



Kayseri Üniversitesi
Mühendislik ve Fen Bilimleri
Dergisi

*Kayseri University
Journal of Engineering and Science*

Temmuz 2025
Cilt: 1 Sayı:1

İÇİNDEKİLER

1. Selçuk, T., Didin, M., Turkmen, A., Konuş, E., vd. (t.y.). Determination of the Standards of Pomegranate Sour obtained from Hejaz Pomegranate and Katırbaşı Pomegranate Varieties Grown in Hatay Province. Kayseri Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 1-6.
2. Abdalla, O., Randrianantenaina, J. L., Baran, A. Y., Kılıç, R. (t.y.). Exploring The Izhikevich Neuron Model for Robust Signal Encoding and Reconstruction. Kayseri Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 7-11.
3. Doğan, S., Güneş, O., & Öztürk, İ. (t.y.). FPGA donanımı ile biyolojik nöron modellerinin modüler olarak tasarımı ve gerçekleştirimi. Kayseri Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 12-21.
4. Dolu, M., & Gengeç Benli, Ş. (t.y.). Zihinsel İş Yüğü Seviyelerinin EEG Alt Bantlarına Dayalı Sınıflandırılması. Kayseri Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 22-29.
5. Kuzuluk, H. M., Uzun, Ş. B. N., Turan, D., Berber, M., vd. (t.y.). Lityum İyon Piller için Çok Amaçlı Bir Batarya Yönetim Sistemi (BYS) Tasarımı, Gerçekleştirilmesi ve Test Edilmesi. Kayseri Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 30-36.

Determination of the Standards of Pomegranate Sour obtained from Hejaz Pomegranate and Katırbaşı Pomegranate Varieties Grown in Hatay Province

Hatay İlinde Yetiştirilen Hicaz Nar ve Katırbaşı Nar Çeşitlerinden Elde Edilen Nar Ekşilerinin Standartlarının Belirlenmesi

Tuğba Selçuk¹ , Mustafa Didin² , Alaeddin Türkmen^{3*} ,

Ertuğrul Konuş⁴ , Fatma Betül Sakallı⁵ 

¹ ORCID: 0009-0005-7183-7873, ²ORCID: 0000-0001-8444-5725, ^{3*}ORCID: 0000-0002-9674-317X,
⁴ORCID: 0000-0003-1853-9189, ⁵ORCID: 0000-0002-3765-2155

^{1,2,4}Hatay Mustafa Kemal University, Food Engineering Department, 31060, Antakya, Hatay, Turkey

^{3*}Kayseri University, Rectatorate Department, 38280, Talas, Kayseri, Turkey

⁵Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Technical Sciences Vocational School, 46050, Onikişubat, Kahramanmaraş, Turkey

Geliş / Recieved: 30.06.2025 Kabul / Accepted: 16.07.2025 Yayımlanma / Published: 30.07.2025

Özet

Bu çalışmada, Hatay ilinde geleneksel yöntemlerle açık atmosfer koşullarında üretilen nar ekşilerinin bazı kalite parametreleri değerlendirilmiştir. Üretimde Hicaz ve Katırbaşı nar çeşitlerine ait taze meyveler kullanılmış, elde edilen ürünler cam kavanozlarda ışık almayan bir ortamda muhafaza edilmiştir. Nar ekşilerinin standartlarını belirlemek amacıyla pH, suda çözünür kuru madde, toplam kuru madde, titre edilebilir asit, glukoz/fruktoz/sakkaroz tayini, hidroksimetilfurfural (HMF) düzeyi ve duyuşal özellikler analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, HMF içeriğinin Türk Standartları Enstitüsü TS 4953 standardında belirtilen maksimum limit değeri olan 50 mg/kg'ın üzerinde olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, açık atmosferde geleneksel yöntemle üretilen nar ekşilerinin tüketime sunulmadan önce üretim koşullarının iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Nar ekşisi, HMF, Geleneksel üretim

Abstract

In this study, certain quality parameters of pomegranate molasses traditionally produced under open-atmosphere conditions in Hatay province were evaluated. Fresh fruits of Hejaz pomegranate and Katırbaşı pomegranate varieties were used in production, and the resulting products were stored in glass jars in a dark environment. To determine the standards of the pomegranate molasses, analyses were conducted for pH, water-soluble dry matter, total dry matter, titratable acidity, glucose/fructose/sucrose content, hydroxymethylfurfural (HMF) levels, and sensory characteristics. The findings revealed that the HMF content exceeded the maximum limit of 50 mg/kg as defined by the Turkish Standards Institute TS 4953. Therefore, it is emphasized that production conditions must be improved before traditionally produced pomegranate molasses is offered for consumption.

Keywords: Pomegranate molasses, HMF, Traditional production

1. Introduction

Throughout history, the pomegranate (*Punica granatum* L.), a significant fruit species that can thrive in both tropical and

subtropical climates, has been used for both culinary and cultural purposes. This fruit's natural distribution areas include the

Mediterranean basin, which includes Turkey [1]. Pomegranate fruit is regarded as a component of a healthy diet and has beneficial effects on the immune system because of its high antioxidant capacity and rich phenolic content [2]. Fresh and processed varieties of superfoods, like pomegranates, have proliferated in the global market in recent years due to the growing demand for healthful products [3]. With the increasing interest in healthy products, both fresh and processed forms of superfoods such as pomegranate have become widespread in the international market in recent years [3].

Hejaz and Katırbaşı are important pomegranate varieties that are grown extensively in Turkey for both export and domestic consumption. Hejaz pomegranates are widely grown, particularly in the Mediterranean and Aegean regions, and are known for their red skin and grain color, high yield, and high market value [4]. In contrast, the Katırbaşı pomegranate is a popular variety in the region that has larger grains and a rich, sweet-sour balance.

These two species directly affect the quality of the final product after processing and are frequently utilized in the creation of traditional pomegranate products [5].

Turkey's Mediterranean and Southeastern Anatolian cuisines make extensive use of pomegranate syrup, a traditional product. Pomegranate syrup, which is obtained by boiling fresh pomegranate juice in an open atmosphere without additives, is preferred as a flavor enhancer in dishes thanks to its unique aroma, high dry matter, and acid content [6]. Traditional production methods generally refer to household production methods and industrial standards such as temperature control cannot be applied in these methods. This is effective in increasing the chemical composition of the product and especially the level of components formed by heat treatments such as HMF [7].

According to 2023 data from the Turkish Statistical Institute (TurkStat), pomegranate production in Turkey reached 647.676 tons in 2021. A significant portion of this production is provided by the Mediterranean region, and Hatay province is at the forefront with an average production of 24.411 tons [8]. In the same years, pomegranate consumption per capita reached 5 kg. When the production data by region are analyzed, it is seen that the climatic and geographical advantages of the Hatay region offer favorable conditions for pomegranate cultivation. This directly affects the quality characteristics of pomegranate species in the region.

Scientific research on pomegranate and pomegranate syrup provides important findings on the content, quality criteria and health effects of these products. For example, İncedayı et al. [9] analyzed the reducing sugar, protein, total sugar, and total polyphenol contents of pomegranate syrups of different brands in the market and stated that there were significant differences between the products. Vatansever (2018) [10] reported that the amount of HMF in industrially produced pomegranate products ranged between 9.20 and 479.63 mg/kg and some samples were well above the legal limits. In another study conducted by Oğuz (2021) [11], pomegranate sour produced by traditional and modern methods were compared and it was found that the production method played a decisive role on the antioxidant capacity and chemical content. Additionally, Eyigün (2012) [7] demonstrated that the storage process reduced antioxidant activity and increased HMF formation.

According to these studies, the quality of pomegranate sour is greatly influenced by factors like temperature, time, and the kind of pomegranate used in the production process.

The purpose of this study is to assess the physical, chemical, and sensory characteristics of Hejaz and Katırbaşı pomegranate sour made in Hatay province using traditional methods and to determine whether they meet the requirements set forth by the Turkish Standards Institute (TS 4953).

The thorough comparative analysis of pomegranate syrups made from these two pomegranate varieties using conventional techniques is not well documented in the literature. In this respect, the study both contributes to the standardization of Hatay local products and provides a data basis for the improvement of production techniques by drawing attention to the presence of compounds such as HMF that may pose a risk to consumer health [12].

2. Method

In this study, Hecaznar and Katırbaşı pomegranate varieties obtained from Hatay province were used as material. Images of the pomegranate varieties used in the study are given in Figure 1 and Figure 2. Pomegranate syrup was produced by processing pomegranate fruits with traditional production techniques. In the production process; the fruits were washed, their seeds were separated, crushed and their water was extracted and the pomegranate syrup was produced by thickening in the open air at 103°C under atmospheric pressure in a 50 cm diameter steel pot. A simple heater mechanism working with bottled gas was used as the heat source. The pomegranate syrup production scheme is given in Figure 3. The obtained pomegranate syrups were filled into glass jars, packaged and stored in Hatay at room temperature (25°C) and in an environment away from light.



Figure 1. Hejaz pomegranate variety



Figure 2. Katırbaşı pomegranate variety

Total dry matter, color (by reflectance method), pH, sugar profile (glucose, fructose, sucrose), titratable acidity, HMF and sensory analysis were performed on two different pomegranate sour samples. All analyses were performed in triplicate.

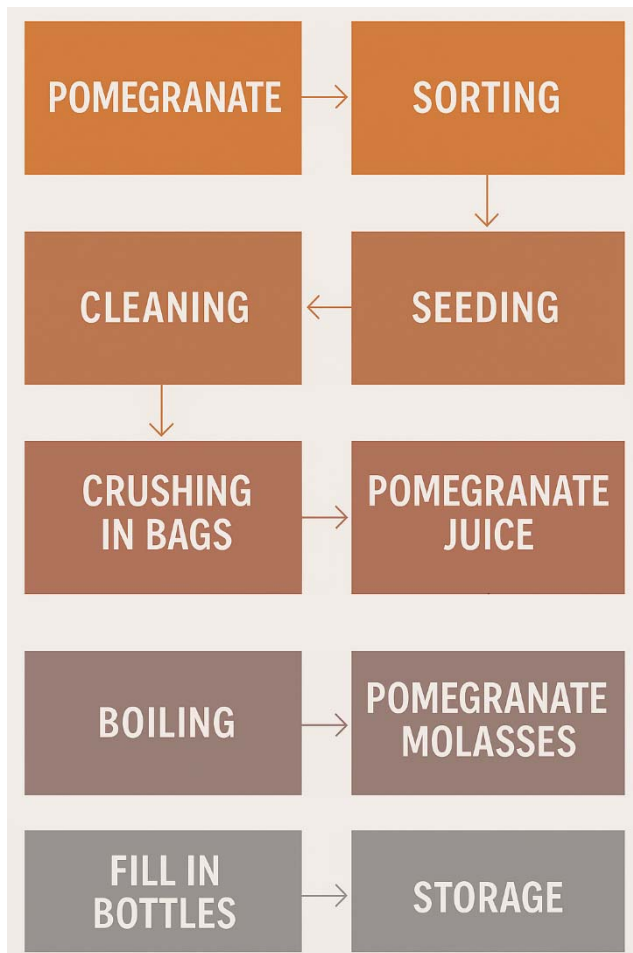


Figure 3. Stages of pomegranate syrup production using traditional methods

2.1. Determination of Water-Soluble Dry Matter

The water-soluble dry matter values of pomegranate syrup samples were determined using a handheld refractometer modeled after the method of Kara and Toplu (2022) [13].

2.2. Total dry matter determination

The total dry matter content in pomegranate syrup samples was determined using the method described by AOAC (1990) [14]. The samples were dried in a vacuum oven at 70°C temperature and under 100 mmHg pressure and the total dry matter values were expressed as percent dry matter

2.3. Reflectance color determination

While determining the color properties of pomegranate syrup samples, the study conducted by Kovuk et al. (2024) [15] was taken as reference. Color determination device CR-400, Konica Minolta, Inc., Osaka, Japan was used for color determination. In addition, C and hue values of the samples were measured.

2.4. Titratable Acidity (TEA) Amount

The titratable acid content of pomegranate sour samples was calculated in terms of citric acid [16].

2.5. pH value

The pH values of the samples were measured using a digital pH meter (WTW Series pH 720, Weilheim, Germany).

2.6. Glucose/Fructose/Sucrose determination

Glucose, fructose and sucrose determination was based on the method of Mazi et al. (2012) [17]. In HPLC; 80% acetonitrile was prepared as mobile phase. Flow rate was 1.3 mL/min, injection volume was 15 µL and column temperature was 30 ± 1 °C. Sugar amounts were expressed as g/100 g.

2.7. Determination of Hydroxymethylfurfural

HMF determination was performed according to Hardt-Stremayr et al. (2012) [18] 90% methanol was used as mobile phase. HPLC conditions were 1.0 mL/min flow rate, 285 nm wavelength.

2.8. Sensory analysis

Pomegranate sour samples were evaluated by a panelist group of 10 people using the 'hedonic scale' according to the Sensory Evaluation Form given in Annex-1 [19].

2.9. Statistical analysis

Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics 27.0.1 statistical package program. Tukey multiple comparison test was used to compare the means of the samples. Statistical analysis of sensory evaluation was performed using Kruskal-Wallis test.

3. Results and Discussion

In this study, the physicochemical and chemical properties of pomegranate sour obtained by traditional method from Hejaz and Katırbaşı species grown in

Hatay province were analyzed and the results of the analysis are given in Table 1, color analysis results are given in Table 2 and sensory evaluation results are given in Table 3. The data obtained were compared with the existing literature.

Table 1. Analysis results and significance levels of Hejaz and Katırbaşı pomegranate syrups

	Hejaz Pomegranate Sour	Katırbaşı Pomegranate Sour	Significance Level ($p < 0.05$)
Water-Soluble Dried Matter (%)	71.64 $\pm$ 0.03 ^b	75.70 $\pm$ 0.02 ^a	*
Total Soot (%)	75.26 $\pm$ 0.02 ^b	79.68 $\pm$ 0.02 ^a	*
TEA (%)	11.99 $\pm$ 0.02 ^a	6.66 $\pm$ 0.03 ^b	*
pH	3.01 $\pm$ 0.02 ^b	3.41 $\pm$ 0.02 ^a	*
Glucose (g/100g)	3.65 $\pm$ 0.01 ^b	4.54 $\pm$ 0.01 ^a	*
Fructose (g/100g)	4.63 $\pm$ 0.01 ^b	5.56 $\pm$ 0.01 ^a	*
Sucrose (g/100g)	Not found	Not found	-
HMF (mg/kg)	182.73 $\pm$ 0.05 ^a	84.28 $\pm$ 0.03 ^b	*

(Different letters in the same row indicate a statistical difference ($p < 0.05$))

Table 2. Color analysis results of Hejaz and Katırbaşı pomegranate sour

	Hejaz Pomegranate Sour	Katırbaşı Pomegranate Sour	Significance Level ($p < 0.05$)
<i>L</i> *	22.45 $\pm$ 0.14 ^b	25.76 $\pm$ 0.08 ^a	*
<i>a</i> *	5.37 $\pm$ 0.11 ^a	5.08 $\pm$ 0.06 ^b	*
<i>b</i> *	1.24 $\pm$ 0.09 ^b	2.43 $\pm$ 0.06 ^a	*
<i>C</i>	5.51 $\pm$ 0.08 ^b	5.64 $\pm$ 0.11 ^a	*
Hue Angle (h°)	13.00 $\pm$ 0.35 ^b	25.31 $\pm$ 0.48 ^a	*

(Different letters in the same row indicate a statistical difference ($p < 0.05$))

Table 3. Sensory analysis results of Hejaz and Katırbaşı pomegranate syrups

	TS89	TS14
Color	8 $\pm$ 0.67	7.9 $\pm$ 0.32
Appearance	8.9 $\pm$ 0.32	8.4 $\pm$ 0.70
Taste	7.5 $\pm$ 0.85	6.7 $\pm$ 0.82
Odor	7.4 $\pm$ 0.52	7.2 $\pm$ 0.63
Consistency	7.4 $\pm$ 0.84	7.5 $\pm$ 0.71
Overall Rating	7.84	7.54

(TS89: Hejaz pomegranate syrup; TS14: Katırbaşı pomegranate syrup)

(There is no statistical difference between the samples in the same row ($p > 0.05$))

Water-soluble dry matter (Brix) values were measured as 71.64% in Hejaz pomegranate sour and 75.70% in Katırbaşı pomegranate sour. These values are well above the minimum 40% limit specified in TS 4953 standard [12] and indicate that the products have concentrated properties. When compared with the water-soluble dry matter values in the range of 60-70% reported by Vardin and Abbasoğlu (2004) [5] it is understood that the findings in our study are parallel to the literature.

Total dry matter content was found to be 75.26% in Hejaz pomegranate sour and 79.68% in Katırbaşı pomegranate sour. These results are similar to the 70-80% total dry matter range reported by İncedayı et al. (2010) [9]. It is thought that the higher dry matter content of the Katırbaşı type may be due to the differences in the internal structure of the pomegranate type used and the heat treatment time.

Hejaz pomegranate sour had a pH of 3.01, while Katırbaşı pomegranate sour had a pH of 3.41. These numbers demonstrate that the naturally acidic structure of pomegranate syrup is preserved. The data in our study are consistent with the pH values between 2.85 and 3.53 found in Vatansever's (2018) [10] study on various brands.

TEA value was found as 11.99% for Hicaz pomegranate syrup and 6.66% for Katırbaşı pomegranate syrup. This result shows that Hicaz pomegranate has a more intense acidic profile. These findings coincide with the TEA values in the range of 6-13% reported by Oğuz (2021) [11]. It has been stated that high TEA levels can positively affect product durability by increasing the sense of sourness and microbial stability.

Hejaz and Katırbaşı pomegranate sour had HMF levels of 182.73 and 84.28 mg/kg, respectively. Both samples exceeded the TS 4953 standard's 50 mg/kg limit value. This indicates that high temperatures were exposed to high temperatures for a long time during production and as a result, Maillard reactions triggered the formation of HMF. Eyigün (2012)[10] and Vatansever (2018)[12] stated that HMF levels are often high in pomegranate syrups produced by the traditional method and due to the lack of control over the temperature-time relationship. Therefore, the high HMF levels obtained in this study are consistent with the risky classifications in the literature [7].

In sugar analysis, glucose 3.65 g/100g and fructose 4.63 g/100g were detected in Hejaz pomegranate syrup; sucrose was not detected. In Katırbaşı pomegranate syrup, glucose was 4.54g/100g, fructose was 5.56g/100g and sucrose was not detected. The fact that the fructose content of both products is higher than that of glucose reflects the natural structure of pomegranate. These values are similar to the fructose-dominated sugar profile reported by İncedayı et al. (2021) [20].

When the sensory analysis results were examined; both pomegranate syrups received high scores in terms of taste, color, consistency and general taste. According to the panelists, Hejaz pomegranate sour had a thicker consistency, but Katırbaşı pomegranate sour had a more balanced flavor. This is comparable to earlier research (Oğuz, 2021) [11] and results from variations in sugar and acid content. In summary, the information gathered indicates that pomegranate sour made using the conventional method has good results in a number of physical and sensory parameters, but it may also be risky, particularly when it comes to the HMF level. Therefore, it is advised that more regulated heat treatment and quality control procedures be used to support traditional production.

4. Conclusion

This study compared the physicochemical and sensory characteristics of pomegranate sour made from Hejaz and Katırbaşı pomegranate varieties grown in Hatay province using traditional methods. The information gathered showed that the pomegranate variety had a substantial impact on quality parameters. In comparison to Hejaz pomegranate syrup, Katırbaşı pomegranate syrup had a higher total dry matter and water-soluble dry matter content ($p<0.05$), suggesting a denser product structure. Hejaz pomegranate syrup was characterized by a higher titratable acidity value ($p<0.05$). Color analysis showed that Katırbaşı samples had a lighter and more saturated color profile ($p<0.05$).

HMF levels in both pomegranate sour samples were well above the maximum limit value of 50 mg/kg specified by the Turkish Standards Institute (TS 4953). This situation reveals the negative effect of prolonged and high temperature heat treatments applied in traditional production. Sensory evaluations also showed that Katırbaşı pomegranate syrup was more highly appreciated in terms of taste, color and aroma, while Hejaz pomegranate syrup stood out in terms of consistency.

In conclusion, although the products obtained from both pomegranate varieties comply with Turkish Standards in terms of many quality parameters, the high HMF content poses a significant risk to public health. Therefore, it is recommended to control the traditional production processes, especially to optimize the heat treatment time and temperature. In addition, it is important to encourage healthy and standardized production through informative activities for producers and consumers.

Acknowledgements

The authors would like to thank Dr. Mustafa Didin for his guidance throughout the study.

Conflict of Interest

This study has no conflict of interest. All data in the study were collected with a scientific and objective approach and the results obtained were evaluated in accordance with academic honesty and ethical rules.

Similarity rate:

%4

Artificial Intelligence Usage rate:

Artificial intelligence was not used in the preparation of the article.

Contribution Rate of Researchers

Researchers contributed equally to the study.

References

- [1] Kurt, H., and Şahin, G. (2013). A Study of Agricultural Geography: Pomegranate (*Punica granatum* L.) Cultivation in Turkey *Marmara Journal of Geography*, 27, 551-574.
- [2] Dede, G. (2021). Determination of physicochemical and biological properties of black pomegranates grown in Adıyaman-Tut district. (Harran University, Institute of Science and Technology, Master's Thesis.
- [3] Stiletto, A., and Trestini, S. (2021). Factors behind consumers' choices for healthy fruits: a review of pomegranate and its food derivatives. *Agricultural and Food Economics*, 9(1), 31. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40100-021-00202-7>
- [4] Baysal, T., and Taştan, Ö. (2018). *Pomegranate products and production: Pomegranate is the star in health*. Night Bookshelf.
- [5] Vardin, H., and Abbasoglu, M. (2004). Pomegranate sour and other evaluation possibilities of pomegranate. In *Traditional Foods Symposium* (pp. 165-169). Van.
- [6] Metin, Z. E. (2014). Determination of hydroxymethylfurfural levels of pomegranate sour, pomegranate sour sauce and grape molasses sold in Ankara markets. Hacettepe University, Institute of Science and Technology, Master's thesis.
- [7] Eyigün, F. Ş. (2012). Determination of some characteristics of pomegranate juice concentrates obtained from the fruits of Hejaz variety. Çukurova University, Institute of Science and Technology, Master's thesis
- [8] Turkish Statistical Institute. (2023). *Turkish Statistical Institute*. <https://www.tuik.gov.tr>
- [9] İncedayı, B., Tamer, C. E., & Çopur, Ö. U. (2010). A research on the composition of pomegranate molasses. *Journal of Agricultural Faculty of Uludağ University*, 24(2), 37-47.
- [10] Vatansever, A. (2018). Determination of physicochemical and biochemical properties of pomegranate and its products. Bursa Uludağ University, Institute of Science and Technology, Master's thesis.
- [11] Oğuz, M. (2021). Compliance with related legislation of physiochemical analysis of pomegranate (*Punica granatum* L.) sours produced by traditional method and investigation of its antioxidant properties Gümüşhane University Institute of Science and Technology, Master's thesis.
- [12] Turkish Standards Institute. (2023). *TS 4953: Pomegranate sour - Properties and analysis methods*. Ankara: TSE Publications.
- [13] Kara, A., and Toplu, C. (2022). Periodic changes in fruit quality characteristics of kiwifruit (*Actinidia deliciosa* cv. Hayward) at different altitudes and determination of the optimum harvest period. *Mustafa Kemal University Journal of Agricultural*

- Sciences, 29(1), 192-211.
<https://doi.org/10.37908/mkutbd.1370208>
- [14] Association of Official Analytical Chemists. (1990). *Official methods of analysis* (15th ed.). AOAC.
- [15] Kovuk, Ş. Ş., Duran, Z., Eskigün, S., Öztürk, K., Sarıtepe, Y., Nalçacı, S., Durmaz G. and Çalışkan, M. (2024). Coffee production from apricot kernel and investigation of some properties of the obtained coffee. *Fruit Science*, 11(2), 100-109.
<https://doi.org/10.51532/meyve.1577171>
- [16] Karaçalı, İ. (2012): Conservation and Marketing of Garden Products, Ege University Faculty of Agriculture Publications, Publication No: 494, İzmir.
- [17] Mazi, B.G. Hamamci, H., and Dungan, S.R, (2012). HPLC method for the simultaneous determination of sugars in food products. *Food Chemistry*, 132(1), 254-258.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.085>
- [18] Hardt-Stremayr, M., Bernaskova, M., Hauser, S., Kunert, O., Guo, X., Stephan, J., Spreitz, J., Lankmayr, E., Schmid, M. G., & Wintersteiger, R. (2012). Development and validation of an HPLC method to determine metabolites of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF). *Journal of Separation Science*, 35(19), 2567-2574.
<https://doi.org/10.1002/jssc.201200251>
- [19] Turkish Standards Institute (2016). *TSE 12720: Pomegranate sour communiqué*. Turkish Standards Institute.
- [20] İncedayı, B. (2021). Assessment of antioxidant properties and in-vitro bioaccessibility of some pomegranate products Balıkesir University Journal

of Science and Technology, 23(1), 96-110.
 DOI:<https://doi.org/10.25092/baunfbed.829863>

Annexes

Annex-1: Sensory analysis evaluation form

NAR EKŞİSİ DUYUSAL ANALİZ FORMU

Tarih .../.../...

Panelistin Adı ve Soyadı:

Tarafınıza sunulan 2 farklı nar ekşisi örneklerini aşağıda belirtilen özellikler çerçevesinde 1-9 (1- çok kötü, 9- mükemmel) arasında puanlama yaparak değerlendiriniz.

ÖZELLİKLER

Renk	Nar ekşisi kendine özgü açık kahverengiden koyu kahverengiye kadar değişebilen renkte olmalıdır.
Görünüş	Nar ekşisi tortusuz olmalı, meyve parçacıkları içermemeli ve tekniğe uygun durultulmuş olmalıdır.
Tat	Nar ekşisinin tadı kendine özgü olmalı, yanık ve yabancı tat bulunmamalıdır.
Koku	Nar ekşisine özgü kokuda olmalı, yabancı koku bulunmamalıdır.
Kıvam	Nar ekşisi akışkan kıvamlı olup, sulu bir yapıya sahip olmamalıdır.

Örnek kodu	Renk	Görünüş	Tat	Koku	Kıvam	Ortalama Puan
TS89						
TS14						

İmza

Exploring The Izhikevich Neuron Model for Robust Signal Encoding and Reconstruction

Kararlı Sinyal Kodlama ve Yeniden Yapılandırma için Izhikevich Nöron Modelinin İncelenmesi

Obeid Abdalla¹, Jean Luck Randrianantenaina², Ahmet Yasin Baran^{3,*}, Recai Kılıç⁴

¹ ORCID: 0009-0006-8663-4574, ²ORCID: 0000-0001-8001-4629, ³ORCID: 0000-0001-7069-4974, ⁴ORCID: 0000-0002-5069-6603

^{1,2,3,4} Department of Electrical and Electronics Engineering, Erciyes University, 38039, Melikgazi, Kayseri, Türkiye

Geliş / Recieved: 30.06.2025 Kabul / Accepted: 18.07.2025 Yayınlanma / Published: 30.07.2025

Özet

Nöromorfik sistemlerde geleneksel sinyal kodlama yöntemleri genellikle analog girişleri ateşleme dizilerine dönüştürmek için Sızıntılı Toplayıcı-Ateşleyici (Leaky Integrate-and-Fire – LIF) gibi basitleştirilmiş nöron modellerine dayanır. Ancak bu modeller, zamanla değişen sinyaller için genellikle yüksek ateşleme oranları gerektirir ve bu da enerji tüketimini artırır. Bu çalışmada, sinyal kodlaması için biyolojik anlamlılığı yüksek ve düşük güç tüketimine sahip Izhikevich (IZ) nöron modeli incelenmiştir. IZ nöronunun, giriş genliğini ateşleme zamanlamasına kodlayarak 1-bit Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$) modülatörüne benzer davranış sergilediği gösterilmiştir. Modelin performansını değerlendirmek için farklı sinyal-gürültü oranlarında (SNR) Gauss beyaz gürültüsü (GWN) eklenmiş sinüzoidal giriş sinyalleri IZ nöronuna uygulanmıştır. Oluşan ateşleme dizileri, ateşlemeler arası zaman aralıkları (interspike intervals – ISIs) analiz edilerek ve anlık ateşleme oranı tahmin edilerek çözülmüş; böylece orijinal sinyal yeniden yapılandırılmıştır. Kodlama yapısının dayanıklılığı, farklı SNR seviyelerinde yeniden yapılandırılan sinyalin ortalama kare hata (MSE) değeri ölçülerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar, IZ modelinin gürültülü koşullarda dahi yüksek yeniden yapılandırma doğruluğunu koruduğunu göstermekte ve bu modeli nöromorfik sistemlerde dayanıklı, olay temelli sinyal kodlaması için uygun bir seçenek haline getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Izhikevich (IZ) nöron modeli, Sinyal kodlama, Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$) modülasyonu, Gaussian beyaz gürültü (GWN).

Abstract

Traditional signal encoding in neuromorphic systems often relies on simplified neuron models such as the Leaky Integrate-and-Fire (LIF) to convert analog inputs into spike trains. However, these models typically demand high firing rates for time-varying signals, resulting in increased energy consumption. In this work, we explore the Izhikevich (IZ) neuron model as a low-power, biologically inspired alternative for signal encoding. We show that the IZ neuron exhibits behavior analogous to a 1-bit Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$) modulator by encoding the input's amplitude into spike timing. To assess its performance, sinusoidal input signals with added Gaussian white noise (GWN) at various signal-to-noise ratios (SNRs) have been applied to IZ neuron. The spike trains are decoded by analyzing interspike intervals (ISIs) and estimating the instantaneous firing rate to reconstruct the original signal. The robustness of the encoding scheme has been evaluated by measuring the mean squared error (MSE) of the reconstructed signal across SNR levels. Results indicate that the IZ model maintains high reconstruction fidelity under noisy conditions, demonstrating its suitability for robust, event-driven signal encoding in neuromorphic systems.

Keywords: Izhikevich (IZ) neuron model, Signal encoding, Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$) modulation, Gaussian white noise (GWN).

1. Introduction

Artificial neural networks (ANNs) have achieved remarkable success in classification and pattern recognition tasks, however, due to their high energy consumption their use in robotics, biomedical and sensor application is limited [1, 2]. Neuromorphic computing addresses this challenge by incorporating the event-driven nature of biological neural

systems to the mathematical neural models. Spiking neural networks (SNNs), which is regarded as the third generation of ANNs process information in form of encoded spikes, enabling the implementation of neural networks in low-power applications[3, 4]. A core challenge in such systems is signal encoding: translating analog inputs into spike trains in a way that preserves information while minimizing energy use [5]. Traditional models like the 1-dimensional leaky

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: abaran@erciyes.edu.tr (A. Y. Baran)

integrate-and-fire (LIF) neuron utilizes rate coding, where higher input amplitudes produce higher spike rates[6]. However, using LIF in encoding dynamic signals often requires high firing rates, which lowers power efficiency[7]. Adaptive models like the Adaptive Exponential Integrate-and-Fire (AdExpIF) neuron improve performance by adjusting firing based on recent activity. This behavior has been likened to Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$) modulation, a well-known method used in analog-to-digital conversion. In the literature, several studies have drawn connections between spiking neurons and $\Sigma\Delta$ modulators[7–9]. Høvin et al. showed that $\Sigma\Delta$ bitstreams resemble biological pulse-coded signals[9]. Yoon introduced the asynchronous pulse $\Sigma\Delta$ modulation (APSDM) framework, formalizing how models like LIF and spike response model (SRM) encode signals through level-crossing events[8]. On the hardware side, Nair and Indiveri proposed an ultra-low power $\Sigma\Delta$ neuron circuit with improved signal fidelity[7].

In decoding the modulated signals or reconstructing the input signals several strategies are found in the literature[8, 10–12]. Among these strategies two methods are mainly employed: (i) approximate reconstruction method by using linear decoding filters optimized to minimize the mean squared error (MSE), and (ii) exact or near-exact reconstruction method which is based on interspike interval (ISI) constraints and pseudoinverse computations. The first approach, exemplified by algorithms like the basic spike algorithm (BSA) by Schrauwen et al., which reconstructs input signals using finite impulse response (FIR) filters, offering a practical balance between accuracy and computational load[12]. On the other hand, the latter approach use pseudoinverse-based methods such as those proposed by Wei and Harris which achieve higher fidelity at the cost of increased complexity[11]. Recent studies use novel methods like Thao et al. in which they presented advanced reconstruction techniques using projection onto convex sets (POCS) to recover signals from LIF-encoded outputs[10].

The purpose of this study is to investigate the encoding capabilities of the Izhikevich (IZ) neuron model for continuous-time signals and to evaluate its practical advantages for low-power neuromorphic applications. In this work, we propose the IZ neuron model as a biologically inspired and computationally efficient encoder for analog signals [13]. While neuron models like Hodgkin-Huxley (HH), Morris-Lecar (ML), Hindmarsh-Rose (HR), and FitzHugh-Nagumo (FHN) offer high accuracy in modeling neural dynamics, they rely on complex equations that demand significant computational power. On the other hand, simpler models such as LIF, SRM, and AdExpIF require less computational resources but lack the ability to generate accurate spiking behavior, and in some cases, fail to capture all types of spiking patterns. The IZ neuron model strikes a balance by offering both high biological plausibility and low implementation cost compared to other models[14]. We evaluate the encoding performance and robustness of the encoder by injecting gaussian white noise (GWN) into a sinusoidal input signal and measuring the MSE of signal reconstruction from spike trains. By comparing MSE value of different signal to noise ratios (SNR), we demonstrate the

model's potential as a low-power, high-fidelity encoder for neuromorphic systems.

2. IZ Model as a $\Sigma\Delta$ Encoder

A simple 1-bit $\Sigma\Delta$ modulation encoder performs pulse density modulation (PDM) by using an integrator and an analog to digital converter (ADC) as a quantizer outputting the encoded signal[15]. The output signal is then negatively feedback to the input signal via digital to analog converter (DAC). The resultant output signal is a form of digital pulses that varies in width depending on the amplitude of the analog input signal as seen in Figure 1. This technique relies heavily on oversampling in which the sampling rate is significantly higher than the Nyquist rate of the input signal.

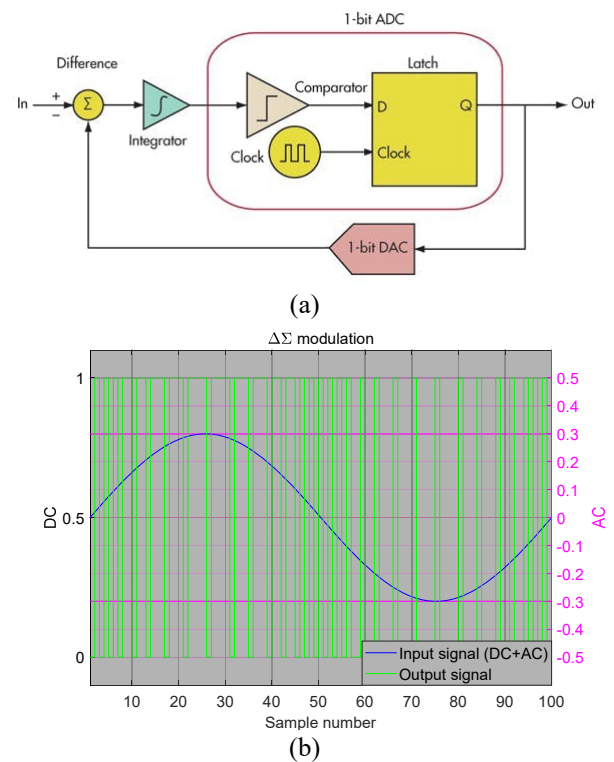


Figure 1. 1-bit $\Sigma\Delta$ modulation encoder (a) component schematic (b) analog input signal and encoded digital output signal.

The IZ model is spiking neuron model that has been introduced by Eugene M. Izhikevich [13]. The model combines the biological realism of the HH model with the simplicity of integrate-and-fire neurons. It is defined by two differential equations as in Equation (1) that describe the membrane potential v and a recovery variable u . These ordinary differential equations are accompanied by a resetting mechanism defined in Equation (2) that is performed when a spike occurs, namely when the membrane potential crosses 30mV threshold. The dynamics acquired from both of these equations allow the replication of various neuronal firing patterns such as tonic spiking, bursting, and fast spiking.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= 0.04 v^2 + 5 v + 140 - u + I \\ \frac{du}{dt} &= a(b v - u) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{if } (v \geq 30): \quad \left. \begin{aligned} v &= c \\ u &= u + d \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Additionally, another output signal S can be acquired by tracing the logical output signal of the Equation (2) condition. This discrete signal S is mathematically given in Equation (3) and is regarded as the spike train output that shows the spiking times of the IZ neuron. In which the $\delta(*)$ is the unit impulse function and T_i is the spiking time of the i^{th} spike.

$$S = \sum_{i=1}^N \delta(t - T_i) \quad (3)$$

The parameter values of a , b , c , and d control and determine the firing pattern of the IZ model. In this work the fast-spiking firing pattern is chosen and according to it these parameters are fixed to $a=0.1$, $b=0.2$, $c=-65$, and $d=2$. The simulations are carried out using the Euler explicit method taking the timestep as 0.01. To view the similarity of the IZ model and the $\Sigma\Delta$ encoder a sinusoidal current $I = (5 \sin 0.1t + 15)$ mA has been injected on the IZ model. Figure 2a displays the numerically calculated membrane potential dynamic v of IZ neuron along with input current. Figure 2b shows the corresponding spike train which represents the discrete output signal generated through the reset mechanism described in Equation (2). As the IZ model gets subjected to a high I value the spiking frequency of the IZ model increases. Similarly, a low I value results in a low spiking frequency which can be correlated with the width of the pulses of the $\Sigma\Delta$ encoder.

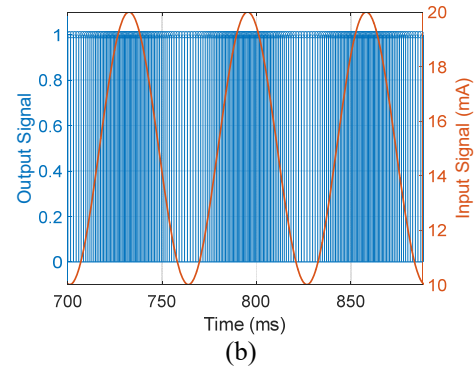
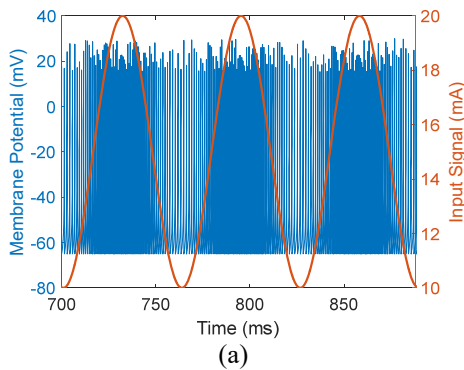


Figure 2. The output response of the IZ neuron model when subjected to a sinusoidal current (a) the neuron's membrane potential (b) the generated spike train.

By comparing the generated output signal found in Figure 1b and Figure 2b, both of the $\Sigma\Delta$ encoding and the IZ model encoding techniques generated binary signals. The $\Sigma\Delta$ modulation produces a continuous pulses of different width depending on the input's amplitude. This continuous pulse analog shape and the dependency on oversampling typically results in higher power consumption. On the other hand, spiking neurons such as the IZ neuron generate impulses with changing frequency depending on the input's amplitude. Due to this event driven nature and the impulse shape output, output is generated only when needed, which leads to significantly lower power consumption.

3. Signal Reconstruction and Performance Evaluation

3.1. Signal reconstruction scheme

The signal reconstruction is performed by calculating the ISI vector of the generated spike train [16]. The ISI vector is calculated by measuring the time difference between each two consecutive spikes as in Equation (4).

$$ISI_i = T_{i+1} - T_i, \quad i \in 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

Afterwards, the instantaneous firing rate R of the IZ is calculated classically as the reciprocal of the ISI [17]. Lastly, the constructed signal is calculated directly by rescaling the firing rate using the amplitude of the original noise-free analog input signal. This reconstruction scheme is summarized in Algorithm 1, which can reconstruct the original noise free input signal from the spike train signal.

Algorithm 1: The reconstruction algorithm

Input: Spike train signal S generated by the neuron model

Output: Reconstructed noise-free input signal.

1: Extract spike times from spike train $[T_1, T_2, \dots, T_N]$

2: Calculate ISI vector using Eq4.

3: Calculate the firing rate vector: $R_i = \frac{1}{ISI_i}$

4: Rescale R to match the amplitude range of the input signal.

5: Return the rescaled signal.

3.2. Noise based performance evaluation

The input signal is subjected to GWN with different power levels resulting in multiple input signals with different SNR values. Each input signal is injected on the IZ neuron model and the signal reconstruction scheme is applied. Figure 3 showcases the reconstructed signals of the different SNR valued input signals. A high noise value results in high distortions in the firing rate of the IZ neuron which heavily affects the signal reconstruction as seen in Figure 3a. A Lower noise value results in lower distortions in the firing rate and enables the signal to be reconstructed more correctly.

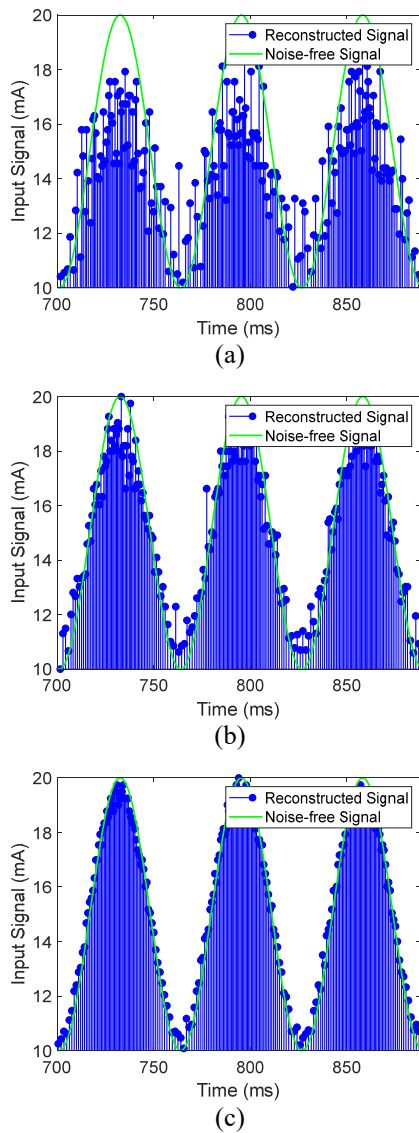


Figure 2. Signal reconstruction using firing rates of the membrane potential when IZ neuron is subjected to a sinusoidal current with SNR values of (a) -10dB (b) 0dB (c) 10 dB.

Since the reconstruction process is not perfect and its resultant signal resembles sampling process, some values of the input signal are lost. Therefore, in order to measure the robustness of the encoding scheme the reconstruction quality

is measured through MSE value calculated by Equation (5). The equation neglects the values where $I_{reconstructed}(n) = 0$ and evaluates the points where the values of the signal are known. The calculated MSE values from the different SNR valued signals are then plotted as seen in Figure 4. For high SNR values the reconstruction process has low MSE values and similarly for low SNR values reconstruction process have high MSE values. The lowest achieved MSE value was 0.0524 which coincides with an input signal with an SNR of 20dB.

$$MSE \cong \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [I(n) - I_{reconstructed}(n)]^2, \quad I_{reconstructed}(n) \neq 0 \quad (5)$$

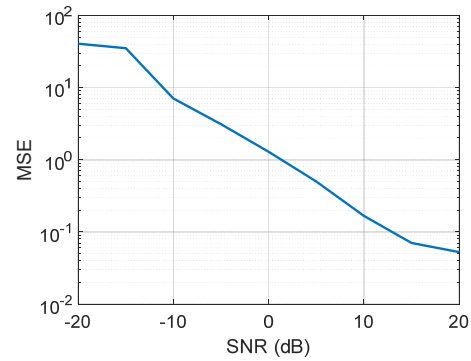


Figure 3. MSE of the reconstructed noise influenced input signal for different SNR values.

4. Conclusion

In this study, we investigate the capabilities of IZ neuron model as an alternative to classical $\Sigma\Delta$ modulation for signal encoding in neuromorphic systems. We demonstrate the IZ model's ability to encode continuous-time analog signals through spike timing, resembling the behavior of a 1-bit $\Sigma\Delta$ modulator. The IZ model is subjected to sinusoidal inputs influenced with GWN at varying SNRs. The resultant spike trains were decoded and the noise-free input signal is reconstructed by computing ISIs and estimating the instantaneous firing rate, which was then rescaled to give the final decoded signal. Results show that the spiking frequency of the IZ model varies according to the amplitude of the input which correlates with pulse width in 1-bit $\Sigma\Delta$ encoders. These findings are consistent with previous studies in the literature, which demonstrate the viability of using spiking neurons as $\Sigma\Delta$ modulators. The robustness of encoding is assessed by looking at reconstruction quality of the signal, which is assessed by calculating the MSE of the multiple SNR valued signals. Inputs with high SNR levels lead to more accurate reconstruction while inputs with low SNR levels introduced distortions in the firing rate resulting in larger errors. In summary, the Izhikevich neuron model presents a promising framework for biologically plausible encoding schemes in neuromorphic systems. Future work will explore the encoding of more complex, real-world signals and consider hardware implementation of the IZ neuron model for practical low-power applications.

Conflict of Interest

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

Similarity Rate (iThenticate): %5

AI Usage Rate: < %10

Researcher Contribution Rates

Obeid ABDALLA: Investigation, Writing, original draft & Software. Jean Luck RANDRIANANTENAINA: Writing, review, editing. Ahmet Yasin BARAN: Review, editing & Conceptualization. Recai KILIÇ: Supervision, Validation.

References

- Kang, M., Lee, Y., Park, M.: Energy Efficiency of Machine Learning in Embedded Systems Using Neuromorphic Hardware. *Electronics* (Basel). 9, 1069 (2020). <https://doi.org/10.3390/electronics9071069>
- Yang, Y., Bartolozzi, C., Zhang, H.H., Nawrocki, R.A.: Neuromorphic electronics for robotic perception, navigation and control: A survey. *Eng Appl Artif Intell*. 126, 106838 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106838>
- Rajendran, B., Sebastian, A., Schmuker, M., Srinivasa, N., Eleftheriou, E.: Low-Power Neuromorphic Hardware for Signal Processing Applications. (2019). <https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2933719>
- Tavanaei, A., Ghodrati, M., Kheradpisheh, S.R., Masquelier, T., Maida, A.: Deep learning in spiking neural networks. *Neural Networks*. 111, 47–63 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.12.002>
- Auge, D., Hille, J., Mueller, E., Knoll, A.: A Survey of Encoding Techniques for Signal Processing in Spiking Neural Networks. *Neural Process Lett*. 53, 4693–4710 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11063-021-10562-2>
- Brette, R.: Dynamics of one-dimensional spiking neuron models. *J Math Biol*. 48, 38–56 (2004). <https://doi.org/10.1007/s00285-003-0223-9>
- Nair, M. V., Indiveri, G.: An Ultra-Low Power Sigma-Delta Neuron Circuit. In: 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). pp. 1–5. IEEE (2019). <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702500>
- Yoon, Y.C.: LIF and Simplified SRM Neurons Encode Signals Into Spikes via a Form of Asynchronous Pulse Sigma-Delta Modulation. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*. 28, 1192–1205 (2017). <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2526029>
- Hovin, M., Wisland, D., Berg, Y., Marienborg, J.T., Lande, T.S.: Delta-sigma modulation in single neurons. In: 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353). pp. V-617–V–620. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2002.1010779>
- Thao, N.T., Rzepka, D., Miśkowicz, M.: Bandlimited Signal Reconstruction From Leaky Integrate-and-Fire Encoding Using POCS. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 71, 1464–1479 (2023). <https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3256269>
- Dazhi Wei, Harris, J.G.: Signal reconstruction from spiking neuron models. In: 2004 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (IEEE Cat. No.04CH37512). pp. V-353–V–356. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2004.1329535>
- Schrauwen, B., Van Campenhout, I.: BSA, a fast and accurate spike train encoding scheme. In: Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2003. pp. 2825–2830. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2003.1224019>
- Izhikevich, E.M.: Simple model of spiking neurons. *IEEE Trans Neural Netw*. 14, 1569–1572 (2003). <https://doi.org/10.1109/TNN.2003.820440>
- Izhikevich, E.M.: Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons? *IEEE Trans Neural Netw*. 15, 1063–1070 (2004). <https://doi.org/10.1109/TNN.2004.832719>
- Janssen, E., van Roermund, A.: Basics of Sigma-Delta Modulation. Presented at the (2011). https://doi.org/10.1007/978-94-007-1387-1_2
- Ko, D., Wilson, C.J., Lobb, C.J., Paladini, C.A.: Detection of bursts and pauses in spike trains. *J Neurosci Methods*. 211, 145–158 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2012.08.013>
- Lánský, P., Rodriguez, R., Sacerdote, L.: Mean Instantaneous Firing Frequency Is Always Higher Than the Firing Rate. *Neural Comput*. 16, 477–489 (2004). <https://doi.org/10.1162/089976604772744875>

FPGA donanımı ile biyolojik nöron modellerinin modüler olarak tasarımı ve gerçekleştirimi

Modular design and implementation of biological neuron models with FPGA hardware

Sılaynur Doğan¹ , Onur Güneş² , İsmail Öztürk^{3,*} 

¹ ORCID: 0009-0001-3340-6993, ²ORCID: 0009-0009-0263-9290, ^{3*}ORCID: 0000-0001-9561-4651

^{1,2,3}Amasya Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 05100, Merkez, Amasya, Türkiye

Geliş / Recieved: 30.06.2025 Kabul / Accepted: 17.07.2025 Yayınlanma / Published: 30.07.2025

Özet

Bu çalışmada biyolojik nöron modellerinin dijital donanım gerçekleştirmeleri için standart ve modüler bir tasarım yaklaşımı önerilmektedir. Bu tasarım yaklaşımına göre matematiksel denklem, parametre ve sergileyebildiği çalışma modlarına bakmaksızın bütün nöron modellerinin tek bir standart formatta gerçekleştirimi yapılmaktadır. Sonrasında ise aynı formatta gerçekleştirilen nöron modellerinin, donanım üzerinde ayrı ayrı kullanılması yerine bu nöron modelleri tek bir blok yapı içerisinde birleştirilerek aynı anda kullanılabilir. Bu modüler yaklaşım nöromorfik uygulamalarda hızlı prototiplendirme ve tasarım esnekliği sağlamaktadır. Örnek bir tasarım olarak Izhikevich, Fitzhugh-Nagumo (FHN), Hindmarsh-Rose (HR) ve Leaky Integrate-and-Fire (LIF) nöron modelleri seçilmiş ve önerilen yapıda birleştirilmiştir. Önerilen yapının donanım gerçekleştirimi ise FPGA (Field Programmable Gate Array) üzerinde yapılmıştır. Çıktılar osiloskop ile gözlemlenmiş olup elde edilen sonuçlar simülasyonlar ile uyumludur.

Anahtar kelimeler: Biyolojik nöron modeli, FPGA, Nöromorfik donanım

Abstract

In this study, a standard and modular design approach is proposed for digital hardware implementations of biological neuron models. According to this design approach, all neuron models are implemented in a single standard format regardless of mathematical equations, parameters and operating modes they can exhibit. Afterwards, instead of using neuron models implemented in the same format separately on the hardware, these neuron models can be combined into a single block structure and used simultaneously. This modular approach provides rapid prototyping and design flexibility in neuromorphic applications. As an example design, Izhikevich, Fitzhugh-Nagumo (FHN), Hindmarsh-Rose (HR) and Leaky Integrate-and-Fire (LIF) neuron models were selected and combined in the proposed structure. The hardware implementation of the proposed structure was performed on FPGA (Field Programmable Gate Array). The outputs were observed with an oscilloscope and the obtained results are in agreement with the simulations.

Keywords: Biological neuron model, FPGA, Neuromorphic hardware

1. Giriş

Biyolojik nöron modelleri canlıların merkezi sinir sisteminde bulunan gerçek nöronların davranışlarının matematiksel denklemlerle bir dinamik sistem olarak modellenmesiyle elde edilirler. Bu tür nöron modelleri canlılardaki nöronların membran potansiyelindeki değişimi çok benzer bir şekilde taklit edebilme kabiliyetine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle biyolojik nöron modelleri nöromorfik hesaplama uygulamalarında ve içgüdüsel sinir

ağlarında (SNN) sıklıkla kullanılırlar [1-6]. Nöromorfik hesaplama uygulamaları diğer yapay sinir ağı tabanlı uygulamalara kıyasla çok daha düşük güç tüketimi imkânı sunduğu için günümüzde gittikçe önem kazanan bir çalışma alanı haline gelmiştir [2, 7].

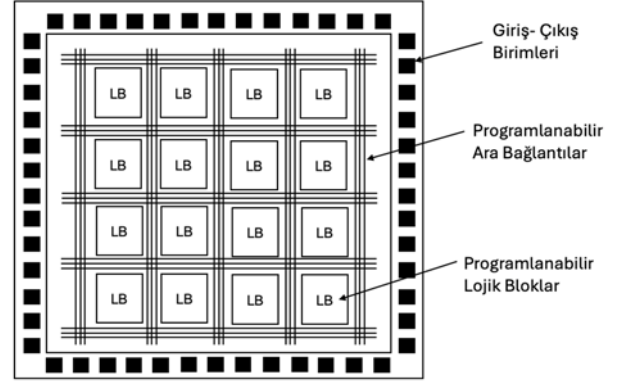
Biyolojik nöron modelleri gerçek nöronların davranışını ne kadar yakın bir şekilde taklit ediyorsa, modeli ifade eden denklemler de o oranda karmaşılaşır. Örneğin 1952 yılında Hodgkin ve Huxley tarafından önerilen nöron modeli, gerçek nöron davranışlarını son derece yakın bir şekilde

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: ismail.ozturk@amasya.edu.tr (İ. Öztürk)

temsil edebilmektedir [8]. Fakat Hodgkin-Huxley (HH) nöron modelinin diferansiyel denklemlerinin karmaşıklığı, bu modelin donanım gerçekleştirimini aynı oranda zorlaştırmakta ve pratik uygulamalardaki kullanımını sınırlamaktadır. Dolayısıyla, sonraki dönemlerde HH nöron modelinin basitleştirilmesiyle Fitzhugh-Nagumo nöron modeli (FHN) önerilmiştir [9,10]. FHN nöron modeli daha pratik bir gerçekleştirim imkânı sunarken nöron dinamiklerini görece yakın bir şekilde taklit edebilmektedir. Literatüre sunulmuş olan Hindmarsh–Rose (HR), Morris–Lecar (ML) ve Izhikevich nöron modelleri de denklem karmaşıklığı ile donanım gerçekleştirimi ilişkisi bakımından FHN modeline benzer modellerdir [11-13].

Eğer nöromorfik uygulamada çok fazla sayıda nöron modeli kullanılması gerekiyorsa, bu tür nöron modellerinin donanım gerçekleştiriminde kullanılması da pratik olmamaktadır. Bu tür durumlarda çok daha basitleştirilmiş Leaky Integrate-and-Fire (LIF), Quadratic Integrate-and-Fire (QIF) ve Exponential Integrate-and-Fire (EIF) modeli gibi modeller tercih edilir [14-16]. Bu tür modeller sadece tek bir diferansiyel denklem ve sıfırlama (reset) mekanizması kullanmak suretiyle nöronun pik şeklindeki aksiyon potansiyeline (spike) benzer çıkışlar üretirler. Biyolojik nöronları taklit yeteneklerinin kısıtlı olmasına karşılık, donanım gerçekleştirimlerinin çok basit olması nedeniyle bu tür modeller de literatürde yaygın olarak tercih edilirler [17-19]. Buradan anlaşılacağı üzere, nöromorfik hesaplama uygulamalarında biyolojik taklit yeteneği ve donanım kısıtlamaları gibi unsurlar göz önünde bulundurularak bahsedilen nöron modelleri arasından en uygununun seçilmesi gerekmektedir.

Biyolojik nöron modellerinin donanım gerçekleştiriminde yeniden yapılandırılabilirlik, paralellik ve hızlı prototiplendirme gibi avantajları sayesinde FPGA (Field Programmable Gate Array) entegre devreleri sıklıkla tercih edilir [20-23]. FPGA, sahada programlanabilir kapı dizisi anlamına gelir ve ihtiyaca göre yeniden programlanabilen dijital entegre devrelerdir. FPGA'lerin iç yapısında programlanabilir giriş-çıkış birimleri, programlanabilir ara bağlantılar, saat sinyali (clock) kanalı, faz kilitlemeli döngü (PLL), hafıza birimleri, çarpıcılar ve programlanabilir lojik bloklar bulunmaktadır. FPGA'lerin genel iç yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Çok sayıda programlanabilir blok ve ara bağlantılar içermesinden dolayı FPGA'lerin paralel işleme yeteneği oldukça yüksektir. Bu özellik paralel işlem gerektiren tasarımlar için önemli bir avantajdır. FPGA'ler içerdiği programlanabilir bloklar yardımıyla herhangi bir dijital mantık devresi tasarımının gerçekleştirilmesi için kullanılabilir. Tasarımı gerçekleştirmek için VHDL (Very High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) veya Verilog gibi donanım tanımlama dillerinden faydalanılır.



Şekil 1. FPGA iç yapısı

Literatürde yapılan çalışmalarda biyolojik nöron modelleri FPGA ile gerçekleştirilirken genellikle tek bir nöron modeli kullanılarak gerçekleştirim yapılır. Örneğin, [24]'te LIF nöron modelinin FPGA üzerinde gerçekleştirimi bir SNN yapısı elde etmek için kullanılmaktadır. [20] ve [23]'teki çalışmalarda ise HR nöron modelinin FPGA gerçekleştirimi sunulmaktadır. [22]'deki çalışmada ise Izhikevich nöron modelinin FPGA gerçekleştirimi incelenmektedir. Birden fazla nöron modelinin gerçekleştirimiyle alakalı çalışmalarda ise genellikle nöron modelleri FPGA üzerinde ayrı ayrı gerçekleştirildikten sonra sentezleme sonuçları kıyaslanmaktadır. Örneğin, [21]'de yapılan çalışmada FHN, HR ve Izhikevich nöron modellerinin FPGA üzerinde ayrı ayrı gerçekleştirimi yapıldıktan sonra sonuçlar FPAA (Field Programmable Analog Array) gerçekleştirmeleri ile kıyaslanmaktadır.

Bu çalışmada ise biyolojik nöron modellerinin FPGA üzerinde gerçekleştirimi için standartlaştırılmış ve modüler bir tasarım önerilmektedir. Bu kapsamda, yapılan diğer çalışmaların aksine, nöron modellerinin ayrı ayrı gerçekleştirimi yerine, tüm nöron modellerinin tek bir blok yapısı içerisinde gerçekleştirimi önerilmektedir. Bunu yapabilmek için de her bir nöron modelinin FPGA üzerinde gerçekleştiriminin Bölüm 2'de bahsedilecek olan standart formata göre yapılması önerilmektedir. Bu standart format, tasarımlara modülerlik sağlayacak olup, bu formata göre hazırlanmış farklı nöron modelleri tek bir blok yapısı içerisinde birleştirilebilecektir. Birleştirilen nöron modellerinin ise, blok yapı içerisinde bir çoklayıcı yardımıyla anahtarlanarak, bloğun çıkışına sadece bir nöronun membran potansiyeli değerinin verilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede nöron modellerini nöromorfik uygulamalarda kullanacak olan araştırmacılar, aynı anda birden fazla nöron modelini kullanıp test edebilecek, modüler yapı sayesinde rahatlıkla yeni nöron modellerini tasarımlarına ekleyebilecekleri gibi, kullanılması planlanmayan nöron modellerini de rahatlıkla tasarımlarından çıkarabileceklerdir. Bunun yanı sıra, her bir nöron gerçekleştirimine eklenecek olan mod girişisi sayesinde, varsa nöron modeline ait farklı çalışma modları da sadece basit bir anahtarlama ile elde edilebilecektir. Bu çalışma tarzı bakımından önerilen tasarım literatüre biyolojik nöron modellerinin FPGA üzerinde gerçekleştirimi konusunda katkı verecektir.

Makalenin organizasyonu şu şekildedir: Bölüm 2’de donanım gerçekleştirmesi yapılacak olan nöron modelleri tanıtılmakta olup bu nöron modellerine ait dinamik sistem denklemleri ve kullanılacak olan parametre değerleri verilmektedir. Yine aynı bölümde, bu parametre değerleri için modellerin simülasyonları yapılmakta ve membran potansiyellerinin değişim grafikleri sunulmaktadır. Eğer varsa, nöron modelinin farklı çalışma modları için simülasyonlar da yine bu bölümde verilmektedir. Sonrasında ise önerilen gerçekleştirim formatı ve blok yapı sunulmaktadır. Bölüm 3’te ise her bir nöron modelinin önerilen formatta FPGA gerçekleştirimi yapıp bunların tek bir blok yapı içerisinde birleştirilmesi açıklanmaktadır. Elde edilen sonuçların osiloskop görüntüleri de bu bölümde verilmekte olup elde edilen sonuçlar simülasyonlarla kıyaslanmaktadır. Son olarak, elde edilen sonuçlar Bölüm 4’te özetlenerek yorumlanmaktadır.

2. Gerçekleştirilen Nöron Modelleri ve Önerilen Tasarım

Literatürdeki modeller arasından Izhikevich, Fitzhugh-Nagumo (FHN), Hindmarsh–Rose (HR) ve Leaky Integrate-and-Fire (LIF) nöron modelleri önerilen yapıda kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu modeller, sahip oldukları farklı matematiksel yapı ve donanımsal gerçekleştirim zorluklarıyla çeşitlilik göstermektedir. Bu bakımdan, seçilen nöron modelleri literatürdeki çok sayıda farklı modeli temsil edebilecek niteliktedir. Bu bölümde, öncelikle seçilen nöron modelleri tanıtılıp bunların simülasyonları yapılmakta ve sonrasında önerilen tasarım metodu açıklanmaktadır.

2.1. Izhikevich Nöron Modeli

Izhikevich nöron modeli iki boyutlu bir diferansiyel denklem takımına ve sıfırlama mekanizmasına sahip olan bir modeldir. Modele ait denklem takımları Denklem (1)’de verilmektedir [25].

$$\begin{aligned} \dot{v} &= 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I \\ \dot{u} &= a(bv - u) \\ v &\geq 30mV \Rightarrow v \leftarrow c \\ u &\leftarrow u + d \end{aligned} \quad (1)$$

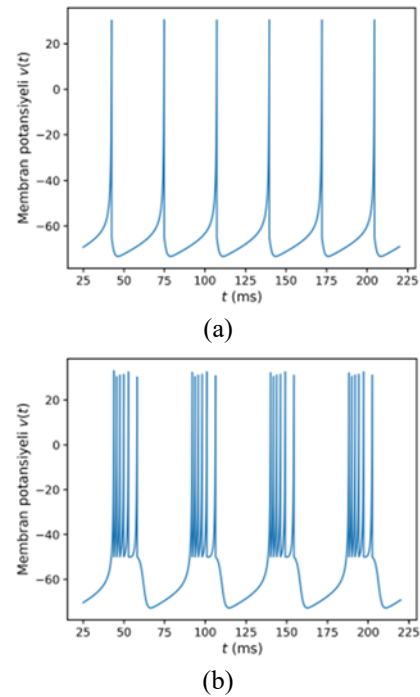
Burada, v durum değişkeni membran potansiyelini temsil eder. u durum değişkeni ise iyileşme değişkeni (recovery variable) olarak adlandırılır ve v ’deki değişimi yavaşlatmak için kullanılır. Modelin parametreleri ise sırasıyla a , b , c , d ve I şeklindedir. I parametresi sinaptik bağlantılardan gelen veya nörona haricen uygulanan akımı temsil etmektedir. Bu parametre değerlerinin değiştirilmesiyle nöron modeli gerçek nöronlarda gözlemlenen pek çok farklı davranışı taklit edebilmektedir [13].

Bu davranışlardan en çok kullanılanları düzenli ateşleme (regular spiking) ve patlamalı ateşleme (bursting) davranışlarıdır. Düzenli ateşlemede nöronun membran potansiyeli periyodik olarak spike adı verilen voltaj pikleri üretir. Patlamalı ateşlemede ise nöron belli bir süre ateşleme yaptıktan sonra belli bir süre çıkışı suskun kalır ve bu

suskunluktan sonra tekrar hızlı bir ateşleme gözlemlenir. Düzenli ve patlamalı ateşleme için seçilen parametre değerleri Tablo 1’de verilmektedir. Izhikevich nöron modelinin düzenli ve patlamalı ateşleme parametreleri için yapılan simülasyonların sonuçları Şekil 2’de verilmektedir.

Tablo 1. Izhikevich nöron modeli için kullanılan parametre değerleri

	Düzenli ateşleme	Patlamalı ateşleme
Δh	0.01	0.01
a	0.02	0.02
b	0.2	0.2
c	-65	-50
d	8	2



Şekil 2. Izhikevich nöron modelinin bilgisayar ortamında yapılan simülasyonu: (a) Düzenli ateşleme, (b) Patlamalı ateşleme

2.2. FitzHugh-Nagumo (FHN) Nöron Modeli

FHN nöron modeli de tıpkı Izhikevich nöron modeli gibi iki boyutlu bir diferansiyel denklem takımına sahipken, Izhikevich nöron modelinden farklı olarak bir sıfırlama mekanizması gerektirmemektedir. FHN nöron modeline ait diferansiyel denklem takımı Denklem (2)’deki gibidir [25].

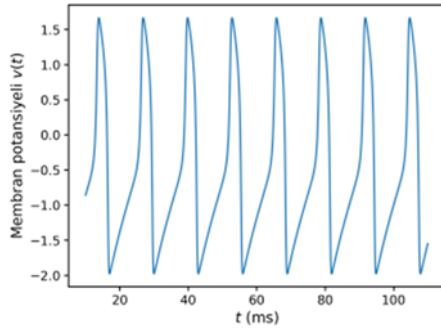
$$\begin{aligned} \dot{v} &= c(v - u + I - \frac{v^3}{3}) \\ \dot{u} &= \frac{v - bu + a}{c} \end{aligned} \quad (2)$$

FHN nöron modeli denklemlerinde de v ve u değişkenleri sırasıyla membran potansiyelini ve iyileşme değişkenini temsil etmektedir. Modele ait parametreler ise a , b , c ve I olarak adlandırılmaktadır. I parametresi yine akımı temsil

etmektedir. FHN nöron modelinin Tablo 2’de verilen parametre değerleriyle simülasyonu yapıldığında Şekil 3’teki gibi düzenli ateşleme davranışı gözlemlenmektedir.

Tablo 2. FHN nöron modeli için kullanılan parametre değerleri

	Düzenli ateşleme
Δh	0.01
a	0.7
b	0.8
c	3.0
I	0.34



Şekil 3. FHN nöron modelinin bilgisayar ortamında yapılan simülasyonu

2.3. Hindmarsh-Rose (HR) Nöron Modeli

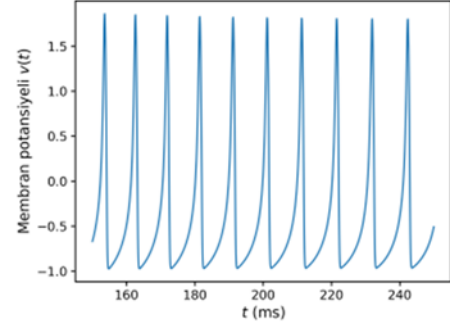
FitzHugh-Nagumo (FHN) modeline üçüncü bir değişkenin eklenmesiyle geliştirilen Hindmarsh-Rose modeli, nöron davranışlarının daha geniş bir yelpazede incelenmesine olanak tanır. FHN modeli, Hodgkin-Huxley modelinin sadeleştirilmiş bir versiyonudur; ancak bazı karmaşık nöral aktiviteleri yansıtmakta yetersiz kalabilir. HR modeli bu sınırlamaları aşmak için ortaya konmuş olup, üç değişkene dayalı yapısıyla daha zengin dinamikler üretmektedir. Özellikle patlamalı uyarılar, düzensiz salınımlar ve periyodik atım gibi çeşitli nöronal davranışları basit ama etkili bir şekilde modelleyebilme özelliğine sahiptir. HR nöron modeline ait diferansiyel denklem takımı Denklem (3)’teki gibidir [25].

$$\begin{aligned} \dot{v} &= u - v^3 + bv^2 + I - w \\ \dot{u} &= 1 - 5v^2 - u \\ \dot{w} &= \mu(s(v - v_{rest}) - w) \end{aligned} \quad (3)$$

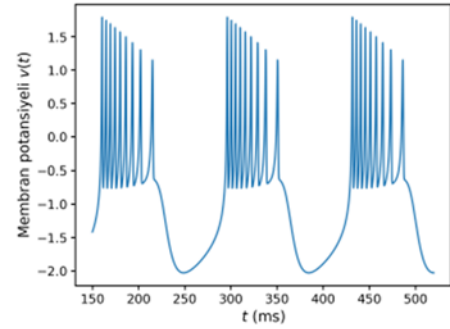
HR nöron modeli denklemlerinde v , u ve w değişkenleri sırasıyla membran potansiyelini ve iyileşme değişkenlerini temsil etmektedir. FHN modelinden farklı olarak iyileşme değişkenleri hızlı (u) ve yavaş (w) olarak ikiye ayrılmıştır. Modele ait parametreler ise b , c , μ , v_{rest} ve I olarak adlandırılmaktadır. I parametresi yine akımı temsil etmektedir. HR nöron modelinin Tablo 3’te verilen parametre değerleriyle simülasyonu yapıldığında Şekil 4’teki gibi düzenli ateşleme ve patlamalı ateşleme davranışı gözlemlenmektedir.

Tablo 3. HR nöron modeli için kullanılan parametre değerleri

	Düzenli ateşleme	Patlamalı ateşleme
Δh	0.01	0.01
b	2.96	2.6
μ	0.01	0.01
s	4	4
I	5	3.15
v_{rest}	-1.6	-1.6



(a)



(b)

Şekil 4. HR nöron modelinin bilgisayar ortamında yapılan simülasyonu

2.4. Leaky Integrate-and-Fire (LIF) Modeli

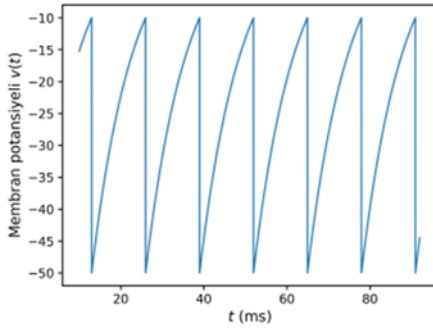
Leaky Integrate-and-Fire (LIF) modeli, biyolojik bir nöronun elektriksel davranışını basitleştirilmiş bir yaklaşımla temsil eden en temel nöron modellerinden biridir. Bu modelde hücre zarının potansiyeli zamanla birikerek belirli bir eşik değere ulaştığında, nöronun bir sinyal (spike) ürettiği varsayılır. Spike oluştuktan sonra potansiyel sıfırlanır ve süreç tekrar başlar. “Leaky” ifadesi, hücre zarından geçen iyonların neden olduğu potansiyel kaybını ifade eder ve bu özellik, modelin daha gerçekçi olmasına katkı sağlar. LIF modeli, karmaşık biyofiziksel süreçleri içermez; ancak sadeliği sayesinde özellikle büyük ölçekli nöral ağların simülasyonlarında sıkça tercih edilir. Bir boyutlu bir denklemle ifade edildiği için gerçekleştirilecek olan modeller arasından en basitidir. LIF nöron modeline ait diferansiyel denklem, Denklem (4)’teki gibidir [26].

$$\dot{v} = \frac{(v_{rest} - v + I)}{\tau} \quad (4)$$

LIF nöron modeli denkleminde v değişkeni membran potansiyelini temsil etmektedir. Modele ait parametreler ise v_{rest} , τ ve I olarak adlandırılmaktadır. I parametresi yine akımı temsil etmektedir. LIF nöron modelinin Tablo 4'te verilen parametre değerleriyle simülasyonu yapıldığında Şekil 5'teki gibi düzenli ateşleme davranışı gözlemlenmektedir.

Tablo 4. LIF nöron modeli için kullanılan parametre değerleri

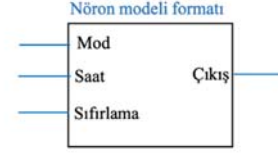
	Düzenli ateşleme
Δh	0.01
v_{rest}	-15
v_{reset}	-50
v_{peak}	-10
I	20



Şekil 5. LIF nöron modelinin bilgisayar ortamında yapılan simülasyonu

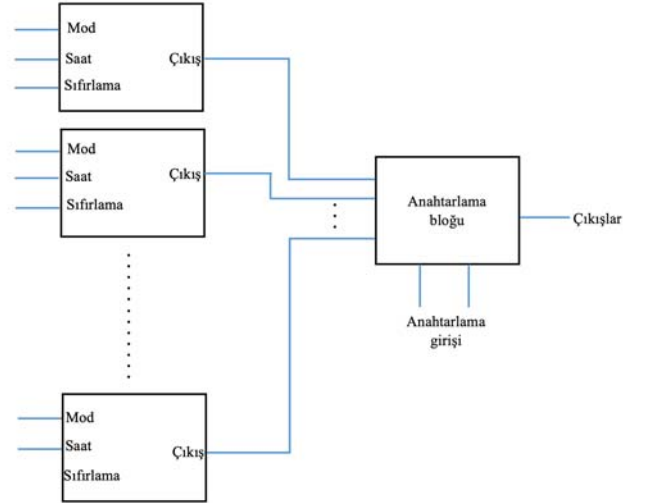
2.5. Önerilen Tasarım

Görülebileceği üzere farklı nöron modelleri farklı sayıda denklemlerle ifade edilmekte ve farklı parametrelerle tanımlanmaktadır. Bu tür farklı nöron modellerinin standart bir formatta gerçekleştiriminin yapılabilmesi için Şekil 6'da gösterilen format kullanılmıştır. Buna göre, her bir nöron modelinin dijital donanım gerçekleştirimine uygun olması için saat ve sıfırlama girişleri bulunmaktadır. Nöronların düzenli ve patlamalı ateşleme benzeri farklı çalışma modları varsa bu tür modların mod girişleriyle kontrolü sağlanmaktadır. Modların çeşitliliğine göre mod girişinin bit uzunluğu istenildiği gibi ayarlanabilir. Her bir mod giriş değeri için nöron modeline ait farklı parametre değerleri kullanılır. Eğer nöron modeli bir ağ yapısı içerisinde kullanılacaksa I akım parametresi de dışarıdan giriş olarak alınıp kullanılabilir. Fakat bu çalışmada bu tür bir ağ yapısı kullanılmadığı için mod girişi I akım parametresini de kontrol etmektedir.



Şekil 6. Nöron modeli gerçekleştirimi için kullanılan standart format

Tüm nöron modeli gerçekleştirimlerinin standart olması için çıkış olarak sadece membran potansiyeli çıkışa aktarılmaktadır. Çoğu nöromorfik uygulama membran potansiyelindeki piklere (spike) bağlı çalıştığı için bu durum herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Çıkışın kaç bit olacağı da ihtiyaca göre istenildiği gibi ayarlanabilir.



Şekil 7. Önerilen tasarımın blok diyagramı

Bu çalışmada, Şekil 6'daki formata göre standart bir şekilde gerçekleştirilmiş olan nöron modellerinin Şekil 7'deki gibi tek bir blok yapı içerisinde kullanımı önerilmektedir. Buna göre, her bir nöron modelinin çıkışı bir adet anahtarlama birimine aktarıldıktan sonra bunlardan sadece biri bloğun çıkışına aktarılmaktadır. Böylece, tek bir nöron modelinin donanım gerçekleştirimini yapmak yerine, birden fazla nöron modeli aynı anda kullanılıp test edilebilmektedir. Standart bir format kullanıldığı için tasarımın geri kalan kısımlarını değiştirmeden rahatlıkla blok yapı içerisinde nöron modelleri çıkarılabilir veya sonradan blok yapıya eklemeler yapılabilir. Bu da tasarıma büyük bir modülerlik kazandırmaktadır. Önerilen tasarımın tek avantajı birden fazla nöron modelini aynı anda modüler bir şekilde kullanabilmek değildir. Aynı zamanda, donanımda değişiklik veya yeniden programlama yapmaya ihtiyaç duymaksızın her bir nöronun farklı çalışma modları da mod girişleri sayesinde kolaylıkla elde edilebilmektedir. Önerilen tasarımın bir donanım gerçekleştiriminde gerçek zamanlı kullanımı bir sonraki bölümde verilmektedir.

3. FPGA Gerçekleştirimi

Önerilen tasarımın FPGA donanımı üzerinde gerçekleştirimini yapabilmek için aritmetik işlemlerde kullanılacak notasyon belirlenmeli ve nöron modellerinin sürekli zamanlı denklem takımları ayrık zamanlı hale getirilmelidir. Bu çalışmada, aritmetik işlemler için donanımına uygun olması bakımından 32-bit sabit noktalı gösterim kullanılmıştır. Tüm nöron modellerinde 32-bitlik hesaplamaların 15-biti tam sayı kısmı; 15-biti ise küsuratlı kısmı temsil etmek için kullanılmaktadır. Geri kalan bit ise sayının pozitif veya negatif olmasını belirlemektedir. Nöron modellerinin denklem takımlarını ayrık zamanlı hale getirebilmek için ise Euler ayrıklaştırma metodu kullanılmıştır. Izhikevich, FHN, HR, ve LIF nöron modellerinin Euler metoduyla ayrıklaştırılmış versiyonları sırasıyla Denklem (5), (6), (7) ve (8)'de verilmektedir.

$$\begin{aligned} v_{n+1} &= v_n + \Delta h(0.04v_n^2 + 5v_n + 140 - u_n + I) \\ u_{n+1} &= u_n + \Delta h(a(bv_n - u_n)) \\ v_n \geq 30mV &\Rightarrow v_{n+1} \leftarrow c \\ u_{n+1} &\leftarrow u_n + d \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_{n+1} &= v_n + \Delta h(c(v_n - u_n + I - \frac{v_n^3}{3})) \\ u_{n+1} &= u_n + \Delta h(\frac{v_n - bu_n + a}{c}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_{n+1} &= v_n + \Delta h(u_n - v_n^3 + bv_n^2 + I - w_n) \\ u_{n+1} &= u_n + \Delta h(1 - 5v_n^2 - u_n) \\ w_{n+1} &= w_n + \Delta h(\mu(s(v_n - v_{rest}) - w_n)) \end{aligned} \quad (7)$$

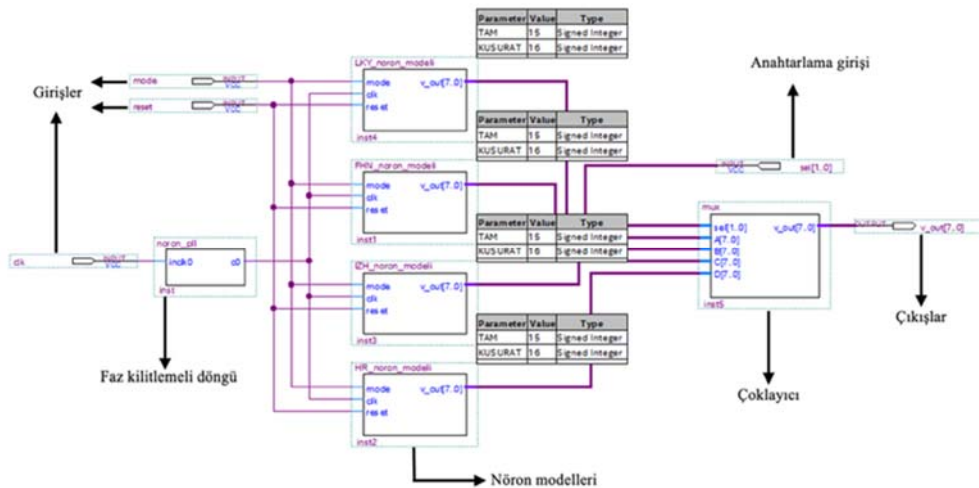
$$v_{n+1} = v_n + \frac{\Delta h}{\tau}(v_{rest} - v_n + I) \quad (8)$$

Donanımı gerçekleştirebilmek için VHDL donanım tanımlama dili kullanılmıştır. Öncelikli olarak tüm nöron modelleri VHDL kullanılarak Şekil 6'da ki formata uygun şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarımda mod girişi, nöron modelinin eğer var ise başka çalışma modlarına geçiş yapabilmesi için kullanılmaktadır. Bu geçiş farklı mod

değerleri için farklı parametrelerinin kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Yapılmış olan bu çalışmada genel olarak nöron modellerinin düzenli ateşleme ve patlamalı ateşleme durumları ele alınmıştır. Bu sebepten dolayı mod girişi bir bit seçilmiştir. Saat ve sıfırlama girişleri tüm dijital sistemlerde gerekli olan girişlerdir. Yapılan aritmetik işlemler 32-bit olmasına rağmen Dijital Analog Dönüştürücüye (DAC) gönderileceği için çıkış 8-bit seçilmiştir. Çıkışın bit uzunluğu tasarımın ihtiyacına göre istenildiği gibi ayarlanabilmektedir. Çıkış bit uzunluğunun FPGA içerisinde yapılan hesaplamalara herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Bu nedenle çıkış bit uzunluğunun sistemin kararlılığına bir etkisi bulunmamaktadır. Sadece gözlemlenen çıkışın hassasiyetini değiştirmektedir. 8-bitlik çıkış ise bu çalışmadaki osiloskop gözlemleri için son derece yeterlidir.

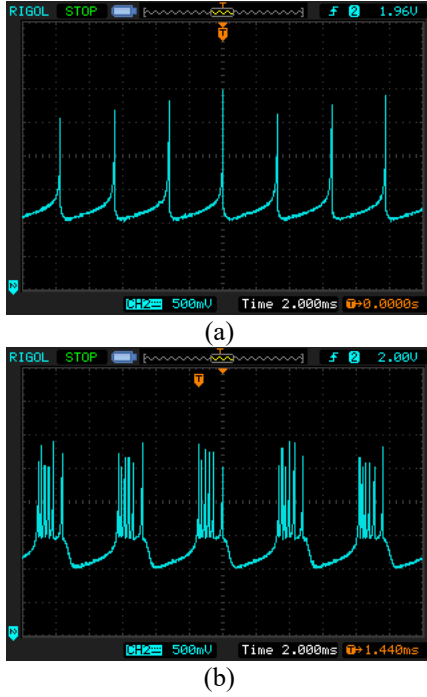
Tüm nöron modelleri için Şekil 6'da gösterilen formata uygun olarak gerçekleştirim yapılmıştır. Ardından tüm nöron modelleri Şekil 8'deki gibi tek bir yapıda birleştirilmiştir. Bu şekil girişler, faz kilitlemeli döngü, formata uygun oluşturulmuş nöron modelleri, çoklayıcı, anahtarlama girişi ve çıkıştan oluşmaktadır. Faz kilitlemeli döngü ile nöron modellerinin saat girişine verilecek olan saat sinyali üretilmektedir. Kullanılan nöron modellerinin çıkışları çoklayıcıya iletilmektedir. Çoklayıcı ise girişlerinden sadece birini çıkışa aktarmaktadır. Girişler farklı sürgülü anahtarlar ile kontrol edilmektedir. İlk anahtar ile nöron modelinin modu kontrol edilirken diğer anahtarlar yardımı ile çoklayıcının çıkışa aktaracağı nöron modeli seçilmektedir. Seçilen nöron modeli DAC'a gönderilir ve çıkış osiloskop üzerinden gözlemlenir.

Çoklayıcı kontrol eden anahtarların "00" konumuna getirilmesi ile çıkışa Izhikevich nöron modelinin çıkışı aktarılmıştır. Izhikevich nöron modeli için elde edilen osiloskop görüntüleri Şekil 9'da görülmektedir. Bu nöron modeli için iki farklı çalışma modu test edilmektedir. Bu da mod girişine bağlanan sürgülü anahtar yardımıyla yapılmaktadır. Mod girişi "0" iken Şekil 9a'daki gibi düzenli ateşleme davranışı gözlemlenmektedir. Mod girişi "1" iken



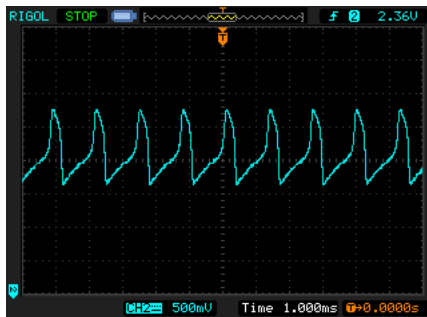
Şekil 8. Önerilen tasarımın FPGA gerçekleştirimi

Şekil 9b'deki gibi patlamalı ateşleme davranışı gözlemlenmektedir.



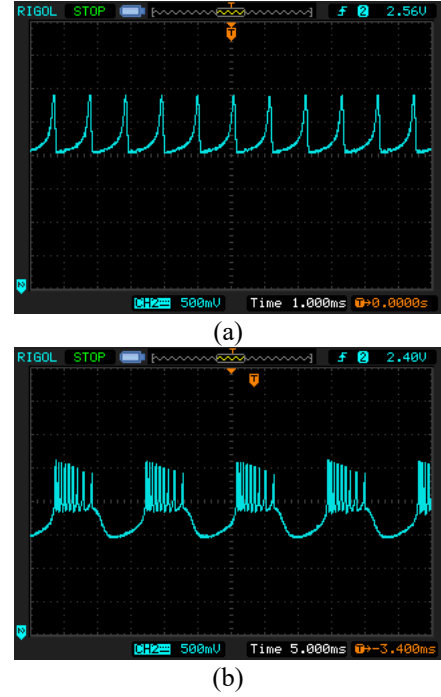
Şekil 9. Izhikevich nöron modeli için osiloskop görüntüleri: (a) düzenli ateşleme, (b) patlamalı ateşleme

Çoklayıcı kontrol eden anahtarların “01” konumuna getirilmesi ile çıkışa FHN nöron modelinin çıkışı aktarılmıştır. Bu nöron modeli için tek bir çalışma modu kullanıldığı için mod girişinin “0” ya da “1” yapılması çıkışı değiştirmemektedir. Standart format nedeni ile mod girişi kullanılmamasına rağmen mevcuttur. FHN nöron modeli için elde edilen osiloskop görüntüsü Şekil 10'daki gibidir.



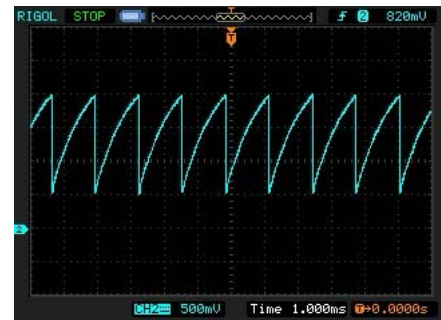
Şekil 10. FHN nöron modeli için osiloskop görüntüsü

Çoklayıcı anahtarlarının “10” konumuna getirilmesiyle ise çıkışa HR nöron modelinin çıkışı aktarılmaktadır. Izhikevich nöron modelinde olduğu gibi bu nöron modeli içinde iki farklı çalışma modu test edilmektedir. Mod girişi “0” iken Şekil 11a'daki gibi düzenli ateşleme davranışı gözlemlenmektedir. Mod girişi “1” iken Şekil 11b'deki gibi patlamalı ateşleme davranışı gözlemlenmektedir.



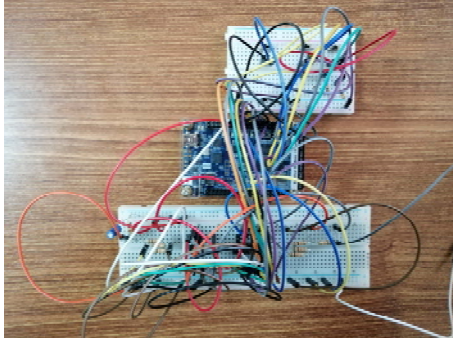
Şekil 11. HR nöron modeli için osiloskop görüntüleri: (a) düzenli ateşleme, (b) patlamalı ateşleme

Çoklayıcı kontrol eden anahtarların “11” konumuna getirilmesi ile çıkışa LIF nöron modelinin çıkışı aktarılmıştır. FHN nöron modelinde olduğu gibi bu nöron modelinde de tek bir mod olduğu için mod girişi etkisizdir. LIF nöron modeli için elde edilen osiloskop görüntüsü Şekil 12'de verilmektedir.



Şekil 12. LIF nöron modeli için osiloskop görüntüsü

Bu çalışma için Altera DE0-Nano FPGA geliştirme kartı kullanılmıştır. Kullanmış olduğumuz deney düzeneği Şekil 13'de sunulmaktadır. Şeklin orta kısmında geliştirme kartı; üst kısmında sürgülü anahtarlar ve alt kısmında ise DAC devresi bulunmaktadır. FPGA gerçekleştirim sonuçları Tablo 5'te özetlenmektedir. Bu sonuçlara göre basit ve ucuz bir geliştirme kartı olmasına rağmen dört farklı nöron modeli FPGA içerisine rahatlıkla sığmaktadır.



Şekil 13. Deney düzeneği

Tablo 5. FPGA gerçekleştirim sonuçları

Parametre	Sonuç
Kullanılan Lojik Blok Sayısı	7533 (%34)
Kullanılan Kaydedici Sayısı	256
Kullanılan Çarpıcı Sayısı	132 (%100)
Maksimum Çalışma Frekansı	13.52Mhz

Bu tasarım yaklaşımında tasarıma yeni nöron modelleri eklemek için tek yapılması gereken her bir nöron modeli için bu bölümde anlatılan aşamaların sırasıyla takip edilip Şekil 6'daki formata uygun bir FPGA tasarımının yapılmasıdır. Yeni modeli blok yapıya eklemek için tek yapılması gereken ise çoklayıcı bloğunun kontrol bitlerini arttırmaktır. Bu bakımdan yeni nöron modellerinin tasarıma eklenmesi son derece kolay olacaktır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada biyolojik nöron modellerinin dijital donanım gerçekleştirimi için standart ve modüler bir tasarım yaklaşımı önerilmiştir. Bu kapsamda literatürde mevcut olan farklı özelliklere sahip çeşitli nöron modellerinin önce bilgisayar ortamında simülasyonları yapılmıştır. Daha sonrasında simülasyonları yapılan bu nöron modellerinin önerilen formatta FPGA gerçekleştirimleri yapılmış ve tüm nöron modelleri yine önerilen tasarıma uygun şekilde tek bir yapı içerisinde toplanmıştır. Böylelikle tek bir FPGA entegre devresi üzerinde yeniden programlama veya VHDL tasarımında herhangi bir değişiklik yapmadan gerçek zamanlı olarak birden fazla nöronun davranışı osiloskop kullanarak gözlemlenebilmiştir. Önerilen tasarımın mod girişleri sayesinde aynı nöronun farklı türdeki davranışları da gerçek zamanlı olarak osiloskop üzerinden gözlemlenmiştir. Osiloskopta gözlemlenen çıkışlar bilgisayar simülasyonları ile uyumludur. Bu da donanım gerçekleştiriminin doğru bir şekilde yapılmış olduğunu göstermektedir.

Daha önceki çalışmalarda yapıldığı gibi tek bir nöron modeline odaklanmak yerine nöron modelinden bağımsız bir tasarım şablonuna odaklanması tasarım esnekliği bakımından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Örneğin, nöromorfik uygulamalarda bu tür bir yaklaşımın kullanılması hızlı prototiplendirme sağlayacaktır. Anahtarlama özelliği sayesinde hangi nöronun uygulamaya daha uygun olduğu veya bir nöronun hangi çalışma modunda kullanılması gerektiği donanım üzerinde değişiklik yapmaya gerek kalmadan hızlı bir şekilde test edilebilecektir. Tek tek

nöronların ayrı ayrı gerçekleştirildiği tasarımlarda ise bu süreç çok daha uzun olacaktır. Önerilen tasarımın bir diğer avantajı ise aynı nöromorfik tasarımın farklı bölgelerinde ihtiyaca göre farklı nöronların rahatlıkla kullanılabilmesidir. Önerilen tasarım ile farklı bölgelerde kullanılan nöron türleri ve çalışma modları gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilecektir. Ya da ileride başka bir nöron modelinin de test edilmesi gerekirse yeni model tasarıma rahatlıkla entegre edilebilecektir.

Önerilen tasarımın ayrı ayrı yapılan gerçekleştirimlere kıyasla dezavantajı ise alan kullanımının daha fazla olacak olmasıdır. Fakat nöromorfik uygulamanın test edilmesinin tamamlanmasından sonra alan kullanımını azaltmak için kullanılmayan nöron modellerini tasarımdan çıkarmak son derece kolay olacaktır. Hızlı prototiplendirme esnekliği ile kıyaslandığında alan kullanımının artması bu nedenle ciddi bir problem teşkil etmemektedir. Sonuç olarak önerilen tasarım yaklaşımı nöromorfik uygulamaların test edilmesi ve tasarlanması aşamasını son derece hızlandıracak ve ileride yapılacak modifikasyonları da kolaylaştıracaktır.

Destek veya Teşekkür

Bu çalışma 1919B012321491 numaralı Tübitak 2209-A projesi tarafından desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Yapay Zekâ Kullanım oranı: %0

Araştırmacıların Katkı Oranı

Sılaynur Doğan: Literatür taraması, veri analizi, tasarım ve donanım gerçekleştirimi, sonuçların yorumlanması, makale yazımı (%35).

Onur Güneş: Literatür taraması, veri analizi, tasarım ve donanım gerçekleştirimi, sonuçların yorumlanması, makale yazımı (%35).

İsmail Öztürk: Literatür taraması, veri analizi, tasarım ve donanım gerçekleştirimi, sonuçların yorumlanması, makale yazımı, danışmanlık (%30).

Kaynaklar

- [1] Yang, J. Q., Wang, R., Ren, Y., Mao, J. Y., Wang, Z. P., Zhou, Y., & Han, S. T. (2020). Neuromorphic engineering: from biological to spike-based hardware nervous systems. *Advanced Materials*, 32(52), 2003610. <https://doi.org/10.1002/adma.202003610>

- [2] Liu, W., Xiao, S., Li, B., & Yu, Z. (2024). SC-IZ: A low-cost biologically plausible Izhikevich neuron for large-scale neuromorphic systems using stochastic computing. *Electronics*, 13(5), 909. <https://doi.org/10.1109/TBCAS.2020.2995869>
- [3] Alkabaa, A. S., Taylan, O., Yilmaz, M. T., Nazemi, E., & Kalmoun, E. M. (2022). An investigation on spiking neural networks based on the izhikevich neuronal model: Spiking processing and hardware approach. *Mathematics*, 10(4), 612. <https://doi.org/10.3390/math10040612>
- [4] Shrestha, A., Fang, H., Mei, Z., Rider, D. P., Wu, Q., & Qiu, Q. (2022). A survey on neuromorphic computing: Models and hardware. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 22(2), 6-35. <https://doi.org/10.1109/MCAS.2022.3166331>
- [5] Yamazaki, K., Vo-Ho, V. K., Bulsara, D., & Le, N. (2022). Spiking neural networks and their applications: A review. *Brain sciences*, 12(7), 863. <https://doi.org/10.3390/brainsci12070863>
- [6] Ghosh-Dastidar, S., & Adeli, H. (2009). Spiking neural networks. *International journal of neural systems*, 19(04), 295-308. <https://doi.org/10.1142/S0129065709002002>
- [7] Li, Y., Yin, R., Kim, Y., & Panda, P. (2023). Efficient human activity recognition with spatio-temporal spiking neural networks. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1233037. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1233037>
- [8] Hodgkin, A., & Huxley, A. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of physiology*, 117, 500-544. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1952.sp004764>
- [9] FitzHugh, R. (1961). Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. *Biophysical journal*, 1(6), 445-466. [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(61\)86902-6](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(61)86902-6)
- [10] Nagumo, J., Arimoto, S., & Yoshizawa, S. (1962). An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proceedings of the IRE*, 50(10), 2061-2070. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1962.288235>
- [11] Hindmarsh, J. L., & Rose, R. M. (1984). A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations. *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological sciences*, 221(1222), 87-102. <https://doi.org/10.1098/rspb.1984.0024>
- [12] Morris, C., & Lecar, H. (1981). Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber. *Biophysical journal*, 35(1), 193-213. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(81\)84782-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(81)84782-0)
- [13] Izhikevich, E. M. (2003). Simple model of spiking neurons. *IEEE Transactions on neural networks*, 14(6), 1569-1572. <https://doi.org/10.1109/TNN.2003.820440>
- [14] Burkitt, A. N. (2006). A review of the integrate-and-fire neuron model: I. Homogeneous synaptic input. *Biological cybernetics*, 95(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00422-006-0068-6>
- [15] Ermentrout, G. B., & Kopell, N. (1986). Parabolic bursting in an excitable system coupled with a slow oscillation. *SIAM journal on applied mathematics*, 46(2), 233-253. <https://doi.org/10.1137/0146017>
- [16] Fourcaud-Trocmé, N., Hansel, D., Van Vreeswijk, C., & Brunel, N. (2003). How spike generation mechanisms determine the neuronal response to fluctuating inputs. *Journal of neuroscience*, 23(37), 11628-11640. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-37-11628.2003>
- [17] Bashir, F., Zahoor, F., Alzahrani, A., & Abbas, H. (2025). Energy-efficient neuromorphic system using novel tunnel FET based LIF neuron design for adaptable threshold logic and image analysis applications. *Scientific Reports*, 15(1), 12638. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93727-6>
- [18] Fang, X., Liu, D., Duan, S., & Wang, L. (2022). Memristive lif spiking neuron model and its application in morse code. *Frontiers in Neuroscience*, 16, 853010. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.853010>
- [19] Aamir, S. A., Stradmann, Y., Müller, P., Pehle, C., Hartel, A., Grübl, A., ... & Meier, K. (2018). An accelerated LIF neuronal network array for a large-scale mixed-signal neuromorphic architecture. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 65(12), 4299-4312. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2018.2840718>
- [20] Dahasert, N., Öztürk, İ., & Kiliç, R. (2012). Experimental realizations of the HR neuron model with programmable hardware and synchronization applications. *Nonlinear Dynamics*, 70(4), 2343-2358. <https://doi.org/10.1007/s11071-012-0618-5>
- [21] Korkmaz, N., Öztürk, İ., & Kilic, R. (2016). Multiple perspectives on the hardware implementations of biological neuron models and programmable design aspects. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(3), 1729-1746. <https://doi.org/10.3906/elk-1309-5>
- [22] Korkmaz, N., Öztürk, İ., Kalinli, A., & Kiliç, R. (2018). A comparative study on determining nonlinear function parameters of the Izhikevich neuron model. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 27(10), 1850164. <https://doi.org/10.1142/S0218126618501645>
- [23] Baran, A. Y., Korkmaz, N., Öztürk, I., & Kiliç, R. (2022). On addressing the similarities between STDP concept and synaptic/memristive coupled neurons by realizing of the memristive synapse based HR neurons. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 32, 101062. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.09.008>
- [24] Guo, W., Yantrı, H. E., Fouda, M. E., Eltawil, A. M., & Salama, K. N. (2021). Toward the optimal design and FPGA implementation of spiking neural

- networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 33(8), 3988-4002.
<https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3055421>
- [25] Dahasert, N. (2012). *Biyolojik nöron modellerinin elektronik donanımlarının incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi].
https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/498682/yokAcikBilim_442064.pdf?sequence=-1
- [26] İşler, Y. S. (2023). Özel Başlangıç Koşulları Altında Lineer LIF Nöron Modelinin Analizi ve Çözüm Metodu. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(3), 1785-1795.
<https://doi.org/10.47495/okufbed.1184076>

Zihinsel İş Yükü Seviyelerinin EEG Alt Bantlarına Dayalı Sınıflandırılması

Classification of Mental Workload Levels Based on EEG Sub-Bands

Müge Dolu^{1*}, **Şerife Genç Benli²**

^{1*} ORCID: 0000-0002-7886-3098, ²ORCID: 0000-0002-5527-8574

^{1,2}Erciyes Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 38280, Talas, Kayseri, Türkiye

Geliş / Recieved: 30.06.2025 Kabul / Accepted: 22.07.2025 Yayınlanma / Published: 30.07.2025

Özet

EEG sinyalleri kullanılarak beyinde farklı durumlara verilen farklı yanıtlar ölçülerek analiz edilebilir. Bu çalışmada, NASA tarafından geliştirilen MATB-II görev tabanlı deney düzeneği kullanılarak elde edilen açık erişimli ve literatürde çok az incelenmiş bir EEG veri seti kullanılmıştır. Çalışmada, üç oturuma ait kolay, orta ve zor olmak üzere üç farklı zorluk seviyesi değerlendirilmiştir. Öncelikle veriler 0.5 Hz ile 45 Hz aralığına filtrelenmiş ve faz kayması giderilmiştir. Sonrasında verilere 4. dereceden ayrık dalgacık dönüşümü uygulanmış ve elde edilen katsayıların her birinden zaman, frekans ve entropi tabanlı 26 özellik olmak üzere toplam 130 özellik çıkarılmıştır. Ardışık ileri seçim yöntemi kullanılarak özellik çıkarımına gidilmiştir. Yapay sinir ağları, k-en yakın komşu ve rastgele orman algoritmaları kullanılarak kolay, orta ve zor seviyeler için sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. En yüksek doğruluk oranı ikili sınıflandırma için kolay-orta sınıflandırma grubunun birinci oturumunda, rastgele orman algoritması ile %86,67 olarak elde edilmiştir. Tüm oturumların bir arada sınıflandırılmasında ise kolay-orta sınıflandırma grubunda rastgele orman algoritması ile %85,10 oranında en yüksek doğruluk görülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde ise en yüksek sınıflandırma başarımları kolay-orta sınıf ayrımında elde edilirken, en yüksek doğruluk oranları ise k-en yakın komşu algoritması ile sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Makine öğrenmesi, zihinsel iş yükü, EEG analizi

Abstract

Using EEG signals, different brain responses to varying conditions can be measured and analyzed. In this study, an open-access EEG dataset, obtained using the task-based experimental setup developed by NASA, MATB-II, and scarcely studied in the literature, was used. Three different difficulty levels (easy, medium, difficult) belonging to three sessions were evaluated in the study. First, the data were band-pass filtered between 0.5 Hz and 45 Hz, and phase distortion was eliminated. Next, a fourth-order discrete wavelet transform was applied, and from each of the resulting coefficients, 26 time-, frequency-, and entropy-based features were extracted 130 features in total. Feature extraction was then refined using the sequential forward selection method. Classifications were conducted for easy, medium, and difficult levels using artificial neural networks, k-nearest neighbor, and random forest algorithms. The highest accuracy rate for binary classification was 86.67% in the first session of the easy-medium classification group, achieved with the random forest algorithm. In the combined classification of all sessions, the highest accuracy rate was 85.10% with the random forest algorithm in the easy-medium classification group. Overall, the highest classification performance was achieved in the easy-medium class distinction, while the highest accuracy rates were achieved with the k-nearest neighbor algorithm.

Keywords: Machine learning, mental workload, EEG analysis

1. Giriş

Beyin fonksiyonları, birbirleriyle bağlantılı çalışan hücrelerden meydana gelmektedir [1]. EEG sinyalleri

beyindeki elektriksel aktiviteyi ölçer ve bu ölçümlerden faydalanılarak analizler yapılabilir. Bu sayede çeşitli hastalıklar, bilişsel durumlar, zihinsel iş yükü seviyeleri ve

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: mugeedolu@gmail.com (M. Dolu)

duygu durumlarıyla ilgili çıkarımlar yapılabilmesine olanak tanınmış olur [2].

Bilişsel iş yükü; bir görevi, bir işi veya durumu gerçekleştirmek için meydana gelen zihinsel aktivite yoğunluğunu ifade eder. Bilişsel iş yükünün yönetimi, yapılan iş veya görevdeki hataların minimize edilmesine katkı sağlar [3]. İnsanların gerçekleştirdiği farklı aktivitelerde farklı bilişsel iş yükü seviyeleri meydana gelir. Aynı görevi gerçekleştiren farklı kişilerde de psikolojik durumlar, çevresel faktörler, kişinin yapılan iş konusundaki tecrübesine dayalı olarak da bilişsel iş yükü seviyelerinde farklılıklar görülebilmektedir [4].

Beynin farklı durumlarda ürettiği yanıtların incelenmesi geniş bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Yapılan analiz ve değerlendirmeler iş kazalarının önlenmesini, araç ve ortam düzenlemelerinin iyileşmesini sağlayabilmektedir [5]. Bu konuda yapılmış farklı çalışmalar mevcuttur.

Mahsa ve ark zihinsel iş yükü ve stres düzeyinin sınıflandırmasını üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 18 katılımcıya ait 64 kanallı EEG verileri kullanılmıştır. 500 Hz örnekleme frekansına sahip veriler 1 Hz-45 Hz aralığında filtrelenmiştir. Alt bantlar kullanılarak özellik çıkarımı yapılmış ve transfer öğrenme tekniği ile zihinsel iş yükü için ortalama %77, stres durumu için ise ortalama %84 oranında başarımlar elde edilmiştir [6].

Jung Ho ve ark EEG verilerini kullanarak tehlike değerlendirmesi amacıyla sanal gerçeklik ile inşaat tehlikeleri üzerine bir sınıflandırma çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada sanal gerçeklik yardımıyla inşaat kazaları simüle edilmiş ve EEG kayıtları alınmıştır. Bu verilerden istatistik ve frekans tabanlı özellikler çıkarılmıştır. LightGBM algoritması ile sınıflandırma yapılmış ve en yüksek başarımlar %82,3 olarak elde edilmiştir [7].

Houtan ve ark yapmış oldukları çalışmada EEG verilerini kullanarak inşaat işçilerindeki stres seviyelerini incelemişlerdir. Üç farklı inşaat sahası veri toplamak için kullanılmış, 14 kanallı EEG ile verilerin elde edilmesi sağlanmıştır. EEG sinyallerinden elde edilen zaman ve frekans tabanlı özellikler çıkarıldıktan sonra destek vektör makineleri kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırmada %80,32 oranında doğruluk elde edilmiştir [8].

Dehais ve ark zihinsel iş yükü seviyelerini değerlendirmek için 2 oturumda gerçekleşen uçuş simülatörü deneti yapmış ve 32 kanal içeren EEG veri seti elde etmişlerdir. Alt bant gücü özelliklerini kullanarak öznelik vektörü elde edildikten sonra sınıflandırma yapılmış ve %89,1 oranında zihinsel iş yükünün ayırt edilmesini sağlamışlardır [9].

Bu çalışma, birinci yazar tarafından Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yapılan 'Farklı Uyarın Türlerinin EEG Sinyalleri Üzerinden Analizi' isimli tezden üretilmiştir [10]. Çalışmada açık erişimli veri setinden [11] elde edilen görev tabanlı EEG veri setinden MATB görev tabanlı çalışmasına ait EEG verileri alınmış ve 0.5 Hz ile 45 Hz aralığında butterworth filtre uygulanmıştır. Çalışmada örnekleme frekansı 125 Hz olarak seçilmiştir. Filtreleme işleminden sonra ayırık dalgacık dönüşümü kullanılarak özellik çıkarma işlemine gidilmiş, böylece sinyalin daha detaylı incelenmesi sağlanmıştır. Özellik çıkarma işleminde

ayırık dalgacık dönüşümü katsayılarının (cA,cD) her birinden 26 adet olmak üzere toplam 130 özellik içeren öznelik matrisi elde edildikten sonra ardışık ileri seçim (sequential forward selection, SFS) ile özellik seçimine gidilmiştir. Rastgele orman, k-EYK ve yapay sinir ağları algoritmaları ile sınıflandırmaya gidilmiştir.

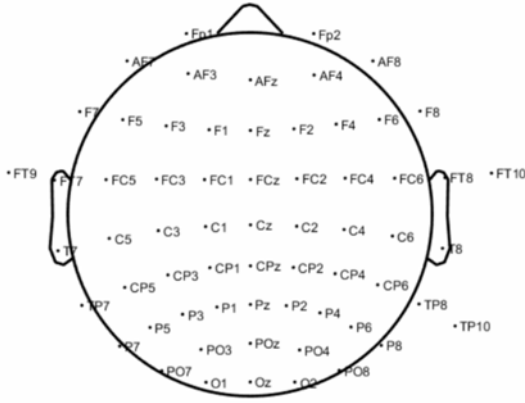
Açık erişimli ve literatürde henüz pek az kullanılmış olan veri seti ile çalışılması, oturumların ayrı ayrı değerlendirildiği gibi toplu halde tek bir oturum gibi değerlendirilmiş olması, özellik çıkarımında çok sayıda özelliğin değerlendirilmesi, özellik seçiminde ardışık ileri seçim algoritmasının tercih edilmesiyle aşırı öğrenmenin engellenmesi bu çalışmayı özgün kılan unsurlardır. Ayrıca ayırık dalgacık dönüşümü kullanılarak EEG sinyallerinin alt bantlarının da incelenmesiyle, orijinal EEG verilerinden elde edilemeyen ayırt edici özelliklerin değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

2. Yöntem

Bu çalışmada açık erişimli veri seti elde edildikten sonra veriler filtrelenmiş ve faz kayması engellenmiştir. Filtrelenmiş verilere ayırık dalgacık dönüşümü uygulanarak elde edilen cA, cD katsayılarından özellik çıkarımı ve özellik seçimi yapılmış sonrasında yapay sinir ağları, k-en yakın komşu ve rastgele orman algoritmaları ile sınıflandırmaya gidilmiştir.

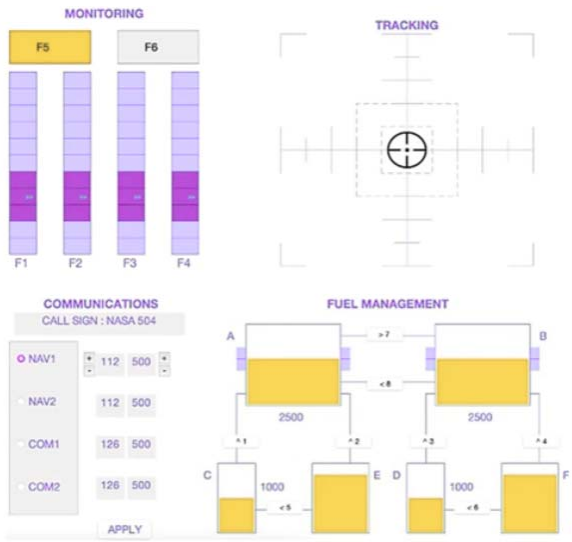
2.1. Veri seti

Bu çalışmada analiz edilen veri seti, farklı uyaranların bir arada bulunduğu ve farklı bilişsel durumları içeren EEG sinyallerinden oluşan veriler içermektedir. Her bir katılımcının birer haftalık arayla toplamda 3 oturuma dahil edildiği görev tabanlı veri seti, Toulouse Üniversitesi'nde 11 kadın ve 18 erkekten oluşan toplam 29 katılımcının 64 kanallı EEG verilerinden meydana gelmektedir. Yaş ortalamaları 23,9 olan katılımcılardan 14 katılımcı lisans derecesine sahipken 13 katılımcı ise yüksek lisans derecesine sahiptir. Verilerin örnekleme frekansı 500 Hz'dir. Aynı testlerin birer haftalık arayla üç oturumda gerçekleştirilmesi, farklı zamanlarda elde edilmiş aynı göreve ait üç verinin incelenmesine olanak tanımaktadır. Çalışmada kullanılan 64 kanallı EEG'den TP9 kanalı çıkarılarak 63 kanallı bir EEG veri seti elde edilmiştir. Farklı oturumlarda elektrot konumlarının değişmemesi için 3D tarama kameraları ve elektrot lokalizasyonunu destekleyen eklentilere yer verilmiştir [11]. Elektrot konumları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. EEG elektrot konumları [11]

Bu çalışmada kullanılan veri setinden Multi-Attribute Task Battery-II (MATB-II) görev tabanlı 3 oturumluk kolay, orta ve zor olmak üzere 3 zorluk seviyesinden oluşan veri seti bölümü kullanılmıştır. MATB-II görev tabanlı çalışmasına ait deney düzeneği Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. MATB-II deney düzeneği [11]

NASA tarafından görev dağılımı değişiminde zihinsel iş yükü seviyelerinin ölçülmesi amacıyla tasarlanmıştır. Katılımcılara tamamlamaları için 4 görev belirtilir. Burada 4 ana görevin deneye dahil edilip edilmemesi ve her bir ana görevin kendi içerisindeki zorluk seviyelerinin değişmesi, katılımcıların bu süreçlerdeki zihinsel iş yüklerinin saptanmasına olanak sağlar. Deney düzeneğinde belirtilen 4 görev: izleme, sistem izleme, iletişim ve kaynak yönetimidir. İzleme görevi sağ üst bölümde yer alır, ekranda hareketli bir hedef bulunur ve katılımcıların joystick yardımıyla hedefin merkezde kalmasını sağlamaları gerekmektedir. Sistem izleme görevi sol üst bölümde yer alır. Katılımcıların buradan gösterge ışıklarını kontrol etmesi ve belirtilen tuşlara basarak tepki vermeleri beklenmektedir. İletişim görevi sol alt kısımda yer alır. Burada katılımcıların belirli

radio frekansları seçmeleri, kendilerine iletilen mesajlara göre ilgili tuşlara basıp kendileri ile alakalı olmayan mesajları göz ardı etmeleri beklenmektedir. Son olarak kaynak yönetimi görevinde ise 8 adet pompa, 2 adet yakıt tankı ve 4 adet yardımcı tank bulunmaktadır. Katılımcılardan iki yakıt tankında da eşit yakıt kalmasını sağlamaları istenmektedir. Bunu gerçekleştirirken de 8 adet pompayı etkinleştirmeleri veya devre dışı bırakmaları gerekmektedir. Görevlerin seviyesine göre kolay, orta ve zor olmak üzere 3 farklı deney düzeneği oluşturulmuştur. Kolay deney düzeneğinde kullanıcılar izleme ve sistem izleme görevlerini gerçekleştirmişlerdir. Orta zorluk seviyesinde izleme, sistem izleme ve kaynak yönetimi görevi kullanılarak 3 alt görev belirlenmiştir. Zor seviyede bulunan deney düzeneğinde ise tüm alt görevler dahil edilip kullanıcı bu görevlerin tamamını gerçekleştirmektedir [11].

Veri setinden MATB görevine ait veriler elde edildikten sonra sinyaller filtelenmiş ve filtrelenmiş sinyallere 4. dereceden ayırık dalgacık dönüşümü uygulanarak özellik çıkarımına gidilmiştir.

2.2. Butterworth filtre ile sinyallerin filtelenmesi

EEG verilerinde istenmeyen gürültüler görülebilmektedir. Sinyal analizi yapılırken doğru sonuçlar elde edebilmek için sinyaldeki bu bölümlerin filtelenmesi gerekmektedir [12]. Bu çalışmada 4. dereceden Butterworth bant geçiren filtre ile EEG sinyali 0.5 Hz ile 45 Hz aralığına filtelenmiştir. Böylelikle sinyal gürültüden arındırılmıştır. Sinyal işleme sırasında faz kaymasını engellemek için, filtreleme işlemi ileri ve geri yönde iki kez uygulanmış böylelikle sıfır faz gecikmesi sağlanmıştır.

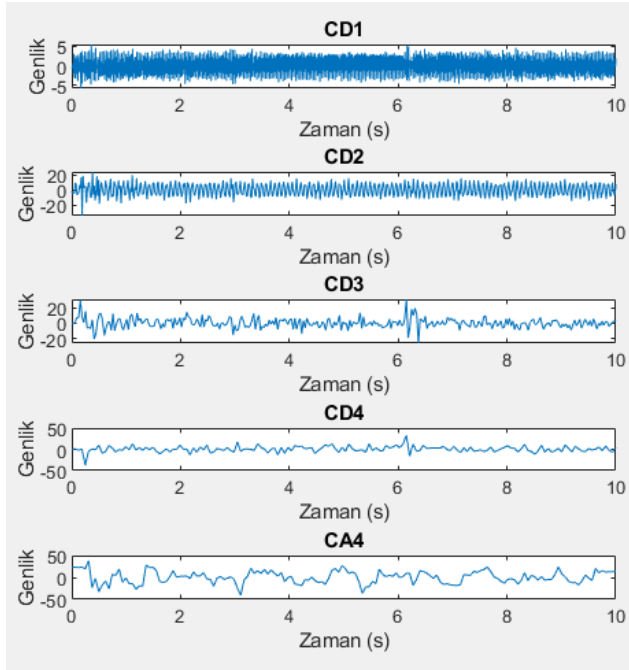
2.3. Ayırık dalgacık dönüşümü

EEG sinyallerinde düşük frekans bilgisi önemlidir. Bu gibi durumlarda büyük zaman aralıklarının kullanımını sağlayan ve farklı bölgelere sahip pencereleme tekniği olan dalgacık analizi sıkça tercih edilmektedir [13].

Dalgacık dönüşümü 2 parametreden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi dalgacığın zaman boyunca ötelenmesini sağlayan öteleme parametresi, ikinci ise fonksiyonun genişleyip daralmasını gerçekleştiren ölçek fonksiyonudur [14].

Sinyaller frekans spektrumlarına ayrıldığı için her bir bölge kendi içerisinde değerlendirilebilmektedir. Bu da durağan olmayan sinyallerin belirli bölgelerinin zaman frekans domeninde işlenmesi için avantaj sağlamaktadır [15].

Bu çalışmada dalgacık çeşitlerinden biri olan Daubechies dalgacık türünden Db4 dalgacı kullanılmıştır. Şekil 3’te 4. dereceden ayırık dalgacık dönüşümü uygulanan sinyal verilmiştir.



Şekil 3. Ayırık dalgacık dönüşümü uygulanmış sinyal

Ayırık dalgacık dönüşümü sonrası elde edilen katsayılar kullanılarak özellik çıkarımı yapılmış ve elde edilen bu verilerle sınıflandırmaya gidilmiştir.

2.4. Öznitelik vektörünün elde edilmesi

Özellik çıkarma, elde edilen EEG sinyallerinden belirli özelliklerin çıkarılmasıyla öznitelik vektörünün elde edilmesidir. EEG sınıflandırma çalışmalarında çok sayıda öznitelik çıkarma yöntemi kullanılmaktadır. Çıkarılan her öznitelik sınıflandırmada etkili sonuç vermeyebilir, bundan dolayı sınıflandırmaya doğrudan etki edecek spesifik özelliklerin seçilmesi gerekmektedir [16].

Bu çalışmada filtrelenmiş ve ayırık dalgacık dönüşümü uygulanmış sinyallerden çıkarılan özellikler: Aritmetik ortalama, alt bant gücü oranları, Hjorth parametreleri, medyan, birinci ve ikinci fark, normalize birinci ve ikinci fark, çarpıklık, basıklık, maksimum ve minimum değerler, autoregressive model katsayıları, ortalama eğri uzunluğu, medyan, birinci ve ikinci fark, normalize birinci ve ikinci fark, ardışık varyasyon logaritmik kök toplamı, varyans, enerji, standart sapma, aralık, shannon entropi, sıralı varyans toplamıdır.

EEG sinyallerinden özellik çıkarımı için ilk olarak 4. dereceden ayırık dalgacık dönüşümü uygulanmış ve böylelikle cA ve cD (cD1,cD2,cD3,cD4) katsayıları elde edilmiştir. Zaman, frekans ve entropi özelliklerini elde edebilmek için toplamda 26 özellik, dalgacık dönüşümünden elde edilen 5 alt banda uygulanmıştır. Böylelikle toplamda 130 özellik içeren bir öznitelik vektörü elde edilmiştir.

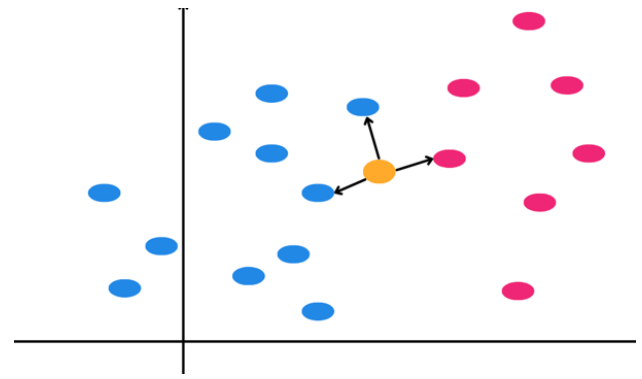
Elde edilen öznitelik vektöründen en uygun özelliklerin seçilebilmesi için sequential feature selection algoritması [17] uygulanmıştır. Böylelikle en belirgin özellikler seçilerek sınıflandırmaya gidilmesi sağlanmıştır. Her

sınıflandırmada seçilen özellikler değişmekle birlikte 130 özelliğin toplamda %15 kadarı seçilmiştir.

Elde edilen öznitelik matrisi kullanılarak yapay sinir ağları (YSA), k- en yakın komşu (k-EYK) ve rastgele orman (RO) algoritmaları ile sınıflandırmaya gidilmiştir.

2.5. K-en yakın komşu algoritması

Eğitim ve sınıflandırma algoritmalarını içeren k-EYK, eğitim algoritmasında veri setinin bu kısmında yer alan her bir veriyi eğitim örnekleri sınıfına dahil ederken, sınıflandırma algoritmasında ise veriye en yakın olan k adet örneği veriyi temsil edecek şekilde etiketler. Oluşturulan sınıf etiketlerine göre veri, kendisine yakın olan sınıfa dahil olur [18]. K-EYK algoritmasının çalışma prensibi Şekil 4'te verilmiştir.



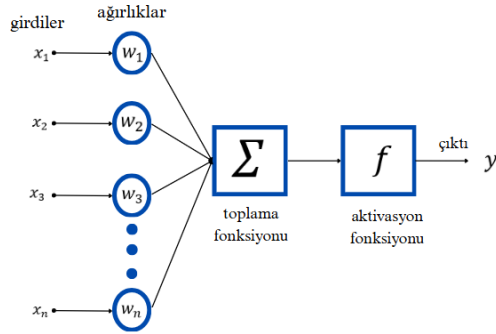
Şekil 4. k-EYK algoritması

Bu çalışmada k-EYK algoritması kullanılırken öklidyen mesafe kullanılmış ve k değeri 11 olarak seçilmiştir. 10 kat çapraz doğrulama ile çalıştırarak doğruluk ve F skoru elde edilmiştir.

2.6. Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları, beynin çalışma prensibine göre tasarlanmış bir algoritmadır. Nöronlardan oluşan algoritma eğitim, sınıflandırma ve veri ilişkilendirme işlemlerini gerçekleştirmektedir [19].

Öğrenmenin matematiksel olarak algoritmaya dönüştürülmesiyle oluşmuştur. Nöronlar işlemci elemanı, dendritler toplama fonksiyonu ve hücre gövdesi de transfer fonksiyonu olarak özdeşleştirilebilir [20]. Yapay sinir ağlarının çalışma prensibi [21] Şekil 5'te gösterilmiştir.



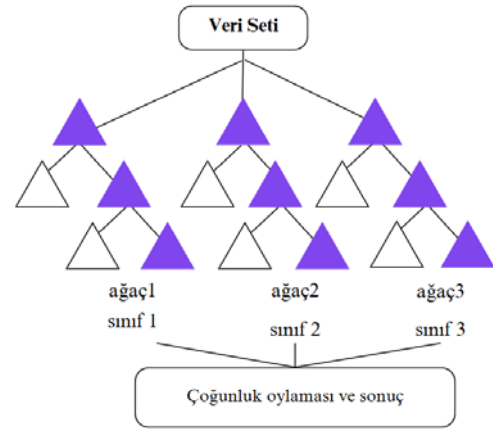
Şekil 5. Yapay sinir ağı algoritması

Bu çalışmada 10 katmanlı yapay sinir ağı algoritması kullanılmış ve 10 kat çapraz doğrulama ile doğruluk ve F skoru değerleri elde edilmiştir.

2.7. Rastgele Orman Algoritması

Karar ağaçları algoritması dallar, yapraklar ve karar düğümlerinden meydana gelmektedir. Ağacın yaprakları olarak belirtilen verilerin test edilmesine dayalı bir yöntemdir. Rastgele orman algoritmasında birden çok karar ağacı kullanılır ve her bir ağaç farklı bir etiket üzerinde eğitilerek çeşitli modeller oluşturulur, böylelikle sınıflandırma gerçekleştirilir [22].

Algoritmada her bir örnek için karar ağacı oluşturulur ve her bir karar ağacının tahmini sonucu verilir. Tahmin sonucunda ortaya çıkan tahmin değerleri arasından en çok oylanan değer sonucu oluşturur [23]. Şekil 6'da rastgele orman algoritmasının çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 6. Rastgele orman algoritması

Bu çalışmada 10 kat çapraz doğrulama yapılmış ve 300 ağaç seçilerek hesaplama yükü ve sınıflandırma başarımı açısından iyi bir denge yakalanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan çalışmada yapay sinir ağı, k-EYK ve rastgele orman algoritmaları kullanılarak öncelikle oturumlar kendi aralarında kolay, orta ve zor olmak üzere sınıflandırılmış böylelikle doğruluk ile F skoru değerleri elde edilmiştir. Sonrasında ise 29 kişiden oluşan 3 oturum birleştirilerek 87 kişilik bir veri aynı şekilde kolay, orta ve zor olmak üzere sınıflandırılmıştır.

Oturumlara ait sınıflandırma sonuçları Tablo 1-3'te verilmiştir.

Tablo 1. Birinci oturumun yüzde doğruluk ve F skoru değerleri

1.Oturum	YSA		k-EYK		RO	
	Doğruluk	F skoru	Doğruluk	F skoru	Doğruluk	F skoru
Kolay-orta	79	78	83	82	86,67	87
Kolay-zor	82,67	86	84,33	86	77,67	79
Orta-zor	53,33	61	58,67	58	48	54

Tablo 2. İkinci oturumun yüzde doğruluk ve F skoru değerleri

2.Oturum	YSA		k-EYK		RO	
	Doğruluk	F skoru	Doğruluk	F skoru	Doğruluk	F skoru
Kolay-orta	77,67	76	84	84	77	76
Kolay-zor	75,67	76	82,33	81	82	83
Orta-zor	50,33	56	60,67	61	50,33	54

Tablo 3. Üçüncü oturumun yüzde doğruluk ve F skoru değerleri

3.Oturum	YSA		k-EYK		RO	
	Doğruluk	F skoru	Doğruluk	F skoru	Doğruluk	F skoru
Kolay-orta	77	76	82,67	82	82,33	81
Kolay-zor	74,67	77	78	78	70,67	72
Orta-zor	54,33	58	56,67	61	63	68

Sınıflandırma sonuçlarında 1. oturum incelendiğinde kolay-orta sınıflandırmasında en yüksek sonuç rastgele orman algoritmasından %86,67 ile elde edilmiştir. Kolay-zor sınıflandırmasında ise en yüksek başarımlar %84,33 ile k-EYK algoritmasında görülmektedir. Orta-zor sınıflandırmasında en yüksek başarımın k-EYK algoritmasından elde edilmesiyle birlikte orta-zor sınıflandırma grubundaki başarımların diğer sınıflandırmalardan düşük olduğu görülmektedir.

2. oturum incelendiğinde ise en yüksek doğruluk oranları kolay-orta sınıflandırmasında %84, kolay-zor sınıflandırmasında %82,33 ve orta-zor sınıflandırmasında %60,67 olarak tüm sınıflandırmalarda k-EYK ile en yüksek başarımların elde edildiği görülmüştür. Bu sınıflandırma da en yüksek doğruluk oranı kolay-orta, en düşük doğruluk oranı orta-zor sınıflandırmasında elde edilmiştir.

3. oturum incelendiğinde ise kolay-orta sınıflandırmasında %82,67 ve kolay-zor sınıflandırmasında %78 doğruluk oranlarıyla en yüksek başarımlar k-EYK algoritmasında elde edilmiştir. Orta-zor sınıflandırmasında ise %63 olarak en yüksek doğruluk oranı rastgele orman algoritmasında görülmüştür.

Tüm oturumlar incelendiğinde kolay-orta sınıflandırmasındaki başarımların, kolay-zor ve orta-zor sınıflandırmalarındaki başarımlardan yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte tüm oturumlarda en düşük doğruluk oranları orta-zor sınıflandırmalarında görülmektedir.

Tüm oturumlar birlikte incelenmiş ve kolay, orta ve zor bölümlerin sınıflandırmaları yapılmıştır. Sınıflandırma sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir

Tablo 4. Tüm oturumların birlikte sınıflandırmasının yüzde doğruluk ve F skoru değerleri

Tüm oturumlar	YSA		k-EYK		RO	
	Doğruluk	F skoru	Doğruluk	F skoru	Doğruluk	F skoru
Kolay-orta	80,36	80	82,25	82	85,10	85
Kolay-zor	79,97	79	82,68	82	81,57	81
Orta-zor	46,60	45	55,33	57	53,66	53

Tüm oturumların birleştirildiği sınıflandırma sonuçları incelendiğinde, en yüksek doğruluk oranı %85,10 olarak kolay-orta sınıflandırmasında rastgele orman algoritmasında görülmektedir. Kolay-zor algoritmasında ise en yüksek doğruluk oranı %82,68 olarak k-EYK algoritmasında görülmektedir. Orta-zor sınıflandırması diğer sınıflandırmalarda olduğu gibi bu sınıflandırmada da diğer sınıflandırma gruplarına göre düşük doğruluk oranları içermektedir.

Kullanılan veri seti ile yapılan başka bir çalışma incelendiğinde, Wang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada MATB ve n-back görev tabanlı çalışmalarına ait EEG verileri kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Veri setindeki 29 kişinin 63 kanallı EEG verileri kullanılarak yapılan çalışmada güç spektral yoğunluğu ile öznelitektör vektörü elde edilmiş ve en yüksek başarımlar SCDA algoritması ile aynı görevin farklı oturumları arasında %75,39 $\pm$ %9,56 olarak elde edilmiştir [24].

Olivier ve arkadaşları, zihinsel iş yükü ile ilgili çalışmalarda hareket ve diğer yaygın artefaktların sinyal kalitesini etkilediğini ve bu durumun zihinsel iş yükünü değerlendirme performansını azalttığını belirtmiş ve MATB görev tabanlı çalışmasını kullanarak EEG sinyallerine filtreleme yapıp sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir. 48 katılımcıdan görev sırasındaki EEG verileri elde edilmiş ve rastgele orman algoritması ile yapılan sınıflandırmada %95 doğruluk elde edilmiştir [25].

Chandra ve arkadaşları, NASA tarafından geliştirilen MATB-II tabanlı EEG veri seti ile çalışmışlardır. 10 kişiye ait 14 kanallı EEG veri seti kullanılmıştır. Kanallardan güç spektral yoğunluğu ile özellik çıkarılarak yapay sinir ağları ile sınıflandırmaya gidilmiştir. Başarımlar oranları %46,7 ile

%90 aralığında elde edilmiştir. En yüksek başarımlar oranı ise AF3 kanalından %90 olarak elde edilmiştir [26].

Zhang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada 22-25 yaş aralığında 10 katılımcı ile MATB görev tabanlı çalışması üzerine çalışmışlardır. 32 kanallı EEG veri seti kullanılmıştır. Elde edilen verilere PCA uygulandıktan sonra farklı algoritmalarla sınıflandırmalar yapılmıştır. GCN spektral evrişim yöntemi kullanılarak yapılan sınıflandırmada %86,3 oranında en yüksek doğruluk elde edilmiştir. [27].

Bu çalışmada ise 29 kişinin 63 kanallı EEG verileri, diğer çalışmalara göre daha fazla sayıda özellik ile incelenmiş ve performansların kıyaslanarak değerlendirilmesi amacıyla farklı algoritmalar kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarla uyumludur. Veriler 3 oturumda ayrı ayrı değerlendirilmiş, sonrasında oturumlar birleştirilerek her bir zorluk seviyesine ait 87 veri içeren daha geniş bir veri seti oluşturulmuş ve bu veri seti üzerinden yeniden sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Oturum sayısı ilerledikçe sınıflandırma başarımlarında düşüş görülmesine rağmen, farklı oturumlarda benzer bileşenler bulunması nedeniyle tüm oturumların birleştirilerek sınıflandırması da başarılı sonuçlar vermiştir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında kolay-orta sınıflandırmasının doğruluk oranları diğer sınıflandırma gruplarına göre daha yüksektir. Orta-zor sınıflandırmasında da diğer sınıflandırma gruplarından daha düşük doğruluk değerleri elde edilmiştir. En yüksek başarımlar genel olarak k-EYK algoritmasından elde edilirken en düşük başarımlar ise yapay sinir ağları algoritmasından elde edilmiştir.

4. Sonuçlar

Görev tabanlı çalışmalar ve zihinsel iş yükü değerlendirmeleri çok derin bir araştırma alanı yaratır. Sınıflandırma sonuçlarını incelediğimizde görmekteyiz ki; insan beyni farklı durumlara farklı yanıtlar verse de farklı kişilerde aynı göreve ait zihinsel iş yükü seviyelerinde anlamlı benzerlikler görülmektedir. Deney düzeneklerinin tasarlanma şekli de bu konuda önemli bir detaydır. Deney düzeneklerinde katılımcıların tecrübeleri, deneydeki zorluk seviyelerindeki değişimler sınıflandırma sonuçlarına yansır. Sınıflandırma sonuçlarına göre bu çalışmada kullanılan veri setine ait deney düzeneği için bir değerlendirme yapıldığında, kolay-orta deney düzenekleri arasındaki farkın, orta-zor deney düzeneğine göre daha belirgin olduğu görülmektedir.

Dördüncü derece ayrık dalgacık dönüşümünden elde edilen katsayılardan özellik çıkarımıyla 130 özellik içeren bir öznetelik matrisi elde edilmiştir. Bu matrisi ardışık ileri seçim algoritması ile %15-20 seviyelerine indirilmiş fakat sınıflandırma performansında anlamlı bir düşüş yaşanmamıştır.

Sınıflandırma algoritmalarında yapay sinir ağları için katman sayısı, rastgele orman algoritması için ağaç sayısı ve k-EYK için komşu sayısı gibi parametrelerin doğru seçimi, model performansında belirleyici etkiye sahiptir.

4.1. Kısıtlar ve Gelecekteki Çalışmalar

Kullanılan veri setinde katılımcı sayısı kısıtlıdır, daha geniş bir katılımcı grubu ile deneyin tekrarlanması önerilmektedir. Deney düzeneklerinin daha belirgin şekilde ayrılması zihinsel iş yükü farkını daha tutarlı bir şekilde ortaya çıkaracaktır. Zorluk derecelerinin veya iş yükü seviyelerinin daha net şekilde tanımlanması, katılımcıların tecrübe düzeyine uygun ve kontrollü ayrılmış deney düzenekleri geliştirilmesi, sınıflandırma performansının artmasına ve zihinsel iş yükü seviyelerinin daha hassas ve güvenilir şekilde belirlenmesine olanak tanıyacaktır.

Farklı ön işleme ve özellik çıkarma yöntemleri kıyaslanarak sınıflandırma performanslarına etkisi değerlendirilebilir, derin öğrenme yöntemleri ve farklı sınıflandırma algoritmaları ile elde edilen başarımlar kullanılarak en uygun modeller araştırılabilir.

Elde edilen sonuçlar, EEG verilerinden zihinsel iş yükü hesaplamaları yapılabileceğini göstermektedir. Bu durum iş kazalarının önlenmesinde, çevre ve çalışma koşullarının düzenlenmesinde, gerçek zamanlı kullanıcı durumu izleme sistemlerinde kullanılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmiştir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Benzerlik oranı %5 olarak tespit edilmiştir.

Yapay Zeka Kullanım oranı:

Turnitin raporuna göre yapay zekâ kullanım oranı tespit edilmemiştir.

Araştırmacıların Katkı Oranı

Çalışma tasarımı Ş.G.B., veri analizi M.D., görselleştirme M.D., makale yazımı M.D., Ş.G.B.

Kaynaklar

- [1] Burke R. E., 2007. Sir Charles Sherrington's the integrative action of the nervous system: a centenary appreciation. *Brain : a journal of neurology*, 130(Pt 4), 887–894. [Doi:10.1093/brain/awm022](https://doi.org/10.1093/brain/awm022)
- [2] Üngüren, E., 2016. Beynin nöroanatomi ve nörokimsiyal yapısının kişilik ve davranış üzerindeki etkisi. *Akdeniz Üniversitesi, Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 7(1).
- [3] Choi, M. K., Lee, S. M., Ha, J. S., Seong, P. H., 2018. Development of an EEG-based workload measurement method in nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*, 111, 595-607. [Doi: 10.1016/j.anucene.2017.08.032](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.08.032)
- [4] Lim WL, Sourina O, Wang LP., 2018 STEW: Simultaneous Task EEG Workload Data Set. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 26(11), 2106-2114. [Doi: 10.1109/TNSRE.2018.2872924](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2872924)
- [5] Wang, S., Gwizdka, J., Chaovalitwongse, W. A., 2016. Using wireless EEG signals to assess memory workload in the n-back task. *IEEE Transactions on Human Machine Systems*, 46(3): 424-435. [Doi:10.1109/THMS.2015.2476818](https://doi.org/10.1109/THMS.2015.2476818)
- [6] Bagheri, M., Power, S. D., 2022. Simultaneous classification of both mental workload and stress level suitable for an online passive brain-computer interface. *Sensors (Basel)*, 22(2): 535. [Doi: 10.3390/s22020535](https://doi.org/10.3390/s22020535)
- [7] Jeon, J. H., Cai, H., 2022. Multi-class classification of construction hazards via cognitive states assessment using wearable EEG. *Advanced Engineering Informatics*, 53, 101646. [Doi: 10.1016/j.aei.2022.101646](https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101646)
- [8] Jebelli, H., Hwang, S., Lee, S. H., 2018. EEG-based workers' stress recognition at construction sites. *Automation in Construction*, 93: 315-324. [Doi:10.1016/j.autcon.2018.05.027](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.027)
- [9] Dehais, F., Somon, B., Mullen, T., ve Callan, D. E., 2020. A neuroergonomics approach to measure pilot's cognitive incapacitation in the real world with EEG.

- Applied Human Factors and Ergonomics, 111-117. [Doi: 10.1007/978-3-030-51041-1_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51041-1_16)
- [10] Dolu M.,2024. Farklı uyaran türlerinin EEG sinyalleri üzerinden analizi. Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] Hinss, M. F., Jahanpour, E. S., Somon, B., et al., 2023. Open multi-session and multitask EEG cognitive dataset for passive brain-computer interface applications. Sci Data, 10, 85. [Doi: 10.1038/s41597-022-01898-y](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01898-y)
- [12] Kang X., Handayani D., Yaacob H.,2021. Comparison between butterworth bandpass and stationary wavelet transform filter for electroencephalography signal. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [Doi:10.1088/1757-899X/1077/1/012024](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1077/1/012024)
- [13] Guo T., Zhang T., Lim, E., Lopez Miguel., Ma F., Yu L., 2022. A Review of Wavelet Analysis and Its Applications: Challenges and Opportunities. IEEE Access, 10, 1-1. [Doi:10.1109/ACCESS.2022.3179517](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3179517)
- [14] Kumar, S. G. S., Sampathila, N., Tanmay, T., 2022.Wavelet based machine learning models for classification of human emotions using EEG signal. Measurement: Sensors, 24: 1-8. [Doi:10.1016/j.measen.2022.100554](https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100554)
- [15] Haşiloğlu, A., 2001. Dalgacık dönüşümü ve yapay sinir ağları ile döndürmeye duyarsız doku analizi ve sınıflandırma. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 25: 405-413.
- [16] Yu C., Wang M., 2022. Survey of emotion recognition methods using EEG information. Cognitive Robotics. 2. 132-146. [Doi:10.1016/j.cogr.2022.06.001](https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.06.001).
- [17] Alakuş, TB, & Türkoğlu, İ. 2019. EEG Sinyallerine Dayalı Duygu Tahmininden Sıralı İleri Seçim Algoritması ile Özellik Seçimi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 23(6), 1096-1105. [Doi:10.16984/saufenbilder.501799](https://doi.org/10.16984/saufenbilder.501799)
- [18] Nurul, I., Amiza, A., Ilyas, M., Razalli, M., 2017. The performance analysis of k nearest neighbors (K-EYK) algorithm for motor imagery classification based on EEG signal. MATEC Web of Conferences, 147: 1-8. [Doi:10.1051/mateconf/201714001024](https://doi.org/10.1051/mateconf/201714001024)
- [19] Gu, Y., Liang, Z., Hagihira, S., 2019. Use of multiple EEG features and artificial neural network to monitor the depth of anesthesia. Sensors (Basel), 19(15): 1- 11. [Doi: 10.3390/s19112499](https://doi.org/10.3390/s19112499)
- [20] Subasi A., Kiyimik M., Alkan A., Koklukaya E.,2005. Neural network classification of EEG signals by using AR with MLE preprocessing for epileptic seizure detection, Mathematical and computational applications, vol. 10, no. 1, pp. 57-70. [Doi: 10.3390/mca10010057](https://doi.org/10.3390/mca10010057)
- [21] Karimi M., Arab F., 2020. Machine Learning Based Framework for Estimation of Data Center Power Using Acoustic Side Channel. [Doi: 10.48550/arXiv.2008.02481](https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.02481)
- [22] Priyama, A., Gupta, R., Ratheeb, A., Srivastava, S., 2013. Comparative analysis of decision tree classification algorithms. International Journal of Current Engineering and Technology, 3(2): 1710-1714. [Doi:10.1155/2022/9449497](https://doi.org/10.1155/2022/9449497)
- [23] Damodar E., Kunal M., Gauri D., Shubham D., 2018. Classification of EEG data for human mental state analysis using Random Forest Classifier. Procedia Computer Science. 132. 1523-1532. [Doi:10.1016/j.procs.2018.05.116](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.116).
- [24] Wang, T., Ke, Y., Huang, Y., He, F., Zhong, W., Liu, S., Ming, D., 2024. Using semi-supervised domain adaptation to enhance EEG-based cross-task mental workload classification performance, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 28(12):7032-7039. [Doi:10.1109/JBHI.2024.3452410](https://doi.org/10.1109/JBHI.2024.3452410)
- [25] Albuquerque, R. O., Cassani, R., Gagnon, J. F., Tremblay, S., Falk, T. H., 2021. Adaptive filtering for improved EEG-based mental workload assessment of ambulant users. Frontiers in Neuroscience, 15: 611962. [Doi:10.3389/fnins.2021.611962](https://doi.org/10.3389/fnins.2021.611962)
- [26] Chandra S., Verma K., Sharma G., Mittal A., Jha D., 2015. EEG based cognitive workload classification during NASA MATB-II multitasking. International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education. 3. 35-42. [Doi:10.23947/2334-8496-2015-3-1-35-41](https://doi.org/10.23947/2334-8496-2015-3-1-35-41)
- [27] Zhang Z., Zhao Z., Qu H., Liu C., Pang L.,2023. A mental workload classification method based on GCN modified by squeeze-and-excitation residual. Mathematics 11, 1189. [Doi:10.3390/math11051189](https://doi.org/10.3390/math11051189)

Lityum iyon piller için çok amaçlı bir batarya yönetim sistemi (BYS) tasarımı, gerçekleştirilmesi ve test edilmesi

Design, implementation, and testing of a multi-purpose battery management system (BMS) for lithium-ion batteries

Hayriye Melisa Kuzuluk¹ , Şüheda Berra Nur Uzun² , Deniz Turan³ ,
Mustafa Berber⁴ , İbrahim Ethem Saçu^{5*} 

¹ ORCID: 0009-0007-4822-8652, ²ORCID: 0009-0007-5273-5972, ³ORCID: 0009-0001-0548-3211,
⁴ORCID: 0009-0002-1370-9089, ⁵ORCID: 0000-0002-8627-8278

^{1,2,3,4,5}Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38030, Melikgazi, Kayseri, Türkiye

Geliş / Recieved: 02.07.2025 Kabul / Accepted: 16.07.2025 Yayınlanma / Published: 30.07.2025

Özet

Modern elektronik sistemler için Lityum-iyon (Li-on) bataryaların güvenli ve verimli yönetimi kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, özellikle laboratuvar ortamları, gündelik el aletleri gibi uygulamalar için düşük maliyetli, güvenilir ve çok amaçlı BYS (Batarya Yönetim Sistemi) tasarlamayı, üretmeyi ve test etmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, 3 ila 5 seri arası Li-ion hücreyi destekleyen ve Texas Instruments BQ7791501 entegresini temel alan pasif dengelemeli bir BYS devresi tasarlanmıştır. Tasarım süreci; Altium Designer'da PCB ve şematik çizimini, EasyEDA'da test cihazı tasarımını, SolidWorks'te koruyucu kılıf modellemesini ve prototipin fiziksel olarak üretilip montajını içermektedir. Ayrıca, sistemin davranışı MATLAB/SIMULINK ortamında simüle edilerek elde edilen bulgularla doğrulanmıştır. Gerçekleştirilen testler, üretilen prototipin aşırı gerilim, düşük gerilim ve akım koruma fonksiyonlarının başarıyla çalıştığını ve üç seri pilden oluşan batarya paketindeki hücre voltajlarını pasif dengeleme ile yaklaşık 3.45V seviyesinde eşitlediğini göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışma ile harici bir mikrodenetleyiciye ihtiyaç duymadan temel güvenlik ve yönetim görevlerini yerine getiren, piyasadaki ticari muadillerine kıyasla önemli ölçüde daha ekonomik (yaklaşık 65 USD) ve işlevsel bir BYS çözümü başarıyla üretilmiştir.

Anahtar kelimeler: Batarya yönetim sistemi, Lityum-iyon piller, Pasif hücre dengeleme

Abstract (10 punto)

The safe and efficient management of Lithium-ion (Li-ion) batteries is of critical importance for modern electronic systems. This study aims to design, implement, and test a low-cost, reliable, and multi-purpose Battery Management System (BMS) for applications such as laboratory environments and common power tools. To this end, a BMS circuit featuring passive balancing, based on the Texas Instruments BQ7791501 integrated circuit and capable of supporting 3-to-5 series Li-ion cells, was designed. The design process encompassed schematic and PCB layout in Altium Designer, the design of a test fixture in EasyEDA, the modeling of a protective enclosure in SolidWorks, and the physical fabrication and assembly of the prototype. Additionally, the system's behavior was validated through findings from simulations in the MATLAB/Simulink environment. Experimental tests demonstrated the successful operation of the prototype's over-voltage, under-voltage, and over-current protection functions, as well as its ability to equalize the cell voltages in a three-cell series battery pack to approximately 3.45V via passive balancing. In conclusion, this work has successfully yielded a functional BMS solution capable of performing essential safety and management tasks without an external microcontroller, at a significantly lower cost (approx. \$65) compared to its commercial counterparts.

Keywords: Battery management system, Lithium-ion batteries, Passive cell balancing

1. Giriş

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte taşınabilir elektronik araçlar, elektrikli cihazlar ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi çeşitli alanlarda enerjiye olan bağımlılık artmıştır. Bu artan talep, enerjinin verimli ve güvenli bir şekilde depolanmasını sağlayan teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun kullanım ömrü ve düşük kendi kendine deşarj oranı gibi üstün özellikleri nedeniyle lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, bu alanda en yaygın kullanılan enerji depolama çözümü olarak öne çıkmaktadır [1]. Bu bataryalar, enerjinin verimli bir şekilde depolanmasını ve yönetilmesini sağlayarak modern teknolojinin vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir.

Ancak, lityum-iyon bataryaların bu üstünlükleri, hassas bir operasyonel aralıkta çalışmaları gerekliliği ile birlikte gelir. Aşırı şarj, aşırı deşarj, yüksek akım ve aşırı sıcaklık gibi ideal çalışma koşullarının dışındaki durumlar, batarya hücrelerinde kalıcı hasara, kapasite kaybına ve hatta termal kaçak (thermal runaway) gibi ciddi güvenlik risklerine yol açabilir [2]. Bu nedenle, batarya paketlerinin güvenliğini, performansını ve ömrünü en üst düzeye çıkarmak için batarya yönetim sistemleri (BYS) kullanımı kritik bir zorunluluktur. Bir BYS, batarya paketindeki her bir hücrenin voltaj, akım ve sıcaklık gibi temel parametrelerini sürekli olarak izler; tehlikeli durumları önlemek için koruma fonksiyonlarını devreye sokar ve hücreler arası voltaj farklılıklarını gidermek için dengeleme (balancing), işlemi yapar [3].

BYS tasarımları, kullanılan entegre devre (çip seti) türüne göre birbirinden ayrılmaktadır. Gelişmiş uygulamalarda, entegre bir mikrodenetleyici içeren akıllı (Smart) BYS çipleri, şarj durumu (state of charge, SoC) ve sağlık durumu (state of health, SoH) gibi karmaşık algoritmaları çalıştırarak hassas kontrol sağlayabilmekle birlikte gerekli haberleşme altyapısı ile verilerin izlenebilmesinde pek çok kolaylık sağlamaktadır. Bunun dışında başka bir çip seti yapısı ise analog front-end (AFE) sistemlerdir. AFE sistemler ise genellikle hücre voltajı, sıcaklık ve akım değerlerini analog olarak toplayan ve bunları dijital olarak değerlendirmeye hazır hale getiren sistemlerdir. Kendi başlarına karar verme kabiliyetleri yoktur. Akıllı entegre yapısına sahip sistemler, tasarımın karmaşık olması, fonksiyonlarını yerine getirirken farklı çevre birimlerine ihtiyaç duyması ve diğer alternatiflere göre yüksek maliyetleri gibi nedenlerden her uygulama için uygun değildir. Benzer şekilde AFE sistemler de sağlayabildiği yüksek hassasiyetli ölçüm yeteneklerine rağmen harici mikro denetleyici ihtiyaçları yüzünden oluşan yarı bağımlı yapıları ve maliyetleri sebebiyle her durumda tercih edilmezler [4, 5, 6, 7]. Buna karşılık, akıllı olmayan (non-smart) olarak da bilinen koruyucu entegre devreler, harici bir mikrodenetleyiciye ihtiyaç duymadan, temel düzeyde izleme, koruma ve pasif dengeleme görevlerini yerine getirir. Bu sayede el aletleri, laboratuvar güç kaynakları, minimal medikal cihazlar ve küçük ölçekli enerji depolama sistemleri için ideal bir çözüm sunar [4, 5, 6, 7].

Bu bağlamda, bu makale, lityum-iyon piller için tasarlanmış, BQ7791501 non-smart entegresini temel alan, pasif dengeleme yeteneğine sahip, düşük maliyetli ve çok amaçlı bir batarya yönetim sisteminin tasarımı, üretim, simülasyon ve test süreçlerini detaylı bir şekilde sunmaktadır [8, 9].

Entegre; 3 ila 5 seri lityum iyon pil yapısını destekleyebilmektedir. Dahili MOSFET yapısı ile sağladığı pasif dengeleme işlevi ile birlikte yüksek/düşük voltaj koruması, yüksek/düşük akım koruması ve termal korumalar gibi çeşitli koruma özellikleriyle öne çıkmaktadır. Ayrıca uyku modu, hata tespit modu ve test modu gibi ekstra işlevlerinin yanı sıra daha fazla hücreye ihtiyaç duyulan durumlar için ekstra entegrelerin bağlanabilmesini sağlayan istiflenebilir (stackable) yapısı ile kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Tüm bunlarla birlikte bu entegrenin alternatif çip set yapılarına göre en belirgin dezavantajı haberleşme altyapısının bulunmaması ve şarj durumu, sağlık durumu gibi gerekli değer ölçümlerinin harici olarak yapılmasını zorunlu kılmasıdır [8, 9].

Çalışmanın temel amacı, karmaşık algoritmalar gerektirmeyen uygulamalar için güvenilir, üretilebilir ve ekonomik bir BYS çözümü ortaya koymaktır. Ayrıca, bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan akıllı ve AFE yapıdaki sistemlerin aksine, genellikle veri sayfası uygulaması olarak kalan non-smart yapıda bir entegre kullanarak bir BYS'nin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tür sistemler, gündelik hayatta veya laboratuvar ortamlarında sıkça kullanılan küçük ölçekli, şarjlı ve lityum-iyon hücreli cihazlar için oldukça uygun bir çözüm sunmaktadır.

2. Yöntem

Bu çalışmada, çok amaçlı bir batarya yönetim sisteminin (BYS) tasarımı, üretimi ve doğrulanması için sistematik adımlar izlenmiştir. Süreç, sistem mimarisinin belirlenmesi, bileşenlerin seçimi, baskı devre kartı (printed-circuit board, PCB) tasarımı, mekanik kılıfın üretimi, prototipin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ve son aşama olarak hem simülasyon hem de fiziksel testlerle doğrulanması adımlarını kapsamaktadır.

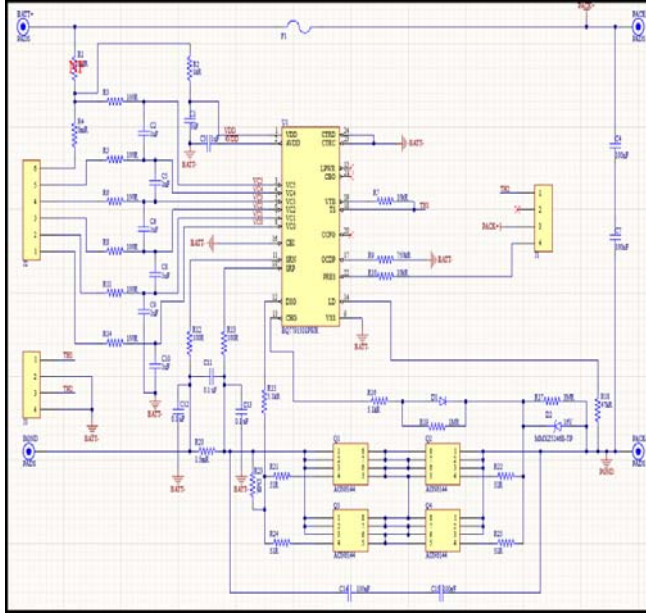
2.1. Sistem Mimarisi ve Bileşen Seçimi

Sistemin temel mimarisi, 3 ila 5 seri bağlı lityum-iyon (Li-ion) hücreden oluşan bir batarya paketini yönetmek üzere ve harici bir mikrodenetleyiciye ihtiyaç duymadan bağımsız bir koruma ve dengeleme devresi olarak kurgulanmıştır. Bu mimarinin özünü, düşük maliyeti, entegre koruma fonksiyonları ve dahili pasif dengeleme yetenekleri nedeniyle Texas Instruments BQ7791501 entegresi oluşturmaktadır [8, 9]. Sistem, 3.6V, 2800mAh değerlerine sahip Molicel INR18650 P28A Li-ion pillerle çalışacak şekilde tasarlanmıştır [10].

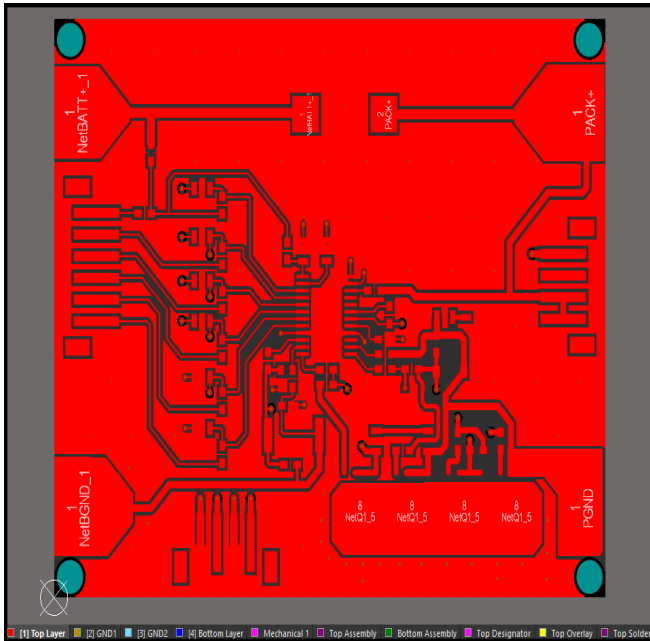
2.2. Devre ve Baskı Devre Kartı (PCB)

Devre şematığı ve PCB tasarımı için Altium Designer yazılımı kullanılmıştır. Tasarım, seçilen entegre için üreticinin sağlamış olduğu referans tasarım ve uygulama notlarına sadık kalınarak gerçekleştirilmiştir [8, 9].

Tasarımda sinyal bütünlüğünün korunması ve elektromanyetik girişimlerin en aza indirilmesi amacıyla PCB 53.35mm x 65.8 mm boyutlarında, dört katmanlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Sinyal hatlarını ayırmak ve gürültüyü azaltmak için, 1. katman için 2.katman ve 4.katman için 3.katman referans toprak katmanı olarak tasarlanmıştır. Isıyı düzgün bir şekilde dağıtmak için termal yol (thermal via) tekniği uygulanmış, gerekli yerlerde katı bakır bölgeler yerleştirilmiş ve güç iletim yolları uygun şekilde kalınlaştırılmıştır.



Şekil 1. BYS'nin Altium Designer şematiği



Şekil 2. BYS'nin Altium Designer üst katman (top layer) görüntüsü

2.3. Üç Boyutlu Koruyucu Kılıf Tasarımı ve Üretimi

BYS kartını çevresel ve mekanik etkilerden korumak amacıyla SolidWorks programında üç boyutlu bir kılıf tasarlanmıştır [11]. Kılıf BYS kartına uyumlu olacak şekilde modellenmiştir. Konnektör çıkışları, havalandırma açıkları ve montaj delikleri tasarımda kullanılmıştır. Maliyet etkinliği ve üretim kolaylığı açısından malzemede turkuaz renkli, dayanıklı ve yalıtkan özelliklere sahip bir filament tercih edilmiş ayrıca eriyik yığıma modelleme (fused deposition modeling, FDM) teknolojisine sahip bir 3D (üç boyutlu) yazıcı kullanılarak üretilmiştir.

2.4. Prototip Üretimi ve Test Prosedürü

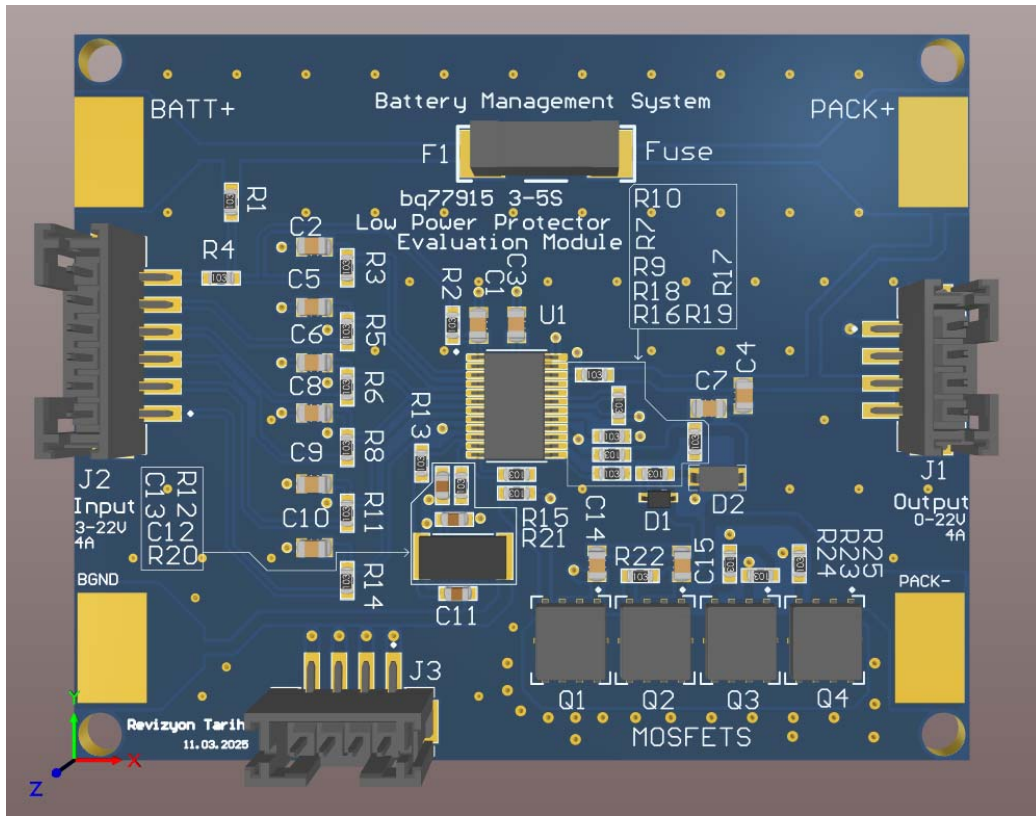
Yüzey montaj bileşenleri, sıcak hava tabancası ve lehim pastası kullanılarak, gerekli yerlerde izolasyon bandı ile hassas bölgeler korunarak ve yüksek özen gösterilerek üretilen PCB üzerine lehimlenmiştir. Ekonomik nedenlerle, sistemin, entegrenin izin verdiği minimum hücre sayısı ile test edilmesine karar verilmiş; bu nedenle üç adet lityum-iyon pil seri bağlanarak prototipin işlevselliğini doğrulamak amacıyla bir test düzeneği kurulmuştur [8, 9]. Her bir hücrenin ve seri bağlı paketin toplam voltajı multimetre ile ölçüldükten sonra batarya paketi BYS'ye bağlanmış ve sistemin çıkışındaki gerilim doğrulanmıştır. Daha sonrasında pasif dengeleme fonksiyonunu test etmek amacıyla sisteme bir yük bağlanmış ve belirli bir süre çalıştırdıktan sonra her bir hücrenin voltajı tekrardan ölçülerek dengeleme işlevi kontrol edilmiştir ve şarj değerleri (SoC) incelenmiştir.

2.5. Test Cihazı Tasarımı

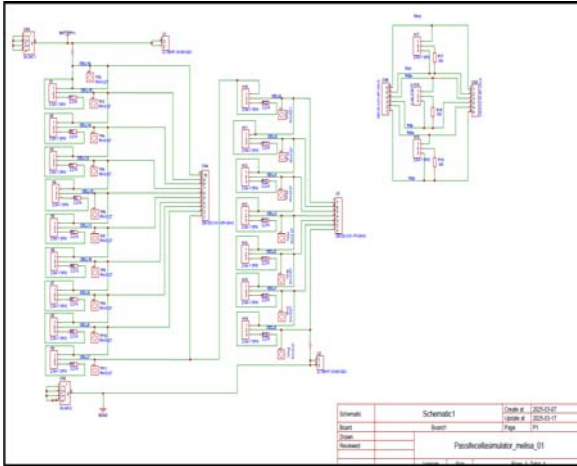
BYS sisteminin çeşitli senaryolarda davranışlarını gözlemlemek üzere bir BYS test cihazı tasarlanmıştır. Bu tasarımda EasyEDA platformu kullanılmıştır. Test cihazı 16 adet seri bağlı hücre ve 3 adet termistör devresiyle sistemin giriş ve çıkışları kontrol edilebilmektedir. Bu, test cihazının gerekli durumlarda hücre görevini üstlenmesi anlamına gelmektedir. Test cihazı, prototip düzeneğinde pillerin zarar görmesi durumunda önlem alabilmek amacıyla tasarlanmıştır [12]. BYS'nin fiziksel olarak gerçekleştirilmesinin ardından herhangi bir sorunla karşılaşmadığı için tasarım baskı devre kartı olarak üretilmemiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

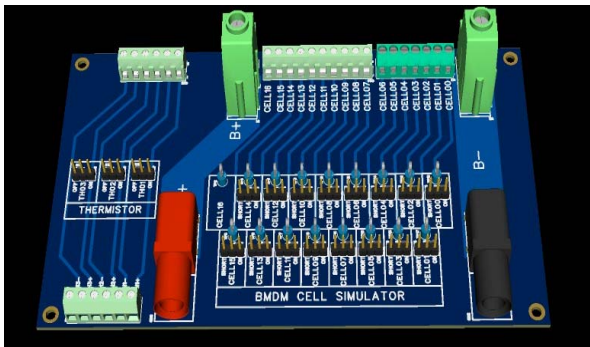
Geliştirilen Batarya Yönetim Sistemi (BYS) prototipinin işlevselliğini ve performansını doğrulamak için bir dizi fiziksel test ve bilgisayar simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistemin tasarım hedeflerini başarıyla karşıladığı elde edilen bulgularla doğrulanmıştır. Seçilen metodolojinin doğruluğu ortaya konmuştur.



Şekil 3. BYS tasarımının üst perspektiften üç boyutlu görüntüsü



Şekil 4. Test cihazının şematik tasarımı



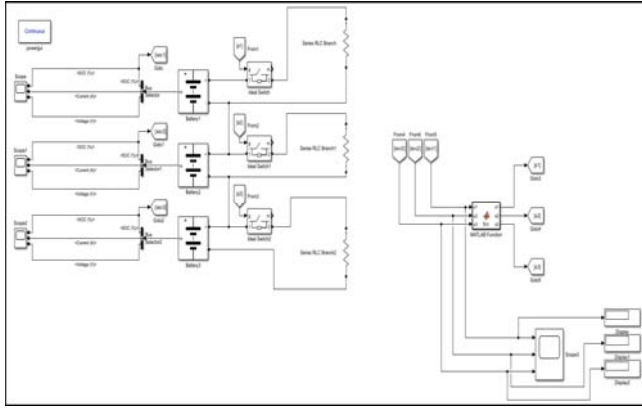
Şekil 5. Test cihazı üç boyutlu görüntüsü

3.1. Fiziksel Test Bulguları

Fiziksel testlerle prototipin 3 seri bağlı lityum-iyon pil ile sorunsuz bir şekilde çalıştığı doğrulanmıştır. Sistemin nominal gerilimi Pack+ ve Pack- çıkışlarından doğru bir şekilde ölçülmüştür. Bu temel test, devrenin anahtarlama elemanlarının ve bağlantıların doğru çalıştığını göstermiştir. Sisteme bir yük bağlanarak yapılan test sonucunda, başlangıçta farklı gerilimlere sahip hücrelerin voltajlarının başarılı bir şekilde birbirine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

3.2. Simülasyon Sonuçları ve Doğrulama

Fiziksel testlerin ardından pasif dengeleme sürecinin dinamiklerini analiz etmek amacıyla MATLAB/SIMULINK ortamında bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Başlangıç şarj durumları (SoC) %100, %50 ve %30 olarak ayarlanan üç hücrenin, simülasyon sonucunda SoC değerlerinin yaklaşık %29 seviyesinde dengelendiği görülmüştür [13]. Son SoC değerinin en düşük başlangıç değeri olan %30'un biraz altında olması, pasif dengeleme sürecinde enerjinin bir kısmının dirençler üzerinden ısı olarak kaybedilmesi ve simülasyonun yük üzerinde, dengeleme sonrası da çalışmaya devam etmesi nedeniyle beklenen bir durumdur.



Şekil 6. Simülasyonun SIMULINK modeli



Şekil 7. SIMULINK simülasyon çıktıları

3.3. Genel Tartışma ve Proje Katkısı

Bu çalışmanın temel hedefi olan düşük maliyetli, güvenilir ve işlevsel bir BYS geliştirme amacına ulaşıldığı elde edilen bulgularla ortaya konmaktadır. Projenin maliyet etkinliği en önemli çıktılarından biridir. Yaklaşık 65 USD maliyetle üretilen prototip, piyasada bulunan benzer özelliklere sahip ticari sistemlere kıyasla oldukça rekabetçi bir alternatif sunmaktadır [9].

Tablo 1. Maliyet tablosu

Tanım	Malzeme Adedi	Toplam Tutar (TL)
BYS, Pil ve Çevre Birimler	64 Adet	4004 TL
Test Cihazı	63 Adet	2027 TL
Toplam	127 Adet	6031 TL

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, lityum-iyon bataryalar için Texas Instruments BQ7791501 entegresini temel alan, pasif dengeleme yapan, çok amaçlı ve muadillerine göre düşük maliyetli bir BYS başarıyla tasarlanmış, üretilmiş ve doğrulanmıştır.

Çalışmanın en önemli çıktısı, harici bir mikrodenetleyiciye ihtiyaç duymaksızın hedeflenen temel görevleri başarıyla

yerine getiren, güvenilir ve piyasadaki muadillerine kıyasla oldukça ekonomik bir mühendislik çözümü sunmasıdır.

Sistem, entegre 3 ila 5 seri lityum-iyon hücre yapısını destekleyebildiği ve üretim sürecindeki ekonomik sebepler nedeniyle minimum hücre sayısı olan 3 hücre ile test edilmiştir. Ancak ihtiyaç duyulması halinde, entegrenin istiflenebilir yapısı sayesinde entegre sayısı artırılarak, buna orantılı olarak desteklenebilecek hücre sayısı da artırılabilir.

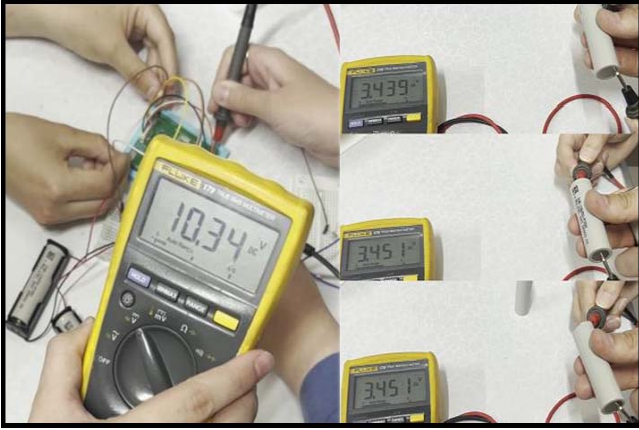
Sistem test edilirken öncelikle sistemin genel işlevselliği doğrulanmıştır. Ardından, bir yük bağlanarak deşarj işlevi, minimal bir şarj cihazı sisteme bağlanarak ise güvenli şarj işlevi test edilmiştir. Bu işlemlerin ardından, hücrelerin şarj değerleri (SoC) harici bir multimetre yardımıyla ölçülmüş ve bu sayede pasif dengeleme işlevinin doğruluğu test edilmiştir. Bu duruma ilişkin görsel şekil 8’de incelenebilir.

Geliştirilen sistem, şarjlı el aletleri, gündelik robotik cihazlar, minimal medikal aygıtlar ve temel laboratuvar uygulamaları için pratik ve üretilebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

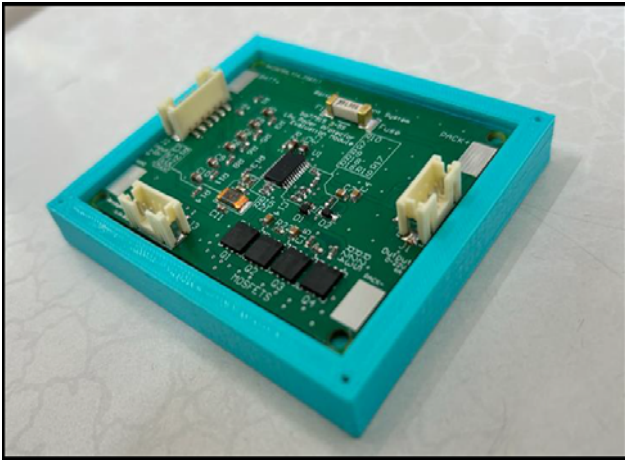
Bu proje, literatürde oldukça yaygın olan, akıllı çip seti (smart) veya analog front-end (AFE) çip seti yapısı kullanan sistemlerin aksine, genelde sadece veri sayfası düzeyinde kalan, ancak daha düşük maliyetli ve işlevsel olarak bazı temel eksikleri bulunan non-smart tipte bir çip seti kullanan bir BYS tasarımı ele almıştır. Bu sayede, literatürdeki non-smart çip seti kullanan BYS sistemler için bulunan bilgi boşluğunu doldurmak ve aynı zamanda aktif şekilde sorunsuz çalışabilen, ekonomik, minimal ve çok amaçlı bir sistem tasarımı gerçekleştirilmek hedeflenmiştir.

Gelecek çalışmalar için non-smart entegre kullanan çok amaçlı bir BYS tasarımına yönelik üretim yol haritası hazırlanmış ve bu tür sistemlere dair kolayca erişilebilecek toplu bir bilgi kaynağı oluşturulmuştur. Kullanılan çip seti; diğer non-smart çiplere kıyasla; dahili koruma fonksiyonları, dahili MOSFET’lerle gerçekleştirilen pasif dengeleme özelliği, farklı entegre modları, istiflenebilir yapısı, ekonomik oluşu ve yapısı gereği farklı uygulamalarda kullanılabilme potansiyeli gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Ayrıca, kullanılan çip setinin non-smart çip setleri arasındaki bu üstünlüğü sayesinde; koruma, dengeleme ve çok amaçlılık açısından akıllı ve AFE çip seti kullanan alternatif sistemlere benzer bir performans düzeyine ulaştığı bu çalışmada vurgulanmıştır.

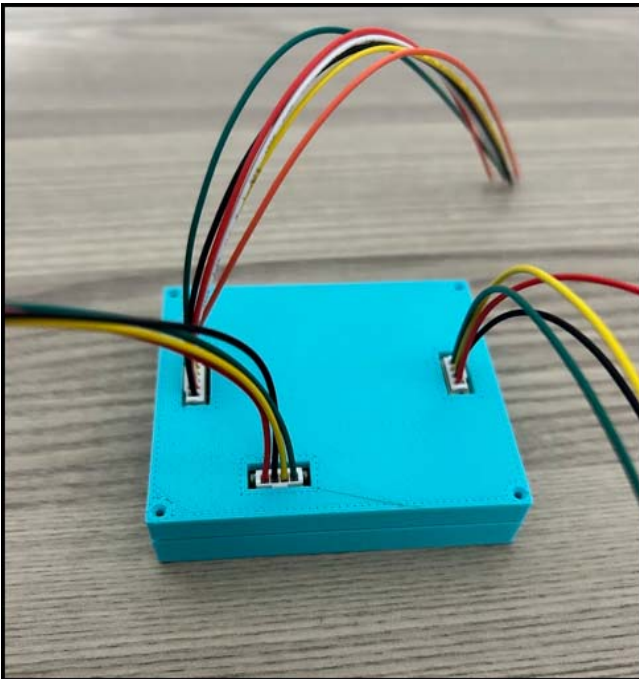
Eğer ileride tasarımın ekonomik üstünlüğü korunarak geliştirilmek istenirse veya farklı fonksiyonları da gerçekleştirmesi hedeflenirse; termal yönetimi iyileştirmek amacıyla bir ısıtma/soğutma sistemi ayrıca bir mikrodenetleyici ve CAN/I2C gibi bir haberleşme protokolü entegre edilerek, aktif dengeleme işlevi, şarj durumu (SoC) tahmini ve veri kaydı gibi gelişmiş özellikler sunan "akıllı" bir BYS’ye dönüştürülmesi önerilmektedir.



Şekil 8. Pasif dengeleme sonrası ölçümlerin incelenmesi



Şekil 9. BYS'nin tüm üretim aşamalarının sonunda gerçekleştirilmiş halinin görüntüleri



Şekil 10. BYS'nin tüm üretim aşamalarının sonunda gerçekleştirilmiş halinin görüntüleri

Destek veya Teşekkür

Proje boyunca katkıları için sayın Doç. Dr. İbrahim Ethem Saçu 'ya teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Bu makalenin yazarları, Hayriye Melisa Kuzuluk, Şüheda Berra Nur Uzun, Deniz Turan, Mustafa Berber ve İbrahim Ethem SAÇU bu çalışmanın araştırılması, yazılması ve/veya yayımlanması ile ilgili olarak herhangi bir potansiyel çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 3

Yapay Zeka Kullanım oranı: % 0

Araştırmacıların Katkı Oranı

Hayriye Melisa Kuzuluk % 20
 Şüheda Berra Nur Uzun % 20
 Deniz Turan % 20
 Mustafa Berber % 20
 İbrahim Ethem SAÇU % 20

Kaynaklar

- [1] Battery university. (2003). *Learn about batteries*. <https://batteryuniversity.com/articles>
- [2] Andrea, D. (2010). *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Norwood, MA: Artech House.
- [3] Soydaş, Ş. (2015). *Lityum tabanlı batarya paketleri için batarya yönetim sistemi tasarımı* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [4] Özcan, M. A. (2023). *Design of a battery management system for electric forklift* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Okan Üniversitesi.
- [5] Takoma Battery. (2022). *Analysis of the types and needs of BMIC*. https://www.takomabattery.com/types-and-needs-of-bmic/?utm_source=chatgpt.com
- [6] RayPCB. (2025). *What BMS chipset do I need during battery management system design*. https://www.raypcb.com/bms-chipset/?utm_source=chatgpt.com
- [7] Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H., & Sauer, D. U. (2018). Battery management system hardware concepts: An overview. *Applied Sciences*, 8(4), 534. <https://doi.org/10.3390/app8040534>
<https://search.ebscohost.com+13us.artechhouse.com+13books.google.com+13scipedia.com+4mdpi.com+4mdpi.com+4>
- [8] Texas Instruments. (2018). *BQ77915*. <https://www.ti.com/product/BQ77915>

- [9] Texas Instruments. (2018). *BQ77915EVM-014*. <https://www.ti.com/tool/BQ77915EVM-014>
- [10] Battery Store. (2025). *Molicel P28A 18650 2800 mAh 35 A battery*. https://www.18650batterystore.com/products/molicel-p28a?srltid=AfmBOopjFw4V7_vQ97A7iWnkEaEhqDoEKFIPUTvSKN5vdtvIJ3JWUaNx
- [11] Bıçakçı, A. N. (2019). *Solidworks & Solidcam*. İstanbul: Kodlab Yayıncılık.
- [12] OSHWLAB. (2025). *Passive Cell Simulator V1*. https://oshwlab.com/eetengineer/passivecellsimulator_01
- [13] Cselectrical and electronics. (2020). *Passive cell balancing simulation in MATLAB Simulink*. https://cselectricalandelectronics.com/passive-cell-balancing-simulation-in-matlab-simulink/#google_vignette