x} \quad \text{ve} \quad y(x) = \left(1 + \frac{x^2}{3}\right)^{-\frac{1}{2}} \text{ dir.}$$

Durum 1.1 $m = 0$ ve $N = 4$ için yaklaşım polinomu,

$$\begin{aligned} y(x) = & 1 - 3.88578 \times 10^{-16} x - 0.16666 x^2 \\ & - 1.33226 \times 10^{-14} x^3 + 5.32907 \times 10^{-15} x^4 \approx 1 - \frac{x^2}{6} \end{aligned} \quad (4.8)$$

olarak elde edilmiştir.

Durum 1.2. $m = 1$ ve $N = 16$ için yaklaşım polinomu

$$\begin{aligned} y(x) = & 0.99999 - 5.85642 \times 10^{-15} x - 0.16666 x^2 \\ & + 1.52207 \times 10^{-9} x^3 + 0.00833 x^4 + 2.16351 \times 10^{-7} x^5 \\ & - 1.9 \times 10^{-4} x^6 + 5.57038 \times 10^{-6} x^7 - 1.42242 \times 10^{-5} x^8 \\ & + 3.79615 \times 10^{-5} x^9 - 6.27821 \times 10^{-5} x^{10} + 7.65878 \times 10^{-5} x^{11} \\ & - 6.811774 \times 10^{-5} x^{12} + 4.29274 \times 10^{-5} x^{13} - 1.81617 \times 10^{-5} x^{14} \\ & + 4.62681 \times 10^{-6} x^{15} - 5.36441 \times 10^{-7} x^{16}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

şeklinde. CSFY ile diğer yöntemlerin mutlak hatalarının karşılaştırılması Tablo 3' te verilmiştir.

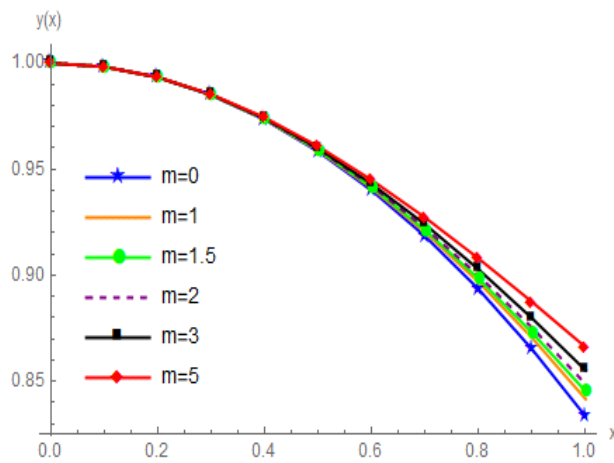
Tablo 3. Mutlak maksimum hataların karşılaştırılması.

x	[21]	[22]	[23]	[24]	CSFY
0.1	$4.61E-11$	$1.40E-06$	$3.44E-09$	$7.27E-10$	$6.24E-13$
0.5	$4.43E-08$	$2.99E-06$	$1.28E-07$	$4.32E-08$	$5.82E-13$
1.0	$3.74E-05$	$1.99E-06$	$3.78E-05$	$3.74E-05$	$4.63E-13$

Durum 1.3. $m = 5$ ve $N = 16$ için çözüm

$$\begin{aligned}
y(x) = & 0.99999 - 1.36002 \times 10^{-14} x - 0.16666x^2 \\
& - 4.70661 \times 10^{-9} x^3 + 0.04166x^4 - 8.80698 \times 10^{-7} x^5 \\
& - 1.15677 \times 10^{-2} x^6 - 3.17828 \times 10^{-5} x^7 + 3.49178 \times 10^{-3} x^8 \\
& - 3.11723 \times 10^{-4} x^9 - 3.92795 \times 10^{-4} x^{10} - 9.06971 \times 10^{-4} x^{11} \\
& + 1.26308 \times 10^{-3} x^{12} - 6.80095 \times 10^{-4} x^{13} + 1.83709 \times 10^{-4} x^{14} \\
& - 2.14651 \times 10^{-5} x^{15} + 2.23517 \times 10^{-7} x^{16}
\end{aligned} \quad (4.10)$$

olarak elde edilmiştir. $[0,1]$ aralığında $N = 16$ iken CSFY ile elde edilen mutlak maksimum hata 1.74×10^{-13} iken, aynı aralık için [25] de kullanılan Haar wavelet yöntemiyle elde edilen hata 8.47×10^{-8} dir ve bu yöntemde dalgacık çözünürlük seviyesinin maksimum değeri $J = 9$ ve $2M = 2^{J+1} = 1024$ olarak alınmakta yani daha çok düğüm noktası kullanılmaktadır. Örnek 3 için $m = 0, 1, 1.5, 2, 3, 5$ alınarak CSFY ile elde edilen yaklaşık çözümler Şekil 2 de verilmiştir. (4.7) denklemindeki her m değeri, farklı bir probleme karşılık gelmekte, dolayısıyla Şekil 2 de farklı problemlerin sayısal çözümleri birlikte gösterilmektedir.



Şekil 2. $m = 0, 1, 1.5, 2, 3, 5$ alınarak elde edilen yaklaşık çözümler

Örnek 4:

$$\begin{cases}
y''(x) + \frac{(4x+1)}{4x} y'(x) = \frac{5x^3(20x^5 e^{y(x)} - 4x - 17)}{4(4+x^5)}, \\
y'(0) = 0, \quad y(1) + 5y'(1) = \log\left(\frac{1}{5}\right) - 5
\end{cases} \quad (4.11)$$

tekil diferansiyel denkleminin analitik çözümü $y(x) = \log\left(\frac{1}{4+x^5}\right)$ dir. CSFY yöntemi kullanılarak elde edilen sayısal çözüm

$$\begin{aligned}
y(x) = & -1.38629 - 5.66779 \times 10^{-14} x - 1.55565 \times 10^{-10} x^2 \\
& + 1.63695 \times 10^{-8} x^3 - 6.73787 \times 10^{-7} x^4 - 0.24998x^5 \\
& - 2.00057 \times 10^{-4} x^6 + 1.78223 \times 10^{-3} x^7 - 1.09354 \times 10^{-2} x^8 \\
& + 4.70694 \times 10^{-2} x^9 - 0.10963x^{10} + 0.27461x^{11} - 0.24922x^{12} \\
& - 0.33414x^{13} + 1.67805x^{14} - 3.22251x^{15} + 3.82783x^{16} \\
& - 3.01115x^{17} + 1.52702x^{18} - 0.44998x^{19} + 0.058273x^{20}
\end{aligned} \quad (4.12)$$

şeklinde dir. $N = 20$ için CSFY yöntemi kullanılarak elde edilen maksimum mutlak 2.99322×10^{-11} ($x = 0.99933$) iken, [3, 26] çalışmalarında $n = 256$ alınarak elde edilen maksimum mutlak hatalar sırasıyla 1.9582×10^{-10} ve 1.13×10^{-9} dir.

Sonuç olarak bu çalışmada CSFY kullanılarak gerçek mühendislik problemlerinde ortaya çıkan doğrusal olmayan tekil sınır değer problemleri çözülmüştür. Ayrıca bu yöntemin yakınsaklık ve hata analizi verilmiştir. Sayısal sonuçlar CSFY'nin problemi alt aralıklara bölmeksizin diğer yöntemlere göre doğruluğunun daha yüksek ve çözüme daha hızlı yakınsadığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Caglar, H., Caglar, N., & Ozer, M., (2009). B-spline solution of non-linear singular boundary value problems arising in physiology. *Chaos Solitons Fractals*, 39, 1232-1237.
- [2] Abukhaled, M., Khuri, S.A., & Sayef, A., (2011). A numerical approach for solving a class of singular boundary value problems arising in physiology. *International Journal of Numerical Analysis and Modeling*, 8(2), 353-363.
- [3] Thula, K., & Roul, P., (2018). A High-Order B-Spline Collocation Method for solving nonlinear singular boundary value problems arising in engineering and applied science. *Mediterranean Journal of Mathematics*, 15(76), 1-24
- [4] Yucel, U., & Sari, M., (2009). Differential quadrature method (DQM) for a class of singular two-point boundary value problem. *International Journal of Computer Mathematics*, 86(3), 465-475.

- [5] Danish, M., & Kumar, S., (2012). A note on the solution of singular boundary value problems arising in engineering and applied sciences: use of OHAM. *Computers & Chemical Engineering*, 36, 57-67.
- [6] Roul, P., & Warbhe, U., (2016). New approach for solving class of singular boundary value problem arising in various physical models. *Journal of Mathematical Chemistry*, 54, 1255-1285.
- [7] Ravi Kanth, A., & Aruna, K., (2010). He's variational iteration method for treating nonlinear singular boundary value problem. *Computers & Mathematics with Applications*, 60(3), 821-829.
- [8] Chawla, M. M., & Katti, C.P., (1982). Finite difference methods and their convergence for a class of singular two-point boundary value problems. *Numerische Mathematik*, 39, 341-350.
- [9] Roul, P. (2017). On the numerical solution of singular two-point boundary value problems: A domain decomposition homotopy perturbation approach. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 40, 7396-7409.
- [10] Pandey, R. K., & Singh, A.K., (2006). A new high-accuracy difference method for a class of weakly nonlinear singular boundary-value problems. *International Journal of Computer Mathematics*, 83(11), 809-817.
- [11] Schreiber, R. (1980). Finite element methods of high order accuracy for singular two-point boundary value problems with non-smooth solutions. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 17, 547-566.
- [12] Khaleghi, M., Moghaddam, M. T., Babolian, E., & Abbasbandy, S., (2018). Solving a class of singular two-point boundary value problems using new effective reproducing kernel technique. *Applied Mathematics and Computation*, 331, 264-273.
- [13] Fox, L., & Parker, I.B., (1968). Chebyshev Polynomials in Numerical Analysis, Oxford University Press, London.
- [14] Clenshaw, C.W., & Curtis, A.R., (1960). A method for numerical integration on an automatic computer. *Numerische Mathematik*, 2, 197-205.
- [15] Elbarbary, E. M. E., & El-Kady, M., (2003). Chebyshev finite difference approximation for the boundary value problems, *Applied Mathematics and Computation*, 139, 513-523.
- [16] Aydinlik, S., & Kiris, A., (2018). A High-Order Numerical Method for Solving Fractional Nonlinear Lane-Emden Type Equations Arising in Astrophysics. *Astrophysics and Space Science*, 363, 264.
- [17] Elbarbary, E.M.E., & El-Sayed, S.M. (2005). Higher order pseudospectral differentiation matrices. *Applied Numerical Mathematics*, 55, 425-438.
- [18] Zhu, H., Niu, J., Zhang, R., & Lin, Y., (2018). A new approach for solving nonlinear singular boundary value problems. *Mathematical Modelling and Analysis*, 23(1), 33-43.
- [19] Singh, R., & Kumar. J., (2016). An efficient numerical technique for the solution of nonlinear singular boundary value problems. *Computer Physics Communications*, 185(4), 466-477.
- [20] Xie, L. J., Zhou, C. L., & Xu, S. (2016). An effective numerical method to solve a class of nonlinear singular boundary value problems using improved differential transform method. *SpringerPlus*, 5, 1066-1084.
- [21] Singh, H. (2018). An efficient computational method for the approximate solution of nonlinear Lane-Emden type equations arising in astrophysics. *Astrophys Space Sci*, 363, 71.
- [22] Parand, K., Dehghan, M., Rezaei, A.R., & Ghaderi, S.M. (2010). An approximation algorithm for the solution of the nonlinear Lane-Emden type equations arising in astrophysics using Hermite functions collocation method. *Comput. Phys. Commun.* 181, 1096-1108.
- [23] Căruntu, B., & Bota, C. (2013). Approximate polynomial solutions of the nonlinear Lane-Emden type equations arising in astrophysics using the squared remainder minimization method. *Comput. Phys. Commun.* 184, 1643-1648.
- [24] Pandey, R.K., & Kumar, N., (2012). Solution of Lane-Emden type equations using Bernstein operational matrix of differentiation. *New Astron.* 17, 303-308.
- [25] Singh, R., Garg, H., & Guleria, V. (2019). Haar wavelet collocation method for Lane-Emden equations with Dirichlet, Neumann and Neumann-Robin boundary conditions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 346, 150-161.
- [26] Pandey, R.K., & Singh, A.K. (2009). On the convergence of a fourth-order method for a class of singular boundary value problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 224, 734-742.

Epidemiyolojideki Kompartman Modellerinin Eşlenmiş Hamilton Analizi

Matched Pair Hamiltonian Analysis of the Compartmental Models in Epidemiology

Begüm ATEŞLİ¹ , Oğul ESEN² , Serkan SÜTLÜ³ 

^{1,2} Gebze Teknik Üniversitesi, Matematik Bölümü, 41400, Kocaeli, Türkiye
³ Işık Üniversitesi, Matematik Bölümü, Şile, 34980, İstanbul, Türkiye

Öz

Epidemiyolojideki SIR, SEIR, 2-SIR ve 2-SEIR modellerinin Hamilton formülasyonu verildi. Eşlenmiş Lie-Poisson sistemleri yazıldı. SIR ve SEIR modellerinin eşlenmiş Lie-Poisson sistemi oldukları gösterildi. Bir Lie cebiri için bükülmüş eşçevrim genişlemesi çalışıldı. Bu genişlemenin dual uzayı üzerinde eşlenmiş Lie-Poisson denklemleri elde edildi. SIR ve SEIR kompartman modellerinin iki popülasyon karşılığı olan 2-SIR ve 2-SEIR modellerinin bükülmüş eşçevrim genişlemesiyle elde edilmiş Lie-Poisson sistemi olarak ifade edilebilecekleri gösterildi.

Anahtar Kelimeler: Eşlenmiş Lie cebirleri; Eşlenmiş Lie-Poisson sistemleri; Bükülmüş eşçevrim genişlemesi; Epidemiyolojik kompartman modelleri.

Abstract

Hamiltonian formulations of SIR, SEIR, 2-SIR and 2-SEIR epidemiological models are presented. Matched Lie-Poisson dynamics is exhibited. SIR and SEIR models are expressed as matched pair Lie-Poisson systems. A twisted cocycle extension of a Lie algebra is studied. Lie-Poisson equations are written on the dual of a twisted cocycle extension. It is shown that two population 2-SIR and 2-SEIR models admit this Lie-Poisson formulation.

Keywords: Matched pairs of Lie algebras; Matched Lie-Poisson systems; Twisted cocycle extension; Epidemiological compartmental models.

I. GİRİŞ

Epidemiyoloji için kompartman modelleri 1900'lerin başında çalışılmaya başlanan ve bulaş dinamiğini inceleyen modellerdir [1, 15, 17]. Bu modeller bir çok salgın hastalık için oldukça makul öngörülerde bulunmuş [6, 10, 22], günümüzde ise Covid-19 pandemisi için de kullanılmaktadır [2, 25]. Kompartman modelleri kapalı bir toplumu kompartman olarak adlandırılan parçalara ayırır. Her bir kompartman bir büyük harf ile gösterilir: Örneğin, S ile hasta olma potansiyeli olan insanların toplam sayısı, E ile enfekte olup henüz bulaştırıcı olmayan insanların toplam sayısı, I ile enfekte (ve bulaştırıcı) olan insanların toplam sayısı, R ile ise iyileşmiş insanların toplam sayıları gösterilir. Burada dinamik her bir kompartmanın zaman içindeki değişimlerini modelleyen ve lineer olmayan adi diferansiyel denklem takımları ile verilir. Şimdi bu çalışmamızda konu ettiğimiz kompartman modelleri örneklerine bir göz atalım.

1.1. SIR ve SEIR Kompartman Modelleri

Bu makalede çalışacağımız epidemiyoloji modellerinden ilki olan SIR modeli, enfekte olmuş kişilerin direkt olarak bulaşıcı olduğu, diğer bir ifade ile E kompartmanının olmadığı, sadece S , I ve R kompartmanlarından oluşan bir modeldir. Bu modeli belirleyen (diferansiyel) denklem takımı, bulaş oranı a ve iyileşme oranı r ile göstereceğimiz sabit reel sayılar olmak üzere

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -rSI, \\ \dot{I} &= rSI - aI, \\ \dot{R} &= aI. \end{aligned} \quad (1)$$

şekindedir. Bu modelin daha genel bir hali enfekte olup henüz bulaştırıcı olmayan E kompartmanını da içeren SEIR modelidir. Maruziyetten enfekte duruma geçiş oranı ϵ reel sayısı ile gösterilmek üzere, SEIR modeli

$$\begin{aligned}\dot{S} &= -rSI, \\ \dot{E} &= rSI - \epsilon E, \\ \dot{I} &= -aI + \epsilon E, \\ \dot{R} &= aI\end{aligned}\quad (2)$$

denklem takımı ile belirlenir. Şimdi ileri bir adım olarak, sabit nüfus iki modelin ortak tek bir havuz olarak davrandıklarında (bu iki komşu şehir veya ülkenin karantina sonrası ortak davranışı olabilir) nasıl bir model dahilinde incelendiklerine bakalım. Bu ikili eşlenmeyi SIR ve SEIR için ayrı ayrı yapalım ve adlarına da sırasıyla 2-SIR ve 2-SEIR adlarını verelim. S_1, E_1, I_1, R_1 ve a_1, r_1, ϵ_1 ilk popülasyonun, S_2, E_2, I_2, R_2 ve a_2, r_2, ϵ_2 ise ikinci popülasyonun kompartmanlarını ve sabitlerini ifade etsin. Bu notasyonlar ışığında $\ell = 1, 2$ olmak üzere, ilk olarak 2-SIR modeli

$$\begin{aligned}\dot{S}_\ell &= -r_\ell S_\ell I_\ell, \\ \dot{I}_\ell &= r_\ell S_\ell I_\ell - a_\ell I_\ell, \\ \dot{R}_\ell &= a_\ell I_\ell,\end{aligned}\quad (3)$$

şeklinde olacaktır. Sonrasında da 2-SEIR modelini

$$\begin{aligned}\dot{S}_\ell &= -r_\ell S_\ell I_\ell \\ \dot{E}_\ell &= r_\ell S_\ell I_\ell - \epsilon_\ell E_\ell \\ \dot{I}_\ell &= -a_\ell I_\ell + \epsilon_\ell E_\ell \\ \dot{R}_\ell &= a_\ell I_\ell\end{aligned}\quad (4)$$

olarak yazabiliriz. Şimdi ise bu modelleri analiz etmek için kullanacağımız Hamilton sistemleri hakkında genel bir bakış sunalım.

1.2. Hamilton Denklemleri

Hamilton denklemleri, kuantum fiziğinden, finans ve biyolojiye kadar bir çok disiplinden gelen diferansiyel denklemlerin sağladığı özel bir formdur. Bir Hamilton sisteminin kalitatif (stabilite, kontrol, vs.) analizlerini yaparken cebir ve geometri gibi disiplinlerden gelecek yöntemler kullanılabilir [3, 7]. Bu nedenle bir denklemi Hamilton formunda yazmak, sistemin davranışını öğrenmek için ciddi avantajlar sağlamaktadır. Hamilton dinamiğini metin içinde (bakınız Altbölüm 2.1) detaylı bir şekilde sunacak olsak da, bu makalenin amacını anlatmamıza yardımcı olacağını umarak kısaca şu şekilde bir özet yapabiliriz.

Hamilton denklemlerini yazabilmek için öncelikle bağımlı değişkenlerin koordinat olarak tanımlanacağı bir Poisson katmanına (manifold) ihtiyaç vardır. Poisson katmanı üzerinde ters simetrik, Leibniz ve Jacobi eşitliklerini sağlayan Poisson çerçevesi $\{\bullet, \bullet\}$ - Lie cebiri yapısı - barındırmaktadır. Seçilen bir Hamilton fonksiyonu \mathcal{H} için, Hamilton denklemleri

$$\dot{z} = \{z, \mathcal{H}\} \quad (5)$$

şekilde yazılır. Burada z ile bağımlı değişkenler vektörü gösterilmiştir. Bir modelin - diferansiyel denklem takımının - Hamilton analizi için, (1) uygun

bir Poisson çerçevesi tanımlamak, (2) uygun bir Hamilton fonksiyonunu belirlemek, ve de sonuç olarak modeli bu inşaların neticesinde (5) formunda yazabilmek gerekir. Bu iki iş - çerçevenin belirlenmesi ve Hamilton fonksiyonunun seçilmesi - için direkt bir metod/algorithm yoktur. Ve fakat simetri barındıran bazı fiziksel sistemler, örneğin katı cisimler dinamiği ve akışkanlar teorisi içindeki bazı ideal modeller, için kullanılan Poisson çerçeveleri özel olarak Lie-Poisson formundadır [20]. Lie-Poisson çerçeveleri, bir Lie cebirinin duali üzerinde ve cebir üzerindeki Lie çerçevesi vasıtasıyla tanımlanır. Lie-Poisson çerçeveleri bizim modellerimiz için de önemli olduğu için metin içinde detaylı çalışılacaktır (bakınız Altbölüm 2.2). Ayrıca, standart olmayan, Lie-Poisson yapısı taşımayan ve daha çok deneme yanılma ile elde edilen çerçeveler de mevcuttur.

1.3. SIR ve SEIR Modellerin Hamilton Analizi

Epidemiyolojik kompartman modellerin Hamilton analizi literatürde mevcuttur [23, 24]. Çok yakın bir çalışmada [9] ise kapsamlı bir şekilde kompartman modellerin Hamilton formülasyonları verilmiştir. Metnin bütünlüğü açısından SIR (1) ve SEIR (2) modellerinin ve bu modellerin eşlenmiş 2-SIR (3) ve 2-SEIR (4) genelleştirilmelerinin Hamilton formülasyonlarını hatırlatalım. Bunu, her bir model için Poisson çerçevesini ve Hamilton fonksiyonunu sergileyerek başaracağız.

Öncelikle SIR modeline bakalım. Bağımlı değişken $z = (S, I, R)$ olsun. Poisson çerçevesi ise koordinatlarda, a ve r reel sayılar olmak üzere,

$$\{S, R\}_{SIR} = -rSI \quad \{I, R\}_{SIR} = -aI + rSI \quad (6)$$

ve kalanı 0 olacak şekilde tanımlansın. Hamilton fonksiyonunu toplam nüfus $\mathcal{H} = S + I + R$ alırsak, SIR (1) modelini Hamilton formunda

$$\dot{S} = \{S, \mathcal{H}\}_{SIR} \quad \dot{I} = \{I, \mathcal{H}\}_{SIR} \quad \dot{R} = \{R, \mathcal{H}\}_{SIR} \quad (7)$$

yazabiliriz. Kısa ve kolay bir hesapla, bu kısımda yaptığımız seçimler ile denklem takımı (7)'nin SIR (1) sistemini verdiğini görebiliriz.

Benzer şekilde SEIR modelinin Hamilton formülasyonunu da yazabiliriz. Bu sefer bağımlı değişkenleri $z = (S, E, I, R)$ şeklinde belirleyelim. Poisson çerçevesini, a, r ve ϵ reel sayılar olmak üzere,

$$\begin{aligned}\{S, R\}_{SEIR} &= -rSI & \{E, R\}_{SEIR} &= rSI - \epsilon E \\ \{I, R\}_{SEIR} &= -aI + \epsilon E\end{aligned}\quad (8)$$

ve kalanı 0 olacak şekilde tanımlayalım. Hamilton fonksiyonu bir kez daha toplam nüfus $\mathcal{H} = S + E + I + R$ alınırsa, Hamilton denklemleri (5),

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \{S, \mathcal{H}\}_{SEIR} & \dot{E} &= \{E, \mathcal{H}\}_{SEIR} \\ \dot{I} &= \{I, \mathcal{H}\}_{SEIR} & \dot{R} &= \{R, \mathcal{H}\}_{SEIR} \end{aligned} \quad (9)$$

kısa bir hesap sonunda SEIR (2)'yi verecektir.

1.4. 2-SIR ve 2-SEIR Modellerin Hamilton Analizi

2-SIR modelinin Hamilton formülasyonunu sunalım. $z = (S_1, S_2, I_1, I_2, R_1, R_2)$ vektörünü belirleyip, Poisson çerçevesini, $\ell = 1, 2$ için a_ℓ, r_ℓ reel sayılar olmak üzere,

$$\{S_\ell, R_\ell\} = -r_\ell S_\ell I_\ell \quad \{I_\ell, R_\ell\} = -a_\ell I_\ell + r S_\ell I_\ell \quad (10)$$

olarak tanımlayalım. Hamilton fonksiyonunu iki popülasyonun toplam nüfusunu $\mathcal{H} = S_1 + S_2 + I_1 + I_2 + R_1 + R_2$ alırsak, Hamilton denklemlerinden

$$\begin{aligned} \dot{S}_\ell &= \{S_\ell, \mathcal{H}\}_{2-SIR} & \dot{I}_\ell &= \{I_\ell, \mathcal{H}\}_{2-SIR} \\ \dot{R}_\ell &= \{R_\ell, \mathcal{H}\}_{2-SIR} \end{aligned} \quad (11)$$

2-SIR (3) modelini elde ederiz. 2-SEIR modeli için ise $z = (S_1, S_2, E_1, E_2, I_1, I_2, R_1, R_2)$ olarak belirleyelim. Hareket denklemlerini

$$\begin{aligned} \dot{S}_\ell &= \{S_\ell, \mathcal{H}\}_{2-SEIR} & \dot{E}_\ell &= \{E_\ell, \mathcal{H}\}_{2-SEIR} \\ \dot{I}_\ell &= \{I_\ell, \mathcal{H}\}_{2-SEIR} & \dot{R}_\ell &= \{R_\ell, \mathcal{H}\}_{2-SEIR} \end{aligned} \quad (12)$$

yazalım. Çerçeveyi koordinatlarda, $a_\ell, r_\ell, \epsilon_\ell$ reel sayılar olmak üzere,

$$\begin{aligned} \{S_\ell, R_\ell\}_{2-SEIR} &= -r_\ell S_\ell I_\ell \\ \{E_\ell, R_\ell\}_{2-SEIR} &= r_\ell S_\ell I_\ell - \epsilon_\ell E_\ell \\ \{I_\ell, R_\ell\}_{2-SEIR} &= -a_\ell I_\ell + \epsilon_\ell E_\ell \end{aligned} \quad (13)$$

ve kalanı 0 olacak şekilde tanımlayıp $\mathcal{H} = S_1 + S_2 + E_1 + E_2 + I_1 + I_2 + R_1 + R_2$ alırsak, 2-SEIR (4) modelini elde ederiz.

1.5. Makalenin Amacı ve İçerik

Bu çalışmada kompartman modellerinin Hamilton analizini bir basamak ileri taşımak, daha net bir ifade ile, S, I, E ve R kompartmanlarının birbiriyle olan ilişkilerinin cebirsel/geometrik analizini yapmak hedeflenmiştir.

Kullanacağımız temel yaklaşım, karşılıklı etki eden iki sistemin kollektif davranışını yazmamıza olanak sağlayan eşlenmiş (Lie-Poisson) Hamilton denklemleri teorisidir [13]. Eşlenmiş Hamilton analizi yeni bir teori olmasına rağmen, elektromanyetik teoriden [12], akışkanlar [11] ve plazma teorisine [14] kadar geniş uygulama alanları bulmuştur. Bu teorideki temel cebirsel yapı, birbiri üzerine karşılıklı olarak etki eden - cebir tasvirleri olan - iki Lie cebiri göz önüne almak ve bu cebirleri aşikar olarak içerecek ve fakat karşılıklı etkileri de koruyacak toplam bir Lie cebiri inşa etmektir. Bu tür Lie cebiri genişlemeleri, literatürde eşlenmiş Lie cebiri (matched pair Lie algebras) adı ile alınır [18], detaylı anlatım için bakınız Altbölüm 2.3. Bu karşılıklı etkiler, dual uzaylar üzerinde dual etkiler tanımlar. Bu sayede, bireysel (Lie-Poisson) Hamilton

denklemlerini ve de karşılıklı etkileri de koruyan tek bir Hamilton denklem sistemi elde edilmesi mümkün olur. Bu sürecin detayları metin içinde, Altbölüm 2.4, anlatılmıştır. İki sistemi bu şekilde birleştirmeyi bilmek, aynı zamanda tek bir sistemi parçalar arasındaki ilişkileri koruyacak şekilde analiz etmeyi de mümkün kılar.

Bu çalışmamızda, eşlenmiş Hamilton analizini epidemiyolojik modeller üzerinde çalışacağız ve SIR (1) ve SEIR (2) modellerinin birer eşlenmiş Hamilton sistemi olduğunu (sırasıyla bkz. 4.1 ve 4.2) göstereceğiz. Diğer bir ifade ile, tek bir Hamilton sistemi olarak ifade edilmiş SIR (1) ve SEIR (2) modellerini, karşılıklı etki tepki içindeki iki alt sistemin toplamı olarak ifade edecek, diferansiyel denklemlerdeki her bir terimin bireysel ve/veya karşılıklı etki sonucu olup olmadığını göstereceğiz.

2-SIR (3) ve 2-SEIR (4) modellerini alt dinamiklere bölmek ise yukarıda tarif ettiğimiz eşlenmiş Hamilton sistemlerinden daha genel bir yaklaşım talep etmektedir. Bu tür Lie cebiri genişlemelerine [4]'te birleşik çarpım (unified product) adı verilmiştir. Bir Lie cebiri ve bir vektör uzayının birleşik çarpımı bir Lie cebiri olup bu Lie cebiri ve vektör uzayının direkt toplamı olarak yazılır, ve kendisini oluşturan Lie cebiri parçasını bir Lie altcebbiri olarak ihtiva eder. Diğer parçanın birleşik çarpım içerisinde yalnızca bir vektör altuzayı olarak bulunup bir Lie altcebbiri olmaması ise bu vektör uzayından Lie cebiri parçasına tanımlanan ters-simetrik bir fonksiyon, bükülmüş eşçevrim (twisted cocycle) dönüşümü, ile telafi edilir. Bu çalışmamızın 3. bölümü teorik olarak bu tip Lie cebirlerini sunmak ve bu tip cebirlerin dual uzayları üzerindeki Poisson yapılarını belirlemek üzerinedir (bkz. 3.2). Bu son durum teorik olarak da literatürde henüz çalışılmamış ve ilk burada sunulacaktır. 2-SIR (3) ve 2-SEIR (4) modellerinin bu teorik yapıya uygun oldukları da sırasıyla Bölüm 4.3 ve 4.4'te verilecektir.

II. HAMILTON DİNAMİĞİ VE EŞLENME PROBLEMİ

2.1. Hamilton Sistemleri

P türevlenebilir bir katman (manifold) olsun [28]. P üzerinde tanımlı reel değerli türevlenebilir fonksiyonlar uzayı $C^\infty(P)$ için

$$\{\bullet, \bullet\}: C^\infty(P) \times C^\infty(P) \rightarrow C^\infty(P)$$

operasyonunu düşünelim. Eğer her $\mathcal{F}, \mathcal{G}, \mathcal{H} \in C^\infty(P)$ ve $a, b \in \mathbb{R}$ için bu operasyon

- (İki-lineerlik.) $\{a\mathcal{F} + b\mathcal{G}, \mathcal{H}\} = a\{\mathcal{F}, \mathcal{H}\} + b\{\mathcal{G}, \mathcal{H}\}$ ve $\{\mathcal{F}, a\mathcal{G} + b\mathcal{H}\} = a\{\mathcal{F}, \mathcal{G}\} + b\{\mathcal{F}, \mathcal{H}\}$,
- (Ters simetri.) $\{\mathcal{F}, \mathcal{H}\} = -\{\mathcal{H}, \mathcal{F}\}$,
- (Jacobi özdeşliği.) $\{\mathcal{F}, \{\mathcal{G}, \mathcal{H}\}\} + \{\mathcal{G}, \{\mathcal{H}, \mathcal{F}\}\} + \{\mathcal{H}, \{\mathcal{F}, \mathcal{G}\}\} = 0$,
- (Leibniz kuralı.) $\{\mathcal{F}\mathcal{G}, \mathcal{H}\} = \mathcal{F}\{\mathcal{G}, \mathcal{H}\} + \mathcal{G}\{\mathcal{F}, \mathcal{H}\}$

özelliklerini sağlıyorsa, $\{\bullet, \bullet\}$ operasyonu *Poisson çerçevesi*, $(P, \{\bullet, \bullet\})$ ise *Poisson katmanı* olarak adlandırılır [29, 30].

Bir $\mathcal{H} \in C^\infty(P)$ fonksiyonu seçelim. Bu fonksiyona *Hamilton fonksiyonu* diyeceğiz. Çerçevenin Leibniz kuralını sağlaması neticesinde, verilen bir Hamilton fonksiyonu \mathcal{H} için bir vektör alanı $X_{\mathcal{H}}$ tanımlayalım:

$$X_{\mathcal{H}}(\mathcal{F}) = \{\mathcal{F}, \mathcal{H}\}, \quad \mathcal{F} \in C^\infty(P). \quad (14)$$

Sol taraftaki notasyon, rasgele seçilen bir \mathcal{F} fonksiyonunun $X_{\mathcal{H}}$ vektör alanı etkisindeki yönlü türevini (directional derivative) göstermektedir. Literatürde, $X_{\mathcal{H}}$ vektör alanı *Hamilton vektör alanı* olarak adlandırılır. Bu durumda her $z \in P$ için,

$$\dot{z} = X_{\mathcal{H}}(z) = \{z, \mathcal{H}\} \quad (15)$$

şeklinde yazılan diferansiyel denklem *Hamilton denklemi* adını alır.

Sonlu Boyut - Koordinatlar. Yerel olarak P üzerinde (z_i) koordinat sistemini alırsak, Poisson çerçevesini $N_{ij} = \{z_i, z_j\}$ notasyonu ile belirleyebiliriz. Buradaki $N = [N_{ij}]$ matrisi *Poisson matrisi* olarak adlandırılır. Bu durumda Lie çerçevesinin genel hali (14)'ü ve Hamilton denklemleri (15)'i

$$\{\mathcal{F}, \mathcal{H}\} = N_{ij} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial z_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial z_j}, \quad \dot{z}_i = N_{ij} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial z_j} \quad (16)$$

şeklinde yazabiliriz.

2.2. Lie-Poisson Sistemleri

\mathfrak{g} bir vektör uzayı olsun. Bu vektör uzayı üzerinde tanımladığımız iki-lineer, ters simetrik ve Jacobi özdeşliğini sağlayan

$$[\bullet, \bullet]: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$$

operasyonuna *Lie çerçevesi*, bu operasyonla donatılmış $(\mathfrak{g}, [\bullet, \bullet])$ vektör uzayına ise *Lie cebiri* denir. \mathfrak{g} bir Lie cebiriyse, onun duali olan \mathfrak{g}^* uzayında tanımlı reel değerli fonksiyonlar uzayı üzerinde

$$\{\mathcal{F}, \mathcal{H}\}(z) = \langle z, \left[\frac{\delta \mathcal{F}}{\delta z}, \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta z} \right] \rangle \quad (17)$$

şeklinde tanımlanabilen bir Poisson çerçevesi bulunur. Bu çerçeve *Lie-Poisson çerçevesi* olarak adlandırılır. (17)'deki $\delta \mathcal{F} / \delta z$ ve $\delta \mathcal{H} / \delta z$ türevlerinin Lie cebire ait olabilmesi, dolayısıyla da tanımın geçerli olabilmesi için \mathfrak{g} vektör uzayının \mathfrak{g}^{**} uzayını içermesi gerekmektedir. Bu tanım ışığında, Hamilton fonksiyonu \mathcal{H} 'nin etkisindeki \mathcal{F} 'nin dinamiği

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{F}} &= \{\mathcal{F}, \mathcal{H}\}(z) = \langle z, \left[\frac{\delta \mathcal{F}}{\delta z}, \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta z} \right] \rangle = \langle z, -ad_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta z}} \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta z} \rangle \\ &= \langle ad_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta z}}^* \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta z}, z \rangle \end{aligned} \quad (18)$$

şeklinde hesaplanır. Buradaki ad ve ad^* operasyonları \mathfrak{g} 'nin sırasıyla adjoint ve koadjoint operasyonları olup her $X, Y \in \mathfrak{g}$ ve $\mu \in \mathfrak{g}^*$ için

$$\begin{aligned} ad_X Y &:= [X, Y] \quad \text{ve} \\ \langle ad_X^* \mu, Y \rangle &= \langle \mu, -ad_X Y \rangle = -\langle \mu, [X, Y] \rangle \end{aligned}$$

olarak tanımlanır. Hamilton denklemi ise

$$\dot{z} - ad_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta z}}^* z = 0 \quad (19)$$

şeklinde yazılır ki bu, \mathcal{H} Hamilton fonksiyonunun etkisindeki *hareket denklemi*dir.

Sonlu Boyut - Koordinatlar. Şimdi sonlu boyutlu \mathfrak{g} uzayının dualinde tanımlı Lie-Poisson yapılarını koordinatlarda inceleyelim. $\{e_i\} = \{e_1, \dots, e_N\}$, \mathfrak{g} uzayının bir bazı ise, bu baz üzerindeki Lie çerçevesi işlemlerini

$$[e_i, e_j] = C_{ij}^k e_k, \quad (20)$$

şeklinde yazabiliriz. Buradan elde ettiğimiz C_{ij}^k sabitleri Lie çerçevesinin *yapı sabitleri*dir. Dual bazı $\{e^i\} = \{e^1, \dots, e^N\}$ şeklinde gösterebiliriz. Bu durumda \mathfrak{g}^{**} 'daki herhangi bir eleman $z = z_i e^i$ şeklinde yazılabilir ve $\{z_1, \dots, z_N\}$ reel sayıları da koordinatları ifade eder. Böylece, (17)'deki Lie-Poisson çerçevesinin koordinatlardaki yazımı

$$\{\mathcal{F}, \mathcal{H}\} = C_{ij}^k z_k \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta z_i} \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta z_j} \quad (21)$$

olurken, (19)'daki hareket denklemi koordinatlarda

$$\dot{z}_i - C_{ij}^k z_k \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta z_j} = 0 \quad (22)$$

şeklinde yazılır.

2.3. Eşleşmiş ve (Sol) Yarı Direkt Çarpım Lie Cebirleri

\mathfrak{g} ve \mathfrak{h} iki Lie cebiri olsun. Bu cebirlerin karşılıklı etkileşiminden bahsedebilmek için birbirleri üzerinde sağ ve sol etkilerini tanımlamamız gerekir. $\xi, \xi' \in \mathfrak{g}$ ve $\eta, \eta' \in \mathfrak{h}$ için,

$$\begin{aligned} \triangleright : \mathfrak{h} \otimes \mathfrak{g} &\rightarrow \mathfrak{g}, & \eta \otimes \xi &\mapsto \eta \triangleright \xi \\ \triangleleft : \mathfrak{h} \otimes \mathfrak{g} &\rightarrow \mathfrak{h}, & \eta \otimes \xi &\mapsto \eta \triangleleft \xi \end{aligned} \quad (23)$$

olmak üzere iki lineer dönüşüm tanımlayalım. Eğer bu dönüşümler

$$\begin{aligned} [\eta, \eta'] \triangleright \xi &= \eta \triangleright (\eta' \triangleright \xi) - \eta' \triangleright (\eta \triangleright \xi) \\ \eta \triangleleft [\xi, \xi'] &= (\eta \triangleleft \xi) \triangleleft \xi' - (\eta \triangleleft \xi') \triangleleft \xi \end{aligned} \quad (24)$$

eşitliklerini sağlarsa, \triangleright ve \triangleleft dönüşümleri sırasıyla *sol etki* ve *sağ etki* olarak adlandırılır. Burada, okumayı kolaylaştırmak adına, \mathfrak{g} ve \mathfrak{h} 'ye ait Lie çerçevesi aynı

$[\bullet, \bullet]$ sembolüyle yazılmıştır. Direkt toplam $\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ üzerinde bir Lie yapısı tanımlayabilmek için de bu etkilerden yararlanacağız. Öncelikle,

$$\eta \triangleright [\xi, \xi'] = [\eta \triangleright \xi, \xi'] + [\xi, \eta \triangleright \xi'] + (\eta \triangleleft \xi) \triangleright \xi' - (\eta \triangleleft \xi') \triangleright \xi \quad (25)$$

$$[\eta, \eta'] \triangleleft \xi = [\eta, \eta' \triangleleft \xi] + [\eta \triangleleft \xi, \eta'] + \eta \triangleleft (\eta' \triangleright \xi) - \eta' \triangleleft (\eta \triangleright \xi)$$

"uyumluluk" şartlarının sağlandığını varsayalım. Bu durumda,

$$(\xi \oplus \eta), (\xi' \oplus \eta') \triangleright = ([\xi, \xi'] + \eta \triangleright \xi' - \eta' \triangleright \xi) \oplus ([\eta, \eta'] + \eta \triangleleft \xi' - \eta' \triangleleft \xi) \quad (26)$$

şeklinde tanımlanan operasyon, Lie çerçevesi özelliklerini taşır. Böylece $(\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}, [\bullet, \bullet]_{\otimes})$, eşleşmiş Lie cebiri (matched pair Lie algebra) oluşturur. (26)'ya göre etkiler

$$[\eta, \xi] = (\eta \triangleright \xi) \oplus (\eta \triangleleft \xi) \quad (27)$$

eşitliğini sağlamaktadır.

Özel olarak ise denklem (23)'te ikinci satırda verilen \mathfrak{g} 'nin \mathfrak{h} 'ye sağ etkisini aşikar kabul edelim. Bu durumu $\mathfrak{g} \ltimes \mathfrak{h}$ notasyonu ile belirtip, literatürde (sol) yarı direkt çarpım (semi-direct product) adıyla anıldığını hatırlatalım. Bu özel durum için uyumluluk koşulları (25)'ten birincisinin sol etkinin Lie çerçevesini korumasını gerektireceği

$$\eta \triangleright [\xi, \xi'] = [\eta \triangleright \xi, \xi'] + [\xi, \eta \triangleright \xi'], \quad (28)$$

ikinci koşulun ise otomatikman sağlanacağı rahatlıkla gözlemlenir. Eşleşmiş çerçeve ise

$$([\xi \oplus \eta), (\xi' \oplus \eta')]_{\otimes} = ([\xi, \xi'] + \eta \triangleright \xi' - \eta' \triangleright \xi) \oplus ([\eta, \eta']) \quad (29)$$

şekline indirgenecektir.

Sonlu Boyut - Koordinatlar. $\{e_{\alpha}\}$ kümesi $\alpha = 1, \dots, N$ olacak şekilde \mathfrak{g} uzayının, $\{f_a\}$ kümesi ise $a = 1, \dots, M$ olacak şekilde \mathfrak{h} uzayının bazıları olsun. Her bir Lie cebiri için yapı sabitlerini

$$[e_{\alpha}, e_{\beta}] = C_{\alpha\beta}^{\theta} e_{\theta}, \quad [f_a, f_b] = D_{ab}^j f_j. \quad (30)$$

olarak tanımlayalım. $\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ direkt toplamı $N + M$ boyutlu bir vektör uzayı olduğundan,

$$\{\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_a\} \subset \mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}, \quad \bar{e}_{\alpha} = e_{\alpha} \oplus 0, \quad \bar{e}_a = 0 \oplus f_a \quad (31)$$

şeklinde tanımlanmış $\{\bar{e}_1, \dots, \bar{e}_{N+M}\}$ kümesi $\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ için bir baz oluşturur. Buradaki sonlu yapıda, denklem (23)'te verilen karşılıklı etkiler

$$f_a \triangleright e_{\alpha} = L_{\alpha\alpha}^{\beta} e_{\beta} \quad f_a \triangleleft e_{\alpha} = R_{\alpha\alpha}^b f_b \quad (32)$$

şeklinde yazılabilir. Bazları sabitlediğimiz için $L_{\alpha\alpha}^{\beta}$ ve $R_{\alpha\alpha}^b$ sabitlerini tek şekilde elde ederiz. Şimdi eşleşmiş

Lie çerçevesi operasyonunu baz elemanlarına uygulayalım. (32)'den yararlanarak

$$[\bar{e}_{\beta}, \bar{e}_{\alpha}]_{\otimes} = \bar{C}_{\beta\alpha}^{\gamma} \bar{e}_{\gamma} + \bar{C}_{\beta\alpha}^a \bar{e}_a = [e_{\beta} \oplus 0, e_{\alpha} \oplus 0]_{\otimes} = C_{\beta\alpha}^{\gamma} e_{\gamma} \oplus 0$$

$$[\bar{e}_{\beta}, \bar{e}_a]_{\otimes} = \bar{C}_{\beta a}^{\gamma} \bar{e}_{\gamma} + \bar{C}_{\beta a}^j \bar{e}_j = [e_{\beta} \oplus 0, 0 \oplus f_a]_{\otimes} = -L_{\beta a}^{\gamma} e_{\gamma} \oplus (-R_{\beta a}^j f_j)$$

$$[\bar{e}_b, \bar{e}_a]_{\otimes} = \bar{C}_{ba}^{\gamma} \bar{e}_{\gamma} + \bar{C}_{ba}^j \bar{e}_j = [0 \oplus f_b, 0 \oplus f_a]_{\otimes} = 0 \oplus D_{ba}^j f_j \quad (33)$$

sonuçlarını alırsız. Dolayısıyla, eşleşmiş Lie cebirinin yapı sabitleri şu şekilde olur:

$$\bar{C}_{\beta\alpha}^{\gamma} = C_{\beta\alpha}^{\gamma}, \quad \bar{C}_{\beta\alpha}^a = 0, \quad \bar{C}_{\beta a}^{\gamma} = -L_{\beta a}^{\gamma}$$

$$\bar{C}_{\beta a}^j = -R_{\beta a}^j, \quad \bar{C}_{ba}^{\gamma} = 0, \quad \bar{C}_{ba}^j = D_{ba}^j. \quad (34)$$

Bir özel durum olarak (32)'de ikinci denklemle verilen etkilerden \mathfrak{g} 'nin \mathfrak{h} 'ye sağ etkisini aşikar kabul edelim. Koordinatlarda, bu durumun gerçekleşebilmesi için tüm $R_{\alpha a}^b$ sayılarının sıfır olması gerekecektir. Böylece de eşleşmiş sistem (29) için $\bar{C}_{\beta a}^j$ ile kodlanan yapı sabitleri de sıfır olarak hesap edilecektir.

2.4. Eşleşmiş ve (Sol) Yarı Direkt Çarpım Lie-Poisson Sistemleri

Öncelikle $\eta \in \mathfrak{h}$ olacak şekilde bir eleman sabitleyelim. \mathfrak{h} Lie cebiri \mathfrak{g} 'ye soldan etki ettiği için

$$\eta \triangleright : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}, \quad \xi \mapsto \eta \triangleright \xi \quad (35)$$

şeklinde bir lineer dönüşüm tanımlayabiliriz. Bu lineer dönüşümün duali aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\triangleleft \eta : \mathfrak{g}^* \rightarrow \mathfrak{g}^*, \quad \langle \mu \triangleleft \eta, \xi \rangle = \langle \mu, \eta \triangleright \xi \rangle. \quad (36)$$

Yani \triangleleft dönüşümü, \mathfrak{h} 'nin \mathfrak{g}^* 'e etkisi olur. Şimdi de $\xi \in \mathfrak{g}$ elemanını sabitleyerek

$$b_{\xi} : \mathfrak{h} \rightarrow \mathfrak{g}, \quad b_{\xi}(\eta) = \eta \triangleright \xi \quad (37)$$

lineer dönüşümünü tanımlayalım. Bu dönüşümün duali ise aşağıdaki şekildedir:

$$b_{\xi}^* : \mathfrak{g}^* \rightarrow \mathfrak{h}^*, \quad \langle b_{\xi}^* \mu, \eta \rangle = \langle \mu, b_{\xi}(\eta) \rangle = \langle \mu, \eta \triangleright \xi \rangle. \quad (38)$$

Sağ etki için de benzer dönüşümler yazabiliriz. $\xi \in \mathfrak{g}$ elemanını sabitleyerek $\triangleleft \xi$ dönüşümünü ve onun duali olan $\xi \triangleright^*$ dönüşümünü şu şekilde tanımlarız:

$$\triangleleft \xi : \mathfrak{h} \rightarrow \mathfrak{h}, \quad \eta \mapsto \eta \triangleleft \xi \quad (39)$$

$$\xi \triangleright^* : \mathfrak{h}^* \rightarrow \mathfrak{h}^*, \quad \langle \xi \triangleright^* \nu, \eta \rangle = \langle \nu, \eta \triangleleft \xi \rangle. \quad (40)$$

Burada da \triangleright dönüşümü, \mathfrak{g} 'nin \mathfrak{h}^* 'e etkisidir. $\eta \in \mathfrak{h}$ elemanını sabitleyerek de a_{η} dönüşümünü ve onun duali olan a_{η}^* dönüşümünü tanımlarız:

$$\alpha_\eta: g \mapsto \mathfrak{h}, \quad \alpha_\eta(\xi) = \eta \triangleleft \xi \quad (41)$$

$$\alpha_\eta^*: \mathfrak{h}^* \mapsto g^*, \quad \langle \alpha_\eta^* \nu, \xi \rangle = \langle \nu, \alpha_\eta \xi \rangle = \langle \nu, \eta \triangleleft \xi \rangle. \quad (42)$$

Bu notasyonlar ışığında, $g^* \oplus \mathfrak{h}^*$ dual uzayı üzerindeki eşleşmiş Lie-Poisson çerçevesi [13], $\mu \in g^*$ ve $\nu \in \mathfrak{h}^*$ olmak üzere,

$$\begin{aligned} \{\mathcal{H}, \mathcal{F}\}_\times(\mu \oplus \nu) &= \underbrace{\left\langle \mu, \left[\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right] \right\rangle + \left\langle \nu, \left[\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \right] \right\rangle}_{\text{A: Direkt toplam}} \\ &+ \underbrace{\left\langle \mu, \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu} \triangleright \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right\rangle - \left\langle \mu, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \triangleright \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu} \right\rangle}_{\text{B: } \mathfrak{h}^* \text{nin } g \text{ üzerindeki sol etkisinden gelen terim}} \\ &+ \underbrace{\left\langle \nu, \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu} \triangleleft \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right\rangle - \left\langle \nu, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \triangleleft \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu} \right\rangle}_{\text{C: } g^* \text{nin } \mathfrak{h} \text{ üzerindeki sağ etkisinden gelen terim}} \end{aligned} \quad (43)$$

olarak hesaplanır. Bu tanımın geçerli olabilmesi için, g ve \mathfrak{h} uzaylarının sırasıyla g^{**} ve \mathfrak{h}^{**} uzaylarını içermeleri gerekmektedir. Eşleşmiş Lie-Poisson ($\mathcal{H} = \mathcal{H}(\mu, \nu)$ Hamilton fonksiyonuyla üretilmiş) hareket denklemleri ise

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{dt} &= \underbrace{ad_{\delta \mathcal{H}}^*(\mu)}_{g^* \text{de Lie-Pois. denk.}} - \underbrace{\mu \triangleleft \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}_{\mathfrak{h}^* \text{nin etkisi}} - \underbrace{\alpha_{\delta \mathcal{H}}^* \nu}_{g^* \text{nin etkisi}} \\ \frac{d\nu}{dt} &= \underbrace{ad_{\delta \mathcal{H}}^*(\nu)}_{\mathfrak{h}^* \text{de Lie-Pois. denk.}} + \underbrace{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu} \triangleright \nu}_{g^* \text{nin etkisi}} + \underbrace{\mathfrak{b}_{\delta \mathcal{H}}^* \mu}_{\mathfrak{h}^* \text{nin etkisi}} \end{aligned} \quad (44)$$

olarak yazılır.

Özel olarak g^* 'nin \mathfrak{h}^* 'ye sağ etkisini aşikar kabul edelim. Bu durumda $g^* \times \mathfrak{h}^*$ uzayının duali üzerinde (sol) yarı direkt çarpım olacak şekilde denklem (43)'te verilen çerçevede C ile kodlanmış terimler sıfır gelecektir ve çerçeve

$$\begin{aligned} \{\mathcal{H}, \mathcal{F}\}_\times(\mu \oplus \nu) &= \underbrace{\left\langle \mu, \left[\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right] \right\rangle + \left\langle \nu, \left[\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \right] \right\rangle}_{\text{A: Direkt toplam}} \\ &+ \underbrace{\left\langle \mu, \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu} \triangleright \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right\rangle - \left\langle \mu, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \triangleright \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu} \right\rangle}_{\text{B: } \mathfrak{h}^* \text{nin } g^* \text{ üzerindeki sol etkisinden gelen terim}} \end{aligned} \quad (45)$$

şeklinde indirgenecektir. Bu özel durumda eşleşmiş hareket denklemleri (44)'te sağ etkiden gelen terimler düşecek ve

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{dt} &= \underbrace{ad_{\delta \mathcal{H}}^*(\mu)}_{g^* \text{de Lie-Pois. denk.}} - \underbrace{\mu \triangleleft \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}_{\mathfrak{h}^* \text{nin etkisi}} \\ \frac{d\nu}{dt} &= \underbrace{ad_{\delta \mathcal{H}}^*(\nu)}_{\mathfrak{h}^* \text{de Lie-Pois. denk.}} + \underbrace{\mathfrak{b}_{\delta \mathcal{H}}^* \mu}_{\mathfrak{h}^* \text{nin etkisi}} \end{aligned} \quad (46)$$

olarak elde edilecektir. Yarı direkt çarpım uzayları üzerindeki Hamilton denklemleri için ayrıca bakınız [21].

Sonlu Boyut - Koordinatlar. Eşleşmiş Lie-Poisson

cebirini lokal koordinatlarda inceleyelim. $g \oplus \mathfrak{h}$ uzayı için $\{\bar{e}_i\}$ bazını (31)'de tanımlamıştık. g^* ve \mathfrak{h}^* 'nin dual bazları da sırasıyla $\{e^\alpha\}$ ve $\{f^a\}$ olduğuna göre, $g^* \oplus \mathfrak{h}^*$ 'nin bazını da (31)'deki gibi tanımlayabiliriz. Yani

$$\{\bar{e}^\alpha, \bar{e}^a\} \subset g^* \oplus \mathfrak{h}^*, \quad \bar{e}^\alpha = e^\alpha \oplus 0, \quad \bar{e}^a = 0 \oplus f^a \quad (47)$$

şeklinde tanımlanan $\{\bar{e}^1, \dots, \bar{e}^{N+M}\}$ kümesi, dual bazdır. Bu bazı kullandığımızda, (36) ve (40) dual dönüşümlerini yerel koordinatlarda

$$\begin{aligned} (\mu_\alpha e^\alpha) \triangleleft (\eta^a f_a) &= \mu_\alpha \eta^a L_{a\beta}^\alpha e^\beta, \\ (\xi^\alpha e_\alpha) \triangleright \nu &= \nu_a \xi^\alpha R_{b\alpha}^a f^b \end{aligned} \quad (48)$$

olarak yazabiliriz. Buradaki $L_{a\beta}^\alpha$ ve $R_{b\alpha}^a$, karşılıklı etkileri tek şekilde tanımlayan (32)'deki sabitlerdir. Öte yandan, (38) ve (42) dönüşümleri yerel koordinatlarda

$$\begin{aligned} \mathfrak{b}_{(\xi^\alpha e_\alpha)}^*(\mu_\alpha e^\alpha) &= \mu_\alpha \xi^\beta L_{a\beta}^\alpha f^a, \\ \mathfrak{a}_{(\eta^a f_a)}^*(\nu_a e^a) &= \nu_a \eta^b R_{b\alpha}^a e^\alpha. \end{aligned} \quad (49)$$

şeklinde yazılır. Böylece, (43)'teki eşleşmiş Lie-Poisson çerçevesinin koordinatlardaki yazımı

$$\begin{aligned} \{\mathcal{H}, \mathcal{F}\}_\times(\mu \oplus \nu) &= \mu_\alpha C_{\beta\gamma}^\alpha \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\beta} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mu_\gamma} + \nu_a D_{be}^a \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \nu_e} \\ &+ \mu_\alpha L_{a\beta}^\alpha \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_a} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mu_\beta} - \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \nu_a} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\beta} \right) \\ &+ \nu_a R_{b\beta}^a \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mu_\beta} - \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \nu_b} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\beta} \right) \end{aligned} \quad (50)$$

Eşleşmiş Lie-Poisson çerçevesi operasyonunu koordinatlara uyguladığımızda ise aşağıdaki sonuçları elde ederiz:

$$\begin{aligned} \{\mu_\theta, \mu_\rho\} &= \mu_\alpha C_{\theta\rho}^\alpha, \\ \{\mu_\theta, \nu_b\} &= -\mu_\alpha L_{b\theta}^\alpha - \nu_a R_{b\theta}^a, \quad \{\nu_b, \nu_e\} = \nu_a D_{be}^a. \end{aligned} \quad (51)$$

(44)'teki eşleşmiş Lie-Poisson hareket denklemlerinin koordinatlardaki yazımı ise

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_\beta}{dt} &= \mu_\rho \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\alpha} C_{\beta\alpha}^\rho - \mu_\alpha \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_a} L_{a\beta}^\alpha - \nu_a \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} R_{b\beta}^a \\ \frac{d\nu_e}{dt} &= \nu_a \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} D_{eb}^a + \nu_a \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\alpha} R_{e\alpha}^a + \mu_\alpha \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\beta} L_{e\beta}^\alpha. \end{aligned} \quad (52)$$

şeklinde olur.

Özel durumumuz olan sağ etkinin aşikar alındığı zaman Poisson çerçevesi (45) sonlu boyutta şu şekilde yazılır:

$$\begin{aligned} \{\mu_\theta, \mu_\rho\} &= \mu_\alpha C_{\theta\rho}^\alpha, \\ \{\mu_\theta, \nu_e\} &= -\mu_\alpha L_{e\theta}^\alpha, \quad \{\nu_b, \nu_e\} = \nu_a D_{be}^a. \end{aligned} \quad (53)$$

ve hareket denklemleri (46) ise

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_\beta}{dt} &= \mu_\rho \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\alpha} C_{\beta\alpha}^\rho - \mu_\alpha \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial v_\alpha} L_{\alpha\beta}^\alpha \\ \frac{dv_e}{dt} &= v_\alpha \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial v_\beta} D_{eb}^\alpha + \mu_\alpha \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\beta} L_{e\beta}^\alpha \end{aligned} \quad (54)$$

şeklinde olur.

Daha özel bir durum olarak, Lie çerçevesinin \mathfrak{g} ve \mathfrak{h} üzerinde aşikar olduğunu, yani tüm $C_{\beta\alpha}^\rho$ ve D_{eb}^α yapı sabitlerini 0 kabul edelim. Bu durumda (52)'deki denklemler

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_\beta}{dt} &= -\mu_\alpha \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial v_\alpha} L_{\alpha\beta}^\alpha \\ \frac{dv_e}{dt} &= \mu_\alpha \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_\beta} L_{e\beta}^\alpha \end{aligned} \quad (55)$$

olarak yazılır.

III. LIE-POISSON SİSTEMLERİNİN BÜKÜLMÜŞ EŞÇEVİRİM GENİŞLEMESİ

3.1. Lie Cebirlerinin Bükülmüş Eşçevrim Genişlemesi

İlk olarak bir \mathfrak{K} Lie cebiri ile başlayalım ve bu cebirin \mathfrak{g} ile göstereceğimiz bir altcebirini göz önüne alalım. Temel lineer cebir teorisinden biliyoruz ki; $\mathfrak{K} = \mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ direkt toplam eşitliğini sağlayacak bir $\mathfrak{h} \subset \mathfrak{K}$ vektör altuzayı her zaman mevcuttur. Burada eğer \mathfrak{h} altuzayı \mathfrak{K} üzerindeki Lie çerçevesi altında kapalı ise, diğer bir ifade ile \mathfrak{h} bir Lie altcebiri ise, $\mathfrak{K} = \mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ toplamı bir eşleşmiş Lie cebiri olacaktır. Burada karşılıklı etkiler için $[\mathfrak{h}, \mathfrak{g}]$ hesabına başvurmak gerekir. Bu durum önceki bölümlerde incelenmişti.

Şimdi ise daha genel bir yapıyı inceleyeceğiz; $\mathfrak{K} = \mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ dekompozisyonunda \mathfrak{g} altcebir iken \mathfrak{h} vektör altuzayı altcebir olmasın. Diğer bir ifade ile \mathfrak{K} üzerindeki Lie çerçevesi \mathfrak{g} 'de kapalılık özelliği gösterirken, \mathfrak{h} 'de göstermesin. Bu durumu şu şekilde ifade edebiliriz. $\xi_1, \xi_2, \xi, \xi' \in \mathfrak{g}$ ve $\eta_1, \eta_2, \eta \in \mathfrak{h}$ olmak üzere, çerçeve işlemleri

$$\begin{aligned} \kappa(\eta, \eta) &= 0, \quad \Phi(\eta, \eta) = 0, \\ \kappa(\eta, \eta') \triangleleft \xi &= \kappa(\eta, \eta' \triangleleft \xi) - \kappa(\eta', \eta \triangleleft \xi) + \eta \triangleleft (\eta' \triangleright \xi) - \eta' \triangleleft (\eta \triangleright \xi), \\ \kappa(\eta, \eta') \triangleright \xi &= [\xi, \Phi(\eta, \eta')] + \Phi(\eta, \eta' \triangleleft \xi) + \Phi(\eta \triangleleft \xi, \eta') + \eta \triangleright (\eta' \triangleright \xi) - \eta' \triangleright (\eta \triangleright \xi), \\ \eta \triangleright [\xi, \xi'] &= [\xi, \eta \triangleright \xi'] - [\xi', \eta \triangleright \xi] + (\eta \triangleleft \xi) \triangleright \xi' - (\eta \triangleleft \xi') \triangleright \xi, \\ \eta \triangleleft [\xi, \xi'] &= \eta \triangleleft \xi \triangleleft \xi' - \eta \triangleleft \xi' \triangleleft \xi, \\ \cup \Phi(\eta_1, \kappa(\eta_2, \eta_3)) + \cup \eta_1 \triangleright \Phi(\eta_2, \eta_3) &= 0, \\ \cup \kappa(\eta_1, \kappa(\eta_2, \eta_3)) + \cup \eta_1 \triangleleft \Phi(\eta_2, \eta_3) &= 0 \end{aligned} \quad (62)$$

olmasıdır, [4, Thm. 3.2] ve [5, Thm. 3.1.2].

Buradaki son iki özelliğe sırasıyla Φ dönüşümünün *bükülmüş eşçevrim* (twisted cocycle) özelliği, ve κ dönüşümünün *bükülmüş Jacobi* (twisted Jacobi) özdeşliği denilir.

Özel olarak \mathfrak{g} 'nin \mathfrak{h} üzerine sağ etkisi (60) aşikar etki olarak alınırsa, ki bu durumda (61) çerçevesi

$$[\xi_1, \xi_2] = \xi \quad [\eta_1, \eta_2] = \eta + \xi' \quad (56)$$

olarak yazılabilir. Buradaki hesaplara bağlı kalarak, Φ dönüşümünü

$$\Phi: \mathfrak{h} \times \mathfrak{h} \rightarrow \mathfrak{g}, \quad \Phi(\eta_1, \eta_2) = \text{proj}_{\mathfrak{g}}[\eta_1, \eta_2] = \xi', \quad (57)$$

κ dönüşümünü ise

$$\kappa: \mathfrak{h} \times \mathfrak{h} \rightarrow \mathfrak{h}, \quad \kappa(\eta_1, \eta_2) = \text{proj}_{\mathfrak{h}}[\eta_1, \eta_2] = \eta \quad (58)$$

olarak tanımlayalım. Burada $\text{proj}_{\mathfrak{g}}$ ve $\text{proj}_{\mathfrak{h}}$ ile \mathfrak{K} uzayından sırasıyla \mathfrak{g} ve \mathfrak{h} üzerine izdüşüm operatörleri ifade edilmektedir. Öte yandan,

$$[\eta, \xi] = \eta \triangleright \xi + \eta \triangleleft \xi$$

olacak şekilde

$$\triangleright: \mathfrak{h} \otimes \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g} \quad (59)$$

ve

$$\triangleleft: \mathfrak{h} \otimes \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{h} \quad (60)$$

lineer dönüşümlerini kurgulayalım. Bu sayede $\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ üzerindeki Lie çerçevesi

$$\begin{aligned} [(\xi \oplus \eta), (\xi' \oplus \eta')]_{\times_\Phi} &= ([\xi, \xi'] + \eta \triangleright \xi' - \eta' \triangleright \xi \\ &+ \Phi(\eta, \eta')) \oplus (\kappa(\eta, \eta') + \eta \triangleleft \xi' - \eta' \triangleleft \xi) \end{aligned} \quad (61)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada; (61) ile verilen çerçevenin iki-lineer ve ters simetrik oluşundan, Φ ve κ dönüşümlerinin iki-lineer ve ters simetrik oldukları açıktır. Dahası, direkt bir hesap kullanarak (61) çerçevesinin Jacobi özdeşliğini sağlamanın gerek ve yeter şartı, her $\xi, \xi' \in \mathfrak{g}$, ve her $\eta, \eta', \eta_1, \eta_2, \eta_3 \in \mathfrak{h}$ için

$$\begin{aligned} [(\xi \oplus \eta), (\xi' \oplus \eta')]_{\times_\Phi} &= ([\xi, \xi'] + \eta \triangleright \xi' - \eta' \triangleright \xi \\ &+ \Phi(\eta, \eta')) \oplus \kappa(\eta, \eta') \end{aligned} \quad (63)$$

halini alır. Diğer yandan, Φ dönüşümü aşikar olarak alınırsa, (61) çerçevesi

$$\begin{aligned} [(\xi \oplus \eta), (\xi' \oplus \eta')]_{\infty} &= ([\xi, \xi'] + \eta \triangleright \xi' - \eta' \triangleright \xi \\ &\oplus (\kappa(\eta, \eta') + \eta \triangleleft \xi' - \eta' \triangleleft \xi)) \end{aligned} \quad (64)$$

olur. Bu son durumda, (62) içerisindeki son özelliğe bakılarak κ dönüşümünün

$$\cup \kappa(\eta_1, \kappa(\eta_2, \eta_3)) = 0,$$

yani Jacobi özelliğini sağlayacağı, ve dolayısıyla \mathfrak{h} üzerinde bir Lie çerçevesi belirleyeceği görülebilir. Diğer yandan, eğer \mathfrak{h} bir Lie cebiri (κ dönüşümü Lie çerçevesi olmak üzere), ve (59) dönüşümü de bir Lie cebiri sol etkisi ise, (62) içerisinde sondan bir önceki özellik Φ dönüşümünün \mathfrak{h} Lie cebiri üzerinde \mathfrak{g} katsayılı bir 2-eşçevrim (2-cocycle) olması şeklinde yorumlanabilir.

Toplam uzayında, aşikar olamayan bir bükülmüş eşçevrim mevcut ise, rahatlıkla fark edilebileceği üzere, \mathfrak{h} Lie altcebirini olamayacak, bu durumda da \mathfrak{h} 'nin \mathfrak{g} üzerinde etkisi gerçek bir Lie cebiri etkisi olamayacaktır. Bu gerçeği akılda tutarak, makale boyunca bu dönüşüme yeni bir terminoloji yaratmamak için etki demeye devam edeceğiz.

Sonlu Boyut - Koordinatlar. Önceki bölümlerdeki seçimlerimize sadık kalalım: \mathfrak{g} 'nin bazı $\{e_i\}$ $i = 1, \dots, N$ ve \mathfrak{h} 'nin bazı $\{f_j\}$, $j = 1, \dots, M$ olsun. Denklem (57)'de verilen Φ bükülmüş eşçevrim dönüşümü

$$\Phi(f_a, f_b) = \Phi_{ab}^\alpha e_\alpha \tag{65}$$

şeklinde gösterilebilir. Burada Φ_{ab}^α ile verilen sayılar Φ dönüşümünü tek şekilde belirler. Denklem (61)'de verilen Lie çerçevesini ise bazlar üzerinde şu şekilde yazabiliriz:

$$[e_\alpha, e_\beta] = C_{\alpha\beta}^\theta e_\theta \quad [f_a, f_b] = D_{ab}^j f_j + \Phi_{ab}^\alpha e_\alpha. \tag{66}$$

Önceki bölümlerle uyumlu olmak adına $C_{\alpha\beta}^\theta$ ve D_{ab}^j yapı sabitleri olarak ifade edilecektir.

Biliyoruz ki, (31) şeklinde tanımlanmış $\{\bar{e}_1, \dots, \bar{e}_{N+M}\}$, $\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ için bir bazdır. (32) ve (66) eşitliklerinden yararlanarak, (61) çerçevesinin yapı sabitlerini bulabiliriz:

$$\begin{aligned} [\bar{e}_\beta, \bar{e}_\alpha]_{\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}} &= \bar{C}_{\beta\alpha}^\gamma \bar{e}_\gamma + \bar{C}_{\beta\alpha}^a \bar{e}_a \\ &= [e_\beta \oplus 0, e_\alpha \oplus 0]_{\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}} = C_{\beta\alpha}^\gamma e_\gamma \oplus 0 \\ [\bar{e}_\beta, \bar{e}_a]_{\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}} &= \bar{C}_{\beta a}^\gamma \bar{e}_\gamma + \bar{C}_{\beta a}^j \bar{e}_j \\ &= [e_\beta \oplus 0, 0 \oplus f_a]_{\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}} = -L_{a\beta}^\gamma e_\gamma \oplus (-R_{a\beta}^j f_j) \\ [\bar{e}_b, \bar{e}_a]_{\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}} &= \bar{C}_{ba}^\gamma \bar{e}_\gamma + \bar{C}_{ba}^j \bar{e}_j \\ &= [0 \oplus f_b, 0 \oplus f_a]_{\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}} = \Phi_{ba}^\gamma e_\gamma \oplus D_{ba}^j f_j. \end{aligned} \tag{67}$$

Yani, bükülmüş eşçevrim genişlemesiyle elde edilen eşlenmiş Lie cebirinin yapı sabitleri şu şekilde olur:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\beta\alpha}^\gamma &= C_{\beta\alpha}^\gamma, & \bar{C}_{\beta\alpha}^a &= 0, & \bar{C}_{\beta a}^\gamma &= -L_{a\beta}^\gamma \\ \bar{C}_{\beta a}^j &= -R_{a\beta}^j, & \bar{C}_{ba}^\gamma &= \Phi_{ba}^\gamma, & \bar{C}_{ba}^j &= D_{ba}^j. \end{aligned} \tag{68}$$

Eğer özel durum (63)'te verildiği şekilde sağ etki aşikar alınırsa, $R_{a\beta}^d$ sayılarının hepsi hem çerçeve işlemleri (67)'de hem de yapı sabitleri (68)'de sıfır olarak hesap edilecektir.

3.2. Lie-Poisson Sistemlerin Bükülmüş Eşçevrim Genişlemesi

$\eta, \eta' \in \mathfrak{h}$, $\nu \in \mathfrak{h}^*$ ve $\mu \in \mathfrak{g}^*$ olmak üzere, ilk olarak aşağıdaki fonksiyonu tanımlayalım:

$$\kappa_\eta: \mathfrak{h} \rightarrow \mathfrak{h} \quad \kappa_\eta(\eta') := \kappa(\eta, \eta') \tag{69}$$

Bu lineer dönüşümün (eksi) dualini

$$\kappa_\eta^*: \mathfrak{h}^* \rightarrow \mathfrak{h}^* \quad \langle \kappa_\eta^* \nu, \eta' \rangle = \langle \nu, -\kappa_\eta(\eta') \rangle = -\langle \mu, \kappa(\eta, \eta') \rangle \tag{70}$$

olarak yazarız. Benzer şekilde tanımlayacağımız

$$\Phi_\eta: \mathfrak{h} \rightarrow \mathfrak{g} \quad \Phi_\eta(\eta') := \Phi(\eta, \eta') \tag{71}$$

dönüşümünün dualini ise

$$\begin{aligned} \Phi_\eta^*: \mathfrak{g}^* \rightarrow \mathfrak{h}^* \quad \langle \Phi_\eta^* \mu, \eta' \rangle &= \langle \mu, -\Phi_\eta(\eta') \rangle \\ &= -\langle \mu, \Phi(\eta, \eta') \rangle \end{aligned} \tag{72}$$

olarak yazarız.

Önceki bölümdeki lineer dönüşümler ve yeni tanımladığımız (70) ve (72) dönüşümleri kullanılarak bükülmüş eşçevrim genişlemesiyle elde edilen eşlenmiş çerçeve

$$\begin{aligned} \langle \mathcal{H}, \mathcal{F} \rangle_{\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}}(\mu \oplus \nu) &= \left\langle \mu, \left[\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right] \right\rangle + \left\langle \nu, \kappa \left(\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \right) \right\rangle \\ &+ \left\langle \mu, \Phi \left(\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \right) \right\rangle \\ &\text{A: Bükülmüş eşçevrimden gelen terim} \\ &+ \left\langle \mu, \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu} \triangleright \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right\rangle - \left\langle \mu, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \triangleright \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu} \right\rangle \\ &\text{B: } \mathfrak{h}'\text{nin } \mathfrak{g} \text{ üzerindeki sol etkisinden gelen terim} \\ &+ \left\langle \nu, \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu} \triangleleft \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right\rangle - \left\langle \nu, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \triangleleft \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu} \right\rangle \\ &\text{C: } \mathfrak{g}'\text{nin } \mathfrak{h} \text{ üzerindeki sağ etkisinden gelen terim} \end{aligned} \tag{73}$$

olarak hesaplanır. Bu tanımın geçerli olabilmesi için, \mathfrak{g} ve \mathfrak{h} uzaylarının sırasıyla \mathfrak{g}^{**} ve \mathfrak{h}^{**} uzaylarını içermeleri gerekmektedir. $\mathcal{H} = \mathcal{H}(\mu, \nu)$ Hamilton fonksiyonuyla üretilmiş eşlenmiş Lie-Poisson hareket denklemleri ise

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{dt} &= \underbrace{ad_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu}}^*(\mu)}_{\mathfrak{g}'\text{de Lie-Pois.denk.}} - \underbrace{\mu \triangleleft \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}_{\mathfrak{h}'\text{nin etkisi}} - \underbrace{a_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}^* \nu}_{\mathfrak{g}'\text{nin etkisi}} \\ \frac{d\nu}{dt} &= \underbrace{\kappa_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}^*(\nu)}_{\text{bük.eşçevrim geniş.}} + \underbrace{\Phi_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}^*(\mu)}_{\mathfrak{g}'\text{nin etkisi}} + \underbrace{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu} \triangleright \nu}_{\mathfrak{g}'\text{nin etkisi}} + \underbrace{b_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu}}^* \mu}_{\mathfrak{h}'\text{nin etkisi}} \end{aligned} \tag{74}$$

olarak yazılır.

Özel olarak g 'nin \mathfrak{h} 'ye sağ etkisini aşikar kabul edelim. Bu durumda $g \times \mathfrak{h}$ uzayının duali üzerinde sol yarı direkt çarpım olacak şekilde denklem (73)'te verilen çerçevede C ile kodlanmış terimler sıfır gelecektir ve çerçeve

$$\begin{aligned} \{\mathcal{H}, \mathcal{F}\}_{\times_{\Phi}}(\mu \oplus \nu) &= \left\langle \mu, \left[\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right] \right\rangle + \left\langle \nu, \kappa \left(\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \right) \right\rangle \\ &+ \underbrace{\left\langle \mu, \Phi \left(\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \right) \right\rangle}_{\text{A: Bükülmüş eşçevrimden gelen terim}} \\ &+ \underbrace{\left\langle \mu, \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu} \triangleright \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \mu} \right\rangle - \left\langle \mu, \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta \nu} \triangleright \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu} \right\rangle}_{\text{B: } \mathfrak{h}'\text{nin } g \text{ üzerindeki sol etkisinden gelen terim}} \end{aligned} \quad (75)$$

şeklinde indirgenecektir. Bu özel durumda eşlenmiş hareket denklemleri (74)'te sağ etkiden gelen terimler düşecek ve

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{dt} &= \underbrace{ad_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu}}^*(\mu)}_{g^* \text{ de Lie-Pois.denk.}} - \underbrace{\mu \triangleleft \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}_{\mathfrak{h}'\text{nin etkisi}} \\ \frac{d\nu}{dt} &= \underbrace{\kappa_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}^*(\nu)}_{\text{bük.eşçevrim geniş.}} + \underbrace{\Phi_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \nu}}^*(\mu)}_{\mathfrak{h}'\text{nin etkisi}} + \underbrace{\mathfrak{b}_{\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \mu}}^* \mu}_{\mathfrak{h}'\text{nin etkisi}} \end{aligned} \quad (76)$$

olarak elde edilecektir.

Sonlu Boyut - Koordinatlar. Eşlenmiş Lie-Poisson çerçevesinin koordinatlardaki yazımını şu şekilde buluruz:

$$\begin{aligned} \{\mathcal{H}, \mathcal{F}\}_{\times_{\Phi}}(\mu \oplus \nu) &= \mu_{\alpha} C_{\beta\gamma}^{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\beta}} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mu_{\gamma}} + \nu_{\alpha} D_{be}^{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \nu_e} \\ &+ \mu_{\alpha} \Phi_{be}^{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \nu_e} + \mu_{\alpha} L_{\alpha\beta}^{\alpha} \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_{\alpha}} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mu_{\beta}} - \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \nu_{\alpha}} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\beta}} \right) \\ &+ \nu_{\alpha} R_{b\beta}^{\alpha} \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mu_{\beta}} - \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \nu_b} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\beta}} \right). \end{aligned} \quad (77)$$

Eşlenmiş Lie-Poisson çerçevesi operasyonunu koordinatlara uyguladığımızda ise aşağıdaki sonuçları elde ederiz:

$$\begin{aligned} \{\mu_{\theta}, \mu_{\rho}\} &= \mu_{\alpha} C_{\theta\rho}^{\alpha}, \quad \{\mu_{\theta}, \nu_b\} = -\mu_{\alpha} L_{b\theta}^{\alpha} - \nu_{\alpha} R_{b\theta}^{\alpha}, \\ \{\nu_b, \nu_e\} &= \mu_{\alpha} \Phi_{be}^{\alpha} + \nu_{\alpha} D_{be}^{\alpha}. \end{aligned} \quad (78)$$

eşlenmiş Lie-Poisson hareket denklemlerinin koordinatlardaki yazımı ise

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_{\beta}}{dt} &= \mu_{\rho} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\alpha}} C_{\beta\alpha}^{\rho} - \mu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_{\alpha}} L_{\alpha\beta}^{\alpha} - \nu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} R_{b\beta}^{\alpha} \\ \frac{d\nu_e}{dt} &= \mu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} \Phi_{eb}^{\alpha} + \nu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} D_{eb}^{\alpha} + \nu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\alpha}} R_{e\alpha}^{\alpha} + \mu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\beta}} L_{e\beta}^{\alpha}. \end{aligned} \quad (79)$$

Özel durumumuz olan sağ etkinin aşikar alındığı zaman Poisson çerçevesi (75) sonlu boyutta şu şekilde yazılır:

$$\begin{aligned} \{\mu_{\theta}, \mu_{\rho}\} &= \mu_{\alpha} C_{\theta\rho}^{\alpha}, \quad \{\mu_{\theta}, \nu_a\} = -\mu_{\alpha} L_{a\theta}^{\alpha}, \\ \{\nu_a, \nu_e\} &= \mu_{\alpha} \Phi_{ae}^{\alpha} + \nu_{\alpha} D_{ae}^{\alpha}. \end{aligned} \quad (80)$$

ve hareket denklemleri (79) ise

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_{\beta}}{dt} &= \mu_{\rho} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\alpha}} C_{\beta\alpha}^{\rho} - \mu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_a} L_{\alpha\beta}^{\alpha} \\ \frac{d\nu_e}{dt} &= \mu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} \Phi_{eb}^{\alpha} + \nu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_b} D_{eb}^{\alpha} + \mu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\beta}} L_{e\beta}^{\alpha} \end{aligned} \quad (81)$$

şeklinde olur.

Daha özel bir durum olarak, Lie çerçevesinin g ve \mathfrak{h} üzerinde aşikar olduğunu, yani tüm $C_{\beta\alpha}^{\rho}$ ve D_{eb}^{α} yapı sabitlerini 0 kabul edelim. Bu durumda (79)'daki denklemler

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_{\beta}}{dt} &= -\mu_{\alpha} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_a} L_{\alpha\beta}^{\alpha} \\ \frac{d\nu_a}{dt} &= \mu_{\alpha} \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \nu_c} \Phi_{ac}^{\alpha} + \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mu_{\beta}} L_{a\beta}^{\alpha} \right) \end{aligned} \quad (82)$$

olarak yazılır.

IV. KOMPARTMAN MODELLERİNİN ANALİZLERİ

4.1. SIR Modeli

SIR (1) modelinin Hamilton analizi giriş bölümünde sunulmuş, Poisson çerçevesi (6)'da gösterilmişti. Şimdi bu çerçeve tanımının, eşlenmiş Lie-Poisson çerçevesi (43)'ün özel bir durumu olan ve sağ etkinin aşikar alındığı, sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson çerçevesi (45) olduğunu göstereceğiz. Bu durumda da sonuç olarak SIR (1) denklemlerinin, eşlenmiş Lie-Poisson denklemlerinin (44) özel bir durumu olarak sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson denklemleri (46) olduğunu elde etmiş olacağız. Bu geometriyi görünür kılmak için öncelikle Lie cebiri yapısı ile başlayalım.

Bu bölümde g Lie cebiri 2 boyutlu olsun ve $\{e_1, e_2\}$ baz takımı ile donanmış olsun. \mathfrak{h} Lie cebiri ise 1 boyutlu olsun ve baz olarak $\{f = f_1\}$ seçilmiş olsun. Bu iki Lie cebiri için de aşikar Lie cebiri yapısına sahip olduklarını kabul edelim. Bu durumda denklem (30)'da tanımladığımız altcebirler için tüm yapı sabitleri 0 olacaktır. Eğer etkiler düşünülmede toplam cebir üzerinde de yapı sabitleri sıfır olacaktır. Ama burada iki cebir etki tepki ilişkisi içinde kabul edeceğiz. Etkilerden gelen yapı sabitlerini tanımlamadan önce dual uzayları belirleyelim. g^* için $\{e^1, e^2\}$ dual bazını alalım ve her $\mu \in g^*$ için $\mu = Se^1 + Ie^2$ olacak şekilde, \mathfrak{h}^* için $\{f^1\}$ dual bazını aldığımızda her $\nu \in \mathfrak{h}^*$ için $\nu = Rf^1$ olacak şekilde koordinatları belirleyelim. Dolayısıyla, $g^* \oplus \mathfrak{h}^*$ uzay üzerinde koordinatlar $\{S, I, R\}$ şeklindedir.

Sağ etki aşikar olsun ve \mathfrak{h} 'nin g 'ye sol etkisi ise

$$f_1 \triangleright e_1 = rIe_1, \quad f_1 \triangleright e_2 = -rIe_1 + ae_2 \quad (83)$$

olarak belirlenirse sol etki sabitleri

$$L_{11}^1 = rI, \quad L_{11}^2 = 0, \quad L_{12}^1 = -rI, \quad L_{12}^2 = a \quad (84)$$

olarak yazılır. Burada a ve r reel sabitlerdir. Sol etki sabitlerini sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson çerçevesi (45) içine yerleştirdiğimizde direkt bir hesap sonucu SIR (1) modeli için tanımlanan çerçeveye (6) ulaşmış oluruz. Ayrıca, Hamilton fonksiyonunu $\mathcal{H}(S, I, R) = S + I + R$ ve sol etki sabitlerini (84) (55)'te yerine koyduğumuzda SIR (1) denklemlerine ulaşırız.

4.2. SEIR Modeli

SEIR (2) modeli için Poisson çerçevesi (8)'da verilmişti. SIR modelinde yaptığımız geometrizasyon SEIR modeli için de geçerli olacak. SEIR modeli için tanımlanan Poisson çerçevesinin, sağ etkinin aşikar alındığı, sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson çerçevesi (45) olduğunu ve sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson denklemlerinin (46) SEIR modelini verdiğini göstereceğiz.

Aşikar Lie cebiri \mathfrak{h} bir boyutlu olmaya devam etsin ve fakat aşikar Lie cebiri \mathfrak{g} bu durum için 3 boyutlu olsun ve $\{e_1, e_2, e_3\}$ bazı ile donatılsın. \mathfrak{g}^* için $\{e^1, e^2, e^3\}$ dual bazını aldığımızda her $\mu \in \mathfrak{g}^*$ için $\mu = Se^1 + Ee^2 + Ie^3$ koordinatları tanımlı olsun. Benzer şekilde, \mathfrak{h}^* için $\{f^1\}$ dual bazını aldığımızda her $\nu \in \mathfrak{h}^*$ için $\nu = Rf^1$ alalım. \mathfrak{h} 'nin \mathfrak{g} 'ye sol etkisi bazlar cinsinden

$$\begin{aligned} f_1 \triangleright e_1 &= rIe_1, & f_1 \triangleright e_2 &= -rIe_1 + \epsilon e_2, \\ f_1 \triangleright e_3 &= -\epsilon e_2 + ae_3 \end{aligned} \quad (85)$$

olarak belirlenirse sıfırdan farklı olan sol etki sabitleri

$$\begin{aligned} L_{11}^1 &= rI, & L_{12}^1 &= -rI, & L_{12}^2 &= \epsilon, \\ L_{13}^2 &= -\epsilon, & L_{13}^3 &= a \end{aligned} \quad (86)$$

olarak elde edilir. Burada a , r ve ϵ reel sabitlerdir. Sol etki sabitlerini, Lie-Poisson çerçevesi (45) içine yerleştirdiğimizde SEIR (2) modeli için tanımlanan çerçeveye (8) ulaşmış oluruz. Ayrıca, Hamilton fonksiyonunu $\mathcal{H}(S, I, R) = S + E + I + R$ göz önüne aldığımızda ve sol etki sabitleri (86)'yı (55) içine yerleştirdiğimizde SEIR (1) denklemlerine ulaşırız.

4.3. 2-SIR Modelinin Eşlenmiş Yapısı

2-SIR (3) modelinin Poisson çerçevesi (10)'da verilmişti. Şimdi bu çerçeve tanımının, sağ etkinin aşikar alındığı, bükülmüş eşçevrim genişlemesiyle elde edilen sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson çerçevesi (75) olduğunu göstereceğiz. Bu durumda da sonuç olarak 2-SIR (3) denklemlerinin sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson denklemleri (82) olduğunu elde etmiş olacağız. Bunun için öncelikle Lie cebiri yapısı ile başlayalım.

\mathfrak{g} Lie cebiri 4 boyutlu olsun ve $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ baz takımı ile donanmış olsun. \mathfrak{h} ise bir Lie altcebbiri olmasın, 2 boyutlu bir altuzay olsun ve baz olarak $\{f_1, f_2\}$ seçilmiş olsun. $[\bullet, \bullet]$ $\mathfrak{g} \oplus \mathfrak{h}$ üzerinde bir Lie çerçevesi ise, her $\xi, \xi' \in \mathfrak{g}$ için $[\xi, \xi'] = 0$ ve her $\eta, \eta' \in \mathfrak{h}$ için $proj_{\mathfrak{h}}[\eta, \eta'] = 0$ kabul edelim. Bu durumda denklem (66)'da tanımladığımız tüm yapı sabitleri 0 olacak, yalnızca bükülmüş eşçevrim sabitleri sıfırdan

farklı olabilecektir. Burada \mathfrak{g} ve \mathfrak{h} 'yi etki tepki ilişkisi içinde kabul edeceğiz.

4.1 ve 4.2 altbölümlerinde olduğu gibi, koordinatları belirleyebilmek için dual uzaylardan bahsetmemiz gerekir. \mathfrak{g}^* için $\{e^1, e^2, e^3, e^4\}$ dual bazını alalım ve $\mu \in \mathfrak{g}^*$ için $\mu = S_1e^1 + S_2e^2 + I_1e^3 + I_2e^4$ olacak şekilde, \mathfrak{h}^* için $\{f^1, f^2\}$ dual bazını aldığımızda ise her $\nu \in \mathfrak{h}^*$ için $\nu = R_1f^1 + R_2f^2$ olacak şekilde koordinatları belirleyelim. Dolayısıyla, $\mathfrak{g}^* \oplus \mathfrak{h}^*$ uzayı üzerinde koordinatlar $\{S_1, S_2, I_1, I_2, R_1, R_2\}$ şeklindedir.

Sağ etki aşikar olsun ve \mathfrak{h} 'nin \mathfrak{g} 'ye sol etkisi ise

$$\begin{aligned} f_1 \triangleright e_2 &= r_2I_2e_2, & f_1 \triangleright e_3 &= -r_1I_1e_1 + a_1e_3, \\ f_2 \triangleright e_1 &= r_1I_1e_1, & f_2 \triangleright e_4 &= -r_2I_2e_2 + a_2e_4 \end{aligned} \quad (87)$$

ve kalanı 0 olarak belirlenirse sıfırdan farklı olan sol etki sabitleri

$$\begin{aligned} L_{12}^2 &= r_2I_2, & L_{13}^1 &= -r_1I_1, & L_{13}^3 &= a_1, \\ L_{21}^1 &= r_1I_1, & L_{24}^2 &= -r_2I_2, & L_{24}^4 &= a_2 \end{aligned} \quad (88)$$

olarak yazılır. Burada a_1, a_2 ve r_1, r_2 reel sabitlerdir. Ayrıca, bükülmüş eşçevrim dönüşümü

$$\Phi(f_1, f_2) = r_1I_1e_1 - r_2I_2e_2 \quad (89)$$

olsun. Bükülmüş eşçevrimin sıfırdan farklı olan sabitleri

$$\Phi_{12}^1 = -\Phi_{21}^1 = r_1I_1, \quad \Phi_{12}^2 = -\Phi_{21}^2 = -r_2I_2 \quad (90)$$

şeklinde buluruz. (88) ve (90)'da verilen sabitleri, bükülmüş eşçevrim genişlemesiyle elde edilen sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson çerçevesi (75)'te yerine koyduğumuzda 2-SIR (3) modeli için tanımlanan çerçeveye (10) ulaşmış oluruz. Ayrıca, Hamilton fonksiyonunu $\mathcal{H}(S_1, S_2, I_1, I_2, R_1, R_2) = S_1 + S_2 + I_1 + I_2 + R_1 + R_2$ ve (88)'deki sabitleri (55)'te yerine koyduğumuzda 2-SIR (1) denklemlerine ulaşırız.

4.4. 2-SEIR Modelinin Eşlenmiş Yapısı

2-SEIR (3) modelinin Poisson çerçevesi (10)'da verilmişti. Bu çerçeve tanımının, sağ etkinin aşikar alındığı, bükülmüş eşçevrim genişlemesiyle elde edilen sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson çerçevesi (75) olduğunu göstereceğiz. Bu durumda da sonuç olarak 2-SEIR (4) denklemlerinin sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson denklemleri (82) olduğunu elde etmiş olacağız.

\mathfrak{h} vektör altuzayı ve ona ait baz, 4.3 altbölümünde olduğu gibi olsun. \mathfrak{g} Lie cebiri ise 6 boyutlu ve $\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$ baz takımı ile donanmış, ayrıca aşikar Lie cebiri yapısına sahip olsun. Burada da \mathfrak{g} ve \mathfrak{h} 'yi etki tepki ilişkisi içinde kabul edeceğiz. Dual uzayların bazlarını da bir önceki bölüme benzer şekilde yazalım. \mathfrak{g}^* için $\{e^1, e^2, e^3, e^4, e^5, e^6\}$ dual bazını alalım ve $\mu \in \mathfrak{g}^*$ için $\mu = S_1e^1 + S_2e^2 + E_1e^3 + E_2e^4 + I_1e^5 + I_2e^6$ olacak şekilde, \mathfrak{h}^* için $\{f^1, f^2\}$

dual bazını aldığımızda her $v \in \mathfrak{h}^*$ için $v = R_1 f^1 + R_1 f^2$ olacak şekilde koordinatları belirleyelim. Dolayısıyla, $\mathfrak{g}^* \oplus \mathfrak{h}^*$ uzay üzerinde koordinatlar $\{S_1, S_2, E_1, E_2, I_1, I_2, R_1, R_2\}$ şeklindedir.

Sağ etki aşikar olsun ve \mathfrak{h} 'nin \mathfrak{g} 'ye sol etkisi ise

$$\begin{aligned} f_1 \triangleright e_1 &= r_1 I_1 e_1, & f_1 \triangleright e_2 &= r_2 I_2 e_2, \\ f_1 \triangleright e_3 &= \epsilon_1 e_3, & f_1 \triangleright e_4 &= -r_2 I_2 e_2, \\ f_1 \triangleright e_5 &= -\epsilon_1 e_3 + a_1 e_5, & f_1 \triangleright e_6 &= -\epsilon_2 e_4, \\ f_2 \triangleright e_3 &= -r_1 I_1 e_1, & f_2 \triangleright e_4 &= \epsilon_2 e_4, \\ f_2 \triangleright e_6 &= a_2 e_6 \end{aligned} \tag{91}$$

olarak belirlenirse sıfırdan farklı olan sol etki sabitleri

$$\begin{aligned} L_{11}^1 &= r_1 I_1, & L_{12}^2 &= r_2 I_2, & L_{13}^3 &= \epsilon_1 \\ L_{14}^2 &= -r_2 I_2, & L_{15}^3 &= -\epsilon_1, & L_{15}^5 &= a_1, \\ L_{16}^4 &= -\epsilon_2, & L_{23}^1 &= -r_1 I_1, & L_{24}^4 &= \epsilon_2, \\ L_{26}^6 &= a_2 \end{aligned} \tag{92}$$

olarak yazılır. Burada $a_1, a_2, \epsilon_1, \epsilon_2$ ve r_1, r_2 reel sabitlerdir. Ayrıca, bükülmüş eşçevrim dönüşümü

$$\Phi(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) = -r_1 I_1 \mathbf{e}_1 + \epsilon_2 \mathbf{e}_4 \tag{93}$$

olsun. Bu durumda bükülmüş eşçevrimin sıfırdan farklı olan sabitleri şu şekildedir:

$$\Phi_{12}^1 = -\Phi_{21}^1 = -r_1 I_1, \quad \Phi_{12}^4 = -\Phi_{21}^4 = \epsilon_2. \tag{94}$$

(92) ve (94)'te verilen sabitleri sol yarı direkt çarpım Lie-Poisson çerçevesi (75)'te yerine koyduğumuzda 2-SEIR (4) modeli için tanımlanan çerçeveye (13) ulaşılmış oluruz. Ayrıca, Hamilton fonksiyonunu $\mathcal{H}(S_1, S_2, E_1, E_2, I_1, I_2, R_1, R_2) = S_1 + S_2 + E_1 + E_2 + I_1 + I_2 + R_1 + R_2$ ve (92)'deki sabitleri (82)'de yerine koyduğumuzda 2-SEIR (4) denklemlerine ulaşırız.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK'ın 117F426 numaralı "Eşlenmiş Lagrange ve Hamilton Sistemleri" isimli projesinin bir parçasıdır. Desteği için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] Abbey, H. (1952). An examination of the Reed-Frost theory of epidemics. *Human biology*, 24(3), 201.
 [2] Abou-Ismael, A. (2020). Compartmental Models of the COVID-19 Pandemic for Physicians and Physician-Scientists. *Sn Comprehensive Clinical Medicine*, 1.
 [3] Abraham, R., Marsden, J. E., & Marsden, J. E. (1978). *Foundations of mechanics* (Vol. 36). Reading, Massachusetts: Benjamin/Cummings Publishing Company.
 [4] Agore, A. L., & Militaru, G. (2014). Extending structures for Lie algebras. *Monatshefte für Mathematik*, 174(2), 169-193.
 [5] Agore, A., & Militaru, G. (2019). *Extending Structures: Fundamentals and Applications*. CRC

Press.

[6] Anderson, R. M. (2013). *The population dynamics of infectious diseases: theory and applications*. Springer.
 [7] Arnold, V. I. (2013). *Mathematical methods of classical mechanics* (Vol. 60). Springer Science & Business Media.
 [8] Ay, A., Gürses, M., & Zheltukhin, K. (2003). Hamiltonian equations in R 3. *Journal of mathematical physics*, 44(12), 5688-5705.
 [9] Ballesteros, A., Blasco, A., & Gutierrez-Sagredo, I. (2020). Hamiltonian structure of compartmental epidemiological models. *arXiv preprint arXiv:2006.00564*.
 [10] Brauer, F., Castillo-Chavez, C., & Castillo-Chavez, C. (2012). *Mathematical models in population biology and epidemiology* (Vol. 2, p. 508). New York: Springer.
 [11] Esen, O., Grmela, M., Gümrall, H., & Pavelka, M. (2019). Lifts of symmetric tensors: fluids, plasma, and grad hierarchy. *Entropy*, 21(9), 907.
 [12] Esen, O., Pavelka, M., & Grmela, M. (2017). Hamiltonian coupling of electromagnetic field and matter. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 9(1), 3-20.
 [13] Esen, O., & Sütlü, S. (2016). Hamiltonian dynamics on matched pairs. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 13(10), 1650128.
 [14] Esen, O., & Sütlü, S. (2020). Matched pair analysis of the Vlasov plasma. *arXiv preprint arXiv:2004.12595*.
 [15] Hethcote, H. W. (2000). The mathematics of infectious diseases. *SIAM review*, 42(4), 599-653.
 [16] Bäuerle, G. G., Kerf, E. A., & ten Kroode, A. P. E. (1997). *Finite and infinite dimensional Lie algebras and applications in physics* (Vol. 2). Elsevier.
 [17] Kermack, W. O., & McKendrick, A. G. (1927). A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the royal society of london. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character*, 115(772), 700-721.
 [18] Majid, S. (1990). Matched pairs of Lie groups associated to solutions of the Yang-Baxter equations. *Pacific Journal of Mathematics*, 141(2), 311-332.
 [19] Marsden, J. E., Misiołek, G., Perlmutter, M., & Ratiu, T. S. (1998). Symplectic reduction for semidirect products and central extensions. *Differential Geometry and its Applications*, 9(1-2), 173-212.
 [20] Marsden, J. E., & Ratiu, T. S. (2013). *Introduction to mechanics and symmetry: a basic exposition of classical mechanical systems* (Vol. 17). Springer Science & Business Media.
 [21] Marsden, J. E., Ratiu, T. S., & Weinstein, A. (1984). Reduction and Hamiltonian structures on duals of semidirect product Lie algebras. *Cont. Math. AMS*, 28, 55-100.

-
- [22] Murray, J. D. (2007). *Mathematical biology: I. An introduction* (Vol. 17). Springer Science & Business Media.
- [23] Nakamura, G. M., & Martinez, A. S. (2019). Hamiltonian dynamics of the SIS epidemic model with stochastic fluctuations. *Scientific reports*, 9(1), 1-9.
- [24] Nutku, Y. (1990). Bi-Hamiltonian structure of the Kermack-McKendrick model for epidemics. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 23(21), L1145.
- [25] Oliveira, G. (2020). Refined compartmental models, asymptomatic carriers and COVID-19. *arXiv preprint arXiv:2004.14780*.
- [26] Olver, P. J. (2000). *Applications of Lie groups to differential equations* (Vol. 107). Springer Science & Business Media.
- [27] Schottenloher, M. (2008). *A mathematical introduction to conformal field theory* (Vol. 759). Springer.
- [28] Şuhubi, E. S. (2008). *Dış form analizi*. Türkiye Bilimler Akademisi.
- [29] Vaisman, I. (2012). *Lectures on the geometry of Poisson manifolds* (Vol. 118). Birkhäuser.
- [30] Weinstein, A. (1983). The local structure of Poisson manifolds. *Journal of differenti*

Representation of the Diurnal Distribution of Organic Aerosol by Multidimensional Liquid Chromatography Systems

Organik Aerosolün Çok Boyutlu Sıvı Kromatografi Sistemleri ile Günlük Dağılımının Gösterimi

Elif MERTOĞLU¹ , Rosa M. FLORES¹ 

¹ Marmara University, Environmental Engineering Department, 34722, Istanbul, Turkey

Abstract

Aerosols have various effects on human health, climate, and ecosystems. Aerosols also have an important role in climate change by altering the radiation balance and lifetime and properties of clouds. Organic aerosol (OA) is composed of a mixture of hundreds to thousands of organic compounds that varies geographically, diurnally, and seasonally according to several factors, such as type and concentration of precursor, type and concentration of oxidants, temperature, relative humidity, among others. The type and number of functional groups composing individual organic species influence their interaction with water vapor and sunlight, therefore affecting both the water cycle and radiation balance. Great efforts have been made to develop analytical techniques that allow the identification and quantification of individual species composing this complex mixture of organic matter and decrease the uncertainty of models to accurately predict OA formation and evolution. In this study, it was found that most of the column combinations were not adequate and the best system was provided by methanol: water (1:1). The combination of columns that provided the best separation of the standard compounds was provided by Cyclohexyl and Methyl as primary and secondary columns. However, when this combination of columns was used to represent the evolution of ambient air organic aerosols, significant co-elution was observed. The positive outcome of this study will be helpful to evaluate 2D-LC as a potential technique for more accurate determination of organic aerosol components and to understand organic aerosol formation and transformation pathways that can be used in secondary organic aerosol production models.

Keywords: multidimensional liquid chromatography, 2D-LC, organic aerosol, high-time resolved samples.

Öz

Aerosollerin; insan sağlığı, iklim ve ekosistemler üzerindeki çeşitli etkileri vardır. Ayrıca, aerosoller radyasyon dengesini ve bulutların ömür ve özelliklerini değiştirerek iklim değişikliğinde de önemli rol oynamaktadır. Organik aerosoller (OA), yüzlerce ve binlerce değişik bileşikten oluşurlar ve bu bileşikler coğrafik, gün ve mevsime göre oksidan konsantrasyonu ve türü, sıcaklık, bağıl nem gibi bir dizi faktöre bağlı olarak değişiklik gösterirler. Özgün organik türleri oluşturan fonksiyonel grupların sayısı ve tipi, aerosollerin su buharı ve güneş ışığı ile olan etkileşimini belirler ve bu nedenle su çevrimi ve radyasyon dengesini etkiler. Karmaşık bir karışım olan bu organik maddenin hangi türlerden oluştuğu ve bunların miktarının belirlenmesi ile OA üretimi ve gelişimini tahmin eden modellerdeki belirsizliğin azaltılması konularında büyük çabalar harcanmıştır. Bu çalışmada, kolon kombinasyonlarının çoğunun yeterli olmadığı ve en iyi sistemin metanol: su (1:1) ile sağlandığı bulundu. Standart bileşiklerin en iyi ayrışmasını sağlayan sütunların kombinasyonu, birincil ve ikincil sütunlar olarak Sikloheksil ve Metil ile sağlandı. Bununla birlikte, bu sütun kombinasyonu, ortam havası organik aerosollerinin gelişimini temsil etmek için kullanıldığında, bileşiklerin kolonlarda istenilen düzeyde ayrışmadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın çıktıları, 2D-LC yönteminin organik aerosol bileşenlerin daha doğru tespiti için potansiyel bir teknik olarak değerlendirilmesine ve ikincil organik aerosol üretim modellerinde kullanılan organik aerosol oluşumu ve dönüşüm yollarını anlamaya yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: çok boyutlu sıvı kromatografi, 2D-LC, organik aerosol, sık aralıklı toplanmış örnekler.

I. INTRODUCTION

Atmospheric aerosols exist in both liquid and gas phases and have numerous properties that define their impact on health, ecosystems, and climate change. Atmospheric aerosols are commonly referred as particulate matter (PM), which is classified according to the particle's aerodynamic diameter (D_p) into PM₁₀ ($D_p < 10 \mu m$), PM_{2.5} ($D_p < 2.5 \mu m$), and PM₁ ($D_p < 1 \mu m$). Fine particles (PM_{2.5}) and ultrafine particles (PM₁) have recently received the most attention within the scientific community due to their large atmospheric lifetimes and deeper penetration into the respiratory system[1]. It has been reported that PM is typically present in concentrations that vary between 1.000 - 100.000 cm^{-3} and $\sim 100 \mu g m^{-3}$ in continental atmospheres. Some of the effects that PM have on human health, ecosystems, and climate include aggravated respiratory illnesses, increased morbidity and mortality, atmospheric visibility reduction, acid dry and wet deposition, and alteration in the atmospheric energy budget and water cycle[2].

Secondary organic aerosol (SOA) is the result of homogeneous nucleation of gaseous species or from the condensation of oxidized gaseous species on suspended particles. The parent hydrocarbon (HC) is a volatile organic compound (VOC) that can be oxidized in the atmosphere to produce semi-volatile organic compounds (SVOCs). SVOCs can be further oxidized to form compounds with lower volatility[3]. Oxidation at constant carbon number (nc) represents the addition of oxygen molecules into the parent hydrocarbon (HC), also known as functionalization. Reverse functionalization can be also observed in which the parent hydrocarbon loses one molecule of carbonyl or hydroxyl groups. Fragmentation reactions decrease the number of carbons followed by the addition of one or more functional groups at the site of the bond breakage. These reactions will rapidly affect the volatility of the product that will be highly oxidized. Oligomerization reactions occur when two molecules combine to form a larger molecule (i.e., polymer, P) with very low volatility[4]. Multidimensional liquid chromatography, similarly to multidimensional gas chromatography, provides enhanced resolving power by separating organic aerosol components through two columns with different separation capabilities. The main mechanism that controls the flow between the two columns is normally a multiport high-pressure switching valve with two available modes. The present work has two objectives which involve the use of a theoretical model to evaluate the use of 2D-LC to resolve complex mixtures of organic aerosol and as means to represent diurnal variation of organic aerosol components:

Objective 1. Model the optimal separation of organic matter components in a multidimensional liquid chromatography system.

Objective 2. Represent the evolution of organic aerosol components in multidimensional liquid chromatography diagrams.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Construct Structure of SOA Precursors and Products

The structures of approximately 200 biogenic and anthropogenic organic aerosol components that have been identified in chamber experiments and ambient samples were constructed with the chemistry software Chemdraw Professional v. 15.0.0.106. The SMILES notation for each structure was also predicted with Chemdraw Professional. A database with name, structure, and SMILES notation was created.

2.2. Predict the Solvation Properties of SOA Precursors and SOA Products

Solvation parameters for target analytes have been predicted based on their structure with Adme boxes Absolv algorithm (ACD Labs, Toronto, Canada). A database that includes structure and these predicted solvation parameters have been created. The input to the model can be SMILES notation, CAS number, a structure can be drawn with the drawing tool provided,

and a library is also available. In this study, the SMILES notation has been predicted and used as input to this model.

2.3. Model of Multidimensional Liquid Chromatography Separation

A computer program was created using Matlab (Mathworks Inc. USA). The program includes the theory of separation in liquid chromatography based on interactions between the organic aerosol species and liquid chromatography stationary phases. The computer algorithm was based on the Abraham solvation parameter model.

The solvation parameter model used for the distribution of solutes between two condensed phases is described as follows:

$$\log K_i = c + vV + eE + sS + aA + bB \quad (1)$$

Where K_i is the distribution constant or retention factor between two condensed phases. Lower case letters (v, e, s, a, and b) are constants that determine properties of the chromatographic column, also typically referred as system constants. Upper case letters (V, E, S, A, and B) are solute solvation parameters of target analytes in section 2.1. Both lower and upper case v, e, s, a, and b constants were determined based on molecular structures and represent intermolecular interactions. Where v and V depend on molecular size and represent cavity formation; e and E represent polarizability contributions from n- and π -electrons; s and S represent dipolarizability/polarizability, and a, A, b, and B represent hydrogen bond descriptors [5].

Solute solvation parameters were predicted with Adme Boxes Absolv module based on molecular structure. System constants have been widely reported in the literature at a single mobile phase or narrow range of compositions, including the most common mobile phases methanol-water (50:50) and acetonitrile-water (30:70) [6-13] as can be observed in Tables S1-S4 (supplementary material).

2.4. Predict the Separation of SOA Precursors and Products in 2D-LC Systems

Two-dimensional retention diagrams were created with combinations of liquid chromatography stationary phases based on molecular interactions specified in Eq. (1). An algebraic transformation of Eq. (1) was performed based on retention factor of solutes (K_i) in Eq (2) to calculate retention indices according to [14-16]

$$I_{Kovats} = 100N + 100 \times \frac{\log K_i - \log K_N}{\log K_{N+1} - \log K_N} \quad (2)$$

Where K_i is calculated relative to parent hydrocarbons eluting before (K_N) and after (K_{N+1}) solute i . N indicates the number of carbons of solute i .

2.5. Multidimensional Diagrams of Organic Aerosol Constituents Identified in High-Time Resolved Samples

The methods described in sections 2.1, 2.2, and 2.4 were repeated for a total of 187, 154, 150, and 149 organic compounds identified and quantified in 4 different high-time resolved ambient air samples. These newly proposed 2D-LC diagrams had advantages over Van Krevelen diagrams. Van Krevelen diagrams show the dispersion of organic aerosol components that represent ageing, oxidation, or evolution throughout the day according to environmental conditions such as type and concentration of SOA precursors, type and concentration of oxidant, ambient air temperature, relative humidity, and solar radiation. 2D-LC diagrams preserved identification of species and group them according to physicochemical properties that ultimately determined the impact of organic aerosols on the water cycle and radiation balance. These diagrams can be potentially used as means to decrease uncertainty in secondary organic production models.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Construct Structures of SOA Precursors and Products

A selected group of 186 SOA precursors and products identified in chamber studies and ambient samples was chosen and used to represent a complex mixture of compounds with various numbers and types of functional groups that may be present in ambient air samples. The structures of these compounds were drawn with Chemdraw Professional v. 15.0.0.106 to predict the SMILES notation that was used as input to the model in section 3.2. Figure 1 shows the structures of SOA precursors and products considered in this study. The functional groups that can be observed in organic aerosols are alcohols (-OH), ketones/carbonyls (-C=O), carboxylic acids (-COOH) and types of structures include cyclic, straight-chain alkanes, straight-chain alkenes, and aromatics. The compounds are organized in groups according to functional groups as follows: HC-hydrocarbons, A-hemiterpene, B-monoterpenes, cA-cycloalkane, cB- 2OH, keto cycloalkane, Cc-OH, C=O cycloalkane, cD- COOH cycloalkane, cE- COOH, C=O cycloalkane, cF - COOH cycloalkane, CG- O, OH cycloalkane, cH-COOH, C=O, OH cycloalkane, D-sesquiterpene, E-diaromatic, F- cyclic epoxide/ether, G-C=O, H- OH alkane, I- OH alkene, J- COOH, K- COOH alkene, L-COOH aromatic, M- COOH, C=O, N-2COOH, OH, O-2OH, COOH, P- OH, C=O alkane, Q- C=O aromatic, R-OH aromatic, S-OH, COOH aromatic, T-C=O, COOH aromatic, U-OH, C=O aromatic, V-

nitroaromatic, W- ONO₂, X- OH, ONO₂, Y- 2ONO, Z- OH, 2ONO₂.

3.2. Predict the Solvation Properties of SOA Precursors and SOA Products

The SMILES notations obtained from Chemdraw Professional were used to predict solvation parameters of SOA precursors and products shown in Figure 1. The solute solvation parameters V, S, A, E, B, and L were predicted according to section 2.2. According to the separation theory, the solute retention on a chromatographic system was determined by the overall interaction of five parameters between solutes and the characteristic system. In gas chromatography, the solutes do not have hydrogen bond interactions due to their non-polar characteristic. In addition, the mobile phase is inert and did not influence the retention of the solutes. Therefore, the only parameters that influence were solute size (L), dipolarizability/polarizability (S), and polarizability from n- and π - electrons (E). In Liquid chromatography, the system is more complicated due to the high polarity nature of the solutes A and B are considered, the stationary phases may have various chemistry, and the mobile phases can be mixtures of up to four different solvents with complex ranges of polarities.

The selected group of SOA precursors and products shows a wide range of compounds with various functional groups. This can be observed in the predicted solvation parameters. V is related to the size and shape of the molecule and is related to the cavity formation during the interactions with the stationary phase. As can be expected, the magnitude of V increases with carbon number. See for example the two homologous series of n-alkanes (group HC) and n-alcohols (group OH). The magnitude of V ranges 0.81-4.34 for n-alkanes C5-C30 and 0.31-4.39 for n-alcohols C1-C30. A and B are related to the ability to donate or receive hydrogen bonds, therefore as has been mentioned, the values are low or zero for non-polar compounds (e.g., groups HC, A, B, D, F, G) and highest for compounds with carboxylic acid and alcohol groups (e.g., compound S115, gallic acid and cD148 cyclobutane tetracarboxylic acid). S and E are related to polarizability of the molecule and the values increase with the number of double bonds and the presence of oxygen atoms. For example, compounds in group Q, which are products of naphthalene oxidation, have S values ranging 1.38-1.78 and E 0.97-1.86. Due to these complex interactions between solutes, stationary phases, and mobile phases, it is possible that two solutes that have different number and type of functional groups show similar retention characteristics and therefore, elute similarly in space and time.

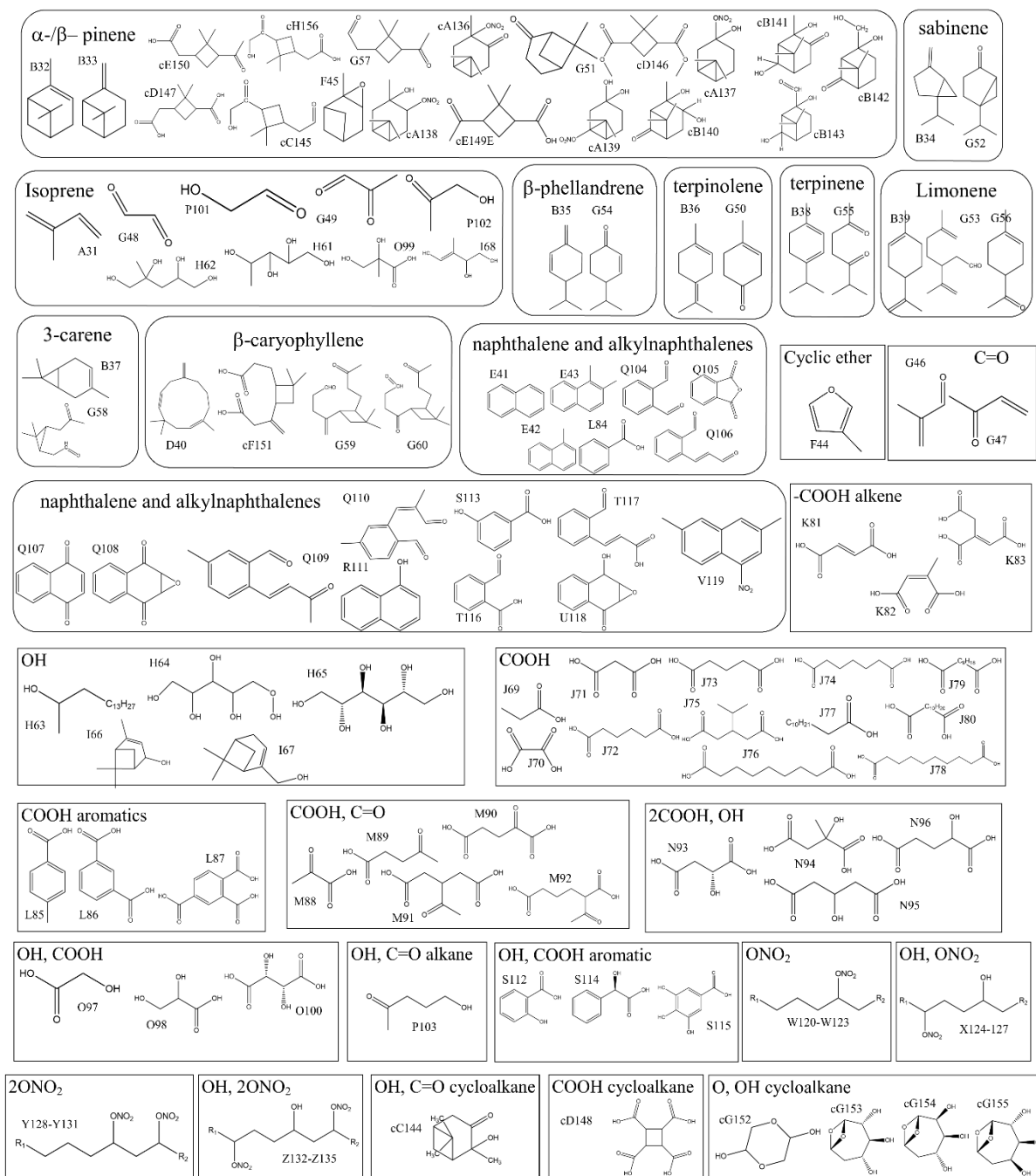


Figure 1. Structures of SOA precursors and products identified in the literature. Adapted from Flores and Doskey [14]

3.3. Prediction of Multidimensional Liquid Chromatography Separation

The solvation parameter model used for distribution of solutes between two condensed phases is described according to Eq 1. By rearranging Eq. 1 and Eq. 2, Eq. 3 is obtained:

$$\log K_i = \frac{I_{Kovats}}{100} = \frac{\log K_i - \log K_N}{\log K_{N+1} - \log K_N} + N \quad (3)$$

Where K_i is calculated relative to parent hydrocarbons eluting before (K_N) and after (K_{N+1}) solute i . N indicates the number of carbons of solute i . Due to the various ranges of polarities, in this work, parent hydrocarbons used were dicarboxylic acids. Linear regression analysis of V , S , E , A , and B of dicarboxylic acids against carbon number can be used to calculate $\log K_N$ and $\log K_{N+1}$ as follows:

$$\log K_N = v(m_V N + b_V) + s(m_S N + b_S) + e(m_E N + b_E) + a(m_A N + b_A) + b(m_B N + b_B) \quad (4)$$

$$\log K_{N+1} = v[m_V(N+1) + b_V] + s[m_S(N+1) + b_S] + e[m_E(N+1) + b_E] + a[m_A(N+1) + b_A] + b[m_B(N+1) + b_B] \quad (5)$$

Finally, the retention factor between solutes and two liquid stationary phases can be calculated by substituting equations (4) and (5) into equation (3) and simplifying as follows:

$$\log K_i = \frac{v(V-b_V)+s(S-b_S)+e(E-b_E)+a(A-b_A)+b(B-b_B)}{m_V v+m_S s+m_E e+m_A a+m_B b} \quad (6)$$

Linear regressions of the solute descriptors against n -values of dicarboxylic acids with $n = 3 - 10$ produced slopes (m) of 0.1409, 0.0048, 0.0164, -0.0019, and 0.0032, intercepts (b) of 0.2574, 1.0440, 0.9707, 0.3474, and 0.6779, and R^2 values of 1.0000, 0.976, 0.823, -0.873, and 0.943 for V , S , A , E , and B , respectively.

3.4. Predict the Separation of SOA Precursors and Products in 2D-LC Systems

In order to predict the separation of SOA precursors and products in 2D-LC systems, several stationary phases in various mixtures of solvents were considered (Tables S1-S4). This work was limited by the amount of system constants available in the literature. A mixture of systems was considered, most of them were reversed phase chromatography, in which the stationary phase is non-polar and the mobile phase is a mixture of two polar solvents. Only a few stationary phases containing cyano and diol groups were considered as part of normal-phase liquid chromatography.

The functional groups of stationary phases increase the retention of the solutes in the following order: C18>C8>C4>cyano>phenyl>amino. The polarity of the solvent increases in the following order water>methanol>isopropanol>dioxane>acetonitrile.

Increasing the amount of water in the mixture decreases retention. In this study, mixtures of water with methanol and acetonitrile were considered. According to Reta et al., 1999, both magnitude and sign of v , s , a , b , and e are the result of the difference between stationary and mobile phases (i.e., stationary-mobile). Zero values indicate the differences of interactions between solutes and stationary and mobile phases are statistically insignificant, therefore do not considerably contribute to solute retention. Negative signs indicate the mobile phase composition has stronger contribution to retention than the stationary phase, therefore solutes will have shorter retention (i.e., will elute faster). The opposite can be said about positive solvation parameters. Reta et al., investigated the effect of mobile phase composition in systems that contain methanol and water as 45, 50, 55 and 60% methanol. As mentioned before, our work is limited by the amount of data that is available in the literature to do the modeling.

In this work we considered three mobile phase composition which are methanol:water (50:50 and 1:9) and acetonitrile:water (30:70). According to Reta et al., only v and b depend on mobile phase composition and decrease or tend to zero as methanol increases. On the contrary, s , a , and e do not vary considerably and can be said that mobile phase composition does not influence their magnitude. In addition, the systems that we have considered in this work show that v and b have the highest magnitudes. This means that solutes with large V values have been retained longer and solutes with large B values have eluted faster.

In order to find the system that provides the best resolution of the complex mixture of compounds in Fig 1, columns in Tables S1-S4 were plotted against each other to form 2D retention index diagrams in LCxLC systems. A total of 484, 576, 256, and 25 theoretical retention diagrams were obtained for combinations of columns in Tables S1, S2, S3, and S4, respectively. General observations are mentioned below.

3.4.1. Stationary phases in Methanol:Water (1:1) mobile phase

The stationary phases in Table S3 are octadecylsiloxane C18 (columns 1-10), octyl (column 11), phenyl (columns 12-14), and fluoro (column 15-16). The predicted separation with C18 columns does not provide adequate separation according to groups, in some cases, the compounds are separated through the chromatogram not forming any groups. In other cases although compounds form groups, the resolution among groups is not adequate (e.g., Fig. 2).

Overall, for this system and the column selection, the combination of columns did not provide ideal separation. The best combination of columns for this system are (a) 13-1 XBridge Phenyl- SunFire C18 (Fig. 3), (b) 14-10 XTerra Phenyl- Synergi Fusion RP18 (Fig. 4), and (c) 15-10 Discovery HS F5- Synergi Fusion RP18 (Fig. 5). Although these three combinations of columns have some limitations. The column selection in Fig. 3 is able to provide separation according to groups and at the same time keeping good dispersion on both primary and secondary columns. However, although the predicted retention on the secondary column seems appropriate, co-elution of compounds within all groups is still observed.

The system in Fig. 4 provides good separation among groups, including cyclic compounds, which are normally difficult to group due to their variation in functionalities. However, the predicted magnitude on the second dimension seems too small. In real separation this has resulted in co-elution of compounds. The selection of columns in Fig. 5 provides similar separation as Fig. 3 however, the magnitude of the retention in the secondary dimension is cut by half. In this column selection, the compounds show good dispersion and less co-elution than Fig. 3, and similarly,

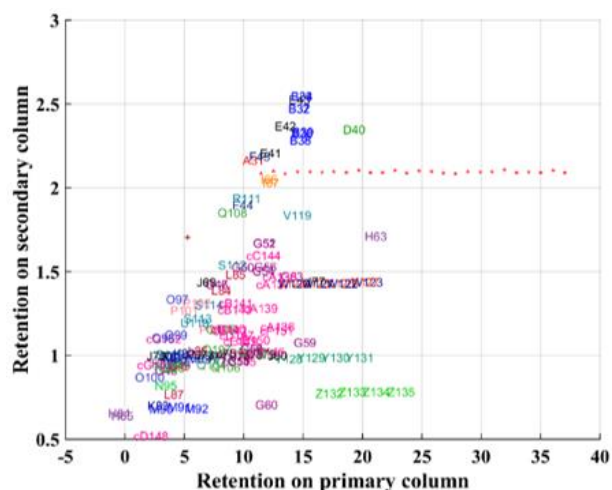


Figure 6. Theoretical LCxLC retention diagram with Betasil C18 and Discovery HS C18 as primary and secondary columns, respectively, with a mixture of Methanol:Water (1:1) mobile phase (Table S3) at 45°C. This column combination provided good separation among groups. However, significant co-elution is observed among species within the groups. This would make difficult the identification and quantification of species.

3.4.2. Stationary phases in Methanol:Water (50:50) mobile phase

For this system, 22 stationary phases were considered and a total of 484 LCxLC theoretical retention diagrams were created. In this system, three different groups of stationary phases were considered (see Table S1): (i) dimethylsiloxane bonded phases (columns 1-8), (ii) octadecylsiloxane-bonded phases (columns 9-16), and (iii) other phases (columns 17-22). In group 2, all columns have the same stationary phase and the difference is the technology that various commercial brands use.

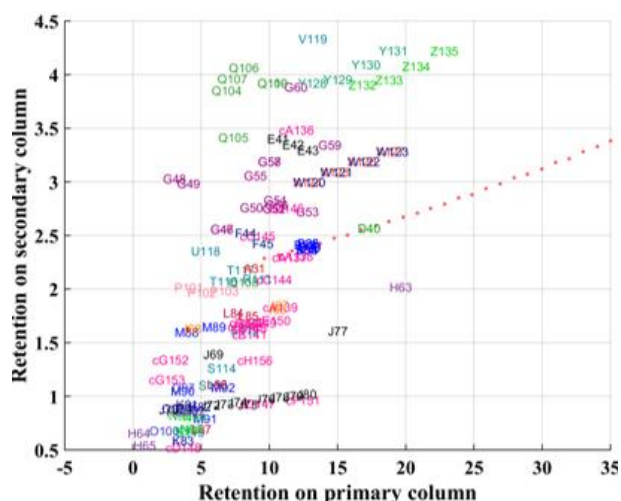


Figure 7. Theoretical LCxLC retention diagram with Cyclohexyl and Methyl as primary and secondary columns, respectively, with a mixture of Methanol:Water (50:50) mobile phase (Table S1). Overall, this combination of columns provided the best separation of compounds for the Methanol:Water

(50:50) mobile phase. Some advantages to the use of this system are: better resolution of compounds (1) in groups Y and Z, (2) cD148, K83, O100, (3) in group M, and (4) it provides shorter analysis times due to shorter retention on the secondary column.

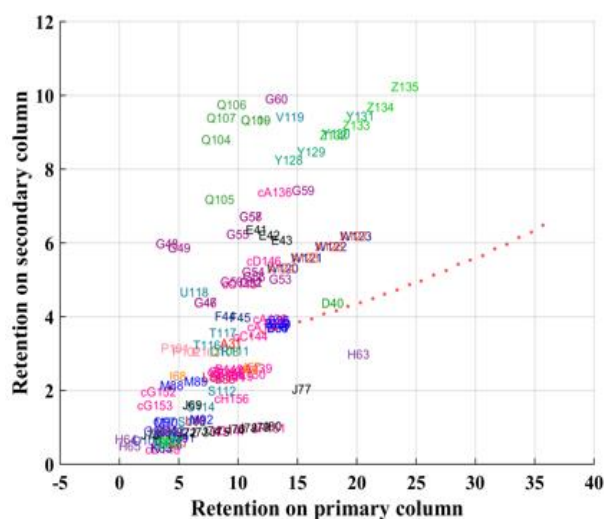


Figure 8. Theoretical LCxLC retention diagram with Decyl and Phenyl as primary and secondary columns, respectively, with a mixture of Methanol:Water (50:50) mobile phase (Table S1). Overall, this combination of columns provided one of the best separation of compounds for the Methanol:Water (50:50) mobile phase system. However, the retention on the secondary column is greater than the retention obtained by the system in Figure 7.

The best combination of columns for the Methanol:Water (50:50) are observed in Fig. 7 (columns 2-1) and Fig. 8 (columns 4-7). Both combinations of columns provide very similar resolution of compounds, however, the compounds are retained longer in the system with columns 4-7. The solvation parameters of columns 2,1 and 4,7 are observed in Table 7. It can be observed that the reason why these systems provide very similar resolution is due to solvation parameters having very similar magnitude. However, although column 1 shows a slightly greater A constant than column 7, the reason for greater retention on column 7 is mainly due to more negative *s* and *b* solvation parameters in column 4. This means that solutes containing high *S* and *B* will be retained in the first column for longer periods of time, therefore, will leave the secondary column later, since both columns are installed in series. Although both systems provide similar separation, there are a few advantages of choosing the system in Fig. 7 over the system in Fig. 8. The system with cyclohexyl and methyl columns (1) resolves better compounds in groups Y and Z, (2) compounds cD148, K83, O100, and (3) compounds in groups M and (4) it provides shorter analysis times due to shorter retention on secondary columns.

3.5. Diagrams of Organic Aerosol Constituents Identified in High-Time Resolved Samples

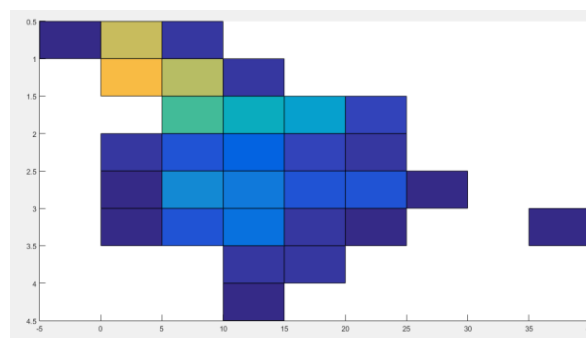
The compounds identified in the atmosphere by Flores and Doskey [17] in samples 2A, 3A, 4A, and 5A with GC×GC-ToF-MS were corrected and their structures re-drawn to meet criteria for separation with LC×LC. In addition, solvation parameters of these compounds were predicted as explained in section 3.2. LC×LC theoretical retention diagrams were obtained with the best combination of columns obtained in Fig. 7.

In order to facilitate the understanding of how processed the organic compound are, an additional figure that represents the organic compounds in selected bins in LCxLC diagrams was created (Fig. 9). This has advantages over Van Krevelen diagrams in which the functionalities are preserved for easy identification and organized in bins according to polarity. The analysis of Fig. 9 confirms the expected results according to observations in chamber experiments and ambient air studies. Fig. 9a was collected at 06:00-10:00h, prior to sunrise and during the first traffic of the day. This sample contains compounds that were accumulated during the night are for instance they have been already processed and contain a number of polar functionalities (i.e., see yellow bins on top-left figure). In addition, this sample contains the majority of compounds that contain single carbonyl functionalities and non-polar hydrocarbons (e.g., see light blue bins on $y=2.5-3.0$ and $x=0-25$).

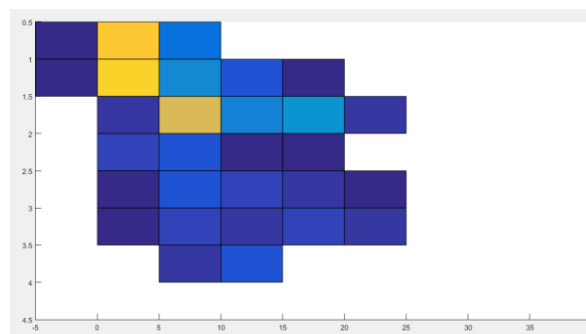
Fig. 9b shows the distribution of organic compounds identified in ambient air sample collected at 10:00-14:00. Due to the highest amount of radiation at this time of the day, this sample is expected to contain the highest number of aged organic compounds with multi- and poli-functionalities, which are shown with dark yellow colors.

Fig. 9c shows compounds identified in a sample collected at 14:00-19:00. This sample is expected to contain a mixture of fresh compounds with no polar groups or with single polar groups emitted by traffic and aged compounds with poli- and multi-functionalities produced in the atmosphere due to oxidation reactions, which can be observed as light blue bins on $y=2.5-3.0$ and yellow and light blue bins on $y=0-2.0$, respectively.

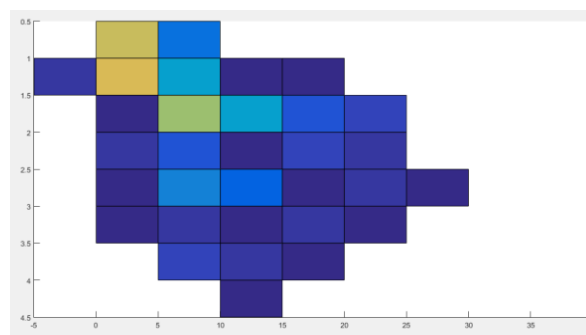
Finally, Fig. 9d shows the distribution of compounds in an ambient air sample collected at 19:00-06:00h. This sample was collected after rush hour and during 11h total sampling time. Due to the lack of solar radiation, this sample is expected to contain a mixture of fresh compounds emitted by traffic and compounds that reacted later during the day but contain less polar groups than 36b when the highest amount of radiation is observed. In addition, this figure shows the lack of compounds with large number of carbons ($x < 20$) possibly due to fragmentation overnight.



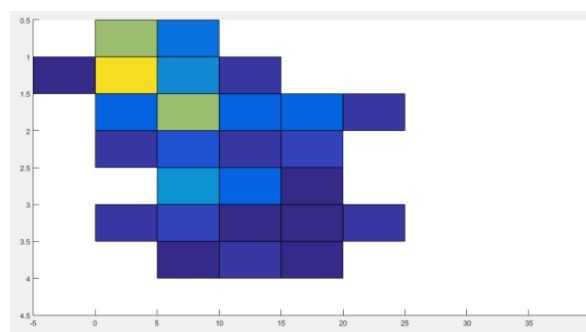
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 9. Theoretical LxLC diagrams of organic compounds identified in ambient air samples. (a) 2A 0600-1000h, (b) 3A 1000-1400h, (c) 4A 1400-1900h, and (d) 5A 1900-0600h. The color bar indicates the number of species identified in each bin according to functional groups in Fig. 7. This figure shows the level of functionalization or aerosol aging throughout the day due to various atmospheric processes, where dark blue indicates fresh emissions (i.e., less functionalization) and yellow indicates aged aerosol (i.e., more functionalization).

IV. CONCLUSIONS

The work presented here had the main objective to evaluate the use of advanced liquid chromatographic systems to resolve complex mixtures of organic compounds that are formed in the atmosphere due to oxidation reactions in the gas- and particle-phases. A model was developed and set up to generate theoretical LCxLC diagrams that resolve a selected number of organic compounds that have been identified in the literature. The model was used to select the best combination of columns that provides adequate separation of these compounds. It was found that most of the column combinations were not adequate and the best system was provided by methanol:water (1:1). The combination of columns that provided the best separation of the standard compounds was provided by Cyclohexyl and Methyl as primary and secondary columns. However, when this combination of columns was used to represent the evolution of ambient air organic aerosols, significant co-elution was observed. An additional figure that simplifies the separation of ambient air samples provided a simplified understanding of the distribution of organic aerosol components at different times of the day. In the near future, a detailed analysis of the LCxLC diagrams of the ambient air samples presented here, and additional samples, will be necessary for detailed understanding of organic aerosol formation pathways. Finding an analytical technique that provides comprehensive identification and quantification of organic aerosol speciation is important for the evaluation of organic aerosol aging in the real atmosphere and for the improvement of organic aerosol production models. Overall, the results obtained in this work show that LCxLC is a promising technique that will be able to provide adequate separation of complex mixtures of organic aerosol when an adequate solvent system and combination of two stationary phases are determined.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK-1002) through Project No. 116Y041.

REFERENCES

- [1] Kim, S.-Y., J.L. Peel, M.P. Hannigan, S.J. Dutton, L. Sheppard, M.L. Clark, and S. Vedal, (2012). The temporal lag structure of short-term associations of fine particulate matter chemical constituents and cardiovascular and respiratory hospitalizations. *Environ Health Persp*, 120 (8), 1094-1099.
- [2] Lu, Z., D.G. Streets, E. Winijkul, F. Yan, Y. Chen, T.C. Bond, Y. Feng, M.K. Dubey, S. Liu, and J.P. Pinto, (2015). Light absorption properties and radiative effects of primary organic aerosol emissions. *Environmental science & technology*, 49 (8), 4868-4877.
- [3] Seinfeld, J.H. and J.F. Pankow, (2003). Organic atmospheric particulate material. *Annu Rev Phys Chem*, 54 (1), 121-140.
- [4] Daumit, K.E., S.H. Kessler, and J.H. Kroll, (2013). Average chemical properties and potential formation pathways of highly oxidized organic aerosol. *Faraday Discuss* 165 181-202.
- [5] Poole, C.F., *Chapter 1 - General Concepts in Column Chromatography*, in *The Essence of Chromatography*, C.F. Poole, Editor. 2003, Elsevier Science: Amsterdam. p. 1-78.
- [6] Abraham, M.H., H.S. Chadha, R.A. Leitaio, R.C. Mitchell, W.J. Lambert, R. Kaliszan, A. Nasal, and P. Haber, (1997). Determination of solute lipophilicity, as log P (octanol) and log P (alkane) using poly (styrene-divinylbenzene) and immobilised artificial membrane stationary phases in reversed-phase high-performance liquid chromatography. *J Chromatogr A*, 766 (1-2), 35-47.
- [7] Abraham, M.H., M. Rosés, C.F. Poole, and S.K. Poole, (1997). Hydrogen bonding. 42. Characterization of reversed-phase high-performance liquid chromatographic C18 stationary phases. *J Phys Org Chem*, 10 (5), 358-368.
- [8] Poole, C.F. and S.K. Poole, (2002). Column selectivity from the perspective of the solvation parameter model. *J Chromatogr A*, 965 (1-2), 263-299.
- [9] Reta, M., P.W. Carr, P.C. Sadek, and S.C. Rutan, (1999). Comparative study of hydrocarbon, fluorocarbon, and aromatic bonded RP-HPLC stationary phases by linear solvation energy relationships. *Anal Chem*, 71 (16), 3484-3496.
- [10] Sándi, Á. and L. Szepeszy, (1998). Characterization of various reversed-phase columns using the linear free energy relationship: II. Evaluation of selectivity. *J Chromatogr A*, 818 (1), 19-30.
- [11] Tan, L.C., P.W. Carr, and M.H. Abraham, (1996). Study of retention in reversed-phase liquid chromatography using linear solvation energy relationships I. The stationary phase. *J Chromatogr A*, 752 (1-2), 1-18.
- [12] Zhao, J. and P.W. Carr, (1998). Comparison of the retention characteristics of aromatic and aliphatic reversed phases for HPLC using linear solvation energy relationships. *Anal Chem*, 70 (17), 3619-3628.
- [13] Zhao, J. and P.W. Carr, (1999). An approach to the concept of resolution optimization through changes in the effective chromatographic selectivity. *Anal Chem*, 71 (14), 2623-2632.
- [14] Flores, R.M. and P.V. Doskey, (2014). Using multidimensional gas chromatography to group secondary organic aerosol species by functionality. *Atmos Environ*, 96 (0), 310-321.

-
- [15] Seeley, J.V., E.M. Libby, K.A.H. Edwards, and S.K. Seeley, (2009). Solvation parameter model of comprehensive two-dimensional gas chromatography separations. *J Chromatogr A*, 1216 (10), 1650-1657.
- [16] Smith, R.M., *Chapter 3 Retention index scales used in high-performance liquid chromatography*, in *Journal of Chromatography Library*, R.M. Smith, Editor. 1995, Elsevier. p. 93-144.
- [17] Flores, R.M. and P.V. Doskey, (In Review). Vapor- and Aerosol-Phase Atmospheric Organic Matter in Urban Air of the Midwest USA. *Atmos Environ*.

Bir Çay Fabrikasında Fine-Kinney ve FMEA Yöntemleri ile Risk Değerlendirmesi

Risk Assessment in a Tea Factory with Fine-Kinney and FMEA Methods

Handan DURMUŞ¹ , Özlem YURTSEVER² , Bahattin YALÇIN³ 

¹Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Güvenliği Yüksek Lisans Programı, İstanbul/Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mülkiyeti Koruma ve Güvenlik Bölümü, İstanbul/Türkiye

³Marmara Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, İstanbul / Türkiye

Öz

Bu çalışmada Rize’de bulunan bir çay fabrikasında Türk mevzuatı kapsamında iş sağlığı ve güvenliği açısından risk değerlendirme yapılmıştır. Fine-Kinney metodu ile tespit edilen tehlikeler arasında, tüm sektörlerde karşılaşılabilecek genel tehlikeler için ayrıca Hata Türleri ve Etkileri (FMEA) risk analiz metodu da kullanılmıştır. Risk değerlendirme yapmadan önce tehlikelerin tanımlanması için çalışma ortamı, çalışanlar ve iş yerine ilişkin gerekli bilgiler toplanmıştır. Toplanan bu bilgiler ışığında tehlikeler tanımlanıp, Fine-Kinney ve FMEA metodolojisi kullanılarak risk değerlendirme yapılmıştır. Fine-Kinney yöntemi ile 47 tane tehlike tespit edilmiştir. Bu tehlikeler içerisinde 6 tanesine neden olabilecek 40 tane hata, FMEA yöntemi ile yeniden değerlendirilmiştir. Tespit edilen riskler arasında en fazla ergonomik, fiziksel ve psikososyal risk etmenleri bulunmaktadır. Fine-Kinney metodu ile fabrikanın her alanı değerlendirilmiş ve olası tehlikeler belirlenmiştir. FMEA yöntemi ile de acil durumlar, yüksekte çalışma, yangın ve hareketli parçalar ile ilgili tehlikeler yeniden değerlendirilmiştir. Türkiye’de bir Çay fabrikasında yapılmış olan bu çalışmanın, literatürde risk değerlendirme ile ilgili boşluğa katkı sağlaması planlanmaktadır. Böylece ülkemizde istihdam oranı yüksek olan bir sektörde iş kazaları ile meslek hastalıklarının önüne geçilmesi için öncü bir çalışma olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Risk Değerlendirmesi, Fine-Kinney, HTEA, Çay Endüstrisi, İş Güvenliği.

Abstract

In this study, a risk assessment was conducted in terms of occupational health and safety within the scope of Turkish legislation in a tea factory in Rize. Among the hazards detected by the Fine-Kinney method, for general dangers that may be encountered in all sectors, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method was also used. Before performing a risk assessment, necessary information about the working environment, employees and workplace was collected in order to identify the hazards. In the light of this information gathered, hazards were identified and risk assessment was conducted using Fine-Kinney and FMEA methodology. By using Fine-Kinney method, 47 dangers were identified and 6 of these dangers were re-evaluated by FMEA method which could have caused by 40 failures. By using the Fine-Kinney method, every area of the factory was evaluated and possible dangers were determined. With the FMEA method, dangers related to emergencies, working at height, fire and moving parts have been re-evaluated. This study which is conducted in a tea factory in Turkey, contributes to the risk assessment gap for this industry in the literature. Thus, it is expected to be a pioneering work to prevent occupational accidents and diseases in a sector with a high rate of employment in our country.

Keywords: Risk Assessment, , Fine-Kinney, FMEA, Tea Industry, Occupational Health and Safety.

I. GİRİŞ

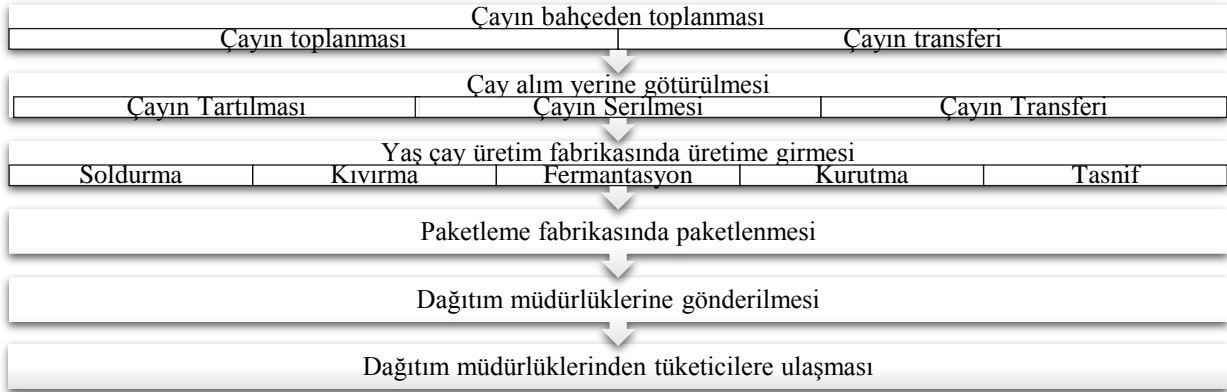
Bol yağışlı iklimlerde yetişmeye müsait olan çay bitkisi, yıllık ısı ortalaması yaklaşık olarak 14 derece, yağışı ise 1200 mm’nin üzerinde ve aynı zamanda nem oranının da %70’in üzerinde olan iklimlerde varlığını sürdürebilmektedir [1]. Türkiye’de ise çay içme alışkanlığının geçmişi 1600’lü yıllara, çay üretimi ile ilgili denemeler ise 1800’lü yıllara dayanmaktadır. Çayın ülkemiz toprakları ile tanışması, 1888 yılında Japonya’dan çay tohumu getirilip Bursa civarında denemeleri ile olmuştur. Bu deneme başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bu yıllardan sonra yeniden bir takım denemeler olmuş fakat sonuç alınamamıştır [2]. Ülkemizde çayın yetiştirilmesi adına ilk önemli gelişme, 1917 yılında yaşanmıştır ve bu denemeden olumlu sonuçlar alınmıştır. Halkalı Ziraat Mekteb-i Alisi müderrislerinden Ali Rıza Erten tarafından yapılan araştırmalar sonucunda, iklim koşulları açısından en uygun iki il olan Rize ve Artvin’de çayın yetiştirilebileceği çıkarımına varılmıştır. O yıllarda bölgede var olan işsizlik sorunu, çay tarımı ile ilgili bu araştırmaların ciddiye alınması sağlanmıştır [2]. Çay endüstrisi, bahçeden bardağa ulaşıncaya kadar, iş sağlığı ve güvenliği açısından ayrıca önem verilmesi gereken bir sektördür. Yapılan bu çalışma ile Rize’de bulunan bir çay fabrikasının 4857 numaralı İş Kanunu’nda işyeri olarak sayılabilecek tüm alanları gözlemlenip, tehlike ve bundan kaynaklanabilecek risklerin tespiti yapılmıştır [3]. Doğu

Karadeniz Bölgesi'nde çay tarımının uzun yıllar tek başına ve önemli bir gelir kaynağı olup çay tarımının mevsimlik işçi ihtiyacı nedeniyle istihdama önemli katkılar sağlamaktadır [4]. Çay endüstrisi yoğun istihdamlı bir sektör olduğundan dolayı iş sağlığı ve güvenliği açısından dikkate alınması gereken bir çalışma alanı olduğunu göstermektedir. Çay sektörü, Doğu Karadeniz bölgesinde, tarım istihdamına önemli ölçüde fayda sağlamaktadır. Özellikle Rize ve Trabzon illerinin yer şekillerinin oldukça engebeli olması, tarım ürünü olarak çay yetiştiriciliğinin önemli bir paya sahip olmasına neden olmaktadır. Çay hasadının Mayıs ve Ekim ayları arasında yapılmasından dolayı, istihdam oranı bu aylarda artmaktadır. Son yıllarda ise özellikle Rize'de, çaya alternatif olarak birçok ürün denense de üretim açısından çay, birinci sırada yer almaktadır[4]. Türkiye, çay üretim ve tüketiminde dünyada önemli bir konuma sahip iken, ihracat rakamlarının düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun düzeltilmesi için gerekli çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan düzenlemeler sonucunda 2023 yılında çay ihracatında yaklaşık olarak 50 bin tona ulaşılabilir ve buna paralel olarak bölgenin gelir ve refah seviyesi artabilir [5]. Ülkemizde ve dünyada gelişen sanayi ile daha çok önem arz etmeye başlayan iş sağlığı ve güvenliği kavramı çay endüstrisinde de ayrı bir öneme sahiptir.

10.83.01 numaralı NACE koduna sahip çay ürünleri imalat endüstrisi İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği'ne göre az tehlikeli sınıfta yer alan işkoludur [6] [7]. Çay bitkisi, üreticiden tüketiciye ulaşana kadar birçok aşamadan geçmektedir. Bu aşamaların bilinmesi iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının odak noktalarının belirlenmesi açısından önemlidir ve Şekil 1'de kısaca gösterilmiştir.

Hindistan'da çay bahçeleri ile ilgili yapılmış bir çalışmada, bahçeler iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmiş ve özellikle çay toplama aşamalarının ergonomik riskler barındırdığı belirtilmiştir [8]. Farklı bir çalışmada, çay tesislerindeki tehlikelerden bahsedilmiştir. Çay üzerine atılan zirai ilaçlar, kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, iş kazaları ve yaralanmalar, termal konfor şartları, bulaşıcı hastalıklar, deri ve solunum hastalıkları ve mesleki kanserler ayrı başlıkları altında incelenmiştir [9].

Çay endüstrisinde birçok tehlike ve risk bulunmaktadır. Çalışanlar en çok fiziksel risk etmenleri ve ergonomik risk etmenlerine maruz kalmaktadırlar. Çayın bahçeden toplanmasından üretimine kadar olan aşamalarda bulunan riskler Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çayın tüketiciye ulaşana kadar geçirdiği aşamalar

Tablo 1. Çay endüstrisinde bulunan risk etmenleri

Çayın Tüketicie Ulaşana Kadar Geçirdiği Aşamalar	Fiziksel	Ergonomik	Psikososyal
Çayın toplanması	x	x	x
Çayın bahçeden taşınması		x	x
Çayın alım yerine aktarımı		x	x
Çayın alım yerinden fabrikaya transferi		x	x
Çayın üretime girmesi için boşaltımı	x	x	x
Soldurma	x		x
Kıvrırma	x	x	x
Fermantasyon	x		x
Kurutma	x		x
Tasnif	x	x	x
Paketleme	x	x	x
Paketlenen çayların transferi		x	x

Çalışanlar, çayı bahçeden toplarken ve üretirken birçok risk etmenine maruz kalmaktadır. Çayın bahçeden toplanması aşamasında eğilip/kalkma, itme/çekme, yük taşıma işlemleri yoğun olduğundan dolayı ergonomik risk etmenleri dikkate alınması gereken konular arasındadır. Ayrıca üretim aşamaları olan soldurma, kıvrırma, fermantasyon, kurutma ve tasnif aşamalarında gürültü, titreşim, termal konfor, aydınlatma ve havalandırma etkenleri ile ciddi anlamda karşı karşıya kalınmaktadır.

Türkiye’de bulunan bir çay fabrikasında yapılmış olan bir çalışmada, fiziksel risk etmenleri ile ilgili ölçümler değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, soldurma, kıvrırma, fermantasyon, kurutma ve tasnif üniteleri odak noktası olarak alınmıştır. Bu bölümlerde gürültü, titreşim ve termal konfor ölçümleri yapılmış olup, en gürültülü bölümün kıvrırma ünitesi olduğu, en nemli bölümün fermantasyon ünitesi olduğu, kurutma ve tasnif ünitelerinde de termal konfor şartlarının uygun olmadığı tespit edilmiştir [10]. Yine Türkiye’deki çay işletmelerinde çalışanların iş sağlığı ve güvenliği algılarının değerlendirildiği lisansüstü çalışmada, çalışanlar ile anket çalışması yapılmış ve iş sağlığı ve güvenliği algıları değerlendirilmiştir [11].

Çay üretim sektörü için önemli bir kaynak oluşturulması hedeflenen bu çalışmada çay endüstrisindeki iş sağlığı ve güvenliği açısından mevcut olan tehlike ve riskler tespit edilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Çay endüstrisinde yapılmış olan bu risk değerlendirmesi çalışmasında, literatürde sıkça rastlanan Fine-Kinney ve FMEA yöntemleri kullanılmıştır. Risk değerlendirmesi ile ilgili Türkiye’de olan birçok farklı sektörde literatür araştırması yapılmıştır. Özellikle inşaat sektöründe en çok Fine- Kinney ve 5x5 Matris risk analiz yöntemlerinin kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca, ormancılık, sağlık, gıda, ecza depoları, telekomünikasyon, otomobil, plastik ve mobilya sektörlerinde Fine-Kinney metodu ile risk değerlendirmesi yapılmıştır [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19]. Bu çalışmalara bakıldığında, Fine-Kinney yönteminin tüm sektörlerde kolayca uygulanabilen bir risk analiz yöntemi olduğu anlaşılmaktadır. Hata Türleri ve Etkileri analiz (FMEA) yöntemi ile de inşaat, laboratuvar, yüksek fırın işletmesi ve ticari araç üretim sektörlerinde risk değerlendirmesi yapılmıştır [20] [21] [22] [23].

Yapılan literatür taramasına göre Türkiye’de çay endüstrisine yönelik herhangi bir akademik risk değerlendirmesi çalışmasına rastlanmamıştır. Dolayısı ile bu akademik çalışma literatürdeki boşluğu doldurmak amacı ile yapılmıştır.

Çay endüstrisinde yapılmış olan bu risk değerlendirmesi çalışmasında, literatürde sıkça rastlanan Fine-Kinney ve FMEA yöntemleri kullanılmıştır. Öncelikle, Fine Kinney metodu ile tehlike ve riskler saptanmıştır. Belirlenen riskler için gerekli düzeltici önleyici faaliyetler önerilmiştir. Çalışmanın devamı olarak, bütün sektörlerde ortaya çıkabilecek geniş kapsamlı tehlikelere sebep olabilecek hatalar için ayrıca Hata Türleri ve Etkileri (FMEA) metodu kullanılmıştır. Bu metod sayesinde hataların sebeplerine daha derinlemesine inilmiş ve gerekli kontrol önlemleri önerilmiştir.

Öncelikle, Fine Kinney metodu ile tehlike ve riskler saptanmıştır. Belirlenen riskler için gerekli düzeltici önleyici faaliyetler önerilmiştir. Çalışmanın devamı olarak, bütün sektörlerde ortaya çıkabilecek geniş kapsamlı tehlikelere sebep olabilecek hatalar için ayrıca Hata Türleri ve Etkileri (FMEA) metodu kullanılmıştır. Bu metod sayesinde hataların sebeplerine daha derinlemesine inilmiş ve gerekli kontrol önlemleri önerilmiştir. Çay fabrikasında yapılan bu çalışmada kullanılan risk analiz yöntemleri, 2.1 ve 2.2 numaralı başlıkta anlatılmıştır.

2.1. Fine-Kinney Risk Analiz Yöntemi

Fine-Kinney metodu Avrupa’da sıkça kullanılan bir yöntem olup ülkemizde 2012 yılında 6331 numaralı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu’nun yürürlüğe girmesiyle yaygınlaşmıştır [24]. Bu metod, riskleri derecelendirirken hangi iş bölümüne ne derecede önem verilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu risk değerlendirme metodunda üç parametre kullanılmaktadır. Bu üç parametrenin çarpımı ile risk skoru elde edilip, riskler derecelendirilmektedir. Risk derecelerine göre düzeltici önleyici faaliyetler önerilmektedir [17]. Risk skorları, zarar ya da hasarın gerçekleşme ihtimali, tehlikeye maruz kalma sıklığı ve tehlike gerçekleştiği halde oluşturacağı etki puanlanıp çarpılarak hesaplanır. Bu parametrelere verilmesi gereken değerler Tablo 2’de gösterilmiştir [25].

Tablo 2’deki değerler ile risk skoru hesaplanır ve elde edilen değerler Tablo 3’deki risk değerlerine göre risk değerlendirme sonucu elde edilir [26].

Tablo 2. Fine-Kinney skalası

İhtimal Skalası: Zarar ya da hasarın zaman içerisinde gerçekleşme olasılığıdır.		Şiddet: Tehlikenin gerçekleşmesi halinde oluşturacağı etkidir.	
Değer	Kategori	Değer	Gerçekleşen Etki
0,2	İmkânsız	1	Ramak Kala
0,5	Düşük İhtimal	3	Hafif Yaralanma
1	Oldukça düşük ihtimal	7	Ağır Yaralanma
3	Nadir ama mümkün	15	Kalıcı Hasar, Çevresel Zarar
6	Kuvvetle muhtemel	40	Ölümlü Kaza
10	Çok yüksek olasılıkla	100	Birden Fazla Ölümlü Kaza
Frekans: Tehlikeye maruz kalma sıklığıdır.			
Değer	Açıklama	Kategori	
0,5	Çok nadir	Yılda bir kez ya da daha az	
1	Oldukça nadir	Yılda bir ya da birden çok	
2	Nadir	Ayda bir ya da birden çok	
3	Ara sıra	Haftada bir ya da birden çok	
6	Sık sık	Günde bir ya da daha fazla	
10	Sürekli	Sürekli ya da saatte birden çok	

Tablo 3. Hesaplanan risk skorları

Risk Değeri	Risk Değerlendirme Sonucu
400<R	Tolerans gösterilemez risk (Derhal önlem alınmalı)
200<R<400	Esaslı risk (Kısa dönemde iyileştirilmeli)
70<R<200	Önemli risk (Uzun dönemde iyileştirilmeli)
20<R<70	Olası risk (Gözetim altında tutulmalı)
R<20	Önemsiz risk (Önlem öncelikli değildir)

Elde edilen sonuçlara göre tolerans gösterilemez riskler için yapılması gereken düzenleyici ve önleyici faaliyetler belirlenip, derhal önlem alınmalıdır. Risk sonuçlarının ciddiyetine göre belirlenen sürelerde olumsuzluklar giderilmelidir. Risk değerlendirmesi yapılırken ise öncelikli amaç, tehlikenin ortadan kaldırılması olmalı, bunun mümkün olmadığı durumlarda ise kabul edilebilir risk seviyesine indirilmesi sağlanmalıdır.

2.2. Hata Türleri ve Etkileri Analiz Yöntemi (FMEA)

Hata türleri ve etkileri analiz yöntemi (FMEA), Fine-Kinney ve 5x5 Matris kadar yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. FMEA, aslında hataları gözden geçirme tekniği olarak tanımlanabilir [27]. Bu yöntem hataların önerilen kontrol tedbirleri ile ortadan kaldırmayı amaçlar. FMEA yönteminde uygulama prosesi bulunmaktadır. Bu süreçte göre, FMEA ekibi

tarafından tespit edilen hatalar yönetime göre hesaplanır, önlemler alınır ve uygulamalar takip edilir [28].

FMEA' da risk öncelik göstergesi hesaplanırken, olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik parametreleri kullanılır. Bu yöntemin parametrelerinden olasılık, hatanın ortaya çıkma ihtimalini; şiddet ise hatanın gerçekleştireceği etkiyi ve fark edilebilirlik ise hatanın nedeninin sistem ya da kişiler tarafından saptanabilirlik seviyesini göstermektedir. Bu parametrelerle hesaplanan risk öncelik göstergesi sonuçlarına göre riskler tanımlanır. Parametreler ise Tablo 4'te gösterilmiştir.

Bu parametrelerle hesaplanan risk öncelik göstergesi sonuçlarına göre riskler tanımlanır. Bu değer ve tanımlamalar Tablo 5'te gösterilmiştir [29].

Tablo 4. FMEA yönteminde hesaplama parametreleri

Derece	Hata Olasılığı		Etki (Şiddet)		Fark Edilebilirlik	
10	1/2'den çok	Çok Yüksek	Büyük felakete neden olabilecek etkiye sahip olan hata	Aniden Gelen Tehlike	Hatanın saptanması mümkün değil	Saptanamaz
9	1/3		Toplu ölümlere neden olabilecek etkiye sahip olan hata		Hatanın saptanması çok uzak	Çok Az
8	1/8	Yüksek	Sistemin tamamının yıkıcı hasara uğramasına neden olabilecek hata	Çok Yüksek	Hatanın saptanması uzak	Az
7	1/20		Prosesin tamamının hasara uğramasına sebep olabilecek hata	Yüksek	Hatanın saptanması çok düşük	Daha Küçük
6	1/80	Orta	Sistem performansını etkileyebilecek hata	Orta	Hatanın saptanması düşük	Küçük
5	1/400		Kırık, kesik, iş göremezlik gibi etkilere sahip olan hata	Az	Hatanın saptanması orta	Orta
4	1/2000	Az	İncinme, sıyrık, geçici rahatsızlıklara neden olan hata	Çok Az	Hatanın saptanması kısmen yüksek	Kısmen Yüksek
3	1/15000		Sistemin işleyişini aksatan hata	Küçük	Hatanın saptanması yüksek	Yüksek
2	1/150000	Çok Az	Sistemin işleyişinde karışıklığa neden olan hata	Daha küçük	Hatanın saptanması çok yüksek	Çok Yüksek
1	1/1500000'den az		Etkisiz	Mevcut Değil	Hatanın saptanması kesin	Kesinlikle

Tablo 5. FMEA yönteminde hesaplama parametreleri

Sıralama	Risk Öncelik Değeri	Risk Seviyesi
1	1-50 arası	Düşük
2	50-100 arası	Orta
3	100-200 arası	Yüksek
4	200-1000 arası	Çok Yüksek

Türkiye’de yapılmış olan risk değerlendirmesi çalışmalarına göre sıkça kullanılan yöntemler arasında bulunan FMEA, hataların analizinin yapılabilmesi açısından diğer yöntemlerden ayrılmaktadır ve bu yüzden risk değerlendirmesi çalışmalarına farklı bir bakış açısı katmaktadır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Sonuç ve Değerlendirmeler

İş sağlığı ve güvenliği açısından yapılan risk değerlendirmesi Rize’de bulunan bir çay fabrikasında yapılmıştır. Fabrika yaklaşık 20,000 m²’lik bir alanı kaplamaktadır. Fabrikada toplam çalışan sayısı 201’dir. Bunların 39’u daimi, 138’i geçici işçi ve 24’ü ise memurdur. Erkek çalışan sayısı 171, kadın çalışan

sayısı 30’dur. Engelli çalışan sayısı 1’i daimi olmak üzere 11 kişi ve eski hükümlü çalışan sayısı da 1’i daimi olmak üzere 5 kişidir.

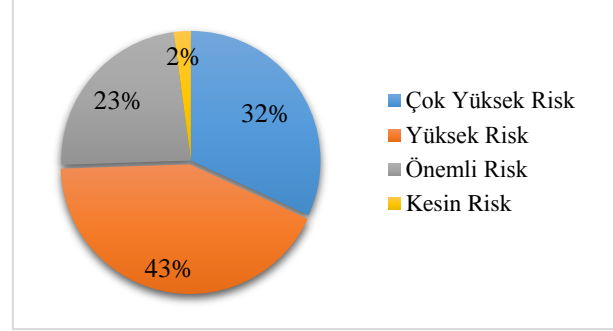
Çay toplama ve üretim işlemleri yılda en az üç kere ve Mayıs-Ekim ayları arasında yapılmaktadır. Bu yüzden çalışanlar kadrolu ve geçici (mevsimlik) olarak ikiye ayrılmaktadır. Kadrolu işçiler devamlı çalışırken, mevsimlik işçiler sadece yaş çay üretim sezonu boyunca çalışmaktadır. Arta kalan zaman dilimlerinde bakım onarım ve yenileme işleri yapılmaktadır. Üretim dışında yapılan faaliyetlerde mevsimlik işçiler işten çıkarılmaktadır. İşyerinin çalışma ruhsatı mevcuttur ve iş yerinde 10 adet bölüm bulunmaktadır. İdari bina (ofisler, yemekhane, tuvaletler, sistem odası, soğuk hava odası vs.), kuru çay ambarları, siyah çay imalat

binası (soldurma, kıvrırma, fermantasyon, kurutma, tasnif üniteleri ve kuru çay analiz laboratuvarı), kazan dairesi, atölyeler (bakım hane, marangozhane), yaş çay boşaltma alanı, kuru çay yükleme alanı, güvenlik kulübesi, otopark alanı, çardak, çalışanların kullandığı dinlenme alanı, yaş çay kalite kontrol laboratuvarı iş yerinin bölümleri olarak sınıflandırılmıştır. Bu işyerinde kısmi zamanlı C sınıfı bir iş güvenliği uzmanı ve kısmi zamanlı bir işyeri hekimi bulunmaktadır.

Çay fabrikasında yapılmış olan bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Fine-Kinney ve FMEA yöntemleri kullanılarak risk analizi yapılmıştır. 3.1.1'de Fine-Kinney yöntemi ile elde edilen sonuçlar verilmiş olup bölüm 3.1.2'de yaygın karşılaşılan hatalar FMEA yöntemi ile değerlendirilmiştir ve sonuçları verilmiştir.

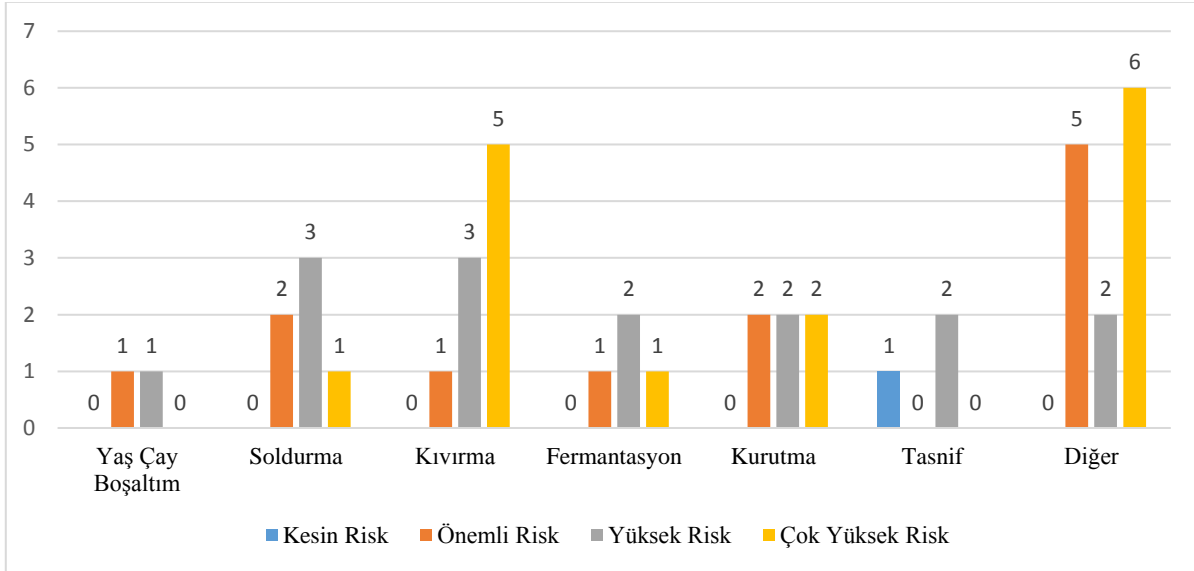
3.1.1. Fine-Kinney Metodu ile Risk Değerlendirmesi

Fine-Kinney risk değerlendirme sonuçlarına göre 47 adet tehlike ve sonuçlarında 43 tane risk bulunmuştur. Bu risklerin seviyeleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Fine-Kinney yöntemine göre risk değerlendirme sonucu

Şekil 2'ye göre, genel olarak çay fabrikasında %43'lük bir oranla yüksek risk ve %32 oranında ise çok yüksek risk bulunmuştur. Kabul edilebilir risk seviyesine ise rastlanmamıştır. Çay fabrikasının üretim bölümünde yer alan, yaş çay boşaltım, soldurma, kıvrırma, fermantasyon, kurutma ve tasnif bölümlerindeki ve diğer bölümlerdeki risklerin sayıları ayrı olarak Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Fabrika bölümlerine göre risk değerlendirme sonuçları

Şekil 3'e göre çay fabrikasının en riskli alanı kıvrırma ünitesi olarak gözükmektedir. Üretim alanının dışında bulunan, diğer bölümler olarak adlandırılan, fabrika bahçesi, kazan dairesi, bakım atölyeleri, çay çöpü imha bölümü ve çalışanların dinlenme alanlarında çok yüksek risklere ulaşılmıştır. Yaş çay boşaltım ünitesinde yarı yarıya yüksek ve önemli risk seviyeleri bulunmaktadır. Soldurma ünitesi ise %50 yüksek risk, %33 önemli risk ve %17 oranında da çok yüksek risk barındırmaktadır. Kıvrırma ünitesi %56 oranında çok yüksek risk bulunması açısından en riskli alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Kurutma ünitesi de diğer bölümlere göre %33'lik oranla çok yüksek riskleri olan ikinci riskli alan olarak düşünülebilir ve ardından %25'lik bir oranla çok yüksek risk barındıran fermantasyon ünitesi de riskli alanlar arasında sayılmaktadır. Tasnif ünitesi ise % 67 oranında yüksek risk seviyesi tespit edilen ünite dir.

Acil durum tahliye planlarının olmaması, acil durumlarda devreye girebilecek şarjlı aydınlatmaların bulunmaması, fabrika bahçesinde araç ve yayalar ile ilgili uygun işaretlemelerin bulunmaması gibi tehlikelerin oluşturabileceği riskler, çok yüksek risk seviyesinde tespit edilmiştir. Fabrika içerisinde yangın algılama ve söndürme sistemlerinin bulunmaması, üretim binasının çok riskli bir alana dönüşmesine sebebiyet vermektedir. Özellikle, kurutma, tasnif ve çay çöplerinin fırınlarda yakıldığı bölümlerde çay tozunun yoğun olarak bulunması, yangının yayılma hızını arttıracığından, riskli alanlar arasında gösterilebilir. Üretim binasında acil durum tahliye planlarının olmaması, tahliyeyi geciktirmekte ve zorlaştırmaktadır. Çay üretiminin yoğun olduğu Mayıs ve Ekim aylarında, fabrika bahçesine yoğun araç giriş çıkışı yaşanmaktadır. Gün içerisinde yaklaşık 5 ya da 6 kere yaş çay yüklü kamyonlar yaş çay boşaltım alanına

gelmektedir. Bunların yanı sıra bahçe içerisinde iş makineleri, diğer araçlar ve yaya geçişleri olabilmektedir. Araç ve yaya yolları ayrılarak, araçların hız limitlerinin gösterilmesi, iş sağlığı ve güvenliği açısından alınması gereken önlemlerin başında gelmektedir.

3.1.2. FMEA Risk Değerlendirmesi

Fine-Kinney metodu ile analizi yapılan risklerden bazıları için FMEA yöntemine göre, tekrar risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Toplamda 40 hata incelenmiş olup kontrol edilen riske göre sıralanmış ve risk öncelik sıraları belirlenmiştir. Bu bölümde değerlendirme yapılırken, sadece bu fabrikada değil, genel olarak tüm sektörlerde karşılaşılabilecek tehlikeler değerlendirilmiştir. Kontrol edilen bu etmenlerin fabrikanın hangi bölümlerinde var olduğu Tablo 6'da özetlenmiştir.

İncelenen bu çay fabrikasında aksaklık yaşanması durumunda büyük hasarlara yol açabilecek alanlar ve durumlar incelenmiş ve risk seviyeleri tespit edilmiştir. Büyük bir alanı kaplayan ve birçok bölümü bulunan çay fabrikasında acil durumlar, hareketli ekipmanlar, yüksekten düşme, yüksekten malzeme düşmesi, çalışanların kayıp/takılıp düşmesi, fabrika bahçesinde çalışanlara ya da başka yerlere araç çarpması ile yaşanabilecek aksaklıklar değerlendirilmiştir. Kontrol edilen tehlikeli durumların birçok hataları bulunmaktadır. Hatalar ve kontrol edilen tehlikeli durumlar Tablo 7'de özetlenmiştir.

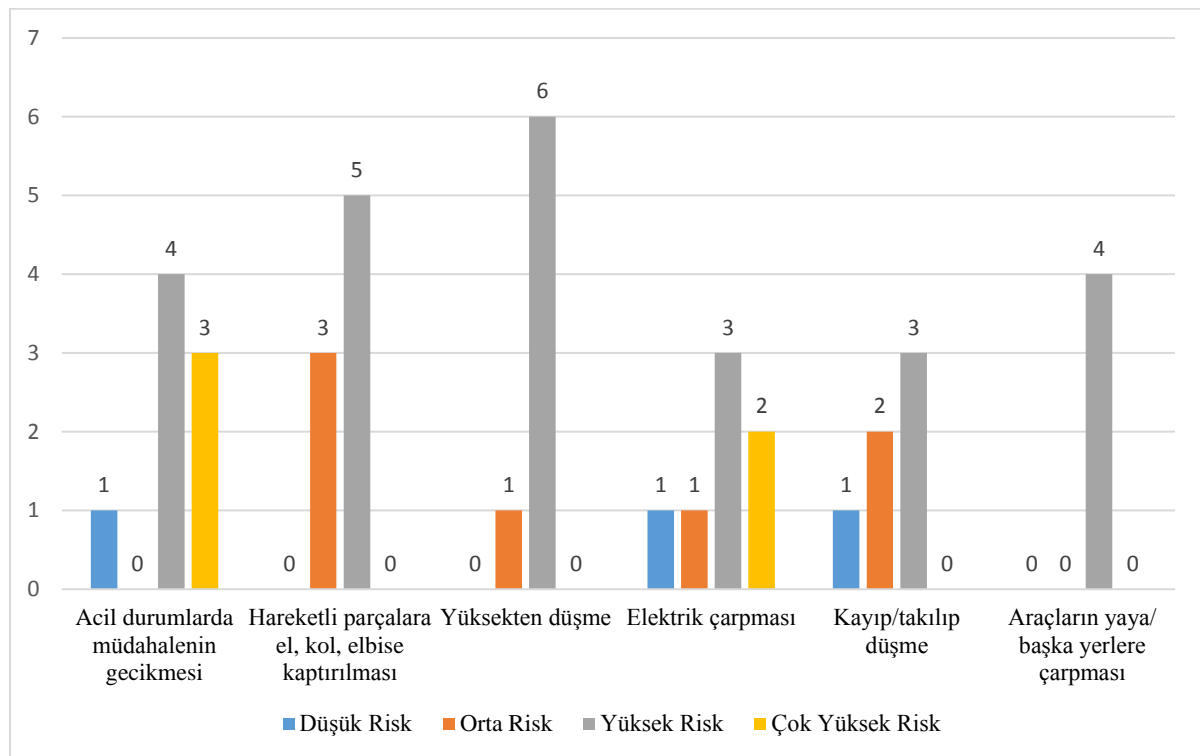
Kontrol edilen	Yaş çay Boşaltım Ünitesi	Soldurma Ünitesi	Kıvrırma Ünitesi	Fermentasyon Ünitesi	Kurutma	Tasif Ünitesi	Diğer
Acil durumlarda yaşanan gecikmeler	x	x	x	x	x	x	x
Hareketli parçalara el, kol, elbise kapıtılması	x	x	x	x	x	x	
Yüksekten düşme	x	x	x		x	x	x
Elektrik çarpması		x	x	x	x	x	x
Kayıp/takılıp düşme	x	x	x	x	x	x	x
Araçların yaya/başka yerlere çarpması	x					x	x

Bu hatalar incelenip ve parametrelere değer verilip hesaplandığında birçok risk seviyesine ulaşılmıştır. Bu risk seviyeleri Şekil 4'te gösterilmiştir.

Tablo 7. Tespit edilen hatalar

Kontrol Edilen	Hatanın Cinsi
Acil durumlarda müdahalenin gecikmesi	<ul style="list-style-type: none"> Acil durum tahliye planının görünür yerlere asılmamış olması Çalışanların tatbikat planına uymaması Kurutma ünitesinde acil durdurma butonunun işaretinin yıpranmış olması Çalışanların acil durum sırasında paniklemesi Yangın tüplerinin periyodik kontrollerinin yapılmamış olması Genel aydınlatmanın yetersiz olması Çalışanların stresli ve dikkatsiz olması Çalışanların dalgın ve uykusuz olması
Hareketli parçalara el, kol, elbise kapıtılması	<ul style="list-style-type: none"> Zincirler üzerindeki koruyucuların çıkarılmış olması Makinelerin koruyucularının çıkarılmış olması Bakım atölyesinde makinaların uyarıcı işaretlemelerinin yıpranmış olması Çalışanların bol elbise giyinmeleri Çalışanların stresli ve dikkatsiz olması Çalışanların dalgın ve uykusuz olması Çalışanların kişisel koruyucu donanımlarını kullanmamaları Aydınlatmanın yetersiz olması
Yüksekten düşme	<ul style="list-style-type: none"> Yaş çay boşaltımı sırasında çalışanların kamyon üzerine çıkarak müdahale etmesi Soldurma ünitesinden kıvrırma ünitesine çay aktarılan kanalların koruyucularının çıkarılmış olması Çalışanların stresli ve dikkatsiz olması Çalışanların dalgın ve uykusuz olması Kıvrırma ünitesinde yüksekte çalışma yapılan yerlerde çalışanların emniyet kemeri takmaması Yüksekte çalışma eğitimi almayanların yüksek platformlarda çalışması Aydınlatmanın yetersiz olması

Elektrik Çarpması	<ul style="list-style-type: none"> • Soldurma ünitesinin tavanında açıkta kablo bulunması • Elektrik ile ilgili yetkili olmayan kişilerin müdahalesi • Çalışanların stresli ve dikkatsiz olması • Çalışanların dalgın ve uykusuz olması • Kaçak akım rölesinin bozuk olması • Semaverde elektrik kaçağı olması • Elektrik panolarının önünden yalıtkan paspasın kaldırılması
Kayıp/Takılıp Düşme	<ul style="list-style-type: none"> • Fermantasyon ünitesinde, su buharı üretilen yerde bulunan ıslak zeminin kurutulmamış olması • Kurutma ünitesinde, zeminde bulunan yoğun çay tozunun temizlenmemiş olması • Kazan dairesinde zeminde (geçiş güzergahında) boru bulunması • Çalışanların stresli ve dikkatsiz olması • Çalışanların dalgın ve uykusuz olması • Aydınlatmanın yetersiz olması
Araçların yaya/ başka yerlere çarpması	<ul style="list-style-type: none"> • Sürücünün ve yayanın dalgın/dikkatsiz olması • Sürücülerin ehliyetsiz olması • Araçların hız limitlerinin uygun konumlarda gösterilmemiş olması • Aydınlatmanın yetersiz olması



Şekil 4. FMEA yöntemine göre tespit edilen risk seviyeleri

Şekil 4'teki hatalar incelendiğinde çok yüksek risk seviyelerinin acil durumlara müdahalenin gecikmesinde ve elektrik çarpmasında olduğu görülmektedir. Genel olarak yüksek risk seviyeleri tümünde varolmakla beraber, yüksekten düşme tehlikesinde daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Tehlikelerin tamamına bakıldığında ise düşük risk seviyelerinin minimum düzeyde olduğu gözükmektedir. Acil durumlara müdahalenin gecikmesine neden olan hataların risk seviyelerine bakıldığında, yüksek risk %50'lik, çok yüksek risk %37 ve düşük risk ise %13'lük bir dilimi kapsamaktadır. Hareketli parçalara el, kol sıkışmasına neden olan hatalarda %62'lik bir oranda yüksek risk ve %38 oranında orta risk seviyesine ulaşılmıştır.

Yüksekten düşmeye neden olan hatalarda ise %86 oranında yüksek risk ve %14 oranında orta risk seviyesi tespit edilmiştir. Elektrik çarpması ile ilgili hatalar %43 yüksek risk, %29 çok yüksek risk, %14 orta ve düşük risk seviyelerinde bir dilimi kapsamaktadır. Kayıp takılıp düşmeye sebebiyet verecek hatalarda %50 yüksek risk, %33 orta risk ve %17 düşük risk seviyelerine ulaşıldığı gözükmektedir. Araçların çarpmasına neden olan hataların tamamının risk seviyesi yüksek olarak tespit edilmiştir.

Fabrikada yer alan tehlike ve riskler, Fine-Kinney ve FMEA risk analiz yöntemi ile değerlendirilmiş olup, alınması gereken önlemler Tablo 8'de gösterilmiştir.

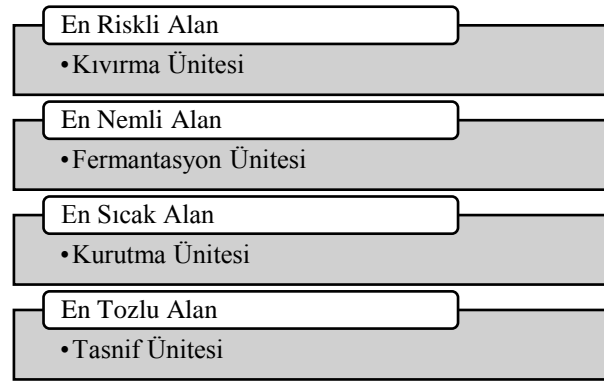
Tablo 8. Alınması gereken önlemler

Önem	İlgili Mevzuat
<ul style="list-style-type: none"> İş ekipmanının kullanım koşulları, meydana gelebilecek normal olmayan durumlara ilişkin talimatlar görünür yere asılmalıdır. Bu talimatlar hazırlanırken yalnız bir dille ve anlaşılabilir şekilde olmasına dikkat edilmelidir. 	İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği [30]
<ul style="list-style-type: none"> İşyerinin büyüklüğüne ve işyerinde bulunan makinelerin özelliklerine göre ve ayrıca çalışan sayısına göre yangın güvenliği ile ilgili önlemler alınması gereklidir. Yangın algılama ve söndürme sistemlerinin, tüm hatların kaçak, kopuk, kısa devre ve yapılan işten dolayı kaynaklanan olumsuz durumlara karşı önlem alabilmesi gerekmektedir. 	İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik [31] Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik [32]
<ul style="list-style-type: none"> Olası acil durumlarda tahliyenin sorunsuz gerçekleştirilmesi için acil kaçış yollarının her koşulda aydınlık olması gerekmektedir. Acil durumlarda devreye girecek aydınlatma sistemi en az 60 dakika süre ile devam etmelidir. Bu durum 200'den fazla çalışanı olan bir yer için 120 dakika olarak belirlenmiştir. 	Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik [32]
<ul style="list-style-type: none"> İş ekipmanlarının tehlikeli ya da olağan durumlarda durdurulmasını sağlayacak acil durdurma sistemi bulunmalı ve yeri işaretlenmelidir. 	İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği [30]
<ul style="list-style-type: none"> Tahliye planları herkesin görebileceği yerlere asılmalıdır. İşyerlerinde acil durumların meydana gelmesi halinde çalışanların korunabilmesi için acil durum planları hazırlanmalıdır ve çalışanlar bununla ilgili eğitilmelidir. Acil durum planları oluşturulurken çalışanlar dışında ziyaretçiler ya da müşteriler de düşünülmelidir. 	Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik, [33]
<ul style="list-style-type: none"> Hareketli parçalarla teması önleyecek koruyucular yapılmalıdır. Bu koruyucular tehlikeye uygun ve sağlam yapıda olmalıdır. 	İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği [30]
<ul style="list-style-type: none"> Hareketli makineler çalışanlar açısından tehlike oluşturmamalıdır. Bu nedenle makinelerin hareketli kısımları ile çevresi arasında uygun mesafe bulundurulmalıdır. 	İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği [30]
<ul style="list-style-type: none"> Yüksek geçit-platformlarda, çalışma alanında serbestlik bulunan düşme riski olan taraflara uygun korkuluklar yapılmalıdır. Yüksekte çalışma yapılan yerlere korkuluk yapılmalıdır. Bu korkuluklar platformdan en az 1 metre yükseklikte olmalıdır ve 125 kilogramlık yüke karşı dirençli olmalıdır. Ayrıca platform ile bitişik şekilde 15 santimetre yüksekliğinde topuk levhası yapılmalıdır. Topuk levhası ve ana korkuluklar arasındaki boşluklarda 47 santimetreden fazla olmayacak şekilde ara korkuluklar bulunmalıdır. 	İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik [31] Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği [34]
<ul style="list-style-type: none"> İşin özelliklerine uygun vücut kemer sistemleri veya buna benzer güvenlik sistemleri kullanılmalıdır. Çalışanlara işe ve standartlara uygun donanımlar temin edilmeli ve çalışanların bunları kullanması sağlanmalıdır. 	Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği [34]
<ul style="list-style-type: none"> Yüksek geçitler, düşme riski bulunan yerlere düşmelere karşı koruyan korkuluklar yapılmalıdır. 	İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik [31]
<ul style="list-style-type: none"> Malzeme transferi yapılan ve aynı zamanda yayalar tarafından kullanılan yollar, işin kapladığı alana göre işaretlenmelidir. 	İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik [31]
<ul style="list-style-type: none"> Kaygan olan zeminler tozdan arındırılıp, kaymayı önleyici tedbirler alınmalıdır. 	Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği [34]
<ul style="list-style-type: none"> İşyeri alanındaki ana yollar, gözetim ve denetim için kullanılan tali yollar, yükleme boşaltma yerlerine giden yollar yönlendirme tabelalarıyla gösterilmelidir. 	İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik [31]
<ul style="list-style-type: none"> Araç ve yaya geçiş yolları güvenliği sağlayacak şekilde belirlenmeli ve işaretlenmelidir. 	İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik [31]

Tablo 8’de fabrikanın tüm alanlarında, alınması gereken önlemler genel olarak belirtilmiştir. Tüm çalışmalar değerlendirildiğinde, fabrikada yüksek risk oluşturan çay tozu ve bundan kaynaklanabilecek yangın, büyük hasarlara neden olabileceği ihtimali yüzünden oldukça önemlidir. Yangın algılama ve söndürme sistemleri en kısa sürede yapılmalı ve ayrıca acil durumlarda koordinasyonun sağlanması için tahliye planları önemsenmeli, uygun yerlere asılmalıdır. Yine fabrikaya gündüz ve gece, yoğun bir şekilde araç giriş çıkışı olduğu için, fabrika bahçesinde işaretlemeler ve tabelalar düzenlenmelidir. Tüm sektörlerde olduğu gibi çay endüstrisinde de çalışanların iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri önemsenmeli ve aksatılmamalıdır.

Çay endüstrisinin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi amaçlanan bu çalışmada, Rize’de bulunan bir çay fabrikasında Fine-Kinney ve FMEA risk değerlendirme yöntemi kullanılarak, risk değerlendirme yapılmıştır. Fine-Kinney yöntemi ile fabrikada bulunan tüm tehlike ve riskler analiz edilip risk skorlarına ulaşılmıştır. FMEA yöntemi ile ise fabrikada bulunan tüm tehlikelerden ziyade, daha genel, her sektörde karşılaşılabilecek tehlikeler değerlendirilip sonuçlar elde edilmiştir. Risk değerlendirme yapılan çalışma alanının tamamı düşünüldüğünde, en çok çayın hasadı ve üretimi safhalarında iş sağlığı ve güvenliği açısından tehlike ve riskler bulunmaktadır. Çayın hasat edilmesi aşamasında ergonomik risk etmenleri ve üretim aşamasında da fiziksel risk etmenleri çoğunluktadır. Fiziksel risk etmenlerinden toz, gürültü, termal konfor ve mekanik tehlikelerin bulunduğu siyah çay imalat binası büyük önem arz etmektedir. Ardından kazan dairesi, atölyeler, yaş çay boşaltım alanı, kuru çay yükleme alanı da bu önemli bölgeler arasında yer almaktadır.

Soldurma ve kurutma ünitelerinde ise yüksek risk bulunması açısından, kıvrırma ünitesinden sonra en riskli alanlar arasında gösterilebilir. Soldurma ünitesinden kıvrırma ünitesine çay aktarımı yapılan alanlarda bulunan korkulukların çıkarılmış olması, düşme riski barındırması açısından oldukça önemlidir. Kıvrırma ünitesinde yüksekte çalışma alanı bulunması, burada çok yüksek risk skorlarına ulaşılmasını beraberinde getirmiştir. Ayrıca bu ünitenin, fabrikanın en gürültülü alanı olması (mesleki maruziyet sınır değerini aşan gürültü düzeyi bulunması), meslek hastalığına yakalanma riskini artırmaktadır. Tüm bu üniteler incelendiğinde fabrikadaki üniteler arasında en riskli alan kıvrırma ünitesi olarak belirlenmiştir. Ayrıca en nemli alanı fermantasyon ünitesi, en tozlu alanı tasnif ünitesi ve en sıcak alanı kurutma ünitesi olarak belirlenmiştir. Bu ünitelerin kısaca özeti Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Fabrika üniteleri ve riskler

IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Çay fabrikasında var olan tüm tehlike ve risklerin analiz edilmesi için Fine-Kinney risk analiz yöntemi kullanılmıştır. Tüm sektörlerde, risk değerlendirmesinin kolayca gerçekleşmesini sağlayan bu yöntem, yapılan çalışmadan verimli sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamıştır. Bu metod, riskleri derecelendirirken hangi iş bölümüne ne derecede önem verilmesi gerektiğini göstermektedir. Böylelikle, çay fabrikasında var olan üretim bölümlerinin, iş sağlığı ve güvenliği açısından ne derece tehlikeli olduğu bu yöntem ile açıklanmıştır. Yapılan analize göre, önemli çay üretim bölümlerinden biri olan kıvrırma aşaması, iş güvenliği açısından en riskli alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca fabrika genelinde ve üretim bölümlerinde iş güvenliği önlemlerinin varlığı, çalışanların sağlığı açısından oldukça önemlidir. Fabrikanın her alanında iş sağlığı ve güvenliğinin önemi, yapılan bu analiz ile vurgulanmıştır. Fine-Kinney metodu ile yapılan bu çalışmada, çay üretim sektörünün, iş sağlığı ve güvenliği açısından önem verilmesi gereken bir alan olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan diğer risk analiz yöntemi FMEA’dır. FMEA risk değerlendirme yönteminin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Tehlikelere neden olan hataların belirlenmesi, proaktif çözümler üretebilmek adına avantaj olarak görülebilmektedir. Fark edilebilirlik parametresi bazı durumlarda dezavantaj olabilmektedir. Hatanın fark edilebilirliği yüksek ise verilen değer o kadar düşük olmaktadır. Dolayısı ile hatanın olasılığı, şiddeti ve farkedilebilirliğinin çarpılması ile bulunan RÖS (Risk Öncelik Sayısı) değeri, farkedilebilirliğin düşük olması sebebi ile önlem almayı gerektirmeyen bir değer olabilir. Bu durum ise olasılığı ve etkisi büyük olan bir hatanın göz ardı edilmesine sebebiyet verebilir. Yine de farkedilebilirliğin yüksek olması, hatanın kolay saptanması açısından önem kazandığı için hatanın meydana gelmesi de anlık olarak engellenebilir.

FMEA yöntemi, her sektörde Fine-Kinney kadar sık kullanılmamaktadır ama üretim sektöründe, özellikle proses hatalarının tespit edilebilmesi açısından tercih edilen bir yöntemdir. Bir üretim sektörü olan çay

endüstrisinde yapılan risk değerlendirmesi sonuçlarına göre, eski bir fabrika olmasından kaynaklanan yapısal eksikliklerin bulunduğu ve bazı bölümlerde iş güvenliği açısından önlemlerin yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Fabrika ve çevresinde, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının kolayca hayata geçirilebileceği bir altyapı bulunmaktadır. Çalışanların ve yönetimin karşılıklı özverisi ile güvenli çalışma ortamı oluşturulması mümkündür.

Bilindiği üzere, çay üretim sektörü İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği'ne göre az tehlikeli sınıfta yer almaktadır. Yapılan tüm iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları bir bütün olarak değerlendirildiğinde ise, bu sektörde çay tozu patlaması, döner aksamli makinelerin kullanılması, yüksekte çalışmaların yapılması, ergonomik olarak tekrarlayan hareketlerin sıklığı ve ağır yük kaldırılması gibi çeşitli tehlikelerin ve risklerin bulunduğu aşikârdır. Dolayısı ile yapılan bu çalışmada çay endüstrisinde çok yüksek risk seviyelerinin çoğunlukta olduğu görülmüştür. Az tehlikeli sınıfta yer alan bu sektörün tehlike sınıfının artırılmasının daha uygun olabileceği düşünülmüştür. Böylece en azından tam zamanlı bir B sınıfı uzmanın istihdamı ile birlikte kontroller daha sık ve düzenli yapılabilir, risk değerlendirme ve acil durum planlarının yenilenme periyodu daha sıklaştırılabilir ve tehlikeler ile risklerin gözden kaçırılmasının nispeten önüne geçilebilir. Ayrıca, çalışanların eğitimlerinin daha sıklaştırılması gibi faaliyetler ile çalışanlara güvenlik kültürü daha rahat aşılanabilir.

Yapılan bu çalışma sonucunda çay endüstrisinin iş sağlığı ve güvenliği açısından önemi vurgulanmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesi'nin önemli geçim ve istihdam kaynağı olan çay üretim sektörü, iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları ile daha verimli hale getirilebilir. Çalışanların sağlığı gözetilerek, güvenli çalışma ortamı oluşturulmalı ve kaliteli çay üretimi için tüm imkânlar oluşturulmalıdır.

TEŞEKKÜR BÖLÜMÜ

Bu çalışma, Marmara Üniversitesi "Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü" tarafından "FEN-C-YLP-250919-0281" numaralı proje çerçevesinde desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Korkmaz, Furkan. (2012). *Türkiye Çay Sektörünün Mevcut Durumu ve Bir Çay Fabrikasında Enerji Verimliliği Analizi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.
- [2] Sarıahmetoğlu Yetiş, Tanrıvermiş, D. Harun., Karakaş, D. Ayşen., & Günler, Nahide. (1997). *Çayda Yeniden Yapılanma* (Cömertler Matbaası b.). İstanbul: İpekyolu Yayıncılık.
- [3] İş Kanunu. (2003, Mayıs 22). Resmi Gazete (Sayı: 4857 (Mükerrer)). Ocak 2020 tarihinde <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.4857.pdf> adresinden alındı

[4] Başer, Ahmet. (2006). *Türkiye'de Tarım Destekleme Politikaları ve Çay Sektörü*. İstanbul: Marmara Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[5] Erdoğan, Mehmet. (2019). *Türk Çay Sektörü Genel Durum Raporu*. Rize: Rize Ticaret Borsası.

[6] *Kobi Strateji Yönetim ve Danışmanlık*. (2020, Ocak 11). [nacesorgulama.com: http://www.nacesorgulama.com/nace-kodu/10.83.01](http://www.nacesorgulama.com/nace-kodu/10.83.01) adresinden alındı

[7] İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği. (2012, Aralık 26). Resmi Gazete (Sayı No: 28509 (Mükerrer)). Ocak 11, 2020 tarihinde <https://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=9.5.16909&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch=i%C5%9Fyeri%20tehli> adresinden alındı

[8] Borgohain, Parijat. (2013). Occupational Health Hazards of Tea Garden Workers Of Hajua And Marangi Tea Estates of Assam, India. *The Clarion*, 129-140.

[9] Mittal, Dr Ashish., & Gupta, Rohit K. (2008, March). Plucking the Pain . New Delhi : Centre for Education and Communication .

[10] Yıldızlar, Hüseyin. Yamaç. (2018). *Çay Fabrikasında Gürültü, Titreşim ve Termal Konfor Parametrelerinin Araştırılması*. Trabzon: Avrasya Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[11] Çol, Sinan. (2019). *Çay İşletmelerinde Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Algularının Değerlendirilmesi*. Rize: Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[12] Metin Tunay, A. B. (2018). Ormanlık Çalışmalarında İş Güvenliği Analizinin Uygulanması (Karabük Orman İşletmesi Örneği). *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 124-129.

[13] Kılıcı, Sevd. (2015). *İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi Kapsamında Risk Değerlendirmesi : "Sağlık Sektöründe Bir Uygulama"*. İzmir: Gediz Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[14] Sarılar, Ayşe. (2015). *Bir Gıda İşletmesinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden Risk Değerlendirmesi*. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[15] Taşçı, İbrahim. Eray. (2018). *Ecza Depolarında İş Sağlığı ve Güvenliği*. İstanbul: Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[16] Yahyalı, Betül. Sultan. (2018). *Telekomünikasyon Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi*. Kayseri: Erciyes Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[17] Uzundede, Jale. (2017). *Otomobil Bakım Servislerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Önlemlerinin Sağlanmasına Yönelik Bir Örnek Alan İncelemesi*. İstanbul: Üsküdar Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[18] Yamurluklu, Yasemin. (2019). *Plastik Sektöründe Fine Kinney Metodu ile Risk Değerlendirmesi*. Ankara: Gazi Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[19] Ateş, Özge. Tuğçe. (2018). *İş Sağlığı ve İş Güvenliğinde Risk Analizi: Mobilya Sektöründe Bir*

Uygulama. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[20] Efe, Burak, Yerlikaya, Mehmet. Emin, & Ege, Ömer Faruk (2016). İş Güvenliğinde Bulanık Promethee Yöntemiyle Hata Türleri ve Etkilerinin Analizi: Bir İnşaat Firmasında Uygulama. *GÜFBED/GUSTIJ*, 126-137.

[21] Uslu, Mustafa Kemal, (2016). *Laboratuvar Çalışanlarının Karşılaştığı Fiziksel Risklerin Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) İle Değerlendirilmesi: Bir Üniversite Hastanesi Örneği*. Konya: Selçuk Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[22] Topaloğlu Güler, Koç Ali, Yağlı Hüseyin, & Öztürk, Nurhan A. (2015). Yüksek Fırımların İşletilmesinde Risk Değerlendirilmesinin Yapılması ve Geliştirilmesi. *Mühendis ve Makine*, 55-63.

[23] Karakaya, Ferdi. (2015). *Ticari Araç Üretiminde Risk Değerlendirmesi*. Ankara: Gazi Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[24] Eskiömeroğlu, Başak. (2018). *Tam Teşekküllü Spor Komplekslerinin Risk Analizlerinin Fine Kinney ve 5x5 L Matris Yöntemleri ile Yapılarak Karşılaştırılması*. İstanbul: Gedik Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[25] Özkan, Acuner. (2019). *İki Farklı İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Metodolojisinin Bir İşletmede Uygulamalı Karşılaştırılması*. Kütahya: Dumlupınar Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[26] Yıldırım, Meryem. (2019). *Hastane Sektöründe Fine Kinney ve Fmea İsig Risk Değerlendirmesi Uygulamalarının Karşılaştırılması Yönünde Bir Saha Çalışması*. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[27] Devren, Mehmet. E. (2016). *Asansör Sistemlerinde FMEA ve Fine-Kinney Metodlarının Risk Değerlendirmelerinin Karşılaştırılması*. İstanbul: İstanbul Aydın Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek

Lisans Tezi.

[28] Turan, Mert. (2018). *Transformatör Üreten Bir Firmada Bulanık Fmea ile Risk Analizi Uygulaması*. Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[29] Güneysu, Gülşah. (2016). *Bir Kereste İşletmesi Üretim Sürecinde İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Çalışması*. Bartın: Bartın Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.

[30] İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği. (2013, Nisan 25). Resmi Gazete (Sayı No: 28628 (Mükerrer)). Aralık 18, 2019 tarihinde

<https://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Asp?MevzuatKod=7.5.18318&MevzuatIliski=0> adresinden alındı

[31] İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik. (2013, Temmuz 17). Resmi Gazete (Sayı No: 28710 (Mükerrer)). Aralık 28, 2019 tarihinde <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/07/20130717-2.htm> adresinden alındı

[32] Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik. (2007, Aralık 19). Resmi Gazete (Sayı No: 26735 (Mükerrer)). Aralık 28, 2019 tarihinde <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/3.5.200712937.pdf> adresinden alındı

[33] Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik. (2013, Haziran 18). Resmi Gazete (Sayı No: 28681 (Mükerrer)). Aralık 28, 2019 tarihinde <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/06/20130618-8.htm> adresinden alındı

[34] Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. (2013, Ekim 5). Resmi Gazete (Sayı No: 28786 (Mükerrer)). Aralık 28, 2019 tarihinde <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/10/20131005-2.htm> adresinden alındı

Experimental and Numerical Analysis of a Waste Cooking Oil Biodiesel Blend used in a Compression Ignition Engine

Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Kullanılan Atık Yemek Yağı Biyodizel Karışımının Deneysel ve Sayısal Analizi

Ramazan ŞENER¹ 

¹ Batman University, Automotive Engineering Department, 72100, Batman, Turkey

Abstract

It is necessary to meet increasingly stringent emission standards of IC engines, reducing the emission values. While improving engine parameters and combustion chamber geometries can reduce emissions, also the research continues for alternative fuels. Biodiesel production from waste cooking oils has advantages in terms of recycling, environment, and cost. Waste cooking oils can be used as fuel in compression ignition (CI) engines with minor modifications. Biodiesel can be used in neat form or blend with diesel. In this way, there is no need to make any modifications to the existing diesel engines. In this study, diesel was blended with biodiesel at 20% (B20) and it was used as fuel in a CI engine. The performance and emission values of this blend were compared according to neat diesel fuel. As a result of the experimental and CFD simulation studies, it was observed that the use of the B20 fuel blend reduced CO emissions by 22.7% and soot emissions by 15.6%. In addition, the maximum pressure inside the cylinder has decreased by 2.7%.

Keywords: CI engine, waste cooking oil, biodiesel, CFD, emission.

Öz

İçten yanmalı motorların emisyon değerlerinin azaltılması, gittikçe katılan standartların karşılanması için gereklidir. Motor parametreleri ve yanma odası geometrilerinin iyileştirilmesi emisyonları azaltılabileceği gibi, alternatif yakıt arayışları da sürmektedir. Atık yemek yağlarından biyodizel üretimi, hem geri dönüşüm ve çevre duyarlılığı bakımından hem de maliyet bakımından avantajları olmaktadır. Atık yemek yağlar, küçük modifikasyonlarla, yakıt olarak kullanılabilir duruma gelmektedir. Üretilen biyodizel saf halde kullanılabilir gibi, dizel ile karıştırılarak kullanılabilir. Bu şekilde, mevcut dizel motorlarda herhangi bir modifikasyon yapmaya gerek kalmamaktadır. Bu çalışmada, %20 oranında biyodizel, dizel ile karıştırılarak, yakıt olarak sıkıştırma ateşlemeli bir motorda kullanılmıştır ve saf dizel yakıt kullanıma göre performans ve emisyon değerleri karşılaştırılmıştır. Deneysel ve CFD simülasyon çalışmaları sonucunda, B20 yakıt karışımı kullanımıyla, CO emisyonlarında %22.6 ve is emisyonlarında %15.6 oranında azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca silindir içi maksimum basınç, %2.7 oranında azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sıkıştırma ateşlemeli motor, atık yemek yağı, biyodizel, HAD, emisyon.

I. INTRODUCTION

Internal combustion engines struggle to meet increasingly stringent emission standards. In order to cope with these emission standards, very high-efficiency internal combustion engines need to be produced. It is aimed to reduce exhaust emissions that threaten human health. To increase engine efficiency, it is important to optimize the injection parameters and to design the optimum combustion chamber, while reducing emission value can be achieved by using alternative fuels.

Among alternative fuels, biodiesel is promising because of biodegradable, requiring only slight modification, and does not contain sulfur or aromatics [1]. Biodiesel is a safer fuel because it has a high flash point [2]. It is also biodegradable, non-toxic, and better lubricity [3]. The most important disadvantage of biodiesel is the high cost hereby it is not common to use [4,5]. Of course, the waste cooking oil (WCO) has a lower cost than virgin oils, it can be produced at about 45% lower cost [6–8]. It has similar emission characteristics to other types of biodiesel. The WCO biodiesel burns with lower temperatures, thus resulting in lower NO_x emission [9–12]. However, in some other studies, NO_x increases and soot emissions decrease compared to the known high NO_x profile of biodiesel [13–17].

The combustion chamber design is important for emission formation. In this regard, experimental studies give a limited understanding of emission formation and the contribution of engine geometry to emission formation.

Corresponding Author: Ramazan ŞENER, Tel: +904882174029, e-posta: ramazan.sener@batman.edu.tr

Submitted: 20.11.2020, **Revised:** 09.03.2021, **Accepted:** 09.03.2021

In addition, the reason for the results is no more than assumptions. Herein computational fluid dynamics (CFD) simulations provide a satisfactory and deep insight into the oxidation and emission generation [18–21]. Also after validation of numerical results, some modifications and new setups can be investigated by simulations [22]. Venu et al. investigated the combustion chamber geometry of alumina added biodiesel-diesel-ethanol fueled on Diesel-RK software and it was found that toroidal re-entrant combustion chamber improves combustion efficiency [23]. Ismail et al. used the Comment code for the numerical study of jatropha and canola-fueled diesel engines. Performance results correspond with experimental results successfully, with a 2.7% error [24]. Asadi et al. investigated the effect of biodiesel premixing on performance and emission with AVL Fire commercial code. According to results, premixing biodiesel results in lower soot and higher NO_x [25]. Rajak et al. have been conducted nine different biofuels fueled diesel engines on Diesel-RK. It is concluded that biofuels have lower soot and smoke profile than neat diesel [26]. Zhao et. al studied unsaturated biodiesels' effects on the mass and size of soot by KIVA4-Chemkin software. According to results, biodiesels suppress the formation of soot. However, it is found that unsaturation raises soot formation regarding mass and size [27]. Akçay et. al investigated a compression ignition (CI) engine fueled with the diesel-WCO biodiesel blend and adding hydrogen to intake air. They obtained that NO_x and HC emissions decreased on low and medium loads with the hydrogen addition while and break specific fuel consumption (BSFC) decreased for all working conditions [28].

In order to see the contribution of the combustion engine design as well as fuel properties in emission formation, in this study, the Converge CFD commercial code was used. WCO biodiesel was selected as an alternative fuel and 20% biodiesel - 80% diesel was chosen for CFD analyses since the best results obtained from this blend regarding reduction in all emissions and minimum BSFC according to experimental studies.

II. MATERIAL AND METHOD

2.1. Biodiesel Production

The transesterification method is used for waste cooking oil-based biodiesel production. This method consists of filtration to remove solid materials from waste cooking oil (WCO), heating to evaporate and remove water from WCO, dissolving alkalis as catalysts in alcohol solutions, mixing to make catalyst-containing alcohol solutions. Fig. 1 shows the schematic of biodiesel production. The properties of diesel and WCO-biodiesel used in this study are given in Table 1. Biodiesel has lower LHV, and higher density compared to diesel.

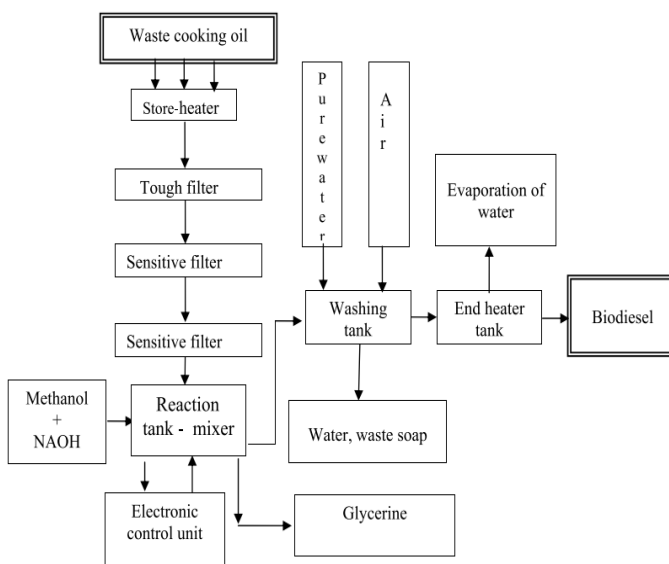


Figure 1. Schematic of the biodiesel production from waste cooking oil [29].

Table 1. Properties of diesel and WCO-biodiesel.

Property	Diesel	B20	WCO-Biodiesel
Density [kg/m^3]	842	849	879
Cetane number [-]	54.9	55.3	56.7
Kinematic viscosity [mm^2/s]	2.93	3.21	4.34
Cloud point [$^{\circ}\text{C}$]	-4.3	-2.2	6.0
Lower heating value [MJ/kg]	42.78	42.14	39.59
Flash point [$^{\circ}\text{C}$]	92.5	110.4	182.0

2.2. Experimental Setup

Experiments were conducted to evaluate the performance and emission of diesel and WCO-based biodiesel fuels using a single-cylinder, four-stroke, direct injection, and water-cooled, naturally aspirated diesel engine. Experiments have been performed in Engine Research Laboratory, Yıldız Technical University. The experimental setup is shown in Fig. 2 and the specifications of the engine are referred to as Table 2.

Table 2. Test Engine Specifications.

Engine model and type	Single Cylinder, four-stroke, Compression Ignition and naturally aspirated
Total displacement	510 cm^3
Bore / Stoke	85 / 90 mm
Connecting rod length	144.5 mm
Compression ratio	17.5
Max. Power	9 kW at 2700 rpm
Max. Torque	32 Nm at 1800 rpm
Injection type	mechanical, 20 MPa
Cooling	water

The test engine was coupled with Kemsan 20 kW electrical dynamometer using Esit branded load cell to measure torque. In-cylinder pressure was measured using an AVL QC34D piezoelectric sensor with a water-cooled. Indismart Gigabit amplificatory was used to amplify obtained voltages from the pressure sensor. Crank angle determination was carried out by AVL 365c encoder. Collected values from the encoder and amplificatory rendered by AVL Indicom v2.4 software. Krohne Optimas 3400 flowmeter was used for fuel mass flow measurement. In addition, exhaust and cooling water temperatures are measured by Tekon TT model thermocouples.

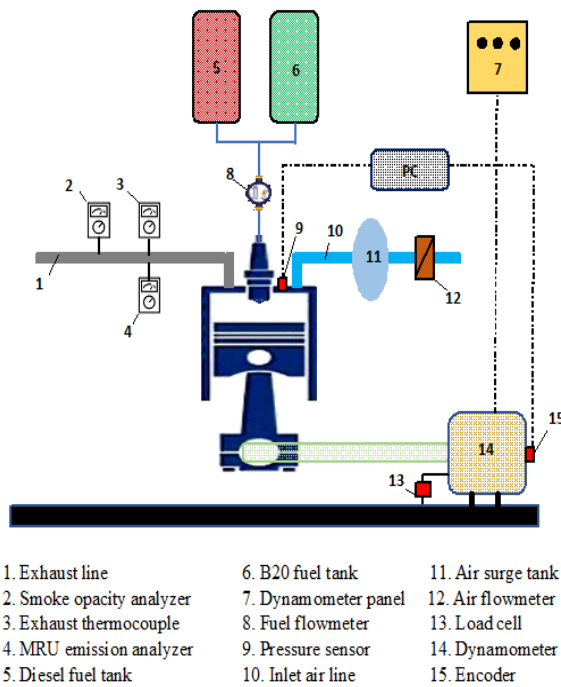


Figure 2. Schematic view of the experimental setup

Exhaust emissions were measured by MRU gas analyzer, which has 10 ppm, 0.03%, 0.5%, 5 ppm, 5 ppm measurement sensitivity for CO, HC, CO₂, NO₂, and NO. In addition, Bosch BAE 070 gas analyzer was used to measure diesel smoke opacity (Table 3).

Table 3. Measurement range and sensitivity of exhaust emissions.

Emissions	Sensitivity	Measurement range
HC	% 0.03	0-10000 ppm
CO ₂	% 0.5	% 0-30
CO	10 ppm	0-4000 ppm
NO ₂	5 ppm	0-200 ppm
NO	5 ppm	0-1000 ppm

Experiments were performed at full load and 2700 rpm. The biodiesel ratio in the blend was chosen as 20% and compared with neat diesel. Measurements were started after exhaust temperatures reach stable conditions. In-cylinder pressure values were averaged over 50 cycles.

2.3. CFD Model

The CFD simulations of the test engine were performed using the Converge CFD tool [30]. The piston bowl of the engine was asymmetrical, however, the full engine with intake and exhaust ports and sector mesh geometries were used for an accurate model. The fluid geometry of the test engine is extracted from the solid body (fig. 3). The domain was meshed with the modified cut-cell cartesian method. The adaptive mesh refinement (AMR) method was employed as a compromise between accuracy and computational runtime. The simulation flow process chart is illustrated in fig. 4.



Figure 3. The fluid domain of the CFD model as a sector and full engine at TDC.

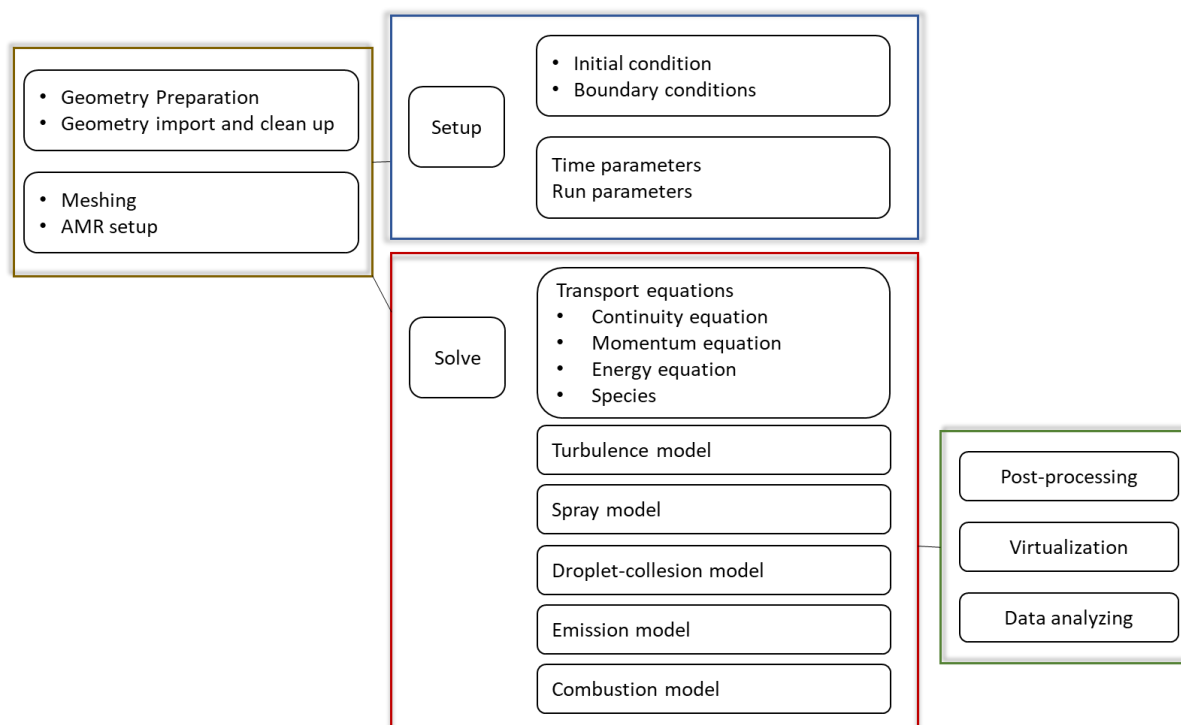


Figure 4. The flow chart of the CFD simulation.

The renormalization group (RNG) k - ϵ model was used as a turbulence model to solve in-cylinder flow because of its accuracy and effectiveness [31]. A detailed chemistry solver (SAGE) was preferred with detailed chemical kinetics to model the in-cylinder combustion [32]. The reaction mechanism that able to predict the ignition delay, flame lift-off length and equivalence ratio under various conditions for biodiesel used in the simulations was developed by Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) [33]. This mechanism consists of 115 species and 460 reactions for a tri-component biodiesel surrogate as methyl decanoate, *n*-heptane, and methyl 9-decenoate. The O'Rourke and Amsden model was selected to simulate the wall heat transfer [34]. The diesel and WOC-biodiesel were defined with fuel specifications in the CFD software. 2.0×10^5 of the drop parcels per injector hole were introduced to present an identical set of drops. The hybrid Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor (KH-RT) spray breakup mechanism was used to breakup processes and spray atomization [35,36]. The No Time Counter (NTC) method was used to model the collision process [37]. NO_x formation was calculated utilizing the expanded Zeldovich mechanism [38]. Soot formation was estimated using the Hiroyasu-NSC empirical soot model [39].

The B0 (neat diesel) and B20 (20% biodiesel + 80% diesel) were used to validate the experimental data. The test engine operating parameters were listed in table 4. The experimental conditions were adopted to the CFD model.

Table 4. Test engine operating parameters.

Pressure at IVC	106.52 kPa
Temperature at IVC	341.87 K
IVC	129° bTDC
EVO	137° aTDC
Fuel	Diesel and WCO Biodiesel
Injected fuel mass	26.54 mg (B0) and 27.3 mg (B20)
SOI	20° bTDC
Injection pressure	20 MPa
Compression ratio	17.5:1
Spray angle	120 gree

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Combustion Characteristics

Biodiesel has an important effect on reducing emissions with diesel mixture. According to previous studies, the B20 blend can be used without the need for a change on the CI engine and a significant reduction in the exhaust emissions can be achieved [40]. Results of B0 and B20 fuel blends experiments and the CFD simulation at full-load and 2700 rpm were compared in fig. 5 and 6. The In-cylinder pressure of the experiment and the simulation have a good consistency and the average deviation is less than 3.56% for B0 and 3.95% for B20. The CFD model was deemed to be effectively calibrated, as stated in. Thus, the effects of biodiesel blends on combustion, and exhaust emissions have been investigated by using experimental methods with the CFD model.

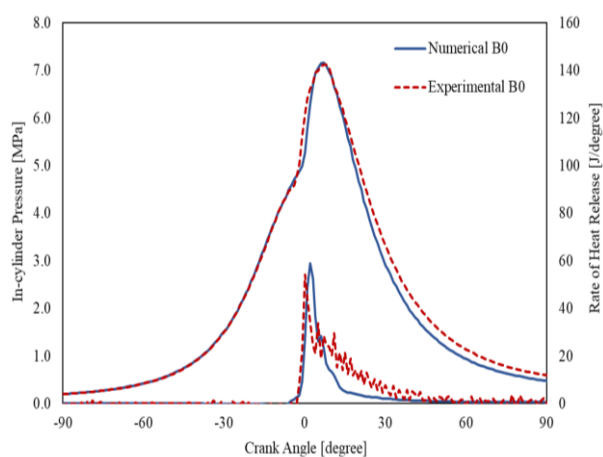


Figure 5. CFD model validation with experimental result for B0 case.

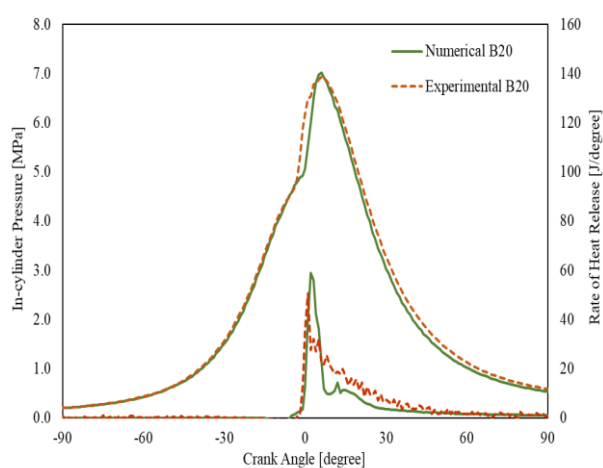


Figure 6. CFD model validation with experimental result for B20 case.

Table 5 shows the experimental and numerical gross IMEP, peak firing pressure (PFP), CA10, CA50, and CA90 of the B0 and B20 fuel blends. The gross IMEP value of the B20 fuel blend is lower than neat diesel. This is an expected situation as the LHV of B20 is lower than B0. The PFP of the CFD model is 7.17 MPa for B0 and 7.03 MPa for B20. There is a 2% difference compared to the experimental pressure. The PFP value is reduced by 2.7% with the B20 fuel blend. B20 has a shorter ignition delay than B0. 10%, 50%, and 90% mass-burn fraction represented by CA10, CA50 and CA90 [41]. The change of these values depends on the cetane number of the fuel. High cetane fuel has a shorter ignition delay in compression ignition engines. Shorter CA50 and CA90 values were obtained with B20 fuel.

Table 5. Experimental and Numerical performance results of B0 and B20 biodiesel blend.

	Experimental		Numerical	
	B0	B20	B0	B20
IMEP _g (bar)	6.43	6.39	6.04	5.95
PFP (MPa)	7.12	6.93	7.17	7.03
PFP (degree)	7.31	7.00	7.31	7.12
CA10 (degree)	0	0.07	0.24	0.07
CA50 (degree)	7.08	5.68	7.21	5.68
CA90 (degree)	44.1	40.8	45.1	40.7

The in-cylinder characteristic of the engines is related to the air and fuel mixing process and the evaporation of the fuel, the combustion chamber geometry, and the properties of the fuel. The distribution of equivalence ratio inside the cylinder for B0 and B20 is shown in fig. 7. It is presented in this figure during fuel injection and when fuel injection is completed. The geometry of the piston bowl is unusual. It can be seen that this geometry is insufficient to direct the fuel. Both fuel blends showed similar characteristics in terms of mixture formation.

The in-cylinder temperature distributions were captured at four different crank angles as -10° , 0° , $+5^\circ$, $+30^\circ$ aTDC (fig. 8). B0 and B20 reach maximum temperatures around 2700 K. This temperature is the local maximum value. In-cylinder mean temperature reaches a maximum of about 1400 K. The distribution of fuel in the cylinder is similar for B0 and B20, as the B0 and B20 fuels exhibit similar temperature distribution characteristics. The only difference is that as the B20 fuel moves further towards the cylinder center, the in-cylinder temperature has also increased at the cylinder center.

Fig 9 illustrates the Turbulent kinetic energy for B0 and B20 fuels from $+20^\circ$ bTDC to $+30^\circ$ aTDC. It is seen in-cylinder TKE distribution that the piston bowl is insufficient to guide the fuel-air mixture. The fuel spray hits the piston wall and is plastered. This situation is an issue for two different fuels. This may result in increased soot emissions. Due to the different viscosity values of the fuels, a small difference was observed in the TKE values.

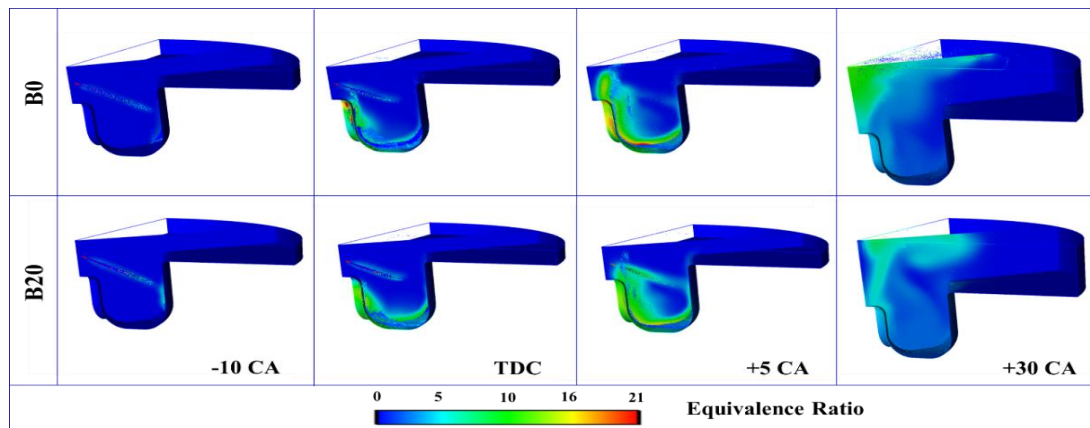


Figure 7. Equivalence ratio distribution for B0 and B20 fueled engines at various crank angles.

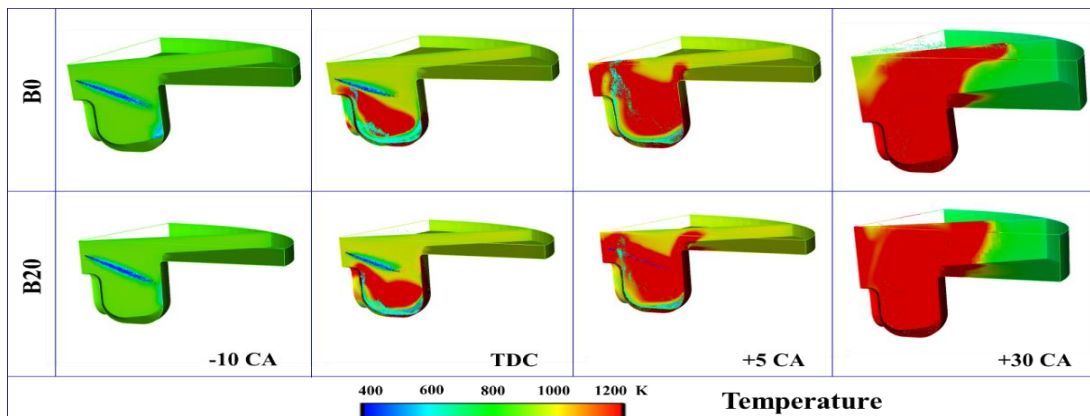


Figure 8. In-cylinder temperature distribution for B0 and B20 fueled engines at different crank angles.

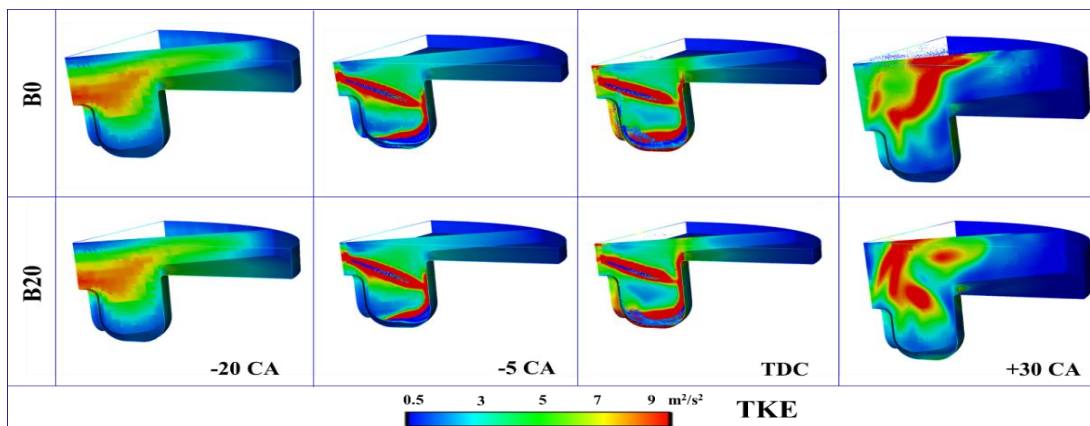


Figure 9. Turbulent kinetic energy for B0 and B20 fueled engines at different crank angles.

3.2. Emission Characteristics

Numerical studies have been performed to better understand the combustion and emission formation of neat diesel and B20 biodiesel. NO_x, soot, and CO emissions were calculated with the CFD simulation. Numerical and experimental emission results were compared to understand the accuracy of the model and also to investigate the influence of the B20 fuel blend. The percentage of the error has been not exceeded

4.39% for both fuels and NO_x, soot, and CO emissions (fig. 10).

B20 fuel blend emits more NO_x emissions. B20 fuel emits 1.85 g/kWh of NO_x emissions that is 5.5% higher than neat diesel. However, in terms of soot and CO emissions, the results are in favor of B20. The soot emission and CO emission of B20 fuel are 1.9 and 14.4 g/kWh respectively, while it is 22.7% lower for CO and 15.6% lower for soot emission compared to B0 fuel.

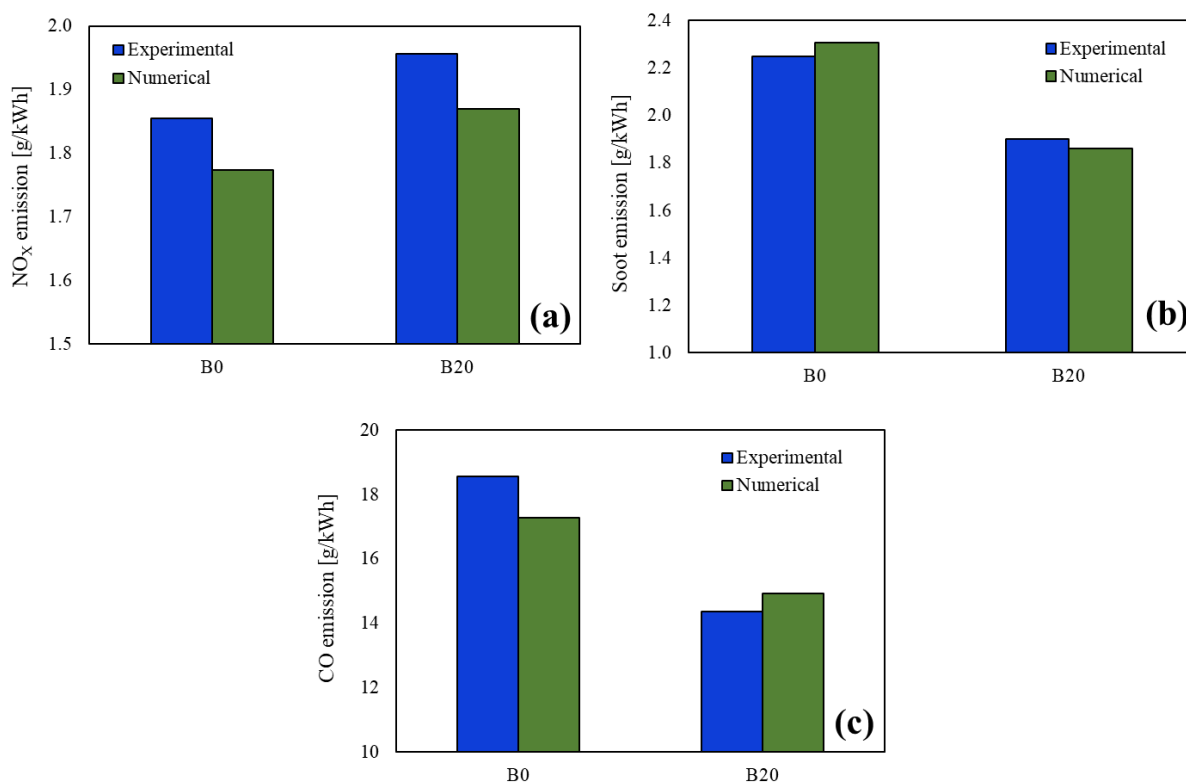


Figure 10. Comparison of experimental and numerical a) NO_x, b) soot and c) CO emission results of B0 and B20.

IV. CONCLUSIONS

Waste cooking oil-based biodiesel in a CI engine is promising due to its low emissions and low cost and contribution to recycling. In the present study, the exhaust emission and engine performance of biodiesel and diesel fuel were examined experimentally and numerically. The CFD model was established to evaluate a test engine characteristic such as in-cylinder fluid flow, mixture preparation, temperature distribution, and emission formation. Validation results of the CFD model against neat diesel and B20 fuel blends showed that this model was able to predict combustion and performance with reasonable accuracy.

Biodiesel that produced from waste cooking oil can be used blended with diesel without modifications either in the engine or in the injection system. The CI engine fueled with B20 blend emits lower CO and soot emission by 22.7%, and 15.6% respectively compared to neat diesel. However, the B20 fuel blend increases the NO_x emission by 5.5%.

Acknowledgment

The author would like to thank Dr. Görkem Kökkülünk, Mr. Cenk Kaya, and Mr. Zafer Aydın from Yıldız Technical University, Turkey for providing support and experimental data for this study. The author gratefully acknowledges the Convergent Science Company for providing the academic version of the Converge CFD software.

Nomenclature

AMR	Adaptive mesh refinement
aTDC	After top dead center
B0	Neat diesel
B20	20% biodiesel + 80% diesel blend
B100	Neat biodiesel
bTDC	Before top dead center
CA	Crank angle
CA10	Crank angle position at which 10% of the heat is released
CA50	Crank angle position at which 50% of the heat is released
CA90	Crank angle position at which 90% of the heat is released
CFD	Computational fluid dynamics
EVO	Exhaust valve opening
IMEP _g	Gross indicated mean effective pressure
IVC	Intake valve closing
KH	Kelvin-Helmholtz
NTC	No Time Counter
PFP	Peak firing pressure
RNG	Renormalization Group
RT	Rayleigh-Taylor
SAGE	Detailed chemistry solver
SOI	Start of injection
TDC	Top dead center
TKE	Turbulent kinetic energy
WCO	Waste cooking oil

REFERENCES

- [1] Knothe, G., & Razon, L. F. (2017). Biodiesel fuels. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 58, pp. 36–59). Elsevier.
- [2] Mohd Noor, C. W., Noor, M. M., & Mamat, R. (2018). Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 94, Issue April, pp. 127–142). Elsevier.
- [3] Tropecêlo, A. I., Caetano, C. S., Caiado, M., & Castanheiro, J. E. (2016). Biodiesel production from waste cooking oil over sulfonated catalysts. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 38(2), 174–182.
- [4] Phan, A. N., & Phan, T. M. (2008). Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel*, 87(17–18), 3490–3496.
- [5] More, G. V., Koli, S. R., Rao, Y. V. H., Prasad, P. I., & Rao, B. N. (2020). Effect of compression ratio on compression ignition engine with RUCO biodiesel/ diethyl ether/ diesel fuel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 1–20.
- [6] Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1–15.
- [7] Wong, Y. C. (2014). Biodiesel production from used cooking oil. *Oriental Journal of Chemistry*, 30(2), 521–528.
- [8] Dubey, A., Prasad, R. S., & Singh, J. K. (2020). An Analytical and Economical Assessment of the Waste Cooking Oil based Biodiesel using Optimized Conditions on the Process Variables. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 1–16.
- [9] Al-Dawody, M. F., Jazie, A. A., & Abdulkadhim Abbas, H. (2019). Experimental and simulation study for the effect of waste cooking oil methyl ester blended with diesel fuel on the performance and emissions of diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 9–17.
- [10] Ulusoy, Y., Arslan, R., Tekin, Y., Sürmen, A., Bolat, A., & Şahin, R. (2018). Investigation of performance and emission characteristics of waste cooking oil as biodiesel in a diesel engine. *Petroleum Science*, 15(2), 396–404.
- [11] Patel, C., Chandra, K., Hwang, J., Agarwal, R. A., Gupta, N., Bae, C., Gupta, T., & Agarwal, A. K. (2019). Comparative compression ignition engine performance, combustion, and emission characteristics, and trace metals in particulates from Waste cooking oil, Jatropha and Karanja oil derived biodiesels. *Fuel*, 236(September 2018), 1366–1376.
- [12] Wei, L., Cheng, R., Mao, H., Geng, P., Zhang, Y., & You, K. (2018). Combustion process and NOx emissions of a marine auxiliary diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel blends. *Energy*, 144, 73–80.
- [13] Abed, K. A., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., Shaib, A. A. E., & Gad, M. S. (2018). Effect of waste cooking-oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 985–989.
- [14] Zareh, P., Zare, A. A., & Ghobadian, B. (2017). Comparative assessment of performance and emission characteristics of castor, coconut and waste cooking based biodiesel as fuel in a diesel engine. *Energy*, 139, 883–894.
- [15] Qureshi, M. W. G., Khan, Z. M., Hussain, M., Ahmad, F., Shoaib, M., & Qasim, M. (2019). Experimental evaluation of a diesel engine for combustion, performance and exhaust emissions with fuel blends derived from a mixture of fish waste oil and waste cooking oil biodiesel. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(4), 2793–2803.
- [16] Chen, H., Xie, B., Ma, J., & Chen, Y. (2018). NOx emission of biodiesel compared to diesel: Higher or lower? *Applied Thermal Engineering*, 137(December 2017), 584–593.
- [17] Chaurasiya, P. K., Singh, S. K., Dwivedi, R., & Choudri, R. V. (2019). Combustion and emission characteristics of diesel fuel blended with raw jatropha, soybean and waste cooking oils. *Heliyon*, 5(5), e01564.
- [18] Li, H., Yang, W., Zhou, D., & Yu, W. (2018). Numerical study of the effects of biodiesel unsaturation on combustion and emission characteristics in diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 137(January), 310–318.
- [19] Yangaz, M. U., Özdemir, M. R., & Şener, R. (2019). Combustion performance of hydrogen-enriched fuels in a premixed burner. *Environmental Technology (UK)*, 1–12.
- [20] Sener, R., Özdemir, M. R., & Yangaz, M. U. (2019). Effect of the geometrical parameters in a domestic burner with crescent flame channels for an optimal temperature distribution and thermal efficiency. *Journal of Thermal Engineering*, 5(6), 171–183.
- [21] Sener, R., Yangaz, M. U., & Gul, M. Z. (2020). Effects of injection strategy and combustion chamber modification on a single-cylinder diesel engine. *Fuel*, 266, 117122.
- [22] Hawi, M., Elwardany, A., Ookawara, S., & Ahmed, M. (2019). Effect of compression ratio on performance, combustion and emissions characteristics of compression ignition engine fuelled with jojoba methyl ester. *Renewable Energy*, 141, 632–645.
- [23] Venu, H., Raju, V. D., & Subramani, L. (2019). Combined effect of influence of nano additives, combustion chamber geometry and injection timing in a DI diesel engine fuelled with ternary (diesel-biodiesel-ethanol) blends. *Energy*, 174, 386–406.
- [24] Ismail, T.M., Lu, D., Ramzy, K., El-salam, M. A., Yu, G., & Elkady, M. A. (2019). Experimental

- and theoretical investigation on the performance of a biodiesel-powered engine from plant seeds in Egypt. *Energy*, 189, 116197.
- [25] Asadi, A., Zhang, Y., Mohammadi, H., Khorand, H., Rui, Z., Hossein, M., & Vahabzadeh, M. (2019). Combustion and emission characteristics of biomass derived biofuel, premixed in a diesel engine: A CFD study. *Renewable Energy*, 138, 79–89.
- [26] Rajak, U., Nashine, P., Singh, T. S., & Verma, T. N. (2018). Numerical investigation of performance, combustion and emission characteristics of various biofuels. *Energy Conversion and Management*, 156(August 2017), 235–252.
- [27] Zhao, F., Yang, W., Yu, W., Li, H., Sim, Y. Y., Liu, T., & Tay, K. L. (2018). Numerical study of soot particles from low temperature combustion of engine fueled with diesel fuel and unsaturation biodiesel fuels. *Applied Energy*, 211(May 2017), 187–193.
- [28] Akcay, M., Yilmaz, I. T., & Feyzioglu, A. (2020). Effect of hydrogen addition on performance and emission characteristics of a common-rail CI engine fueled with diesel/waste cooking oil biodiesel blends. *Energy*, 212, 118538.
- [29] Utlu, Z. (2007). Evaluation of biodiesel fuel obtained from waste cooking oil. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 29(14), 1295–1304.
- [30] Richards, K. J., Senecal, P. K., & Pomraning, E. (2019). *CONVERGE 2.4 Manual* (p. 1078). Convergent Science.
- [31] Li, Z., Wang, Y., Geng, H., Zhen, X., Liu, M., Xu, S., & Li, C. (2019). Parametric study of a diesel engine fueled with directly injected methanol and pilot diesel. *Fuel*, 256(April), 115882.
- [32] Senecal, P. K., Pomraning, E., Richards, K. J., Briggs, T. E., Choi, C. Y., McDavid, R. M., & Patterson, M. A. (2003). Multi-dimensional modeling of direct-injection diesel spray liquid length and flame lift-off length using cfd and parallel detailed chemistry. SAE Technical Papers.
- [33] Luo, Z., Plomer, M., Lu, T., Som, S., Longman, D. E., Sarathy, S. M., & Pitz, W. J. (2012). A reduced mechanism for biodiesel surrogates for compression ignition engine applications. *Fuel*, 99(1), 143–153.
- [34] Amsden, A. A. (1997). KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves. LA Report.
- [35] Frassoldati, A., D’Errico, G., Lucchini, T., Stagni, A., Cuoci, A., Faravelli, T., Onorati, A., & Ranzi, E. (2015). Reduced kinetic mechanisms of diesel fuel surrogate for engine CFD simulations. *Combustion and Flame*, 162(10), 3991–4007.
- [36] Reitz, R.D. (1987). Mechanisms of Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays. *Atomization and Spray Technology*, 3, 309–337.
- [37] Schmidt, D. P., & Rutland, C. J. (2000). A New Droplet Collision Algorithm. *Journal of Computational Physics*, 164(1), 62–80.
- [38] Heywood, J. (1988). Internal combustion engine fundamentals. In McGraw Hill.
- [39] Hiroyasu, H., & Kadota, T. (1976). Models for Combustion and Formation of Nitric Oxide and Soot in Direct Injection Diesel Engines.
- [40] Kaya, C., & Kökkülünk, G. (2020). Biodiesel as alternative additive fuel for diesel engines: An experimental and theoretical investigation on emissions and performance characteristics. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 1–23.
- [41] Zhang, Z., Liu, X., Liu, H., Wu, Y., Zaman, M., Geng, Z., Jin, C., Zheng, Z., Yue, Z., & Yao, M. (2021). Effect of soybean oil/PODE/ethanol blends on combustion and emissions on a heavy-duty diesel engine. *Fuel*, 288(October 2020), 119625.

Bitki Kromozomlarında Sentromerlerin Önemi, Moleküler Yapısı ve Organizasyonu

Importance, Molecular Structure and Organization of Centromeres in Plant Chromosomes

Hümeyra YILDIZ¹ , Bilge Ş. YILDIRIM¹ , Sevim D. K. ÖZTÜRK¹ , Ahmet L. TEK¹ 

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Ayhan Şahenk Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Tarımsal Genetik Mühendisliği Bölümü, Tarımsal Biyoinformatik Anabilim Dalı, 51240, Niğde

Öz

Sentromer hücre bölünmesi esnasında mikrotübüller aracılığıyla kromozomların yeni hücelere eşit dağılımını sağlayan kompleks bir yapıdır. Böylesi bir kompleks yapı, tüm ökaryotlarda olduğu gibi bitki türlerinde de büyük ilgi çekerek farklı çalışma disiplinlerinin temelini oluşturmuştur. Çalışma disiplinlerinden birisi olan bitki sentromer biyolojisi, çeşitli bitki sentromerlerindeki benzerlik ve farklılıkları ortaya koyarak genom biyolojisi, taksonomi, filogeni gibi alanlara temel bilgiler sunmaktadır. Ökaryotlarda kromozomları üzerinde fonksiyonel olarak korunmuş sentromer, yapısal anlamda farklı özellikler gösterebilmektedir. Bu yapısal değişiklikler en yaygın anlamda iki yapısal unsur olan sentromere özgü histon H3 (CENH3) proteini ve sentromerik DNA dizileri bakımından ifade edilmektedir. Sentromer tiplerinin karakteristik yapısal özelliklerinin tanımlanabilmesi için klonlanarak dizilenmesi gerekmektedir. Ancak sentromerik DNA dizilerinde bulunan uzun tekrar DNA elementlerinden dolayı hatalı dizilemeler meydana gelebilmekte ve doğru fiziksel haritalar oluşturulamamaktadır. Bu nedenle bitki sentromer evrimi yeteri kadar çözümlenememiştir. Bitki sentromerini çözümlenebilmek amacıyla sentromer mühendisliği, bitki biyoteknolojisi ve biyoinformatik alanları birbiriyle entegre edilerek yeni analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, tarihsel perspektiften yola çıkarak çeşitli model bitkiler ve devamında baklagiller (*Fabaceae*) özelinde farklı epigenetik özellikteki sentromerik DNA dizileri ve sentromer proteinleri irdelenerek evrensel bitki sentromer yapısının özellikleri ortaya konulacaktır. Ayrıca sentromer mühendisliği aracılığıyla uygulamalı tarım bilimlerinde bitki ıslahına büyük yenilikler katabilecek farklı bilimsel çalışmalar sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: ardışık tekrarlar, CENH3, epigenetik, kinetokor, kromozom, sentromer mühendisliği.

Abstract

Centromere is a complex structure that ensures equal distribution of chromosomes to new cells via microtubules during cell division. Such a complex structure attracted great attention in plant species as well as in all eukaryotes and formed the basis of various study disciplines. Plant centromere biology, which is one of the study disciplines, provides basic information on genome biology, taxonomy, phylogeny by revealing the similarities and differences in various plant centromeres. In eukaryotes, the centromere, which is functionally conserved on chromosomes, may show various structural features. These structural changes are most commonly expressed in terms of the centromere-specific histone H3 (CENH3) protein and centromeric DNA sequences, which are two structural elements. To define the characteristic structural features of the centromere types, extensive studies must be performed involving cloning and sequencing. However, due to the long repeat DNA elements present in centromeric regions, erroneous sequences may occur and correct physical and genetic maps cannot be created. Therefore, plant centromere evolution has not been sufficiently resolved. To analyze the plant centromeres, new analysis methods have been developed by integrating the fields of centromere engineering, plant biotechnology and bioinformatics. Within the scope of this review, starting from a historical perspective, the centromere DNA sequences and centromere proteins with different epigenetic properties will be examined for various model plants and with special emphasis to legumes (*Fabaceae*), and the properties of the universal plant centromere structure will be revealed. In addition, different scientific studies will be presented that can add great innovations to plant breeding in applied agricultural sciences through centromere engineering.

Keywords: tandem repeats, CENH3, epigenetics, kinetochore, chromosome, centromere engineering.

I. GİRİŞ

Hücre bölünmesi, tek hücreli canlılarda yeni bir organizmanın üremesini sağlarken, çok hücreli canlılarda bölünme sonrası oluşan yeni hücrelerle birlikte doku ve organları meydana getirmektedir. Her iki hücre bölünmesiyle üreme ve çoğalma esnasında genetik bilginin sekteye uğramadan aktarımı büyüme ve gelişim için vazgeçilmezdir. Genetik bilgi nesilden nesile, kalıtım materyali olan deoksiribonükleik asit (DNA) molekülünün birbirinden bağımsız birimler şeklinde paketlenerek kromozomlar formunda yeni üretilen kardeş hücelere aktarılmasıyla sağlanmaktadır [1, 2]. Teknik olarak, kromozomlar, somatik ve eşey hücrelerinde sırasıyla mitoz ve mayoz bölünme esnasında kalıtım materyalinin aktarımından sorumludur. Kromozomların fonksiyonel yapı taşları olan sentromer, telomer ve DNA replikasyon bölgelerinin moleküler düzeyde daha iyi anlaşılması yeni

ortaya çıkan hücrelerin sağlıklı formda bulunması için gereklidir. Bu yapısal bölgeler içerisinde özellikle sentromer büyük bir ilgi çekmektedir ve yoğun çalışma disiplini oluşturulmaktadır. Bu bağlamda, bitki sentromerleri özelinde öncelikle model bitkiler ve baklagiller kapsamında temel tanımlamalar yapılacaktır. Ayrıca tarihsel perspektiften yola çıkarak farklı bitki türlerinden elde edilen güncel yapısal özelliklerin incelendiği çalışmaları entegre eden moleküler kompleks bir yapı ortaya konulacaktır. Şu ana kadar elde edilen bulgulardan yola çıkarak bu kompleks hücresel yapının temel bilimlerden başlayıp moleküler bitki islahını kapsayan ve gelecekte tarıma dahil edilebilecek yönlerinden bahsedilecektir. Bunun sonucunda, bu alanda çalışan ve çalışacak olan bilim insanlarına temel referans oluşturacak kritik irdelemelere sahip bir analiz ortaya konulacaktır.

1.1. Sentromer nedir?

Sentromer, hücre bölünmesi esnasında kinetokor aracılığıyla mikrotübüllerin bağlanma bölgesi olarak işlev görebilen kromozomların yeni hücrelere eşit dağılımını sağlamaktadır (Şekil 1B). Klasik sitogenetik çalışmalar açısından sentromer, kromozom üzerindeki birincil (primer) boğum olarak tanımlanmaktadır [3]. Moleküler sitogenetik olarak başka bir açıdan bakıldığında ise sentromer, kromozom üzerinde bulunan heterokromatik bir bölgeye denk gelmektedir [4]. Biyokimyasal perspektiften değerlendirildiğinde sentromer, kinetokor olarak tanımlanan protein kompleksinin mikrotübül ve kromozomal DNA arasında bağlantı kurduğu interaktif bir yapıya işaret etmektedir [5]. Genetik açıdan değerlendirildiğinde, açılım gösteren bir popülasyon üzerinde rekombinasyona dayalı DNA markörleriyle geliştirilen genetik haritalarda; her bir kromozom üzerinde özellikle rekombinasyonun ya tamamen olmadığı ya da son derece sınırlı gerçekleştiği kromozomal lokusu ifade etmektedir. Genetik haritalarda böylesi bir kromozomal lokus fiziksel olarak en az 1-2 Mb uzunluğuna tekabül etmektedir [6]. Sonuç olarak, klasik sitogenetik, moleküler sitogenetik, biyokimyasal ve genetik anlamda sentromer her ne kadar farklı tanımlamalarla ifade edilsede, bu durum sentromer yapısının önemini değiştirmemektedir. Tüm ökaryotik organizmalarda korunmuş olması sebebiyle sentromer, kromozomların tanımlanmasında ve karyotip analizlerinde oldukça irdelenen kompleks bir yapıdır.

1.2. Sentromer ve karyotip ilişkisi

Ökaryotik bir organizmanın somatik hücrelerinde her bir kromozom, benzeşik bir homologuyla beraber bir çift kromozom seti oluşturur. Bir hücredeki somatik metafaz kromozomların homologlarıyla beraber uzun olandan kısa olana doğru sıralandığı görsel sunuma karyotip denir. Karyotipleme yapılırken özellikle kromozomların sayısı, boyutu ve şekli gibi farklı morfolojik özellikleri dikkate alınmaktadır. Karyotipi oluşturan kromozomların boyutuna, sentromer kromozom üzerindeki konumuna, kromozom

çiftlerinin uzun ve kısa kollarının birbirine oranlarına göre yapılmış şematik gruplandırmalara ise idiogram denilmektedir [7]. 1970'li yıllarda ilk kromozom çalışmaları ile somatik metafaz kromozomları asetokarmin, feulgen gibi boyalarla karakteristik özellikleri ortaya çıkartılacak şekilde boyanmıştır. Boyama yapıldıktan sonra elde edilen karakteristik bantlar yardımıyla ilk karyotipik analizler oluşturulmuştur. Bu analizler başlangıçta insan ve hayvan somatik dokularında başlamış olup daha sonra bitki kök ucu gibi hızlı gelişen meristematik dokularda incelenerek devam edilmiştir. Daha ayrıntılı karyotip analizleri için Q (Quinacrine), G (Giemsa), R (Reverse), C (sentromerik bölge), T (telomerik bölge) gibi aynı veya farklı bölgeleri hedef alan özgün bantlama teknikleri geliştirilmiştir [7, 8]. Günümüzde ise DNA-DNA hibridizasyon teknikleri yardımıyla DNA dizi bölgelerini tanımlayan FISH (Floresan *in situ* hibridizasyonu) ve GISH (Genomik *in situ* hibridizasyonu) gibi yöntemler ile karyotipleme çalışmalarına devam edilmektedir [2].

Bir türün evrimsel olarak başarılı olabilmesi ve devamlılık gösterebilmesi için tür içinde karyotip yapısının korunmuş ve sabit olması gerekmektedir. Ökaryotik organizmalarda, kromozom üzerindeki sentromer yeri evrimsel olarak korunmuştur ve her bir sentromer yeri kromozom üzerinde sabittir. Bir kromozom üzerinde sentromer yerinin değişmesi üreme izolasyonu (reproductive isolation) sonucu evrimsel olarak yeni tür oluşmasını sağlamaktadır. Hatta sentromer yerinin değişmesi iki tür arasında bile üreme izolasyonuna sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, kromozom üzerinde sentromer pozisyonunun değişimiyle yeni bir tür oluşumu arasında yakın nedensellik ilişkisi mevcuttur [9].

Tüm ökaryotik organizmalarda, kromozom içi ve kromozomlar arası yeniden düzenlemeler nedeniyle genotipik ve fenotipik farklılıklar oluşabilmektedir. Bu genotipik farklılıklar hem kromozom organizasyonunda hem de sayısında değişiklikler içerebilmektedir. Değişikliklerin tespiti için karyotip evrimi, sitogenetik haritalamalar, karşılaştırmalı genetik ve genomik analizler gibi farklı teknik ve teknolojilerden faydalanılmaktadır [10, 11]. Kromozomlar üzerinde değişken yapısal bölgelerin analiz edildiği farklı yöntemlerle kromozom yapısı anlaşılacak farklı organizmaların karyotip evrimi hakkında ayrıntılı mekanizmalar ortaya çıkarılabilmektedir. Karyotip çalışmalarında sentromer bölgesi, birincil referans olup güncel evrimsel çalışmalar bakımından hedef tema haline gelmiştir. Tür düzeyinde kromozom üzerinde korunmuş pozisyonda bulunan sentromerde meydana gelebilecek değişiklikler, türleşme, disentrik kromozom oluşumu, karyotip sayı değişimi gibi farklı evrimsel sonuçlar ortaya koymaktadır [9, 12]. Bu yüzden sentromer yapısını ve özelliklerini anlamak genom, taksonomi, filogeni ve benzeri alanlarda yapılacak çalışmalara yol gösterici niteliktedir.

1.3. Yapısal özelliklerine göre sentromer tipleri

Sentromer bir organizmada kromozom üzerinde bulunduğu konum ve büyüklük açısından farklı yapısal gruplandırmalarla tanımlanmıştır. Farklı ökaryotik türlerde görülen sentromer özelliklerindeki değişiklikler sebebiyle sentromerler farklı isimlerle anılabilmektedir. Bu sebeple, en genel özelliklerine göre sentromerler, nokta sentromer, bölgesel sentromer, holosentromer ve neosentromer olarak ifade edilebilir [13, 14] (Şekil 1A). Bu sentromer tipleri kısaca aşağıda açıklanmıştır.

Nokta sentromeri, ilk olarak *Saccharomyces cerevisiae* adı verilen tomurcuklanarak çoğalan maya türünde keşfedilmiş özel bir sentromer tipidir. Bu sentromer tipi tekrarlayan DNA dizileri içermemektedir ve bu özellik nokta sentromerler için ayırt edicidir (Tablo 1). Birincil boğum içeren nokta sentromer, tek mikrotübül ve mikrotübül ile bağlantılı yaklaşık 125 baz çiftinden oluşan 3 adet korunmuş DNA elementinden oluşmaktadır [13, 15]. Diğer sentromer tiplerine göre içeriğindeki DNA dizisinden dolayı daha küçük bir yapıya sahiptir ve dizi bilgisine bakılarak bu sentromer tipi tanımlanabilmektedir. Mayalarda sentromerik protein olarak bilinen CSE4 proteini [16] ile nokta sentromerler tanımlanmaktadır. Sentromeri tanımlayan CSE4 proteininin bulunduğu histon oktomerini 3 adet sentromerde bulunan korunmuş DNA elementleri çevrelemektedir [15]. Bu korunmuş elementler sentromerin fonksiyonu etkileyerek daha doğru bir kromozom ayrışmasını sağlamaktadır [17].

İkinci tip olan bölgesel sentromerler, birçok ökaryotik organizmada kromozom üzerinde belirli bir bölgede dağılım gösteren kinetokor proteinlerinden oluşmaktadır (Şekil 1A). Ökaryotlarda genellikle içeriğindeki DNA miktarı fazla olduğu için kilobaz veya megabaz cinsinden tanımlanan bölgesel sentromer, ilk olarak sentromerik tekrar dizileri çalışılırken *Schizosaccharomyces pombe* fisyon mayasında keşfedilmiştir [15]. Bölgesel sentromerler genellikle ardışık tekrarlayan DNA dizilerinden oluşmakta ve nokta sentromerlerin aksine kinetokor proteinlerine birden fazla mikrotübül bağlanmaktadır [13, 15] (Şekil 1A).

İğ ipliklerinin tüm kromozom boyunca birden fazla sentromerik bölgede bulunduğu ve birincil boğumu olmayan sentromer tipi ise holosentromerlerdir (Şekil 1A; Tablo 1). Bölünme esnasında atasal bir sentromere sahip kromozomun herhangi bir bölgesinde meydana gelen DNA çift sarmalındaki kırılmalar sonucunda parça kayıpları oluşabilmektedir. Ancak holosentrik sentromere sahip organizmaların iğ ipliklerinin yayılım göstermesi ve iğ ipliklerinde kopmayı önleyici yapışkan uçların bulunması sayesinde parça kayıplarını engellendiği, kolların doğru ayrışmasını sağladığı ve kinetik aktiviteyi koruduğu öngörülmektedir [18, 19]. Gösterdiği kinetik aktiviteden dolayı holokinetik kromozom olarak da tanımlanmaktadır. Holokinetik kromozomlarda oluşan kırılmalar sonucu parçaların ayrılması ya da başka kromozomlarla birleşmesi ile kromozom sayısında değişiklikler yaratmaktadır. Böylece, kromozom sayılarında oluşan değişikliklerin genetik varyasyon oluşturarak türleşme üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir [19].

Son tip olan neosentromerler, sentromerik olmayan kromozom bölgelerinde oluşan yeni sentromerlerdir. Neosentromer oluşumu sırasında, atasal sentromer kromozom üzerinde kalmakta ancak mikrotübüllerle birlikte, kinetokor proteinleri de yeni oluşan sentromer üzerine bağlanmaktadır. Yeni oluşan sentromerde sentromerik satellit DNA dizileri bulunmazken atasal sentromer içeriğinde bu diziler varlığını sürdürmektedir [20]. Bitkilerde neosentromer tipine örnek olarak buğday üzerinde yapılan bir çalışmada satellit DNA dizileri olmadan da fonksiyonel sentromer organizasyonunun neosentromerler üzerinde oluşabileceği gösterilmiştir [21]. Buğday neosentromerinin aksine, mısır neosentromeri, heterokromatin knob adı verilen rastgele DNA tekrarların ve ek dizilerin birleşmesinden oluşan yapı ile ilişkilendirildiğinden, söz konusu DNA tekrarların yokluğunda neosentromer aktivitesi gözlenmemektedir [22].

Tablo 1. Yapısal özelliklere göre sınıflandırılan sentromer tiplerinin birbirleriyle karşılaştırılması

Sentromer tipi/ Özellikleri	Nokta sentromer	Bölgesel sentromer	Holosentromer	Neosentromer
Birincil boğum	Var	Var	Yok	Var
Ardışık tekrarlayan dizileri	Var	Var	Var	Yok
Sentromer mühendisliği için kullanılabilir mi?	Hayır	Evet	Evet	Evet
Hücre bölünmesi sırasında anomali olabilir mi?	Evet	Evet	Yok	Evet

Sentromer belirleme yöntemi	Dizi Bilgisi	CenH3 İçeren Nükleozom	CenH3 İçeren Nükleozom	CenH3 İçeren Nükleozom
Bitki sentromerler örnekleri	-	<i>Lathyrus sativus</i> [111]	<i>Luzula elegans</i> [110]	<i>Oryza sativa</i> [66]

Sentromer ilk olarak 1880 yılında Flemming tarafından tespit edildiğinden beri birincil boğum olarak bilinmekteydi. Ancak günümüzde sentromerde fonksiyonel olan sentromere özgü histon H3 (CENH3) proteininin karakterize edilmesiyle bölgesel, neosentromer ve holosentromer gibi farklı sentromer tiplerinin keşfedilmesi daha kolay olmuştur. Organizmalar arasında yüksek düzeyde korunmuş CENH3 proteinin ve etkileşimde olduğu sentromerik DNA dizilerin tanımlanması sentromer yapı ve işlevinin anlaşılır hale gelmesini sağlamaktadır [13, 14, 59].

1.4. Sentromerik DNA dizileri

Tüm organizmaların hücre çekirdeğindeki genom yapısı farklı miktarlarda DNA kalıtım materyali içerebilmektedir. Hücre çekirdeğinde replike edilmemiş haploid DNA miktarı “C-değeri” olarak bilinmektedir. Ökaryotik genomlarda bulunan çok tekrarlayan DNA elementleri nedeniyle genom büyüklüğü ve organizma gelişmişliği arasında korelasyon eksikliği bulunmaktadır. Bu durum C-değeri paradoksu olarak adlandırılır. C-değeri paradoksu, çok fazla tekrar dizisi içermesi sebebiyle bitkilerde yaygın bulunan bir fenomendir [23, 24]. Şu ana kadar, bu paradoksun temeli henüz tam olarak anlaşılabilmiş değilse bile, bazı yeni çalışmalar bu istikametteki gelişmelere işaret etmektedir. Son zamanlarda yapılan çok sayıda araştırmada genler çoğunlukla sabit kalırken, genom boyutu varyasyonunun öncelikle tekrarlı DNA dizilerinin kademeli birikimi ve eliminasyonu ile yönlendirildiği kanıtlanmıştır [25]. Bu nedenle bitkilerde bulunan sentromerik ardışık tekrarların ve hareketli DNA elementlerin çeşitli aileleri, DNA dizi uzunlukları, genomda bulunma yüzdeleri, kromozom üzerindeki

yayımları gibi çeşitli yapısal özellikleri farklı perspektiflerden araştırılarak sunulmuştur.

Ökaryotik sentromer yapılarının incelenmesi sonucu yüksek oranda tekrarlayan DNA dizilerinden oluştuğu kanısına varılmıştır. Tekrarlayan DNA dizilerinin oranı bir kromozom için ortalama %5 ile %50 arasında değişebilmektedir. Değişken oranda bulunan sentromerik DNA dizileri birçok farklı organizmada klonlanmış ve tanımlanmıştır (Tablo 2). Bu organizmalarda tanımlanan bazı sentromerik tekrarlar arasında kayda değer bir DNA dizi homolojisi tespit edilememiştir [3]. Böylesi filogenetik olarak farklı dağılım gösteren organizmalar arasında sentromerik DNA dizisi benzerliğinin bulunmaması genel kabul gören evrim teorisi ile çelişmektedir. Geleneksel evrim teorisine göre sentromer gibi tüm ökaryotik organizmalarda korunmuş olan bir yapının DNA kompozisyonunun da korunmuş olması beklenmektedir [3, 26].

1.5. Transpozonlar ve sentromerik ardışık tekrarlar (Tandem tekrarlar)

Geleneksel olarak çok uzun yıllardır sentromer ve perisentromer birçok organizmada heterokromatik yapıda olan aktif bir gen içeriği ve işlevi olmayan bölgeler olarak değerlendirilmiştir. Bu yüzden bu işlevsel bölgelerde yer alan DNA dizileri sessiz, transkripsiyonu olmayan, gen kodlamayan DNA dizileri, “junk DNA” veya “çöp DNA” gibi tabirlerle ifade edilmekteydi [27]. Ne var ki, son zamanlarda yapılan çalışmalar, bu düşünülmenin tam aksini gösteren sonuçlar vermiştir [28]. Bu çalışmalarla birlikte sentromerik tekrarların sitoplazmik, hücresel ve gelişimsel etkileri tespit edilmiştir. Ayrıca kromozom rekombinasyonu için de önemli olduğu bilgisi sunulmuştur [29].

Tablo 2. Ökaryotik organizmalardaki sentromerik DNA dizileri

Bitki türü	Aksesyon	Ardışık tekrar adı	Bulunduğu konum	Dizi uzunluğu (bç)	Referans
<i>Arabidopsis thaliana</i>	X04323	180-bp family*	Sentromer	180	[97] [59]
		pAtMR ⁺	Sentromer	180	[98]
		pAtHR ⁺	Sentromer	180	[98]
		pAL1 ⁺	Sentromer		[97]
<i>Nicotiana tabaccum</i> <i>Oryza sativa</i> <i>Zea mays</i>	X12489	HRS60		184	[99]
		CentO ⁺	Sentromer	155	[48]
		CentC ⁺	Sentromer	156	[49]
<i>Astragalus sinicus</i>	AB649141	CentAs*	Sentromer	20	[50]

	<i>Lotus corniculatus</i>	LjTR1 ⁺		190	[100]
	<i>L.</i>	LjTR2 ⁺		237	
	<i>Medicago truncatula</i>	MtR1-Mtr2	Sentromer	150-300	[101]
		-Mtr3 ⁺	Perisentromer		
	<i>Phaseolus vulgaris</i>	CentPV1*		110	[32]
		CentPV2*	Sentromer		[32]
2	<i>Pisum sativum</i>	AF300830	PisTR-B	Setromer	50
				Subtelomer	
		AF300839	PisTR-A	Dağınık	212
			TR-12		[102]
	<i>Vicia faba</i>	FokI	Dağınık	59	[103]
		pVf7	Dağınık	169	
		172 bç	Dağınık	172	
		TIII15	Dağınık	58	
	<i>Vigna unguiculata</i>	Z49817	pVuKB1 ⁺	Sentromer	488
		AJ131983	pVuKB2 ⁺	Sentromer	436
			455 bp	Sentromer	455
		LC490941	721 bp	Sentromer	721
		LC490942	1600	Sentromer	1600
	<i>Glycine max</i>	U 11026	SB92 ⁺	-	92
			STR120 ⁺	-	120
		CL867099	STR102 ⁺	Perisentromer	120
			CentGm-1 ⁺	Sentromer	92
			CentGm-2 ⁺	Sentromer	94
3		AB536710	GmCENT-1*	Sentromer	299
					[38]
		AB536703	GmCENT-4*	Sentromer	431
	<i>Glycine max spp. soja</i>		CentGm-1 ⁺	-	92
	<i>Glycine latifolia</i>		CentGm-1 ⁻	-	91
	<i>Glycine tomentella</i>		CentGm-1 ⁻	-	92

(*) ChIP temelli, (+) klon temelli, (-) in siliko temelli çalışmaları ifade etmektedir.

1: Model bitkiler 2: Baklagiller 3: Soya türleri

Tekrarlayan DNA dizileri, genom içerisinde bulunurlarını bakımından dağınık tekrarlar ve ardışık tekrarlar olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır. Dağınık tekrarlar olarak bilinen transpozonlar, kodlama dizilerinin yapısı, uzunluğu, kararlılığı ve transpozisyon mekanizmalarına göre kendi içerisinde farklı gruplara ayrılabilir. Ardışık tekrarlar ise, tekrarlayan DNA molekülünün monomer uzunluğuna ve tüm genomdaki toplam büyüklüğüne göre minisatellit, mikrosatellit, satellit ve ribozomal DNA (rDNA) dizileri olmak üzere dört grup altında incelenmektedir [30]. Hücre döngüsü boyunca yoğun olarak katlanmış bir kromatin bölgesi olan heterokromatinin büyük bir bölümünü oluşturan sentromerik tekrarlar, en yaygın olarak satellit DNA dizileri ve retrotranspozonları içermektedir [31]. Sentromerik DNA dizilerinin genomdaki bulunma sıklığı ve genomik lokus sayısı türden türe değişebilmektedir. Farklı bitki genomlarındaki sentromerik DNA tekrarların kompozisyonunu belirleyen süreçler hakkında bilgi edinmenin bir yolu, birden fazla türde bulunan tekrarların detaylı bir

karakterizasyonu yapılarak filogenetik çerçeve kapsamında analiz etmektir [6, 32]. Yakın zamana kadar, bu tür karakterizasyon çalışmaları, tekrar dizilerinin yüksek oranları, çeşitliliği ve dizi karmaşıklığı nedeniyle daha az oranda yapılmaktaydı. Ancak son yıllarda bitki biyoteknolojisinin gelişmesi üzerine yeni nesil dizileme teknolojileri ve farklı biyoinformatik yaklaşımların entegrasyonu sonucu çok fazla ilerleme kaydedilmiştir [26].

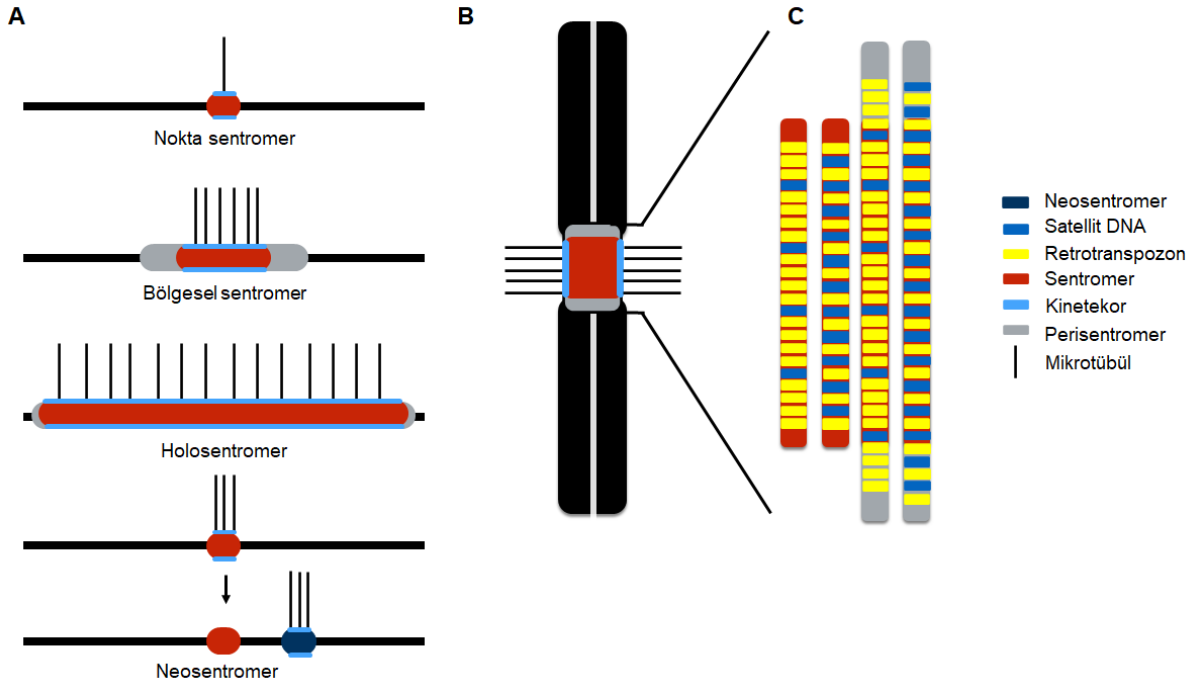
Sentromerik bölgeler için hareketli transpozonlar önemli bir tekrarlayan DNA dizi ailesidir. Transpozonlar, transpozisyon mekanizmasına göre ribonükleik asit (RNA) ara ürünüyle aktarıldığında retrotranspozon, DNA ara ürünüyle aktarıldığında DNA transpozon olarak ifade edilmektedir. Retrotranspozonlar, ters transkriptaz (RT) aktivitesinin varlığına bağlı olarak RNA ara ürününün DNA dizisine dönüştürülüp tekrar genoma dahil etmesi ile yayılım göstermektedir. Retrotranspozonlar DNA dizilerinin yapılarına bağlı olarak LTR (long terminal repeat), LINE (non-LTR retrotransposons or long interspersed

element) ve SINE (short interspersed element) olmak üzere üç sınıfta tanımlanmaktadır [33]. Bitki genomunun büyük bir oranını oluşturan LTR retroelementinin sınıflandırılmasıyla meydana gelen Ty3/gypsy ve Ty3/copia aileleri genomda en çok bulunan dağınık hareketli elementlerdir. Literatür incelendiğinde, *Pisum sativum* tüm genomundaki Ty1/copia elementleri, Ty3/gypsy elementleri ile karşılaştırıldığında genomun çok daha küçük bir bölümünü kapsamaktadır [34]. Bununla birlikte Ty1/copia elementlerinin daha fazla sayıda farklı aileden meydana geldiği saptanmıştır [34]. Retrotranspozonlar tüm genoma yayılım gösterdiği gibi sadece sentromere spesifik olarak da bulunabilmektedir (Şekil 1C). Sentromerik retrotranspozon (CR) dizileri sentromerik ardışık tekrarlar kıyasla daha fazla korunmuş yapıdadır. *Oryza sativa*'da CRR [35], *Zea mays*'ta CRM [36], *Brassica rapa*'da CRB [37], *Glycine max*'ta GmCR [38] türler arasındaki korunmuş sentromerik retrotranspozonlara örnektir. Bu türlerdeki sentromerik yapının karakterizasyonu sonucu; sentromerik ardışık tekrarların çeşitli retrotranspozonlar tarafınca kesintiye uğradığı ortaya çıkartılmıştır (Şekil 1C). Örneğin *Arabidopsis thaliana* 180 baz çiftlik tekrar ailelerinin bazen Athila retrotranspozonları tarafından kesintiye uğrayarak sentromer dışında perisentromerik bölgelerde de birikebildiği yapılan çalışmalar aracılığıyla ispatlanmıştır [39].

Bir diğer sentromerik DNA dizisi olan satellit DNA dizileri, sentromerde en sık karşılaşılan ardışık tekrardır. Adenin-Timin (AT) açısından zengin bir tekrar birimine sahip olan satellit DNA dizilerinin monomer uzunluğu bitki ve hayvanların çoğunluğunda 150-400 bp olarak değişmektedir [40, 41]. Tekrarlayan DNA miktarı, farklı AT/GC içeriği nedeniyle gradient yoğunluk santrifüjünde uydu (satellit) bantlar oluşturmuştur ve daha sonra bu bantlar izole edilerek *in situ* hibridizasyonla kromozom üzerindeki konumları belirlenmiştir [42, 43].

Satellit DNA aileleri, kromozomda meydana gelen eşit olmayan parça değişimi (unequal exchange), yuvarlanan halka çoğalması (rolling circle amplification), replikasyon kayması ve mutasyon gibi moleküler mekanizmalar sonucu ortaya çıkmaktadır [44, 45]. Bu mekanizmalar sayesinde kompleks ökaryotik genomların yaklaşık % 90'ını kapsayarak

genomun temel bir bileşeni haline gelmiştir [41, 46]. Satellit DNA aileleri, bazen genom boyunca dağılmış bir özellik gösterirken bazen de kromozom üzerinde sentromer spesifik bir bölgeye lokalize olabilmektedir [47] (Şekil 1C). Yaptığımız çalışma kapsamında, sentromerik satellit DNA dizilerinin bitkilerdeki örnekleri model organizmalarda, baklagillerde ve önemli bir baklagil ailesi olan *Glycine* türleri kapsamında taranmıştır (Tablo 2). Model organizmalardan, *Arabidopsis thaliana* 180 baz çiftlik sentromerik tekrarı [39], *Oryza sativa* CentO [48], *Zea mays* CentC [49] satellit tekrarlarını içermektedir. Baklagillerden *Astragalus tectorius* CentAs [50] ve *Glycine* cinsine ait *Glycine max* birbirinden bağımsız iki farklı GmCent-1 ve GmCent-4 [38] satellit tekrar ailelerini içermektedir. Tekrarlayan DNA dizilerinin tür içi ve türler arasındaki karşılaştırılması sonucu, evrimi ve nasıl çoğaldığı hakkında kapsamlı bilgi edinilebilmektedir. Bazı tekrarlayan DNA dizileri türler arasında yüksek derecede korunurken, bazı durumlarda da hızlı değişim göstermesi sebebiyle yakın akraba türleri arasında bile farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin, çeltikte (*Oryza sativa*) 155-bç'lik sentromerik satellit tekrar olan CentO, birkaç yabancı çeltik türünde mevcut değildir [51]. Bu yabancı türlerden biri olan *Oryza brachyantha*, CentO ile homoloji göstermeyen CentO-F olarak adlandırılan 154-bç'lik farklı bir sentromerik satellit tekrar dizisini içermektedir. Bununla birlikte, CentO tekrarı, çeltikten daha uzak ilişkili olan mısırdaki sentromerik satellit tekrarı CentC ile önemli dizi homolojisi göstermektedir [51, 52]. Yağ ve protein içeriği bakımından önemli bir baklagil türü olan soyada (*Glycine max*) saptanan GmCent-1 sentromerik satellit tekrar ailesinin varlığı tüm genomu dizilenen bazı yabancı soya türlerinde taranmıştır [38, 53]. *Glycine soja* GmCent-1 tekrar ailesinin dizilerini içerirken, *G. tomentella* ve *G. latifolia* yabancı türleri de GmCent-1 satellit tekrarını genomlarında içerdiği belirlenmiştir [54]. Ne var ki, diğer sentromerik tekrar olan GmCent-4 diğer türlerde ayrıntılı olarak henüz araştırılmamıştır. Bunun gibi farklı sentromerik ardışık tekrarlayan DNA dizilerinin, tür içinde ve türler arasında yatay gen transferi, poliploidizasyon ve benzeri mekanizmalarla açıklanabileceği öngörülmektedir. Korunmuş tekrarlayan DNA dizilerinin bu özelliğinden faydalanarak türler arasındaki evrimsel ve filogenetik ilişkiler belirlenebilmektedir [43].



Şekil 1. Ökaryotik organizmaların kromozomlarında görülen farklı sentromer yapısı ve sentromer DNA organizasyon tipleri. **A.** Nokta sentromer, bölgesel sentromer, holosentromer ve neosentromer yapısı. **B.** Tipik bir ökaryotik metafaz kromozomu. **C.** Sentromerik ve perisentromerik alanlardaki satelit DNA ve retrotranspozon tekrarlayan elementlerin olası dağılımları.

Farklı türlerdeki sentromerik tekrarlayan DNA aileleri sentromer-kinetokor kompleksinin anahtar bileşeni olarak rol oynamaktadır. Tekrarlayan DNA dizileri kinetokor proteinlerinin esas bileşeni olmak dışında, kromozom hareketi ve eşleşmesi, sentromerik yoğunlaşma, kromozom rekombinasyonu, kardeş kromatid eşleşmesi, mitotik iğ ile kromozomal bağlanma, kromozom düzenlemesi, kromatin proteinlerinin etkileşimi, histon katlanması, kromozom yapısının belirlenmesi, karyotipik evrim, gen ekspresyonunun düzenlenmesi, çevresel uyarılara ve fizyolojik değişikliklere genom cevabının düzenlenmesi gibi çok fazla süreçte işlevseldir [55, 56]. Bu nedenle türlerin evrim mekanizmalarının temelini oluşturmaktadır. Türe özgü satelit DNA oluşumu, türlerin hızlı ve güvenilir bir şekilde tanımlanmasını sağlar. Ancak buna rağmen bazen taksonomi içerisinde bazı tekrarlayan DNA dizilerinin muhafaza edilebildiği de belirtilmektedir [41]. Grewal ve Elgin [28], yaptığı çalışmada heterokromatin yapısının oluşumu ve sürdürülmesi açısından satelit DNA'nın transkripsiyonunu ve bunun heterokromatin üzerindeki etkisini devam ettirdiğini tespit etmiştir. Tekrarlayan DNA dizileri ayrıca nükleoprotein komplekslerinin oluşumu için yardımcı moleküler etkileşimlerde rol oynayarak sentromer yapı ve fonksiyonunun korunmasını sağlamaktadır [57]. Ayrıca tekrarlayan DNA dizilerinin transpozitif olması durumunda yeni genler oluşturabileceği de öngörülmektedir [41]. Yapılan sitogenetik ve moleküler çalışmalar kapsamında satelit DNA dizilerinin işlevleri net olarak anlaşılmasına çalışılmıştır.

Genom yapısının daha iyi aydınlatılması için yüksek verimli DNA dizileme teknolojileri ile tüm genom dizilenmesinin yapılması gerekmektedir. Fakat tekrarlayan DNA dizilerinin çok uzun olması ve yüksek AT/GC içeriğinden dolayı dizileme ve karakterizasyonda sıkıntılar yaşanmaktadır. Tekrar dizilerinden kaynaklı genomun karanlık yüzünün aydınlatılması için bilim adamları günümüze kadar çok fazla yöntem geliştirilmiştir ve hâlâ yeni tekniklerin arayışı içerisinde. Sentromerik tekrar dizileri, ilk olarak gradient yoğunluk santrifüjlemesi yapılarak tespit edilmesinin ardından 1970'li yıllarda restriksiyon enzim teknolojisinin gelişmesiyle, genomik DNA, restriksiyon enzimlerle kesilip agaroz jel elektroforezinde fragmentasyonu yapılarak satelit DNA motiflerinin tanımlanması sağlanmıştır. Ayrıca koloni filtre hibridizasyonu, spesifik primerlerle amplifikasyon, gibi farklı yöntemler kullanılarak genomik DNA dizileri içerisindeki tekrarlar kolaylıkla tespit edilebilmektedir [58]. Günümüzde ise, membran sistemi kullanılarak Dot blot, Southern blot gibi teknikler ile DNA-DNA *in situ* hibridizasyonu yapılarak tekrar dizilerin tespiti sağlanmaktadır. Son zamanlarda sentromerik tekrar dizilerinin tespiti için protein-DNA etkileşimine dayanan ChIP (Kromatin immunoprecipitasyon) tekniğinden faydalanılmaktadır. ChIP tekniğiyle sentromerik CENH3 proteinlerine karşı antikor geliştirilerek sentromerik DNA dizileri kolaylıkla tanımlanabilmektedir [59]. Bunlar dışında, tüm genom veya kısmi genom dizisi bilinen türlerdeki tekrarların tespiti için klon temelli analizler ve *in silico* analizler yapılmaktadır (Tablo 2). *In silico* analizlerde sentromerik DNA dizileri, WGS (Whole Genome

Shoutgun) ve NGS (Next Generation Sequencing) dizileme teknolojileriyle birlikte çeşitli biyoinformatik yaklaşımların entegrasyonu sonucu kolaylıkla saptanabilmektedir. Biyoinformatik analizde sık kullanılan grafik tabanlı dizi kümeleme araçları olan RepeatExplorer [60], RepeatAnalyzer, RepeatFinder, Recon gibi farklı yazılımlar genom dizisi verilerindeki yüksek ve orta kopya tekrarları tanımlamak için değerli veriler sağlamaktadır [43]. Sonuç olarak sürekli gelişmekte olan ileri teknolojiler aracılığıyla genomun bilinmeyen yüzü olan sentromer ve etkileşimde bulunduğu protein dizilerinin karakterizasyonunda bir adım öne geçilmesi bilim insanlarınca hedeflenmektedir.

1.6. Sentromer proteinleri

Sentromer proteinleri, ökaryotlarda sentromerin tanımlanmasında ve sentromerik fonksiyonun gerçekleştirilmesinde yardımcı öğelerdir. Bu proteinler ilk olarak Skleroderma CREST semptomları bulunan hastanın serumundan izole ederek tanımlanmıştır. Serum örneğinde 3 farklı uzunlukta SENTromer Proteinini (CENP: CENtrome Protein) tespit edilmiştir. Bu proteinler CENP-A (17 kDA), CENP-B (80 kDA) ve CENP-C (140 kDA) şeklinde adlandırılan kinetokor bağlanma proteinleridir. Otoimmün hastalarda bu proteinleri tanıyan anti-sentromer antikorları tespit edilerek bu antikorların mitotik hücrelerde hastalığın oluşmasında dolaylı yoldan etkili olduğu anlaşılmıştır [61]. İlk defa CENP-A tanımlandıktan sonra HeLa tümör hücrelerinde CENP-A proteinin histon ve nükleozomlarla bağlantılı olduğu saptanmıştır [62]. Ardından yapılan birçok çalışmada CENP-A proteininin insan sentromerleri dışında mantar, hayvan ve bitki sentromerlerinde de homologları tespit edilmiştir. Benzer şekilde CENP-C proteinin karşılığı da belirtilen organizmalarda bulunurken, CENP-B proteinin karşılığı bitkilerde bulunmamıştır [6].

Kinetokor, kardeş kromatitleri doğru bir şekilde bir arada tutan ve iğ ipliklerinin sentromere bağlanmasından sorumlu olan temel sentromerik bir bileşendir. Bu yapının iç ve dış yüzeyine sentromer proteinleri bağlanarak sentromer işlevini ortaya çıkarmaktadırlar [63, 64]. CENP-A proteini gibi iç yüzeydeki kinetokor proteinleri hem sentromerin karakterizasyonunda hem de kromozomların doğru ayrışmasında görev alırken, dış yüzeydeki kinetokor proteinleri sadece kromozomların doğru ayrışmasında görev almaktadır [64, 65].

CENP-A proteinin homologu bitkilerde genellikle farklı uzunluklardaki CENH3 proteinleri şeklinde karakterize edilmiştir. Model bitkiler kapsamında *Arabidopsis thaliana*'da 176 aa uzunluğunda HTR12 [4], *Zea mays*'da 157 aa uzunluğunda ZmCENH3 [36], *Oryza sativa*'da 164 aa uzunluğunda OsCENH3 [66] karakterize edilmiştir. Baklagiller kapsamında ise *Glycine max*'da 158 aa uzunluğunda GmCENH3 [38], *Lotus japonicus* 159 aa uzunluğunda LjCENH3 [67] ve

Onobrychis viciifolia OvCENH3 [68] proteinleri farklı CENH3 homologu örnekleri arasındadır. CENH3 proteini kinetokoru oluşturan protein kompleksinin temel bir parçasıdır. Sentromer DNA'sı CENH3 proteini ve diğer histon proteinleri etrafında paketlenerek sentromerik nükleozomları oluşturmaktadır. Nükleozom çekirdeğini oluşturan histonlardan biri olan standart (kanonikal) histon H3 sentromerde fonksiyonel olarak farklılaşarak yerini histon varyantı olan CENH3 proteinine bırakmaktadır [69]. Bu protein evrimsel süreçte dizi bilgisi bakımından farklılık gösterse de sentromerin karakterize edilmesi sürecinde işlevini kalıcı tutmaktadır [4, 70]. İşlevsel olarak sentromerin belirlenmesi sırasında epigenetik işaretleyici olarak kullanılarak sentromer hakkında bilginin artmasını sağlamaktadır [6].

Başka bir sentromer proteini olan CENP-C, CENH3 gibi kinetokorun iç yüzeyinde bulunan ve kardeş kromatitlerin doğru şekilde ayrışmasından sorumlu sentromerik DNA ile ilişkili bir proteindir [65, 71]. Bitkilerden ilk olarak mısır sentromerinde tespit edilen CENP-C proteini, *Arabidopsis* gibi model bir bitki üzerinde de bulunmasına öncülük etmiştir [71, 72]. Bu proteinin dizilerinin sadece bitkilerde C-terminal bölgesinde korunduğunu saptanmıştır [72]. Sentromer proteinlerin bitkiler üzerinde tanımlanması epigenetik gibi nedeni tam olarak bilinmeyen mekanizmaların çözümlenmesinde yardımcı olacaktır.

1.7. Sentromerlerin epigenetik oluşumu

Kromozom ayrışmasında temel bir yapı olan fonksiyonel sentromer, mayoz ve mitoz hücre bölünmelerinde sırasıyla, homolog kromozomların zıt kutuplara çekilmesini ve kardeş kromatitlerin uygun şekilde ayrışmasını sağlamaktadır. Ayrıca satellit DNA dizileri ve retrotranspozon sentromerik DNA dizilerinin kontrolü de genom bütünlüğünü bozmayacak şekilde sentromer tarafından sağlanmaktadır [73, 74]. Bunun gibi kritik rollere rağmen, bitkilerde fonksiyonel bir sentromerin nasıl karakterize edildiğinin kesin bir tanımını yapmak hala zordur. Şu ana kadar elde edilen mevcut veriler sentromer oluşumunun epigenetik mekanizmalarla kontrol edildiğini işaret etmektedir. Peki bu kadar karmaşık ve bilinmeyen cevaplarla dolu olan epigenetik mekanizmayı yöneten unsurlar nelerdir? DNA dizisinde herhangi değişikliğe sebep olmadan gen ifadesini, kromozom yapısını ve fonksiyonunu değiştiren, genom bütünlüğünü sağlayan mekanizmaların hepsi epigenetik terimi altında toplanmaktadır [31]. Genom bütünlüğü DNA metilasyonu, kromatin, post-translasyonel histon ve RNA aracılı modifikasyonlar ile sağlanmaktadır. Bitki sentromerlerinin epigenetik oluşumu, önceleri CENH3 proteini ve siRNA'lar incelenerek anlaşılmasına çalışılmıştır. Son zamanlarda ise, disentrik kromozomlar üzerindeki sentromerlerden birisinin

inaktivasyonu ve neosentromer oluşumu incelenerek yeni mekanizmalar geliştirilmiştir [6, 12].

Kromozom üzerindeki post-translasyonel modifikasyonların en iyi anlaşıldığı epigenetik işaret histon H3 proteinleridir. Aktif sentromerlerde ise bu modifikasyonlar CENH3 proteininin varlığıyla tespit edilebilmektedir [4, 75]. CENH3 proteininin özellikle N terminal bölgesindeki kovalent modifikasyonlarının kromatin durumunu ve gen transkripsiyonunu etkilediği bilinmektedir. CATD (histon katlanma alanı) bölgesi ise sentromere CENH3 proteinini yüklenmesinden sorumlu olup çeşitli histon modifikasyonları ile bu kontrolleri sağlamaktadır [76]. Zhang vd., [48] mısır ZmCENH3 proteininde pS50 fosforilasyonunu tespit etmelerinin ardından Demidov vd., [77] tarafından *Arabidopsis*'te çiçek gelişiminin kontrolünden sorumlu Aurora3'un HTR12 pS65 proteinini fosforile ettiği saptanmıştır. Ancak baklagillerde dahil olmak üzere hala CENH3 post-translasyonel modifikasyonları belirlenemeyen çok fazla bitki türü bulunmaktadır. Bu eksikliği giderebilmek için CENH3 proteininin etkileşimde bulunduğu diğer proteinler, sentromerik ardışık tekrarlar ve retrotranspozonlarda meydana gelen metilasyonlarının anlaşılması gerekmektedir [57]. Bu sentromerik DNA dizilerinde saptanan epigenetik modifikasyonlar (DNA metilasyonu gibi) ilerde olası post-translasyonel modifikasyon analizlerinde temelini oluşturacaktır.

Sentromerik tekrar dizilerindeki DNA metilasyonları farklı teknikler kullanılarak başta model organizmalar olmak üzere birçok bitki türünde tespit edilmiştir. Zhang vd., [78], *Arabidopsis thaliana* ve *Zea mays* model bitkilerinde sentromerik ve perisentromerik bölgelerde bulunan 178 bç'lik tekrar dizisinin her iki türde de sentromerik bölgede, perisentromerik bölgelere kıyasla daha fazla hipometile edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, sentromerik bölgelerde DNA hipometilasyonunun düşük bir H3K9me2 seviyesi ile ilişkili olduğu gösterilmiştir. *Oryza sativa*'da bulunan CentO tekrarları *Arabidopsis* ve mısırdaki sentromerik satelitlerde olduğu gibi hipometilasyon göstermiştir. Ayrıca ilgili bazı sentromerlerdeki sitozin metilasyonlarının haritalanması sonucu CENH3 ile ilişkili domainlerin, H3 domainine kıyasla yüksek DNA metilasyon seviyesi gösterdiği ortaya çıkmıştır [79]. Wu vd., [80], çeltikte dört farklı ökromatik histon modifikasyonunu taramıştır ve sonucunda sadece bir ökromatik modifikasyonun sentromerik H3 domainde gömülü kopyalanmış sentromerik dizilerle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

Barbara McClintock tarafından 1956 yılında ilk defa mısırdaki keşfedilen retrotranspozonlar, gen aktivasyonu, inaktivasyonu, genom bütünlüğü, evrimsel seçim, replikasyon ve rekombinasyon gibi farklı rolleri üstlenmektedir [81]. Ayrıca genomda mutasyonlar oluşturarak genetik varyasyona ve türleşmeye önemli

katkılar sağlamaktadır. Bu yüzden günümüzde yapılan ıslah çalışmalarının hedefi halindedir. Etkin ve çok fonksiyonlu olan hareketli DNA elementlerinin metilasyonlarının belirlenmesi tüm bu çalışmaların önünü açacaktır. Sonuç olarak, sentromerik tekrar dizilerinde meydana gelen epigenetik mekanizmalar, CENH3 proteininin sentromere bağlanmasını ve kromozom yapısının korunmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu dizilerdeki DNA metilasyonları, sentromer ile perisentromerik kromatin bölgelerinin ayırt edilmesinden ve kinetokor oluşumundan sorumludur. Neosentromerler, kromozomdaki atasal sentromer ile ilişkili olmayan bir genomik bölgeden gelen epigenetik bir oluşumdur. Büyük ve karmaşık genomları olan ökaryotlarda kromozomlar üzerinde çeşitli bölgelerde aktive edilebilmekle birlikte genellikle gen yoğunluğu az heterokromatik bölgelerde işlevseldir. Bu nedenle neosentromer, olduğu konumdaki genleri baskılayabilir özelliktedir [26, 74]. Ayrıca genom düzenlenmesinde de aktif olarak rol alan sentromerik bir işaret olarak da düşünülmektedir. Olgun sentromerlerin neosentromerlerden evrimleştiği fikrini destekleyen kanıtlar günümüzde hala süregelen yoğun çalışmalar sayesinde aktifliğini korumaktadır.

İlk olarak mısırdaki keşfedilen sentromere spesifik kodlanmış RNA'lar, sentromer için potansiyel epigenetik işaretlerden bir diğeridir. Bu küçük RNA'lar (siRNA; yaklaşık 40-75 nt) kinetokorun temelini oluşturan sentromer spesifik nükleozomların yüklenmesinin, sentromerik transkripsiyona bağlanabileceğine dair kanıtlar sunmaktadır. Sentromerik transkriptler, sentromer lokalizasyonu için CENH3 gibi kinetokor proteinleri tarafından bağlanır. Bazı transkripte olmayan RNA'lar da gen ekspresyonunu ve kinetokor bağlanmasında işlevseldir [82]. Mısır, çeltik ve *Arabidopsis*'te yapılan çalışmalarda kinetokor ile ilişkili RNA dizileri CHIP yöntemiyle belirlenmeye çalışılmıştır. Sentromerik satelit tekrar ve retrotranspozonlarla etkileşimde olan çok sayıda siRNA transkriptleri elde edilmiştir [75, 83, 84, 85]. siRNA'lar, metilasyon için spesifik DNA dizilerini hedefleyerek bitkilerde heterokromatin oluşumunu teşvik edebilir, bu nedenle transkripte edilmiş sentromerik diziler, kinetokor oluşumuna uygun bir kromatin ortamı sağlamada hayati bir rol oynamaktadır [74]. Sonuç olarak siRNA aktif bir sentromer yapısının organizasyonu için önemli bir epigenetik işarettir.

Epigenetik mekanizmalar haricinde DNA dizisinin fonksiyonel bir sentromer oluşturulmasında rol oynadığına dair bir takım kanıtlar bulunmuştur. Yakın zamanda mısır ve buğdayda B kromozomu türevlerini içeren iki bitkinin melezenmesi sonucu büyük ve küçük B sentromerlere sahip disentrik kromozomların varlığı tespit edilmiştir. Bu disentrik kromozomlar kararlı yapıdadır ve bir sentromer aktifken diğer sentromer inaktif formda bulunmaktadır. Bu tür dizileri hem aktif hem de inaktif sentromerler için yapılarını

koruduklarından dolayı, sentromer aktivitesinin DNA dizisinden bağımsız bir epigenetik bileşenle sağlandığı sonucuna varılmıştır. İnaktif B sentromeri her nesilde kararlı olarak iletilir ve inaktiviteyi korur ancak bazı durumlarda, aktif olmayan sentromerler, çeşitli modifikasyonlarla yeniden düzenlenerek sentromer fonksiyonunu geri kazanabilmektedir [12, 86]. Bitki sentromer fonksiyonu ve yeniden düzenlenmesinde dinamik ve hızla değişebilen bir takım farklı epigenetik mekanizmalar bulunmaktadır. Epigenetik mekanizmaların anlaşılması ilerde yapılabilecek sentromer temelli modifikasyonlar ile elde edilebilecek haploid bitkilerin temellerini oluşturacaktır.

1.8. Sentromer modifikasyonlarında gelecek beklentiler

Haploid üretimi, birçok mahsul bitki türünün üreme sürecini hızlandıran ve homozigotluğu sağlayan temel süreçlerden biridir. Ayrıca, gerçek ıslah hatlarını elde etmek için geleneksel ıslah ile yıllarca süren kendileme veya geriye melezleme ihtiyacı olmadan, tüm genom replikasyonu yoluyla tek bir nesilde tüm lokuslarda elde edilebilmesini sağlayan güçlü bir ıslah yöntemidir. Geleneksel ıslaha kıyasla hem zaman hem de kaynaklarda önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Haploidler *in vitro* veya *in vivo* elde edilebilir, ancak birçok tür ve genotipte bu işlemler süresince aşılması gereken birtakım zorluklar vardır [87, 88, 89]. Mevcut haploid teknolojilerinde uygulanabilirlikteki eksiklikler nedeniyle, bitki yetiştiricileri ve bilim insanları yeni teknikler geliştirerek farklı haploidizasyon prensipleri arayışına girmiştir. Sentromer mühendisliği ile haploid bitkilerin üretimi, bu zorlukların üstesinden gelmek için umut verici bir yöntemdir. Bu yaklaşım bitki ıslahçıları tarafından büyük bir heyecanla karşılanmış olmasına rağmen şu anda herhangi bir üretilen sentromer mühendisliği yoluyla geliştirilen haploid bitki örneği bulunmamakla birlikte çalışmalar hala devam etmektedir [73, 90, 91].

Sentromer mühendisliği kapsamında genom eliminasyonuna dayanan tür içi veya türler arası melezleme yoluyla haploid bitki elde edilmeye çalışılmaktadır [92]. Sentromerin karakterize edilmesinde sıkça kullanılan CENH3 haploid bitki eldesi için hedef bir proteindir. Ravi ve Chan [73] doğal bir tetraploid *Arabidopsis*'i diploid bir yapıya dönüştürmek için CENH3 proteinini mutasyona uğratarak fonksiyonunu spesifik olarak değiştiren yeni bir yaklaşımın temelini atmıştır. Elde edilen mutant kimerik CENH3 proteinleri "GFP-CENH3" ve "GFP-tailswap" olduğu durumlarda bitki için ölümcül olmamıştır ve genom eliminasyonu ile haploid hat elde edilebilmiştir. Bu öncü çalışma sayesinde, sentromerler ve CenH3 geni artık sadece temel öneme sahip epigenetik bir işaret değil, aynı zamanda önemli tarımsal uygulamalar için potansiyel bir alan olarak da görülmeye başlamıştır [93]. Kuppu vd., [91], *A. thaliana* HTR12 proteinindeki CATD bölgelerinde tek bir amino asitte değişiklik yaparak mutant yeni hatlar

oluşturmuştur. Bu hatların birçoğu, kendine döllenmede verimli iken, yabani türlerle melezlendiğinde benzersiz haploid bitkiler üretmiştir. Yapılan her iki çalışmadan yola çıkarak CENH3'nin mutasyona uğramış olan CATD bölgesi yüksek derecede evrimsel olarak korunmuştur ve haploid teknolojisinin çeşitli bitki türlerinde uygulanması için umut verici bir fırsat sunmaktadır. Kelliher vd [94], mısırdaki CENH3 kaynaklı haploid ıslah hatlarını rapor ettiği çalışmada, CENH3 proteini RNAi teknolojisi ve transpozon yerleştirilmesi ile susturulmuştur. Elde edilen mutant CENH3, bu tür mısır hatlarını üretebilmek için *in vivo* haploid induksiyonunda kullanılmıştır. Haploidizasyon çalışmaları sonucu CENH3:RNAi hatlarının diğer hatlara kıyasla daha az haploid ürün verdiği tespit edilmiştir. Son olarak, CRISPR-Cas9 teknolojisi ile *Arabidopsis thaliana* CENH3 proteininde delesyonlar oluşturarak güçlü haploid hatlar ortaya çıkartılmıştır [91, 95].

Sonuç olarak kısa sürede verimli ve homozigot haploid hatlar üretebilmek için sentromer modifikasyonuna dayalı teknolojiler dikkat çekmeye başlamıştır. Tüm canlılar için kalıtımın önemli parçası olan sentromer haploidi ve ıslah çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Bitkilerde CENH3 proteini ile yapılan temel çalışmalar sayesinde gelecekte yeni haploid ıslah hatları geliştirme potansiyeli vardır.

II. SONUÇ

Sentromer, hücre bölünmesi esnasında mikrotübüller aracılığıyla kromozomların yeni hücrelere eşit dağılımını sağlayan bir kompleks bir yapıdır [26]. Sentromer, tüm ökaryotlarda fonksiyonel bakımdan korunmuşluk gösterirken kromozom üzerinde buldukları konum, yapı ve oluşum mekanizmaları bakımından farklılıklar gösterebilmektedir. Sentromerik farklılıklar, evrimsel süreçte ökaryotik organizmaların birbirlerinden ayırt edilmesine, türleşmeye ve yeni tip sentromerlerin gelişmesine öncülük edecektir. Tek bir sentromer tipi yerine farklı sentromer tiplerinin bulunması tek taraflı bir bakış açısı yerine sentromer biyolojisi ve evrimini çok yönlü anlamaya ve keşfetmeye yardımcı olacaktır [96]. Sentromer biyolojisi tüm ökaryotlarda olduğu gibi bitki sentromerleri özelinde de incelemeler yaparak bitki için sentromerik yapının önemini anlamamıza öncelik etmektedir. Bu çalışma kapsamında öncelikli olarak model bitkiler ve baklagiller sentromerleri üzerinden temel tanımlamalar yapılacaktır. Ayrıca tarihsel perspektiften yola çıkarak farklı bitki türlerinden elde edilen güncel yapısal özelliklerin incelendiği çalışmaları entegre eden moleküler kompleks bir yapı ortaya konulacaktır.

Kompleks bitki sentromerinin oluşumu ve korunmasına katkıda bulunan esas elementler sentromerik DNA dizileri ve sentromerik proteinlerdir. Önceleri çöp DNA olarak adlandırılan sentromerik tekrar dizilerinin aslında sentromer üzerinde bulunan sitoplazmik,

hücrel ve gelişimsel gibi önemli farklı fonksiyonları organizmalardaki önemini gözler önüne sermektedir. Sentromerik tekrar dizileri her ne kadar organizma için çok önemli fonksiyonları olsada dizilenmesi sırasında dizilerin doğru olarak birleştirilememesi, fiziksel haritaların oluşturulamaması gibi nedenlerden dolayı bitkilerdeki sentromer uzunluğu tam olarak belirlenememiştir ve bitki sentromer evrimi yeteri kadar çözümlenememiştir [24]. Bu nedenle sentromer hala çözümlenmeye ihtiyaç duyan sorularla doludur. Sentromerin tanımlanmasında etken diğer bir fenomen sentromer proteinleridir. Sentromerik tekrar dizileriyle etkileşimde olan sentromerik CENH3 proteini bu evrimsel sorunun çözümlenmesine katkı sağlayacaktır. CENH3 proteini, kromozom üzerindeki post-translasyonel modifikasyonların en iyi anlaşıldığı epigenetik işaret olarak bilinmektedir. CENH3 post translasyonel modifikasyonlar öncelikle model bitkilerde taranmış olup baklagiller kapsamında henüz yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma çerçevesinde bitki sentromerindeki epigenetik ve genetik bilimleri arasındaki çözümlenmiş mekanizmalar ve bu mekanizmaların işlevleri belirlenebilecektir.

Gelecekte bitki sentromerinin tanımlanmasında önemli olan CENH3 proteini üzerinden sentromer mühendisliği aracılığıyla bitki ıslahının en temel sorunu olan zaman problemi çözümlenerek kısa sürede homozigot saf haploid hatlar oluşturulabilecektir. Sentromer mühendisliği aracılığı ile saf haploid hatlar oluşturulmasına yardımcı diğer bir yapı ise çoklu gen kümelerinin eş zamanlı hücreye transfer edilmesi için mini kromozomların (yapay kromozomlar) vektör olarak kullanılmasına dayanmaktadır. Günümüzde henüz bu teknoloji ile yapay bitki kromozomlarını bir araya getiren başarılı bir sonuç sağlanamamıştır [6, 74]. Ancak CRISPR, RNAi, TILLING gibi farklı yenilikçi yöntemlerle sentromer hedefli ıslah çalışmaları hızlı bir şekilde çalışmaya devam etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK (118O670 ve 118Z589) ve COST CA16212 - INDEPTH projeleri tarafından desteklenmektedir. Yazarlar (HY, BŞY ve SDKÖ) YÖK 100/2000 Sürdürülebilir Tarım ve Bitki Biyoteknolojisi programı tarafından desteklenmektedir. Bitki Kromozom Laboratuvarındaki çalışmalarımız Ayhan Şahenk Vakfı tarafından desteklenmektedir. Makale değerlendirmesi esnasında kıymetli katkılarından dolayı hakemlere teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Mellone, B. G. (2009). Structural and temporal regulation of centromeric chromatin. *Biochem Cell Biol*, 87(1), 255-264. <https://doi.org/10.1139/O08-121>
- [2] Santos, A. P., Gaudin, V., Mozgová, I., Pontvianne, F., Schubert, D., Tek, A. L., Dvořáčková, M.,

Liu, C., Fransz, P., Rosa, S., & Farrona, S. (2020). Tidying-up the plant nuclear space: Domains, functions, and dynamics. *J Exp Bot*, 71(17), 5160-5178. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa282>

- [3] Henikoff, S., Ahmad, K., & Malik, H. S. (2001). The Centromere Paradox: Stable Inheritance with Rapidly Evolving DNA. *Science*, 293(5532), 1098-1102. <https://doi.org/10.1126/science.1062939>
- [4] Talbert, P. B., Masuelli, R., Tyagi, A. P., Comai, L., & Henikoff, S. (2002). Centromeric Localization and Adaptive Evolution of an *Arabidopsis* Histone H3 Variant. *The Plant Cell*, 14(5), 1053-1066. <https://doi.org/10.1105/tpc.010425>
- [5] Fukagawa, T., & Earnshaw, W. C. (2014). The Centromere: Chromatin Foundation for the Kinetochore Machinery. *Dev Cell*, 30(5), 496-508. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2014.08.016>
- [6] Jiang ve Birchler. (2013). Plant Centromere Biology (1. bs). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118525715>
- [7] Robertis, D. (1987). Cell and molecular biology. 8th Edition. <https://www.osti.gov/biblio/6157496>
- [8] Bickmore, W. A. (2001). Karyotype Analysis and Chromosome Banding. *eLS*. <https://doi.org/10.1038/npg.els.0001160>
- [9] Rice, S. (1998). Endless Forms: Species and Speciation. Oxford University Press.
- [10] Schubert, I., & Lysak, M. A. (2011). Interpretation of karyotype evolution should consider chromosome structural constraints. *Trends in Genetics*, 27(6), 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2011.03.004>
- [11] Doyle, S. R., Tracey, A., Laing, R., Holroyd, N., Bartley, D., Bazant, W., Beasley, H., Beech, R., Britton, C., Brooks, K., Chaudhry, U., Maitland, K., Martinelli, A., Noonan, J. D., Paulini, M., Quail, M. A., Redman, E., Rodgers, F. H., Sallé, G., Cotton, J. A. (2020). Extensive genomic and transcriptomic variation defines the chromosome-scale assembly of *Haemonchus contortus*, a model gastrointestinal worm. *BioRxiv*, <https://doi.org/10.1101/2020.02.18.945246>
- [12] Fu, S., Gao, Z., Birchler, J., & Han, F. (2012). Dicentric Chromosome Formation and Epigenetics of Centromere Formation in Plants. *Journal of Genetics and Genomics*, 39(3), 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2012.01.006>
- [13] Pluta, A. F., Mackay, A. M., Ainsztein, A. M., Goldberg, I. G., & Earnshaw, W. C. (1995). The centromere: Hub of chromosomal activities. *Science*, 270(5242), 1591-1594. <https://doi.org/10.1126/science.270.5242.1591>
- [14] Ekwall, K. (2007). Epigenetic control of

- centromere behavior. *Annu Rev Genet*, 41, 63-81.
<https://doi.org/10.1146/annurev.genet.41.110306.130127>
- [15] Clarke, L. (1990). Centromeres of budding and fission yeasts. *Trends Genet*, 6(5), 150-154.
[https://doi.org/10.1016/0168-9525\(90\)90149-z](https://doi.org/10.1016/0168-9525(90)90149-z)
- [16] Stoler, S., Keith, K. C., Curnick, K. E., & Fitzgerald-Hayes, M. (1995). A mutation in CSE4, an essential gene encoding a novel chromatin-associated protein in yeast, causes chromosome nondisjunction and cell cycle arrest at mitosis. *Genes Dev.*, 9(5), 573-586.
<https://doi.org/10.1101/gad.9.5.573>
- [17] McGrew, J., Diehl, B., & Fitzgerald-Hayes, M. (1986). Single base-pair mutations in centromere element III cause aberrant chromosome segregation in *Saccharomyces cerevisiae*. *Mol Cell Biol*, 6(2), 530-538.
<https://doi.org/10.1128/mcb.6.2.530>
- [18] Wensch, D. L., Kethley, J. B., & Norton, R. A. (1994). Cytogenetics of Holokinetic Chromosomes and Inverted Meiosis: Keys to the Evolutionary Success of Mites, with Generalizations on Eukaryotes. *Springer*, 282-343. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2389-5_11
- [19] Mandrioli, M., & Manicardi, G. C. (2012). Unlocking holocentric chromosomes: New perspectives from comparative and functional genomics? *Curr. Genomics*, 13(5), 343-349.
<https://doi.org/10.2174/138920212801619250>
- [20] Voullaire, L., Saffery, R., Earle, E., Irvine, D. V., Slater, H., Dale, S., Sart, D. du, Fleming, T., & Choo, K. H. A. (2001). Mosaic inv dup(8p) marker chromosome with stable neocentromere suggests neocentromerization is a post-zygotic event. *American Journal of Medical Genetics*, 102(1), 86-94.
[https://doi.org/10.1002/1096-8628\(20010722\)102:1<86::AID-AJMG1390>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/1096-8628(20010722)102:1<86::AID-AJMG1390>3.0.CO;2-T)
- [21] Nasuda, S., Hudakova, S., Schubert, I., Houben, A., & Endo, T. R. (2005). Stable barley chromosomes without centromeric repeats. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 102(28), 9842-9847.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0504235102>
- [22] Peacock, W. J., Dennis, E. S., Rhoades, M. M., & Pryor, A. J. (1981). Highly repeated DNA sequence limited to knob heterochromatin in maize. *PNAS*, 78(7), 4490-4494.
<https://doi.org/10.1073/pnas.78.7.4490>
- [23] Thomas, C. A. (1971). The genetic organization of chromosomes. *Annu. Rev. Genet.*, 5, 237-256.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ge.05.120171.001321>
- [24] Choo, K. H. (1997). Centromere DNA dynamics: Latent centromeres and neocentromere formation. *American Journal of Human Genetics*, 61(6), 1225-1233.
<https://doi.org/10.1086/301657>
- [25] Bennetzen, J. L., & Wang, H. (2014). The Contributions of Transposable Elements to the Structure, Function, and Evolution of Plant Genomes. *Annual Review of Plant Biology*, 65(1), 505-530.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-035811>
- [26] Talbert, P. B., & Henikoff, S. (2020). What makes a centromere? *Experimental Cell Research*, 389(2), 111895.
<https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2020.111895>
- [27] Ohno. (1972). Ohno "Junk" DNA paper in full, 1972. <http://www.junkdna.com/ohno.html>
- [28] Grewal, S. I. S., & Elgin, S. C. R. (2007). Transcription and RNA interference in the formation of heterochromatin. *Nature*, 447(7143), 399-406.
<https://doi.org/10.1038/nature05914>
- [29] Plohl, M. (2010). Those mysterious sequences of satellite DNAs. *Periodicum Biologorum*, 112, 403-410.
- [30] Harrison, G. E., & Heslop-Harrison, J. S. (1995). Centromeric repetitive DNA sequences in the genus *Brassica*. *Theoret. Appl. Genetics*, 90(2), 157-165.
<https://doi.org/10.1007/BF00222197>
- [31] Plohl, M., Meštrović, N., & Mravinac, B. (2014). Centromere identity from the DNA point of view. *Chromosoma*, 123(4), 313-325.
<https://doi.org/10.1007/s00412-014-0462-0>
- [32] Iwata, A., Tek, A. L., Richard, M. M. S., Abernathy, B., Fonsêca, A., Schmutz, J., Chen, N. W. G., Thareau, V., Magdelenat, G., Li, Y., Murata, M., Pedrosa-Harand, A., Geffroy, V., Nagaki, K., & Jackson, S. A. (2013). Identification and characterization of functional centromeres of the common bean. *The Plant Journal*, 76(1), 47-60.
<https://doi.org/10.1111/tpj.12269>
- [33] Kunze, R., Saedler, H., & Lönnig, W.-E. (1997). Plant Transposable Elements. J. A. Callow (Ed.), *Advances in Botanical Research* (C. 27, ss. 331-470). [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(08\)60284-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(08)60284-0)
- [34] Macas, J., Neumann, P., & Navrátilová, A. (2007). Repetitive DNA in the pea (*Pisum sativum* L.) genome: Comprehensive characterization using 454 sequencing and comparison to soybean and *Medicago truncatula*. *BMC Genomics*, 8, 427.
<https://doi.org/10.1186/1471-2164-8-427>
- [35] Nagaki, K., Neumann, P., Zhang, D., Ouyang, S., Buell, C. R., Cheng, Z., & Jiang, J. (2005). Structure, Divergence, and Distribution of the CRR Centromeric Retrotransposon Family in Rice. *Mol Biol Evol*, 22(4), 845-855.

- <https://doi.org/10.1093/molbev/msi069>
- [36] Zhong, C. X., Marshall, J. B., Topp, C., Mroczek, R., Kato, A., Nagaki, K., Birchler, J. A., Jiang, J., & Dawe, R. K. (2002). Centromeric Retroelements and Satellites Interact with Maize Kinetochores Protein CENH3. *The Plant Cell*, 14(11), 2825-2836. <https://doi.org/10.1105/tpc.006106>
- [37] Lim, K.B., Yang, T.J., Hwang, Y.J., Kim, J. S., Park, J.Y., Kwon, S.J., Kim, J., Choi, B.S., Lim, M.H., Jin, M., Kim, H.I., Jong, H. de, Bancroft, I., Lim, Y., & Park, B.S. (2007). Characterization of the centromere and pericentromere retrotransposons in Brassica rapa and their distribution in related Brassica species. *The Plant Journal*, 49(2), 173-183. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2006.02952.x>
- [38] Tek, A.L., Kashiwara, K., Murata, M., & Nagaki, K. (2010). Functional centromeres in soybean include two distinct tandem repeats and a retrotransposon. *Chromosome Res*, 18(3), 337-347. <https://doi.org/10.1007/s10577-010-9119-x>
- [39] Nagaki, K., Song, J., Stupar, R. M., Parokony, A. S., Yuan, Q., Ouyang, S., Liu, J., Hsiao, J., Jones, K. M., Dawe, R. K., Buell, C. R., & Jiang, J. (2003). Molecular and cytological analyses of large tracks of centromeric DNA reveal the structure and evolutionary dynamics of maize centromeres. *Genetics*, 163(2), 759-770.
- [40] Schmidt, T., & Heslop-Harrison, J. S. (1998). Genomes, genes and junk: The large-scale organization of plant chromosomes. *Trends in Plant Science*, 3(5), 195-199. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01223-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01223-0)
- [41] Mehrotra, S., & Goyal, V. (2014). Repetitive Sequences in Plant Nuclear DNA: Types, Distribution, Evolution and Function. *Genomics, Proteomics & Bioinformatics*, 12(4), 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.gpb.2014.07.003>
- [42] John, H. A., Birnstiel, M. L., & Jones, K. W. (1969). RNA-DNA hybrids at the cytological level. *Nature*, 223(5206), 582-587. <https://doi.org/10.1038/223582a0>
- [43] Biscotti, M. A., Olmo, E., & Heslop-Harrison, J. S. (Pat). (2015). Repetitive DNA in eukaryotic genomes. *Chromosome Res*, 23(3), 415-420. <https://doi.org/10.1007/s10577-015-9499-z>
- [44] Charlesworth, B., Sniegowski, P., & Stephan, W. (1994). The evolutionary dynamics of repetitive DNA in eukaryotes. *Nature*, 371(6494), 215-220. <https://doi.org/10.1038/371215a0>
- [45] Tek, A. L., & Jiang, J. (2004). The centromeric regions of potato chromosomes contain megabase-sized tandem arrays of telomere-similar sequence. *Chromosoma*, 113(2), 77-83. <https://doi.org/10.1007/s00412-004-0297-1>
- [46] Tek, A. L., Song, J., Macas, J., & Jiang, J. (2005). Sobo, a Recently Amplified Satellite Repeat of Potato, and Its Implications for the Origin of Tandemly Repeated Sequences. *Genetics*, 170(3), 1231-1238. <https://doi.org/10.1534/genetics.105.041087>
- [47] Heslop-Harrison, J. S., Brandes, A., & Schwarzacher, T. (2003). Tandemly repeated DNA sequences and centromeric chromosomal regions of Arabidopsis species. *Chromosome Res*, 11(3), 241-253. <https://doi.org/10.1023/A:1022998709969>
- [48] Zhang, X., Li, X., Marshall, J. B., Zhong, C. X., & Dawe, R. K. (2005). Phosphoserines on Maize Centromeric histone H3 and Histone H3 Demarcate the Centromere and Pericentromere during Chromosome Segregation. *The Plant Cell*, 17(2), 572-583. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.028522>
- [49] Birchler, J. A., & Han, F. (2009). Maize Centromeres: Structure, Function, Epigenetics. *Annu. Rev. Genet*, 43(1), 287-303. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-102108-134834>
- [50] Tek, A. L., Kashiwara, K., Murata, M., & Nagaki, K. (2011). Functional centromeres in *Astragalus sinicus* include a compact centromere-specific histone H3 and a 20-bp tandem repeat. *Chromosome Res*, 19(8), 969-978. <https://doi.org/10.1007/s10577-011-9247-y>
- [51] Lee, H. R., Zhang, W., Langdon, T., Jin, W., Yan, H., Cheng, Z., & Jiang, J. (2005). Chromatin immunoprecipitation cloning reveals rapid evolutionary patterns of centromeric DNA in *Oryza* species. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 102(33), 11793-11798. <https://doi.org/10.1073/pnas.0503863102>
- [52] Cheng, Z., Dong, F., Langdon, T., Ouyang, S., Buell, C. R., Gu, M., Blattner, F. R., & Jiang, J. (2002). Functional Rice Centromeres Are Marked by a Satellite Repeat and a Centromere-Specific Retrotransposon. *The Plant Cell*, 14(8), 1691-1704. <https://doi.org/10.1105/tpc.003079>
- [53] Gill, N., Findley, S., Walling, J. G., Hans, C., Ma, J., Doyle, J., Stacey, G., & Jackson, S. A. (2009). Molecular and Chromosomal Evidence for Allopolyploidy in Soybean. *Plant Physiology*, 151(3), 1167-1174. <https://doi.org/10.1104/pp.109.137935>
- [54] Liu, Q., Chang, S., Hartman, G. L., & Domier, L. L. (2018). Assembly and annotation of a draft genome sequence for *Glycine latifolia*, a perennial wild relative of soybean. *Plant J*, 95(1), 71-85. <https://doi.org/10.1111/tbj.13931>

- [55] Mehrotra, S., Goel, S., Sharma, S., Raina, S. N., & Rajpal, V. R. (2013). Sequence analysis of *KpnI* repeat sequences to revisit the phylogeny of the Genus *Carthamus L.* *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 169(4), 1109-1125. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-0063-4>
- [56] Silva, D. M. Z. A., Pansonato-Alves, J. C., Utsunomia, R., Daniel, S. N., Hashimoto, D. T., Oliveira, C., Porto-Foresti, F., & Foresti, F. (2013). Chromosomal organization of repetitive DNA sequences in *Astyanax bockmanni* (Teleostei, Characiformes): Dispersive location, association and colocalization in the genome. *Genetica*, 141(7-9), 329-336. <https://doi.org/10.1007/s10709-013-9732-7>
- [57] Keçeli, B. N., Jin, C., Van Damme, D., & Geelen, D. (2020). Conservation of centromeric histone 3 interaction partners in plants. *J Exp Bot*, 71(17), 5237-5246. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa214>
- [58] Macas, J., Požárková, D., Navrátilová, A., Nouzová, M., & Neumann, P. (2000). Two new families of tandem repeats isolated from genus *Vicia* using genomic self-priming PCR. *Mol Gen Genet*, 263(5), 741-751. <https://doi.org/10.1007/s004380000245>
- [59] Nagaki, K., Talbert, P. B., Zhong, C. X., Dawe, R. K., Henikoff, S., & Jiang, J. (2003). Chromatin immunoprecipitation reveals that the 180-bp satellite repeat is the key functional DNA element of *Arabidopsis thaliana* centromeres. *Genetics*, 163(3), 1221-1225.
- [60] Novák, P., Neumann, P., Pech, J., Steinhaisl, J., & Macas, J. (2013). RepeatExplorer: A Galaxy-based web server for genome-wide characterization of eukaryotic repetitive elements from next-generation sequence reads. *Bioinformatics*, 29(6), 792-793. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt054>
- [61] Earnshaw, W. C., & Rothfield, N. (1985). Identification of a family of human centromere proteins using autoimmune sera from patients with scleroderma. *Chromosoma*, 91(3), 313-321. <https://doi.org/10.1007/BF00328227>
- [62] Palmer, D. K., O'Day, K., Wener, M. H., Andrews, B. S., & Margolis, R. L. (1987). A 17-kD centromere protein (CENP-A) copurifies with nucleosome core particles and with histones. *J Cell Biol*, 104(4), 805-815. <https://doi.org/10.1083/jcb.104.4.805>
- [63] Yu, H. G., Dawe, R. K., Hiatt, E. N., & Dawe, R. K. (2000). The plant kinetochore. *Trends in Plant Science*, 5(12), 543-547. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01789-1](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01789-1)
- [64] Jiang, J., Birchler, J. A., Parrott, W. A., & Kelly Dawe, R. (2003). A molecular view of plant centromeres. *Trends in Plant Science*, 8(12), 570-575. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2003.10.011>
- [65] Warburton, P. E., Cooke, C. A., Bourassa, S., Vafa, O., Sullivan, B. A., Stetten, G., Gimelli, G., Warburton, D., Tyler-Smith, C., Sullivan, K. F., Poirier, G. G., & Earnshaw, W. C. (1997). Immunolocalization of CENP-A suggests a distinct nucleosome structure at the inner kinetochore plate of active centromeres. *Current Biology*, 7(11), 901-904. [https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(06\)00382-4](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(06)00382-4)
- [66] Nagaki, K., Cheng, Z., Ouyang, S., Talbert, P. B., Kim, M., Jones, K. M., Henikoff, S., Buell, C. R., & Jiang, J. (2004). Sequencing of a rice centromere uncovers active genes. *Nat. Genet.*, 36(2), 138-145. <https://doi.org/10.1038/ng1289>
- [67] Tek, A. L., Kashihara, K., Murata, M., & Nagaki, K. (2014). Identification of the centromere-specific histone H3 variant in *Lotus japonicus*. *Gene*, 538(1), 8-11. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2014.01.034>
- [68] Tek, A. L., & Kara S. D. Ö. (2020). High allelic diversity of the centromere-specific histone H3 (CENH3) in the legume sainfoin (*Onobrychis viciifolia*). *Mol Biol Rep.* <https://doi.org/10.1007/s11033-020-05926-1>
- [69] Sullivan, K. F., Hechenberger, M., & Masri, K. (1994). Human CENP-A contains a histone H3 related histone fold domain that is required for targeting to the centromere. *J Cell Biol*, 127(3), 581-592. <https://doi.org/10.1083/jcb.127.3.581>
- [70] Maheshwari, S., Tan, E. H., West, A., Franklin, F. C. H., Comai, L., & Chan, S. W. L. (2015). Naturally occurring differences in CENH3 affect chromosome segregation in zygotic mitosis of hybrids. *PLoS Genetics*, 11(1), e1004970. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1004970>
- [71] Dawe, R. K., Reed, L. M., Yu, H. G., Muszynski, M. G., & Hiatt, E. N. (1999). A maize homolog of mammalian CENPC is a constitutive component of the inner kinetochore. *Plant Cell*, 11(7), 1227-1238. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC144275/>
- [72] Ogura, Y., Shibata, F., Sato, H., & Murata, M. (2004). Characterization of a CENP-C homolog in *Arabidopsis thaliana*. *Genes & Genetic Systems*, 79(3), 139-144. <https://doi.org/10.1266/ggs.79.139>
- [73] Ravi, M., & Chan, S. W. L. (2010). Haploid plants produced by centromere-mediated genome elimination. *Nature*, 464(7288), 615-618. <https://doi.org/10.1038/nature08842>
- [74] Douglas, R. N., & Birchler, J. A. (2013). Plant Centromere Epigenetics. *Plant Centromere Biology* (ss. 147-158). John Wiley & Sons,

- Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9781118525715.ch11>
- [75] Gent, J. I., Dong, Y., Jiang, J., & Dawe, R. K. (2012). Strong epigenetic similarity between maize centromeric and pericentromeric regions at the level of small RNAs, DNA methylation and H3 chromatin modifications. *Nucleic Acids Research*, 40(4), 1550-1560. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr862>
- [76] Strahl, B. D., & Allis, C. D. (2000). The language of covalent histone modifications. *Nature*, 403(6765), 41-45. <https://doi.org/10.1038/47412>
- [77] Demidov, D., Heckmann, S., Weiss, O., Rutten, T., Dvořák Tomaštková, E., Kuhlmann, M., Scholl, P., Municio, C. M., Lermontova, I., & Houben, A. (2019). Deregulated Phosphorylation of CENH3 at Ser65 Affects the Development of Floral Meristems in *Arabidopsis thaliana*. *Front Plant Sci*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00928>
- [78] Zhang, W., Lee, H.-R., Koo, D.-H., & Jiang, J. (2008). Epigenetic Modification of Centromeric Chromatin: Hypomethylation of DNA Sequences in the CENH3-Associated Chromatin in *Arabidopsis thaliana* and Maize. *Plant Cell*, 20(1), 25-34. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.057083>
- [79] Yan, H., Kikuchi, S., Neumann, P., Zhang, W., Wu, Y., Chen, F., & Jiang, J. (2010). Genome-wide mapping of cytosine methylation revealed dynamic DNA methylation patterns associated with genes and centromeres in rice. *Plant Journal*, 63(3), 353-365. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04246.x>
- [80] Wu, Y., Kikuchi, S., Yan, H., Zhang, W., Rosenbaum, H., Iniguez, A. L., & Jiang, J. (2011). Euchromatic Subdomains in Rice Centromeres Are Associated with Genes and Transcription. *Plant Cell*, 23(11), 4054-4064. <https://doi.org/10.1105/tpc.111.090043>
- [81] McClintock, B. (1956). Controlling Elements and the Gene. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 21, 197-216. <https://doi.org/10.1101/SQB.1956.021.01.017>
- [82] Talbert, P. B., & Henikoff, S. (2018). Transcribing Centromeres: Noncoding RNAs and Kinetochore Assembly. *Trends in Genet*, 34(8), 587-599. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2018.05.001>
- [83] Topp, C. N., Zhong, C. X., & Dawe, R. K. (2004). Centromere-encoded RNAs are integral components of the maize kinetochore. *PNAS*, 101(45), 15986-15991. <https://doi.org/10.1073/pnas.0407154101>
- [84] May, B. P., Lippman, Z. B., Fang, Y., Spector, D. L., & Martienssen, R. A. (2005). Differential Regulation of Strand-Specific Transcripts from *Arabidopsis* Centromeric Satellite Repeats. *PLoS Genetics*, 1(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.0010079>
- [85] Yan, H., Ito, H., Nobuta, K., Ouyang, S., Jin, W., Tian, S., Lu, C., Venu, R. C., Wang, G., Green, P. J., Wing, R. A., Buell, C. R., Meyers, B. C., & Jiang, J. (2006). Genomic and Genetic Characterization of Rice Cen3 Reveals Extensive Transcription and Evolutionary Implications of a Complex Centromere. *Plant Cell*, 18(9), 2123-2133. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.043794>
- [86] Han, F., Gao, Z., & Birchler, J. A. (2009). Reactivation of an Inactive Centromere Reveals Epigenetic and Structural Components for Centromere Specification in Maize. *Plant Cell*, 21(7), 1929-1939. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.066662>
- [87] Dunwell, J. M. (2010). Haploids in flowering plants: Origins and exploitation. *Plant Biotechnology Journal*, 8(4), 377-424. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2009.00498.x>
- [88] Dwivedi, S. L., Britt, A. B., Tripathi, L., Sharma, S., Upadhyaya, H. D., & Ortiz, R. (2015). Haploids: Constraints and opportunities in plant breeding. *Biotechnology Advances*, 33(6, Part 1), 812-829. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.07.001>
- [89] Ishii, T., Karimi-Ashtiyani, R., & Houben, A. (2016). Haploidization via Chromosome Elimination: Means and Mechanisms. *Annual Review of Plant Biology*, 67(1), 421-438. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114714>
- [90] Ravi, M., & Chan, S. W.-L. (2013). Centromere-Mediated Generation of Haploid Plants. *Plant Centromere Biology* (ss. 169-181). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118525715.ch13>
- [91] Kuppu, S., Ron, M., Marimuthu, M. P. A., Li, G., Huddleson, A., Siddeek, M. H., Terry, J., Buchner, R., Shabek, N., Comai, L., & Britt, A. B. (2020). A variety of changes, including CRISPR/Cas9-mediated deletions, in CENH3 lead to haploid induction on outcrossing. *Plant Biotechnol J*, pbi.13365. <https://doi.org/10.1111/pbi.13365>
- [92] Kalinowska, K., Chamas, S., Unkel, K., Demidov, D., Lermontova, I., Dresselhaus, T., Kumlhehn, J., Dunemann, F., & Houben, A. (2019). State-of-the-art and novel developments of in vivo haploid technologies. *Theor Appl Genet*, 132(3), 593-605. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3261-9>
- [93] Tek, A. L., Stupar, R. M., & Nagaki, K. (2015). Modification of centromere structure: A promising approach for haploid line production in plant breeding. *Turk J Agric For*, 39(4), 557-562.

- <http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/abstract.htm?id=16664>
- [94] Kelliher, T., Starr, D., Wang, W., McCuiston, J., Zhong, H., Nuccio, M. L., & Martin, B. (2016). Maternal Haploids Are Preferentially Induced by CENH3-tailswap Transgenic Complementation in Maize. *Front. Plant Sci.*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00414>
- [95] De Storme, N., Keçeli, B. N., Zamariola, L., Angenon, G., & Geelen, D. (2016). CENH3-GFP: A visual marker for gametophytic and somatic ploidy determination in *Arabidopsis thaliana*. *BMC Plant Biol.*, 16, 1. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0700-5>
- [96] Cuacos, M., H Franklin, F. C., & Heckmann, S. (2015). Atypical centromeres in plants-what they can tell us. *Front Plant Sci.*, 6, 913. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00913>
- [97] Martinez-Zapater, J. M., Estelle, M. A., & Somerville, C. R. (1986). A highly repeated DNA sequence in *Arabidopsis thaliana*. *Molec Gen Genet.*, 204(3), 417-423. <https://doi.org/10.1007/BF00331018>
- [98] Murata, M., Ogura, Y., & Motoyoshi, F. (1994). Centromeric repetitive sequences in *Arabidopsis thaliana*. *Jpn J Genet.*, 69(4), 361-370. <https://doi.org/10.1266/jjg.69.361>
- [99] Koukalová, B., Komarnitsky, I. K., & Kuhrová, V. (1993). The distribution of tobacco HRS60 DNA repeated sequences in species of the genus *Nicotiana*. *Plant Science.*, 88(1), 39-44. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(93\)90107-B](https://doi.org/10.1016/0168-9452(93)90107-B)
- [100] Ohmido, N., Ishimaru, A., Kato, S., Sato, S., Tabata, S., & Fukui, K. (2010). Integration of cytogenetic and genetic linkage maps of *Lotus japonicus*, a model plant for legumes. *Chromosome Res.*, 18(2), 287-299. <https://doi.org/10.1007/s10577-009-9103-5>
- [101] Kulikova, O., Geurts, R., Lamine, M., Kim, D. J., Cook, D. R., Leunissen, J., de Jong, H., Roe, B. A., & Bisseling, T. (2004). Satellite repeats in the functional centromere and pericentromeric heterochromatin of *Medicago truncatula*. *Chromosoma.*, 113(6), 276-283. <https://doi.org/10.1007/s00412-004-0315-3>
- [102] Neumann, P., Nouzová, M., & Macas, J. (2001). Molecular and cytogenetic analysis of repetitive DNA in pea (*Pisum sativum* L.). *Genome.*, 44(4), 716-728.
- [103] Neumann, P., Navrátilová, A., Schroeder-Reiter, E., Koblížková, A., Steinbauerová, V., Chocholová, E., Novák, P., Wanner, G., & Macas, J. (2012). Stretching the rules: Monocentric chromosomes with multiple centromere domains. *PLoS Genetics.*, 8(6), e1002777. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002777>
- [104] Galasso, I., Pignone, D. R., Harrison, G. E., Heslop Harrison, J. S. (1999). Location of two repeated DNA sequences of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. on chromosomes and extended DNA fibres by FISH. *Journal of Genetics & Breeding (Italy)*.
- [105] Iwata-Otsubo, A., Radke, B., Findley, S., Abernathy, B., Vallejos, C. E., & Jackson, S. A. (2016). Fluorescence In Situ Hybridization (FISH)-Based Karyotyping Reveals Rapid Evolution of Centromeric and Subtelomeric Repeats in Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) and Relatives. *G3 (Bethesda)*, 6(4), 1013-1022. <https://doi.org/10.1534/g3.115.024984>
- [106] Ishii, T., Juranić, M., Maheshwari, S., Bustamante, F. de O., Vogt, M. M., Salinas-Gamboa, R., Dreissig, S., Gursansky, N., How, T., Fuchs, J., Schubert, V., Spriggs, A., Vielle-Calzada, J. P., Comai, L., Koltunow, A. M. G., & Houben, A. (2020). Unequal contribution of two paralogous centromeric histones to function the cowpea centromere. *BioRxiv.*, 2020.01.07.897074. <https://doi.org/10.1101/2020.01.07.897074>
- [107] Vahedian, M., Shi, L., Zhu, T., Okimoto, R., Danna, K., & Keim, P. (1995). Genomic organization and evolution of the soybean SB92 satellite sequence. *Plant Molecular Biology.*, 29(4), 857-862. <https://doi.org/10.1007/BF00041174>
- [108] Morgante, M., Jurman, I., Shi, L., Zhu, T., Keim, P., & Rafalski, J. A. (1997). The STR120 satellite DNA of soybean: Organization, evolution and chromosomal specificity. *Chromosome Res.*, 5(6), 363-373. <https://doi.org/10.1023/A:1018492208247>
- [109] Lin, J.-Y., Jacobus, B. H., SanMiguel, P., Walling, J. G., Yuan, Y., Shoemaker, R. C., Young, N. D., & Jackson, S. A. (2005). Pericentromeric regions of soybean (*Glycine max* L. Merr.) chromosomes consist of retroelements and tandemly repeated DNA and are structurally and evolutionarily labile. *Genetics.*, 170(3), 1221-1230. <https://doi.org/10.1534/genetics.105.041616>
- [110] Heckmann, S., Macas, J., Kumke, K., Fuchs, J., Schubert, V., Ma, L., Novák, P., Neumann, P., Taudien, S., Platzer, M., & Houben, A. (2013). The holocentric species *Luzula elegans* shows interplay between centromere and large-scale genome organization. *Plant J.*, 73(4), 555-565. <https://doi.org/10.1111/tpj.12054>
- [111] Neumann, P., Schubert, V., Fuková, I., Manning, J. E., Houben, A., & Macas, J. (2016). Epigenetic Histone Marks of Extended Meta-Polycentric Centromeres of *Lathyrus* and *Pisum* Chromosomes. *Front Plant Sci.*, 7, 234. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00234>

Fe(III) İyonu Tayini İçin Floresans Sensör Geliştirilmesi

Development of Fluorescence Sensor for the Determination of Fe (III) Ion

Soner ÇUBUK^{*1} , Didem AYDIN² , M.Vezir KAHRAMAN¹ 

¹ Marmara Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, 34722, Kadıköy-İstanbul.

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

Öz

Düşük maliyet ve yüksek dayanıklılığı sayesinde vazgeçilmez bir metal olan demir, gıda sektöründen otomotiv sektörüne, beyaz eşyalardan kırtasiye malzemelerine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Aynı zamanda her canlı organizmanın biyolojik olarak temel bir bileşenidir. Demir iyonları hücrelerde aşırı veya düşük miktarda bulunduğu birçok hastalık oluşabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı Fe(III) iyonlarının tayin edilmesi oldukça önemlidir. Günümüze kadar yapılan başlıca Fe(III) tayini çalışmaları; voltmetri, kapiler elektroforez, induktif eşleşmiş plazma kütle spektrometrisi (ICP-MS) ve alevli atomik absorpsiyon spektroskopisi (FAAS) gibi yöntemleri içermektedir. Bu yöntemlerin hemen hemen hepsi karmaşık ve çok basamaklı örnek hazırlama prosedürleri içerdiği için zaman alıcı olmaktadır. Çalışmamızda, fotopolimerizasyon tekniği ile hazırlanan polimerik bir membran kullanılarak Fe(III) iyonlarının tayini için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Membranın yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiş ve ardından pH, kalibrasyon aralığı, duyarlılık, seçicilik, cevap süresi ve tekrarlanabilirlik gibi parametreler sistematik olarak incelenmiştir. Geliştirilen polimerik sensör, tatmin edici sonuçlarla gıda ve su örneklerinde Fe (III) iyonlarının tayinine başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Demir, Floresans, Polimerik Sensör.

Abstract

Iron, which is an indispensable metal due to its low cost and high durability, is used in many fields from food sector to automotive industry, from home appliances to stationery materials. It is also a biologically essential component of all living organisms. When iron ions are present in cells in excess or in low amounts, many diseases can occur. For these reasons, determination of Fe(III) ions is very important. So far, the methods in used for determination of iron are voltammetry, capillary electrophoresis, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and flame atomic absorption spectroscopy (FAAS) etc. But almost all of these methods are time taking methods due to complicated and multi stepped sample preparation procedure. In this study, a new method for the determination of Fe(III) ions using a polymeric membrane prepared by photopolymerization technique has been developed. The structural and morphological properties of the membrane were studied and then the parameters such as pH, calibration range, sensitivity, selectivity, response time and reproducibility were systematically investigated. The developed polymeric sensor was successfully applied to the determination of Fe(III) ions in food and water samples with satisfactory results.

Keywords: Iron, Fluorescence, Polymeric Sensor.

I. GİRİŞ

Sulu çözelti içindeki demir iyonlarının yüksek oranda seçicilikle ve hassas bir şekilde tayini, bu iyonların fizyolojik fonksiyonlarının canlı organizmalarda izlenmesi ve araştırılmasında büyük önem taşımaktadır. Yer kabuğunda kütlece en fazla bulunan dördüncü element olan demir, aynı zamanda dünya çapında üretilen bütün metal tonajının %95'i dahil olmak üzere tüm metallerin en çok kullanılanıdır. Demiri içeren en yaygın cevher hematittir, ama manyetit ve takonit gibi minerallerde de yaygın olarak bulunmaktadır. Ticari olarak demir, hematit ve magnetitin kok ve kireçtaşı ile bir yüksek fırındaki reaksiyonu ile üretilmektedir. Böylece dünya çapında her yıl yaklaşık 1,3 milyar ton üretilen çeliğin yapımında kullanılan yaklaşık %3 karbon ve diğer safsızlıkları içeren ham demir oluşturulmaktadır. Demir, düşük maliyet ve yüksek dayanım kombinasyonu sayesinde vazgeçilmez bir metal olup, gıda kaplarından arabalara, korkuluklardan çamaşır makinelerine, kargo gemilerinden kağıt zimbalarına kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Aynı zamanda demir, her canlı organizmanın biyolojik olarak temel bir bileşenidir. Oksijen ile temasında çok fazla çözünmeyen ve bu yüzden organizmalar tarafından alımı uygun olmayan oksitler oluşturması çevre için büyüme sınırlayıcı bir faktör olmaktadır. Bununla birlikte mayalarda olduğu gibi mikroplar tarafından salgılanan sideroforlar sayesinde demirin çözünmeyen Fe(III) formundan çözünebilir Fe²⁺ formuna indirgenmesini sağlayan mekanizmalarla çevreden biyolojik olarak demir alınabilmektedir. İnsanları da içine alan yüksek organizmalar da benzer mekanizmalara sahiptir. Fe(III), hemoglobinin ve çeşitli enzimlerin fonksiyonlarında, oksijen metabolizmasından DNA ve RNA sentezine kadar pek çok biyolojik işlemde hücre seviyesinde önemli roller üstlenmektedir. İnsan vücudunda, demir çoğunlukla proteine bağlı (hemoprotein)

hemoglobin ve miyogloblin olarak bilinen hem bileşikleri, hem enzimleri veya non-hem bileşikleri (flavin-demir enzimleri, transferrin ve ferritin) olarak bulunmaktadır. Demir, özellikle hemoglobin ve miyogloblin gibi oksijen taşıyan proteinlerin sentezleri, hem enzimlerinin ve elektron transferi, yükseltgenme-indirgenmelerde yer alan diğer demir içeren enzimlerin oluşumu için gerekmektedir. Demir alımının yetersiz olması veya yetersiz beslenme nedeniyle demir alınmaması sonucu anemi ortaya çıkabilir. Buna demir eksikliği anemisi adı verilmektedir. Demir eksikliği anemisi, mide ülserleri veya diğer kolon kanseri, rahim kanseri, bağırsak polipleri, hemoroitler vb. kronik kanama kaynakları olduğunda da ortaya çıkabilir. Demir eksikliği olması durumunda anemiye eşlik eden bağışıklık sistemini ve gündelik yaşamı sınırlayan birçok fonksiyonel bozukluk da gelişebilmektedir. Hamilelik sırasındaki demir eksikliği hem anne hem de bebek için kan zehirlenmesi (sepsis), anne ölümleri, paternal ölümler (doğumdan hemen önce, doğum sırasında ve doğumdan sonraki 48-72 saat içerisinde ölüm) ve düşük doğum ağırlığı gibi çeşitli olumsuz sonuçlara sebebiyet vermektedir. Ayrıca, demir eksikliği ve anemi öğrenme yeteneğini azaltmaktadır. Çoğu organizma için vazgeçilmez olan demirin eksikliği kadar fazlalığı da çeşitli patolojik bozukluklarla sonuçlanmaktadır. Demir iyonlarının hücrelerde aşırı miktarda bulunması durumunda Fenton reaksiyonu yoluyla lipitlere, nükleik asitlere ve proteinlere zarar verebilen reaktif oksijen türlerinin oluşumu tetiklenebilmektedir. Demir iyonlarının sebep olduğu hücresel toksisite, Alzheimer, Huntington ve Parkinson gibi ciddi hastalıklar ile ilişkilendirilmektedir [1-6].

Bu amaçla Fe(III) iyonlarının tayini için kapiler elektroforez, voltametri, indüktif eşleşmiş plazma atomik emisyon spektrometrisi (ICP-AES), indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometrisi (ICP-MS) ve alevli atomik absorpsiyon spektroskopisi (FAAS) esaslarına dayanan cihazlar kullanılmaktadır. Ama bu yöntemler oldukça tecrübeli ve bilgili personel ile çok titiz örnek hazırlama süreci içermektedir. Bu metotlar geniş doğrusal aralık ve iyi tespit limitleri sağlayabilmekte, ama laboratuvarda kullanmak için oldukça pahalı gelişmiş cihazlara ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca örneğin analize hazırlanması da potansiyel hata kaynağı olarak göze çarpmaktadır. Bu nedenle, Fe(III) belirlenmesi için basit, yüksek doğruluklu ve seçici sensörlerin hazırlanması ve eser Fe(III) iyonlarının belirlenmesi için bir yöntem oluşturulması gereklidir. Son yıllarda, duyarlılık, seçicilik, cevap süresi ve floresans kimyasal sensörlerin lokal gözlem avantajlarından yararlanarak Fe(III) sensör gelişiminde önemli çabalar sarf edilmiştir. Bununla birlikte, mevcut yöntemler ya düşük duyarlılık ve seçicilik açısından sınırlıdır, ya da sulu ortamlarla uyumsuzdur ve sadece birkaç tanesi tamamen sulu ortamda Fe(III) tayini için pratik olarak kullanılabilmektedir [7-14].

Çalışmamızda, fotopolimerizasyon tekniği ile hazırlanan polimerik membran kullanılarak Fe(III) iyonlarının tayini için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Membranın yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiş ve ardından pH, kalibrasyon aralığı, duyarlılık, seçicilik, tepki süresi ve tekrarlanabilirlik gibi parametreler sistematik olarak incelenmiştir. Geliştirilen polimerik sensör, tatmin edici sonuçlarla gıda ve su örneklerinde Fe(III) iyonlarının tayinine başarıyla uygulanmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kimyasal Maddeler

Çalışmamızda, polimerik membranın hazırlanmasında kullanılan tüm monomerlerin ve diğer kimyasal maddelerin tamamı analitik saflıkta olup Sigma'dan temin edilmiştir. 1000 ppm konsantrasyona sahip tüm stok tek metal çözeltileri ise Merck Millipore'dan satın alınmıştır. Deneylerde kullanılan metallerin çalışma çözeltileri de bu stok çözeltilerin ultra saf su ile seyreltilerek istenen konsantrasyonlara ulaşması ile hazırlanmıştır.

2.2. Deneysel Yöntemler

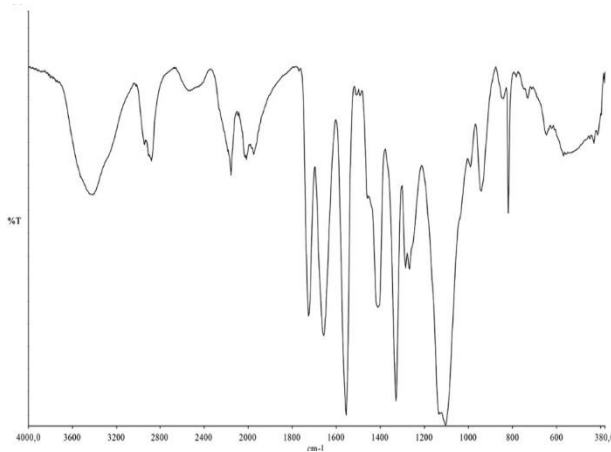
Deneylerde kullanılan polimerik membran 1-Vinil-2-pirrolidinon (NVP), Poli(etilen glikol) diakrilat (PEGDA), 1,3,5-Triallil 1,3,5-triazin-2,4,6(1H, 3H, 5H)-trion (TAT), Trimetilolpropan triakrilat (TMPTA) monomerlerinin 1-Hidroksi sikloheksilfenilketon (Irg-184) ve Kamforkinon (CQ) fotobaşlatıcılarının varlığında fotopolimerizasyon tekniği ile hazırlanmıştır. Reaksiyona girmemiş olan monomer ve fotobaşlatıcı aşırıların yapıdan uzaklaştırılmaları için membranlar saf su içerisinde 1 gece bekletildikten sonra liyofilizatör yardımıyla kurutularak deneyler için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan membranlarda tam kurumama, şeklen düzgün durmayıp kıvrılma, aşırı hidrofilik olup sulu ortamda çok hızlı şişme ya da sulu çözeltiyle geç etkileşme, suda veya farklı pH' larda dağılıma gibi bir takım istenmeyen durumlar ortaya çıkabildiği için, bu işlem farklı oranlarda monomer içeren formülasyonlar ile yapılmış ve istenmeyen durumların gerçekleşmediği en uygun formülasyona ve UV ışınlama süresine karar verilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

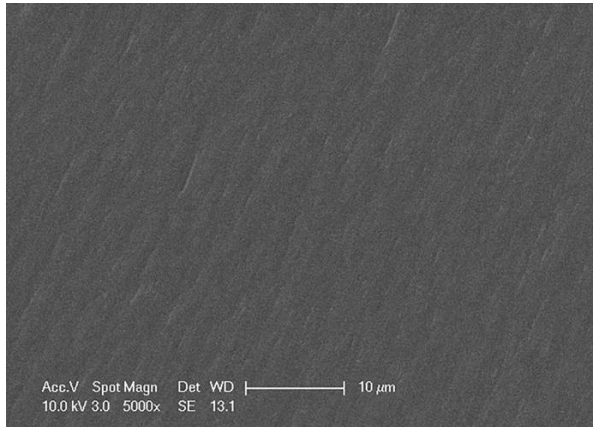
3.1. Karakterizasyon Çalışmaları

Zayıflatılmış Toplam Yansıma - Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (ATR-FTIR) ile 400-4000 cm^{-1} dalgaboyu aralıklarında kaydedilen spektrum Şekil 3.1'de gösterilmektedir. 2949 cm^{-1} ve 2883 cm^{-1} 'de görülen pikler TMPTA'daki asimetric -C-H titreşimini göstermektedir. 1727 cm^{-1} 'deki pik NVP, PEGDA ve TMPTA'daki karbonil grubuna aittir. 1106 cm^{-1} 'de görülen pik C-O gerilmesini göstermektedir. 1630 cm^{-1} 'deki akrilat gruplarına ait karakteristik pikin kaybolması çapraz bağlanmanın gerçekleştiğini göstermektedir. 1557 cm^{-1} 'de bulunan pik triazin halkası titreşim bantlarını göstermektedir [15-16].

Ayrıca polimerik membranın yüzey morfolojisinin belirlenmesi taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile yapılmıştır. Elde edilen Şekil 3.2’de yer alan 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü incelendiğinde membranın pürüzsüz ve gözeneksiz bir yapıda ve aynı zamanda homojen, çatlaksız, kırıksız bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Spektral karakterizasyon çalışmaları için gerekli ölçümler Varian Eclipse Spektrofluorimetre kullanılarak en uygun yarık genişlikleri ve fotoçoğaltıcı tüp voltajında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda uyarma ve emisyon dalga boyları sırasıyla 390 nm ve 425 nm, slit aralığı 5 nm ve fotoçoğaltıcı tüp voltajı da 600 V olarak tespit edilmiş ve Fe(III) iyonu varlığında fluoresans şiddetinin arttığı görülmüştür.



Şekil 3.1. Polimerik membranın ATR-FTIR spektrumu.

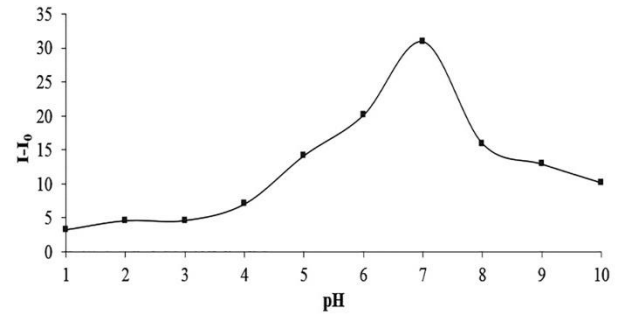


Şekil 3.2. Polimerik membranın 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.

3.2. Ölçüm Parametrelerinin Optimizasyonu

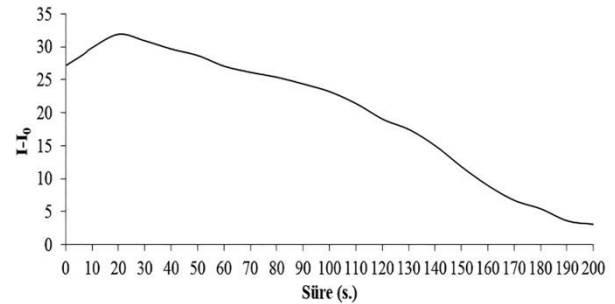
Elde edilen polimerik sensöre pH etkisinin incelenmesi amacıyla $1,79 \cdot 10^{-8}$ mol L⁻¹ Fe(III) çözeltisi varlığında pH 1,0-10,0 aralığındaki tampon çözeltiler kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda Şekil 3.3’te verilen grafikten de görüleceği üzere fluoresans şiddetinde pH 1,0- 7,0 aralığında artış, pH 7,0-10,0 aralığında ise azalış olduğu tespit edilmiştir. Maksimum fluoresans şiddetine pH 7,0 değerinde ulaşıldığı için en uygun pH

değerinin pH 7,0 olduğuna karar verilmiş ve daha sonraki çalışmalarda bu pH değeri esas alınmıştır.



Şekil 3.3. Fluoresans şiddeti üzerine pH etkisi.

$1,79 \cdot 10^{-8}$ mol L⁻¹ Fe(III) iyonu varlığında polimerik membranın vermiş olduğu fluoresans şiddetindeki zamana bağlı değişimin belirlenmesi amacıyla 5’er saniyelik periyotlar ile toplam 200 saniye süresince ölçüm yapılmış olup; Şekil 3.5’teki grafikten de görülebileceği gibi fluoresans şiddetinin başlangıçtan 20. saniyeye kadar artış gösterdiği, 20.saniyeden itibaren ise azaldığı belirlenmiştir. Fluoresans şiddetinin en fazla değeri göstermiş olduğu süre olan 20.saniyeye yöntemimizde analiz için en az beklenilmesi gereken süre olarak karar verilmiştir.



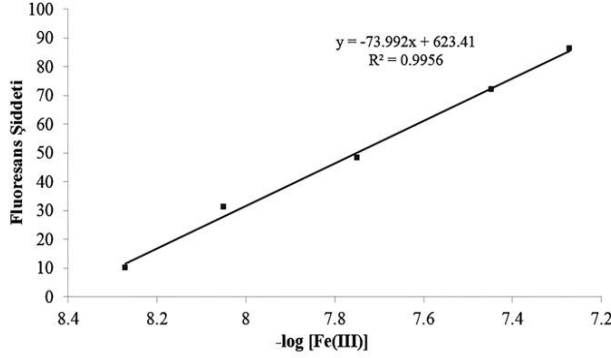
Şekil 3.4. Fluoresans şiddeti üzerine sürenin etkisi.

Rejenerasyon ve tekrarlanabilirlik özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda; polimerik membran sensörün Fe(III) iyonu ile temas ettikten sonra, sadece saf su ile bir dakikadan daha kısa bir yıkanması suretiyle başlangıç fluoresans şiddetine ulaşıldığı görülmüştür. Bu nedenle sensörün rejenerasyonu için sadece saf su kullanılmıştır. Bu rejenerasyon işlemi sonucunda aynı sensörün 200 defa kullanılabilirdiği ve en az 6 ay boyunca kararlı olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Kalibrasyon Aralığı ve Tespit Sınırının Belirlenmesi

Bu aşamaya kadar yürütülmüş olan çalışmalar sonucunda belirlenmiş olan uyarma ve emisyon dalga boyları (390 nm/425 nm), en uygun pH ve süre değerleri (pH:7 ve 20. saniye) kullanılarak oluşturulan kalibrasyon grafiği Şekil 3.5’te yer almaktadır. Kalibrasyon grafiği $5,36 \cdot 10^{-9}$ - $5,36 \cdot 10^{-8}$ mol L⁻¹ Fe(III) konsantrasyon aralığında doğrusal olmakla birlikte R²

değeri 0,9956 olarak hesaplanmıştır. Grafiklerde “I” ortamda Fe(III) iyonunun bulunduğu, “I₀” ise bulunmadığı durumlara ait floresans şiddetlerini göstermektedir. Yönteme ait tespit sınırı değeri (LOD) 6 adet şahit çözeltinin ölçüm sonuçlarından elde edilen standart sapma değerinin 3 katı (3ss) olarak hesaplanmış olup $2,24 \cdot 10^{-9}$ mol L⁻¹ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.5. Geliştirilen yönteme ait kalibrasyon grafiği.

3.4. Yabancı İyon Etkisinin İncelenmesi

Analiz ortamında bulunması muhtemel yabancı iyonların floresans şiddeti üzerine etkisinin araştırılması için daha önce belirlenen şartlarda olmak üzere $1,79 \cdot 10^{-8}$ mol L⁻¹ Fe(III) iyonu varlığında ölçümler yapılmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Sonuçlar, Fe(III) iyonunun yaklaşık 1000 katında bile, yabancı iyonların sensörün floresans şiddeti üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Tablo 3.1. Girişime sebep olabilecek yabancı iyonların kabul edilebilir üst sınırları.

Yabancı İyon	Müsaade edilen üst limit (mol L ⁻¹)
Mn(II)	$2,20 \cdot 10^{-5}$
Cu(II)	$1,99 \cdot 10^{-5}$
Cd(II)	$1,90 \cdot 10^{-5}$
Ni(II)	$1,73 \cdot 10^{-5}$
Co(III)	$1,47 \cdot 10^{-5}$
Cr(III)	$1,01 \cdot 10^{-5}$
Zn(II)	$1,04 \cdot 10^{-5}$
Ag(I)	$7,43 \cdot 10^{-6}$
Hg(II)	$4,93 \cdot 10^{-6}$
Pb(II)	$4,12 \cdot 10^{-6}$

3.5. Sensörün Analitik Uygulamaları

Bu amaçla Fe(III) konsantrasyonu ICP-MS cihazı ile NMKL 186 uluslararası standart yöntemine göre belirlenmiş olan kuyu suyu ve soya unu örnekleri kullanılmıştır. Örnekler mikrodalga cihazında HCl ve HNO₃ ile yakılarak analize hazırlanmıştır. Örneklerin içermekte olduğu Fe(III) konsantrasyonu geliştirdiğimiz yöntemle de ölçülerek elde edilmiş olan sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonuç olarak geliştirdiğimiz yöntemin %2,46 ve %2,87 bağıl hatalar ile başarılı bir

şekilde soya unu ve kuyu suyu gerçek örneklerine uygulanabildiği tespit edilmiştir.

3.6. Sonuç ve Değerlendirme

Hazırlanmış olduğumuz sensörün herhangi bir hasar olmaksızın en az 200 defa kullanılabilir olması ve tekrarlanabilir sonuçlar vermesi, 6 ay süreyle kararlı olması, 20 saniye gibi kısa bir sürede Fe(III) iyonlarının tayinine imkan tanınması yöntemimizin üstünlükleri arasında sayılabilir. Sonuç olarak geliştirdiğimiz yöntem, daha önce bildirilen yöntemlere göre yüksek seçicilik ve hassasiyet, düşük tespit limiti ve düşük maliyetinin yanı sıra herhangi bir ekstraksiyon gerektirmemesi ve organik zararlı çözücü kullanılmaması gibi avantajlara da sahip olup Fe(III) iyonu tayini için alternatif bir yöntem olarak umut vadetmektedir. Ayrıca polimerik sensörün gerçek numunelere de başarıyla uygulandığı görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma FEN-C-YLP-230119-0008 numaralı Marmara Üniversitesi BAPKO Lisansüstü Tez projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Liu, S.R., Wu, S.P. (2012). New water-soluble highly selective fluorescent chemosensor for Fe (III) ions and its application to living cell imaging. *Sensors and Actuators B*, 171-172,1110-1116.
- [2] Bricks, J.L., Kovalchuk, A., Trieflinger, C., Nofz, M., Büschel, M., Tolmachev, A.I., Daub, J., Rurack, K. (2005). On the Development of Sensor Molecules that Display FeIII-amplified Fluorescence. *J. Am. Chem. Soc.*, 127,13522-13529.
- [3] Abbaspour, N., Hurrell, R., Kelishadi, R. (2014). Review on iron and its importance for human health. *J. Res. Med. Sci.*, 19(2), 164–174.
- [4] Wei, D., Sun, Y., Yin, J., Wei, G., Du, Y. (2011). Design and application of Fe³⁺ probe for “naked-eye” colorimetric detection in fully aqueous system. *Sensors and Actuators B*, 160, 1316–1321.
- [5] Xiang, Y., Tong, A. (2006). A New Rhodamine-Based Chemosensor Exhibiting Selective FeIII-Amplified Fluorescence. *Org. Lett.*, 8(8),1549-1552.
- [6] Huang, S., Li, Z., Li, S., Yin, J., Liu, S. (2012). Imidazole-based dithienylethenes as a selective chemosensors for iron(III) ions. *Dyes and Pigments*, 92,961-966.
- [7] Timerbaev, A.R., Dabek-Zlotorzynska, E., Marc van den Hoop, A.G.T. (1999). Inorganic environmental analysis by capillary electrophoresis. *Analyst*, 124,811–826.
- [8] Van den Berg, C.M.G. (2006). Chemical speciation of iron in seawater by cathodic stripping voltammetry with dihydroxynaphthalene. *Analytical Chemistry*, 78,156–163.

- [9] Castillo Busto, M.E., Montes-Bayon, M., Blanco-Gonzalez, E., Meija, J., Sanz Medel, A. (2005). Strategies to study human serum transferrin isoforms using integrate liquid chromatography ICPMS, MALDI-TOF, and ESI-Q-TOF detection: application to chronic alcohol abuse. *Analytical Chemistry*, 77, 5615–5621.
- [10] Pomazal, K., Prohaska, C., Steffan, I., Reich, G., Huber, J.F.K. (1999). Determination of Cu, Fe, Mn, and Zn in blood fractions by SEC–HPLC–ICP–AES coupling. *Analyst*, 124, 657–663.
- [11] Vanloot, P., Coulomb, B., Brach-Papa, C., Sergent, M., Boudenne, J.L. (2007). Multivariate optimization of solid-phase extraction applied to iron determination in finished waters, *Chemosphere*, 69, 1351–1360.
- [12] Shamspur, T., Sheikhshoae, I., Mashhadizadeh, M.H. (2005). Flame atomic absorption spectroscopy (FAAS) determination of iron (III) after pre-concentration onto modified analcime zeolite with 5-((4-nitrophenylazo)-N-(2',4'-dimethoxy phenyl)) salicylaldehyde by column method. *J. Anal. At. Spectrom.*, 20, 476–478.
- [13] Andersen, J.E.T. (2005). A novel method for the filterless preconcentration of iron. *Analyst*, 130, 385–390.
- [14] Syal, A., Sud, D. (2018). Development of highly selective novel fluorescence quenching probe based on Bi₂S₃-TiO₂ nanoparticles for sensing the Fe(III). *Sensors and Actuators B*, 266, 1–8.
- [15] Çubuk, S., Firlak, M., Taşci, N., Yetimoğlu, E.K., & Kahraman, M.V. (2016). Phosphonic acid based polymeric fluorescent sensor for Hg(II) analysis. *Sensors and Actuators B-chemical*, 224, 640-647.
- [16] Firlak, M., Çubuk, S., Yetimoğlu, E.K., & Kahraman, M.V. (2016). Recovery of Au(III) ions by Au(III)-imprinted hydrogel. *Chemical Papers*, 70, 757-768.

Isıl Yaşlandırmanın Yüksek Yoğunluklu Polietilen/Fındık Kabuğu Polimer Kompozitinin Fiziksel ve Aşınma Özelliklerine Etkisi

Effects of thermal aging on physical and wear properties of high-density polyethylene/hazelnut shell polymer composite

Münir TAŞDEMİR¹ 

¹Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34722, Türkiye

Öz

Bu çalışmada; toz haline getirilmiş fındık kabukları, yüksek yoğunluklu polietilen içerisine, %5-10-15 ve 20 oranında katılarak enjeksiyon kalıplama yöntemiyle fındık kabuğu katkılı dört farklı polimer kompozit malzeme üretilmiştir. Malzemelere 15 ve 30 gün süreyle ısıtılma işlemi yapılmış ve malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan testlerin sonuçlarına göre, matris içerisinde fındık kabuğu toz oranlarının artmasıyla; limit oksijen indeksi (LOI), erime akış indeksi (MFI), ısıtılma sıcaklığı (HDT) ve Vicat yumuşama sıcaklığı değerlerinin düştüğü buna karşılık nem miktarı ve aşınma oranı değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Isıtılma süresinin artmasıyla Vicat yumuşama sıcaklığı, ısıtılma sıcaklığı, erime akış indeksi ve aşınma oranının da arttığı belirlenmiştir. Ancak ısıtılma süresinin artması ile HDPE/FK kompozitinin nem emme ve limit oksijen indeksi değerleri düşmüştür.

Anahtar kelimeler: Yüksek yoğunluklu polietilen, fındık kabuğu, aşınma, fiziksel özellikler, mekanik özellikler, ısıtılma.

Abstract

In this study, powdered hazelnut shells were added to high density polyethylene at a rate of 5-10-15 and 20%, and four different polymer composite materials with hazelnut shells were produced by injection molding. The materials were heat aged for 15 and 30 days and their physical and mechanical properties were examined. According to the results of the tests, with the increase of hazelnut shell powder ratio in the matrix; It was determined that the limit oxygen index (LOI), melt flow index (MFI), heat deflection temperature (HDT) and Vicat softening temperature values decreased, whereas moisture content and wear rate values increased. It was determined that as the the thermal aging time increased, the Vicat softening temperature, heat deflection temperature, melt flow index and wear rate also increased. However, with the increase in the thermal aging time, the moisture absorption and limit oxygen index values of HDPE / FK composite decreased.

Key words: High-density polyethylene, hazelnut shell, wear, physical properties, mechanical properties, thermal aging.

I. GİRİŞ

Fosil kaynaklarının sınırlı olması ve bunlardan yapılan ürünlerin çevreyi kirlenmesi konusunda endişeler artmaktadır. Petrol kaynaklarının yerine yenilenebilir kaynaklar bulmak ve bunlardan yapılan ürünlerin sürdürülebilirliğini sağlamak günümüzde çok ilgi çekmektedir [1]. Bu amaçla yenilenebilir kaynaklardan elde edilen bio-bazlı polimer kompozitler petrolden elde edilen polimerlerin yerlerini almaya başlamıştır. Bu durum polimer kompozitlerinde kullanılan sentetik liflerin yerini doğal liflerin almasına sebebiyet vermektedir. Aynı zamanda tarımsal yan ürünlerin ve atıkların karlı ürünlere dönüşümlerinin de önünü açmaktadır [2]. Yüksek yoğunluklu polietilen kendine özgü fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle yüksek tonajlı olarak dünyanın her bölgesinde kullanılmaktadır. Mühendislik polimerlerine kıyasla hava koşullarına dayanımının az olması, tokluk değerinin iyi olmaması ve çatlama direncinin az olması nedenleriyle kullanımı sınırlanmaktadır. Bu dezavantajı iyileştirmek için yüksek yoğunluklu polietilenin içerisine bazı maddeler katılmış ve özellikleri geliştirilmiştir [3]. Fındık kabukları lignoselülozik karakterli malzemelerdir. Genellikle yem gibi veya yakma amaçlı düşük değerli uygulamalarda kullanılırlar. Zehirsiz olmaları, hafif olmaları ve ucuz bir atık olmaları nedeniyle fındık kabuklarının dolgu malzemesi olarak kullanım alanları vardır [4].

Dolayısıyla bazı araştırmacılar bu doğrultuda polimerlerin içerisine bu doğal tarımsal atıkları katmakta ve özelliklerini araştırmaktadırlar. Örneğin, Sutivisedsak ve arkadaşları [4] yapmış oldukları bir çalışmada polimerlere badem, antep fıstığı ve fındık kabuklarını katmışlar ve bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada ise Kumar ve arkadaşları [5] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada polilaktik asit (PLA) içerisine

makademya (macadama) fındık kabukları katıp elde ettikleri biopolymer kompozitinin özelliklerini incelemişlerdir. Son yıllarda polimerler; kendi kendine yağlama yeteneklerinin olması, düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları, iyi aşınma dirençlerinin olması nedenleriyle dişliler, kamalar, tekerlekler, frenler, contalar ve burçlar gibi tribolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Katkısız polimerler bu tip uygulamalarda iyi mekanik ve aşınma özelliği sergileyemediğinden gerekli olan performansı karşılayamazlar. Polimer kompozitlerinin aşınma dirençleri, polimere katılan partiküllerin tiplerine, boyutlarına, boyut dağılımlarına, matris ile oluşturdıkları ara yüzey etkileşimine ve aşınma test koşullarına yani kayma mesafesi ve uygulanan kuvvet gibi etkenlere bağlıdır [6]. Dong ve arkadaşları [7] makademya türü fındık kabuklarını polyster içerisine katarak bir polimer kompoziti elde etmiş ve özelliklerini incelemişlerdir. Bae ve arkadaşları da [8] yapmış oldukları bir çalışmada karbon kompozit üretiminde makademya türü fındık kabukları kullanmışlardır. Balart, J. ve arkadaşları [9] ise polilaktik asit (PLA) polimerine %10-40 oranlarında değişen fındık kabukları katarak bir biyo-bazlı polimer kompoziti üretmişler ve özelliklerini incelemişlerdir. Artan fındık kabuğu ile polimer kompozitinin kristallenme derecesinin de arttığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda araştırmacılar fındık kabuğunun ilavesiyle kompozitin termo-boyutsal genleşme katsayısının da bir düşüş tespit etmişlerdir. Bunun sebebinin de fındık kabuklarının zincir hareketlerini engellemesinden kaynaklandığını çalışmalarında rapor etmişlerdir. Salasinska, K. [10] ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada atık polietilen ve fındık kabuğu tozlarından bina iç ve dış cephesinde kullanılabilir bir kompozit üretmişlerdir. Elde ettikleri kompozitin mekanik özellikleri, su emme ve yanma davranışları geliştirilmiştir. Zhang, Q. ve arkadaşlarının [11] yapmış oldukları çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen içerisine yer fıstığı, pirinç ve ceviz kabuğu tozları katarak polimer kompozitleri elde etmişler ve üç kompozitin özelliklerini karşılaştırmışlardır. Pirinç kabuğu dolgululu kompozitin diğer ceviz ve yer fıstığı dolgululu olanlardan daha mukavemetli, daha pürüzsüz yüzeye sahip olmaları ve sürünme dirençlerinin daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Mazur K. ve arkadaşları [12] odun ve keten lifleri ile ceviz kabuğu tozunu yüksek yoğunluklu polietilene katarak bu kompozitinin özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Örneğin elastiklik modülünü %600 oranında iyileştirmişlerdir. Tufan M. ve arkadaşlarının [13] yapmış oldukları çalışmada fındık kabuklarını geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen içerisine katarak bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Kompoziti oluşturan malzemeleri tek vidalı ekstrüzyon makinesinde karıştırmışlardır. Daha sonra test numunelerinin üretilmesinde sıcak pres sıkıştırma kalıplama kullanılmıştır. Çalışmalarında fındık kabuğu toz oranının artmasıyla eğilme ve çekme modüllerinin arttığını buna karşılık biyolojik kararlılığının, eğilme ve

çekme mukavemet değerlerinin düştüğünü belirlemişlerdir. Araştırmacılar yüksek yoğunluklu polietilen ve fındık kabukları arasındaki yapışmayı sağlamak için maleic anhidrit aşılı polietilen (MAPE) kullanmışlardır. Yıldırım, K. [14] polipropilen esaslı polimer kompozit üretiminde fındık kabuklarının değerlendirilmesi üzerine çalışmıştır. Polimer kompozitini ekstrüzyon yöntemi ile üretmiş ve sıkıştırma kalıplama yaparak numuneleri elde etmiştir. En iyi sonuçların %30 fındık kabuğu katkılı olan gruba ait olduğunu belirlemiştir.

Bu çalışmada, ülkemizde bol miktarda üretilmekte olan atık fındık kabuklarının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Ülkemizde genelde bu seluloz bazlı kabuklar yakılmaktadır. Bunların öğütülerek toz haline getirilmesi ve yüksek yoğunluklu polietilen içerisine bir çeşit dolgu malzemesi olarak katılması sağlanmıştır. Elde edilen polimer kompozitinin farklı ısıl yaşlandırma süreleri sonuçundaki değerleri belirlenmiş ve sonuçlar rapor edilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kompozisyon ve Malzemeler

Fındık kabuğu tozunun kompozit içerisinde oluşturacağı oranlar değiştirerek 5 farklı grup hazırlanmıştır. Aşağıda Tablo 1’ de oranlar verilmiştir. Kullanılan Petilen I 668 UV kodlu Petkim tarafından üretilen bir üründür. Yoğunluğu 0,970 g/cm³, erime akış indisi 5,2 g/10 dak. (190 °C-2,16 kg), akma mukavemeti 28,0 MPa ve çentikli Izod darbe mukavemeti ise 50 J/m’ dir. Fındık kabukları Rize’ de yaşayan yerel halktan temin edilmiştir.

Tablo 1. Karışım oranları dağılımı

Gruplar	HDPE (%)	Fındık kabuğu tozu (FK) (%)
1	100	-
2	95	5
3	90	10
4	85	15
5	80	20

2.2. Numune hazırlama

Fındık kabukları toz şeklinde partiküller üretmek için Siemens öğütücüsünde kuru olarak 30 ila 90 mikron aralığında öğütülmüştür. Şekil 1’de bu yöntemin fotoğrafları verilmiştir. Fındık kabuğu tozları Yamato ADP-31 tipi fırında matris ile karıştırılmadan önce 105 °C’ de 24 saat kurutulmuştur. Daha sonra tozlar ve HDPE granülleri Patterson marka karıştırıcısında onbeş dakika boyunca karıştırılmıştır. Bir sonraki aşamada ise Mikrosan marka çift vidalı ekstrüderde 25-30 bar basınç, 25 dev/dak dönüş hızında ve 190-220 °C arasındaki sıcaklıklarda eritilerek karışımları gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra tekrar fırında 80 °C’ de 24 saat kurutuldu ve test numuneleri enjeksiyon sıcaklığı 190–220 °C, enjeksiyon basıncı 800-1000 bar ve vida dönme hızı 25 dev/dak olan bir

enjeksiyon makinesinde test numuneleri basılmıştır. Devotrans marka bir fırında ısıtma hızlandırma yapılmıştır. Buradaki süre 15 ve 30 gün ve ısıtma hızlandırma sıcaklığı ise 100 °C idi.



Kırılmış kabuklar

Toz hali



Granülatör cihazı

Şekil 1. Kırılmış fındık kabuklarının toz haline getirilmesi

2.3. Karakterizasyon

Elde edilen gruplardan testler için beş adet numune alınmıştır ve ortalamaları verilmiştir. Isıl çarpılma sıcaklığı (HDT) testi ISO 75' e göre ve Vicat yumuşama sıcaklığı ise ISO 307' e göre Ceast marka test cihazı ile yapılmıştır. Isıl çarpılma sıcaklığı testi Metod A' ya göre yapılmıştır. Eğilme mukavemeti sabiti 1,8 MPa ve numuneye silikon yağının ısıtma hızı ise saatte 120 °C alınmıştır. Numune boyutları 80x10x4 mm olup mesnetler arası mesafe de 64 mm' dir. Numuneler yatay (flatwise) olarak test edilmiş olup 0,34 mm eğim miktarındaki sıcaklıklar kayıt edilmiştir. Numunelere uygulanan yük aşağıdaki formül ile belirlenmiştir.

$$F=2.\sigma.b.h^2/3L \quad (F:1)$$

Burada, σ : Eğilme mukavemeti (MPa), b: Numune genişliği (mm), h: Numune kalınlığı (mm), L: Mesnetler arası mesafe (mm), F: Numuneye uygulanan kuvvet (N)' dir. Bu formüle göre değerler yerine konulduğunda numune üzerine 3 Newton yük uygulanmıştır.

Vicat testi metod A' ya göre yapılmıştır. Vicat testinde numuneye 10 Newton yük uygulanmış ve silikon yağının ısıtma hızı ise saatte 120 °C alınmıştır. Bu sıcaklıkta ve 10 N yük altında cihazdaki batıcı ucun numuneye 1 mm girdiği andaki sıcaklık rapor edilmiştir. Burada kullanılan numunelerin boyutu 20x20x4mm olarak alınmıştır.

Erime akış indeksi (MFI) testi ISO 1133 standardına göre Zwick 4100 marka cihaz ile yapılmıştır. Bu testte, malzeme sıcaklık ile eritilerek üzerine belirli bir yük uygulanır ve bu yük altında kılcal bir borudan 10 dakika içerisinde ne kadar malzemenin aktığı belirlenir. Burada numuneye 230 °C sıcaklık uygulanmış olup 2,16 kg yük altında akışa zorlanmıştır. Bu değerlerin seçilmesinin nedeni ise standartta yüksek yoğunluklu polietilen için kullanılan değerler olmasıdır. Belirli bir süre sonunda akan malzeme test edilmiş ve aşağıdaki formülde değerler yerine konularak MFI değeri belirlenmiştir. Burada, m: Belirli sürede (T) akan toplam numune ağırlığı (gr) ve t: Belirli süre (sn)' dir.

$$MFI=m.600/t \quad (F:2)$$

Nem ölçüm tetleri ASTM D6980' e göre Kern marka nem ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihaz sıcaklığa dayanıklı numune kabının içerisine koyulan ürünü önce tartar ve hafızaya alır sonra halojen lambası ile 105 °C' ye kadar ısıtma yaparak numuneyi kurutur. Cihaz ürünün kurduğunu terazideki değerlerin değişiminden anlayarak ısıtmayı durdurur ve nemli miktar ile kuru miktarı bildiği için arasındaki farkı hassas bir şekilde % nem olarak ekrana getirir. Burada kullanılan numune boyutlarının ölçüleri 10x10x4 mm' dir.

Limit oksijen indeksi testleri ISO 4589' e göre Devotrans marka LOI test cihazı ile yapılmıştır. Oksijen indeksi testi bir plastiğin ateş çekildikten sonra yanmaya devam etmesi için havada bulunması gereken minimum oksijen miktarını gösterir. Deney parçasının boyutları standartta belirtilen tip 1' e göre basılmış olup boyutlar 80x10x4 mm' dir. Bu testte üst yüzey tutuşması olan A tipi tutuşma uygulanmıştır. LOI değeri bulunana kadar yaklaşık 10-15 adet numune test edilmiştir.

Aşınma testleri DIN 53 516 standardına göre Devotrans DA5 marka tambur tipi aşınma test cihazında yapılmıştır. Bu test için numunelerin kalınlığı 7 mm ve çapları ise 15,5 mm alınmıştır. Tamburun dönüş hızı dakikada 40 devir olarak alınmıştır. Numunelere uygulanan yük (F_N) 10 N ve aşındırma mesafeleri (L) ise 20-40-60 ve 80 metre olacak şekilde uygulanmıştır. Numunelerin kütle kaybı aşındırma işleme sonrasında ölçülerek aşınma oranları aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$W_s=\Delta m/\rho.F_N.L \quad (F:3)$$

Bu formülde Δm : Kütle kaybı, ρ : Yoğunluk, F_N : Uygulanan yük ve L: Aşındırma mesafesini temsil etmektedir. Aşınma oranlarının belirlenmesinde 3 adet numune test edilmiş ve aritmetik ortalamalar verilmiştir. Darbe numunelerinden elde edilen kırık yüzeyler Polaron marka kaplama cihazında altın/paladyum alaşımı ile kaplanmıştır. 10 nm kalınlığındaki bu kaplama elektriksel yüklemeyi önlemek için yapılmıştır. Daha sonra numuneler 20 kV altında Jeol marka taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

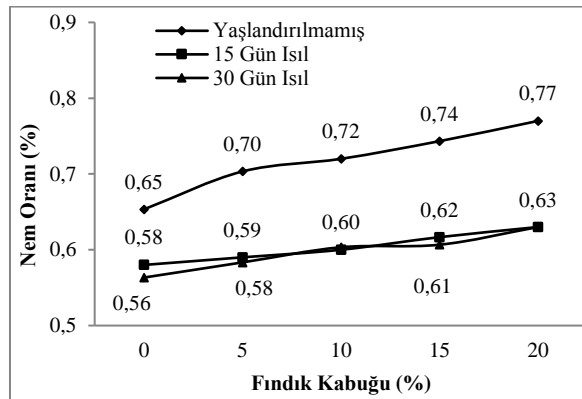
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Fiziksel Özellikler

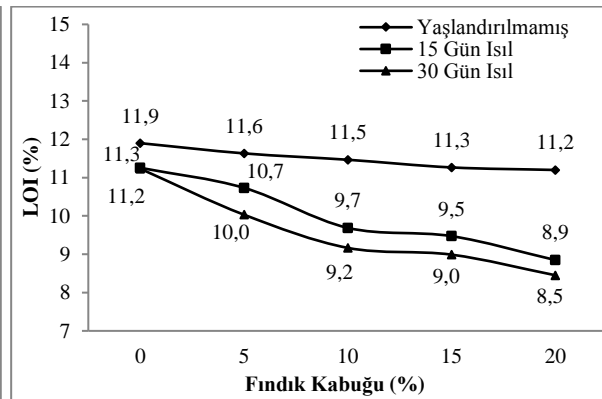
Isıl yaşlandırma süresinin ve fındık kabuklarının oranının artışıyla nem emme değerlerinin nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 2-A' da verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi HDPE polimerine fındık kabuğu tozlarının ilavesiyle kompozitin nem emme oranı artmıştır. Örneğin ısıl yaşlandırma yapılmamış dört farklı numunenin nem emme oranları sırasıyla % 0,70 - 0,72 - 0,74 ve 0,77' dir. Saf HDPE baktığımızda bu değer % 0,65 olduğu görülmektedir. Saf HDPE 'nin nem emme değerini en fazla toz katılan grup ile (%20 fk) karşılaştırdığımızda bu değer %18 oranında arttığı anlaşılmıştır. 15 günlük ısıl yaşlandırma uygulanmış gruplarda nem emme değerlerinin (fındık kabuğu tozu oranı %5, 10, 15 ve 20) sırasıyla % 0,59 - 0,60 - 0,62 ve 0,63 olduğu görülmektedir. Saf HDPE'nin emme değeri ise %0,58' dir. Saf HDPE'nin nem emme değerini %20 fındık kabuğu tozu katkılı grup ile karşılaştırıldığında bu değer %9 oranında arttığı görülmüştür. Diğer taraftan, 30 günlük ısıl yaşlandırmaya uygulanmış kompozitin nem emme değerlerinin (fındık kabuğu tozu oranı %5, 10, 15 ve 20) sırasıyla % 0,58 - 0,60 - 0,61 ve 0,63 olduğu ve saf HDPE'nin nem emme değerinin ise % 0,56 olduğu grafikte görülmektedir. Burada da saf HDPE' nin nem emme değerini %20 fındık kabuğu tozu ilaveli grubun değeri ile karşılaştırıldığında bu değer %13 oranında arttığı görülmektedir. Sonuç olarak, ısıl yaşlandırma süresinin artmasıyla (15'den 30 güne çıkması) HDPE/fındık kabuğu tozu polimer kompozitlerinin nem emme değerlerinin düştüğü görülmüştür. Akbaş, S. ve arkadaşlarının [15] yapmış oldukları bir çalışmada değişik oranlardaki fındık kabuklarını

polipropilen matris içerisine katıp bir polimer kompoziti oluşturmuşlar ve elde ettikleri kompozitin içerisinde fındık kabuğu tozlarının oranlarının artması ile yüzde kalınlık artışı ve su emme oranlarında artış olduğunu belirlemişlerdir. Stokke, D. ve arkadaşlarının [16] yapmış oldukları bir çalışmada da benzer sonuçların var olduğu görülmüştür. Su emme ve nem emme mikrarının artması fındık kabuğunun hidrofilik yapısından kaynaklanmaktadır.

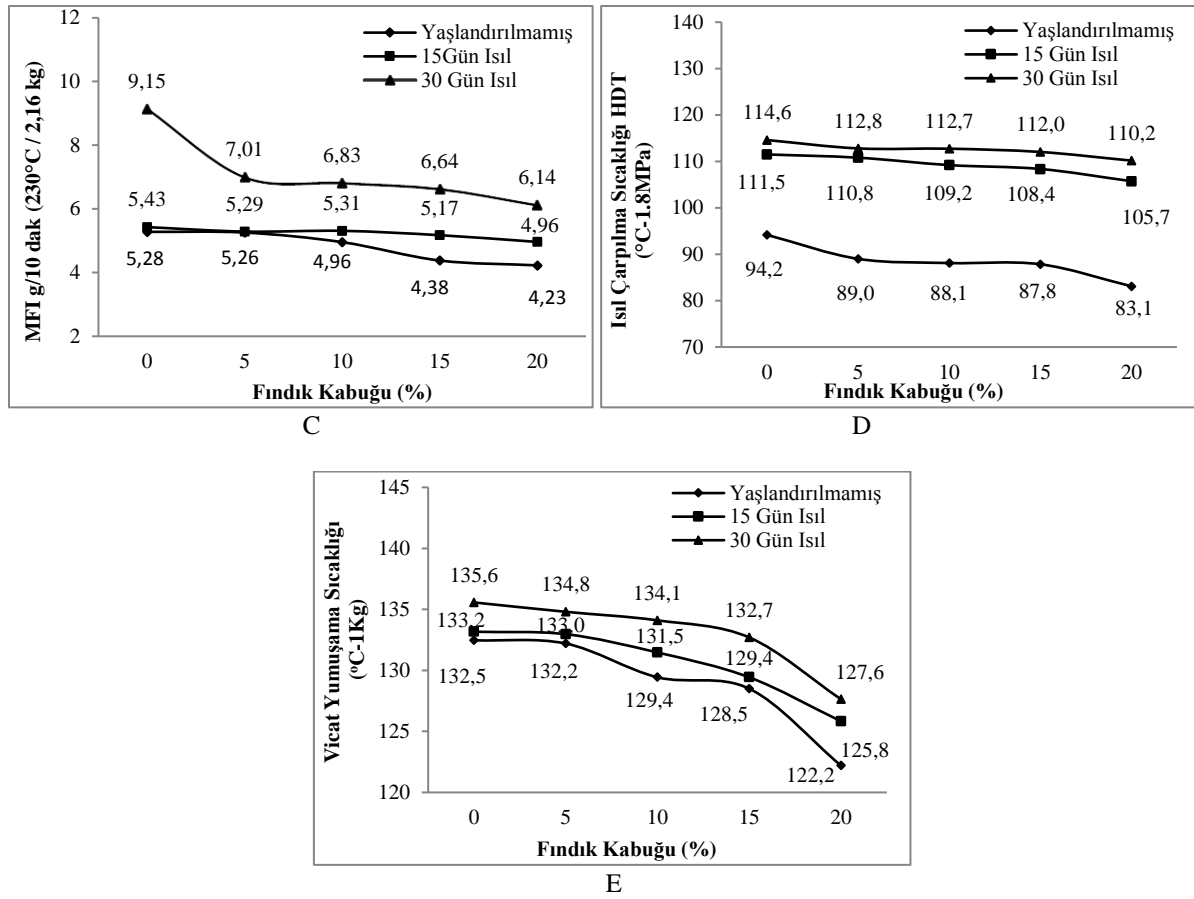
HDPE kompozitinde fındık kabuğu tozunun oranının ve ısıl yaşlandırma süresinin artışıyla limit oksijen indeksi değerlerinin nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 2-B' de verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi HDPE polimerine fındık kabuğu tozlarının ilavesiyle kompozitin limit oksijen indeksi değerleri düşmüştür. Şekilden de görüldüğü gibi ısıl yaşlandırma yapılmamış grup için limit oksijen indeksi değerleri sırasıyla % 11,6 - 11,5 - 11,3 ve 11,2 olarak ölçülmüştür. Saf HDPE'nin limit oksijen indeksi değeri ise % 11,9' dur. Bu değeri %20 fındık kabuğu tozu ilaveli grup ile karşılaştırıldığında değer %6 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Benzer durum 15 ve 30 günlük ısıl yaşlandırma uygulanmış gruplarda da görülmüştür. Fakat burada ısıl yaşlandırma süresinin artmasıyla limit oksijen indeksi değerlerinin bir miktar düştüğü de tespit edilmiştir. Limit oksijen indeksi bir polimerin yanmaya devam etmesi için ortamda bulunması gereken minimum oksijen miktarını gösteren değerdir. Dolayısıyla burada fındık kabuklarının ilavesiyle kompozitin LOI değerlerinde düşüş olmuştur. Yani daha az oksijen seviyelerinde bile yanmaya devam etmiştir. Bu da selüloz bazlı fındık kabuklarının daha kolay tutuşmalarından kaynaklanmaktadır.



A



B



Şekil 2. HDPE/fındık kabuğu tozu polimer kompozitinin fiziksel özellikleri (100°C' de yaşlandırma)

HDPE kompozitinde fındık kabuğu tozunun oranının ve ısıl yaşlandırma süresinin artışıyla erime akış indeksi değerlerinin nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 2-C' de verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi HDPE polimerine fındık kabuğu tozlarının ilavesiyle kompozitin erime akış indeksi değerleri düşmüştür. Yani malzeme fındık kabuğu tozlarının ilavesiyle akışkanlık özelliğini bir miktar kaybetmiştir. Malzemenin az veya çok akışkan olması kalıplama işleminde önem arz etmektedir. Çok akışkan yani MFI' yı yüksek malzemeler enjeksiyon işlemine daha uygundur. Az akışkan malzemelerde genelde ekstrüzyon işleminde tercih edilirler. Polimerlere çeşitli katkı maddeleri katılarak akışkanlıkları ayarlanabilir. Tekrar grafiğe dönecek olursak, örneğin ısıl yaşlandırma yapılmamış kompozitin MFI değerleri sırasıyla 5,26 - 4,96 - 4,38 ve 4,23 g/10 dak. olarak ölçülmüştür. Saf HDPE'nin erime akış indeksi değeri ise 5,28' dir. Saf HDPE'nin erime akış indeksi değerini %20 fındık kabuğu tozu ilaveli grup ile karşılaştırıldığında bu değer %20 oranında azaldığı anlaşılmaktadır. Benzer durum 15 ve 30 günlük ısıl yaşlandırma uygulanmış gruplarda da görülmüştür. Fakat burada ısıl yaşlandırma süresinin artması akışkanlığı yükseltmiştir. Yani kompozit ısıl yaşlandırma süresinin artmasıyla daha kolay akış özelliği kazanmıştır.

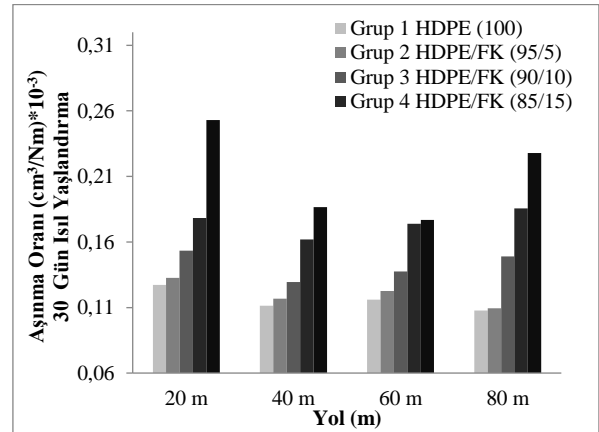
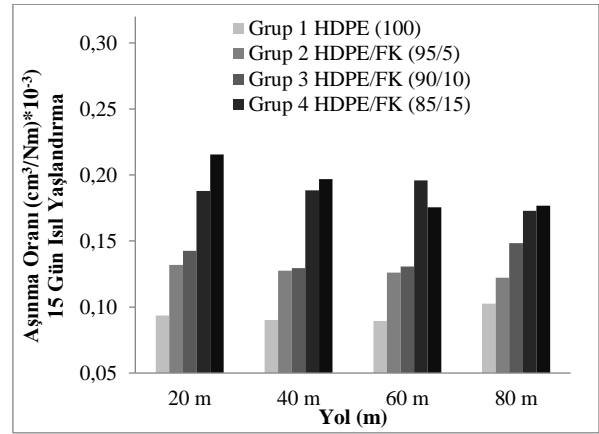
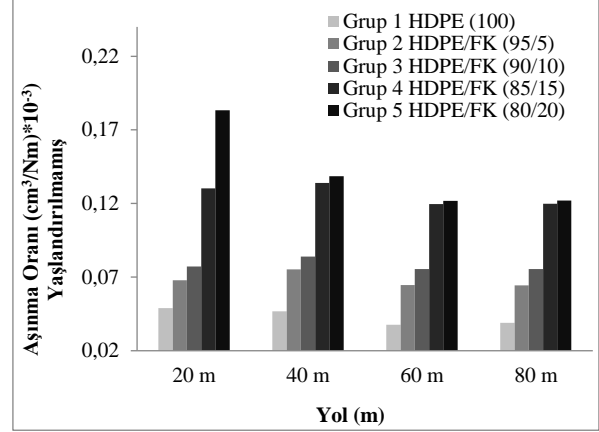
HDPE kompozitinde fındık kabuğu tozunun oranının ve ısıl yaşlandırma süresinin artışıyla ısıl çarpılma sıcaklığı değerlerinin nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 2-D' de verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi HDPE polimerine fındık kabuğu tozlarının ilavesiyle kompozitin ısıl çarpılma sıcaklığı değerleri düşmüştür. Örneğin ısıl yaşlandırma yapılmamış grupta değerler sırasıyla 89 - 88,1 - 87,8 ve 83,1 °C olarak ölçülmüştür. Saf HDPE' nin ısıl çarpılma sıcaklığı değeri ise 94,2' dir. Saf HDPE'nin ısıl çarpılma sıcaklığı değerini %20 fındık kabuğu tozu ilaveli grup ile karşılaştırıldığında bu değer %12 oranında azaldığı anlaşılmaktadır. Benzer durum 15 ve 30 gün ısıl yaşlandırma yapılmış gruplarda da görülmüştür. Buradan çıkan sonuç fındık kabukları tozlarının oranının polimer kompoziti içerisinde artmasıyla polimer kompozitinin daha düşük sıcaklıklarda eğilmeye başlamasıdır. Sıcaklığa maruz kalacak uygulamalarda bu durum istenmez. Düşük ısıl çarpılma sıcaklığı malzemenin çekme mukavemetinin de düşük olduğunu gösterir. Örneğin düşük yoğunluklu polietilenin ısıl çarpılma sıcaklığı düşük dolayısıyla çekme mukavemeti de düşüktür. Buna karşılık ısıl çarpılma sıcaklığı yüksek olan polikarbonatın çekme mukavemeti de yüksektir [17].

HDPE kompozitinde fındık kabuğu tozunun oranının ve ısıl yaşlandırma süresinin artışıyla Vicat yumuşama sıcaklığı değerlerinin nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 2-E' de verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi

HDPE polimerine fındık kabuğu tozlarının ilavesiyle kompozitin Vicat yumuşama sıcaklığı değerleri düşmüştür. Örneğin ısı yaşlandırma yapılmamış grubun değerleri sırasıyla 132,2 - 129,4 - 128,5 ve 122,2 °C olarak ölçülmüştür. Saf HDPE'nin Vicat yumuşama sıcaklığı değeri ise 132,5' dir. Bu değeri %20 fındık kabuğu tozu ilaveli grup ile karşılaştırıldığında değerlerin %8 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Benzer durum 15 ve 30 gün ısı yaşlandırma yapılmış gruplarda da görülmüştür. Vicat deneyi kompozitin kaç derecede yumuşamaya başladığını belirlemek için kullanılır. HDT için söylenenler Vicat yumuşama değerleri için de söylenebilir. Burada da fındık kabukları tozlarının miktarının polimer kompoziti içerisinde artışı polimer kompozitinin daha düşük sıcaklıklarda yumuşamaya başlamasına sebebiyet vermiştir. Bunun sebebinin fındık kabuğunun selulozik yapısından ve uyumluluk maddesi kullanılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.2. Aşınma Özellikleri

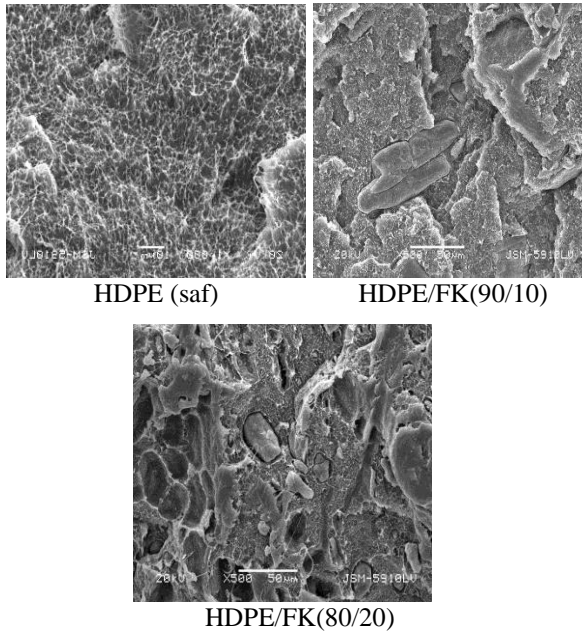
Bu testin yapılmasının amacı malzemenin sürtünme, kazıma gibi etkiler nedeniyle malzemeden kopan parçanın miktarının belirlenmesi prensibine dayanır. Malzemelerde aşınma davranışlarını ölçmek için bir çok deney düzeneği geliştirilmiştir. Bu çalışmada tambur tipi aşındırma test cihazı kullanılmıştır. Aşınma oranı formülüne (F:3) baktığımızda bu değere kütle kaybının yoğunluğunun, aşındırma mesafesinin ve uygulanan yükün etkin olduğu görülmektedir. Açıkcası aşınma davranışlarının belirlenmesi karmaşık bir işlemdir. Bu çalışmada HDPE matrisi içerisine katılan fındık kabuğu tozlarının oranlarının ve ısı yaşlandırma sürelerinin artışı ile aşınma oranlarındaki değişimler belirlenmiştir. Bu tambur tipi aşındırıcıda kullanılan zımpara kağıdı #60 numaralı kağıt olup numunelere 10 Newton yük uygulanmıştır. Tamburun dönme hızı ise 0,32 m/sn'dir. Aşındırma mesafeleri ise 20-40-60 ve 80 metredir. Aşınma oranı gösteren grafikler Şekil 3' de verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi HDPE matrisi içerisindeki fındık kabuğu tozlarının oranlarının artmasıyla aşınma oranlarında arttığı görülmektedir. Benzer durumun ısı yaşlandırma süresinin artmasıyla da olduğu anlaşılmaktadır. Aşınma mesafesinin 20 metreden 80 metreye çıkması ile kütle kaybı (Δm) artmıştır. Matris içerisindeki fındık kabuğu toz oranının %5' ten %20' ye çıkmasıyla da kütle kaybının (Δm) arttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebinin fındık kabukları ve matris arasında bir uyumluluk maddesinin kullanılmaması ve fındık kabuklarının rijit yapıda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3. HDPE/fındık kabuğu tozu polimer kompozitinin aşınma oranları

3.3. Mikroyapı Özellikleri

Saf HDPE, HDPE/fındık kabuğu tozu (90/10) ve HDPE/fındık kabuğu tozu (80/20) örneklerinin SEM görüntüleri Şekil 4' te verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi matris ve fındık kabuğu tozları net olarak gözükmemektedir. Tozların matrise yapışma yeteneği ve homojen olarak dağılması herhangi bir polimer kompozitinin özelliklerini anlamada çok yardımcı olmaktadır [18]. Şekil 4' ten de anlaşıldığı gibi, bazı fındık kabuğu parçacıklarının matrise olan zayıf bağlanmalarından dolayı hafifçe dışarıya doğru çıktıkları görülmektedir. Bazılarının ise HDPE matrisinin içerisine gömülü oldukları görülmektedir. Bazı çalışmalarda yüksek oranlarda dolgu kullanımı ara yüzeyde daha az yapışmanın olduğunu ortaya koymaktadır. Bazı araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalarda matris ile dolgu malzemesi arasında yapışmanın artırılması veya kalıplama kolaylığı sağlamak için çeşitli maddeler kullanmışlardır. Örneğin, Kızıldaş ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada [19] poli (etilen tereftalat) (PET) ve poli (trimetilen tereftalat) (PTT) polimerlerine mikro kristal selüloz katıp bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Yağlayıcı (lubricant) olarak kompozite struktol ticari isimli bir malzeme kompozitin daha kolay kalıplanması için işlem kolaylaştırıcı olarak katılmıştır. Zhang, X. ve arkadaşları ise [20] yapmış oldukları bir çalışmada polipropilen/mikro kristalin selüloz polimer kompozitlerinde polipropilen ile selüloz arasındaki yapışmanın artırılması kompozite maleik anhidrit aşılı polipropilen (PP-g-MA) ve metil akrilik asit glisidil ester aşılı PP (PP-g-GMA) katmışlardır. Bizim yapmış olduğumuz bu çalışmada herhangi bir arayüzey uyumluluk maddesi ve yağlayıcı kullanılmamıştır.



Şekil 4. Yaşlandırılmamış HDPE/fındık kabuğu tozu polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafları

IV. SONUÇLAR

Atık fındık kabuklarının HDPE matrisli kompozitlerde potansiyel bir dolgu malzemesi olarak kullanımı bu çalışmada ortaya konulmuştur. Dolayısıyla bu çalışma ile fındık kabuğu oranının ve ısıl yaşlandırma sürelerinin değişmesiyle birlikte elde edilen polimer kompozitinin limit oksijen indeksi, erime akış indeksi, ısıl çarpılma sıcaklığı, Vicat yumuşama sıcaklığı, aşınma oranları ve morfolojilerini nasıl etkilendiği ortaya konmuştur. HDPE matrisi içerisinde Fındık kabuğu toz oranının artmasıyla birlikte; limit oksijen indeksi, erime akış indeksi, ısıl çarpılma sıcaklığı ve Vicat yumuşama sıcaklık değerleri düşmüş buna karşılık nem emme miktarı ve aşınma oranı değerleri ise artmıştır. Diğer taraftan ısıl yaşlandırma süresinin artmasıyla da; erime akış indeksi, ısıl çarpılma sıcaklığı, Vicat yumuşama sıcaklığı ve aşınma oranı değerleri yükselmiş buna karşılık nem emme miktarı ve limit oksijen indeksi değerleri ise düşmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Zini, E., and Scandola, M., (2011) Green composites: an overview, *Polymer Composites*, 32 (12), 1905–1915.
- [2] Mukherjee, T., and Kao, N., (2011) PLA based biopolymer reinforced with natural fibre: a review, *Journal of Polymers and the Environment*, 19 (3) 714–725.
- [3] Yerleşen, U., Taşdemir, M., (2015) Effect of zinc oxide and zinc borate on mechanical properties of high density polyethylene, *Romanian J. of Materials*, 45 (3), 240-243.
- [4] Sutivisedsak, N., Cheng, H.N., Burks, C.S., Johnson, J.A., Siegel, J.P., Civerolo, E.L., Biswas, A., (2012). Use of nutshells as fillers in polymer composites, *J polymer Environ*, 20, 305-314.
- [5] Kumar, R., Ofosu, O., and Anandjiwala, R.D., (2013), Macadamia Nutshell Powder Filled Poly Lactic Acid Composites with Triacetin as a Plasticizer, *Journal of Biobased Materials and Bioenergy* 7(5) 541–548.
- [6] Zulkifli, N.I., Samat, N., Anuar, H., and Zainuddin, N. (2015). Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites, *Mater. Des.* 69, 114-123.
- [7] Dong, C., Davies, I.J., (2012). Flexural properties of macadamia nutshell particle reinforced polyester composites, *Compos. Part B-Eng.* (43), 2751-2756.
- [8] Bae, J.S., and Su, S., (2013), Macadamia nut shell-derived carbon composites for post combustion CO₂ capture, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 174–182.
- [9] Balart, J.F., Garcia-Sanoguera, D., Balart, R., Boronat, T., Sanchez-Nacher, L., (2016), Manufacturing and properties of biobased thermoplastic composites from poly(lactid acid)

- and hazelnut shell wastes, *Polymer composites*, 39, 848-857.
- [10] Salasinska, K., Ryszkowska, J., (2012), Natural fibre composites from polyethylene waste and hazelnut shell: Dimensional stability, physical, mechanical and thermal properties, *Composite Interfaces*, 19(5), 321-332.
- A) [11] Zhang, Q., Li, Y., Cai, H., Lin, X., Zhang, J., (2019), Properties comparison of high density polyethylene composites filled with three kinds of shell fiber, *Results in Physics*, 12, 1542-1546.
- [12] Mazur, K., Jakubowska, P., Romanska, P., Kuciel, S., (2020), Green high density polyethylene (HDPE) reinforced with basalt fiber and agricultural fillers for technical applications, *Composites Part B: Engineering*, 202.
- [13] Tufan, M., and Ayrilmis, N. (2016). Potential use of hazelnut husk in recycled high-density polyethylene composites, *BioResources*, 11(3), 7476-7489.
- [14] Yildirim, K. (2020). Evaluation of Hazelnut Shells in Polypropylene Based Polymer Composite Production. *International Journal of Science and Society*, 2(4), 40-45.
- [15] Akbaş, S., Güleç, T., Tufan, M., Tařciođlu, C., Peker, H., (2013) Findık kabuklarının polipropilen esaslı polimer kompozit üretiminde değerlendirilmesi, *Artvin Çorum Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 14 (1), 50-56.
- [16] Stokke DD, Gardner DJ (2003) Fundamental Aspects of Wood as a Component of Thermoplastic Composites, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 9, 2, 96–104
- [17] Taşdemir, M., (2018) Plastik malzemelerin test teknikleri, Seçkin kitap, ISBN 978-975-02-4729-3, sayfa: 79-85, Ankara
- [18] Mathew, A. P., Oksman, K., Sain, M., (2005) Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC), *J. Appl. Pol. Sci.* 97(5), 2014-2025.
- [19] Kızıltas, A., Gardner, D.J., Han, Y., Yang, H.S., (2010). Determining the mechanical properties of microcrystalline cellulose (MCC) filled PET/PTT blend composites, *Wood Fiber Sci.* 42(2), 165-176.
- [20] Zhang, X., Shen, J., Yang, H., Lin, Z., Tan, S., (2011). Mechanical properties, morphology, thermal performance, crystallization behavior, and kinetics of PP/microcrystal cellulose composites compatibilized by two different compatibilizers *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 24(6), 735-753.