



ENERJİ SİSTEMLERİ, MAKİNE DİNAMİĞİ, SAYISAL ANALİZ VE AKILLI MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI



Editör
HASAN KÖTEN



BİDGE Yayınları

**Enerji Sistemleri, Makine Dinamiği, Sayısal Analiz ve Akıllı
Mühendislik Uygulamaları**

Editör: HASAN KÖTEN

ISBN: 978-625-8567-90-8

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



Enerji Sistemleri, Makine Dinamiği, Sayısal Analiz ve Akıllı Mühendislik Uygulamaları

Önsöz

Makine mühendisliği ve enerji sistemleri alanı, günümüzde dijitalleşme, sürdürülebilirlik, akıllı sistemler ve yüksek performans gereksinimleri doğrultusunda hızlı bir dönüşüm yaşamaktadır. Özellikle makine dinamiği, titreşim, kontrol sistemleri, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji teknolojileri ve sayısal analiz yöntemleri; hem akademik araştırmaların hem de endüstriyel uygulamaların merkezinde yer almaktadır. Bu gelişmeler, disiplinler arası yaklaşımlarla ele alınan güncel ve nitelikli bilimsel çalışmaların önemini daha da artırmaktadır. Bu kitap, döner makinelerden enerji sistemlerine, kontrol ve otomasyon uygulamalarından hesaplamalı akışkanlar dinamiğine (CFD), deneysel ve sayısal analiz yöntemlerinden elektrikli ve hibrit araç teknolojilerine kadar geniş bir konu yelpazesini kapsayan özgün çalışmaları bir araya getirmektedir. Kitapta yer alan bölümler; teorik altyapıyı, deneysel yaklaşımları ve mühendislik uygulamalarını bütüncül bir bakış açısıyla ele alarak, okuyucuya hem temel hem de ileri düzey bilgi sunmayı amaçlamaktadır. Eserde; rulman rijitliğinin sistem doğal frekansları üzerindeki etkilerinin incelenmesinden, Python tabanlı grafik arayüzlerle kontrol eğitimi uygulamalarına; katı oksit yakıt pilleri, termoelektrik malzemeler ve güneş enerjisi destekli sistemlerin termodinamik analizlerinden, elektrikli araçlarda enerji tüketimini etkileyen parametrelerin duyarlılık analizine kadar pek çok güncel konu detaylı biçimde ele alınmaktadır. Ayrıca, makine dinamiğinde zaman tanım bölgesi çözümleri, erken uyarıcı bakım yöntemleri, biyomekanikte sonlu elemanlar analizi, yüksek hızlı asansör sistemleri ve yeni nesil sensör teknolojileri gibi alanlara yönelik çalışmalar da kitaba önemli katkılar sunmaktadır. Bu kitabın; lisans ve lisansüstü öğrenciler, akademisyenler, Ar-Ge mühendisleri ve enerji, otomotiv, savunma ve imalat sektörlerinde çalışan profesyoneller için değerli bir başvuru kaynağı olacağı düşünülmektedir. Bölüm yazarlarının güncel literatür, mühendislik problemleri ve uygulama odaklı yaklaşımları bir araya getiren katkıları sayesinde, bu eserin hem eğitim hem de araştırma faaliyetlerine önemli katkılar sunması hedeflenmektedir. Bu vesileyle, kitabın hazırlanmasında bilimsel birikimlerini paylaşan tüm yazarlarımıza, değerlendirme sürecinde katkı sağlayan hakemlere ve yayıma hazırlık aşamasında emeği geçen herkese teşekkür ederiz. Bu eserin, mühendislik bilimleri alanında yapılacak gelecekteki çalışmalara ışık tutmasını ve literatüre kalıcı bir katkı sağlamasını temenni ederiz.

Prof. Dr. Hasan KÖTEN
Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

INVESTIGATION OF BEARING STIFFNESS EFFECTS ON THE NATURAL FREQUENCIES OF A SHAFT-DISK USING RECEPTANCES	1
---	---

ADEM SERDAR ARIKAN, MURAT ŞEN, ORHAN ÇAKAR

PYTHON TABANLI GUI İLE OTOMATİK KONTROL EĞİTİM ARAYÜZÜ: DC MOTOR-DİŞLİ- YÜK SİSTEMİNİN KONUM KONTROLÜ ÖRNEK ÇALIŞMASI	14
---	----

ELİF ERZAN TOPÇU

KALSİYUM OKSİT KATKILI MALZEMELERİN KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ SİSTEMLERİNDEKİ ROLÜ	33
---	----

GÜLŞAH GERMEN TUTAŞ, ESRA KILAVUZ

SOLAR II MERKEZİ ALICILI GÜNEŞ KULE SANTRALİNDE RANKİNE ÇEVİRİMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ	43
--	----

HASAN OKTAY, MEHMET ZERRAKKI IŞIK

TERMOELEKTRİK MALZEMELERİN TERMOELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ALTERNATİF YÖNTEMLER İLE ÖLÇÜLMESİ	61
--	----

SİNAN ÇOBANER, MUHAMMED ASIM KESERCİOĞLU

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTUCUDA HAVUÇ KURUTMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ	82
---	----

ELİF TURNA, BENGİ ŞANLI

ÇİFT KADEMELİ GÜNEŞ ENERJİLİ ABSORPSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMİNİN BANDIRMA İKLİM KOŞULLARINDA PERFORMANS ANALİZİ	102
--	-----

RAMAZAN YILMAZ, ERHAN KIRTEPE

DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİNE GİRİŞ VE ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN ÇEKME NUMUNE DAYANIMINLARININ DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ	121
--	-----

SELMAN TEZCAN

YÜKSEK HIZLI ASANSÖRLER İÇİN YENİ NESİL KAYMALI FREN TASARIMI VE İMALATI	142
---	-----

NİZAMETTİN YILMAZ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN DUYARLILIK ANALİZİ	180
---	-----

TEVFİK ATAMAN, MEHMET KARAYEL

Hipotetik Bakir Pervane Tasarımı İçin Racing Drone Aerodinamik Analizi: K- ϵ Realizable Scalable Wall Functions Modeli Kullanılarak Cfd Simülasyonları	194
---	-----

MEHMET AKİF KARTAL

BİYOMEKANİKTE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ UYGULAMALARI	205
---	-----

FATİH ALİBEYOĞLU, ARİF BALCI

Bakir Pervaneli İnsansız Hava Aracının Sst K- ω Türbülans Modelinde Cfd Analizi: Hipotetik Bir Uygulama	237
---	-----

MEHMET AKİF KARTAL

ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNİN TASARIM SINIFLANDIRILMASI VE NÜKLEER GÜVENLİK ANALİZİ	248
---	-----

MAHMUT CÜNEYT KAHRAMAN

DÖNER MAKİNALARDA ERKEN UYARICI BAKIM (EUB) YÖNTEMİYLE ARIZA TESPİTİ: RULMAN HASARLARININ TEŞHİSİ	279
---	-----

RECEP KILIÇ, RECEP KOZAN

Hibrit Dişlilerde Kompozit Katman Elastisite Modülünün Dişli Gerilme ve Rijitliğine Etkisi	329
---	-----

TUFAN GÜRKAN YILMAZ

PLASTİK PARÇALARDA ÇARPILMA VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR	342
--	-----

ONURALP ULUER, GÖZDENUR COŞTAN

MAKİNE DİNAMİĞİNDE LAGRANGE KARARLILIĞI VE NEWMARK YÖNTEMİ İLE ZAMAN TANIM BÖLGESİNDE MATEMATİKSEL ÇÖZÜM	364
--	-----

ALİ İHSAN ENGÜR

MAKİNE DİNAMİĞİNDE SABİT MONİTÖRLÜ VE MODÜLER SİSTEMLİ TREND TAKİBİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	373
--	-----

ALİ İHSAN ENGÜR

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLARDA KULLANILAN SENSÖRLERİN ÜRETİMİ VE KULLANIMI	382
---	-----

NEVFEL YUNUS COŞKUN, MERVE EREN YAKIŞIKLIER

ENDÜSTRİYEL ROBOT AKTÜATÖR TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	421
--	-----

EBUBEKİR YAŞAR

BÖLÜM 1

INVESTIGATION OF BEARING STIFFNESS EFFECTS ON THE NATURAL FREQUENCIES OF A SHAFT-DISK USING RECEPTANCES

Adem Serdar ARIKAN¹

Murat ŞEN²

Orhan ÇAKAR³

Introduction

Rotors as rotating machines are widely used in industry such as automotive, marine, energy, aerospace engineering. Basically, a rotor consists of freely rotating shaft-disk on the bearings. The rotors are supported with ball, roller or journal bearings. The heavy rotors like power plant shafts are mostly supported by journal bearings. Unbalanced forces can cause excessive vibration leading to wear on the bearings and damage to the rotor. This occurs when the rotor rotates at its critical speed. In

¹ Y. Müh. Fırat Üniversitesi, Orcid: 0000-0003-4903-698X

² Dr.Öğr.Üyesi, Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-3063-5635

³ Prof.Dr., Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6947-3875

****This study was supported by Scientific Research Projects Unit of Fırat University (FUBAP) under the Grant Number FÜBAP MF 21.02.**

this respect, it is extremely important to perform dynamic analysis of rotors and to determine their critical speeds. In order to determine the dynamic properties of the rotors, the numerical methods such as Finite Element (FE) analysis and the Experimental Modal Analysis are commonly used. It should be noted that the dynamic properties of the rotor affected by the rotation speed of the rotor. This effect can be visualised by Campbell diagram that is the plot of the natural frequencies of the rotor versus rotating speeds. On the other hand, the bearing properties affect the dynamic behaviour of the rotors. In the literature, there are some books (Friswell et al., 2010) and a lot of works about dynamic analysis of rotors (Ku, 1998; Vázquez et al., 2001; MacHado et al., 2005; Sinou et al., 2005; Dikmen et al., 2010; Hu et al., 2011; Taplak & Parlak, 2012; Chouksey et al., 2012; Jalali et al., 2014; Fan et al., 2018; Kang, 2022; Pasi et al., 2024). In the review paper by (Pasi et al., 2024) analysis of the rotors using discrete models, finite element (FE) models, experimental modal testing, measured vibration response and related fault diagnosis techniques were comprehensively discussed. Finite Element Method (FEM) as a computational method is a very effective tool and widely used for determining natural frequencies and mode shapes of rotors. Dynamic properties of the rotors are strongly depended on the bearing properties. Therefore, using accurate bearing model in the analysis indispensable. Traditionally ball and journal bearings are modelled by spring and damping elements. (Guo & Parker, 2012) developed a finite element/contact mechanics model for rolling element bearings stiffness. A comprehensive review paper on ball bearing models was presented by (Cao et al., 2018). The journal bearing model depends on clearance, oil viscosity, and spin speed of the rotor. Usually, while the bearings are considered as a point support, (Sudhakara Rao et al., 1996) presented a distributed bearing stiffness and damping. (Vázquez et al., 2001) presented an experimental study on the unbalance response and stability

analyses of a flexible rotor on three lobe journal bearings on flexible supports. The effect of support stiffness on the dynamic properties of a flexible rotor was studied both FE analysis and experimental modal analysis by (Dikmen et al., 2010). The analyses were performed for different support model as well as different support stiffnesses. (Liu & Tang, 2021) analysed the critical speeds of flexible rotors considering the combined effects of the bearing support stiffness and position. An analytical method based on the FEM was proposed and the method was verified using a commercial FE software.

Above studies show that the bearings stiffness and position effect the dynamic properties of rotors. The method proposed for investigation of the bearings effects require remodelling and further analysis. Furthermore, in the experimental case a special support design is necessary where the supports stiffness and positions can be changed. In this study, a structural modification technique is proposed which uses the receptances of the original system to investigate bearings effect on the dynamic properties of the rotors. The receptances of the system can be obtained from FE solutions or can be measured experimentally. In the next section, the theory of method proposed is explained. Then the natural frequencies and mode shapes of a free-free shaft-disk system are obtained by using FEM and EMA, and the results are compared. In order to show the effect of bearings, the method proposed is applied.

Structural Modification Technique

Structural modification is a very effective tool for examining how modifications made to a structure change its dynamic properties. The method proposed in this study, is based on Sherman-Morrison-Woodbury (SMW) formula (Akgn et al., 2001; CAKAR, 2015; Cakar & Sanliturk, 2005; Sanliturk, 2002) given as:

$$[\alpha^*]_a = [\alpha]_a - [\alpha]_a[U]([I] + [V]^T[\alpha]_a[U])^{-1}[V]^T[\alpha]_a \quad (1)$$

where $[\alpha^*]$ and $[\alpha]$ are the receptance matrices of modified and original system, respectively; $[I]$ is identity matrix and; $[U]$ and $[V]$ represent the modifications. Subscript a , indicates active coordinates i.e. excitation, response and modification coordinates.

Modal Analysis of Shaft-Disk System

In this study, a simple shaft-disk system on two bearings shown in Figure (1) is considered. The disk is located at the midpoint of shaft. The bearings modelled as springs are located at two ends of the shaft. Damping effect is not considered and the stiffness affect towards only vertical direction. Physical and mechanical properties of the shaft and disk are given in Table 1.

Figure 1 Shaft-disk system on two bearings

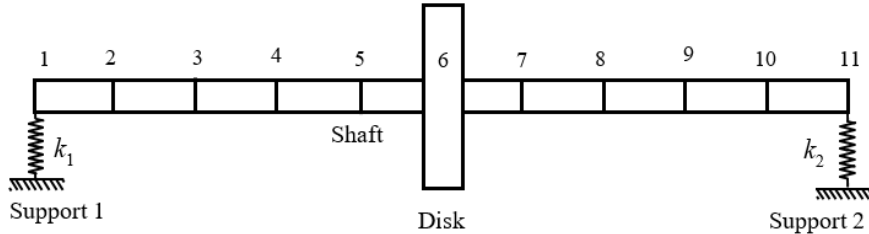


Table 1 Mechanical properties of shaft-disk system

Parameter	Value
Shaft diameter (mm)	25
Shaft length (mm)	830
Shaft density (kg/m ³)	7850
Shaft Elasticity Modulus (GPa)	205
Disk diameter (mm)	100
Disk width (mm)	25
Disk density (kg/m ³)	7850
Disk Elasticity Modulus (GPa)	205

Firstly, the system has been modelled by FEM using Euler-Bernoulli beam theory. For the brevity, the mass and stiffness matrices are not given here. The model consists of ten elements and eleven nodes. Eigenvalue problem for free-free boundary condition was solved by using MATLAB and natural frequencies was obtained. The rotor under investigation was also modelled by ANSYS Workbench with 2408 elements and 9274 nodes, the natural frequencies and mode shapes were obtained. In addition, an experimental system shown in Figure 2 was manufactured and the modal test was performed. The rotor suspended from two ends with strings to satisfy free-free boundary condition. The rotor was excited by Kistler 9742A200 at eleven points which match with FE model, sequentially and the responses were measured Dytran 3097A2 accelerometer. Data was acquired and frequency response functions (FRFs) were calculated for frequency band 0-1000 Hz via Oros OR36 FFT analyser. Some measured FRFs are seen in Figure 3. Measured FRFs were analysed by using Oros Modal software and the natural frequencies and mode shapes calculated. Figure 4 shows the first three bending mode shapes, excluding rigid modes obtained by ANSYS and EMA. Note that only the bending modes in one direction are given.

Figure 2 Experimental Shaft-disk system.

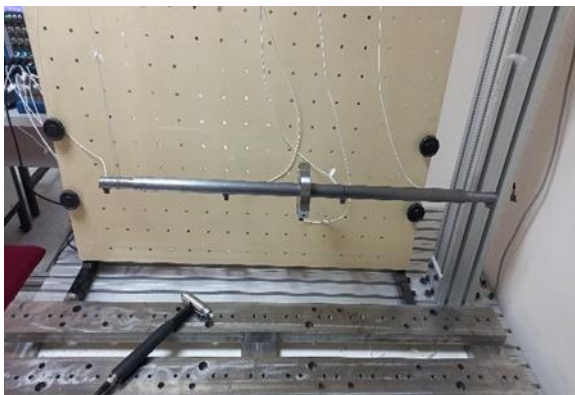


Figure 3 Experimentally measured FRFs of Shaft-disk system.

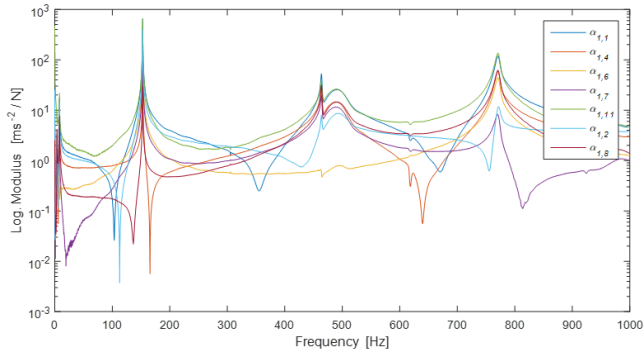
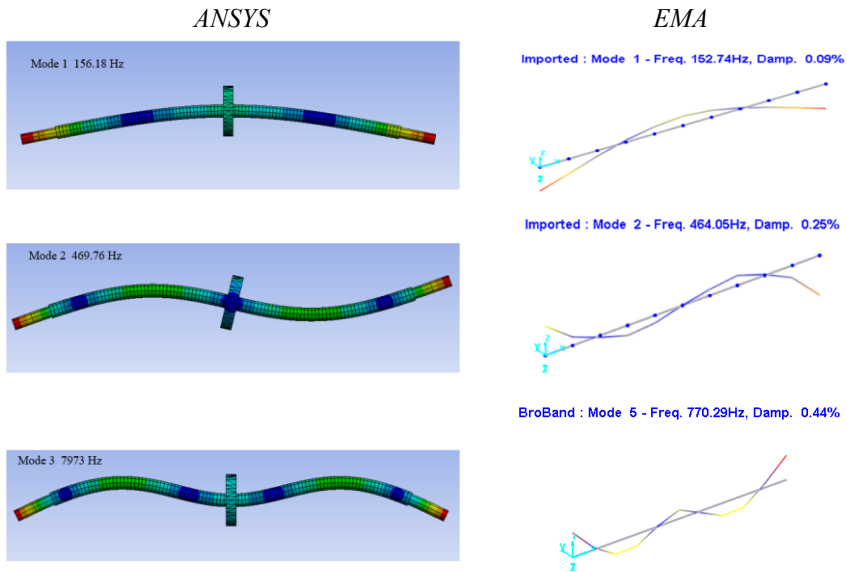


Figure 4 First three bending mode shapes of shaft-disk system.



For free-free boundary condition, the natural frequencies obtained using three methods are compared in Table 2. The relative errors according to the experimental results are also given in the table. It is seen that ANSYS and experimental results are in very good agreement. Matlab solution is a bit far due to chosen element type, number of elements and nodes.

Table 2 Comparison of free-free rotor's natural frequencies obtained using three methods.

Mod	MATLAB	ANSYS	Experimental
1	139.58 %8.6	156.18 %2.25	152.74
2	445.43 %4.2	469.76 %1.23	464.05
3	751.62 %2.4	797.30 %3.5	770.29
4	1359.20	1371.1	-
5	1945.30	1928.2	-

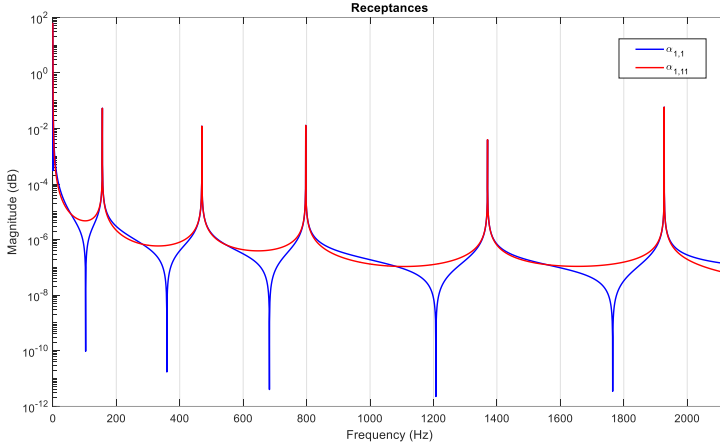
Effect of Bearing Stiffness on the Natural Frequencies

In this section, the effect of bearing stiffness on the natural frequencies of the shaft-disk system is investigated. For this, firstly the FRFs of the free-free rotor are calculated ignoring damping in frequency band 0-2100 Hz with 0.01 Hz interval by using mode summation formula given as follows:

$$\alpha_{pq} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{pr}\phi_{qr}}{\omega_r^2 - \omega^2} \quad (2)$$

where p and q are response and excitation nodes, r is mode number, N is maximum number of modes, ω_r is natural frequency for mode r and ω is excitation frequency. ϕ_{pr} and ϕ_{qr} are elements of mode shapes for mode r . α_{pq} is receptance between nodes p and q . The necessary natural frequencies and corresponding mode shapes in the equation exported from ANSYS solution to MATLAB. Figure 5 shows two FRFs of free-free rotor.

Figure 5 Calculated receptances of the free-free shaft-disk system.

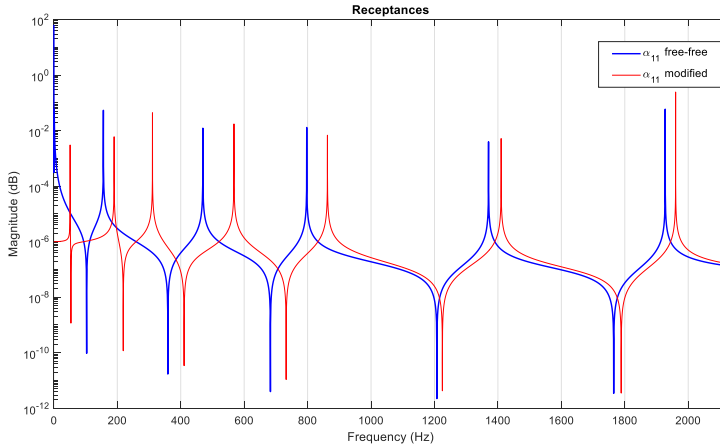


It is considered that the rotor bearings are located at nodes 1 and 11 corresponding to two ends of rotor as shown in Figure 1. Therefore, the stiffness modification will be made at these nodes. For different bearing stiffness values, the natural frequencies were computed by using ANSYS Workbench, first. Then, the stiffness modifications were made by using the method proposed in this study given in Equation 1. The natural frequencies of the modified rotor were determined by picking the picks on the FRF plots. Figure 6 compares point FRFs of the free-free rotor and that of the rotor modified by 1E6 N/m stiffness value at the nodes 1 and 11. Adding stiffness increases the natural frequencies as seen in the figure.

Table 3 compares the first six natural frequencies obtained both ANSYS (F) and structural modification method (M) proposed in this study for various stiffness values. It is seen in the figure and the table that the natural frequencies are tends to increase with increasing bearing stiffness as expected. Moreover, the natural frequencies obtained by using both method are almost the same. It

should be point out that the proposed method can determine easily without solving a FE model which is an important advantage of the structural modification technique based on use of FRFs.

Figure 6 Comparision of FRFs of the free-free rotor and the modified rotor by 1E6 N/m stiffness at nodes 1 and 11.



Tablo 3 Natural frequencies for different bearing stiffness values

			Bearing stiffness $k_1 = k_{11}$ (N/m)					
Mode		Free	1E4	2E4	5E4	1E5	1E6	5E6
1	F	0	11.04	15.36	23.17	30.51	51.19	55.52
	M	0	11.05	15.37	23.18	30.53	51.28	55.63
2	F	0	23.59	33.27	52.21	72.93	188.28	253.72
	M	0	23.6	33.28	52.25	73.03	190.0	257.3
3	F	156.18	158.68	161.16	168.42	179.96	309.16	457.32
	M	156.2	158.7	161.2	168.4	180.0	310.9	463.9
4	F	469.76	470.73	471.7	474.61	479.48	565.06	791.01
	M	469.8	470.7	471.7	474.6	479.5	567.9	819.8
5	F	797.3	797.92	798.55	800.42	803.56	861.45	1079.8
	M	797.2	797.9	798.5	800.4	803.5	862.5	1101
6	F	1370.7	1371.1	1371.5	1372.6	1374.5	1409.0	1565.4
	M	1370.0	1371.0	1371.0	1372.0	1374.0	1410.0	1613

Conclusion

The bearing stiffness effect on the natural frequencies of the rotors is investigated in this study by using FE and structural modification methods. It was shown that the natural frequencies of the rotor increase with increasing bearing stiffness. In order to determine the dynamic behaviour of structures FE method are extensively used. As in this study, when a structural modification is needed on the structure under investigation, re-analysing of the system by using FEM can be time consuming. In this study, a method based on using FRFs to determine dynamic properties of the modified system is proposed. It was shown that the natural frequencies of the modified system using both methods are in the very agreement. The method proposed uses a few number of FRFs related only modification coordinates. On the other hand, the method can be used in the real word because FRFs can also be measured experimentally on the structure.

References

- Akgn, M. A., Garcelon, J. H., & Haftka, R. T. (2001). Fast exact linear and non-linear structural reanalysis and the Sherman-Morrison-Woodbury formulas. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50(7), 1587–1606. <https://doi.org/10.1002/NME.87>;ISSUE:ISSUE:DOI
- CAKAR, O. (2015). Calculation of Receptance of a Structure Modified by Mass and Grounded Spring. *Second International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE 2015*, 63–67. <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-045-3-84>
- Cakar, O., & Sanliturk, K. Y. (2005). Elimination of transducer mass loading effects from frequency response functions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(1), 87–104. [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00086-4](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00086-4)

- Cao, H., Niu, L., Xi, S., & Chen, X. (2018). Mechanical model development of rolling bearing-rotor systems: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 102, 37–58. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2017.09.023>
- Chouksey, M., Dutt, J. K., & Modak, S. V. (2012). Modal analysis of rotor-shaft system under the influence of rotor-shaft material damping and fluid film forces. *Mechanism and Machine Theory*, 48(1), 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.09.001>
- Dikmen, E., Van Der Hoogt, P., De Boer, A., Aarts, R., & Jonker, B. (2010). A flexible rotor on flexible supports: Modeling & experiments. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings*, 15, 51–56. <https://doi.org/10.1115/IMECE2009-10851>
- Fan, Y., Ding, H., Li, M., & Li, J. (2018). Modal analysis of a thick-disk rotor with interference fit using finite element method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5021245>
- Friswell, M. I., Penny, J. E. T., Garvey, S. D., & Lees, A. W. (2010). *Dynamics of Rotating Machines*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511780509>
- Guo, Y., & Parker, R. G. (2012). Stiffness matrix calculation of rolling element bearings using a finite element/contact mechanics model. *Mechanism and Machine Theory*, 51, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.12.006>
- Hu, Q., Deng, S., & Teng, H. (2011). A 5-DOF model for aeroengine spindle dual-rotor system analysis. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24(2), 224–234. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60027-7](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60027-7)
- Jalali, M. H., Ghayour, M., Ziaei-Rad, S., & Shahriari, B. (2014). Dynamic analysis of a high speed rotor-bearing system. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 53, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.010>

- Kang, Y. (2022). Analysis of backward whirling characteristics of a dual-rotor system caused by unbalance. *Measurement*, 203, 111982.
- Ku, D. M. (1998). Finite element analysis of whirl speeds for rotor-bearing systems with internal damping. *Mech. Syst. Signal Process.*, 12(5), 599–610.
<https://doi.org/10.1006/mssp.1998.0159>
- Liu, J., & Tang, C. (2021). A Method for Predicting the Influences of Bearing Support Stiffness and Position on the Vibrations of a Flexible Rotor System. *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 26(4), 287–295.
<https://doi.org/10.20855/ijav.2021.26.41798>
- MacHado, L. H. J., Miranda, W. M., & De Faria, M. T. C. (2005). Dynamics of high-speed turbomachines using a finite element procedure based on a rotor supported by fluid film bearings. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2005-01-4016>
- Pasi, D. K., Tiwari, A., & Chouksey, M. (2024). Rotor Dynamics: Modelling and Analysis—A Review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* 2024 106:1, 106(1), 463–476. <https://doi.org/10.1007/S40032-024-01135-Y>
- Sanliturk, K. Y. (2002). An Efficient Method for Linear and Nonlinear Structural Modifications. *Proceedings of ESDA2002: 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis Proceedings of ESDA2002: 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis July 8-11, i*, 1–8.
- Sinou, J.-J., Villa, C., & Thouverez, F. (2005). Experimental and Numerical Investigations of a Flexible Rotor on Flexible Bearing Supports. *International Journal of Rotating Machinery*, 2005(3), 179–189.
<https://doi.org/10.1155/IJRM.2005.179>
- Sudhakara Rao, B., Sekhar, A. S., & Majumdar, B. C. (1996). Analysis of rotors considering distributed bearing stiffness and damping. *Computers & Structures*, 61(5), 951–955.

[https://doi.org/10.1016/0045-7949\(96\)00027-2](https://doi.org/10.1016/0045-7949(96)00027-2)

- Taplak, H., & Parlak, M. (2012). Evaluation of gas turbine rotor dynamic analysis using the finite element method. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 45(5), 1089–1097. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.032>
- Vázquez, J. A., Barrett, L. E., & Flack, R. D. (2001). A Flexible Rotor on Flexible Bearing Supports: Stability and Unbalance Response. *Journal of Vibration and Acoustics*, 123(2), 137–144. <https://doi.org/10.1115/1.1355244>
- Vázquez, J. A., Barrett, L. E., & Flack, R. D. (2001). Including the effects of flexible bearing supports in rotating machinery. *International Journal of Rotating Machinery*, 7(4), 223–236. <https://doi.org/10.1155/S1023621X01000203>

BÖLÜM 2

PYTHON TABANLI GUI İLE OTOMATİK KONTROL EĞİTİM ARAYÜZÜ: DC MOTOR- DİŞLİ- YÜK SİSTEMİNİN KONUM KONTROLÜ ÖRNEK ÇALIŞMASI

ELİF ERZAN TOPÇU¹

Giriş

Otomatik kontrol kavramı mühendislik sistemlerinin insan müdahalesi olmadan kullanıcı tarafından belirlenen, arzu edilen duruma getirilmesi için yapılan işlemlerin bütünü olarak tanımlanabilir. Hem endüstriyel uygulamalarda hem de günlük hayatımızda farkında olarak veya olmayarak pek çok alanda otomatik denetlenen sistemler kullanılmaktadır. Otomatik kontrol disiplinler arası bir konu olup tüm mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Isıl, mekanik, elektrik, akışkan gibi ayrışık veya hibrit yapılı mühendislik sistemlerinin kontrolünde günümüzde daha çok elektrik-elektronik kontrol birimlerine sahip yazılım ve donanım bileşenleri kullanılmaktadır. Kontrol uygulamalarında mikroişlemci, programlanabilir mantıksal denetleyici (PLC) ve bilgisayarlı denetim şeklinin gelişmesiyle kontrol edilebilirlik daha kolaylaşmış

¹ Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-6115-3110

ve uygulanabilir hale gelmiştir. Bu şekilde havacılık, savunma, tekstil, otomotiv, kimya, ziraat, sağlık, biyomekanik, robotik gibi çok farklı endüstriyel uygulama alanlarında kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu alanlardaki temel beklenti ise minimum hata ile hızlı ve kararlı çalışmanın sağlanmasıyla kaliteli ve ekonomik ürün üretiminin gerçekleştirilmesidir. Sürekli gelişmekte olan bu alanda da yetişmiş insan ve disiplinler arası çalışmalarda ortak dil geliştirilmesi ihtiyacı da gün geçtikçe artmaktadır. Dolayısıyla bu konu da lisans seviyesinde alınacak eğitim de önem arz etmektedir.

Günümüzde eğitimle ilgili tüm alanlarda verimi arttırmak, öğrenme sürecini iyileştirmek amacıyla bilgisayar destekli yazılımların yaygın olarak kullanıldığı ve yapay zeka destekli çalışmaların da gün geçtikçe bu sürece dahil edildiği görülmektedir (Arslan, 2020; Boztepe, 2025; Coşkun& Gülleroğlu, 2021; Temur, 2025). Konu özelinde makine mühendisliği eğitiminde de tasarım, yapısal analiz ve programlama konularındaki eğitim çalışmalarında AutoCAD, CATIA, MATLAB, SolidWorks, ANSYS, Python, C++ gibi programlar da yaygın olarak yaygın olarak kullanılan programlardan birkaç tanesidir (Makine Eğitimi; 2025). Hatta bu programların pek çoğu birbiriyle etkileşimli olarak da kullanım sağlamaktadır. Mühendislik eğitiminde de görsellik ve görselleştirmenin önem kazanmasıyla simülasyon, animasyon, sanal gerçeklik vb. çalışmalarla da daha farklı aşamalara geçmeye başlamıştır (Toroğlu& İçingür, 2007; Balak M.V. & Kısa, 2018; Emreli ark. 2019)

Makine mühendisliği alanında mühendislik sistemlerinin elektrik motoru tahrikli, PID denetleyicili yazılım ve donanımlarla konum ve hız kontrollerinin yapılması ile ilgili çalışmalar yaygın olarak görünmektedir. Dolayısıyla öğrencilerin lisans/lisansüstü çalışmalarında bu sistemler hakkında bilgi sahibi olması, hareket denklemlerini elde etmesi ve bileşenlerin sistem cevabı üzerindeki

etkilerini idrak edebilmesi, sistemin açık döngü ve kapalı döngü davranışı hakkında bilgi sahibi olması ve mümkünse bunu uygulamayla desteklemesi önem arz etmektedir. Fiziksel sistemler üzerinden yapılamayan çalışmalarda dijital ikiz, sanal gerçeklik ve animasyon gibi çalışmaların da destekleyici olduğu görülmektedir.

Bu kapsamda hazırlanan çalışmada bir sistemin otomatik denetiminin incelenmesi, zaman alanı ve frekans cevabında parametre değişiminin sistem cevabı üzerindeki etkisinin anlaşılması, PID tipi klasik kontrol algoritmasının sistemin kapalı döngü cevabı üzerindeki etkisinin incelenmesi ve animasyonla beraber cevapların ilişkilendirilmesi amacıyla Python programı ile DC motor ile tahrik edilen bir yükün konum denetimi ile ilgili inceleme yapılmıştır. Konuyla ilgili detaylar aşağıda sunulmuştur.

İlk önce denetim organı, DC motor-dişli-yük ve algılayıcı alt sistemlerinin hareket denklemleri çıkartılarak sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Ardından bu sistemin dinamik davranışını incelemeyi görsel açıdan da kolaylaştıracak olan kullanıcı dostu arayüzün sunumu yapılmıştır. Oluşturulan GUI' den elde edilen sonuçlar MATLAB, Simulink programı ortamlarında yapılan modelleme sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmede cevap eğrilerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

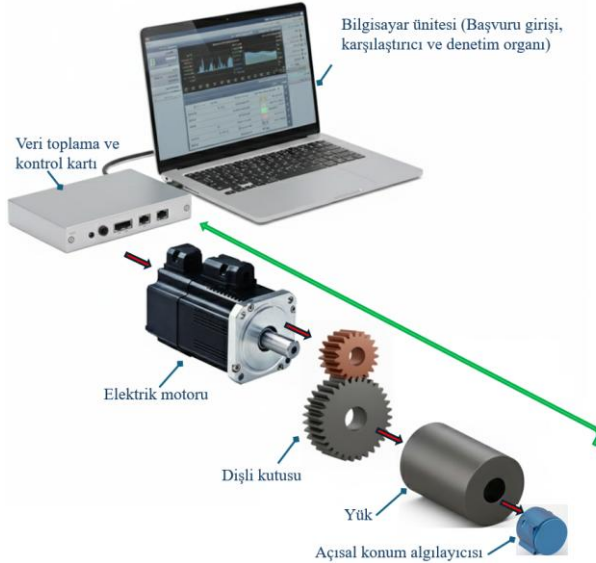
Sistemin Genel Yapısı

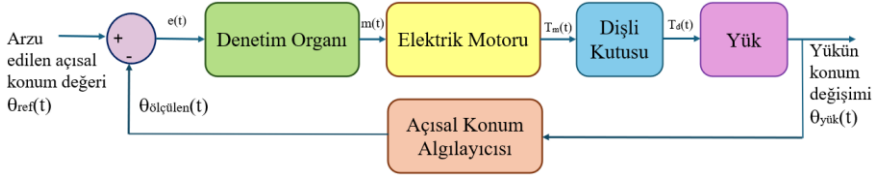
Şekil 1a' da dönme hareketi yapan bir yükün konum denetiminin yapılması için gerekli olan temel bileşenler gösterilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda bilgisayar (mikroişlemci, PLC vb.) yapılar üzerinden kullanıcının arzu ettiği giriş değeri verilerek sistem çalıştırılabilir. Şekil 1b' de ise bu sistemin kapalı döngü blok şeması ve sinyal akışı gösterilmiştir. Başvuru girişi, karşılaştırıcı ve denetim organı bu yapı üzerinden yapılandırılabilir. Veri toplama ve gönderme eylemi ise veri toplama ve denetim

kartları ile gerçekleştirilmektedir. Yükün açısal konum değişimi bir konum algılayıcısıyla (enkoder, potansiyometre vb.) algılanarak bu kart üzerinden karşılaştırıcıya gönderilerek arzu edilen giriş değeri ile mukayese edilir ve hata sinyali üretilir. Konum hata sinyali denetim organına (PID tipi vb.) giriş olarak verilir ve denetleyicinin yapısına bağlı olarak uygun büyüklükte denetim sinyali üretilir. Bu denetim sinyali elektrik motoruna gönderilir. Elektrik motoru bu sistemde eyleyici (hareket sağlayıcı mekanizma) olarak görev yapar. Bu amaçla fırçalı DC motor, fırçasız DC motor, adım motoru, servo motor vb. pek çok farklı motor çeşidi kullanmak mümkündür. Mekanik sistemlerde güç aktarımında dişli kutuları da yaygın olarak kullanılan bileşenlerdir. Gücün sabit kalmasıyla dişli çevrim oranına göre çıkışlarında momenti arttırmak, hızı düşürmek veya momenti azaltmak, hızı yükseltmek amacıyla kullanılırlar.

Şekil 1. Dönme hareketi yapan yükün konum denetim sistemi

a) Sistemin temel bileşenleri; b) Kapalı döngü sistemin kavramsal blok şeması





(b)

Sistemin Modellenmesi ve Transfer Fonksiyonun Elde Edilmesi

Mühendislik sistemlerinin dinamik davranışının incelenmesi için teorik ve deneysel yöntemler kullanılabilir. Bir dinamik davranışın matematiksel olarak soyut bir şekilde ifade edilmesine “matematiksel modelleme” denir. Mühendislik sistemlerinin matematiksel modelleri çoğunlukla diferansiyel denklemlerle gösterilir. İncelencek mühendislik sisteminin bileşenleri tanımlandıktan sonra sistemin fiziksel modeli elde edilir ve fiziksel sistemin hareket yasaları kullanılarak sistemin hareketini tanımlayan matematiksel model elde edilir. Bu denklemlerin uygun yöntemler kullanılarak çözümü ile giriş sinyaline göre sistemin tepkisi incelenir. Kullanılan modelin basitliği ve elde edilen sonuçların doğruluğu arasında bir uyum sağlanmalıdır (Yüksel, 2021). Sistemlerin giriş çıkış ilişkilerinin incelenmesi için transfer fonksiyon ve durum uzayı gösterimleri yaygın olarak kullanılır. Transfer fonksiyon kavramı doğrusal sistemlere uygulanabilen bir tekniktir. Bu çalışmada transfer fonksiyon kavramı üzerinden sistemin giriş-çıkış ilişkisi incelenmiştir. Aşağıda Şekil 1’ de temel bileşenleri ve kavramsal blok şeması verilen sistemin hareket denklemleri, denetleyici yapısı ve tüm sistemin blok diyagramı ile ilgili işlemler aşağıda sunulmuştur.

Kapalı döngü yani geribeslemeli denetim sistemlerinde denetlenen sisteme uygun bir denetim organı tasarlamak sistem tasarımcısının temel amacıdır. Burada dikkate alınması gereken üç temel unsur vardır. Bunlar minimum, mümkünse sıfır hata, hızlı cevap ve kararlı çalışmadır. Denetim işlemi için tasarlanabilecek çok

farklı denetim algoritmaları geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir (Sonugür, 2025; Bozali, Al Saremi & Öztürk, 2024; Kaya & Bawdaka, 2019; Rodríguez-Abreo & ark., 2021; Kamış, Erzan Topçu & Yüksel, 2005). PID tipi denetim organı hem endüstriyel çalışmalarda hem de akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır. Denetim parametrelerinin en uygun şekilde ayarlanmasıyla ilgili çalışmalar ve farklı denetim teknikleriyle kıyaslama yapılan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir (Bozali, Al Saremi & Öztürk, 2024; Flores-Morán & ark. 2020; Manuel, İnanç & Lüy, 2023). Otomatik kontrol derslerinde de temel olarak gösterilen bir denetim algoritmasıdır. Bu sebeple sistemin denetim işleminde bu algoritmanın kullanılması uygun görülmüştür.

PID denetim algoritması (yordamı); orantı (P- Proportional), integral (I- Integral) ve türev (D- Derivative) denetim etkilerinin birleşimiyle oluşan bir sürekli denetim algoritmasıdır. Üç etki beraber kullanılabileceği gibi sistemin yapısına göre P, PI ve PD biçimlerinde de kullanılabilir. Denetim organına giriş olarak verilen $e(t)$ hata sinyali değerlendirilerek çıkışta $m(t)$ denetim sinyali üretilir (Yüksel, 2021). Oluşturulan arayüzde kullanılan “Koşut PID” denetim algoritmasının kullanılması ile elde edilecek denetim sinyali

$$m(t) = K_p e(t) + K_p \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

denklemini ile tanımlanır. Buradan denetim organının transfer fonksiyonu

$$M(s) = \frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} \quad (2)$$

olarak elde edilir. Burada K_p orantı etki kazancı, K_i integral etki kazancı, K_d türev etki kazancını ifade etmektedir. Sistemin orantı etkiyle denetiminde orantı kazancının artışıyla kalıcı durum hatası

azaltılabilir. Ancak sistemdeki salınım artabilir ve eğer kazanç artışıyla kararsız hale geçebilen bir sistemse bu artışla kararsız bir davranış da gözlemlenebilir. PI denetim organı orantı etki kullanımıyla giderilemeyen kalıcı durum hatasının zaman içinde sıfırlanması için kullanılır. Ayrıca integral etki sistemin açık döngü transfer fonksiyonun paydasına getirdiği s çarpanı sebebiyle orjinde bir kutup eklenmesine sebep olmaktadır. Bu da sistemin kararlılığını olumsuz yönde etkilenmesine sebep olabilir. Benzer şekilde bu kutup ilavesi frekans alanında da 90^0 ’ lik faz gecikmesi meydana getirir. PD denetim organı D etkinin hatanın değişimine göre tepki verdiği için hata büyümeden hızlı bir şekilde hatayı düzeltme etkisi oluşturur. Ayrıca açık döngü transfer fonksiyonu payına s çarpanı getirdiği için bir sıfır ilave edilmesini sağlar. Bu durum sisteme sönüm etkisi katar ve sistemin kararlılığını iyileştirebilir. Frekans cevabı açısından bakıldığında sisteme 90^0 ’ lik faz öndeliği sağlar. PID denetim organı ile bu denetim etkilerinin üstünlüklerini bir araya getirerek hızlı bir cevapla kalıcı durum hatasını sıfırlamayı hedeflenir. Sistemden iyi bir dinamik davranış elde edebilmek için bu denetim etkilerinin kazanç değerlerinin optimum şekilde ayarlanması gerekmektedir.

Şekil 1’ de gösterilen elektrik motoru temel olarak elektrik, manyetik ve mekanik alt sistemlerinden oluşmaktadır. Buradaki incelemede elektrik motorunun rotor sargısından denetimli bir DC motor olduğu hal incelenmiştir. Bu yapı pek çok çalışmada referans olarak kabul edilebilmektedir (Sonugür, 2025; Bozali, Al Saremi & Öztürk,2024; Kaya &Bawdaka, 2019; Rodríguez-Abreo & ark., 2021). Elektriksel sistemin hareket denkleminin elde edilmesinde Kirchhoff yasaları kullanılmıştır. Elektrik motorunun girişi $m(t)$ denetim sinyali olarak kabul edilmiştir. Sürücü devre dinamiği bu çalışmaya dahil edilmemiştir. Sistemin elektriksel kısmında denetim sinyali ile rotorun değişken mıknatıs alanı içinde dönmeye zorlanmasıyla oluşan zıt elektromotor kuvveti (zıt emk) arasındaki

fark gerilimine karşılık bobinde oluşan akım değişimi arasındaki bağıntı ve elektriksel kısmın transfer fonksiyonu;

$$m(t) - e_{zit}(t) = e_m(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (3a)$$

$$M(s) - E_{zit}(s) = (Ls + R)I(s) \quad (3b)$$

olarak elde edilir. Burada L bobinin indüktansı (Henry-H), R bobinin direnci (Ω) olarak elektriksel sistemin basit elemanlarını ifade etmektedir. Denklem (3a)' da yer alan $e_{zit}(t)$ zıt emk rotorun açısai hızı ile orantılı olup doğrusallaştırılmış bağıntısı ve transfer fonksiyonu

$$e_{zit}(t) = K_b \frac{d\theta_m}{dt} = K_b \omega_m(t) \xrightarrow{T.F.} \frac{\theta_m(s)}{E_{zit}(s)} = K_b s \quad (4)$$

olarak ifade edilebilir. Burada K_b (V/(rad/s)) motor sabitidir. Akım değişimi sonucu bobin etrafında oluşan manyetik alan sebebiyle rotor üzerinde oluşan döndürme momentinin akım ile orantılı olarak kabul edilir ve denklem (5) ile ifade edilir.

$$T_m(t) = K_m i(t) \xrightarrow{T.F.} \frac{T_m(s)}{I(s)} = K_m \quad (5)$$

Burada K_m (Nm/A) olarak motor sabitini temsil eder ve genellikle $K_m=K_b$ olarak alınır. Burada oluşan döndürme momentine göre mekaniksel kısmının diferansiyel denklemi Newton' un II. Hareket yasası kullanılarak elde edilir. Buna göre motorun mekanik kısmının hareket denklemi ve transfer fonksiyonu döndürme momentine bağlı olarak ;

$$T_m(t) = J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} + T_{yük1}(t) \quad (6a)$$

$$T_m(s) - T_{yük1}(s) = s(J_m s + B_m)\theta_m(s) \quad (6b)$$

ile ifade edilir. Burada J_m (kgm²) motor rotoru, motor rotor mili ve ona bağlı dişlinin kütsel atalet momentini, B_m (Nm/(rad/s)) motor yapışkanlık sürtünme katsayısını, $T_{yük1}(t)$ (Nm) yük momentini

ifade etmektedir. İncelenen sistemde $T_{yük1}(t)$ rotor mili veya kaplin üzerinden dişliye aktarılan momenti temsil etmektedir. Aradaki bağlantı rijit olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla burada mil rijit olduğu için $\theta_{yük1}(t) = \theta_m(t)$ ve $\omega_{yük1}(t) = \omega_m(t)$ olacaktır. Dişli kutusunun denklemi dişliler arasında bir kayıp olmadığı kabulü altında giriş ve çıkış güçlerinin eşitliğinden;

$$T_{yük1}(t) \cdot \omega_m(t) = T_{yük2}(t) \cdot \omega_y(t) \quad (7)$$

ve çevrim oranı ile ilişkili olarak

$$\frac{T_{yük2}(t)}{T_{yük1}(t)} = \frac{\omega_m(t)}{\omega_y(t)} = n \text{ ve } \frac{\theta_m(t)}{\theta_y(t)} = n \quad (8a)$$

$$\frac{T_{yük2}(s)}{T_{yük1}(s)} = \frac{\omega_m(s)}{\omega_y(s)} = n \text{ ve } \frac{\theta_m(s)}{\theta_y(s)} = n \quad (8b)$$

yazılabilir. Dişlinin çıkışındaki yük momenti $T_{yük2}(t)$ yine Newton' un II. Hareket yasası kullanılarak yükün kütsel atalet momenti J_y (kgm^2) ve yükün yapışkanlık sürtünme katsayısına B_y ($\text{Nm}/(\text{rad/s})$) bağlı olarak

$$T_{yük2}(t) = J_y \frac{d^2\theta_y(t)}{dt^2} + B_y \frac{d\theta_y(t)}{dt} \quad (9a)$$

$$T_{yük2}(s) = s(J_y s + B_y)\theta_y(s) \quad (9b)$$

elde edilir. Buna göre yükün açısal konumu $\theta_y(s)$ çıkış, elektrik motoruna uygulanan denetim sinyali $M(s)$ giriş olarak alınırsa denklem (3b), (4), (5), (6b), (8b) ve (9b) denklemleri birleştirilerek motor- dişli ve yük sisteminin açık döngü transfer fonksiyonu;

$$\frac{\theta_c(s)}{M(s)} = \frac{K_m n}{s[L(J_m n^2 + J_y)s^2 + (L(B_m n^2 + B_y) + R(J_m n^2 + J_y))s + R(B_m n^2 + B_y) + (K_m n)^2]} \quad (10)$$

elde edilir.

Yük açısal konum denetim sisteminde geribesleme elemanı olarak kullanılan konum algılayıcısı kazanç tipi bir transfer

fonksiyon ile tanımlanabilir. Buna göre algılayıcının transfer fonksiyonu

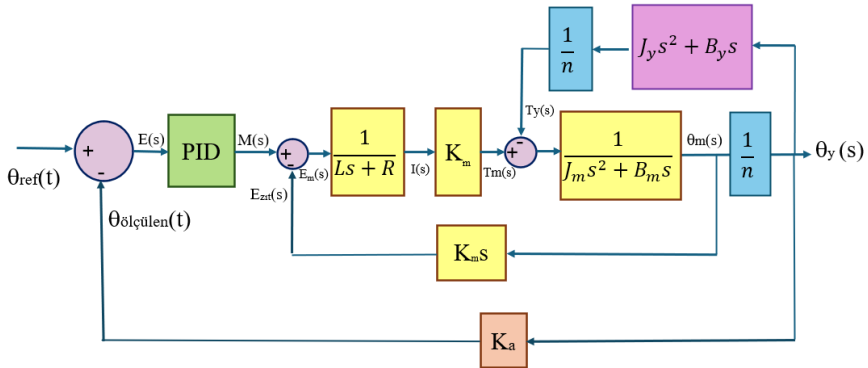
$$\frac{\theta_{ölçülen}(s)}{\theta_y(s)} = K_a \quad (11)$$

denklemini ile ifade edilir. Çalışmada birim geribesleme olduğu kabul edilmiştir. Yukarıda elde edilen transfer fonksiyonlara göre sistemin blok şeması Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Buna göre denklem (2), denklem (10) ve denklem (11)’in blok şema indirgeme kurallarına göre indirgenmesiyle $\theta_y(s)$ çıkış ve referans açısal konum değeri arasında $\theta_{ref}(s)$ alınarak tüm sistemin kapalı döngü transfer fonksiyonu

$$\frac{\theta_y(s)}{\theta_{ref}(s)} = \frac{K_m n (K_p s + K_i + K_d s^2)}{L J_{eş} s^4 + (L B_{eş} + R J_{eş}) s^3 + (R B_{eş} + (n K_m)^2 + K_d K_a K_m n) s^2 + K_a K_p K_m n s + K_a K_i K_m n} \quad (12)$$

olarak elde edilir. Bu denklemde denk eylemsizlik momenti $J_{eş} = J_m n^2 + J_y$ ve denk yapışkanlık sürtünme katsayısı $B_{eş} = B_m n^2 + B_y$ ile açıklanabilir.

Şekil 2. DC motor-dişli-yük sistemin kapalı döngü blok şeması



Yük Konum Denetim Sisteminin Analizi için GUI

Mühendislik çalışmalarında pek çok farklı alanda sistemlerin davranışlarını incelemek, parametre değişimlerinin veya çalışma şartlarının değişimlerinin incelenmesi ve sonuçların doğrudan

kolaylıkla gözlemlenebilmesi için grafik kullanıcı arayüzlerinin (GUI) tasarımlarının yapıldığı ve kullanıldığı görülmektedir (Şefkat& Yüksel, 2005; Korukçu, 2024; Özçay, Azar & Topçu, 2023; Manathunga & ark, 2025). GUI lerin hazırlanması için pek çok farklı platform ve program kullanılabilir. MATLAB, LabVIEW gibi programlar mühendislik sistemlerinin modellenmesi ve denetimi konusunda akademik ve endüstriyel alanda geniş bir kullanım alanına ve kapasiteye sahiptirler. Ayrıca GUI tasarımı ve geliştirilmesinde de kullanılmaktadırlar (Korayem& ark., 2011; Şefkat& Yüksel, 2005; Korukçu, 2024). Python, C#, C++ vb. yazılım dilleriyle de bu işlemler yapılabilen olup, günümüzde gelişen bilişim teknolojisi ve yapay zekâ tekniklerinin bu programlarla beraber kullanımının yaygınlaşmasıyla da kod üretilmesinin hızlandığını ve kolaylaştığını söylemek mümkündür (Akbulut, 2025, Deperlioğlu& Köse, 2025). Ancak elde edilen sonuçların doğruluğunun kullanıcı olarak kontrol edilmesi ve başka tekniklerle doğrulanmasının gerekliliği de bulunmaktadır. Mühendislik, matematik vb. eğitim alanlarında da bilgisayar programlama dili olarak Python' un kullanımının yaygınlaştığı ve kontrol üzerine kütüphanede geliştirildiği görülmektedir (Türkşen, 2023, Kaya 2023; Karaçay, 2017; Fuller & ark., 2021).

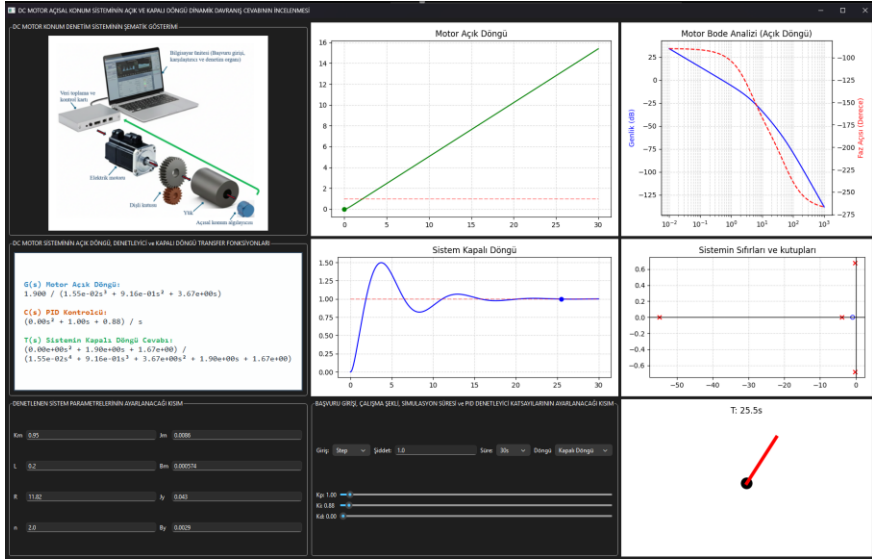
Bu gelişmelere paralel olarak otomatik kontrol eğitimi ile ilgili alanlarda da GUI destekli çalışmaları yaygınlaşmaktadır (Anathi& Prabhakar, 2025; Manathunga & ark, 2025; Zhang, Wang & Fan, 2025). Bu çalışmada da özellikle makine, elektrik-elektronik ve mekatronik mühendisliği alanlarında hem eğitim amaçlı hem de pratikte de oldukça yaygın olarak kullanılan DC Motor-dişli- yük sisteminin dinamik davranışının incelenmesi ve konum kontrolünün yapılması için Python tabanlı bir GUI hazırlanmıştır. Burada önceki bölümde tanımlanan denetim organı transfer fonksiyonu, motor-dişli-yük sisteminin açık döngü transfer fonksiyonu ve tüm sistemin kapalı döngü transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Bu grafiksel

kullanıcı arayüzün oluşturulmasında standart kütüphanenin yanı sıra PySide6, NumPy, SciPy, Matplotlib kütüphaneleri kullanılmıştır. Şekil 3' te çalışma kapsamında geliştirilen grafik kullanıcı arayüz ekranı gösterilmiştir. 3X3 lük bir matris olarak planlanan yapıda 1X1 de incelenen sistemin bileşenleri görsel olarak tanımlanmıştır. 2x1' de sistemin açık döngü transfer fonksiyonu, denetleyici transfer fonksiyonu ve kapalı döngü transfer fonksiyonları gösterilmektedir. 3X1' de denetlenen sistemin elemanlarının J_y , B_y , J_m , B_m , R , L , K_m ve n parametreleri kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Benzer şekilde 3X2' de denetim organı kazanç değerleri K_p , K_i ve K_d kayar bileşen (slider) şeklinde tasarlandığı için mouse ile değerleri değiştirilebilmekte, başvuru girişi tipi basamak veya ramp olarak seçilebilmekte, sinyal şiddeti ayarlanabilmekte, simülasyon süresi değiştirilebilmektedir. Ayrıca sistemin zaman alanı cevabında açık döngü, kapalı döngü davranışının izlenmesine de kullanıcı tarafından karar verilebilmektedir. Açık döngü davranış seçildiğinde 1X2' de motor-dişli-yük sistemin, n açık döngü cevabının eğrisi elde edilmekte ve 3X3' te yer alan animasyon kısmında da yük açık döngü davranışı gösterecek şekilde hareket etmektedir. Animasyon kısmındaki zaman değeri de yeşil nokta ile cevap erişimi takip etmektedir. Benzer şekilde kapalı döngü dinamik davranış seçildiğinde de 3X3 animasyon kapalı döngü çalışmayı temsil edecek şekilde yük dönme hareketi yapmaktadır. 2X2' de yer alan kapalı döngü zaman alanı cevabındaki mavi noktanın hareketi de bu animasyonla beraber izlenebilmektedir. 1X3' te açık döngü sistemin frekans cevabı grafiği Bode diyagramı olarak çizdirilmektedir. 2X3' te ise kapalı döngü sistemin kutupları ve sıfırları karmaşık sayı düzleminde gösterilmektedir. Bu da kararlılık analizinin yapılmasında kullanılmaktadır.

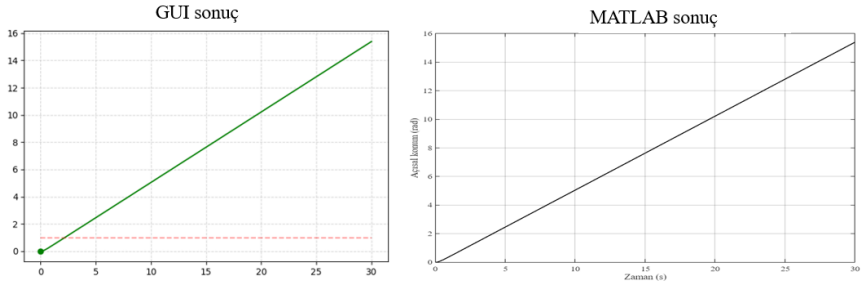
Transfer fonksiyonları ve elde edilen sonuçlar MATLAB ve MATLAB/Simulink programlarında hazırlanan modeller ile de karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu

görülmüştür. Şekil 4’ de motor açık döngü, kapalı döngü zaman alanı ve frekans cevaplarının karşılaştırıldığı grafikler gösterilmiştir.

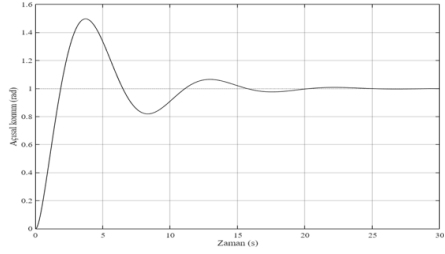
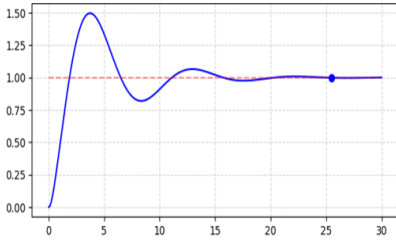
Şekil 3. Python tabanlı DC Motor-Dişli- Yük Sistemi GUI ekranı



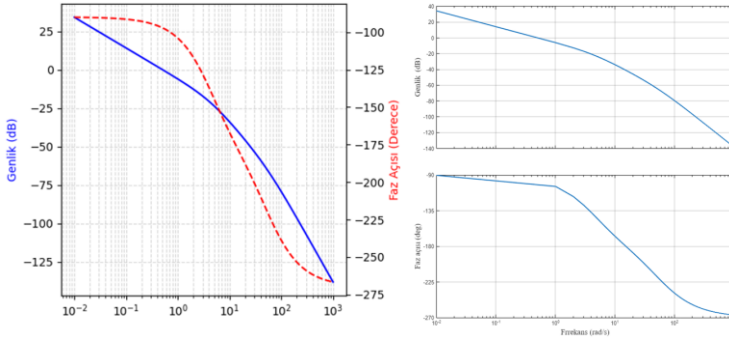
Şekil 4. GUI sonuçlarını MATLAB sonuçları ile karşılaştırılması



a) Açık döngü sonuçları



b) Kapalı döngü sonuçları



c) Frekans cevabı sonuçları

Sonuç

Bu çalışmada Python programlama dili kullanılarak DC motor-dişli kutusu-yükten oluşan bir sistemin dinamik davranışının incelenmesi için bir grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) hazırlanmıştır. Bu GUI ortamı ile kullanıcı sistem sabitlerine ait bir parametrenin veya kontrolcü katsayılarının değişiminin sistemin dinamik davranışı üzerindeki etkisinin hem zaman ve frekans cevabı eğrilerinden anlık olarak görülebilmekte hem de animasyonla da yükü davranışını gözlemleyebilmektedir. Bu şekilde kullanıcı sistemin dinamik davranışını grafik üzerinden takip ederken eş zamanlı olarak yükün hareketinin animasyonunu da izleyebildiği için kontrol ile ilgili konuların daha iyi anlaşılması da sağlanabilecektir. Ayrıca tek bir platform üzerinde kararlılık, hata,

geçici ve kalıcı durum davranışı gibi temel kavramlarla ilgili yorum da yapabilecektir.

Bu modülün makine mühendisliği bölümü “Otomatik Kontrol” dersinde anlatılan konular kapsamında da kullanılması planlanmaktadır. Bu şekilde öğrencilerin otomatik kontrol eğitimindeki temel kavramlar olan standart giriş fonksiyonları, açık döngü-kapalı döngü denetim sistemleri, zaman alanı cevabı, frekans cevabı, kararlılık ve PID denetim algoritması konularını pekiştirmesine ve konuların birbirleriyle olan ilişkisini daha iyi kavrayabilmesine destek olunacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- Akbulut, M. (2025). Yapay Zeka Uygulamalarının Python Kod Üretimindeki Performans Karşılaştırması. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 259-288. Doi: 10.33484/sinopfbd.1635155.
- Ananthi, G. & Prabhakar, G. (2025). GUI-Driven Real-Time PID Control Tool for Educational Virtual Systems. *Journal of Engineering Education Transformations*, 38(2), 61–71. Doi: 10.16920/jeet/2024/v38i2/24190.
- Arslan, K. (2020). Eğitimde Yapay Zeka ve Uygulamaları. *Batı Anadolu Eğitim Bilimleri Dergisi*, 11(1), 71-88.
- Balak M.V. & Kısa M. Sanal Gerçeklik Teknolojisinin Makine Mühendisliği Birinci Sınıf Öğrencilerinin Uzamsal Görselleştirme Becerilerine Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 282-290, (2018).
- Bozali, B., Al Saremi, N. B. N. & Öztürk, A. (2024). Enhancing DC Motor Speed Control Performance Using Heuristic Optimization and Comparative Analysis of Control Methods. *Düzce University Journal of Science and Technology*, 12(4), 2220-2244. Doi: 10.29130/dubited.1505316.
- Boztepe, C. (2025). Eğitimde Yapay Zekâ Uygulamaları: Fırsatlar, Sınırlılıklar ve Etik Tartışmalar. *Dumlupınar Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 98-121. Doi: 10.71272/debder.1706141.
- Coşkun, F.& Gülleroğlu, H. D. (2021). Yapay Zekanın Tarih İçindeki Gelişimi ve Eğitimde Kullanılması. *Ankara University Journal of Faculty of Educational Sciences (JFES)*, 54(3), 947-966. Doi: 10.30964/auebfd.916220_

Deperlioğlu Ö. & Köse, U. (2025). *Python ile Yapay Zekaya Giriş Kavramsal Çerçeve – Temeller – Kodlama* (2. Baskı), Ankara: Seçkin Yayıncılık.

Emreli, D., Kofoğlu, M., Kuş, A., Arslan, R. & Unver, E. 2019. Teknik Resim Eğitimi İçin Geliştirilen Sanal Gerçeklik Öğretim Materyalinin Öğrencilerin Kavramsal ve Bilişsel Öğrenme Düzeylerine Etkisinin İncelenmesi. *Uluslararası Fen, Matematik, Girişimcilik ve Teknoloji Eğitimi Kongresi*, 12-14 Nisan 2019, İzmir, Türkiye.

Flores-Morán, E., Yáñez-Pazmiño, W., Espín-Pazmiño, L., Carrera-Manosalvas, I. & Barzola-Monteses, J. (2020). Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm PID for DC motor position controllers, *2020 IEEE ANDESCON*, 13-16 October 2020, Quito, Ecuador, (pp. 1-6), Doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272127.

Fuller, S., B. Greiner, J. Moore, R. Murray, R. Van Paassen and R. Yorke. (2021). The Python Control Systems Library (python-control). *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Austin, TX, USA, 13-17 December 2021, Austin, TX, USA, (pp. 4875-4881). Doi: 10.1109/CDC45484.2021.9683368.

Kamış, Z., Topçu, E., & Yüksel, I., (2005). Computer-aided automatic control education with a real-time development system. *Computer applications in Engineering Education*, 13(3), 181-191. Doi: 10.1002/cae.20045.

Karaçay, T. (2017). *Yeni Başlayanlar İçin Python 3 Temel Kavramlar*. (3. Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.

Kaya İ. & Bawdaka, A. (2019). DC Motor Sürücüsü İçin Model Öngörülü Denetleyici Tasarımı, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* , 10(3), 899–910, Doi: 10.24012/dumf.591216.

Kaya, Y. (2023). *Python ile Veri Yapıları ve Algoritma Analizi*, /1. Baskı). Ankara: Nobel Yayıncılık.

Korukçu, M.Ö. (2024). A Graphical User Interface for Calculating Exergy Destruction for Combustion Reactions. *Processes*, 12, 294. Doi:10.3390/pr12020294.

Korayem, M. H., Taherifar, M., Maddah, S. M., Tourajizadeh H. and & Khayatzadeh, S. (2011). Design and programming a graphical user interface for the IcasBot robot using LabVIEW. *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, 27-29 December 2011, Shiraz, Iran, (pp. 853-858). Doi: 10.1109/ICCIAutom.2011.6356773.

Makine Eğitimi. (2025). *Makine mühendislerinin en çok kullandığı yazılımlar*. (24.12.2025 tarihinde <https://www.makinaegitimi.com/makine-muhendislerinin-en-cok-kullandigi-yazilimler/> adresinden ulaşılmıştır.

Manathunga, C.H., Dharmasiri, R.A.D.D., Wanniarachchi, W.K.I.L., Jayananda, M.K. & Nakayama, T. (2025). PyCSBtool: Python-Based GUI Learning Tool for Basics Control System Education. *IEEE Access*, 13, 117491-117499, Doi: 10.1109/ACCESS.2025.3583103.

Manuel N. L., İnanç, N., & Lüy, M. (2023) Control and Performance Analyses of a DC Motor Using Optimized PIDs and Fuzzy Logic Controller, *Results in Control and Optimization*, 13 100306, Doi: 10.1016/j.rico.2023.100306.

Özçay, B., Azar, S. & Topçu, E. E. (2023). An interface design for comparison of energy consumption of pneumatic and ball screw-driven linear actuators. *The European Journal of Research and Development*, 3(4), 298–313. Doi:10.56038/ejrnd.v3i4.299

Rodríguez-Abreo O., Rodríguez-Reséndiz, J., Fuentes-Silva, C., Hernández-Alvarado, R. & Falcón, M.D.C.P.T. (2021). Self-Tuning

Neural Network PID With Dynamic Response Control. *IEEE Access*, 9, 65206-65215. Doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075452.

Sonugür, G. (2025). Efficient speed control of DC motors: imitation learning with fuzzy logic expert systems. *Automatika*, 66(2), 306–320. Doi:10.1080/00051144.2025.2480425

Şefkat, G. & Yüksel, İ. (2005). MATLAB GUI Tabanlı Elektromıknatıs Devre Tasarımı ve Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 123-129.

Temur, S. (2025). 2000-2024 Yılları Arasında Eğitim Alanında Yapılan Yapay Zekâ Konulu Lisansüstü Çalışmaların İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Dergisi*. (63), 1181-1218. Doi:10.53444/deubefd.1600146.

Toroğlu, A. & İçingür, Y. (2007). Üç Boyutlu Bir Animasyon Sisteminin Tasarımı ve Teknoloji Eğitiminde Kullanılması. *Politeknik Dergisi*, 10(3), 247-252.

Türkşen, Özlem. *Optimizasyon Yöntemleri ve MATLAB, Python, R uygulamaları*. (1. Baskı). Ankara: Nobel Yayınevi.

Yüksel, İ. (2021). *Otomatik kontrol: Sistem dinamiği ve denetim sistemleri* .(12. baskı). Bursa: Dora Yayıncılık.

Zhang, F.; Wang, Z. & Fan L. (2025). Large Language Model-Integrated Teaching Practices in Courses on Python and Automatic Control Principles. *Engineering Proceedings*. 98(1), 43. Doi:10.3390/engproc2025098043.

BÖLÜM 3 **Kalsiyum Oksit Katkılı Malzemelerin Katı Oksit Yakıt Pilleri** **Sistemlerindeki Rolü**

Öğr. Gör. Dr. Gülşah Germen Tutaş^{*1}

ORCID: 0000-0002-7705-7465

Öğr. Gör. Dr. Esra Kılavuz²

ORCID: 0000-0001-9324-5346

¹ Niğde Ömer Halis Üniversitesi, Endüstriyel Hammaddeler ve Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde, Türkiye

² Niğde Ömer Halis Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı, 51240, Niğde, Türkiye

1. Giriş

Küresel iklim değişikliğiyle mücadele ve fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi, yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip, düşük emisyonlu ve sürdürülebilir enerji sistemlerine olan ihtiyacı her zamankinden daha kritik hale getirmiştir. Bu bağlamda, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren Katı Oksit Yakıt Hücreleri (KOYP) ve su veya karbondioksiti elektroliz ederek hidrojen ya da sentez gazı üreten Katı Oksit Elektroliz Hücreleri (KOE), karbon nötr bir enerji döngüsünün tesis edilmesinde stratejik bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemlerin en temel avantajı olan yüksek verimlilik ve yakıt esnekliği (hidrojen, metan, sentez gazı ve biyogaz kullanımı gibi), aynı zamanda yüksek işletme sıcaklıklarından (700–1000 °C) kaynaklanan ciddi malzeme zorluklarını da beraberinde getirmektedir. Özellikle katot malzemelerindeki stabilite kaybı, anot tarafında hidrokarbon yakıt kullanımından kaynaklanan karbon birikimi ve bileşenler arasındaki sızdırmazlık sorunları, sistemlerin ticari ömrünü ve performansını sınırlayan ana parametrelerdir (Momin and Manjanna 2022; Wang et al. 2023). Katı oksit hücrelerinin verimli ve dayanıklı çalışması, iyonik iletkenlik, termal genleşme uyumu ve katalitik aktivite gibi çoklu malzeme parametrelerinin optimize edilmesine bağlıdır. Bu doğrultuda, alkali toprak metallerinden biri olan kalsiyum (Ca) ve kalsiyum oksit (CaO) katkıları, hücre bileşenlerinin performansını iyileştirmek için önemli bir dopant stratejisi olarak araştırılmaktadır. Literatürde bildirilen çalışmalar, kalsiyum katkısının aşağıdaki temel mekanizmalar üzerinden performans iyileştirmesi sağladığını göstermektedir:

- Elektrolitlerde; kalsiyumun zirkonya (ZrO_2) yapısına girmesiyle oluşan oksijen boşlukları, iyonik iletim kanallarını genişleterek iyonik iletkenliği optimize etmektedir.

- Katotlarda; stronsiyumun yapıdan ayrışmasını engellemek ve yapı uyumsuzluğunu minimize etmek amacıyla kalsiyum ikamesi başarıyla uygulanmaktadır.
- Anotlarda; CaO'nun sağladığı yüzey bazikliği, nikel bazlı anotlarda karbon birikimini bastırarak metan yakıtlı hücrelerde yüksek katalitik aktivite ve stabilite sağlamaktadır.
- Sızdırmazlık Elemanlarında; cam-seramik matrislerde kalsiyum içeriği, termal genleşme katsayısının diğer bileşenlerle uyumlu hale getirilmesi ve kristalleşme davranışının kontrol edilmesi noktasında kritik bir ağ değiştirici görevi görmektedir.

Özellikle kalsiyum ile katkılanmış seria ($\text{Ce}_{1-x}\text{Ca}_x\text{O}_{2-\delta}$) gibi elektrolit sistemlerinde yapılan çalışmalar, CaO katkısının optimum aralıkta iyonik iletkenliği artırdığını (örneğin $8.01 \times 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ seviyesine çıkardığını) göstermiştir; bu tür malzemeler, katı oksit yakıt pilleri ara sıcaklık uygulamalarında potansiyel elektrolit adayı olarak değerlendirilmektedir (Momin and Manjanna 2022).

Bu bölüm kapsamında, kalsiyum oksidin KOYP ve KOE sistemlerindeki bu çok fonksiyonlu rolü, yapısal stabilite, elektrokimyasal performans ve sızdırmazlık teknolojileri perspektifinden güncel kaynaklar ışığında derinlemesine analiz edilecektir.

2. CaO'nun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kalsiyum oksit, yüksek bazik karaktere sahip, termodinamik olarak kararlı bir alkali toprak metal oksidi olup, yüksek sıcaklıklarda oksit yüzeylerinde güçlü adsorpsiyon özellikleri sergilemektedir. Bu özellikler, CaO'yu özellikle gaz-katı etkileşimlerinin belirleyici olduğu elektrot reaksiyonları açısından cazip bir malzeme hâline getirmektedir (Mogensen, Sammes, and Tompsett 2000; Asamoto et al. 2009). Katı oksit yakıt hücrelerinin yüksek sıcaklıklı çalışma koşullarında CaO'nun kimyasal stabilitesini koruması, elektrot bileşenlerine fonksiyonel katkı maddesi olarak entegrasyonuna olanak sağlamaktadır.

SOFC çalışma koşulları altında CaO'nun öne çıkan özellikleri; yüksek sıcaklıklarda kimyasal ve termodinamik kararlılık göstermesi, CO_2 ve karbonlu türlere karşı güçlü bağlanma eğilimi sergilemesi, oksijen iyonu boşluklarının oluşumunu teşvik edebilmesi ve elektrot yüzey kimyasını modifiye edebilme yeteneği şeklinde özetlenebilir (Mogensen et al., 2000). Özellikle CaO'nun yüzey bazikliği, nikel bazlı anotlarda karbon birikimini bastırarak hidrokarbon yakıtlı KOYP sistemlerinde katalitik aktiviteyi ve uzun dönem stabiliteyi artırmaktadır. Bu çok yönlü özellikler, CaO'nun hem anot hem de katot tarafında elektrokimyasal performansı ve hücre dayanıklılığını artıran fonksiyonel bir katkı maddesi olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

3. CaO'in KOYP Anotlarında Kullanımı

KOYP yakıt türüne bağı olarak anot üzerindeki asidik bölgelerin hidrokarbon çatlama reaksiyonlarını kolaylaştırdığı bilinmektedir. Bu nedenle, alkali metallerin veya alkali toprak metal oksitlerinin (Li, Na, CaO, BaO ve MgO gibi) Ni bazlı seramik anoda eklenmesiyle karbon oluşumunun engellenebileceği ve alkaliliğinin artırılabilir beklenmektedir. Dahası, alkali metallerin veya alkali toprak metal oksitlerinin mükemmel hidrofilikliği ve CO₂ adsorpsiyonu, hidrokarbon yakıtlarının yerinde buhar/CO₂ reformasyonu ve bitişik karbonla oksitlenen hidroksil gruplarının (*OH) adsorpsiyonu yoluyla karbon birikimlerinin giderilme hızını hızlandırabilir.

Takeguchi ve ark. , Ni-YSZ seramiğine güçlü bazikliğe sahip CaO ilavesinin, metal Ni'yi hafif katyonik bir duruma getirdiğini ve bunun da reformasyon aktivitesini azaltmadan karbon birikimini engellemede etkili olduğunu bulmuşlardır (Takeguchi et al. 2002). Asamoto ve ark. da benzer bir sonuca varmışlardır; yani, Ni-SDC anotuna CaO ilavesinin MPD'yi hafifçe azalttığını, ancak KOYP performansının kararlılığını artırdığını ve anotta karbon birikimini engellediğini belirtmişlerdir. 700 °C'de metan yakıtında, Ni-SDC anotlu hücre 40,3 mW cm⁻²'lik bir MPD sergilerken, Ni-CaO-SDC anotlu hücre yaklaşık 35,6 mW cm⁻²'lik bir MPD'ye sahipti. KOYP'nin azalan elektrokimyasal performansı, CaO'nun ZrO₂ veya CeO₂ kafesinde çözünmesine bağlanmıştır . Ancak 30 dakika sonra Ni-SDC anot üzerinde 36,1 mg karbon birikmişken, Ni-CaO-SDC üzerinde bu miktar sadece 31,0 mg olduğu kaydedilmiştir (Asamoto et al. 2009).

Ni'nin hidrokarbon yakıtlar üzerindeki verimli katalitik yeteneği göz önüne alındığında, karbona dayanıklı alaşımlar üzerine yapılan araştırmalar şu anda ağırlıklı olarak Ni bazlı bimetalik seramiklere odaklanmaktadır. Nikel bazlı alaşımlardaki ikinci metal türü için bu inceleme esas olarak Cu, Co, Fe, Mo, Sn, Ag, Pd ve Ru metallerinin yanı sıra CaO, BaO ve MgO gibi alkali toprak metal oksitlerini özetlemektedir. Farklı sıcaklıklarda metal oksit oluşumunun entalpi değişimine göre çizilen Ellingham diyagramında, KOYP çalışma sıcaklığında hidrojenle indirgenebilen metal alaşımlarının sınırlı olduğu, ancak hidrojenle daha fazla CO ile indirgenebilen metal türünün bulunduğu dikkate değerdir (Hasegawa 2014). Bu nedenle, gelecekteki alaşımlama çalışmaları, hidrojen dışı indirgeme yolları aracılığıyla daha geniş bir yelpazede bimetalik seramiklerin sentezini göz önünde bulundurmalıdır.

Karbon Birikimi Direncinin Artırılması

KOYP'lerin hidrokarbon yakıtlarla (özellikle metan) çalıştırılması durumunda en önemli sorunlardan biri **karbon birikimidir**. Nikel bazlı anotlarda oluşan karbon filamentleri, aktif yüzey alanını azaltarak hücre performansının hızla düşmesine neden olur.

CaO katkılı anot sistemleri bu noktada önemli avantajlar sunmaktadır. CaO'nun bazik yapısı sayesinde:

- Karbon öncülleri (CO, CH_x türleri) yüzeyden uzaklaştırılabilir
- CO₂ adsorpsiyonu artar ve karbon oluşumu baskılanır
- Ni yüzeyinde karbon filamentlerinin büyümesi engellenir

Literatürde, **Ni-SDC ve Ni-YSZ anotlara CaO ilavesinin**, metan yakıtlı KOYP'lerinde uzun süreli stabilite sağladığı rapor edilmiştir (Qu et al. 2016)

Anot Katalitik Aktivitesi Üzerindeki Etkiler

CaO katkısı yalnızca karbon direncini artırmakla kalmaz, aynı zamanda reformlama reaksiyonlarını teşvik eder, gaz difüzyonunu iyileştirir, aktif üçlü faz sınırını (tpb) genişletir. Oksijen boşlukları oluşturmak, Ca^{2+} gibi daha düşük valanslı iyonların Ce^{4+} yapısına eklenmesi (Ahmad et al. 2025) yük dengeleme kuralı gereği kristal kafesinde **oksijen iyonu boşlukları** yaratır. Bu boşluklar, elektrolitin iyon iletkenliği için hayati önem taşır; çünkü iyonlar bu boşluklar üzerinden taşınır. İyonik iletkenliğin bu şekilde artması, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği üçlü faz sınırı (TPB) bölgesini genişletir. Bu durum, reaksiyonların sadece arayüzde değil, elektrot hacmi içinde de gerçekleşmesine olanak tanıyarak toplam katalitik aktiviteyi artırır. Kaynaklarda, kalsiyum katkılı yapıların (örneğin $La_{0.4}K_{0.1}Ca_{0.5}MnO_{3-\delta}$ - LKCM) yüzey katalitik aktivitesini doğrudan iyileştirdiği ifade edilmektedir (Losilla and Marrero-l 2024).

4. CaO'nun KOYP Katotlarında Kullanımı

Oksijen İndirgenme Reaksiyonu (ORR)

Katı Oksit Yakıt Hücrelerinde katotlar, oksijen indirgenme reaksiyonunun (ORR) gerçekleştiği ve cihaz performansını sınırlayan ana bileşenlerden biridir. Bu nedenle katot malzemelerinin iletkenlik, yüzey reaktivitesi ve termal genleşme gibi özelliklerinin optimize edilmesi, hücrenin

genel verimliliği ve uzun süreli stabilitesi açısından kritik öneme sahiptir. Bir yaklaşım, CaO veya Ca içeren kompleks oksitlerin katot malzemesi olarak tasarlanmasıdır.

Ca₃Co₄O_{9+δ} (Ca-Cobaltite) Bazlı Katotlar

Kalsiyum içeren Ca₃Co₄O_{9+δ} (CCO) misfit yapılı kompleks oksitler, KOYP katot malzemesi olarak son yıllarda giderek daha fazla araştırılmıştır. Bu bileşikler, iyi elektriksel iletkenlik ve oksijen indirgenme katalitik aktivitesi sergilemekte olup, orta sıcaklık uygulamalarında yüksek fonksiyonel performans göstermektedir. CCO ve türevleri, yüksek iyonik/e- iletkenlik ve uygun termal genleşme değerleri nedeniyle özellikle orta sıcaklık aralığında umut verici katotlar arasında yer alır (Yurchenko et al. 2025).

Ca-İçerikli Perovskit ve Ruddlesden–Popper Tip Yapılar

Kalsiyum, perovskit veya Ruddlesden–Popper tipi katot malzemelerinde A-site dopantı olarak kullanıldığında, oksijen vakansı konsantrasyonunu artırarak oksijen iyonlarının difüzyonunu ve yüzey ORR kinetiğini iyileştirebilir. Örneğin, Nd_{0.8-x}Sr_{0.2}Ca_xCoO_{3-δ} sistemlerinde Ca dopingi ile iletkenlik artışı ve optimum alan spesifik direnç (ASR) değerlerinin elde edildiği rapor edilmiştir (Du et al. 2022).

Kalsiyumun Termal Genleşme ve Uyum Özelliklerine Etkisi

Kalsiyum içeren katot malzemeleri, sadece iyonik ve elektronik iletkenlik üzerindeki etkileriyle değil, aynı zamanda termal genleşme katsayısı üzerinde de belirgin bir rol oynar. Ca dopingi, katot bileşiklerinde TG değerlerini düşürebilmekte ve böylece elektrolit ile termal uyumu iyileştirebilmektedir. Bu uyum, hücre bileşenleri arası mekanik gerilmeleri azaltırken uzun vadeli kararlılığı artırmaktadır.

Ca İçeren Kompozit ve Karma Yapılar

Araştırmalar, Ca-içeren kompleks oksitlerin kompozit veya heteroyapı olarak tasarlanmasıyla katot performansının daha da artırılabilceğini göstermiştir. Örneğin, Ca₃Co₄O_{9+δ}'nin farklı katkılarla modifiye edilmesiyle iletkenlik ve polarizasyon dirençlerinde iyileşme gözlemlenmiştir (Yurchenko et al. 2025).

Ca Dopingi ile Elektrokimyasal Aktivite Artışı

Kalsiyum, hem doğrudan katot malzemesinin yapısal ve iletkenlik özelliklerini etkilemekte hem de oksijen indirgenme reaksiyonu kinetiğini hızlandırmaktadır. Ca dopingi, katot yüzeyinde oksijen adsorpsiyonunu ve iletimini optimize ederek alan spesifik direnç (ASR) ve polarizasyon kayıplarını düşürebilir. Bu, hücrenin daha düşük sıcaklıklarda bile iyi performans göstermesine katkı sağlar

SOFC performansını sınırlayan en önemli adımlardan biri katotta gerçekleşen oksijen indirgenme reaksiyonudur (ORR). CaO infiltrasyonu veya katılınması, katot yüzeyinde oksijen adsorpsiyonunu artırarak ORR kinetiğini iyileştirebilir.

5. Elektrolitlerde CaO Kullanımı

Kalsiyum oksit, özellikle Katı Oksit Yakıt kullanılan zirkonya (ZrO_2) bazlı elektrolitlerin stabilize edilmesinde kritik bir rol oynar. Kaynaklara göre, CaO kullanımı hem ekonomik hem de teknik avantajlar sunmaktadır (Cai et al. 2017; Zhigachev et al. 2025; Ce 2024). CaO'nun elektrolitlerdeki kullanımı ve etkileri şu ana başlıklar altında toplanabilir:

Faz Stabilizasyonu ve Yapısal Rolü

Saf zirkonya oda sıcaklığında monoklinik bir yapıya sahiptir ve sıcaklık arttıkça faz değişirir. CaO, zirkonyanın kübik veya tetragonal fazını tüm sıcaklıklarda korumasına yardımcı olan bir stabilizatör olarak işlev görür. Bu stabilizasyon, elektrolitin yüksek sıcaklıklardaki operasyonel kararlılığı için gereklidir.

İyonik İletkenlik Mekanizması

CaO'nun zirkonya kafesine eklenmesi (katılama), malzemenin iyon iletkenliğini şu şekilde sağlar:

- **Yük Dengesizliği ve Boşluk Oluşumu:** Daha düşük değerli bir katyon olan Ca^{2+} , Zr^{4+} iyonlarının yerini aldığı anda kafes içinde bir yük açığı oluşur.
- **Oksijen Boşlukları:** Bu yük açığını dengelemek için yapı içinde oksijen iyonu boşlukları yaratılır.
- **İletkenlik:** Bu boşluklar, oksijen iyonlarının (O^{2-}) kafes içinde hareket etmesine izin vererek malzemenin bir katı elektrolit olarak çalışmasını sağlar.

Ekonomik ve Lojistik Avantajlar

Kaynaklar, CaO'nun yaygın olarak kullanılan Ytriya (Y_2O_3) gibi nadir toprak elementlerine göre önemli avantajlarını vurgulamaktadır:

- Maliyet; CaO, dünyada çok bol bulunan kireçten üretilir; 2018'de dünya kireç üretimi 420 milyon ton iken, ytriya üretimi sadece birkaç bin ton düzeyindedir.
- Alternatif Stabilizatör: Ytriya pahalı ve rezervleri kısıtlı bir malzeme olduğu için CaO, orta sıcaklıklı yakıt hücreleri için maliyet etkin bir alternatif teşkil eder.

Performans ve Uygulama Detayları

- Optimum Karışım: İyonik iletkenlik, katkılama seviyesine bağlıdır. Örneğin, 12 mol% CaO içeren kalsiyum stabilize zirkonya (CSZ), 500 °C'de düşük aktivasyon enerjisiyle yüksek iyonik iletkenlik göstermiştir.
- Üretim Yöntemleri: CSZ elektrolitleri, anot destekli hücrelerde düşük maliyetli bir yöntem olan spreyl kaplama tekniği ile ince filmler halinde uygulanabilir.
- Sınırlamalar: Çok yüksek CaO konsantrasyonları, tane sınırlarında iletken olmayan fazların oluşmasına neden olarak iletkenliği düşürebilir. Ayrıca, CSZ hücrelerin performansı ticari YSZ (Ytriya Stabilize Zirkonya) bazlı hücrelere göre şu an için daha düşük kalabilmektedir.

Özetle; CaO, zirkonyayı "disipline ederek" onun yüksek sıcaklıklarda kristal yapısını bozmasını engeller ve içerisinde oksijen iyonlarının geçebileceği "kapılar" (boşluklar) açarak malzemenin elektriği iletmesini sağlar.

6. Gelecek Perspektifler ve Araştırma Eğilimleri

CaO, katı oksit yakıt hücreleri ve katı oksit elektroliz teknolojilerinde elektrolit kararlılığından anot performansına ve sızdırmazlık güvenilirliğine kadar kritik roller üstlenmektedir (Zhigachev et al. 2025; Yurchenko et al. 2025; Losilla and Marrero-l 2024). Elektrolit yapılarında, özellikle zirkonya bazlı sistemlerde kübik fazı stabilize ederek yüksek oksijen iyon iletkenliği sağlamakta, seryum bazlı elektrolitlerde ise doping maddesi olarak oksijen boşlukları oluşturarak iyonik iletkenliği artırmaktadır (An et al. 2022). Anot performansında, nikel bazlı cermetlere eklenen CaO, metan ve diğer hidrokarbon yakıtların doğrudan kullanımında ciddi

bir sorun olan karbon birikimini (koklaşma) etkili bir şekilde bastırmakta ve sistemin uzun süreli katalitik kararlılığını desteklemektedir. Ayrıca, doğrudan karbon yakıtlı hücrelerde (DC-SOFC) Boudouard reaksiyonunu katalize ederek güç yoğunluğunu ve yakıt kullanım verimliliğini artırmaktadır (Cai et al. 2017; Dizaj et al. 2024; Fu et al. 2025; Mogensen, Sammes, and Tompsett 2000; Ren, Lin, and Jin 2025; Yurchenko et al. 2025). Sızdırmazlık teknolojilerinde ise CaO, cam-seramik dolgu malzemelerinin camsı geçiş sıcaklığını ve ısıl genleşme katsayısını optimize ederek yığın bileşenleri arasında termomekanik uyum ve sızıntısız operasyon sağlamaktadır (Zhigachev et al. 2025). Son olarak, CaO'nun katotlarda doping maddesi olarak kullanılması elektrot kararlılığını artırırken, sisteme entegre edilen CaO-CO₂ yakalama üniteleri karbon emisyonlarını düşürerek toplam elektriksel verimliliği %65 seviyelerine çıkarma potansiyeli sunmaktadır (Cai et al. 2017). Anot, katot ve elektrolit tarafında sunduğu çok yönlü avantajlar sayesinde CaO, ileri SOFC malzeme tasarımlarında önemli bir araştırma konusu olmaya devam edecektir.

Gelecekteki çalışmalarda CaO'nun KOYP ve KOE sistemlerindeki kullanımı, özellikle gerçek çalışma koşulları altında uzun vadeli kararlılığın artırılması ve ikincil faz safsızlıklarının (CaZrO₃ gibi) olumsuz etkilerinin minimize edilmesi üzerine yoğunlaşmalıdır. Mevcut araştırmalar, kalsiyum bazlı katotların ve elektrolitlerin ticarileşmesini hızlandırmak için bu safsızlık fazlarını daha da azaltacak ve reel operasyonel ortamlarda dayanıklılığı artıracak optimizasyonlara ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, kalsiyum içeren cam-seramik sızdırmazlık malzemelerinde yüzey ve yığın (bulk) kristallenme kinetiği arasındaki farkların ve bu sürecin sızdırmazlık güvenilirliğine olan uzamsal etkilerinin daha derinlemesine incelenmesi pratik uygulama açısından kritik bir öneme sahiptir. Düşük sıcaklıktaki SOE uygulamalarında ise potasyum gibi katkı maddelerinin su buharı ile reaksiyonunun ve bu durumun uzun süreli operasyon üzerindeki etkilerinin ele alınması gereken önemli bir bilimsel zorluk olduğu not edilmektedir. Teknolojinin gelişim sürecinde, moleküler dinamik simülasyonları, yoğunluk fonksiyonu teorisi (DFT) ve yapay zeka/makine öğrenmesi gibi hesaplamalı araçların kullanımı, yeni elektrolit malzemelerinin iyonik iletkenliğini, aktivasyon enerjisini ve ısıl özelliklerini öngörmeye giderek daha etkin bir rol oynayacaktır. Son olarak, alkali metal dopingi ve çoklu doping (co-doping) gibi stratejilerle operasyon sırasında meydana gelebilecek elementel buharlaşmanın **operando** ölçümlerle karakterize edilmesi, yüksek performanslı, maliyet etkin ara tabaka (buffer layer) ve elektrot tasarımları için vazgeçilmez bir gelecek araştırma alanını temsil etmektedir.

KAYNAKLAR

Ahmad, Syed Ismail, Samia E Attia Negm, D Ravi Kumar, and M Buchi Suresh. 2025. "Aliovalent Doping of Ceria IT-SOFC Electrolyte : Structural , Morphological , Electrical and Transport Properties." *Arabian Journal for Science and Engineering* 50 (9): 6879–92. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09638-7>.

An, J L, P Zhang, T Y Ma, J R Liu, and W Y He. 2022. "Materials Today Sustainability The Synthesis of Nanoscale Structure of Calcia-Stabilized Zirconia Electrolytes by Lamellar Liquid Crystal Template Method" 18. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100144>.

Asamoto, Makiko, Shinji Miyake, Kazunari Sugihara, and Hidenori Yahiro. 2009. "Electrochemistry Communications Improvement of Ni / SDC Anode by Alkaline Earth Metal Oxide Addition for Direct Methane – Solid Oxide Fuel Cells." *Electrochemistry Communications* 11 (7): 1508–11. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2009.05.042>.

Cai, Weizi, Jiang Liu, Fangyong Yu, Qian Zhou, and Yapeng Zhang. 2017. "ScienceDirect A High Performance Direct Carbon Solid Oxide Fuel Cell Fueled by Ca-Loaded Activated Carbon." *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (33): 21167–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.229>.

Ce, F Gd. 2024. "Enhanced Performance of Solid Oxide Fuel Cells Using Highly Conductive." *Journal of Power Sources* 612 (May): 234810. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234810>.

Dizaj, Ramin Babazadeh, Andreas Heyden, Dong Ding, and Fanglin Chen. 2024. "A Redox-Reversible A/B-Site Co-Doped BaFeO₃ Electrode for Direct Hydrocarbon Solid Oxide Fuel Cells," 14087–98. <https://doi.org/10.1039/d4ta01957a>.

Du, Xu, Songbo Li, Shengli An, Liangmei Xue, and Yang Ni. 2022. "Evaluation of Nd(0.8-x)Sr(0.2)Ca (x) CoO(3-δ) (x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2) as a Cathode Material for Intermediate-Temperature Solid Oxide Fuel Cells." *RSC Advances* 12 (27): 17379–89. <https://doi.org/10.1039/d2ra02546a>.

Fu, Shize, Fupeng Cheng, Ruizhu Li, Yutian Yu, and Chao Jing. 2025. "Performance of Al₂O₃ Reinforced BaO-SiO₂-CaO Glass as Sealing Materials for Solid Oxide Fuel Cells" 51 (May): 34106–14.

Hasegawa, Masakatsu. 2014. "Chapter 3.3 - Ellingham Diagram." In *Treatise on Process Metallurgy*, edited by Seshadri Seetharaman, 507–16. Boston: Elsevier.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096986-2.00032-1>.

Losilla, Enrique R, and David Marrero-l. 2024. “Exploring Alkali Metal Doping in Solid Oxide Cells Materials : A Comprehensive Review” 493 (May). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152832>.

Mogensen, Mogens, Nigel M Sammes, and Geoff A Tompsett. 2000. “Physical , Chemical and Electrochemical Properties of Pure and Doped Ceria” 129:63–94.

Momin, Naeemakhtar, and J Manjanna. 2022. “Materials Advances Synthesis and Ionic Conductivity of Calcium-Doped Ceria Relevant to Solid Oxide Fuel Cell Applications †,” 8780–91. <https://doi.org/10.1039/d2ma00868h>.

Qu, Jifa, Wei Wang, Yubo Chen, Xiang Deng, and Zongping Shao. 2016. “Stable Direct-Methane Solid Oxide Fuel Cells with Calcium-Oxide-Modified Nickel-Based Anodes Operating at Reduced Temperatures.” *Applied Energy* 164 (5): 563–71. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.014>.

Ren, Haishen, Huixing Lin, and Ye Jin. 2025. “Low Thermal Stress and Excellent Gas Tightness in BaO – CaO – Al₂O₃ – B₂O₃ – SiO₂ Glass-Ceramic for Long-Term ITSOFC Application,” no. September 2024, 1–16. <https://doi.org/10.1111/jace.20197>.

Takeguchi, Tatsuya, Yukimune Kani, Tatsuya Yano, and Ryuji Kikuchi. 2002. “Study on Steam Reforming of CH₄ and C₂ Hydrocarbons and Carbon Deposition on Ni-YSZ Cermets” 112:588–95.

Wang, Liang, Tian Xia, Liping Sun, Qiang Li, and Hui Zhao. 2023. “Solid Oxide Fuel Cells †,” 2339–44. <https://doi.org/10.1039/d2ra06750a>.

Yurchenko, Maksim, Alexey Suntsov, Elena Pikalova, Anton Sednev-lugovets, Elena Filonova, and Dmitry Medvedev. 2025. “Ca₃Co₄O₉ + δ with an Unusual Crystal Structure as a Basis of Modernized Oxygen Electrodes for Solid Oxide Fuel and Electrolysis Cells ☆.” *Chemical Engineering Journal* 522 (August): 167101. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.167101>.

Zhigachev, Andrey O, Maria A Alexeeva, Sergey I Bredikhin, Ekaterina V Tsipis, Irina I Zverkova, and Ekaterina A Agarkova. 2025. “Effect of SiO₂ / B₂O₃ Ratio on High-Temperature Behavior and Crystallization of BaO-CaO-SiO₂ -Al₂O₃ -B₂O₃ Sealants for SOFCs” 51 (February): 25371–78. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.03.221>.

BÖLÜM 4

SOLAR II MERKEZİ ALICILI GÜNEŞ KULE SANTRALİNDE RANKİNE ÇEVİRİMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

1. YAZAR ADI-(HASAN OKTAY)¹
2. YAZAR ADI-(MEHMET Z. IŞIK)²

Giriş

Küresel enerji talebindeki hızlanan artış ve iklim değişikliğini hafifletmenin aciliyeti, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru hızlı bir geçişi tetiklemiştir. Bunlar arasında güneş enerjisi, bolluğu, coğrafi dağılımı ve büyük ölçekli enerji üretim teknolojileriyle uyumluluğu nedeniyle özellikle caziptir (Behar & ark., 2013: 12). Fotovoltaik (PV) sistemler dağıtılmış üretimde baskın olsa da yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) santralleri, yüksek sıcaklıkta ısı sağlayabildikleri ve uzun süreli termal enerji depolamayı entegre edebildikleri için şebeke ölçekli elektrik üretiminde stratejik bir rol oynamaktadır (Ho & Iverson, 2014: 835).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-0917-7844

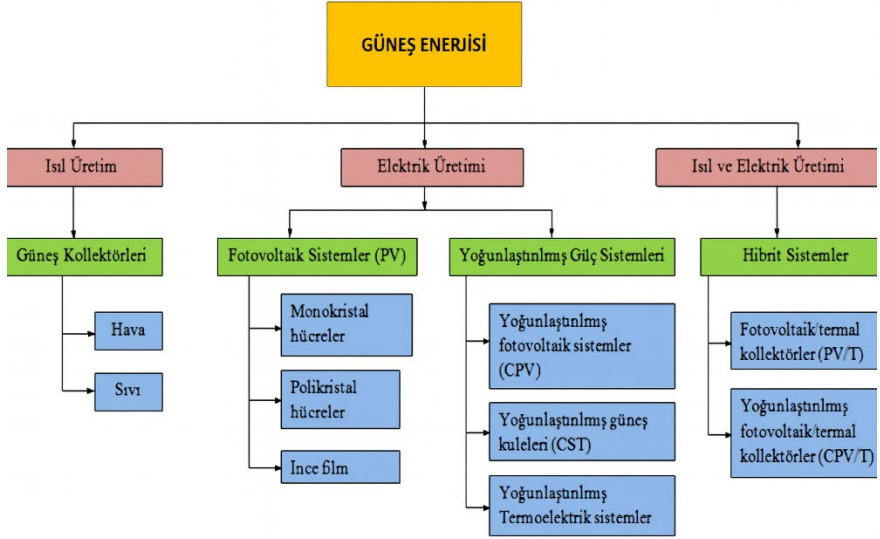
² Doç. Dr., Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-9753-6458

Güneş enerjisi teknolojileri genel olarak doğrudan ve dolaylı dönüşüm yolları olarak sınıflandırılır. Doğrudan güneş enerjisi dönüşümünde, PV cihazlar, yarı iletken bağlantılar kullanarak foton enerjisini elektrığe dönüştürür ve ara ısı aşaması olmadan dağıtılmış ve modüler üretim sağlar (Güney, 2016: 776). Buna karşılık, dolaylı (güneş-ısı) dönüşümde önce güneş radyasyonu yüksek sıcaklıkta ısıya dönüştürülür ve bu ısı daha sonra termodinamik bir döngü yoluyla mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülür (Ho & Iverson, 2014: 835).

Dolaylı güneş enerjisi teknolojileri, düşük ve orta sıcaklıkta ısı temini için düz plakalı ve vakumlu tüp kolektörlerin yanı sıra, erimiş tuzlar gibi gelişmiş ısı transfer sıvıları kullanarak 550-600 °C'nin üzerinde sıcaklıklara ulaşabilen CSP sistemlerini içerir. Bu yüksek sıcaklıklar, CSP sistemlerine daha büyük ekserji potansiyeli kazandırarak, verimli Rankine veya Brayton güç çevrimlerini ve sevk edilebilir elektrik üretimi için büyük ölçekli termal enerji depolamasının etkin entegrasyonunu mümkün kılar (Desideri & Campana, 2014: 422).

Bu teknolojiler arasında, heliostat tabanlı merkezi alıcı sistemler (güneş kuleleri), yüksek optik konsantrasyonu, yüksek çalışma sıcaklıklarını ve nitrat tuzları kullanılarak düşük maliyetli termal depolamayı birleştirdikleri için, şebeke ölçekli elektrik üretimi için en umut vadeden yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Mancini, 2015: 1). Güneş enerjisi dönüşümünün genel sınıflandırma çerçevesi Resim 1'de gösterilmiştir.

Resim 1 Güneş enerjisinden elde edilen ısı, elektrik ve hibrit üretim sistemleri



Kaynak: Bayrak, 2017

CSP Teknolojilerine Genel Bakış

- CSP teknolojileri, doğrudan doğal radyasyonu (DNI) bir alıcıya yoğunlaştırarak, bir güç döngüsünü çalıştıran yüksek sıcaklıkta ısı üretir. Yaygın olarak kabul edilen dört ana konfigürasyon vardır: parabolik oluklar, doğrusal Fresnel reflektörler, parabolik çanaklar ve merkezi alıcı sistemleri (Behar & ark., 2013: 12).
- Parabolik oluklu güneş enerjisi santralleri, güneş ışınlarını tek bir eksen boyunca takip eden ve güneş radyasyonunu odak çizgisinde bulunan bir alıcı tüpe odaklayan doğrusal odaklı kolektörler kullanır. Isı transfer sıvısı olarak genellikle sentetik yağlar kullanılır ve tipik çıkış sıcaklıkları 390–420 °C arasındadır.

- Doğrusal Fresnel sistemleri, oluklu sistemlere benzer ancak parabolik bir yüzeyi yaklaşık olarak oluşturmak için birden fazla düz veya hafifçe kavisli ayna kullanır; bu da biraz daha düşük optik verimlilik pahasına potansiyel maliyet düşüşleri sunar.
- Parabolik çanak sistemleri, genellikle küçük ölçekli Stirling veya Brayton motorlarıyla birlikte kullanılarak noktasal odaklama sağlar ve çok yüksek sıcaklıklara ulaşır, ancak şebeke ölçekli enerji üretimi için ölçeklenebilirliği sınırlıdır.
- Merkezi alıcı santralleri, güneşi iki ekseninde takip eden ve radyasyonu kulenin tepesinde bulunan bir alıcıya yönlendiren geniş bir heliostat alanı kullanır. Bu sistemler, özellikle erimiş tuzlar veya gelişmiş ısı transfer akışkanları kullanıldığında, oluklu veya Fresnel santrallerinden daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilir (Ho & Iverson, 2014: 835).

Termodinamik açıdan bakıldığında, merkezi alıcı tesisler en yüksek ekserji potansiyelini sunar çünkü ekserji içeriği sıcaklıkla artar. Bu, güç bloğunda daha yüksek ısı-elektrik dönüşüm verimlilikleri sağlar ve kule sistemlerini süperkritik Rankine veya Brayton çevrimleriyle entegrasyonu için özellikle cazip hale getirir (Kalogirou, 2023).

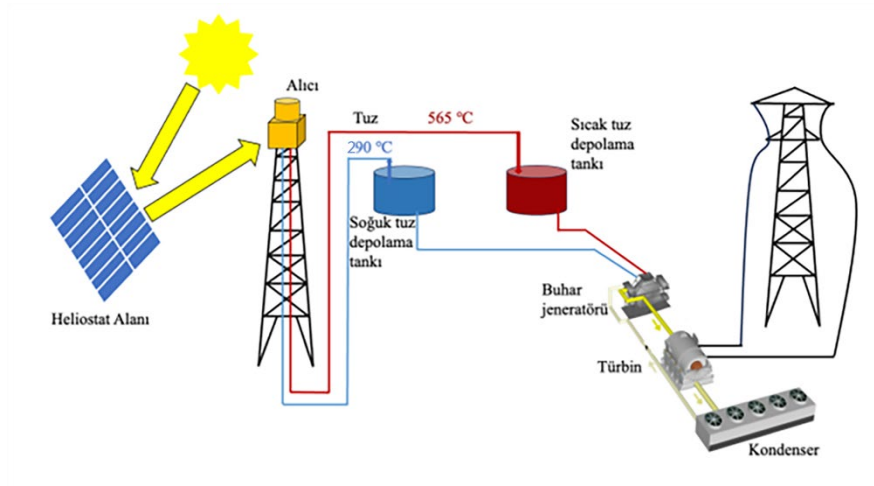
Merkezi Alıcılı CSP Sistemleri

Merkezi alıcılı güneş enerjisi sistemleri, geniş bir alana yayılmış ve tek tek odaklanabilen heliostat aynalardan oluşur. Bu aynalar, doğrudan güneş ışınımını kule üzerine yerleştirilmiş bir merkezi alıcıya yönlendirerek sabit bir noktada yoğunlaştırır. Alıcı içerisinde su/buhar, erimiş nitrat tuzları, sıvı metaller veya hava gibi bir ısı transfer akışkanı (HTF) dolaşır ve CSP enerjisi bu akışkan tarafından hacimsel olarak soğutulur. Elde edilen yüksek sıcaklıktaki

ısı enerjisi, elektrik üretimi amacıyla bir Rankine güç çevrimine aktarılır. Heliostatlar, bilgisayar kontrollü izleme sistemleri sayesinde gün boyunca alıcıya maksimum ışınımın yönlendirilmesini sağlar (Behar & ark., 2013: 12).

Resim 2’de tipik bir güneş kulesi santralinin şematik gösterimi verilmiştir. Bu tür sistemler temel olarak; heliostat alanı, merkezi alıcı, sıcak ve soğuk tuz tankları, ısı değiştirici, buhar türbini, kondenser, sirkülasyon pompası ve besleme suyu sistemi gibi alt bileşenlerden oluşmaktadır.

Resim 2 Güneş kulesi santralinin şematik diyagramı



Kaynak: Leblebicioğlu, 2017

Güneş kulelerinde heliostat alanının tasarımı, gölgeleme, engelleme ve kosinüs kayıplarını en aza indirirken arazi kullanımını ve yapısal maliyetleri azaltacak şekilde genellikle radyal-kademeli veya çevreleyici düzenlerde yapılmaktadır (Collado & Guallar, 2013: 142). Merkezi alıcılı sistemlerde ısı transfer verimini artırmak ve ısı kayıpları azaltmak amacıyla farklı alıcı tipleri ve HTF üzerine kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür. Alıcılar genel olarak dış (external) ve boşluklu (cavity) olarak sınıflandırılırken, hacimsel

(volumetric) alıcılar doğrudan emilim yoluyla daha yüksek sıcaklıklara ulaşmayı hedeflemektedir (Ho & Iverson, 2014: 835).

HTF olarak en yaygın kullanılan çözümlerden biri, yaklaşık %60 NaNO_3 ve %40 KNO_3 içeren erimiş nitrat tuzu karışımıdır. Bu akışkan, 565–600 °C'ye kadar termal kararlılık sunması ve çift tanklı termal enerji depolama sistemleriyle uyumlu çalışması nedeniyle ticari uygulamalarda tercih edilmektedir (Gil & ark., 2010: 31). Bununla birlikte, yüksek donma noktası (~220 °C) tasarım aşamasında etkin yalıtım ve donma koruma önlemlerini zorunlu kılmaktadır (Pacheco, Showalter & Kolb, 2002: 153).

Merkezi alıcılı güneş kulesi santrallerinde elektrik üretiminin temelini oluşturan buhar çevrimleri, sistem performansının belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, aşağıdaki bölümde Solar II güç santralinin Rankine çevrimi temel alınarak, çevrimin termodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

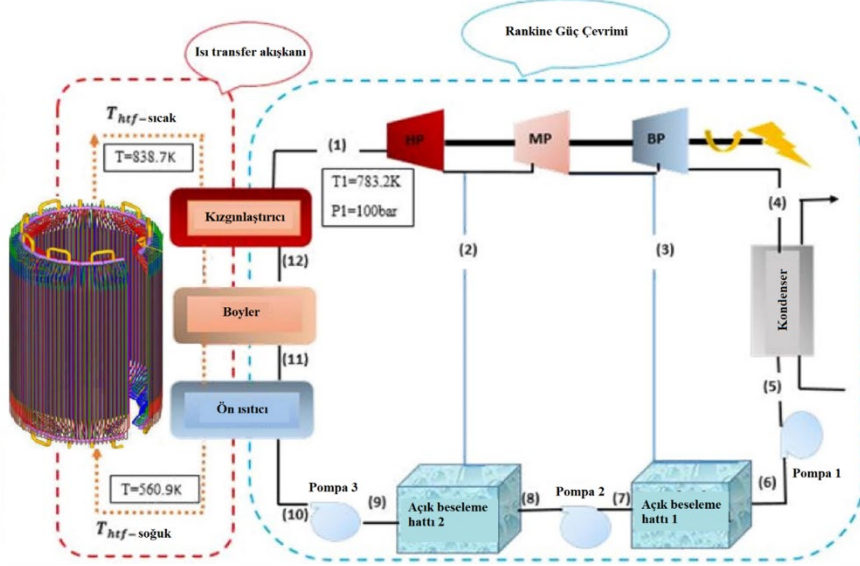
Solar II Güç Santrali Rankine Çevrimi Hesaplamaları

Solar II merkezi alıcı sisteminden gelen ısı güç, bir elektrik enerjisi üretim çevrimini yürütmek için kullanılmaktadır. Söz konusu uygulaması için seçilen en yaygın üretim çevrimi Rankine buhar çevrimidir. Bu çevrim, merkezi alıcı HTF tarafından sağlanan ısının, gün boyunca belirli kütle debisiyle ısı depolamadan gelen birleşik giriş enerjisi ile türbinlerde elektrik gücüne dönüştürülmesini sağlar. Böylece Rankine çevrim modeli herhangi bir boyut döngüsünde uygulanabilmektedir.

Resim 3, Solar II güç santralinde uygulanan buhar türbinli Rankine çevriminin sadeleştirilmiş akış şemasını sunmaktadır. Sistem; güneş kulesi alıcısı, buhar ile HTF arasında ısı transferinin gerçekleştiği bir dizi ısı değiştiriciyi (ön ısıtıcı, ara ısıtıcı (boyler) ve kızgınlaştırıcı), yüksek (HP), orta (MP) ve düşük basınçlı (LP) olmak üzere çok kademeli buhar türbinlerini, bir kondenser, iki adet besleme suyu ısıtıcısını ve bu bileşenler arasında konumlandırılmış

üç kademeli pompa grubunu içermektedir. Bu yapı sayesinde çevrim, yaklaşık 10 MW net elektrik gücü üretecek şekilde tasarlanmıştır. (Pacheco & ark., 2002).

Resim 3 CSP güç bloğunun modellenmesinde esas alınan Rankine çevriminin konfigürasyonu

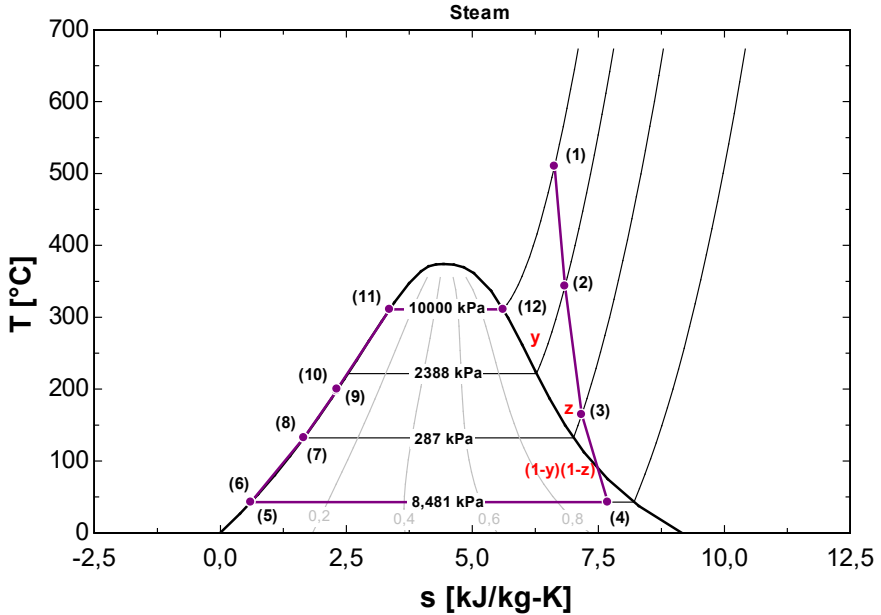


Çevrim tasarımı yapılırken tüm kondenser, eşanjör ve açık su besleme hatlarındaki basınç düşüşleri ihmal edilmiştir. Çevrim verimliliğinin bu basınçlara bağımlılığı nispeten zayıf olduğu literatürde belirlenmiştir. Solar II merkezi alıcı sisteminde kullanılan HTF eriyik bir tuz (%60 Na-NO₃-40% KNO₃) olup Rankine çevriminin çalışma akışkanı ise buhardan oluşmaktadır. HTF'nin termofiziksel özellikleri Kaynak'ta (Wang & ark., 2015: 235) verilmiştir.

HTF'nin eşanjörlerde ısıyı suya aktarması şu şekilde gerçekleşir: Su öncelikle ön ısıtıcıdan geçirilerek ısıtılır. Ardından, ara ısıtmada buharlaştırılarak kızgınlaştırıcı çıkışında kızgın buhar elde edilir. Elde edilen kızgın buhar öncelikle HP türbinini çalıştırır

ve büyük bir kısmı MP türbini besler. HP türbininden ayrılan buharın bir kısmı ise açık besleme suyu ısıtıcısı 2'deki (y) suyu ısıtmak için kullanılır. MP türbin çıkışında, açık besleme suyu ısıtıcısı 1'deki suyu ısıtmak için bir miktar buhar (z) kullanılır. Buharın geri kalanı LP türbinini çalıştırır. Çıkan buhar, suyla soğuyan kondensere boşaltılır. Yoğuşan su buharı 287 kPa basınca pompalanır ve açık besleme suyu ısıtıcısı 1'den geçer. Daha sonra su 2.38 MPa basınçta ikinci açık besleme suyu ısıtıcısı 2'ye pompalanır. Ardından, çevrimi tamamlamak ve ön ısıtıcıya geri dönmek için suyun basıncını 10 MPa'a yükselten üçüncü bir pompa devreye girer. Solar II güç çevrimi şemasından uyarlanan çevrim konfigürasyonuna ait hesaplanan sıcaklık-entropi (T-s) diyagramı Grafik 1'de sunulmuş olup, çevrime ait parametrelerinin sayısal değerleri Tablo 1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Grafik 1 Rejenerasyonlu Rankine çevrimi için sıcaklık-entropi diyagramı



Tablo 1 Solar II CSP güç santralinin parametreleri

Parametreler	Değerler
Eriyik tuz kütleli debi ($\dot{m}_{HTF}$) (kg/s)	82,5
Su buharı kütleli debi ($\dot{m}_{su}$) (kg/s)	13,67
HP giriş sıcaklığı (T_1) (°C)	510,1
HP giriş basıncı (P_1) (MPa)	10
Pompa 1 giriş basıncı (P_5) (kPa)	8,481
Kızgınlaştırıcı çıkış sıcaklığı ($T_{htf,h}$) (°C)	565,6
Ön ısıtıcı giriş sıcaklığı ($T_{htf,c}$) (°C)	287,5
Tesisin gücü (MW)	10
Açık besleme hattı 2'ye giren su oranı (y)	0,11
Açık besleme hattı 1'e giren su oranı (z)	0,1447
Türbinlerin izentropik verimliliği (%)	0,7
Pompaların izentropik verimliliği (%)	0,695
Sistem ısı verimliliği (η_t) (%)	0,33

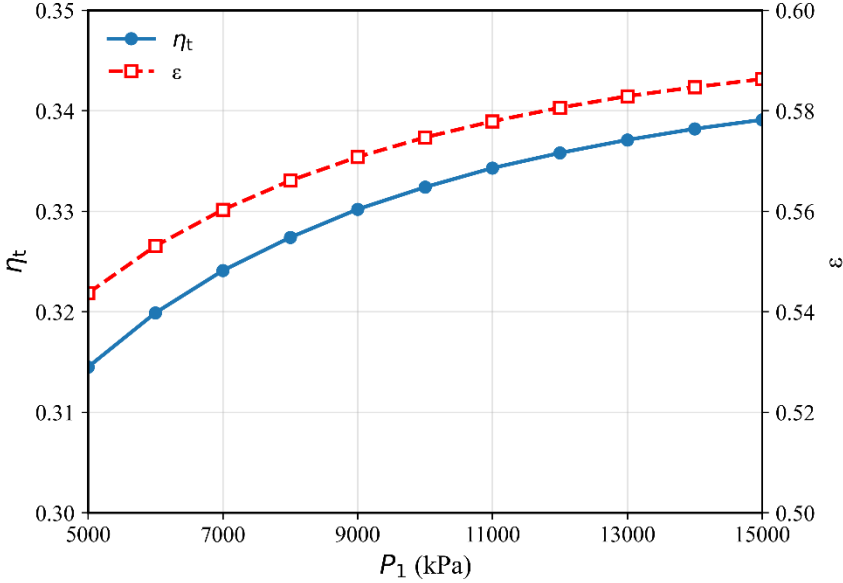
Kaynak: Pacheco & ark., 2002

Tablo 1 incelendiğinde güç santral verimliliği %33'e eşit olup belirlenen bu verimlilik, bir Rankine güç çevrim verimliliğiyle karşılaştırıldığında nispeten düşük kalmaktadır. Genel olarak, buhar türbini ile elektrik üretimi, çevrimin verimliliğini artırmak için birtakım teknolojilere de ihtiyaç duymaktadır. Bundan sonraki bölümde, tam kapasitede çalışan bir Solar II santralinde bulunan her bir parametrenin performans etki değeri, enerji ve ekserji verimliliklerinin belirlenmesi kısımları hesaplanarak incelenmiştir. Çevrimin farklı noktalarındaki basınç ve sıcaklıklar kullanılarak buhar türbin-alıcı çevriminin termodinamik modellemesi Kaynak'ta (Seviptekin, 2022) verilmiş olup ilgili tüm hesaplamalar Mühendislik Denklem Çözücü (EES) yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında, Solar II merkezi alıcılı CSP sistemi için tasarım şartları, parametreleri, güç çevrimi analizleri yapılarak sistemsel olarak incelenmiştir.

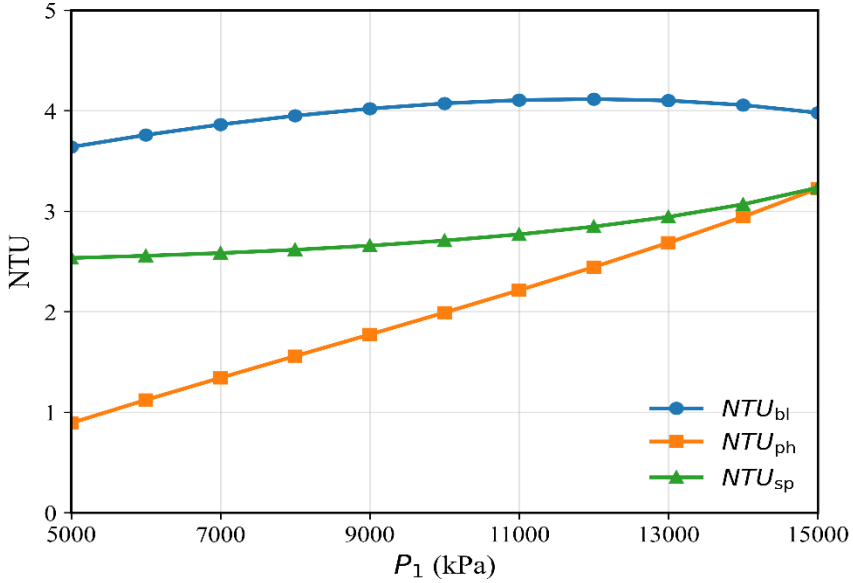
Grafik 2 HP türbin giriş basınç değerlerinin çevrimin enerji-ekserji verimliliğine etkisi



Grafik 2, HP türbin giriş basıncının (P_1) Rankine çevriminin hem enerji hem de ekserji verimlilikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. P_1 basıncı 5 MPa'dan 15 MPa'ya yükseldikçe, enerji verimliliği %31,5'ten %33,9'a sürekli artmakta ve bu da yaklaşık %7,8'lik genel bir nispi iyileşmeye karşılık gelmektedir. Ekserji verimliliği için de benzer bir eğilim gözlemlenmekte olup, aynı basınç aralığında %54,4'ten %58,6'ya yükselmekte ve bu da yaklaşık %7,8'lik bir artışa karşılık gelmektedir. I. ve II. yasa verimliliklerindeki eş zamanlı iyileşme, türbin giriş basıncının artırılmasının sadece sağlanan ısıya göre net iş çıktısını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çevrimdeki genel tersinmezlikleri azaltarak çevrimin termodinamik kalitesini de iyileştirdiğini göstermektedir. Bu durum, ısı ilavesinin ortalama sıcaklık seviyesindeki artışa bağlanabilir; bu da aynı anda enerji performansını iyileştirerek sağlanan ekserji miktarını yükseltmektedir. Sonuç olarak, daha

yüksek türbin giriş basınçları, daha verimli ve termodinamik olarak daha tutarlı bir Rankine çevrimi çalışmasını sağlamaktadır.

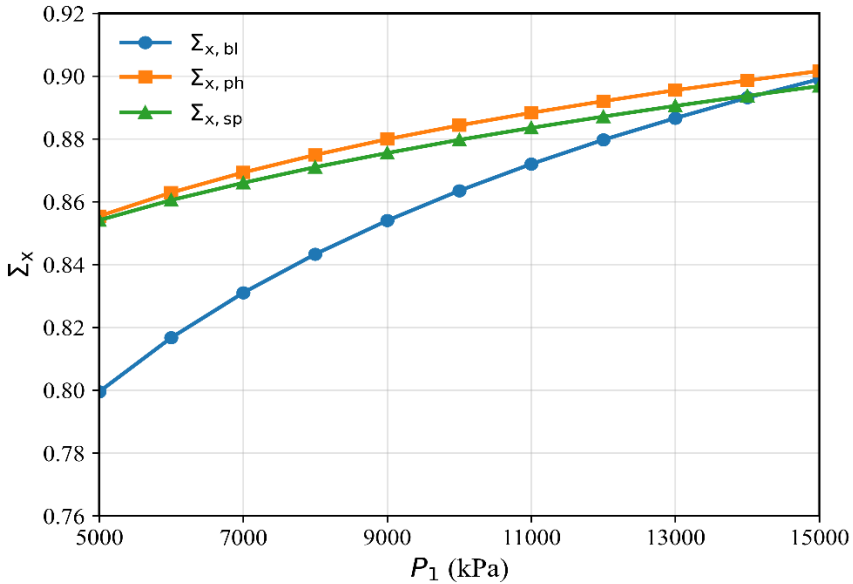
Grafik 3 HP türbin giriş basınç değerlerinin boyler (bl), ön ısıtma (ph) ve kızgınlaştırıcının (sp) ısı transfer birim sayısına etkisi



Grafik 3, Solar II merkezi alıcılı Rankine çevriminde boyler, kızgınlaştırıcı ve ön ısıtıcının transfer birimi sayısının (NTU), P_1 basıncına bağlı olarak değişimini göstermektedir. P_1 basıncı 5 MPa'dan 15 MPa'a yükseldikçe, üç ısı eşanjörünün de NTU değerleri genel olarak artan bir eğilim göstermekte olup, bu da minimum ısı kapasitesi oranına (C/C_{min}) göre ısı transfer yeteneğinin arttığını göstermektedir. Kazan, sürekli olarak orta-yüksek NTU aralığında (3,6-4,1) çalışmakta olup, zaten büyük ısı transfer yüzeyi ve çevrimdeki baskın rolü nedeniyle basınca karşı sınırlı bir duyarlılık göstermektedir. Buna karşılık, ön ısıtıcı ve kızgınlaştırıcı, özellikle daha yüksek basınçlarda, artan kütle akış hızlarının, değişen ısı kapasitesi oranlarının ve ısı transfer akışkanları arasındaki iyileştirilmiş ısıl eşleşmenin birleşik etkilerini yansıtarak

çok daha güçlü bir NTU artışı göstermektedir. Ön ısıtıcının NTU'daki belirgin artış, P_1 basıncı arttıkça duyarlı ısı geri kazanımına olan artan katkısını vurgulamaktadır. Bununla birlikte, NTU değerlerinin yaklaşık 3'ü aşması, etkinlik açısından azalan getiriler bölgesine karşılık geldiğinden, NTU'daki daha fazla artış, ısıl performansta marjinal kazanımlar anlamına gelirken, potansiyel olarak daha yüksek sermaye maliyetlerine yol açabilir. Bu nedenle, basınç artış ısı eşanjörlerinin ısıl entegrasyonunu iyileştirse de sonuçlar, yüksek basınçlı güneş enerjisiyle çalışan Rankine çevrimleri tasarlanırken ekonomik ve termodinamik açıdan eş zamanlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Christian & Ho, 2012: 227).

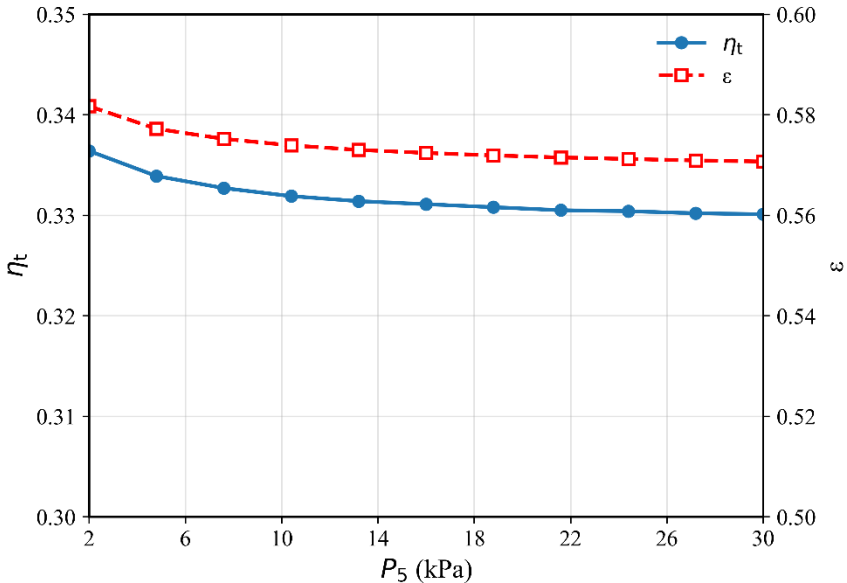
Grafik 4 HP türbin giriş basınç değerlerinin boyler, ön ısıtma ve kızgınlaştırıcının ekserjetik verimlilikleri üzerindeki etkisi



Grafik 4 ise solar Rankine çevriminde P_1 basıncının boyler, ön ısıtıcı ve kızgınlaştırıcının ekserjetik verimlilikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Basınç 5 MPa'dan 15 MPa'ya yükseldikçe,

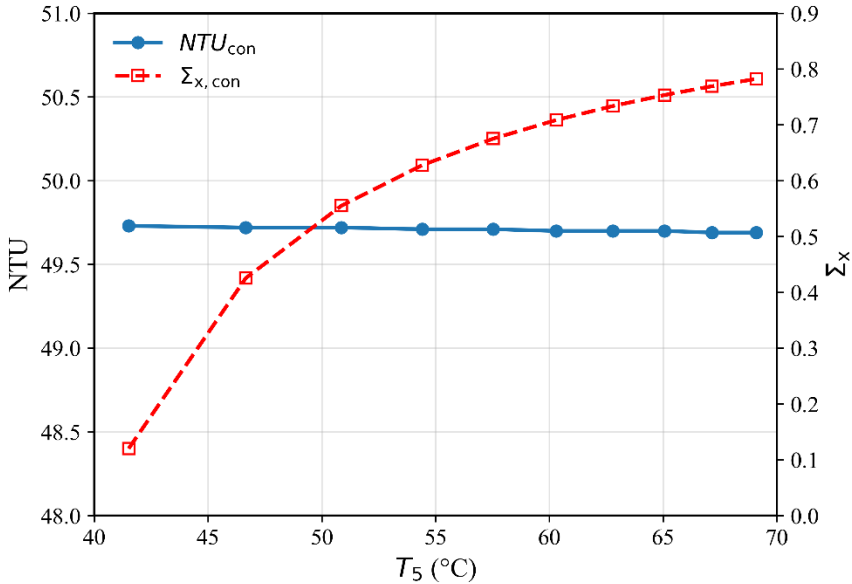
kazanın ekserjetik verimliliği %80'den %90'a yükselirken, ön ısıtıcı ve kızgınlaştırıcı verimlilikleri sırasıyla %85,5'ten %90,2'ye ve %85,4'ten %89,7'ye artmıştır. Tüm bileşenlerdeki ekserjetik verimlilikteki süregelen artış, çevrim daha yüksek basınç seviyelerinde çalışırken tersinmezliklerde sistematik bir azalmayı göstermektedir. Bu davranış, ısı kaynağı ile çalışma akışkanı arasındaki ısı uyumu artıran, ısı eşanjörlerinde entropi üretimini azaltan ve ısıнын sağlandığı ortalama sıcaklığın yükselmesine bağlanabilir. Boylerde gözlemlenen daha güçlü nispi iyileşme, toplam ekserji kaybına yaptığı baskın katkıyı yansıtırken, ön ısıtıcı ve kızgınlaştırıcı zaten nispeten yüksek ekserji verimliliklerinde olmalarından kaynaklı daha ılımlı kazanımlar sergilemektedir. Genel olarak, P_1 basıncının artırılması, güneş enerjisiyle çalışan Rankine çevrimi boyunca termodinamik olarak daha tutarlı bir ısı ekleme sürecini sağlamaktadır.

Grafik 5 Pompa-1 giriş basınç değerlerinin çevrimin enerji-ekserji verimliliğine etkisi



Grafik 5, pompa-1 giriş basıncının (P_5) Rankine çevriminin enerji ve ekserji verimlilikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. P_5 2 kPa'dan 30 kPa'a yükseldikçe, enerji verimliliği %33,6'dan %33'e düşmekte ve bu da tam olarak %1,9'lık bir azalmaya karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, ekserji verimliliği de %58,2'den %57,1'e düşmekte ve bu da aynı basınç aralığında tam olarak %1,9'luk bir azalmayı temsil etmektedir. I. Ve II. yasa verimliliklerindeki tutarlı azalma, pompa-1 giriş basıncının sistematik olarak artmasının çevrim performansını düşürdüğünü göstermektedir. Bu davranış, öncelikle kondenser basıncındaki ve doyma sıcaklığındaki artışa bağlanmaktadır; bu da türbin genleşme oranını ve net özgül iş çıktısını azaltırken aynı zamanda ısı atım sürecindeki tersinmezlikleri yoğunlaştırmaktadır. Sonuç olarak, pompa giriş basıncının artması, mutlak verimlilik değişimleri sınırlı kalsa bile, Rankine çevriminin hem enerji hem de ekserji performansında ölçülebilir bir bozulmaya götürmektedir.

Grafik 6 Kondenser çıkış sıcaklığının çevrimin enerji-ekserji verimliliğine etkisi



Grafik 6, Rankine çevriminde kondenser çıkış sıcaklığının (T_5) kondenser NTU'su ve ekserjetik verimliliği üzerindeki etkisini göstermektedir. Kondenser sıcaklığı 41,5 °C'den 69,1 °C'ye yükseldikçe, NTU yaklaşık 49,7 gibi çok yüksek bir seviyede neredeyse sabit kalmakta ve ihmal edilebilir bir düşüş göstermektedir. Bu durum, kondenserin son derece yüksek NTU rejiminde çalıştığını, ısı transfer sürecinin zaten asimptotik etkinlik sınırına yakın olduğunu ve bu nedenle orta dereceli sıcaklık değişimlerine karşı zayıf bir duyarlılığa sahip olduğunu doğrulamaktadır. Buna karşılık, faydalı ekserji çıkışının toplam ekserji girişine oranı olarak tanımlanan ekserjetik verimlilik, aynı sıcaklık aralığında belirgin bir artış göstermektedir. Bu iyileşme, öncelikle ekserji yıkımının azalması ve yoğunlaşma sürecinin daha yüksek bir sıcaklık seviyesinde gerçekleşmesiyle atılan ısıntının ekserji içeriğinin artmasıyla ilişkilidir. Isının çevreye atıldığı sıcaklığın yükseltilmesiyle, entropi üretimi azalır ve ısı transfer sürecinin termodinamik kalitesi artar. Sonuç olarak, NTU'daki hafif düşüşe rağmen, ekserjetik verimlilikteki önemli artış, kondenser ve sistemin termodinamik performansında genel bir iyileşmeyi açıkça göstermektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, Solar II merkezi alıcılı güneş–buhar santralinin Rankine çevrimi I. ve II. yasa açısından ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, türbin giriş basıncının artırılmasının ortalama ısı ekleme sıcaklığını yükselttiğini ve çevrimdeki toplam tersinmezlikleri azaltarak hem enerji hem de ekserji verimliliklerini anlamlı biçimde iyileştirdiğini göstermektedir. Artan basınçla birlikte boyler, ön ısıtıcı ve kızgınlaştırıcının NTU değerleri yükselmekte; ancak sistemin orta–yüksek ve yüksek NTU rejimlerinde çalışması, ilave ısı transferi kazanımlarının sınırlı kaldığını ve teknik–ekonomik optimizasyonun önemini ortaya koymaktadır. Kondenserin son derece yüksek NTU

rejiminde çalıştığı, bu nedenle sıcaklık değişimlerinin ısı transfer miktarını önemli ölçüde etkilemediği; buna karşın yoğunlaşmanın daha yüksek sıcaklık seviyesinde gerçekleşmesi sayesinde entropi üretiminin azaldığı ve ekserjetik verimliliğin belirgin biçimde arttığı belirlenmiştir. Buna karşılık, pompa-1 giriş basıncının artırılması türbin genleşme oranını düşürerek hem enerji hem de ekserji verimliliklerini olumsuz etkilemektedir. Genel olarak sonuçlar, yüksek performanslı CSP–Rankine çevrimlerinin doğru değerlendirilmesi ve geliştirilmesi için klasik ısı transfer parametrelerinin ekserji temelli analizlerle birlikte ele alınmasının zorunlu olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, burada sunulan analizler, CSP sistemlerinin verimlilik artışı, ekserji kayıplarının azaltılması ve rekabetçi, sevk edilebilir temiz enerji üretimi hedeflerine ulaşmasında önemli katkılar sağlamaktadır.

Kaynakça

GeçBayrak, F. (2017). Fotovoltaik panellere bütünleştirilmiş farklı pasif yöntemlerin sistem verimliliğine etkisinin sayısal ve deneysel analizi [Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ].

Behar, O., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2013). A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and sustainable energy reviews*, 23, 12-39.

Christian, J. M., & Ho, C. K. (2012). CFD simulation and heat loss analysis of the Solar Two power tower receiver. In *Proceedings of the ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability & 10th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference* (pp. 227–235).

Collado, F. J., & Guallar, J. (2013). A review of optimized design layouts for solar power tower plants with campo code. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 142-154.

Desideri, U., & Campana, P. E. (2014). Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant. *Applied energy*, 113, 422-433.

Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 31-55.

Guney, M. S. (2016). Solar power and application methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 776-785.

Ho, C. K., & Iverson, B. D. (2014). Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 835-846.

Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: processes and systems*. Elsevier.

Leblebicioğlu, E. (2017). Güneş Güç Kulesi Sistemleri. (21/12/2025 tarihinde <https://muhendistan.com/gunes-kulesi-sistemleri/> adresinden ulaşılmıştır).

Mancini, T.R. (2015). Introduction: Concentrating Solar Power Systems. In *Handbook of Clean Energy Systems*, J. Yan (Ed.).

Pacheco, J. E., Bradshaw, R. W., Dawson, D. B., De la Rosa, W., Gilbert, R., & Goods, S. H. (2002). Final test and evaluation results from the solar two project. SAND2002-0120, 1-294.

Pacheco, J. E., Showalter, S. K., & Kolb, W. J. (2002). Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants. *Journal of solar energy engineering*, 124(2), 153-159.

Seviptekin Kızar, M. (2022). Merkez alıcılı güneş kulesi sisteminin enerji ve ekserji analizi ve performans optimizasyonu [Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman].

Wang, H., Sivan, V. P., Mitchell, A., Rosengarten, G., Phelan, P., & Wang, L. (2015). Highly efficient selective metamaterial absorber for high-temperature solar thermal energy harvesting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137, 235-242

BÖLÜM 5

TERMOELEKTRİK MALZEMELERİN TERMOELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ALTERNATİF YÖNTEMLER İLE ÖLÇÜLMESİ

1. SİNAN ÇOBANER¹

2. M. ASİM KESERCİOĞLU²

¹ Arş. Gör., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği,
Orcid: 0009-0000-6821-4265

² Dr. Arş. Gör., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği,
Orcid: 0009-0003-3751-4224

Giriş

Termoelektrik olgular, sıcaklık farkının elektriksel gerilim üretmesi ya da elektrik akımı ile sıcaklık farkı oluşturulması prensiplerine dayanan fiziksel bir olaydır. Bu olgu ilk olarak 19. yüzyılda keşfedilen ve günümüzde enerji dönüşümü alanında önemli uygulamalara sahip olan Seebeck, Peltier ve Thomson etkileri ile tanımlanır (Çobaner, Kesercioğlu, & Aktaş, 2024).

Seebeck etkisi, 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedilmiş olup, iki farklı iletkenin uçları arasında sıcaklık farkı oluştuğunda elektrik gerilimi meydana gelmesi şeklinde tanımlanır (Binner, Unmüßig, Vergez, Bartel, & Schäfer-Welsen, 2024). Bu etki, Termoelektrik Jeneratörlerin (TEJ) temelini oluşturur ve atık ısıdan elektrik üretimi gibi enerji geri kazanım uygulamalarında sıklıkla kullanılır (Huang, Xing, Zheng, & Yao, 2024). Peltier etkisi ise 1834 yılında Jean Charles Peltier tarafından tanımlanmış ve Seebeck etkisinin tersi olarak, iki farklı iletken malzeme arasında bir elektrik akımı geçirildiğinde, malzeme birleşim noktalarında ısının soğutulması veya yayılması olayını ifade eder. Bu etki, Termoelektrik Soğutucuların (TES) temelini oluşturur. Thomson etkisi ise 1851 yılında Lord Kelvin (William Thomson) tarafından ortaya konmuş olup, homojen bir iletken içinde elektrik akımı ve sıcaklık gradyanı mevcut olduğunda, bu iletkenin boyunca ısı absorpsiyonu veya yayılımının oluştuğunu belirtir (Lee, 2013). Thomson etkisi, Seebeck ve Peltier etkilerini birbirine bağlayan ve termoelektrik olayların termodinamik açıklamasında tamamlayıcı rol oynayan bir olgudur.

Termoelektrik malzemeler bu üç temel etkinin bir araya gelmesiyle enerji dönüşümünü gerçekleştirebilir. Bu malzemelerin performansı genellikle boyutsuz bir parametre olan $zT = \frac{S^2 \sigma T}{k}$ ile ifade edilir; burada S Seebeck katsayısı, σ elektriksel iletkenlik, T mutlak sıcaklık ve k ısı iletkenliğidir (Chen, Shi, Zou, & Chen,

2022). Yüksek zT değerine sahip malzemeler hem elektrik üretimi hem de soğutma uygulamaları için daha verimli sistemlerin tasarlanmasını mümkün kılar.

Termoelektrik teknolojiler günümüzde birçok farklı alanda kullanılmaktadır. En bilinen uygulamalarından biri, elektronik bileşenlerin soğutulmasıdır (Zhang, Mui, & Tarin, 2009). Termoelektrik soğutucular, mikroişlemciler, lazer diyotlar ve hassas ölçüm cihazlarında pasif veya aktif soğutma sağlamak için kullanılır (Uysal & Çobaner, 2024). Kompakt yapıları ve hareketli parça içermemeleri sayesinde titreşimsiz, sessiz ve güvenilir bir soğutma çözümü sunarlar. Uzay ve savunma sanayilerinde, özellikle derin uzay görevlerinde kullanılan radyoizotop termoelektrik jeneratörler (RTG), Plütonyum-238 gibi radyoaktif kaynakların yaydığı ısıyı elektrik enerjisine dönüştürerek uzun ömürlü güç kaynağı sağlar. Bu jeneratörler, NASA'nın Voyager, Curiosity ve Perseverance görevlerinde başarıyla kullanılmıştır (Çobaner, Çerlek, & Han, 2024).

Otomotiv endüstrisinde ise egzoz gazlarının sıcaklığı termoelektrik jeneratörlerle elektrik enerjisine dönüştürülerek batarya sistemlerine destek sağlanmakta ve genel yakıt verimliliği artırılmaktadır (Lan, Lu, Mu, Wang, & Zhai, 2023). Ayrıca, dizel jeneratörlerin ve kombi sistemlerinin atık ısılarının değerlendirilmesiyle konut veya endüstriyel tesislerde elektrik üretimi yapılabilmektedir. Medikal alanda termoelektrik cihazlar, taşınabilir ilaç soğutucuları, vücuda entegre sensörler ve giyilebilir sağlık izleme sistemlerinde kullanılmaktadır (Zaferani, Sams, Ghomashchi, & Chen, 2021). Yine giyilebilir teknolojiler kapsamında, vücut sıcaklığı ile çalışan enerji toplama sistemleri, düşük güçlü elektronik cihazları besleyerek pil ihtiyacını azaltmaktadır (Chen, Shi, Zou, & Chen, 2020). Bunların dışında güneş enerjisi sistemleriyle entegre termoelektrik modüller kullanılarak, güneş paneli yüzeylerinde oluşan atık ısıdan ek elektrik

üretimi sağlanabilmektedir (Özdemir, Köysal, Özbas, & Atalay, 2015).

Termoelektrik sistemlerin bazı önemli avantajları bulunmaktadır. Hareketli parça içermedikleri için mekanik aşınma problemi yoktur ve bakım gereksinimi düşüktür; bu da onları uzun ömürlü ve sessiz sistemler hâline getirir (Çobaner & Uysal, 2024). Ayrıca, boyutlarının küçük olması sayesinde kompakt uygulamalarda kullanılabilirler. Hem ısıdan elektriğe hem de elektrikten ısıya dönüşüm sağlayabilmeleri, onları çift yönlü enerji sistemlerinde avantajlı kılar. Ancak bazı sınırlayıcı dezavantajlar da mevcuttur. Mevcut termoelektrik malzemelerin çoğu düşük verimlilikle çalışmaktadır; bu da büyük ölçekli uygulamalarda ekonomik anlamda sınırlayıcı olabilir.

Termoelektrik malzemelerin enerji dönüşüm performansını belirleyen bu temel kavramsal çerçeve ortaya konulduktan sonra, malzemelerin gerçek uygulamadaki etkinliğini değerlendirebilmek için Seebeck, Peltier ve Thomson katsayılarının nicel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu katsayılar, bir termoelektrik malzemenin ısı–elektrik etkileşimlerini karakterize eden en önemli büyüklükler olup hem modelleme çalışmalarında hem de deneysel tasarım süreçlerinde kritik bir rol oynar. Dolayısıyla, termoelektrik olayların teorik temellerinden deneysel ölçüm tekniklerine doğru ilerlerken, bu katsayıların nasıl elde edildiğine ilişkin yöntemlerin ayrıntılı biçimde incelenmesi çalışmanın bütünlüğü açısından önem taşımaktadır. Bu bölümde malzemelerin termoelektrik özelliklerini belirlemede kullanılan cihazlar yerine alternatif yöntemler incelenecektir. Bu doğrultuda, aşağıdaki bölümde Seebeck, Peltier ve Thomson katsayılarının belirlenmesinde kullanılan temel prensipler ve uygulanan yöntemler sistematik olarak ele alınmaktadır.

Seebeck Katsayısı (S)

Seebeck katsayısı ölçülürken farklı yöntemler kullanılır. Bu bölümde kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin uygulama şekilleri incelenecektir.

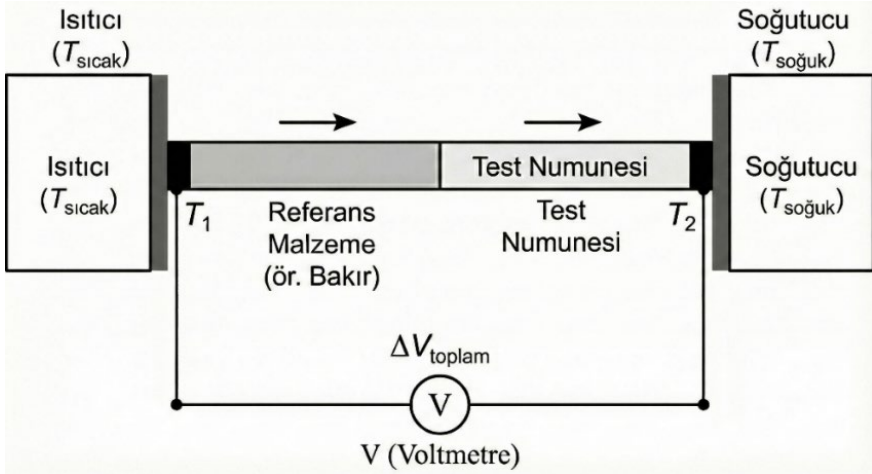
Seebeck katsayısı için kullanılan alternatif ölçüm yöntemleri;

- Diferansiyel Yöntem
- Yarı Kararlı Durum Yöntemi
- Statik Doğru Akım Yöntemi

Diferansiyel Yöntem (Differential Method)

Bu yöntemde, Seebeck katsayısı bilinmeyen bir malzemenin Seebeck katsayısı, Seebeck katsayısı bilinen referans malzeme ile karşılaştırarak ölçülür (Mishra, Bhattacharjee, & Anwar, 2015). Deney düzeneği şekil 1’de gösterilmiştir.

Şekil 1. Diferansiyel ölçüm yöntemi deney şeması.



Uygulama şekli;

- Test numunesi ve referans malzeme (örneğin bakır) seri olarak bağlanır.

- İki uç arasına bir sıcaklık farkı uygulanır.
- Uçlar arasındaki toplam termoelektrik gerilim ölçülür.
- Referans malzemenin Seebeck katsayısı bilindiği için:

$$S_{numune} = \frac{V_{ölçülen}}{\Delta T} + S_{referans}$$

Formülüyle numunenin Seebeck katsayısı hesaplanır. Bu ölçüm yönteminin avantajı, doğru referansla yüksek hassasiyet sağlamaktır.

Yarı Kararlı Durum Yöntemi (Quasi-Steady-State Method)

Bu yöntem, sıcaklık farkı zamanla çok yavaş değişirken ölçüm yapılmasını içerir; tam kararlı hâl beklenmez, ancak sıcaklık değişimi oldukça yavaştır (Masoumi, Noori, & Pakdel, 2024). Deney düzeneği şekil 1'deki gibi diferansiyel yöntem ile aynıdır fakat ölçüm yöntemi farklıdır.

Uygulama şekli;

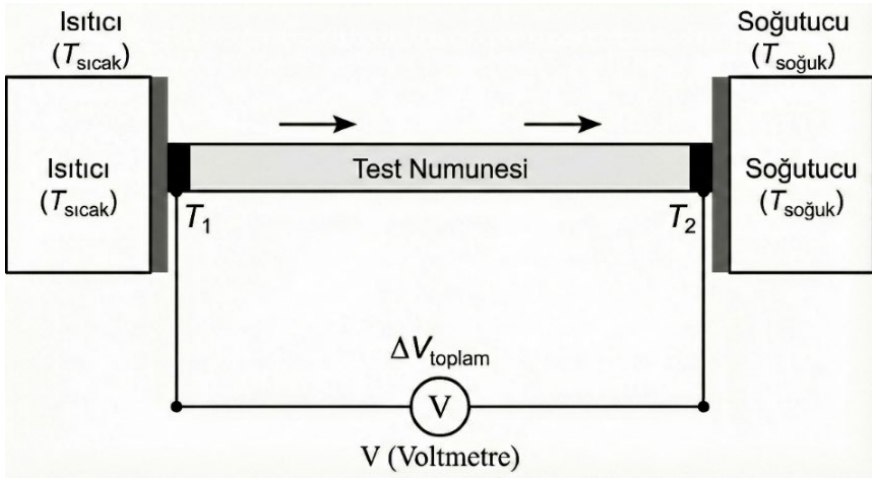
- Numuneye iki uçtan sıcaklık farkı uygulanır, ancak sistem tam kararlı hâle gelmeden ölçüm yapılır.
- Sıcaklıklar ve gerilim zamana bağlı olarak izlenir.
- Her an için $S = \frac{V(t)}{\Delta T(t)}$ hesabı yapılır.
- Ortalama alınarak nihai değer belirlenir.

Bu ölçüm yönteminin avantajı, ölçüm süresi daha kısadır, sabit sıcaklık beklemek gerekmez.

Statik Doğru Akım Yöntemi (Static DC Method)

Sabit bir sıcaklık farkı oluşturularak gerilim doğrudan ölçülür. Deney düzeneği şekil 2'de gösterildiği gibidir.

Şekil 2. Statik doğru akım deney şeması.



Uygulama şekli;

- Numunenin iki ucu sabit sıcaklıklarla tutulur (T_1 ve T_2).
- Aradaki gerilim farkı (DC voltaj) ölçülür.
- Seebeck katsayısı:

$$S = \frac{V}{T_1 - T_2}$$

Formülüyle doğrudan hesaplanır.

Bu ölçüm yönteminin avantajı, uygulaması basittir. Dezavantajı ise temas dirençleri veya ortam sıcaklığı değişimleri ölçüm doğruluğunu etkileyebilir.

Bu üç yöntemi değerlendirdiğimizde en yaygın kullanılanı diferansiyel yöntemidir. Ayrıca ölçüm sistemleri çoğunlukla ASTM E3059-17 standardına uygun yapılır. Bu yöntemler arasında seçim yaparken malzemenin tipi, ölçüm ortamı, gerekli hassasiyet ve mevcut ekipman göz önüne alınmalıdır. Ölçüm sistemlerinin kalibrasyonu ve ısı kayıplarının kontrolü de güvenilir sonuçlar için oldukça kritiktir. Dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ölçüm sırasında sıcaklık farkı sabit ve düzgün bir şekilde uygulanmalı,

termocouple etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca farklı sıcaklık aralıklarında ölçüm alarak Seebeck katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi de incelenebilir.

Basitçe bir deney düzeneği kurulmak istenirse,

Gerekli ekipmanlar;

- Test edilecek termoelektrik malzeme (örneğin Bi_2Te_3)
- Referans malzeme (örneğin bakır)
- Hassas voltmetre (mikrovolt düzeyinde)
- 2 adet sıcaklık sensörü (örneğin termokupl)
- Isıtıcı blok (veya Peltier elemanı)
- Soğutucu (ısı emici, fanlı sistem olabilir)
- Isıl yalıtım malzemesi

Bu malzemeleri kullanarak deney düzeneği oluşturulabilir ve yukarıdaki yöntemlerden biri uygulanarak malzemenin Seebeck katsayısı ölçülebilir.

Peltier Katsayısı (II)

Peltier katsayısı da Seebeck katsayısı gibi farklı yöntemler ile ölçülür. Bu bölümde kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin uygulama şekilleri incelenecektir.

Ölçüm Yöntemleri

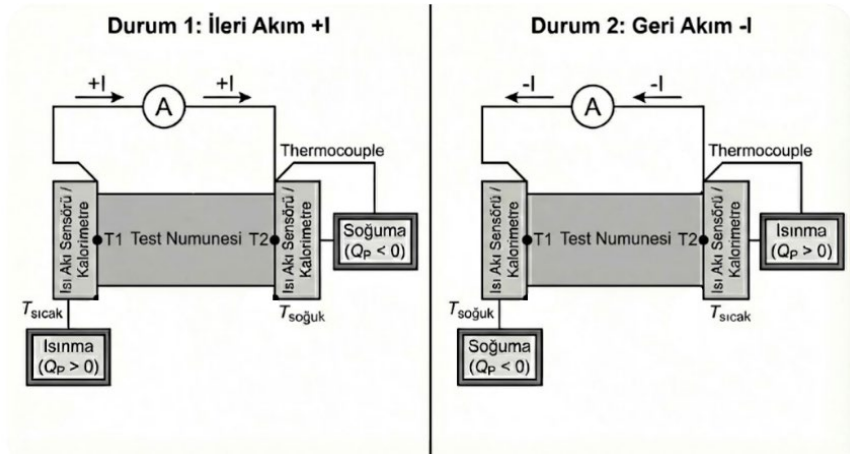
- Doğrudan Kalorimetrik Yöntem

•Geçici Yanıt Yöntemi

Doğrudan Kalorimetrik Yöntem (Direct Calorimetric Method)

Bu yöntem ayrıca akım tersleme yöntemi diye de adlandırılır. Peltier etkisinin doğrudan neden olduğu ısı değişimini ölçmek için kullanılır. Deney düzeneği şekil 3'teki gibidir. Numunenin uçlarına uygulanan elektrik akımı sonucu oluşan ısıyı, bir kalorimetre yardımıyla doğrudan ölçer. Bu yöntem, Peltier ısısının diğer ısı kaynaklarından (örneğin Joule ısısı) ayrıştırılmasıyla Π katsayısının hassas biçimde elde edilmesini sağlar (Brestovic, ve diğerleri, 2014).

Şekil 3. Doğrudan kalorimetrik yöntem deney şeması.



Uygulama şekli;

- Numunenin iki ucuna sabit bir elektrik akımı uygulanır.
- Uçlarda oluşan sıcaklık değişimi veya ısı akısı hassas bir kalorimetre ile ölçülür.
- Elektrik akımı ters çevrilerek ölçüm tekrarlanır, böylece Joule ısısı ve Peltier ısısı ayrıştırılır.
- Peltier etkisiyle taşınan ısı:

Olduğundan, ölçülen ısı ve bilinen akım kullanılarak Π hesaplanır.

Bu ölçüm yönteminin avantajı, en doğrudan ve fiziksel temelli yöntemdir. Dezavantajı ise çok hassas ısı ölçüm ekipmanı gerektirir; ısı kayıplarını minimize etmek zordur.

Geçici Yanıt Yöntemi (Transient Harman Method)

Temelde ZT (termoelektrik verimlilik) hesaplamaları için kullanılır; ancak Peltier etkisini de içerir. Numuneye ani bir akım darbesi uygulanır ve sıcaklık değişiminin zamanla verdiği geçici yanıt analiz edilir. Bu sıcaklık yanıtı, Seebeck, Peltier ve termal iletkenlik gibi parametreleri aynı anda tahmin etmeye olanak tanır (Rojo, ve diğerleri, 2015).

Uygulama şekli;

- Malzeme üzerine kısa süreli bir DC akım uygulanır.
- Bu akım, malzeme içinde hem Joule hem de Peltier ısısı üretir.
- Bu esnada oluşan sıcaklık profili zamanla izlenir.
- Akım kesildiğinde, sıcaklık değişimi analiz edilerek Seebeck, Peltier ve termoelektrik performans katsayısı ZT tahmin edilir.

Bu ölçüm yönteminin avantajı, Seebeck, Peltier ve termal iletkenlik aynı anda değerlendirilebilir. Dezavantajı, teorik analiz ve veri işleme gerektirir ve deney düzeneği karmaşıktır.

Bu ölçüm yöntemlerini incelediğimizde literatürde doğrudan kalorimetrik yöntemin sıklıkla kullanıldığını görebiliriz. Kalorimetrik yöntem, Peltier ısısı doğrudan ölçülür, ısı değişimi üzerinden hesap yapılır. Ayrıca Peltier katsayısı ile Seebeck katsayısı arasında Kelvin ilişkisi vardır:

$$\Pi = S \cdot T$$

Bu nedenle, Seebeck katsayısı ve sıcaklık biliniyorsa Peltier katsayısı teorik olarak da elde edilebilir.

Basitçe bir deney düzeneği kurulmak istenirse,

Gerekli ekipmanlar;

- Termoelektrik malzeme
- DC güç kaynağı (sabit ve ayarlanabilir)
- Isı akışı sensörü (veya diferansiyel termokupl)
- Soğutucu blok ve yalıtım
- Isı geçişini sınırlamak için seramik ara yüzey
- Akım ve gerilim ölçer (multimetre)

Bu malzemeler kullanılarak bir deney düzeneği oluşturulabilir ve yukarıdaki yöntemlerden biri kullanılarak Peltier katsayısı ölçülebilir. Dikkat edilmesi gereken bir husus da Joule ısısidir. Burada Joule ısısı ($I^2 R$) bu ölçümden çıkarılmalıdır. Peltier etkisi akım yönüne bağlı olarak ters işaretli ısı değişimi oluşturur, bu özellik doğrulama için kullanılır.

Thomson Katsayısı (μ)

Thomson katsayısı farklı yöntemler ile ölçülür. Bu bölümde kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin uygulama şekilleri incelenecektir.

Ölçüm yöntemleri;

- Sıcaklık gradyanı kullanılarak Thomson etkisi ölçme yöntemi

- Kendi kendini ısıtma yöntemi

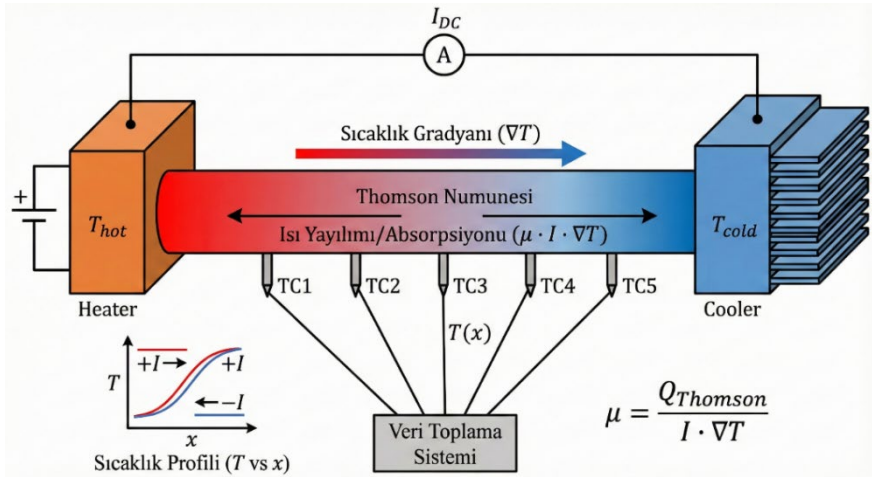
- Sıcaklık Eşleştirmeli Diferansiyel Ölçüm

Sıcaklık Gradyanı Kullanılarak Thomson Etkisi Ölçme Yöntemi

Numuneye sabit bir elektrik akımı uygulanırken, iki ucu arasında sıcaklık farkı oluşturulur. Bu durumda, Thomson etkisi nedeniyle iletken içinde ısı absorpsiyonu ya da yayılması meydana gelir. Ölçülen sıcaklık profili analiz edilerek, ısı akısı içindeki Thomson katkısı ayrıştırılır ve μ katsayısı hesaplanır. Bu yöntem, Thomson etkisini doğrudan ortaya koyan klasik bir yaklaşımdır (Uchida, Murata, Miura, & Iguchi, 2020). Deney düzeneği şekil 4'te verilmiştir.

(Bazı kaynaklarda “Temperature Gradient with Constant Current” yöntemi olarak da geçer.)

Şekil 4. Sıcaklık granyanı oluşturarak Thomson etkisi ölçme deney düzeneği.



Uygulama şekli;

- Numune boyunca sabit bir elektrik akımı geçirilir.
- Numunenin iki ucuna farklı sıcaklıklar uygulanarak bir sıcaklık gradyanı oluşturulur.
- Bu durumda Thomson etkisi nedeniyle numune içinde ek bir ısı yayılımı ya da absorpsiyonu olur.
- Numune boyunca sıcaklık dağılımı hassas termokupl ile ölçülür.
- Joule ısısı ve ısı iletimi etkileri matematiksel olarak modellenir ve ayrıştırılır.

Ortaya çıkan sıcaklık profilinden Thomson katsayısı çıkarılır:

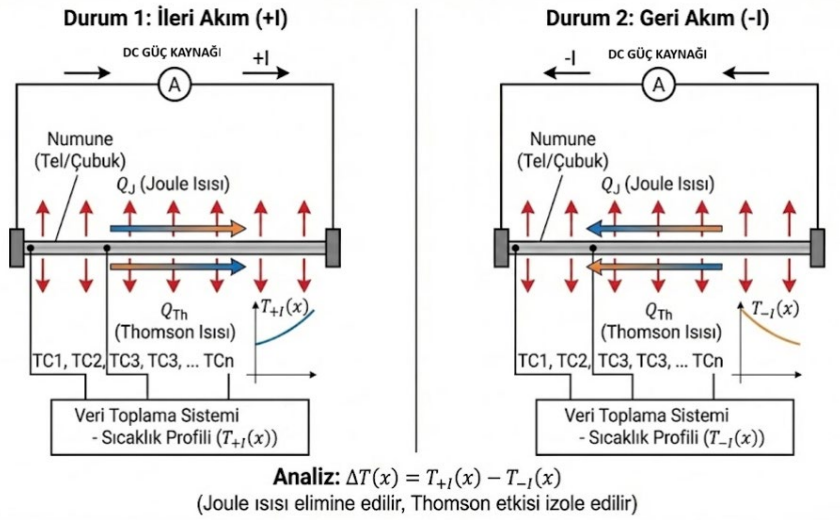
$$\mu = \frac{1}{I} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)$$

Bu ölçüm yönteminin avantajı, teorik temeli nettir, doğrudan fiziksel gözleme dayanır. Dezavantajı ise ısı iletimi, Joule ısısı ve Thomson ısısı aynı anda var olduğundan bu ısıları ayırtmak gerekir.

Kendi Kendini Isıtma Yöntemi (Self-Heating Method)

Bu yöntemde dışarıdan sıcaklık gradyanı oluşturulmadan, sadece elektrik akımı verilerek numunenin kendi ısınması sağlanır. Şekil 5'teki deney düzeneğinde gösterildiği gibi akımın yönü değiştirildiğinde Thomson etkisi de yön değiştirir, ancak Joule ısısı aynı kalır. Bu fark kullanılarak sıcaklık değişimi ölçülür ve Thomson etkisi izole edilir. Böylece μ katsayısı belirlenebilir. Düşük sıcaklıklarda uygulanması yaygındır (Amagai, ve diğerleri, 2022).

Şekil 5. Kendi kendine ısıtma yöntemi deney şeması.



Uygulama şekli;

- Numuneye sabit bir elektrik akımı verilir ve dışarıdan sıcaklık gradyanı uygulanmaz.
- Bu durumda, sadece Joule ısısı ve Thomson ısısı etkisi vardır.
- Numune boyunca sıcaklık profili hassas olarak ölçülür.

- Ardından akım yönü ters çevrilerek ölçüm tekrarlanır.
- Joule ısısı değişmediğinden, sadece Thomson etkisi yön değiştirir.
- İki ölçüm arasındaki fark, Thomson ısısına karşılık gelir:

$$Q_{Thomson} = \frac{1}{2} (T_{ileri} - T_{geri})$$

•Bu fark ve sıcaklık gradyanı kullanılarak Thomson katsayısı hesaplanır.

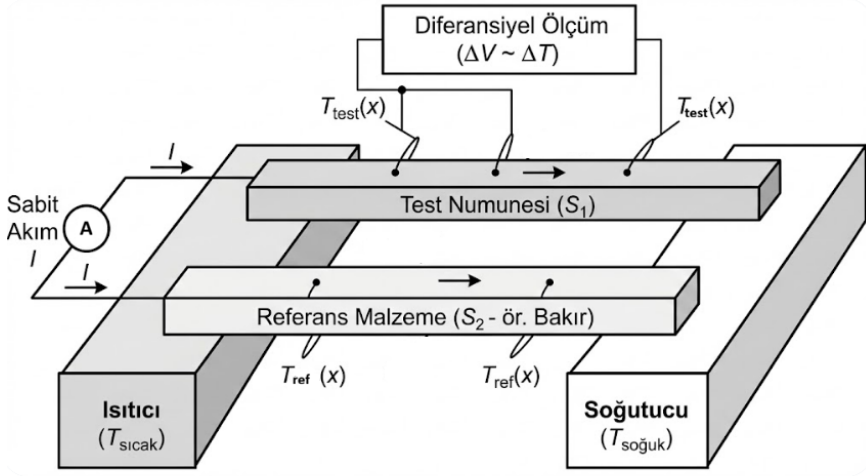
Bu ölçüm yönteminin avantajı, dışarıdan sıcaklık kontrolü gerektirmez. Dezavantajı, yalnızca küçük Thomson etkilerinin ölçülmesine uygundur; hassasiyet sınırlıdır.

Sıcaklık Eşleştirmeli Diferansiyel Ölçüm (Differential Measurement in Temperature-Graded Conductors)

İki benzer boyutta iletken (biri test malzemesi, biri referans — genellikle bakır) aynı sıcaklık gradyanı altında ve aynı akımla test edilir. İki malzeme arasındaki sıcaklık farkı veya voltaj farkı ölçülerek, test malzemesine özgü Thomson etkisi diferansiyel olarak hesaplanır. Deney düzeneği şekil 6'daki gibidir. Bu yöntemle çevresel etkiler minimize edilerek daha hassas sonuçlar elde edilir (Garrido & Manzanares, 2024).

(Bazı kaynaklarda “Differential Technique with Matched Conductors” olarak da adlandırılır.)

Şekil 6. Sıcaklık eşleştirmeli diferansiyel ölçüm yöntemi deney şeması.



Uygulama şekli;

- Aynı fiziksel boyutlara sahip iki iletken (biri test numunesi, diğeri referans — genellikle bakır) aynı sıcaklık farkına maruz bırakılır.

- Her ikisinden aynı büyüklükte akım geçirilir.

- İki iletkenin sıcaklık profili veya voltaj farkları hassas şekilde karşılaştırılır.

- Thomson ısısı sadece test numunesinde varsa, aradaki fark doğrudan Thomson etkisine karşılık gelir.

- Farklı sıcaklıklar boyunca yapılan ölçümlerle diferansiyel Thomson katsayısı çıkarılır.

Bu ölçüm yönteminin avantajı, ortam etkileri, ısı kayıpları gibi dışsal hatalar en aza indirilir. Dezavantajı, referans ile test numunesinin çok iyi eşlenmiş olması gerekir.

Thomson etkisi en zor ölçülen katsayıdır. Çünkü etkisi çok küçüktür ve diğer termoelektrik etkilerden ayrıştırılması zordur. Bu yüzden

doğrudan deneysel çalışmalar nadirdir. Genellikle Kelvin ilişkisi kullanılarak dolaylı yoldan ölçülür. Thomson katsayısı, Seebeck katsayısının sıcaklığa göre türeviyle de ilişkilidir (Kelvin ilişkisi):

$$\mu = T \cdot \frac{dS}{dT}$$

Bu ifade, teorik veya deneysel olarak Seebeck katsayısının sıcaklığa göre değişimini bilen araştırmacılar için dolaylı yoldan Thomson katsayısı hesaplamada kullanılır. Bazı literatürlerde bu tür dolaylı hesaplamalara “Thermodynamic estimation” ya da “indirect method” denir.

Gerekli ekipmanlar;

- Uzun, homojen termoelektrik tel (örneğin nikel veya demir)
- DC güç kaynağı
- Termal kamera veya çoklu termokupllar
- Isı yalıtımı (telin sadece belirli bölgesinde gradyan oluşturmak için)
- Akım/gerilim ölçüm cihazları

Yukarıdaki ekipmanlar kullanılarak bir deney düzeneği oluşturulabilir ve Thomson etkisi ölçüm yöntemlerinden birisi ile ölçülebilir. Dikkat edilmesi gereken husus Thomson etkisi zayıftır, bu nedenle dikkatli kalibrasyon ve diğer ısı kaynaklarından ayırıştırma yapılmalıdır.

SONUÇ

Bu bölümde, termoelektrik olayların temelini oluşturan Seebeck, Peltier ve Thomson etkilerin katsayıları teorik ve deneysel yönleriyle ele alınmış; her bir katsayının ölçüm yöntemi detaylı olarak incelenmiştir. Seebeck katsayısı için kullanılan yöntemler

arasında en yaygın ve pratik olanı karşılaştırmalı yöntem olup, bu yöntemin güvenilir referans malzemelerle birlikte yüksek hassasiyet sağladığı görülmektedir. Peltier katsayısı ölçümünde ise doğrudan kalorimetrik yöntem tekniği öne çıkmaktadır. Her iki yöntemin de Joule ısıısının ölçüme etkisini minimize etmeye yönelik stratejiler sunduğu anlaşılmaktadır. Thomson katsayısı ise termoelektrik parametreler içinde en zor ölçülen özellik olup, deneysel ayırıştırma süreçlerinin karmaşıklığı nedeniyle genellikle dolaylı yöntemlerle belirlenmektedir. Bu bağlamda, Kelvin ilişkisi gibi teorik yaklaşımlar önemli bir alternatif sunmaktadır.

Termoelektrik sistemlerin uygulama alanları, mikro soğutuculardan uzay teknolojilerine, giyilebilir elektroniklerden atık ısı geri kazanımına kadar oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu uygulamaların etkinliği büyük ölçüde malzeme performansına bağlıdır. Bu nedenle doğru, hassas ve tekrarlanabilir ölçüm yöntemlerinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Elde edilen değerlendirmeler, termoelektrik malzeme karakterizasyonunda ölçüm yöntemi seçiminin, deneysel koşullar, kullanılabilir ekipman, hedeflenen sıcaklık aralığı ve istenen duyarlılık düzeyi dikkate alınarak yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kaynakça

- Amagai, Y., Shimazaki, T., Okawa, K., Kawae, T., Fujiki, H., & Kaneko, N.-H. (2022, November 17). A straightforward DC-reversal method for the Thomson coefficient measurement. *Measurement*.
- Binninger, R., Unm   ig, S., Vergez, M., Bartel, M., & Sch  fer-Welsen, O. (2024, February 7). Customized measuring station for Peltier modules. *Heliyon*.
- Brestovic , T., Jasminsk , N., C arnogursk , M., Pu  k r, M., Kelemen, M., & Fil o, M. (2014, March 28). Measuring of thermal characteristics for Peltier thermopile using calorimetric method. *Measurement*, s. 40-48.
- Chen, W.-Y., Shi, X.-L., Zou, J., & Chen, Z.-G. (2020, December 14). Wearable fiber-based thermoelectrics from materials to applications. *Nano Energy*.
- Chen, W.-Y., Shi, X.-L., Zou, J., & Chen, Z.-G. (2022, August 17). Thermoelectric coolers for on-chip thermal management: Materials, design, and optimization. *Materials Science & Engineering R*.
-  obaner, S., & Uysal, F. (2024). FARKLI SICAKLIKTA Y ZEYLERE UYGULANAN PELT  ER SO UTUCUNUN PERFORMANS DE ERLEND  RMES . *3rd International Conference on Recent Academic Studies* (s. 955-967). Konya: All Sciences Academy.
-  obaner, S.,  erlek,  ., & Han, K. (2024). Termoelektrik Mod  ller ve Kullanım Alanları. S.  obaner,  .  erlek, & K. Han. içinde Konya: All Science Academy.

- Çobaner, S., Kesercioğlu, A. M., & Aktaş, N. F. (2024). Cooler Effect On Performance Of Peltier Module. *5th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences* (s. 1326-1240). Konya: All Sciences Academy.
- Garrido, J., & Manzanares, J. (2024, September 21). Thomson/Joule Power Compensation and the Measurement of the Thomson Coefficient. *materials*.
- Huang, L., Xing, L., Zheng, Y., & Yao, H. (2024, October 30). A chip thermal management method realizing integrated applications of cooling, power generation and heat flow measurement based on thermoelectric effect. *Applied Thermal Engineering*.
- Lan, Y., Lu, J., Mu, L., Wang, S., & Zhai, H. (2023, January 18). Waste heat recovery from exhausted gas of a proton exchange membrane fuel cell to produce hydrogen using thermoelectric generator. *Applied Energy*.
- Lee, H. (2013, May 22). The Thomson effect and the ideal equation on thermoelectric coolers. *Energy*, s. 61-69.
- Masoumi, S., Noori, A., & Pakdel, A. (2024, June 19). Exploring electrical transport in thin film and bulk thermoelectric materials with an automated Seebeck coefficient and resistivity. *Measurement*.
- Mishra, A., Bhattacharjee, S., & Anwar, S. (2015, 14 March). Simple apparatus to measure Seebeck coefficient up to 900 K. *Measurement*, s. 295-301.
- Özdemir, A. E., Köysal, Y., Özbas, E., & Atalay, T. (2015, April 10). The experimental design of solar heating thermoelectric generator with wind cooling chimney. *Energy Conversion and Management*, s. 127-133.

- Rojo, M. M., Romero, J. J., Ramos, D., Borca-Tasciuc, D.-A., Borca-Tasciuc, T., & Gonzalez, M. M. (2015, December 5). Modeling of transient thermoelectric transport in Harman method for films and nanowires. *International Journal of Thermal Sciences*, s. 193-202.
- Uchida, K.-i., Murata, M., Miura, A., & Iguchi, R. (2020, September 2). Observation of the Magneto-Thomson Effect. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*.
- Uysal, F., & Çobaner, S. (2024, Kasım 3). Experimental Investigation of the Effect of Two-Stage Peltier Application on the Temperature of a Microprocessor. *SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF COMPUTER AND INFORMATION SCIENCES*, s. 460-469.
- Zaferani, S. H., Sams, M., Ghomashchi, R., & Chen, Z.-G. (2021, September 28). Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical applications: Design, optimization, and advancement. *Nano Energy*.
- Zhang, H., Mui, Y., & Tarin, M. (2009, November 5). Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages. *Applied Thermal Engineering*, s. 561-568.

BÖLÜM 6

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KURUTUCUDA HAVUÇ KURUTMA PERFORMANSININ İNCELENMESİ

1. ELİF TURNA¹

2. BENGİ ŞANLI

Giriş

İnsanlar var oluşlarından bugüne hayatta kalabilmek için çeşitli gıda saklama metotları arayışı içinde olmuşlardır. Tarihsel süreçte güneş ve rüzgar gibi çevresel koşullardan yararlanılarak uygulanan bu yöntem, günümüzde kontrollü sıcaklık, kontrollü nem alma ve hava hızı gibi parametrelerin yönetildiği modern kurutma sistemleri ile daha etkin ve güvenilir bir hale gelmiştir.

Kurutma işleminin temel prensibi, ürün bünyesinde bulunan serbest ve kısmen bağlı suyun uzaklaştırılmasına dayanmakta olup, bu sayede mikroorganizmaların gelişimi için gerekli olan su aktivitesi düşürülmektedir. Kurutma işlemi yalnızca gıdanın mikrobiyolojik stabilitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda

¹ Arş. Gör. Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-4066-009X

Doç. Dr. Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-6805-2454

depolama ve taşımaya yönelik de önemli avantajlar sunmaktadır. Üründen uzaklaştırılan su miktarına bağlı olarak hacim ve kütle azalmakta, bu durum nakliye ve depolama maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle sebze ve meyveler gibi yüksek nem içeriğine sahip ürünlerde kurutma, mevsimsel üretim fazlalarının değerlendirilmesine olanak tanıyarak gıda sürekliliğinin sağlanmasında da önemli bir rol oynamaktadır (Çay vd., 2017:155). Kurutma işlemi sırasında sıcaklık düzeyi, işlem süresi ve kurutma havasına ait koşulların uygun biçimde belirlenmemesi durumunda; gıdanın besinsel bileşenlerinde kayıplar meydana gelebilmekte, renk değişimleri ve yapısal bozulmalar gibi kaliteyi olumsuz etkileyen sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, kurutma prosesinin yalnızca nem uzaklaştırmaya odaklanmaması, aynı zamanda ürün kalitesini koruyacak şekilde optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu amaçla son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda, düşük enerji tüketimli, çevresel etkileri azaltan, ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini muhafaza edebilen kurutma sistemlerinin geliştirilmesine önem verilmektedir. Özellikle güneş enerjisinden yararlanan ve farklı enerji kaynaklarını bir arada kullanan hibrit kurutma sistemleri, hem sürdürülebilirlik hem de ekonomik açıdan sundukları avantajlar nedeniyle zamanla daha fazla araştırma konusu haline gelmişlerdir. Tosun vd. (2009: 84), Diyarbakır ili iklim koşullarında domates, biber ve salça gibi ürünlerin kurutulması amacıyla, tamamen güneş enerjisine dayalı ve tek enerji kaynağıyla çalışan bir gıda kurutma sistemi tasarlamış; bu sistemle ürünlerin doğrudan güneş ışınlamına ve olumsuz çevresel etkilere maruz kalmadan kurutulması sağlamıştır. Yıldız vd'nin (2020:34) çalışmalarında, elma dilimleri 4 ve 10 mm kalınlıklarda hazırlanarak raflı doğal konvektif güneş enerjili bir kurutucuda kurutulmuş ve ayrılabilir nem oranının elma dilimlerinin kuruma kinetiği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneyler, 40 °C, 44 °C ve 48 °C kurutucu kabin hava sıcaklıklarında; 0,009 g/dk, 0,010 g/dk

ve 0,012 g/dk kurutma hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Kurutma kinetiği, Page, Midilli ve Henderson–Pabis modelleri kullanılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Henderson–Pabis modelinin deneysel verilerle daha iyi uyum sağladığını göstermiştir. Lingayat vd. (2020:1), bir güneş enerjili kurutucuda elma ve karpuz dilimlerinin kurutulmasını incelemiş; çalışmada her iki ürün için kuruma performansı ve kurutma kinetiği analiz edilmiştir. Ayrıca deneysel veriler kullanılarak elma ve karpuz için etkin difüzyon katsayısı, ısı transfer katsayıları ve aktivasyon enerjileri tahmin edilmiştir. Deneysel sonuçlar, güneş ışınımındaki dalgalanmalara bağlı olarak kurutma kabini içi sıcaklığının zamanla değiştiğini göstermiştir. Çalışma kapsamında elmanın nem içeriği 6,16’dan 0,799 kg/kg kuru bazda, karpuzun nem içeriği ise 10,76’dan 0,496 kg/kg kuru bazda düşürülmüştür. Akman vd. (2018:1), güneş enerjisi destekli bir kurutma sistemi tasarlayıp imal etmiş ve bu sistemin ilk deneysel uygulamalarını Osmaniye ili iklim koşullarında gerçekleştirmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, kurutma havası sıcaklığı 45 °C’ye kadar çıkabilmiş, kolektör girişindeki hava sıcaklığı ortalama 10–14 °C artırılmış ve yaklaşık 6 saatlik kurutma süresi sonunda üründen %58 oranında nem uzaklaştırılmıştır. Elde edilen bu bulgular, geliştirilen sistemle kurutma işleminin etkin ve başarılı bir şekilde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, Mersin ili koşullarında tarımsal ürünlerin kurutulmasına yönelik güneş enerjisi destekli bir kurutma sistemi tasarlanmış ve Ekim ayı iklim verileri kullanılarak havuç dilimlerinin kurutulması gerçekleştirilmiştir. Sistem performansı; kurutma süresi, kurutma parametreleri ve enerji tüketimi açısından değerlendirilmiştir.

Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında, yüksek güneşlenme potansiyeline sahip Mersin ili için tasarlanan ve üretilen güneş enerjisi destekli gıda kurutma sistemi, *Apiaceae (Umbelliferae)* familyasına ait havuç (*Daucus carota L.*)’un kurutulma işlemi için kullanılmış ve gerçekleştirilen kurutma deneyleri ile sistem performansı analiz edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan havuç (*Daucus carota L.*), yapısı gereği yüksek oranda su içeren bir kök sebzedir. Literatürde taze havucun başlangıç nem içeriğinin yaş bazda genellikle %86–92 aralığında olduğu belirtilmektedir (Akpınar vd, 2006: 500; Doymaz, 2011: 289). Bu yüksek nem içeriği, havucun kurutma davranışı ve kurutma süresi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, havuç kurutma deneylerinde kurutma süreci boyunca belirgin bir kütle azalımı gözlenmekte; nemin uzaklaştırılma hızı, kurutma kinetiğini ve sistemin enerji kullanımını doğrudan etkilemektedir.

Güneş Enerjisi Destekli Kurutma Sistemi ve Çalışma Prensibi

Tasarlanan güneş enerjisi destekli kurutma sistemi; güneş ışınımını ısı enerjisine dönüştüren bir kolektör ünitesi, ısıtılan havanın kurutma kabinine iletilmesini sağlayan hava iletim hattı ve kurutulan üründen nem uzaklaştırma sürecini destekleyen kapalı devre kalorifer sistemi ile donatılmıştır. Kurutma kabini, enerji kayıplarını minimize etmek ve kurutma sürecinde termal kararlılığı artırmak amacıyla sandviç panel yapıda tasarlanmıştır. Sandviç panelin yalıtım çekirdeği, grafen nanotoz katkılı %50 poliüretan ve %50 EPS bileşiminden oluşturulmuş ve panel kalınlığı 4 cm olarak belirlenmiştir. Sistem tasarımı, Mersin ilinin yüksek güneşlenme potansiyeli dikkate alınarak güneş enerjisinden en verimli şekilde yararlanılması amaçlanmıştır; bu sayede kurutma süresinin azaltılması ve sistem veriminin artırılması hedeflenmiştir. Kurutma düzeneği, rijit bir taşıyıcı konstrüksiyon üzerine monte

edilmiştir. Sistemin genel yerleşimi ve genel görüntüsü Resim 1’de yer almaktadır.

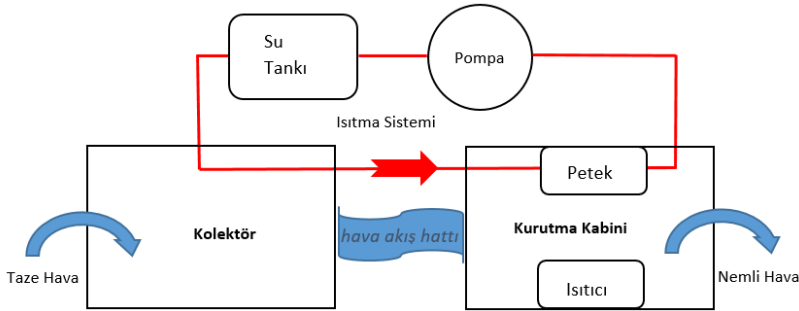
Resim 1 Geliştirilen güneş enerjili kurutma sistemi



Sistemin temel enerji kaynağını güneş enerjisi oluşturmaktadır. Güneşten mümkün olan en yüksek düzeyde fayda sağlamak amacıyla tasarlanan güneş kolektörü; uzun bakır borulama hattına sahip, yüzeyi siyah cisim davranışına yakın özellik gösterecek şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Kolektör yüzeyine ulaşan güneş ışınımı, siyah boyalı ve yüksek soğurma katsayısına sahip iç yüzey tarafından absorbe edilmekte; elde edilen ısı enerji hem havaya hem de kapalı devre kalorifer sistemine aktarılan kurutma için gerekli olan enerji sağlanmaktadır. Kolektör içerisindeki ısı geçişinin etkinliğini artırmak amacıyla, yüksek ısı iletkenliğine sahip toplam 16 m uzunluğunda bakır boru kullanılmış ve böylece güneşten elde edilen ısıнын su devresine daha verimli bir biçimde aktarılması sağlanmıştır. Kolektörün yan ve alt yüzeylerinde yer alan yalıtım malzemeleri ile ısı kayıpları minimum seviyeye indirilerek sistemin genel termal verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu yapısı sayesinde güneş kolektörü,

güneş ışınımını soğuran ve bu enerjiyi hem hava hem de su akışkanlarına aktaran bir ısı değıştirici olarak görev yapmaktadır. Kolektör içerisinde ısınan hava, fan yardımıyla kurutma kabinine çekilerek kabin içerisindeki gerekli ısı ortamının oluşturulmasına önemli katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda kolektörde ısınan su, pompa aracılığıyla radyatöre iletilmekte; bu sayede kabin içindeki sıcaklık ve nem dağılımının daha dengeli ve homojen bir şekilde gerçekleşmesi desteklenmektedir. Güneş enerjisi destekli bu sistem, güneş ışınımının yetersiz olduğu veya bulunmadığı koşullarda kabin sıcaklığının sürdürülebilmesi amacıyla kabin içerisine yerleştirilen elektrikli kızılötesi (Infrared, IR) ısıtıcılar ile birlikte hibrit bir yapı kazanmaktadır. Deney düzeneğinin çalışma prensibi şematik olarak aşağıdaki Şekil 1’de gösterilmektedir.

Şekil 1 Deney düzeneğinin çalışma prensibinin şematik



Kabin içerisine yerleştirilen aksiyel fanlar, ısınmış havanın kabin içinde eşit biçimde dağılmasını sağlayarak kurutma ortamının homojenliğini artırmaktadır. Bu durum, ürün yüzeyinden suyun buharlaşması için gerekli olan etkin kütle transferi koşullarının sağlanmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Kurutma işlemi sırasında ürünlerden buharlaşarak uzaklaşan nem, kabin içi hava nemini artırmakta; kabinin üst bölümünde yer alan baca hattı ise bu nemli havayı sistem dışına tahliye ederek kabin içi nem dengesinin korunmasına yardımcı olmaktadır. Böylece kabin içerisinde sürekli bir taze hava giriş-çıkışı sağlanarak sistemin

kurutma verimi arttırılmaktadır. Kurutma kabini iç dizaynı Resim 2’de gösterilmektedir.

Resim 2 Kurutma kabini iç dizaynı



Sisteme ait tüm ekipmanlar, birlikte ve uyumlu şekilde çalışacak biçimde entegre edilmiş; kurutma sürecinin hassas ve kontrollü olarak yönetilebilmesi amacıyla manuel on-off anahtarlı bir kumanda kontrol panosu tasarlanmıştır. Kurutma performansının belirlenmesi ve enerji analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için, Resim 3’te gösterilen kontrol panosu üzerine yerleştirilen dijital ekran aracılığıyla kabin içi sıcaklık ve bağıl nem ile dış ortam sıcaklığı sürekli olarak ölçülmüştür. Ayrıca, sisteme entegre edilen elektrik sayacı sayesinde kurutma süreci boyunca sistemin toplam elektrik enerji tüketimi de ölçülmüştür. Dış ortamdan gelen güneş enerjisinin kurutma sistemine olan etkisini değerlendirebilmek amacıyla ise, düzeneğin kurulduğu konumda bir solarimetre kullanılarak anlık güneş ışıyım şiddeti (W/m^2) yarım saatlik periyotlarla ölçülmektedir.

Resim 3 Kontrol panosu



Kurutma Performansının Değerlendirilmesi

Gıda ürünlerinin kurutma performanslarının belirlenmesi sürecinin başlangıç noktası, numunenin başlangıç nem içeriğinin belirlenmesidir (Aktaş vd., 2012:287). Başlangıç nem içeriğinin belirlenmesi için, AOAC, ISO ve APHA gibi uluslararası otoriteler tarafından temel nem tayin yöntemi olarak kabul edilen etüv fırınında kurutma tekniği kullanılmıştır. Başlangıç neminin etüv fırını yöntemiyle belirlenmesinin ardından kuru baz nem oranı, kuruma hızı ve kuruma kinetiği parametreleri matematiksel olarak hesaplanmıştır.

Etüv Fırın ile Nem Tayin Yöntemi

T1330 standardı esas alınarak uygulanan bu yöntemde, numune 100–105 °C sıcaklık aralığında kontrollü koşullar altında kütle değişimi sona erinceye kadar kurutulmaktadır. Uygulama sırasında numune içerisinde bulunan serbest suyun tamamı ve bağlı suyun büyük bir kısmı uzaklaştırılmakta olup, bu sayede numunenin gerçek kuru madde içeriği yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik ile belirlenebilmektedir (Yağcıoğlu, 1999:1).

Etüv kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, numunenin kurutma öncesine ait yaş kütlesi ile sabit kütleye ulaştıktan sonraki kuru kütlesi arasındaki fark belirlenmekte; hesaplanan bu kütle farkı, başlangıç kütlesine oranlanarak numunenin nem içeriği yüzde cinsinden ifade edilmektedir. Bu çalışmada, kurutma deneylerine ilişkin performans değerlendirmeleri, başlangıç nem içeriğinin etüv yöntemiyle tespit edilmesinin ardından; kuru baz nem içeriği, kuruma hızı ve kurutma kinetiği gibi temel parametrelerin matematiksel ilişkiler kullanılarak hesaplanması esasına dayanmaktadır.

$$Nem(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

W₁: Numunenin kurutma öncesi (yaş) ağırlığı (gram)

W₂: Numunenin kurutma sonrası (kuru) ağırlığı (gram)

Nem Oranı (MR)

Kurutma işlemi süresince ürün bünyesinde bulunan nem miktarının zamana bağlı değişimi, nem oranı kavramı ile tanımlanmaktadır. Nem oranı, belirli bir anda üründe mevcut olan nem içeriğinin, başlangıç durumundaki nem miktarına göre azalma derecesidir. (Aktaş, 2014:229).

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_o - m_e} \quad (2)$$

Bu eşitlikte, m_t herhangi bir t anında belirlenen kuru baz nem oranını (g su/g kuru madde), m_o ürünün başlangıçtaki kuru baz nem içeriğini ve m_e ise kurutma işlemi sonunda sistemin ulaştığı denge nem oranını temsil etmektedir. Denge nem oranı m_e çoğunlukla çok küçük değerler aldığından, uygulamaya yönelik hesaplamalarda genellikle ihmal edilmekte ve bu varsayım altında söz konusu eşitlik daha basit bir forma indirgenmektedir (Aktaş, 2014:229).

$$MR = \frac{mt}{mo} \quad (3)$$

Kurutma Hızı (DR)

Kurutma süreci boyunca ürün içerisindeki nemin zamana bağlı olarak uzaklaştırılma hızını tanımlayan bu büyüklük, belirli bir zaman diliminde üründen uzaklaştırılan nem miktarının söz konusu süreye oranlanmasıyla ifade edilen temel bir parametredir (Aktaş, 2014:229).

$$DR = \frac{m_{t+\Delta t} - m_t}{\Delta t} \quad (4)$$

Bu denklemlerde; m_t : t anındaki kuru bazda nem oranı (g su/g kuru madde), Δt : iki ölçüm arasındaki zaman farkı (saat veya dakika) olarak tanımlanmaktadır.

Özgül Nem Çekme Oranı (SMER)

SMER, kuruucunun enerji verimliliği olarak ifade edilmektedir ve bir kurutma sisteminin enerji kullanım etkinliğini nicel olarak ortaya koyan temel bir performans parametresidir. Birim enerji tüketimi başına üründen uzaklaştırılan su miktarını ifade etmektedir. Bu büyüklük genellikle $\text{kg}_{\text{su}}/\text{kWh}$ birimiyle gösterilmektedir (Kahraman, 2018:1).

$$SMER = \frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi}}{\text{Harcanan Enerji}} \quad (5)$$

Özgül Enerji Tüketimi (SEC)

Özgül enerji tüketimi, ürünün kurutulması sırasında, birim kütledeki nemin üründen uzaklaştırılması için gereken enerji miktarıdır. Birimi kJ/kg_{su} 'dur ve aşağıda denklem kullanılarak belirlenmektedir (Kahraman, 2018:1).

$$SEC = \frac{\text{Toplam Enerji Tüketimi}}{\text{Üründen uzaklaştırılan Nem Kütlesi}} \quad (6)$$

Kurutma Verimi

Sisteme verilen toplam enerjinin hangi oranının ürün bünyesindeki nemin buharlaştırılmasında etkin olarak kullanılan kısmını ifade etmektedir. Verim değerinin yükselmesi, sistemin nem transfer performansının arttığını ve buna bağlı olarak nem giderme kapasitesinin daha etkin hâle geldiğini göstermektedir (Koca vd., 2020:583).

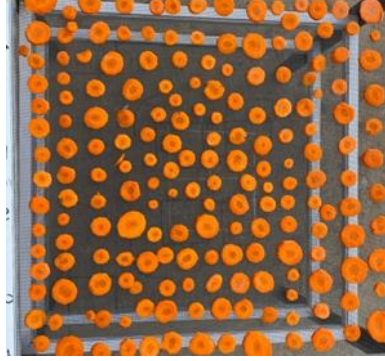
$$\eta = \frac{\text{Buharlaşma için gereken enerji ihtiyacı}}{\text{Harcanan Enerji}} \quad (7)$$

Bulgular ve Tartışma

Tasarlanıp üretilen güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde havuç kurutma parametrelerini belirlemek üzere; Ekim ayı içinde 3 farklı günde kurutma yapılmıştır. Elde edilen bulguların sağlıklı biçimde değerlendirilebilmesi için öncelikle etüv fırın yöntemiyle 105 ± 2 °C sıcaklıkta havuç numunelerinin yaş bazda başlangıç nem içeriği yaklaşık %88,55 olarak belirlenmiştir. Elde edilen başlangıç nem içeriği değerinin, taze havuçlar için literatürde bildirilen %86–92 aralığı içerisinde yer alması, çalışmada kullanılan ham maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin literatür verileriyle uyumlu olduğunu göstermekte ve deneysel sonuçların güvenilirliğini desteklemektedir (Akpınar vd., 2006: 500; Doymaz, 2011:289).

Başlangıç nem içeriğinin belirlenmesinin ardından, geliştirilen güneş enerjisi destekli kurutma sisteminde deneysel uygulamalara başlanmıştır. Kurutma performansının güvenilir biçimde izlenebilmesi amacıyla, kurutma kabine olarak yerleştirilen havuç dilimleri arasından dokuz adet numune seçilmiş ve bu numunelerin ortalama başlangıç kütlesi 5,32 g olarak ölçülmüştür ve havuçlar 5 ± 1 mm olarak dilimlenmiştir. (Resim 4).

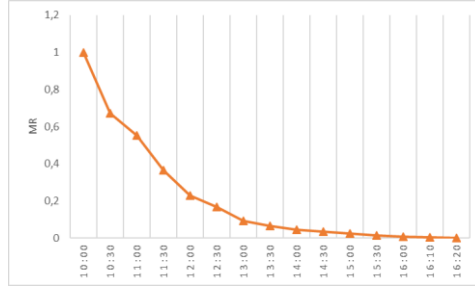
Resim 4 Deneylerde kullanılan havuç numuneleri



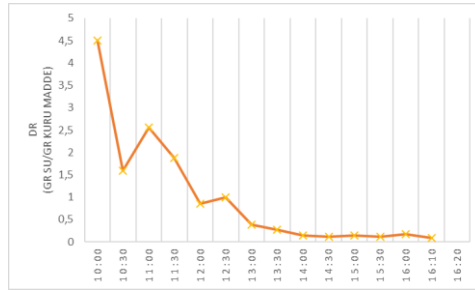
Deney süresince kurutma kabininin çalışma sıcaklığı, sistemde yer alan termostat aracılığıyla kontrol edilerek 50–55  C aralığında sabit tutulmuştur. Sıcaklığın sabit tutulabilmesi için, deney esnasında sisteme entegre edilmiş infrared ısıtma ünitesinin devreye girdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kurutma işlemi için hedeflenen nihai nem içeriği yaş bazda %10 olarak tanımlanmış olup, numunelerin bu değere ulaşmasıyla birlikte deneysel kurutma süreci sonlandırılmıştır (Mengeş vd. 2006:353).

Deneylerde, her yarım saatte bir ölçüm alınarak havuç numunelerinin kurutma süreci boyunca ürün nem oranının kurutma süresine bağlı değişimi (MR) ile kurutma hızının kurutma süresine bağlı değişimi (DR) gözlemlenmiştir ve bu değişimler sırasıyla Grafik 1 ve 2’de gösterilmektedir. Bu şekiller birlikte değerlendirildiğinde, havuç numunelerinin kurutma sürecine özęü kuruma karakteristiğinin belirgin biçimde ortaya çıktığı görölmektedir. Başlangıçta gözlenen hızlı kütle kaybı, ürün bünyesindeki serbest nemin uzaklaştırılmasına bağlı olarak kuruma hızının yüksek olduğunu yansıtırken, sürecin ilerleyen aşamalarında eğrinin yataylaşması bağlı nemin uzaklaştırılma miktarının azaldığını göstermektedir.

Grafik 1 Zamana bağı numunenin nem oranının değişimi

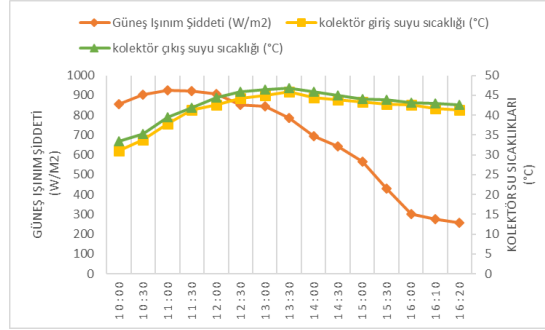


Grafik 2 Zamana bağı numunenin kurutma hızının değişimi



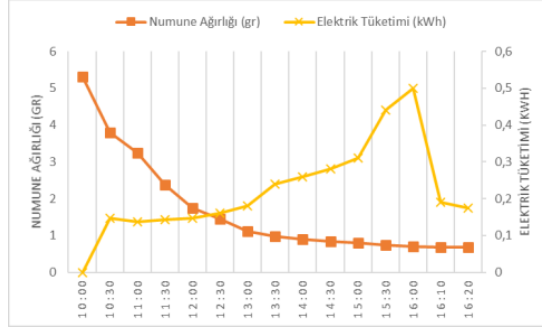
Güneş ışınım şiddeti ile kolektör su giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki ilişki Grafik 3'te gösterilmektedir. Güneş ışınım şiddetindeki artışa paralel olarak kolektör su giriş ve çıkış sıcaklıklarının yükseldiği, ışınımın azalmasıyla birlikte ise her iki sıcaklık değerinin de kademeli olarak düştüğü görülmektedir. Ölçümler boyunca kolektör çıkış suyu sıcaklığının giriş sıcaklığından sürekli daha yüksek olması, kolektörün güneş enerjisini akışkan aracılığıyla sisteme etkin biçimde aktardığını göstermekte olup, elde edilen sıcaklık profilleri sistemin kararlı ve beklenen davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Grafik 3 Zamana bağılı güneş ışınlı şiddeti ve kolektör sıcaklıkları



Kurutma sisteminin enerji performansını değerlendirmek amacıyla, deney süresince kullanılan tüm elektrikli bileşenlerinin (IR ısıtıcı, fanlar, kontrol panosu ve yardımcı ekipmanlar) güç tüketimleri, sisteme entegre edilen dijital elektrik sayacı üzerinden izlenmiştir. Sayaç, deney başlangıcından numunelerin son kuru nem değerine ulaşma anına kadar geçen süreçte kullanılan toplam elektrik enerjisi miktarını kWh cinsinden kaydederek sistemin gerçek enerji tüketimini ortaya koymuştur. Elektrik enerjisi tüketiminin zamanla değişimi ise Grafik 4'te gösterilmektedir. Işınım değerlerinin yüksek olduğu 10.00-12.30 saatleri arasında elektrik tüketiminin az olduğu görülmektedir. Işınım değerlerinin düşmesiyle akşam saatlerine doğru; sisteme entegre edilen infrared ısıtıcının devreye girmesiyle elektrik sarfiyatının arttığı gözlemlenmektedir. Özet olarak; Ekim ayında gerçekleştirilen bu havuç kurutma işleminde ortalama elektrik tüketimi 3,307 kWh seviyesindedir.

Grafik 4 Kütle değişimi gerçekleşirken tüketilen enerji miktarı



Ayrıca, Mersin iklim koşullarında yürütülen bu deneysel çalışmada, 1100 g havuç için toplam 370 dakika süren kurutma süreci boyunca sistemin elektrik enerjisi tüketimi sayaç verilerine dayalı olarak (3,307 kWh) olarak tespit edilmiştir. Bu enerji tüketim değeri, kurutma sisteminin performans analizlerinde temel referans parametre olarak kullanılmıştır. Özgül nem çekme oranı (SMER) denklem (5), özgül enerji tüketimi (SEC) denklem (6) ve kurutma verimi denklem (7) esas alınarak hesaplanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, başlangıçta 1100 g olan yaş havuç miktarının kurutma işlemi sonunda yaklaşık 140,05 g seviyesine düştüğü ve bu süreçte toplam 0,961 kg suyun üründen uzaklaştırıldığı belirlenmiştir ve kurutma sistemine ait enerji performans parametreleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1 Kurutma sürecine ilişkin enerji performans sonuçları

SMER	0,291 kg su/kWh
SEC	3,445 kWh/kg
Kurutma Verimi	%20,9

Güneş Enerjisi destekli Kurutma Sisteminin Ev Tipi Kurutma Sistemi ile Karşılaştırılması

Tasarlanan güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin performansının, elektrikli kurutucularla karşılaştırılması amacıyla, 245 W gücünde bir elektrikli kurutma fırınında 1100 g havuç, 5 ± 1

mm kalınlığında dilimlenerek kurutulmuştur. Yaklaşık %10 nem içeriğine sahip kuru havuç elde edilmesi için kurutma işlemi 17,5 saatte tamamlanmıştır. Elektrikli kurutma fırını ile güneş enerjisi destekli kurutma sistemine ait performans verileri Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak yer almaktadır. Güneş enerjisi destekli sistem kullanımıyla, kurutma süresinin elektrikli kurutma sistemininkinin yaklaşık üçte birine düşürüldüğü açıkça görülmektedir. Ayrıca, elde edilen kuru ürünler tat ve görsel olarak karşılaştırıldığında; güneş enerjisi destekli sistemde kurutulan havuçların, orijinal tatlarının daha iyi korunduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 2 Kurutma sürecine ilişkin enerji performans sonuçları

Kurutma Türü	Çalışma Sıcaklığı	Süre	Elektrik Tüketimi
Güneş Enerjisi Destekli	50-55°C	6 saat 10 dakika	3,307 kWh
Ev Tipi Kurutucu	55 °C	17 saat 30 dakika	4,29 kWh

Sonuç

Bu çalışmada, güneş enerjisi destekli hibrit bir kurutma sistemi tasarlanmış ve *Apiaceae (Umbelliferae)* familyasına ait havuç (*Daucus carota L.*) numuneleri kurutularak sistem test edilmiştir. Deneyler 50–55 °C sıcaklık aralığında yürütülmüş, nihai ürün için yaş bazda %10 nem içeriği hedeflenmiştir. Havuç dilimlerinin başlangıç nem içeriğinin, yaş bazda %88,55 nem olduğu tespit edilmiştir. Mersin’in Ekim ayına özgü yüksek güneş ışınlam koşullarında yürütülen deneylerde, toplam 1100 g havuç 370 dakika içerisinde hedeflenen kuruluk seviyesine ulaştırılmış ve bu süreçte yalnızca 3,307 kWh elektrik enerjisi tüketilmiştir; kurutma işlemi sonunda ise havuç numunelerinin yaklaşık 140,05 g kuru denge ağırlığına ulaştığı belirlenmiştir. Güneş enerjisi destekli kurutma sistemi, ev tipi kurutucuya kıyasla benzer sıcaklık aralığında çalışmasına rağmen kurutma süresini yaklaşık %65 oranında kısaltmış ve daha düşük elektrik tüketimi ile kurutma

işlemini gerçekleştirmiştir. Elde edilen bulgular, geliştirilen güneş enerjisi destekli kurutma sisteminin, havuç kurutma uygulamalarında yüksek enerji etkinliği, kısa kurutma süresi ve yüksek ürün kalitesi sağlaması açısından tercih edilebilecek bir sistem olduğunu ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2024-TP3-5113 numaralı proje ile desteklenerek; Addmix Tarım Danışmanlık Ltd. Şti. firması ile birlikte imal edilmiştir.

Kaynakça

- Akman, H., Çerçi, K., Hürdoğan, E., & Büyükalaca, O. (2018). Güneş enerjisi destekli bir kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve ilk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 1–9.
- Akpınar, E. K., Midilli, A., & Bicer, Y. (2006). The first and second law analyses of thermodynamic of drying of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 73(4), 500–507. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.031>
- Aktaş, M., Şevik, S., Doğan, H., & Öztürk, M. (2012). Fotovoltaik ve termal güneş enerjili sürekli bir kurutucuda domates kurutulması. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 18(4), 287–298.
- Aktaş, M., Menlik, T., Boran, K., & Aktekeli, B. (2014). Isı pompalı bir kurutucuda portakal kabuğu kurutulması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2(2), 229–238.
- Çay, Y., Şengül, A., Gültekin, R., & Başaran, T. (2017). Gıda kurutma sistemlerinde enerji verimliliği. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 13(2), 155–163.
- Doymaz, İ. (2011). Drying of carrot slices using infrared radiation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(3), 289–298. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00427.x>
- Kahraman, A. (2018). *Endüstriyel mısır kurutma tesislerinde enerji ve ekserji analizi* (Doktora tezi). [Üniversite adı].
- Koca, T., & Polat, M. N. (2020). Güneş enerjisi ile reyhan kurutma sisteminin tasarlanması, imalatı, deneysel incelenmesi ve alternatif yöntemlerle karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 583–592.
- Lingayat, A., Chandramohan, V. P., Raju, V. R. K., & Kumar, A. (2020). Development of indirect type solar dryer and experiments for estimation of drying parameters of apple and watermelon. *Thermal Science and Engineering Progress*, 16, 100477. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100477>

- Mengeş, H. O., & Ertekin, C. (2006). Havucun ince tabaka kuruma karakteristiklerinin incelenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 2(4), 353–362.
- Tosun, N., Bayındır, H., & Aydın, H. (2009). Diyarbakır ilinde çok fonksiyonlu güneş enerjili kurutma sistemi oluşturulması üzerine bir araştırma. *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (ss. 84–89), Diyarbakır.
- Yağcıoğlu, A. (1999). *Tarımsal ürünleri kurutma tekniği*. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 536.
- Yıldız, Z., & Gökayaz, L. (2020). Rafli doğal konvektif güneş enerjili kurutucuda elma kuruma kinetiğinin incelenmesi. *Engineering Sciences*, 15(1), 34–42.

BÖLÜM 7

ÇİFT KADEMELİ GÜNEŞ ENERJİLİ ABSORPSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMİNİN BANDIRMA İKLİM KOŞULLARINDA PERFORMANS ANALİZİ

RAMAZAN YILMAZ¹
ERHAN KIRTEPE²

Giriş

Güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemleri (GEASS), artan enerji tüketimi ve fosil yakıt kaynaklı çevresel etkiler karşısında, yenilenebilir enerji temelli alternatif soğutma teknolojileri arasında önemli bir yere sahiptir. Özellikle yaz aylarında soğutma ihtiyacının güneş enerjisinin en yüksek olduğu dönemlerle örtüşmesi, bu sistemlerin enerji arz-talep uyumu açısından avantajlı olmasını sağlamaktadır. GEASS'ler, elektrik enerjisine olan bağımlılığı azaltarak sera gazı emisyonlarının düşürülmesine katkı sunmakta ve sürdürülebilir bina enerji sistemleri kapsamında giderek daha fazla ilgi görmektedir.

Literatürde güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemlerine yönelik çalışmaların farklı soğutucu-absorban akışkan çiftleri, kolektör türleri, sistem konfigürasyonları ve iklim koşulları altında yoğunlaştığı görülmektedir. Mazloumi, Naghashzadegan ve Javaherdeh (2008), LiBr-H₂O akışkan çiftine sahip tek kademeli bir GEASS'i Ahvaz/İran iklim koşullarında incelemiş ve 17,5 kW soğutma kapasitesi için 57,6 m² kolektör alanının yeterli olduğunu raporlamıştır. Bellos, Tzivanidis, Pavlovic ve

¹ Öğr. Gör. Dr. Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, Orcid: 0000-0001-6275-7197

² Dr. Öğr. Üyesi, Şırnak Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Orcid: 0000-0002-1824-2599

Stefanovic (2017) ise çift kademeli LiCl-H₂O sisteminin, LiBr-H₂O temelli tek kademeli sistemlere kıyasla daha yüksek COP değerleri sunduğunu ve kolektör alanı ihtiyacını azalttığını ortaya koymuştur.

Akışkan çifti ve kolektör seçiminin sistem performansı üzerindeki etkisi, çok sayıda çalışmada vurgulanmıştır. Asadi ve arkadaşları (2018), NH₃-H₂O akışkan çiftiyle çalışan bir sistemde farklı güneş kolektörlerini termo-ekonomik açıdan değerlendirmiş ve vakum borulu kolektörlerin ekonomik açıdan daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Bellos ve Tzivanidis (2018a; 2018b), ejektör entegrasyonu ve nanoakışkan kullanımı ile sistem performansında anlamlı iyileştirmeler elde edildiğini raporlamış; aynı araştırma grubu farklı kolektör tipleri ve akışkan çiftleri için enerji, ekserji ve ekonomik analizler gerçekleştirmiştir (Bellos et al., 2016; Bellos et al., 2017).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, özellikle çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin tek kademeli sistemlere kıyasla daha yüksek soğutma kapasitesi ve performans katsayıları sunduğunu göstermektedir. De ve Ganguly (2020), çift kademeli bir sistemin COP değerinin tek kademeli sisteme göre yaklaşık %80 daha yüksek olduğunu belirtirken; Ma ve arkadaşları (2022), çift kademeli çalışan sistemlerin daha uzun süreli ve kararlı soğutma sağladığını ifade etmiştir. Ayrıca enerji depolama entegrasyonu ve hibrit sistem yaklaşımları ile COP değerlerinin 1,35 seviyelerine kadar çıkabildiği rapor edilmiştir (İbrahim et al., 2020a; 2020b).

Bununla birlikte, GEASS performansının yalnızca enerji temelli göstergelerle değil, ekserji analizi ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Ekserji analizi, sistemdeki tersinmezliklerin ve enerji kalitesinin ortaya konulmasına olanak sağlamakta; özellikle farklı iklim koşullarında sistem davranışının daha doğru yorumlanmasına katkı sunmaktadır (Özen & Yağcıoğlu, 2020). Literatürde LiBr-H₂O akışkan çiftinin ekserji verimi açısından güvenilir ve yaygın bir seçenek olduğu, çift kademeli sistemlerde ise daha karmaşık tersinmezlik mekanizmalarının devreye girdiği belirtilmektedir (Bellos et al., 2016; Bellos et al., 2017).

Bu çalışma kapsamında, Bandırma iklim koşullarında parabolik oluk tipi kolektör (PTC) ile beslenen, LiBr-H₂O akışkan çiftine sahip çift kademeli güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, sistemin saatlik bazda davranışı analiz edilmiş; performans katsayıları, ekserji verimleri ve ısı transfer büyüklükleri istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların, Bandırma ve benzeri iklim koşullarına sahip bölgelerde çift kademeli GEASS tasarımı ve işletilmesine yönelik literatüre katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada, Bandırma iklim koşullarında çalışan çift kademeli güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminin (GEASS) enerji ve ekserji performansını incelemek amacıyla ayrıntılı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelleme sürecinde, sistemin

Analizde kullanılan dış ortam verileri, Bandırma iklim koşullarını temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Güneş ışınlamı verileri, açık gökyüzü ışınlamı modeli kullanılarak saatlik bazda hesaplanmıştır. Ortam sıcaklığına ait veriler ise Bandırma Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü'nden temin edilmiş ve saatlik ölçümlerin ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, analizlerin tipik yaz günü koşullarını temsil etmesini sağlamaktadır.

Sistem Tanımı

Şekil 1 Çift kademeli güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemi



Çift kademeli sistemlerde, tek kademeli çevrimlere kıyasla generatörün daha yüksek sıcaklıklarda çalışması gerekmektedir. Bu nedenle kolektöre giriş sıcaklığı 135 °C olarak alınmıştır. Bu sıcaklık seviyesi, çift kademeli sistemlerin kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla literatürde önerilen değerlerle uyumludur (Bellos & Tzivanidis, 2018a; De & Ganguly, 2020).

Matematiksel Modelleme

Sürekli rejim koşulları altında, her bir çevrim elemanı için ayrı ayrı sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Modellemede belirtilen kabuller yapılmıştır: Sistem sürekli rejimde çalışmaktadır. Borulardaki basınç ve ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Çözelti pompasının elektriksel güç tüketimi ihmal edilmiştir (Bellos & Tzivanidis, 2018a; Bellos et al., 2017).

Çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemine ait tüm bileşenlerde uygulanan kütle ve enerji denge eşitlikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 Kütle ve enerji denge eşitlikleri

Bileşen	Kütle Dengesi	Eş. No	Enerji Dengesi	Eş. No
Absorber	$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10}$ $X_1 \dot{m}_1 = X_6 \dot{m}_6$	(1) (2)	$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_1 h_1$	(19)
Isı Değiştirici-1	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	(3) (4)	$\eta_{id-1} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_2}$	(20)
Isı Değiştirici-2	$\dot{m}_3 = \dot{m}_{13}$ $\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15}$	(5) (6)	$\eta_{id-2} = \frac{h_{14} - h_{15}}{h_{14} - h_3}$	(21)
Yüksek Kademe Generatör	$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} + \dot{m}_{17}$ $X_{13} \dot{m}_{13} = X_{14} \dot{m}_{14}$	(7) (8)	$\dot{Q}_{gen} = \dot{m}_{17} h_{17} + \dot{m}_{14} h_{14} - \dot{m}_{13} h_{13}$	(22)
Düşük Kademe Generatör	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_7 + \dot{m}_4$ $X_{16} \dot{m}_{16} = X_4 \dot{m}_4$	(9) (10)	$\dot{Q}_{LG} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_{16} h_{16}$	(23)
Yoğusturucu-1	$\dot{m}_8 = \dot{m}_7 + \dot{m}_{19}$	(11)	$\dot{Q}_{yoğ-1} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{19} h_{19} - \dot{m}_8 h_8$	(24)
Yoğusturucu-2	$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18}$	(12)	$\dot{Q}_{yoğ-2} = \dot{m}_{17} (h_{17} - h_{18})$	(25)
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	(13)	$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_9 (h_{10} - h_9)$	(26)
Genleşme valfleri	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	(14)	$h_5 = h_6$	(27)
	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	(15)	$h_8 = h_9$	(28)
	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16}$	(16)	$h_{15} = h_{16}$	(29)
	$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19}$	(17)	$h_{18} = h_{19}$	(30)
Çözelti Pompası-1	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	(18)	$h_2 = h_1 + \dot{W}_{p-1} \approx h_1$	(31)

Çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminin (ASS) çalışması için gerekli enerji kolektörde güneşten elde edilen yararlı ısı enerjisidir. Bu enerji ilk önce ısıl enerji

depolama tankına aktarılmakta ve tankta depolanan enerji ASS'nin çalıştırılmasında kullanılmaktadır. PTC'lerde ve ısııl enerji depolama tankında çalışma akışkanı olarak Syltherm 800 kullanılmıştır. Isıl enerji depolama tankından ASS'nin generatörüne aktarılan ısııl enerjinin hesabının nasıl yapıldığı önceki çalışmada ayrıntılı olarak anlatılmıştır (Kırtepe & Yılmaz, 2025).

PTC'den elde edilen yararlı ısıı kolektör verimine bağılı olarak hesaplanmıştır. Kolektör verimi direkt güneş ışıınım değıerine, akışkanın kolektöre giriş ve dış ortam sıcaklığına bağılı olarak Eşitlik 32 ile hesaplanmıştır. (Asadi et al., 2018)

$$\eta_{ısııl,PTC} = 0,762 - 0,2125 \cdot \left(\frac{T_{f,i} - T_{amb}}{I_{PTC}} \right) - 0,001672 \left(\frac{(T_{f,i} - T_{amb})^2}{I_{PTC}} \right) \quad (32)$$

Performans Göstergeleri

Absorpsiyonlu soğıutma sistemine ait performans katsayısı (COP), elde edilen soğıutma yükünün generatöre sağılanan ısıya oranı olarak tanımlanmıştır (Eş. 33). Güneş enerjili absorpsiyonlu soğıutma sistemi için COP değıeri ise, elde edilen soğıutma yükünün kolektör yüzeyine gelen toplam güneş enerjisine oranı şeklinde ifade edilmiştir (Eş. 34) (Bellos et al., 2017; Bellos & Tzivanidis, 2018b).

$$COP_{ASS} = \frac{\dot{Q}_{buh}}{\dot{Q}_{gen} + \dot{W}_{pompa}} \approx \frac{\dot{Q}_{buh}}{\dot{Q}_{gen}} \quad (33)$$

$$COP_{GEASS} = \frac{\dot{Q}_{buh}}{G_b A_a} \quad (34)$$

Ekserji analizinde, buharlaştırıcıdan elde edilen faydalı ekserji çıkışı (Eş. 35) ile generatöre giren ekserji girdisi (Eş. 36) esas alınmıştır. Buna bağılı olarak absorpsiyonlu soğıutma sisteminin ve güneş enerjili absorpsiyonlu soğıutma sisteminin ekserji verimleri, literatürde önerilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır (Asadi et al., 2018; Bellos et al., 2016).

$$\dot{X}_{buh} = \dot{Q}_{buh} \left(\frac{T_a}{T_{buh}} - 1 \right) \quad (35)$$

$$\dot{X}_{gen} = \dot{Q}_{gen} \left(1 - \frac{T_a}{T_{gen}} \right) \quad (36)$$

Simölasyon ve İstatistiksel Yöntem

Saatlik dış ortam verileri doğırultusunda sistem davranışı analiz edilmiş ve tüm performans parametreleri her zaman adımı için hesaplanmıştır.

Ayların sistem performans parametreleri üzerindeki etkisini değıerlendirmek amacıyla istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Ön incelemelerde, veri setinin normal

dağılım ve varyans homojenliği varsayımlarını sağlamadığı belirlenmiştir. Bu nedenle analizlerde %20 kırılmış ortalamalara dayalı robust tek yönlü varyans analizi tercih edilmiştir. Anlamlı farklılıkların belirlenmesi amacıyla robust post-hoc karşılaştırmalar uygulanmış ve istatistiksel analizler Jamovi yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (The jamovi project, 2024).

Bulgular

Tablo 2’de sunulan tanımlayıcı istatistikler ile Shapiro–Wilk normallik testi sonuçları dikkate alınarak bağımlı değişkenlerin dağılım özellikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen p-değerleri incelendiğinde, buharlaşma ısı geçiş miktarı ($\dot{Q}_{buh}$), kolektör ısı verimi (η_{isl}), absorpsiyonlu soğutma sistemine ait ekserji verimi ($\eta_{eks,ASS}$) ve güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemine ait ekserji verimi ($\eta_{eks,GEASS}$) değişkenleri için normallik varsayımının sağlandığı görülmektedir ($p > 0,05$).

Buna karşılık, faydalı ısı geçiş miktarı ($\dot{Q}_u$), absorpsiyonlu soğutma sistemine ait performans katsayısı (COP_{ASS}) ve güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemine ait performans katsayısı (COP_{GEASS}) değişkenleri için Shapiro–Wilk testi sonucunda p-değerlerinin 0,05’in altında kaldığı belirlenmiş olup, bu değişkenlerin normal dağılım göstermediği tespit edilmiştir.

Elde edilen bu bulgular doğrultusunda, izleyen istatistiksel analizlerde normallik varsayımını sağlamayan değişkenler için dağılımdan bağımsız ve robust istatistiksel yöntemlerin tercih edilmesi uygun görülmüştür.

Tablo 2 Bağımlı değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler ve normallik testi sonuçları

							Shapiro-Wilk	
	N	Missing	Mean	SD	Minimum	Maximum	W	p
$\dot{Q}_u$ (kW)	24	0	15,7287	0,89477	13,352	16,7622	0,908	0,032
$\dot{Q}_{buh}$ (kW)	24	0	19,3242	1,55403	15,543	21,3722	0,95	0,267
η_{isl}	24	0	0,7038	0,00287	0,6965	0,7077	0,938	0,147
COP_{ASS}	24	0	1,2879	0,04707	1,2105	1,3498	0,898	0,02
COP_{GEASS}	24	0	0,8639	0,03224	0,81	0,905	0,905	0,028
$\eta_{eks,ASS}$	24	0	0,4027	0,03025	0,3456	0,4416	0,931	0,103
$\eta_{eks,GEASS}$	24	0	0,0723	0,00407	0,0639	0,0772	0,922	0,063

Korelasyon Analizi Bulguları

Standart zamanın sistem performans parametreleri ile ilişkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen korelasyon analizi yapılmıştır. Değişkenler arasındaki ilişkiler, dağılım özellikleri dikkate alınarak hem Pearson korelasyon katsayısı hem de Spearman rho korelasyon katsayısı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, standart zaman ile faydalı ısı geçiş miktarı arasında istatistiksel olarak anlamlı ve orta düzeyde negatif yönlü bir ilişki tespit edilmiştir (Pearson $r = -0,547$; $p = 0,006$). Bu bulgu, günün ilerleyen saatlerinde faydalı ısı geçiş miktarının azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, standart zaman ile buharlaştırıcı ısı geçiş miktarı arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir (Pearson $r = -0,164$; $p = 0,443$).

Performans katsayıları açısından değerlendirildiğinde, standart zaman ile absorpsiyonlu soğutma sistemine ait performans katsayısı arasında istatistiksel olarak anlamlı ve pozitif yönlü bir ilişki olduğu görülmektedir (Pearson $r = 0,592$; $p = 0,002$). Benzer şekilde, güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemine ait performans katsayısı ile standart zaman arasında da orta düzeyde ve istatistiksel olarak anlamlı pozitif bir ilişki tespit edilmiştir (Pearson $r = 0,558$; $p = 0,005$). Bu sonuçlar, sistemin enerji temelli performansının gün içerisinde belirli saatlere kadar artış gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Ekserji temelli performans göstergeleri Spearman korelasyon katsayısı kullanılarak değerlendirildiğinde, standart zaman ile absorpsiyonlu soğutma sistemine ait ekserji verimi arasında istatistiksel olarak anlamlı ve negatif yönlü bir ilişki bulunduğu belirlenmiştir (Spearman $\rho = -0,546$; $p = 0,006$). Benzer biçimde, güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemine ait ekserji verimi ile standart zaman arasında da anlamlı ve negatif yönlü bir ilişki tespit edilmiştir (Spearman $\rho = -0,586$; $p = 0,003$). Bu durum, günün ilerleyen saatlerinde sistemdeki tersinmezliklerin artmasına bağlı olarak ekserji veriminin azaldığını göstermektedir.

Faydalı Isı Geçiş Miktarı Bulguları

Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı olarak faydalı ısı geçiş miktarının gün içindeki değişimi Şekil 2’de sunulmuştur. Tüm aylar için faydalı ısı geçiş miktarı değerlerinin sabah saatlerinden itibaren artış eğilimi gösterdiği, öğle saatleri civarında maksimum seviyelere ulaştığı ve öğleden sonra saatlerinde azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Bu davranış, güneş ışıınım şiddetinin gün içindeki değişimi ile uyumlu olup, sistemin beklenen termodinamik çalışma karakteristiğini yansıtmaktadır.

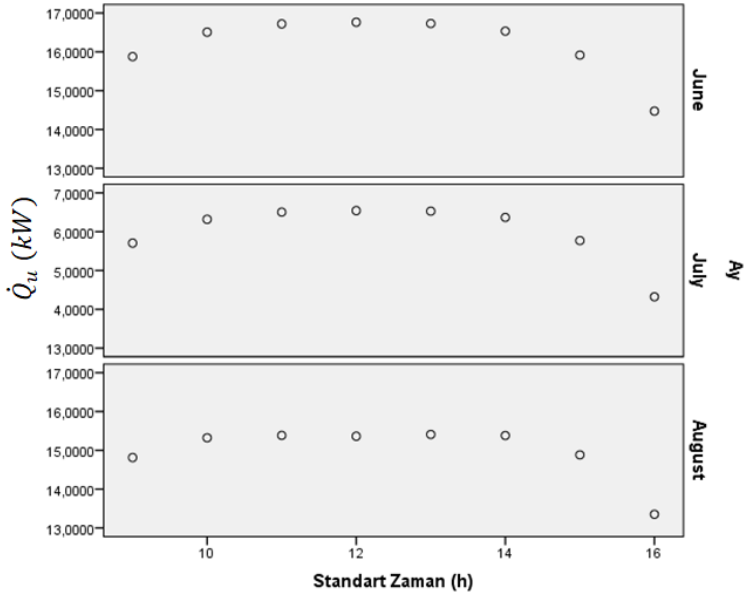
Aylar arasındaki karşılaştırmada, Haziran ve Temmuz aylarına ait faydalı ısı geçiş miktarı değerlerinin gerek büyüklük gerekse gün içi dağılım eğilimleri açısından birbirine oldukça benzer bir profil sergilediği görülmektedir. Buna karşılık, Ağustos ayına ait faydalı ısı geçiş miktarı değerlerinin özellikle günün ilerleyen saatlerinde daha düşük seviyelerde gerçekleştiği dikkat çekmektedir.

Şekil 2’de gözlenen bu farklılıklar, uygulanan robust tek yönlü varyans analizi sonuçlarıyla istatistiksel olarak da doğrulanmıştır. Nitekim, ay değişkeninin faydalı ısı geçiş miktarı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($F(2,00; 9,70) =$

16,0; $p < 0,001$). Hesaplanan etki büyüklüğünün yüksek düzeyde olması ($ES = 0,625$), aylık işletme koşullarının faydalı ısı geçiş miktarı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Gerçekleştirilen robust post-hoc karşılaştırmalar, Ağustos ayının Haziran ($p = 0,002$) ve Temmuz ($p = 0,003$) aylarından istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklılaştığını ortaya koymuştur. Buna karşılık, Haziran ve Temmuz ayları arasında faydalı ısı geçiş miktarı açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p = 0,512$). Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, sistemin Haziran ve Temmuz aylarında benzer bir performans sergilediği, Ağustos ayında ise faydalı ısı geçiş miktarı açısından belirgin bir düşüş yaşandığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Şekil 2 Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı faydalı ısı geçiş miktarı değişimi



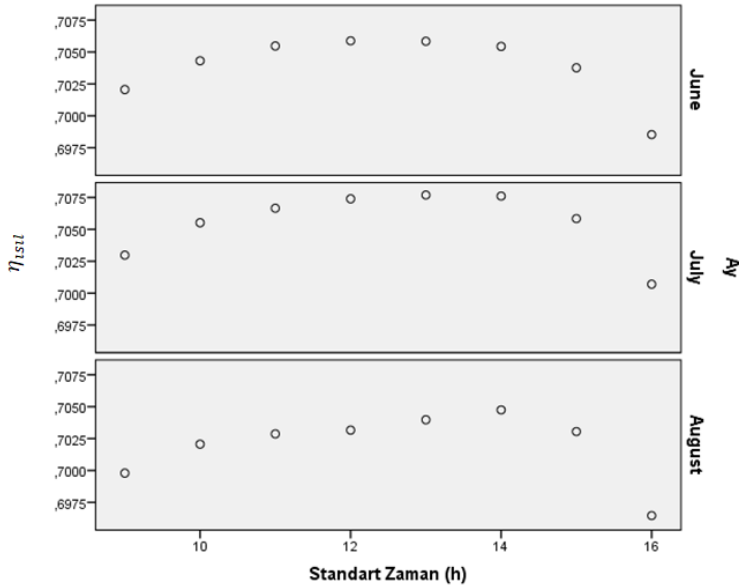
Kolektör Isıl Verimi Bulguları

Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı olarak kolektör ısı veriminin gün içindeki değişimi Şekil 3'de sunulmuştur. Tüm aylar için kolektör ısı veriminin sabah saatlerinden itibaren artış eğilimi gösterdiği, öğle ve öğleden sonraki saatlerde maksimum değerlere ulaştığı ve günün ilerleyen saatlerinde sınırlı bir azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Gün içi değişim aralığının görece dar olması, güneş enerjili çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminde kullanılan kolektörün enerji performansı açısından kararlı bir çalışma davranışı sergilediğini göstermektedir.

Aylar arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak değerlendirilmesi amacıyla uygulanan %20 kırılmış ortalamalara dayalı robust tek yönlü varyans analizi sonuçlarına göre, ay değişkeninin kolektör ısı verimi üzerindeki etkisi istatistiksel anlamlılık sınırına oldukça yakın bulunmuştur $F(2,00;9,94)=3,91;p=0,056$ $F(2,00; 9,94) = 3,91; p = 0,056$ $F(2,00;9,94)=3,91;p=0,056$. Buna karşın, hesaplanan etki büyüklüğü değerinin yüksek düzeyde olması ($ES = 0,713$), aylık işletme koşullarının kolektör ısı verimi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, istatistiksel anlamlılığın sınırda kalmasına rağmen pratik açıdan anlamlı bir farklılaşmanın mevcut olduğunu göstermektedir.

Robust post-hoc karşılaştırmalar incelendiğinde, Ağustos ve Temmuz ayları arasındaki farkın istatistiksel anlamlılık sınırına yaklaştığı ($p = 0,053$), buna karşılık Haziran–Temmuz ve Haziran–Ağustos ay çiftleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığı belirlenmiştir ($p > 0,05$). Bu bulgu, Haziran ve Temmuz aylarında kolektör ısı veriminin benzer bir davranış sergilediğini, Ağustos ayında ise özellikle günün ilerleyen saatlerinde sınırlı düzeyde farklılaşan bir performans ortaya çıktığını göstermektedir.

Şekil 3 Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı kolektör ısı verimi değişimi



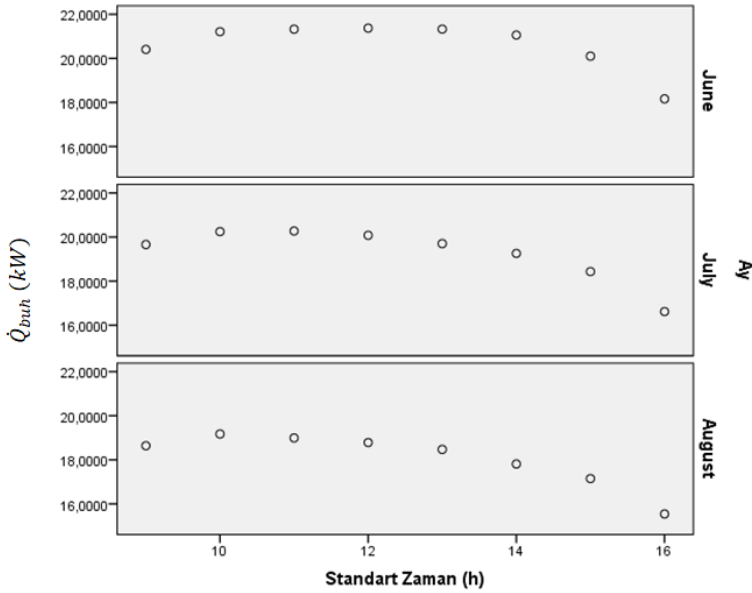
Genel olarak değerlendirildiğinde, kolektör ısı veriminin gün içindeki değişiminin güneş ışınım şiddetinin zamana bağlı karakteristiği ile uyumlu olduğu, aylar arası farklılıkların ise özellikle Ağustos ayındaki işletme koşullarına bağlı olarak belirginleştiği söylenebilir. Robust analiz sonuçları, kolektör ısı veriminin aylara bağlı

değişiminin istatistiksel açıdan sınırdan olmakla birlikte yüksek etki büyüklüğü nedeniyle sistem performansı açısından dikkate değer olduğunu ortaya koymaktadır.

Buharlaşma Isı Geçiş Miktarı Bulguları

Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı olarak buharlaşma ısı geçiş miktarının gün içindeki değişimi Şekil 4'te sunulmuştur. Tüm aylar için buharlaşma ısı geçiş miktarı değerlerinin sabah saatlerinden öğle saatlerine doğru artış eğilimi gösterdiği, gün ortasında maksimum seviyelere ulaştığı ve öğleden sonra saatlerinde belirgin bir azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Bu gün içi davranış, soğutma yükünün güneş ışınımı ve çevresel sıcaklık koşullarına bağlı olarak değiştiğini ve sistemin beklenen termodinamik karakteristiğini yansıttığını göstermektedir.

Şekil 4 Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı buharlaşma ısı geçiş miktarı değişimi



Aylar arasındaki karşılaştırmada, Haziran ayına ait buharlaşma ısı geçiş miktarı değerlerinin gün boyunca daha yüksek seviyelerde seyrettiği, Temmuz ayında bu değerlerin kısmen azaldığı ve Ağustos ayında ise özellikle günün ilerleyen saatlerinde belirgin biçimde daha düşük seviyelerde gerçekleştiği dikkat çekmektedir. Bu görsel farklılıklar, %20 kırılmış ortalamalar yöntemine dayalı olarak gerçekleştirilen robust tek yönlü varyans analizi ile istatistiksel olarak da doğrulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, ay değişkeninin buharlaşma ısı geçiş miktarı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur $F(2,00;9,76)=15,4; p<0,001$ $F(2,00; 9,76) = 15,4; p < 0,001$ $F(2,00;9,76)=15,4; p<0,001$. Ayrıca, hesaplanan etki büyüklüğünün yüksek düzeyde

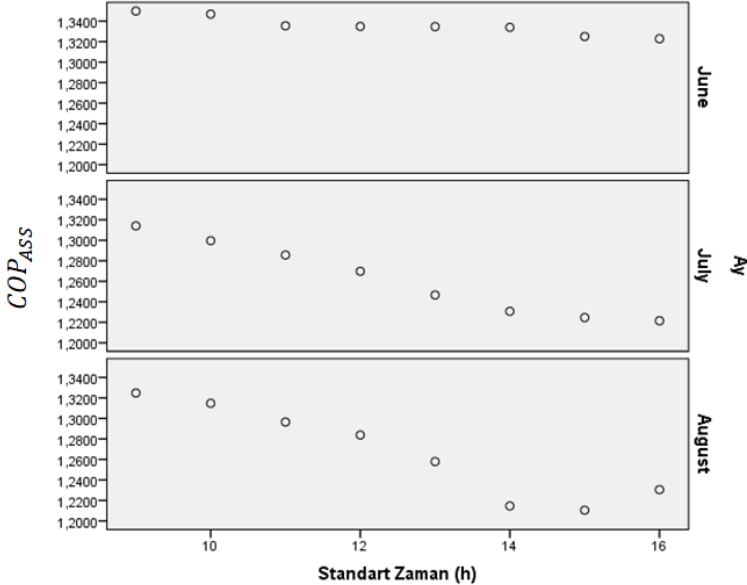
olması ($ES = 0,760$), aylık işletme koşullarının buharlaşma ısı geçiş miktarı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen robust post-hoc karşılaştırmalar, Ağustos ayının hem Temmuz ($p = 0,036$) hem de Haziran ($p < 0,001$) aylarından istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklılaştığını göstermektedir. Buna ek olarak, Temmuz ve Haziran ayları arasındaki farkın da istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir ($p = 0,029$). Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, buharlaşma ısı geçiş miktarının Haziran ayında en yüksek seviyelerde gerçekleştiği, Temmuz ayında azalma eğilimi gösterdiği ve Ağustos ayında ise sistemin daha düşük soğutma yükleri altında çalıştığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Performans Katsayısı Bulguları

Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı olarak absorpsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayısının gün içindeki değişimi Şekil 5’de sunulmuştur. Haziran ayında performans katsayısı değerlerinin gün boyunca sınırlı bir değişim gösterdiği ve görece yüksek seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Buna karşılık Temmuz ve Ağustos aylarında performans katsayısı değerlerinin sabah saatlerinden itibaren günün ilerleyen saatlerine doğru belirgin bir azalma eğilimi sergilediği dikkat çekmektedir. Bu eğilim, yüksek çevresel sıcaklıklar ve artan soğutma yüklerinin sistem çevrimi üzerindeki olumsuz etkisini yansıtmaktadır.

Şekil 5 Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı absorpsiyonlu soğutma sistemi performans katsayısı değişimi



Aylar arasındaki karşılaştırmada, Haziran ayına ait performans katsayısı değerlerinin hem büyüklük hem de gün içi dağılım açısından Temmuz ve Ağustos aylarından belirgin biçimde ayrıştığı görülmektedir. Temmuz ve Ağustos aylarına ait dağılımlar ise birbirine oldukça yakın bir profil sergilemektedir. Bu görsel bulgular, %20 kırılmış ortalamalar yöntemine dayalı olarak gerçekleştirilen robust tek yönlü varyans analizi ile istatistiksel olarak da doğrulanmıştır. Analiz sonucunda, ay değişkeninin performans katsayısı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur $F(2,00;7,30)=14,3; p=0,003$ $F(2,00; 7,30) = 14,3; p = 0,003$ $F(2,00;7,30)=14,3; p=0,003$. Ayrıca, hesaplanan etki büyüklüğünün orta–yüksek düzeyde olması ($ES = 0,634$), aylık işletme koşullarının absorpsiyonlu soğutma sisteminin performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Gerçekleştirilen robust post-hoc karşılaştırmalar, Haziran ayının hem Temmuz ($p = 0,012$) hem de Ağustos ($p = 0,039$) aylarından istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklılaştığını ortaya koymaktadır. Buna karşın, Temmuz ve Ağustos ayları arasında performans katsayısı açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p = 0,796$). Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, absorpsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayısının Haziran ayında daha yüksek ve kararlı bir seyir izlediği, Temmuz ve Ağustos aylarında ise benzer ve görece daha düşük seviyelerde gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır.

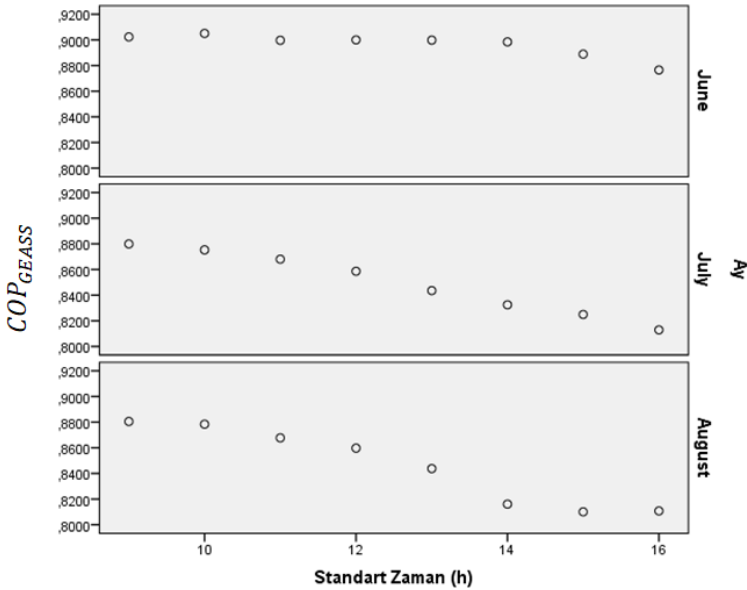
Güneş Enerjisi Destekli Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Performans Katsayısı Bulguları

Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı olarak güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayısının gün içindeki değişimi Şekil 6’da sunulmuştur. Haziran ayında değerlerinin gün boyunca sınırlı bir değişim gösterdiği ve görece yüksek seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Buna karşılık Temmuz ve Ağustos aylarında performans katsayısı değerlerinin sabah saatlerinden itibaren günün ilerleyen saatlerine doğru belirgin bir azalma eğilimi sergilediği dikkat çekmektedir. Bu eğilim, güneş kolektörleri çıkış sıcaklığındaki düşüşler ile artan çevresel yüklerin sistem performansı üzerindeki olumsuz etkisini yansıtmaktadır.

Aylar arasındaki karşılaştırmada, Haziran ayına ait performans katsayısı değerlerinin hem büyüklük hem de gün içi dağılım açısından Temmuz ve Ağustos aylarından belirgin biçimde ayrıştığı görülmektedir. Temmuz ve Ağustos aylarına ait dağılımlar ise birbirine oldukça benzer bir profil sergilemektedir. Bu görsel bulgular, %20 kırılmış ortalamalar yöntemine dayalı olarak gerçekleştirilen robust tek yönlü varyans analizi ile istatistiksel olarak da desteklenmiştir. Analiz sonucunda, ay değişkeninin performans katsayısı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur $F(2,00;7,28)=14,2; p=0,003$ $F(2,00; 7,28) = 14,2; p = 0,003$ $F(2,00;7,28)=14,2; p=0,003$. Hesaplanan etki büyüklüğünün orta–yüksek düzeyde olması ($ES = 0,652$), aylık işletme koşullarının güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma sisteminin performansı üzerinde belirgin bir rol oynadığını göstermektedir.

Gerçekleştirilen robust post-hoc karşılaştırmalar, Haziran ayının hem Temmuz ($p = 0,016$) hem de Ağustos ($p = 0,028$) aylarından istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklılaştığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, Temmuz ve Ağustos ayları arasında performans katsayısı açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p = 0,809$). Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, güneş enerjisi destekli çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayısının Haziran ayında daha yüksek ve kararlı bir düzeyde gerçekleştiği, Temmuz ve Ağustos aylarında ise benzer ve görece daha düşük seviyelerde seyrettiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Şekil 6 Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma sistemi performans katsayısı değişimi



Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Ekserji Verimi Bulguları

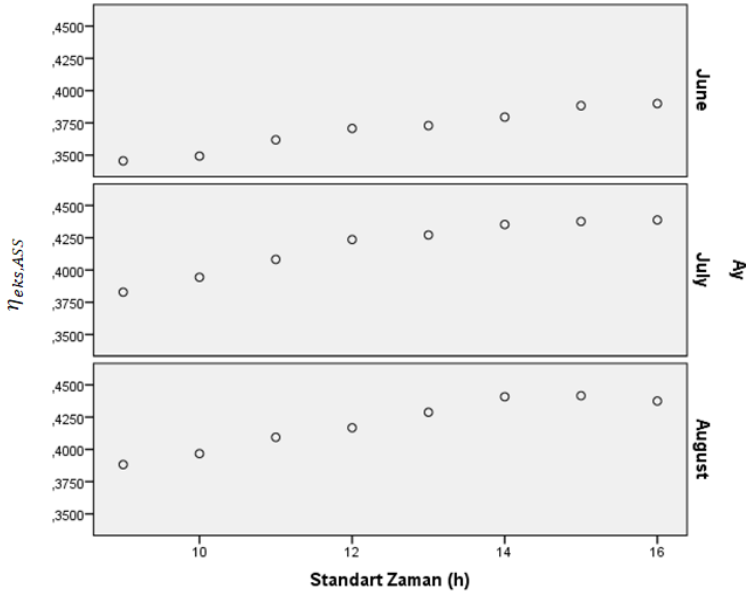
Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı olarak çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminin ekserji veriminin gün içindeki değişimi Şekil 7'de sunulmuştur. Tüm aylar için ekserji verimi değerlerinin sabah saatlerinden itibaren artış eğilimi gösterdiği, günün ilerleyen saatlerinde daha yüksek seviyelere ulaştığı ve gün sonuna doğru bu seviyelerin büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Bu eğilim, jeneratör sıcaklığı ile sistem bileşenleri arasındaki sıcaklık farklarının gün içerisinde artmasına bağlı olarak ekserji yıkım oranlarının azalmasıyla uyumlu bir davranış sergilemektedir.

Aylar arasındaki karşılaştırmada, Haziran ayına ait ekserji verimi değerlerinin Temmuz ve Ağustos aylarına kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği dikkat çekmektedir. Temmuz ve Ağustos aylarına ait dağılımlar ise hem büyüklük hem de gün içi değişim eğilimi açısından birbirine oldukça yakın bir profil sergilemektedir. Bu görsel

farklılıklar, %20 kırılmış ortalamalar yöntemine dayalı olarak gerçekleştirilen robust tek yönlü varyans analizi ile istatistiksel olarak da doğrulanmıştır. Analiz sonucunda, ay değişkeninin ekserji verimi üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur $F(2,00;9,93)=12,5; p=0,002$ $F(2,00; 9,93) = 12,5; p = 0,002$ $F(2,00;9,93)=12,5; p=0,002$. Ayrıca, hesaplanan etki büyüklüğünün yüksek düzeyde olması ($ES = 0,739$), aylık işletme koşullarının sistemin ekserji performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen robust post-hoc karşılaştırmalar, Haziran ayının hem Temmuz ($p = 0,003$) hem de Ağustos ($p = 0,003$) aylarından istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklılaştığını göstermektedir. Buna karşılık, Temmuz ve Ağustos ayları arasında ekserji verimi açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p = 0,963$). Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sisteminin ekserji veriminin Haziran ayında daha yüksek bir düzeyde gerçekleştiği, Temmuz ve Ağustos aylarında ise benzer ve görece daha düşük seviyelerde seyrettiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Şekil 7 Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemi ekserji verimi değişimi



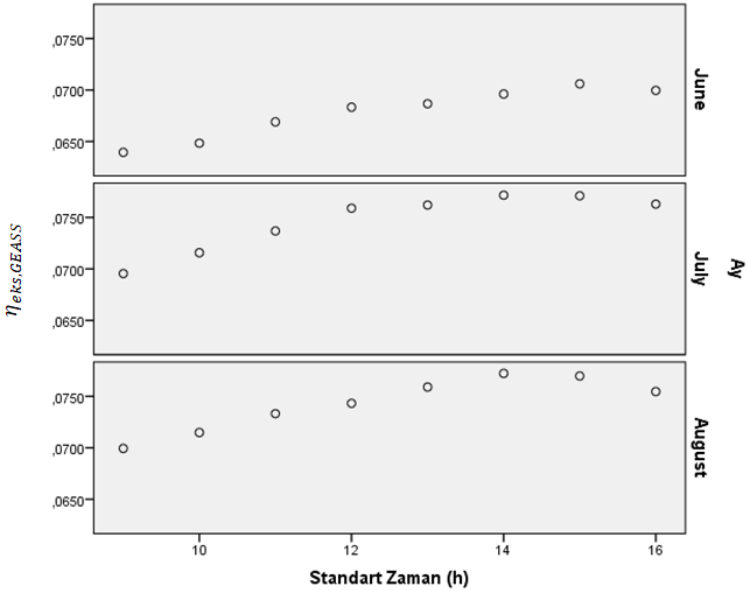
Güneş Enerjili Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Ekserji Verimi Bulguları

Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı olarak güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminin ekserji veriminin gün içindeki değişimi Şekil

10'da sunulmuştur. Tüm aylar için ekserji verimi değerlerinin sabah saatlerinden itibaren artış eğilimi gösterdiği, öğle saatlerine doğru daha yüksek seviyelere ulaştığı ve öğleden sonra bu seviyelerin büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Bu davranış, gün içerisinde güneş ışınımının artmasına bağlı olarak jeneratör sıcaklığının yükselmesi ve sistem bileşenleri arasındaki etkin sıcaklık farklarının artması sonucunda ekserji yıkımlarının görece azalmasıyla tutarlı bir eğilim sergilemektedir.

Aylar arası karşılaştırmada, Haziran ayına ait ekserji verimi değerlerinin Temmuz ve Ağustos aylarına kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleştiği, Temmuz ve Ağustos aylarının ise hem mutlak değerler hem de gün içi değişim profili açısından birbirine oldukça benzer bir dağılım sunduğu dikkat çekmektedir.

Şekil 8 Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için standart zamana bağlı güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemi ekserji verimi değişimi



Bu görsel bulgular, %20 kırılmış ortalamalara dayalı olarak gerçekleştirilen robust tek yönlü varyans analizi sonuçlarıyla istatistiksel olarak da desteklenmiştir. Robust ANOVA sonuçlarına göre, ay değişkeninin ekserji verimi üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur $F(2,00;9,99)=13,0;p=0,002$ $F(2,00; 9,99) = 13,0; p = 0,002$ $F(2,00;9,99)=13,0;p=0,002$. Hesaplanan etki büyüklüğünün yüksek düzeyde olması (ES = 0,795; %95 GA: 0,613–0,957), aylık işletme ve çevresel koşulların güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminin ekserji performansı üzerinde belirgin ve güçlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen robust post-hoc karşılaştırmalar, Haziran ayının hem Temmuz ($p = 0,003$) hem de Ağustos ($p = 0,003$) aylarından istatistiksel olarak anlamlı biçimde

farklılaştığını göstermektedir. Buna karşılık, Temmuz ve Ağustos ayları arasında ekserji verimi açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p = 0,731$). Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminin ekserji veriminin Haziran ayında daha düşük seviyelerde gerçekleştiği, Temmuz ve Ağustos aylarında ise benzer ve görece daha yüksek performans düzeylerinde seyrettiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, Bandırma iklim koşullarında çalışan çift kademeli güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji temelli performansı, standart zaman ve ay değişkenleri esas alınarak kapsamlı biçimde incelenmiştir. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarını kapsayan analizler sonucunda, sistem performansının hem gün içi işletme koşullarına hem de aylık çevresel değişkenlere duyarlı olduğu açık biçimde ortaya konulmuştur.

Gün içi değerlendirmeler, tüm aylarda güneş ışınlamına bağlı olarak faydalı ısı geçiş miktarı ve buharlaşma ısı geçiş miktarının öğle saatleri civarında maksimum değerlere ulaştığını, öğleden sonra ise azalma eğilimine girdiğini göstermiştir. Bu durum, sistemin beklenen termodinamik davranışıyla uyumlu olup, güneş enerjisi girdisinin soğutma performansı üzerindeki belirleyici rolünü teyit etmektedir. Özellikle buharlaşma ısı geçiş miktarı açısından aylar arasında belirgin farklılıklar gözlenmiş ve Haziran ayının en yüksek soğutma kapasitesine karşılık geldiği belirlenmiştir.

Kolektör ısı verimi açısından değerlendirildiğinde, sistemin genel olarak kararlı bir enerji verim karakteristiği sergilediği, ancak Ağustos ayında günün ilerleyen saatlerinde sınırlı bir performans düşüşünün ortaya çıktığı görülmüştür. Robust analiz sonuçları, istatistiksel anlamlılığın sınırdan kalmasına rağmen yüksek etki büyüklüğü değerleri ile aylık işletme koşullarının kolektör performansı üzerinde pratik açıdan önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Performans katsayıları incelendiğinde, hem absorpsiyonlu soğutma sistemi performans katsayısı hem de güneş enerjisi destekli sistem performans katsayısı açısından Haziran ayının daha yüksek ve kararlı bir performans sunduğu belirlenmiştir. Temmuz ve Ağustos aylarında ise özellikle günün ilerleyen saatlerinde COP değerlerinde belirgin bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, artan çevresel sıcaklıklar ve yükselen soğutma yüklerinin sistem çevrimi üzerindeki olumsuz etkileriyle ilişkilendirilmektedir.

Ekserji temelli değerlendirmeler, enerji analizlerini tamamlayıcı nitelikte önemli bulgular sunmuştur. Absorpsiyonlu sistem ekserji verimi açısından Haziran ayının daha avantajlı olduğu, Temmuz ve Ağustos aylarında ise benzer ve görece daha düşük değerlerin elde edildiği belirlenmiştir. Buna karşılık, güneş enerjili sistem ekserji verimi Temmuz ve Ağustos aylarında daha yüksek ve kararlı bir seyir izlemiş, Haziran ayında ise daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu durum, güneş enerjisi katkısının yaz ortası aylarında sistem ekserji performansını daha etkin biçimde desteklediğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen sonuçlar enerji temelli performans göstergeleri ile ekserji temelli göstergelerin her zaman paralel eğilimler sergilemediğini, bu nedenle enerji ve ekserji analizlerinin birlikte ele alınmasının sistem performansının doğru ve bütüncül biçimde değerlendirilmesi açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin tasarım ve işletme stratejilerinin aylık ve saatlik değişkenler dikkate alınarak optimize edilmesi gerektiğini göstermekte olup, benzer iklim koşullarındaki uygulamalar için yol gösterici nitelik taşımaktadır.

Teşekkürler

Bu alışma, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: BAP-24-1004-001

Kaynakça

Asadi, J., Amani, P., Amani, M., Kasaeian, A., & Bahiraei, M. (2018). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of absorption cooling system driven by various solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 173, 715–727. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.013>

Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2018a). Parametric analysis and optimization of a cooling system with ejector-absorption chiller powered by solar parabolic trough collectors. *Energy Conversion and Management*, 168, 329–342. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.024>

Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2018b). Performance analysis and optimization of an absorption chiller driven by nanofluid based solar flat plate collector. *Journal of Cleaner Production*, 174, 256–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.313>

Bellos, E., Tzivanidis, C., & Antonopoulos, K. A. (2016). Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types. *Applied Thermal Engineering*, 102, 749–759. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.032>

Bellos, E., Tzivanidis, C., Symeou, C., & Antonopoulos, K. A. (2017). Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven absorption chiller – A dynamic approach. *Energy Conversion and Management*, 137, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.041>

Bellos, E., Tzivanidis, C., Pavlovic, S., & Stefanovic, V. (2017). Thermodynamic investigation of LiCl–H₂O working pair in a double effect absorption chiller driven by parabolic trough collectors. *Thermal Science and Engineering Progress*, 3, 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.005>

De, R. K., & Ganguly, A. (2020). Performance comparison of solar-driven single and double-effect LiBr–water vapor absorption system based cold storage. *Thermal Science and Engineering Progress*, 17, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100488>

Gogoi, T. K., & Saikia, S. (2019). Performance analysis of a solar heat driven organic Rankine cycle and absorption cooling system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 13, 100372. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100372>

Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., & Ani, F. N. (2020a). A detailed parametric study of a solar driven double-effect absorption chiller under various solar radiation data. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119750>

Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Saat, A., Rehman, S., & Ani, F. N. (2020b). Charging and discharging characteristics of absorption energy storage integrated with a solar driven double-effect absorption chiller for air conditioning applications. *Journal of Energy Storage*, 29, 101374. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101374>

Kırtepe, E. (2024). Güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminde kolektörde nanoakışkan kullanılmasının sistem performansına etkisinin termodinamik analizi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(76), 69–81. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2024267609>

Kırtepe, E., & Yılmaz, R. (2025). Bandırma iklim koşullarında güneş enerjili absorpsiyonlu soğutma sisteminin performans analizi. A. S. Kurnuç (Ed.), *Makine mühendisliği değerlendirmeleri içinde* (ss. 26–53). İstanbul: YAZ Yayınları.

Li, H., Huang, S., Wang, X., Zhao, Y., Bu, X., & Wang, L. (2022). Analysis of H₂O/EMISE absorption chiller driven by stationary solar collectors in hot-humid climate. *Thermal Science and Engineering Progress*, 27, 101155. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101155>

Lubis, A., Jeong, J., Saito, K., Giannetti, N., Yabase, H., Alhamid, M. I., & Nasruddin. (2016). Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates. *Renewable Energy*, 99, 825–835. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.055>

Ma, H., Li, Q., Wang, D., Song, Q., Zhou, S., Wang, X., & Li, Y. (2022). Operating performance and economic analysis of solar single/double-effect compound absorption refrigeration system. *Solar Energy*, 247, 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.005>

Mazloumi, M., Naghashzadegan, M., & Javaherdeh, K. (2008). Simulation of solar lithium bromide–water absorption cooling system with parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management*, 49, 2820–2832. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.014>

The jamovi project. (2024). jamovi (Version 2.6) [Computer software]. Sydney, Australia: The jamovi project. Retrieved from <https://www.jamovi.org>

Özen, D. N., & Yağcıoğlu, K. Ç. (2020). Thermodynamic and exergy analysis of an absorption cooling system for different refrigerants. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 93–103.

Wu, W., Leung, M., Ding, Z., Huang, H., Bai, Y., & Deng, L. (2020). Comparative analysis of conventional and low-GWP refrigerants with ionic liquid used for compression-assisted absorption cooling cycles. *Applied Thermal Engineering*, 172, 115145. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115145>

Zheng, X., Shi, R., Wang, Y., You, S., Zhang, H., Xia, J., & Wei, S. (2019). Mathematical modeling and performance analysis of an integrated solar heating and cooling system driven by parabolic trough collector and double-effect absorption chiller. *Energy and Buildings*, 202, 109400. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109400>

BÖLÜM 8

DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİNE GİRİŞ VE ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN ÇEKME NUMUNE DAYANIMINLARININ DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

1. Yazar Adı-(Selman TEZCAN)¹

Giriş

Birçok yeni mühendis, araştırmacı ya da bilim insanı, deney tasarlama konusunda çok az eğitim ya da hiç eğitim almamaktadır. Verilen dersler ise çoğu zaman soyut ve endüstriyel uygulamalardaki pratik hususlardan kopuk olmaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak, genellikle deneysel tasarım iş yerinde şirket içi kısa kurslar olarak önümüze çıkmaktadır. Bu kurslar, mühendis ve bilim insanlarının tekniklere hızlı şekilde başlamasına yardımcı olur; ancak uzun vadeli gerçek bir anlayış geliştirmek için gereken derinlik ve titizlikten çoğu zaman yoksundur. Bu kitap bölümünün amacı, bu boşluğu doldurmaya yardımcı olmak; temel materyali pratik problemlere hızlı uygulanabilir biçimde sunarken, aynı zamanda uzun vadeli gelişme için gerekli yapı ve anlayışı sağlamaktır. Kitap bölümü

¹ Öğr. Gör. Dr.,Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi,Makine Mühendisliği,Orcid: 0000-0003-0573-6781

temel konseptler ve istatistiksel analiz değerlendirmelerini kapsayacaktır.

Temel konseptler

Bu bölümde öncelikle kalitenin tanımı, kaliteye geleneksel yaklaşım ve Taguchi yaklaşımları açıklanacaktır. Temel bazı istatistiksel konseptlere değinilerek sayısal örnekler üzerinden konu somutlaştırılacaktır. Ardından verilerin ortalamalar analizi (ANOM) ve varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirmeler ele alınacaktır. Son olarak üç boyutlu yazıcı yardımıyla üretilmiş numunelerin deneysel çekme dayanım sonuçları ve istatistiksel yorumlamaları yapılacaktır.

Kalite tanımı ve genel yaklaşımlar

Gündelik hayatta kalite kelimesi çoğu zaman iyi veya güzel ile eş anlamlı olarak kullanılır. Bu ifadeler soyut ve niteliksel olarak açıklama sağlasa da somut ve niceliksel olarak ne olup bittiğini ifade etmekte yetersizdir. Kaliteye daha anlamlı bir yaklaşım bir ürünün gerek şartlara tam olarak uymasının maliyet göz önünde değerlendirilmesidir. Bu bağlamda genellikle iki farklı yaklaşım sıkça endüstri ve literatürde karşımıza çıkmaktadır (Taguchi, 1986), (Phadke, 1995), (Funkenbusch, 2004):

Geleneksel kalite yaklaşımı (kabul/ret),

- Ürün sadece tolerans sınırlarının dışına çıkarsa kusurlu sayılır ve maliyet oluşur.
- Tolerans içindeki tüm parçalar eşit olarak kabul edilir.
- Uygulamada maliyet genellikle bir parçanın kusurlu olması halinde oluşan maliyet.

Ürün tolerans içinde (Alt tolerans sınırı (ATS) ve üst tolerans sınırları (ÜTS) arasında) → kayıp = 0

Ürün tolerans dışında $\rightarrow$ sabit bir kayıp $= C_d$

$C_x \rightarrow$ kayıp fonksiyonu, $x \rightarrow$ ölçülen parça değeri

$$C_x = \begin{cases} 0, & \text{eğer} & ATS \leq x \leq ÜTS \\ C_d, & \text{eğer} & x < ATS \text{ ya da } x > ÜTS \end{cases}$$

Kabul/ret yaklaşımında toplam kayıp,

$$E[C] = p_{def} \times C_d$$

$p_{def} \rightarrow$ Tolerans dışı düşme olasılığı

$C_d \rightarrow$ Tolerans dışına düşen her bir ürün için maliyet

Kalite için kayıp fonksiyonu tanımlama,

- Kalite sapmasının hemen her değeri için bir maliyet tanımlar; sapma hedef değerden ne kadar büyükse kayıp o kadar büyükür.
- En yaygın form (Taguchi'nin kuadratik kayıp (Loss) fonksiyonu):

$$L_{(y)} = k(y - m)^2$$

- y : ölçülen özellik, m : hedef değer, k : maliyet katsayısı.

$$k = \frac{C_d}{\Delta^2}$$

$C_d \rightarrow$ Tolerans dışına düşen her bir ürün için maliyet

$\Delta \rightarrow$ Tolerans aralığının yarısı

- Böylece hedefe yakın olmak da ekonomiye katkı sağlar; tolerans sınırları içinde dahi sapma maliyet üretir.
- Tüm ürün veya süreç için beklenen Taguchi kaybı:

$$E[L] = k [(\mu - T)^2 + \sigma^2]$$

$\mu \rightarrow$ Ürün veya süreç ortalaması

$\sigma^2 \rightarrow$ Ürün veya süreç varyansı

Görüldüğü üzere bu yaklaşımda nominalden sapma ve varyasyonun ikisi de kayba katkı yapamaktadır.

Geleneksel ve Taguchi kalite yaklaşımı karşılaştırması

Geleneksel ve Taguchi yaklaşımının karşılaştırılması kapsam, süreç tasarımı ve maliyet tahmini açısından aşağıda yapılmıştır.

Kapsam: Geleneksel sadece tolerans dışını cezalandırır ve toleransa çok yakın değerleri de ideal değer gibi görür; Taguchi tüm sapmaları cezalandırır.

Süreç tasarımı: Taguchi, proses ortalamasını hedefe çekme ve varyansı küçültmenin her zaman ekonomik fayda sağladığını gösterir; geleneksel yaklaşımda bazen tolerans içinde kalmak yeterli görülür.

Maliyet tahmini: Taguchi genellikle daha gerçekçi (uzun vadeli ve müşteri perspektifli) maliyet tahminleri verir; geleneksel yöntemde gerçek dünyadaki performans bozulmaları göz ardı edilebilir.

Kalitenin niceliksel ölçüm örneği:

Bir otomotiv üretim tesisinde CNC tezgâhında piston kolu pimi üretilmektedir. Bu pim, motorun krank mekanizmasında kritik bir rol oynadığı için hem ölçü hassasiyeti hem de performans kriterleri oldukça önemlidir. Ürün için müşteri tarafından belirlenen ana kritik özellik pim çapıdır.

Hedef değer (T): 20.00 mm

İzin verilen tolerans aralığı: 20.00 ± 0.50 mm

Ortalama çap: $\mu = 20.30$ mm

Standart sapma: $\sigma = 0.20$ mm

Tolerans dışı her parça için hurda işleme maliyeti: $C_d = 60\text{TL/parça}$

Geleneksel (kabul/ret) yaklaşımı için parça başı beklenen maliyet

Kusur koşulları: $x < 19.5$ veya $x > 20.5$

Her iki durum için de z skorlarının hesaplanması:

Alt sınır için:

$$z_{alt} = \frac{ATS - \mu}{\sigma} = \frac{19.50 - 20.30}{0.20} = -4$$

Üst sınır için:

$$z_{üst} = \frac{ÜTS - \mu}{\sigma} = \frac{20.50 - 20.30}{0.20} = 1$$

Standart normal tablolarından (Z Table, 2025):

$$P(Z < -4.0) \approx 0.00003167$$

$$P(Z > 1.0) = 1 - \Phi(1.0) \approx 1 - 0.841344746 = 0.158655254.$$

Toplam kusur olasılığı:

$$p_{def} = 0.00003167 + 0.158655254 \approx 0.158686925.$$

Geleneksel beklenen parça başı maliyet:

$$E[C] = p_{def} \times C_d \approx 0.158686925 \times 60 \approx 9.52 \text{ TL}$$

Taguchi Quadratic Loss yaklaşımıyla parça başı beklenen maliyet:

$$E[L] = k [(\mu - T)^2 + \sigma^2]$$

$$k = \frac{C_d}{\Delta^2} = \frac{60}{0.5^2} = 240$$

Hedef değer (T): 20.00 mm

Ortalama çap: $\mu = 20.30$ mm

Standart sapma: $\sigma = 0.20$ mm

$$E[L] = 240 [(20.30 - 20)^2 + 0.2^2] = 31.2 \text{ TL}$$

Taguchi'nin tasarım aşamaları

Taguchi'nin tasarım aşamaları üç gruptan oluşmaktadır (Taguchi, 1986).

Kavramsal tasarım: Ürünün ve sistemin temel işlevi, hangi mimarinin/teknolojinin kullanılacağı belirlenir. “Ne yapmalı?” sorusuna cevap verir. (Örn. bir bağlantı pimi mi yoksa perçin mi kullanılacak; hangi malzeme seçilecek.)

Parametre tasarımı: Üretim/çalışma koşullarındaki ayarlar (kontrol faktörleri) seçilir ve optimize edilir ki ürün hedefe yakın ve stabil olsun. Amaç varyansı azaltmak ve bias'ı hedefe çekmektir. Genelde Taguchi deney tabloları bu amaç için kullanılır. (Örn. talaş hızı, ilerleme, takım geometri ayarları.)

Tolerans tasarımı: Müşteri gereksinimleri, maliyetler ve üretim yeteneği göz önünde bulundurularak tolerans aralığı belirlenir. Bu aşamada ne kadar sıkı tolerans gerektiğine karar verilir. Sıkı tolerans yüksek üretim maliyetli ile birlikte gelir.

Basit örnek üzerinden Taguchi'nin üç aşamasını değerlendirelim.

Bir plastik kapak üretilmek isteniyor. Kapağın iç çapı şişeye ne gevşek ne de çok sıkı geçmeli. Bu sebeple hedef çap 30 mm olarak belirleniyor. Kabul edilebilir aralık 29.90 ile 30.10 mm olarak belirtiliyor.

Kavramsal tasarım aşaması: Ürünün çalışma prensibi, malzemesi ve temel tasarım yaklaşımı seçilir. Örneğimiz için Tablo 1’de verilen iki alternatif belirleyelim.

Tablo 1 Kavramsal tasarım üretim yöntemi alternatifleri

Alternatif	Üretim Yöntemi	Avantaj	Dezavantaj
A	Enjeksiyon kalıplama	Ucuz	Boyut dalgalanması yüksek
B	CNC torna işleme	Hassas tolerans	Parça maliyeti yüksek

Enjeksiyon + cam elyaf katkılı PP (polipropilen) ile boyut kararlılığı daha iyi hale getirilebilir, bu yüzden enjeksiyon kalıp kavramsal tasarım aşamasında tercih edilmiştir. Bu aşamada herhangi bir hesaplama yoktur, stratejik seçim söz konusudur.

Parametre tasarımı: Bu aşamada varyasyonu azaltacak kontrol parametreleri belirlenir. Tablo 2’de verilen kontrol parametreleri ve benzer şekilde deney sonuçlarımızı değerlendireceğimiz ölçülebilir cevap veya cevaplar belirlenir.

Tablo 2 Kontrol parametreleri ve düzeyleri

Faktör	Düzy 1	Düzy 2	Cevap
A: Kalıp sıcaklığı	40 °C	70 °C	Kapak çapı ve sapma miktarı
B: Enjeksiyon basıncı	50 MPa	70 MPa	Kapak çapı ve sapma miktarı
C: Soğutma süresi	10 s	15 s	Kapak çapı ve sapma miktarı

Bu aşamaları takiben nasıl bir deneysel tasarım tablosu kullanılacağını belirlemenmesi gerekmektedir. Bu örneğimiz için Tablo 3’te belirtilen full faktöriyel (tüm faktörlerin kombinasyonları içeren) Taguchi L8 ortogonal dizini seçilmiştir. Bu örneğimiz için sonuçlar Taguchi S/N oranı doğrultusunda değerlendirilecektir. Taguchi’ye göre bir prosesin kalitesini belirleyen iki şey vardır:

- Signal (S) → Üretmek istediğimiz ortalama performans.
- Noise (N) → Proses değişkenlikleri (sıcaklık, makine kararsızlığı).

Bu değerlendirme kriterinde amacımız S/N oranını maksimize ederek varyansı azaltıp kaliteyi arttırmaktır. Ölçülen cevabın tipine göre S/N yaklaşımının üç temel türü vardır (Taguchi, 1986).

Daha küçük daha iyi – Smaller the better (örnek: çap sapması, hata oranı)

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum y_i^2\right)$$

Daha büyük daha iyi – Larger the better (örnek: dayanım, verim)

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2}\right)$$

Hedef değer daha iyi – Nominal the better (örnek: zaman, sıcaklık)

$$S/N = 10 \log\left(\sum \frac{m^2}{y_i^2}\right)$$

Örneğimizde çap sapması kullanıldığı için Smaller-the-better (daha küçük daha iyi) uygulanması uygundur. Hesaplanan S/N değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3 Taguchi L8 deney tasarımı

Deney	A	B	C	Ölçülen çap	Sapma	S/N (dB)
1	40	50	10	29.92	-0.08	21.94
2	40	50	15	30.06	+0.06	24.44
3	40	70	10	29.91	-0.09	20.91
4	40	70	15	30.08	+0.08	21.94
5	70	50	10	29.95	-0.05	26.02
6	70	50	15	30.02	+0.02	34.00
7	70	70	10	29.98	-0.02	34.00
8	70	70	15	30.03	+0.03	30.46

Son olarak tolerans tasarım aşamasında tolerans kararı verilecektir. Tolerans daraltma işlemi yapılacaksa daha önce hesaplamalarını yaptığımız gibi kayıp fonksiyonu tanımlamasıyla maliyet hesaplamaları çıkarılmalıdır. Önceki kısımlarda bu hesaplamalar yapıldığı için bu örnek için detaylı nicel hesaplamalar yapılmamıştır.

Ortalamaların (ANOM) ve varyansların analizi (ANOVA)

Tasarlanmış bir deneyin sonuçlarının analizi genellikle aşağıdaki hedeflerden bir veya birkaçına yöneliktir:

- Kontrol parametreleri için en iyi düzeylerin belirlenmesi.
- Faktörlerin önem sırasına göre derecelendirilmesi.

- Faktörlerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığının belirlenmesi (ANOVA).

Bu bölümde yukarıdaki belirtilen amaçlar doğrultusunda, verilen deney dizisi (experimental array) üzerinde ANOM (Analysis of Means) ve ANOVA (Analysis of Variance) için gerekli terimlerin nasıl hesaplanacağını öğreneceğiz (Montgomery, 2013).

ANOM hesaplamaları

ANOM, her faktörün seviye ortalamalarını genel ortalama ile kıyaslayarak, hangi seviyelerin genel ortalamadan anlamlı şekilde yüksek olduğunu ya da hangi seviyelerin anlamlı şekilde düşük olduğunu göstermeye yarayan bir yöntemdir.

Genel ortalama, tüm deney değerlerinin ortalaması ($\bar{Y}$):

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{N}$$

$Y_i \rightarrow$ Her bir deneyin cevabı

$N \rightarrow$ Toplam deney sayısı

Plastik kapak üretimi örneğimiz için,

$$\bar{Y} = 26.21375$$

Her faktör düzeyinin ortalaması o faktörün farklı düzeyde yapılan deneylerinin ortalamasıdır. Örneğimizde her bir faktör için dörder tane düzey 1 ve düzey 2 deneyleri mevcuttur. Aşağıda bu değerler sırasıyla verilmiştir.

$$\bar{Y}_{A1} = 22.81, \bar{Y}_{A2} = 31.12$$

$$\bar{Y}_{B1} = 26.10, \bar{Y}_{B2} = 26.83$$

$$\bar{Y}_{C1} = 25.72, \bar{Y}_{C2} = 27.71$$

Her faktörün etkisi kendi düzeyleri arasındaki farkın miktarı ile ölçülür. Farkın şiddeti (mutlak değeri) ne kadar büyükse cevaba olan

etkisi de o ölçüde yüksek olarak belirlenir. Faktörler arasında bağıl olarak önem derecesi tespiti yapmak mümkündür.

Örneğimiz için,

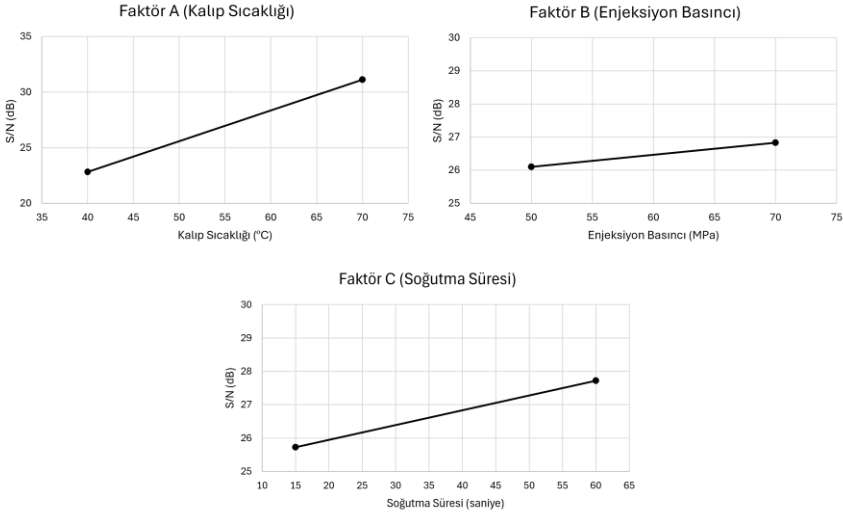
$$\Delta A = 22.81 - 31.12 = -8.41$$

$$\Delta B = 26.10 - 26.83 = -0.73$$

$$\Delta C = 25.72 - 27.71 = -1.99$$

Bu sonuçlar doğrultusunda $A > C > B$ faktör etki sıralaması yapılabilir. Ayrıca S/N değeri yüksek olan faktör düzeyleri belirlenerek de en iyi sonuç veren deney seti de belirlenebilir. Örneğimiz için bu set A2 – B2 – C2 yani kalıp sıcaklığı 70 °C, enjeksiyon basıncı 70 MPa ve soğutma süresi 15 s olarak bulunmuştur. Faktörlerin grafikleri Şekil 1’de ayrı ayrı gösterilmektedir.

Şekil 1 Faktörlerin ANOM grafikleri



Ayrıca en iyi deney sonuçları baz alınarak tasarımıımız örnek bir öngörü değeri (y_{pred}) oluşturabilir (Montgomery, 2013). Bu öngörü değeri ile deney sonuçları karşılaştırılarak model ve deney

arasındaki hata belirlenebilmektedir. Örneğimiz için en iyi set A2 – B2 – C2 dir.

$$y_{pred} = \bar{Y} + (\bar{Y}_{A2} - \bar{Y}) + (\bar{Y}_{B2} - \bar{Y}) + (\bar{Y}_{C2} - \bar{Y})$$

$$y_{pred} = 26.21375 + (31.12 - 26.21375) + (26.83 - 26.21375) + (27.71 - 26.21375)$$

$$y_{pred} = 33.2325$$

$$\% \text{ Hata hesabı} = \frac{\text{Deneysel Sonuç} - y_{pred}}{\text{Deneysel Sonuç}} \times 100$$

Örneğimizde en iyi sonuç deney numara 6'da gerçekleşmiş olup ölçülen S/N değeri 34.00'dır. Modelimizin bu set için bulduğu değer ise 33.2325'tir. Buna bağlı olarak hata hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\% \text{ Hata hesabı} = \frac{34 - 33.2325}{34} \times 100 = 2.2573$$

Başka deney setleri ve hatta tasarımda bulunmayan değerler için de öngörüle bulunmak mümkündür. Bu setler için de deneysel çalışma yapılarak validasyon gerçekleştirilebilir.

Varyans analizi (ANOVA) hesaplamaları

Varyans Analizi (ANOVA), Taguchi Deney Tasarımı (Design of Experiments, DOE) yaklaşımı kapsamında, kontrol faktörlerinin bir performans karakteristiği üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Taguchi yöntemi, deney sonuçlarını yalnızca ortalama performans üzerinden değil, aynı zamanda sistemin gürültü faktörlerine karşı dayanıklılığını temsil eden Sinyal/Gürültü (S/N) oranı üzerinden analiz ederek, daha kararlı ve tekrarlanabilir proses koşullarının belirlenmesini amaçlar. ANOVA, S/N oranındaki toplam değişkenliği faktörlere ve hata terimine ayırarak, hangi kontrol faktörlerinin sürece anlamlı katkı sağladığını ve bu katkıların göreceli

önemini nicel olarak ortaya koyar. Bu sayede Taguchi DOE yaklaşımı ile minimum deney sayısı kullanılarak kontrol parametrelerinin optimize edilmesi ve kalite karakteristiklerinin istatistiksel olarak güvenilir biçimde yorumlanması mümkündür.

ANOVA analizinde, cevap değişkenine ait toplam değişkenlik ilk olarak toplam kareler toplamı (SST) ile ifade edilir. SST, her bir ölçümün genel ortalamadan olan sapmalarının kareleri toplamı olarak tanımlanır:

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$$

Burada y_{ij} , i 'inci faktör düzeyine ait j 'inci gözlemi; $\bar{y}$ ise tüm deneylerin genel ortalamasını temsil etmektedir.

Toplam değişkenlik, faktörlere bağlı değişkenlik ve deneysel hatadan kaynaklanan değişkenlik olmak üzere iki bileşene ayrılır:

$$SST = SS_F + SS_E$$

Faktör veya etkileşimlere ait kareler toplamı (SS_F) aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$SS_F = \sum_{i=1}^a n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2$$

Burada $\bar{y}_i$, i 'inci faktör düzeyinin ortalamasını; n_i ise ilgili düzeydeki gözlem sayısını göstermektedir.

Deneysel belirsizlikleri ve ölçüm hatalarını temsil eden hata kareler toplamı (SS_E) ise şu şekilde tanımlanır:

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

Her bir kareler toplamı, ilgili serbestlik derecesine (sd ya da df) bölünerek ortalama kareler (Mean Square, MS) elde edilir:

$$MS_F = \frac{SS_F}{df_F}$$
$$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$$

Son olarak, faktör etkilerinin istatistiksel anlamlılığı F-istatistiği kullanılarak değerlendirilir. F-istatistiği, faktör ortalama karesinin hata ortalama karesine oranı olarak tanımlanır:

$$F = \frac{MS_F}{MS_E}$$

Hesaplanan F değeri, seçilen anlamlılık düzeyine (α) karşılık gelen kritik F değeri ile karşılaştırılır. Eğer:

$$F > F_{\alpha, df_F, df_E}$$

koşulu sağlanıyorsa, ilgili faktörün cevap değişkeni üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu kabul edilir.

Örneğimiz için bu hesaplamalar kullanılarak oluşturulan ANOVA sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Bir faktör ve dört hata serbestlik derecesinde % 95 güven aralığı için, $F_{0.05, 1, 4} = 7.71$ olarak bulunmuştur. Yalnızca A faktörü (kalıp sıcaklığı) verilen F değerini geçtiğinden istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. B (enjeksiyon basıncı) ve C (soğutma süresi) faktörleri ANOM ile uyumlu olarak istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Deney tasarımı hata yüksek etkileşimlerin (iki veya daha fazla faktörün bir arada sonuca olan etkisi) toplamı olarak alınmıştır. Bu etkileşimler A x B, A x C, B x C ve A x B x C'dir. Tasarımımız full faktöriyel olduğu için her faktör ve etkileşim bir serbestlik derecesine sahiptir. Bu yüzden hata için toplam serbestlik derecemiz dört olarak bulunmuştur. Tablo 4'te gösterilen hata saf deneysel hata değildir. Saf deneysel hatayı bulabilmek için deneylerimizin tekrarlı olarak gerçekleştirilmesi

gerekmektedir. Böylelikle aynı deney ayarı için elde edilen sonuçlar arasındaki farklar bize deneysel hatayı verir. Ancak deney maliyetlerinin yüksek olabilmesi sebebiyle bazen bu tekrarlar gerçekleştirilemediğinde, yüksek etkileşim terimlerinden başlayarak etkileşim terimlerinin hata olarak değerlendirildiği görülmektedir. Özellikle simülatif çalışmalarda saf bir deneysel hata oluşması mümkün olmadığından, hata terimi her zaman tasarım içindeki terimlerden seçilmektedir.

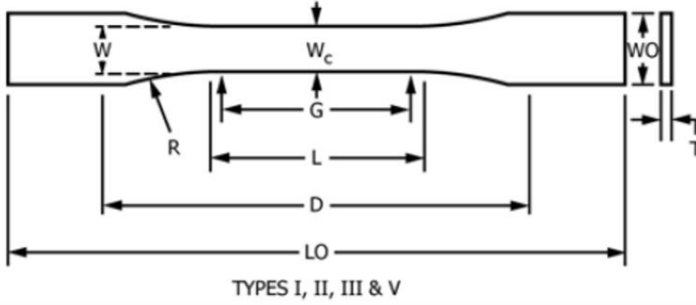
Tablo 4 Plastik kapak tasarımı ANOVA sonuçları

Kaynak	SS (Karelerin toplamı)	DF (Serbestlik derecesi)	MS	F
A	155	1	155	16.94
B	1.2	1	1.2	0.13
C	2	1	2	0.22
Hata	36.6	4	9.15	-
Toplam	194.8	7	-	-

Deneyisel çalışma

Bu bölümde üç boyutlu yazıcı ile üretilen çekme numune dayanımının deneysel tasarım yöntemiyle incelenmesi ele alınacaktır. Numunelerimiz PLA filamentıyla plastik malzemelerin çekme standardına uygun olarak Şekil 2 referans alınarak üretilmiştir (ASTM International, 2014). Numunelerin basımı Bambu-Lab P1S kullanılarak Şekil 3’te gösterildiği gibi yapılmıştır (Bambu Lab, 2023). Her bir deney için üç numune test edilmiştir. Shimadzu AG-IC (100 kN kapasiteli) çekme-basma teçhizatında (Corporation, Shimadzu, 2015) numunelerin testleri gerçekleştirilip, deney 1 için yapılan üç kırılma sonucu Şekil 4’te verilmiştir. Numunelerin çekme dayanımını etkileyeceği düşünülen sekiz kontrol faktörü olarak belirlenmiştir. Tablo 5’te gösterildiği gibi bu faktörlerden sadece ilki olan çekme hızı iki düzeye, diğer faktörler üç düzeye sahiptir. Bu koşulu sağlayabilecek Taguchi L18 deney dizini seçilip, her deney için gerekli kurulum Tablo 6’da gösterilmiştir.

Şekil 2 ASTM D638 Plastik plaka çekme numunesi (Parantez dışındaki birimler milimetre, parantez içleri inç karşılıklarıdır)



W—Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)
L—Length of narrow section	57 (2.25)
WO—Width overall, min ^G	19 (0.75)
WO—Width overall, min ^G	...
LO—Length overall, min ^H	165 (6.5)
G—Gage length ^I	50 (2.00)
G—Gage length ^I	...
D—Distance between grips	115 (4.5)
R—Radius of fillet	76 (3.00)
RO—Outer radius (Type IV)	...

Kaynak: ASTM D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Şekil 3 Üç boyutlu yazıcı ile üretilen çekme numuneleri (PLA)



Şekil 4 Üç boyutlu yazıcı ile üretilen çekilmiş numuneler (PLA)



Bütün plastik numuneler gevrek yapıya sahip olduğundan Şekil 4'te gösterilen kırılma tipi ortaya çıkmış, plastik bölgeye geçişin hemen ardından ani bir kırılma gerçekleşmiştir. Kuvvet ölçer (load cell) yardımıyla toplanan kuvvetler kesit alanına bölünerek maksimum çekme dayanımları hesaplanmıştır.

Tablo 5 Üç boyutlu yazıcı ile üretilen numunelerin çekme dayanımı için kontrol faktörleri ve düzeyleri

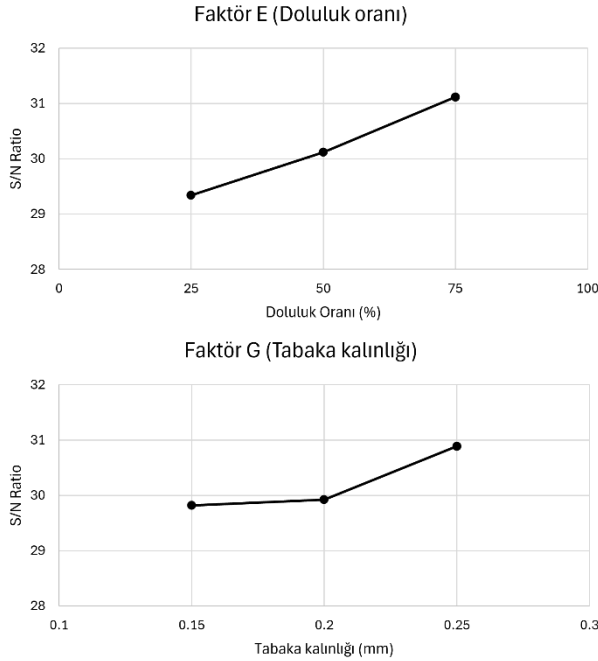
Faktör	Düzy 1	Düzy 2	Düzy 3
A.Çekme hızı	5 mm/dak	10 mm/dak	-
B.Doldurma yönü	0 °	45 °	90 °
C.Alt-üst yüzey şekli	Eş-merkezli	Doğrusal	Monoton çizgi
Ç.Dolgu şekli	Izgara	3D bal peteği	Üçgen
D.Ütüleme	Yok	Üst yüzey	Tüm yüzeyler
E.Doluluk oranı	%25	%50	%75
F.Basım hızı	Düşük(%50)	Standart(%100)	Spor(%124)
G.Yüzey kalınlığı	0.15 mm	0.20 mm	0.25 mm

Üç tekrarlı gerçekleştirilen her bir deneyin çekme dayanımı sonuçlarının ortalamaları karakteristik cevap olarak kaydedilmiştir. Bu cevaplar Taguchi'nin daha büyük daha iyi yaklaşımı kullanılarak S/N değerlerine dönüştürülmüştür. Bu değerler ışığında doluluk oranı ve tabaka kalınlığı faktörlerinin sırasıyla en yüksek etki yaptığı Şekil 5'teki ANOM grafikleri ile gösterilmiştir. Diğer faktörlerin etkisi görece olarak daha düşük gözlemlenmiştir. Doluluk oranına artışına bağlı olarak S/N oranı doğrusal bir artış gösterirken, tabaka kalınlığına bağlı olarak artış yoğunluklu olarak 0.2 mm'den 0.25 mm'ye geçiş durumunda gerçekleşmiştir. İki faktör için de en yüksek S/N oranı düzey 3'te bulunmuştur.

Tablo 6 Taguchi L18 deney tasarım dizini (D1: Düzey 1, D2: Düzey 2, D3: Düzey 3)

Deney No	A	B	C	Ç	D	E	F	G	Çekme Dayanımı (MPa)	S/N Oranı
1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	29.8227	29.4908
2	D1	D1	D2	D2	D2	D2	D2	D2	30.9495	29.8096
3	D1	D1	D3	D3	D3	D3	D3	D3	37.9732	31.5891
4	D1	D2	D1	D1	D2	D2	D3	D3	36.4333	31.2294
5	D1	D2	D2	D2	D3	D3	D1	D1	38.2111	31.6435
6	D1	D2	D3	D3	D1	D1	D2	D2	27.2686	28.7128
7	D1	D3	D1	D2	D1	D3	D2	D3	39.1626	31.8572
8	D1	D3	D2	D3	D2	D1	D3	D1	25.2654	28.0473
9	D1	D3	D3	D1	D3	D2	D1	D2	30.7992	29.7680
10	D2	D1	D1	D3	D3	D2	D2	D1	33.3533	30.4626
11	D2	D1	D2	D1	D1	D3	D3	D2	33.1781	30.4163
12	D2	D1	D3	D2	D2	D1	D1	D3	29.6474	29.4389
13	D2	D2	D1	D2	D3	D1	D3	D2	30.4237	29.6633
14	D2	D2	D2	D3	D1	D2	D1	D3	32.5270	30.2435
15	D2	D2	D3	D1	D2	D3	D2	D1	31.7508	30.0345
16	D2	D3	D1	D3	D2	D3	D1	D2	36.1578	31.1638
17	D2	D3	D2	D1	D3	D1	D2	D3	35.3816	30.9754
18	D2	D3	D3	D2	D1	D2	D3	D1	28.8712	29.2083

Şekil 5 L18 ANOM yüksek etkili bulunan faktörlerin grafikleri



Bir önceki bölümde tanıtılan varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle ikinci bir istatistiksel değerlendirme sonuçları Tablo 7’de gösterilmektedir. ANOVA sonucu en yüksek etkili faktör ANOM’la uyumlu şekilde doluluk oranı olarak bulunmuştur. Yine benzer şekilde tabaka kalınlığı ikinci sırada gözlemlenmektedir. ANOM’a ek olarak ANOVA yönteminde faktörlerin istatistiksel olarak önemli değerlendirilip değerlendirilemeyeceği hakkında da yorum yapabilmektedir. Yüzde 95 güven aralığı için herhangi bir faktör istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Ancak yüzde 90 güven aralığı, iki serbestlik dereceli hata ve faktör koşullarında kritik F değeri $F_{0.1,2,2} = 9.00$ olarak görülmektedir. Faktör E (doluluk oranı) belirtilen kritik F değerinden yüksek olduğu için istatistiksel olarak önemli bulunmaktadır. Tabaka kalınlığı da dahil olmak üzere diğer

faktörler ise kritik değerden düşük olduğundan istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Tablo 7 L18 ANOVA tablosu

Kaynak	SS (Karelerin toplamı)	DF (Serbestlik derecesi)	MS	F
A	0.0162666	1	0.016266	0.0340
B	0.0219254	2	0.010963	0.0229
C	2.1840489	2	1.092024	2.2836
Ç	0.2737116	2	0.136856	0.2862
D	2.0348192	2	1.017410	2.1275
E	9.0419894	2	4.520995	9.4539
F	0.3021418	2	0.151071	0.3159
G	4.2006508	2	2.100325	4.3920
Hata	0.956426	2	0.4782	-
Toplam	19.031980	17	-	-

Genel değerlendirme

Bu çalışma kapsamında, geleneksel kalite anlayışı ile Taguchi'nin modern kalite yaklaşımı arasındaki farklar teorik ve pratik örneklerle ortaya konulmuştur. Yapılan teorik incelemeler, Taguchi'nin hedefe yakınlık prensibinin ve varyans kontrolünün, endüstriyel süreçlerde maliyetleri minimize etmede kritik bir rol oynadığını kanıtlamaktadır. Ardından Taguchi'nin tasarım aşamaları plastik kapak üretimi örneği ile somutlaştırılmıştır. Bu örnek yardımıyla kalite yaklaşımları, ANOM ve ANOVA hesaplamaları, model oluşturma ve hata hesabı konuları irdelenmiştir.

Deneysel aşamada, 3 boyutlu yazıcı teknolojisi (Bambu-Lab P1S) ile PLA malzemeden üretilen çekme numuneleri üzerinde sekiz farklı parametrenin dayanıma olan etkileri Taguchi L18 ortogonal dizini kullanılarak sistematik bir şekilde incelenmiştir. Yapılan ANOM ve ANOVA analizleri sonucunda şu temel bulgulara ulaşılmıştır.

- Çekme dayanımı üzerinde en yüksek etkiye sahip faktörler sırasıyla doluluk oranı (E) ve tabaka kalınlığı (G) olarak belirlenmiştir.
- Her iki faktörün de en yüksek dayanım verdiği seviyeler düzey 3 olarak bulunmuştur. Bunlar sırasıyla % 70 doluluk oranı ve 0.25 mm tabaka kalınlığıdır.
- %90 güven aralığında yapılan analizde, doluluk oranının istatistiksel olarak anlamlı bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Tabaka kalınlığı ise ikinci sırada gelmesine rağmen kritik F değerinin altında kalarak bu güven aralığında anlamlı bulunmamıştır.

Bu kitap bölümünün deneysel çalışma kısmında kullanılan Bambu-Lab PS1 teçhizatının ve basım için kullanılan filamentlerin alımı GAP-2025-627 kodlu genel amaçlı proje kapsamında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi BAP koordinatörlüğü desteğiyle sağlanmıştır. Yazar bu destek sebebiyle Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi BAP koordinatörlüğüne teşekkür eder.

Kaynakça

- ASTM International. (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bambu Lab. (2023). Bambu Lab P1S Desktop 3D Printer User Manual / Technical Specifications. Shenzen, Çin.
- Corporation, Shimadzu. (2015). AG-IC Series Universal Testing Instruments User Manual. Tokyo, Japonya.
- Funkenbusch, P. D. (2004). *Practical Guide to Designed Experiments A Unified Modular Approach*. Columbus, Ohio: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiments*. Tempe, Arizona: John Wiley & Sons, Inc.
- Phadke, M. S. (1995). *Quality engineering using robust design*. United States: Prentice Hall PTR.
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization.
- Z Table. (2025, 12 18). *Z Table: Standard Normal Distribution Table*. 12 18, 2025 tarihinde ztable.io.: <https://ztable.io/> adresinden alındı

BÖLÜM 9

YÜKSEK HIZLI ASANSÖRLER İÇİN YENİ NESİL KAYMALI FREN TASARIMI VE İMALATI

Nizamettin YILMAZ

Giriş

Günümüzde hızlı kentleşme, yüksek katlı yapıların artışı ve dikey ulaşım ihtiyacının kritik bir altyapı unsuru hâline gelmesi, asansör sistemlerinde güvenlik, konfor ve performans beklentilerini önemli ölçüde artırmıştır. Asansörler yalnızca insan ve yük taşımaya yönelik mekanik sistemler olmaktan çıkmış; yüksek hızlarda çalışan, karmaşık mekanik ve elektromekanik bileşenlerden oluşan entegre güvenlik sistemleri hâline gelmiştir. Bu bağlamda, asansör emniyet sistemlerinin en kritik bileşenlerinden biri olan fren mekanizmaları, tarihsel süreç içerisinde basit mekanik çözümlerden modern kaymalı paraşüt fren sistemlerine doğru evrilmiştir. Özellikle 1,00 m/sn üzerindeki kabin hızlarında, ani duruşun yolcu sağlığı üzerinde oluşturduğu yüksek negatif ivme riskleri nedeniyle, kinetik enerjinin kontrollü ve zamana yayılmış şekilde sönmülmesini sağlayan kaymalı fren sistemleri zorunlu hâle gelmiştir. TS EN 81-20/50 standartlarının getirdiği yeni güvenlik gereklilikleri doğrultusunda, frenleme ivmesinin belirli sınırlar içerisinde tutulması ve sistemin yeniden kurulabilir, hasarsız ve güvenilir bir yapıya sahip olması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında, klasik

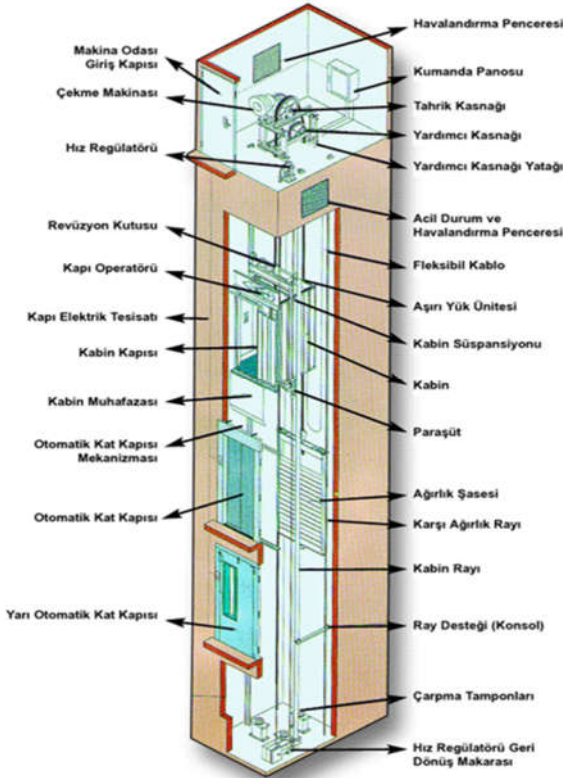
regülatörlü para  t fren sistemlerine alternatif olarak geliştirilen, hız ölçümünü elektronik olarak gerçekleştiren ve elektromekanik aktivasyon prensibiyle çalışan yeni nesil bir kaymalı fren tasarımı ele alınmıştır. Tasarlanan sistem; reg lat r ihtiyacını ortadan kaldıran, daha az bileşenden oluşan, montaj ve bakım kolaylığı sağlayan yapısıyla hem güvenlik hem de mühendislik verimliliği açısından yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

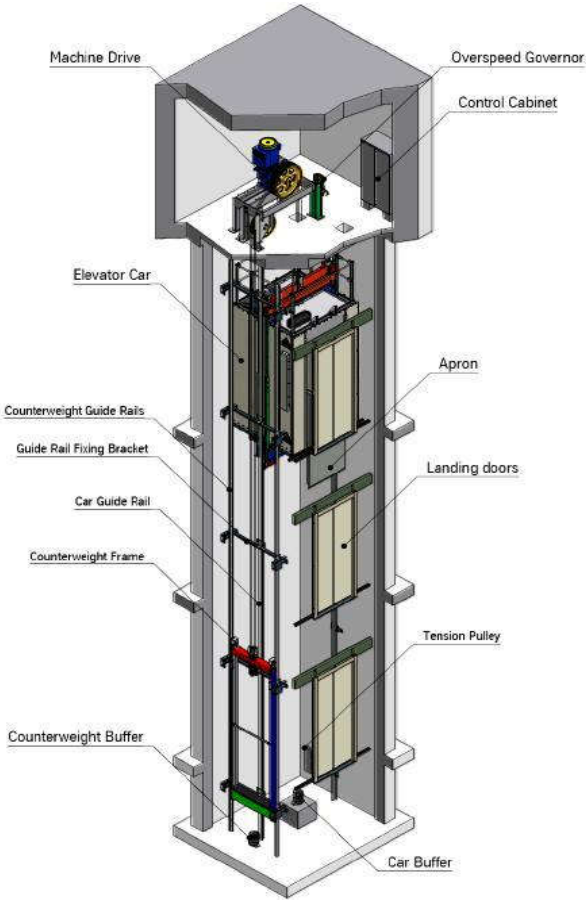
Makine Mühendisi, HKS Has Asansör Kauçuk Plastik Metal Sanayi ve Ticaret A. ., Bursa, Türkiye, 0000-0002-9468-804X

Asansör Sistemi

Asansör, dikey ve yatay olarak yük ve insan taşımada kullanılan bir araçtır. Asansör, özellikle büyük şehirlerde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Asansör teknolojilerinin sürekli değişmesi ve gelişmesi ile şehirlerde yüksek binalar yapılmasının önü açılmıştır. Ayrıca inşaatlarda, fabrikalarda ve diğer iş alanlarında da yük taşımada kullanılan asansörler de mevcuttur.

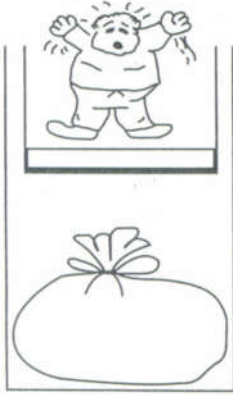
► Asansörün Genel Görünüşü



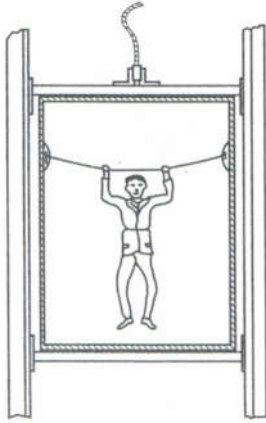


Asansör Emniyet Sistemi

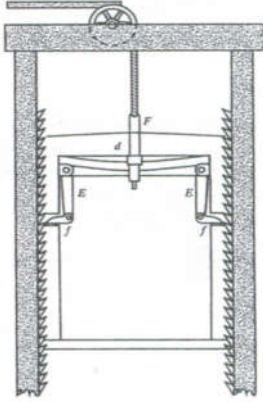
Asansör çalışma sisteminde, güvenlik için en önemli ekipmanlardan biri fren sistemidir. Frenler, asansör gelişim sürecinde, çeşitli aşamalardan geçerek en son kaymalı fren tipi olarak netleşmiştir. Tarih boyunca çeşitli fren tipleri kullanılmıştır.



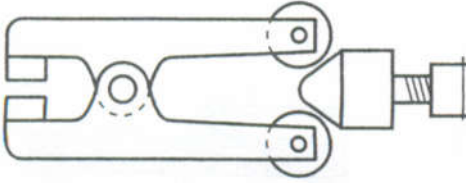
Asansör Dibinde Kuş Tüyü Torbası



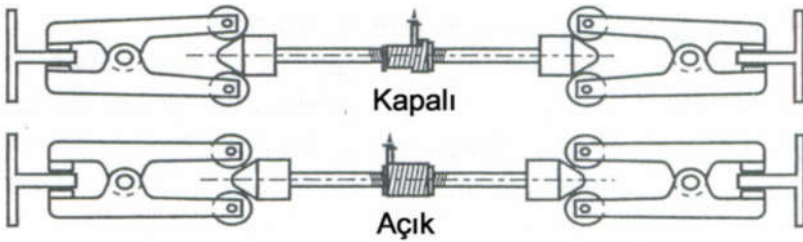
İtalyan Güvenlik Patenti



Elisha Otis'in Geliştirdiği Tertibat



Mekanik Kenetleme Cihazı



<<T>> Biçiminde Çelik Kılavuz Üstünde Kama Kelepçesi

Asansörlerin tarihsel gelişim süreci içerisinde, fren mekanizmaları sürekli değişim ve gelişim içerisinde olmuştur. Asansörde herhangi bir olumsuz durum oluşması halinde can ve mal güvenliğini sağlayabilmek için, günümüzde kullanılan modern paraşüt fren sistemlerini;

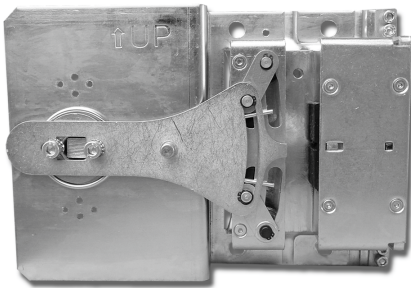
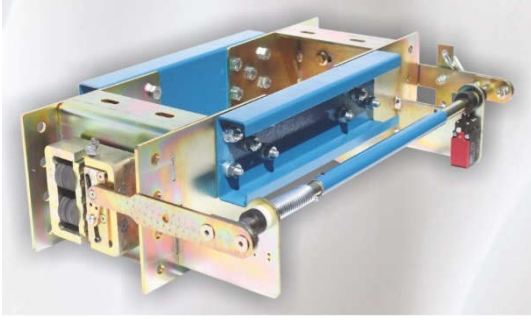
0.63 m/sn kabin hızına kadar Ani Etkili Fren
(Hidrolik Sistemlerde Kullanılır.)



0.63-1.00 m/sn kabin hızına kadar Tampon Etkili Fren
(EN81-20/50 Standardı ile birlikte kullanımdan kalkmıştır.)

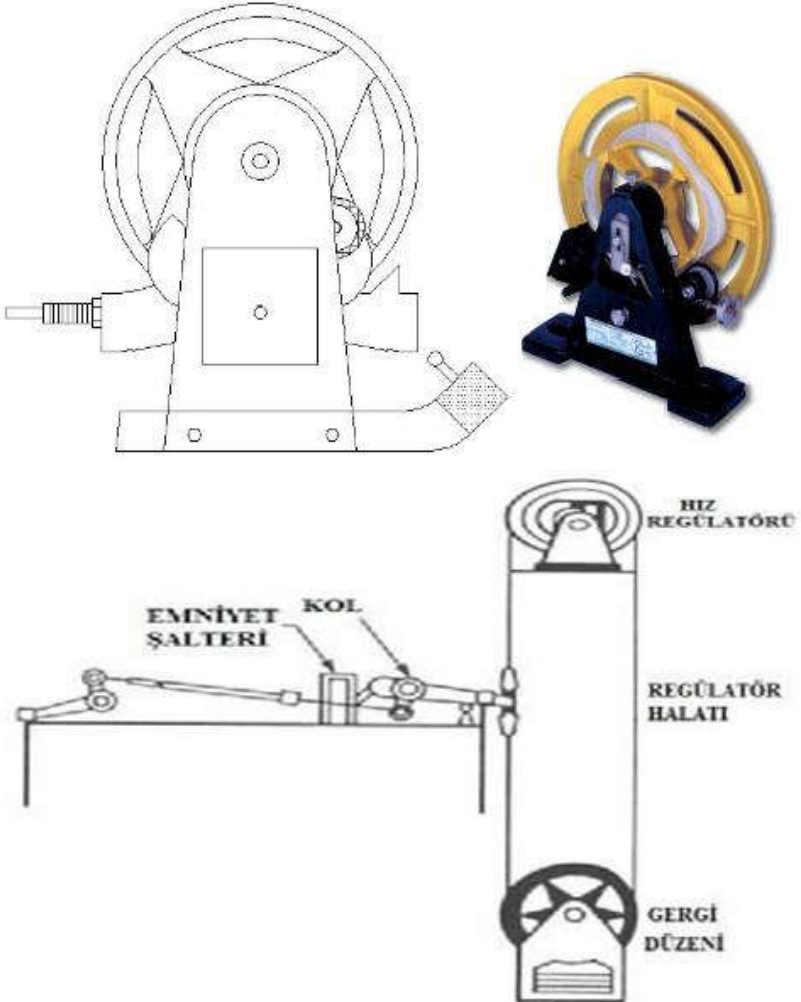


1.00 m/sn kabin hızlarında da Kaymalı Fren olarak sınıflandırabiliriz.



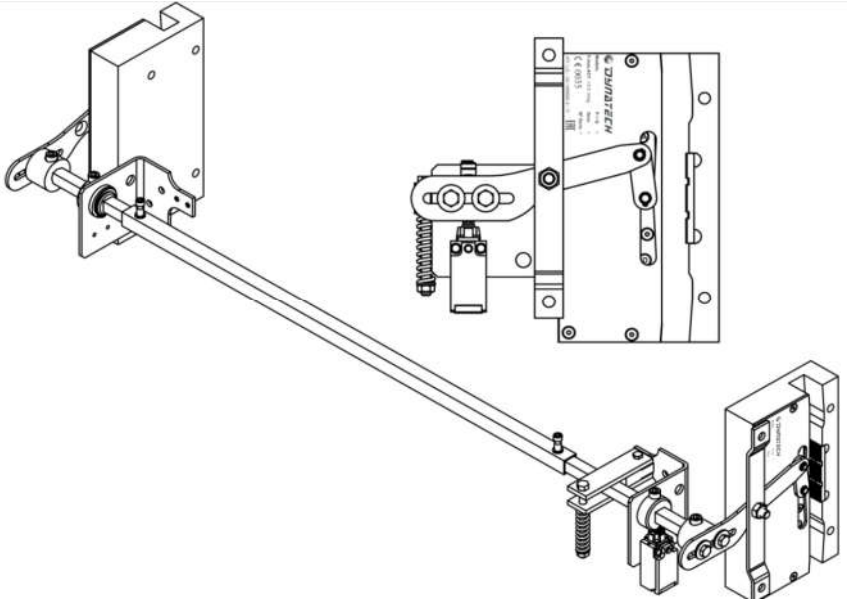
Klasik Frenlerin Çalışma Prensibi

Prensip olarak, paraşüt sistemler genelde aşağı yönde olmak üzere (bazen yukarı yönde de olabilir) kabin hızında beklenmedik bir artış söz konusu olduğunda devreye girip kabini ve dolayısıyla da içindekileri korurlar. (Genelde 1 m/sn beyan hızı). Mekanik olarak hız ölçme görevi bulunan regülatör (paraşüt sistem), sistemde hız sapması meydana geldiğinde, yapısında bulunan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle kilitlenme gerçekleşir. Paraşüt sistemi kapalı çevrim olarak çalışmaktadır. (Çalışma prensibi)



Kaymalı Fren

Fren bünyesinde bulunan yay tertibatı yardımıyla, kılavuz rayları üzerinde sürtünme ile gerçekleşen frenleme etkisiyle, frenleme kuvvetini dağıtarak daha uzun bir mesafe ve sürede duruşu sağlanan paraşüt frenleridir. Çeşitli hız ve kapasiteler için belirlenen değerler arasında kullanılırlar. Ani frenlemeli sistemlerden farklı olarak, hız değişimine göre kapasite değeri de değişmektedir.

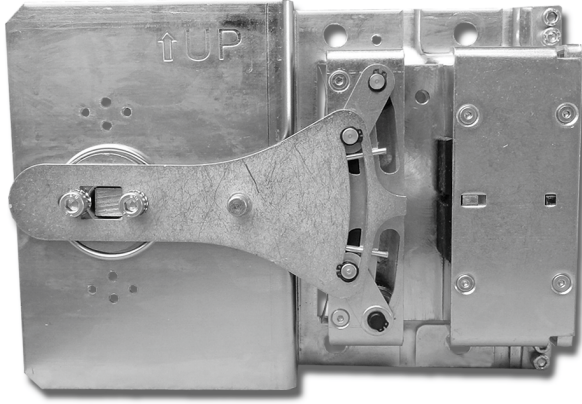


Frenleme sonrasında paraşüt fren sistemini eski haline getirmek için sadece kabini ters yönde hareket ettirmek yeterlidir. Ancak son gelen standart değişikliğine göre, frenleme anında aktif hale geçen switchin, artık kararlı switch olması isteniyor. Dolayısıyla, frene geçen bir sistemde, switchin tekrar çalışır pozisyonunda bırakılması için elle müdahale edilmesi gerekiyor.

Kaymalı paraşüt fren sistemi avantajları:

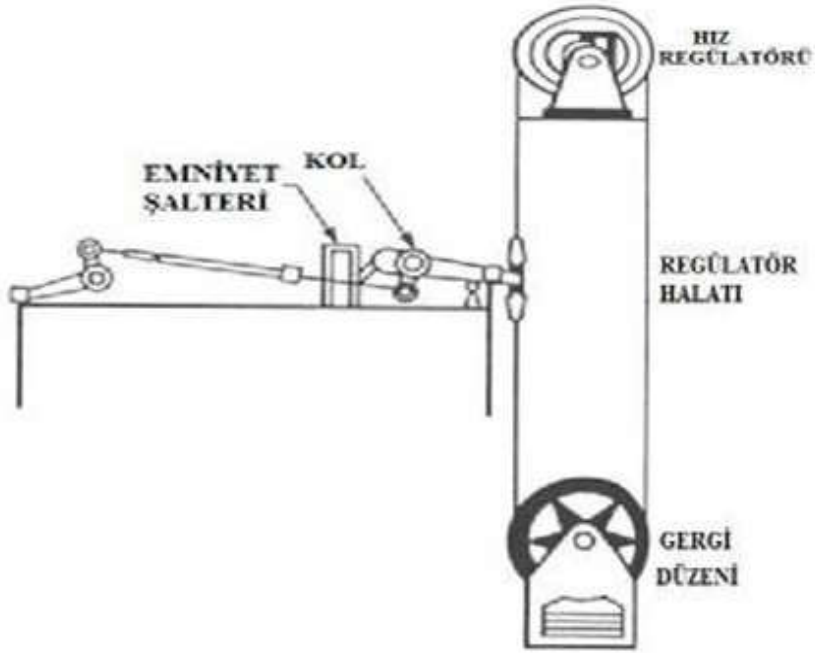
- Kabine yumuşak bir kayma hareketi verirler.
- Basit ve efektif bir yapıları olduğundan kısa tepki süresinde işleme başlarlar.
- Temas yüzeylerine çok az veya hiç zarar olmaz.
- Tekrar kolay kurulur, yeniden ayara gerek duymazlar. Sadece switch kontrolü gereklidir.
- Sistem üzerinde kolayca konumlandırılırlar.





Regülatör;

Paraşüt yani regülatör, hız ölçme görevi görürken normal hızdan öngörülen bir değerin üzerinde sapma meydana geldiğinde, merkezkaç kuvvetinin etkisini kullanan bir mekanizma sayesinde kilitlenme gerçekleşir ve çelik halatın ilerlemesini frenler durdurur. Devreye girmesi için gerekli olan kuvvet yay vasıtasıyla ayarlanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, paraşüt yani regülatörden geçen halatın taşıyıcı halat olmamasıdır. Bu halat sadece frenleme maksadıyla kullanılır.



Frenin Devreye Girmesi;

Regülatör halatının çekmesi ile mekanik fren devreye girer ve kabini kilitler. Kabin iskeleti üzerine monte edilen mekanik fren tertibatları rayların sıkıştırılması prensibiyle çalışırlar. Kabin karkası üzerinde kabin altına veya üstüne monte edilebilirler. Tavsiye edilen, kabin altında olmasıdır. Ancak bakım ve montaj zorluğundan dolayı kullanıcı talebine binaen kabin üstüne de konabilir. Frenler, asansör kabini ile birlikte raylara yerleştirilir ve mekanizma yardımıyla aynı anda hareket ederler.

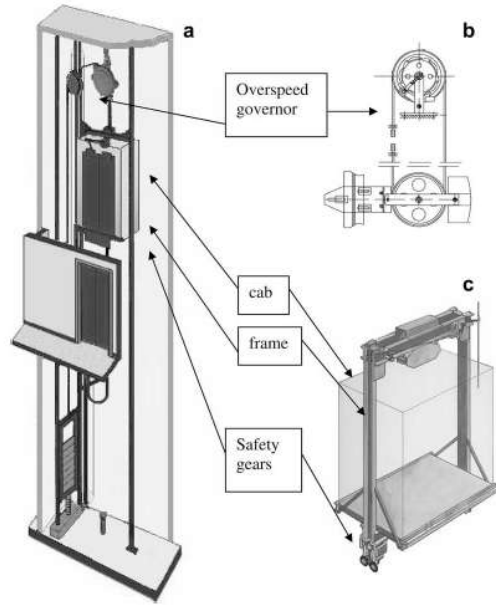


Fig. 1. 3D view of the experimental lift system, including details of its key components: (a) electric elevator, (b) over-speed governor, (c) car frame.

Frenin Devreye Girmesi, Gerilmeler

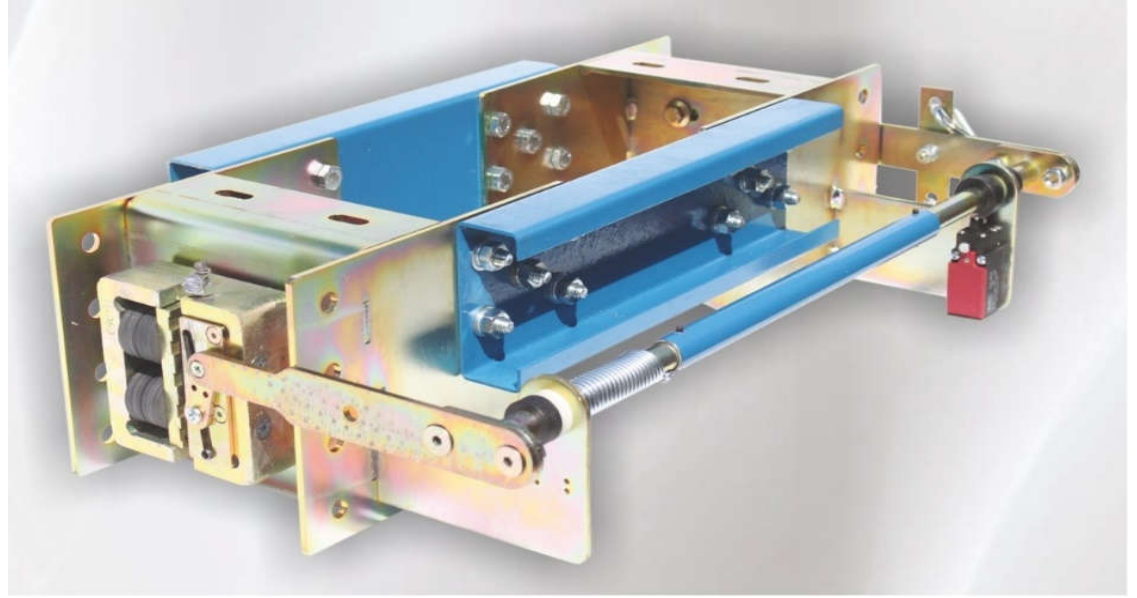
Asansörde beyan hızından %15'lik bir hız sapması meydana geldiğinde, yukarıda blokaj olmuş regülatör (paraşüt sistemi) aşağıya doğru gitmek isteyen asansör kabinine izin vermeyecektir. Bu esnada regülatör halatında çok yüksek gerilmelerin oluşmasını engellemek için frenler de devreye girer ve halat sıkışır. Böylece asansör kabini hem mukavemet açısından hem de güvenlik açısından iyi bir şekilde durmuş olur.



Eğer sistemde sadece paraşüt kullanılsaydı, frenler kullanılmıyaydı, paraşütün blokaj anında, fiziksel olarak aşağıya doğru izafi hareketi sınırlamaya çalışacak olan kabin, yapısına ve ağırlığına göre halatı koparırdı ya da paraşüt sistemine zarar verirdi. Ayrıca, bu şekilde durma esnasında insan sağlığı açısından tehlikeli olabilecek çok yüksek ivme değerleri de meydana gelebilmektedir.

Fren Switch Kontrolü

Paraşüt sistemi; mekanik olarak çalışan sistemdir. Kabin karkası ve güvenlik tertibatının bağlantısı yeterli dayanıma sahip cıvata bağlantıları ile sağlanır. Ancak güvenlik tertibatının çalışmasından önce veya çalışması sırasında, kabine yerleştirilmiş uygun bir elektrik güvenlik tertibatı asansör motorunu durdurmalıdır. Fren kolu üzerindeki emniyet switchi veya paraşüt kontağı olarak isimlendirilen bu kontak mekanik fren kilitlediğinde motor devresinin kesilmesini ve elektromanyetik devrenin de devreye girmesini sağlar.



Güvenlik tertibatının tasarımında ve sistemde kullanılması için seçiminde aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Asansör freninin dayanabileceği maksimum yükün tam olarak bilinmesi gerekir.
- $P+Q$ olarak tabir edilen bu değerde;

Q:Asansör Kapasitesi

P: Sisteme etkiyen diğer yükler. (Kabin, süspansiyon, kapılar, bağlantı elemanları) olarak adlandırılmaktadır.

- Fren seçiminde; sistemin kapasitesi, beyan hızı, $P+Q$ değeri ve sistemde kullanılan rayın kalınlığı ve rayın cinsi (işlenmiş & soğuk çekme) bilinmesi gereken önemli parametrelerdir.
- Fren, sistem üzerine monte edilirken, kılavuz ray yüzeyi ile fren çenesi arasındaki mesafe 3-8mm arasında belirlenmelidir. (Fren üretici firmaları, bu mesafeyi ürünlerine göre farklı ölçülerde bırakabilmektedir.)

- Bütün bu teknik koşulların yanında, asansörün çalışacağı çevre şartları da fren seçimi yapılırken göz önünde bulundurulmalıdır.

Fren tasarımında imalatçıyı bağlayan olmazsa olmaz iki koşul vardır.

- Frenleme kuvvetinin $F_{Fr} = (P+Q) \cdot 16$ olması ve
- Frenleme ivmesinin sınır değerleri 0,2.g ve 1 g'den hareketle, ortalama frenleme ivmesinin $g_0 = 0,6.g$ olmasıdır.

Frenleme kuvvetinin hesaplanması:

- v hızıyla düşmekte olan kabinin kinetik enerjisi:

$$E_K = m \frac{v^2}{2}$$

- Fren kuvveti:

$$F_{Fr} = F_N \cdot \mu$$

- Fren kuvvetinin etkisinde L mesafesi kadar kayarak duran kabinde fren kuvvetinin yaptığı iş:

$$E_{Fr} = F_N \cdot \mu \cdot L$$

Burada ; F_N : Fren elemanları arasındaki normal kuvvet,
 μ : Elemanlar arası sürtünme katsayısı, (genelde 0,2 civarındadır) (rayın tipi önemlidir.)

L : Frenlemenin başladığı andan durmaya kadarki sürede kabinin kayma mesafesidir.

- Asansör seyir hızı v m/s ise, frenlemeyi gerektirecek başlangıç hızı

$$v_0 = 1,15 \cdot v \text{ m/s}$$

olur.

- Kinetik enerji, frenleme işi tarafından absorbe edileceğinden;

$$E_K = E_{Fr}$$

$$\frac{m.v_0^2}{2} = F_N \cdot \mu \cdot L$$

- Yukarıdaki ifadeler birleştirildiğinde meydana gelen sonuca göre, frenin raya bastırması gereken kuvvet ;

$$F_N = (P + Q) \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \mu \cdot L$$

- Burada L mesafesi ise;

$$L = \frac{v_0^2}{2 \cdot a}$$

(a: frenleme ivmesi = 0,6.g)

Genel kural olarak, hareketli bir cismi, kinetik enerjisini sönümleyerek, belirli bir zaman dilimi içinde durdurmanın en basit yolu; sürtünme yoluyla kinetik enerjinin ısıya çevrilmesi ve bu arada bir miktar da elastik- plastik deformasyonla mümkün olur.

Yüksek hızlı asansörlerde kaymalı fren kullanılması asansörü kullanan kişilerin güvenliği ve konfor arzusundan kaynaklanır. Ani frenleme, çok yüksek frenleme ivmesi oluşturur ki yüksek negatif ivme başta çocuklar, yaşlılar, hastalar ve hamile kadınlar için büyük bir risktir. Bu nedenle standartlar frenleme ivmesinin yer çekimi ivmesinin 0,2 ile 1 katı arasında olmasını şart koşmuştur.

Elektromanyetik Fren – Klasik Fren Farkı

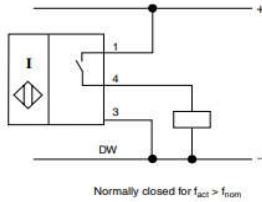
Yukarıda bahsedilen kayma fren mekanizmalarından farklı olarak düşünölen elektromekanik frende en önemli fark, kapalı çevrim olarak çalışan paraşüt sisteminin olmamasıdır. Hızı mekanik olarak ölçen regölatör yerine, frekans sayıcı olarak çalışan Inductive Speed Monitor kullanılmaktadır. Bu ürün, kabin üzerine yerleştirilen dönel cisim vasıtasıyla asansör kabininin hızını ölçmektedir. Frekans aralığı 1 m/sn hıza ayarlanan bu cihaz, ayarlanan frekans sayısını geçtiğinde sisteme enerji verecek şekilde tasarlanmış ve ayarlanmıştır.

Speed Monitors



Speed monitors are inductive proximity switches in which both the damping status and the act of exceeding or falling short of a reference frequency is signalled. The reference frequency is adjusted via a built-in potentiometer. If the actual frequency f_{act} measured by the proximity switch is smaller than f_{nom} , the output is switched off. If the measured actual frequency f_{act} is greater than f_{nom} , the output is closed (switched on).

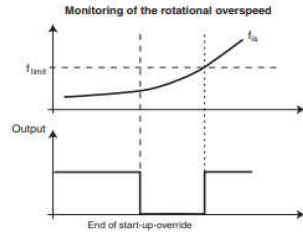
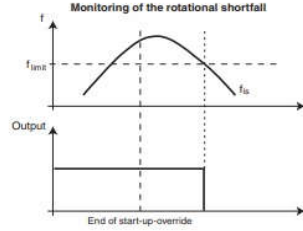
This mode of operation has the advantage of reducing the reaction time to the lowest possible value, i.e. $1/f_{act}$.



The speed monitor is available for the following frequency and rotational speed ranges:

0.1 Hz ... 1 Hz, i.e. 6 min^{-1} ... 60 min^{-1} ,
 1 Hz ... 10 Hz, i.e. 60 min^{-1} ... 600 min^{-1} ,
 10 Hz ... 100 Hz, i.e. 600 min^{-1} ... 6000 min^{-1} .

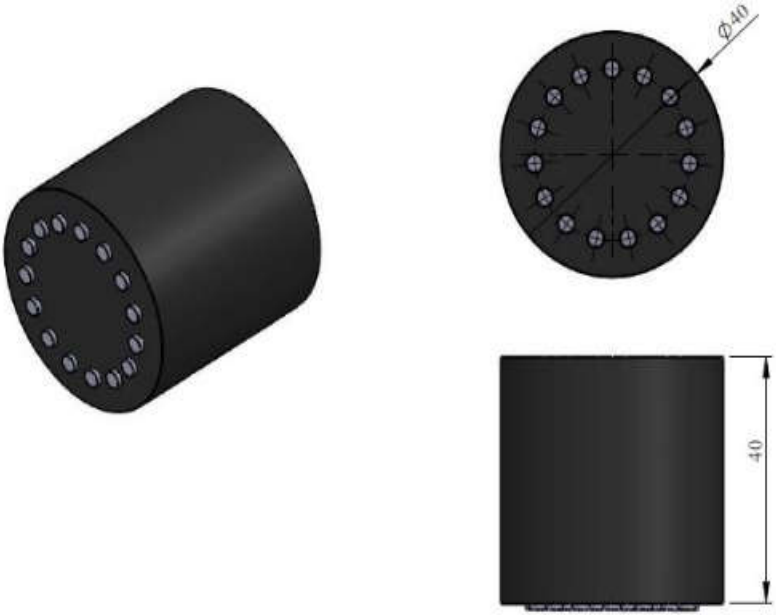
The speed monitors are equipped with a start-up override: once the operating voltage is applied, the output is switched on for the duration of the start-up override.



Subject to reasonable modifications due to technical advances.

Copyright Pepperl+Fuchs. Printed in Germany
 Pepperl+Fuchs Group • Tel.: Germany +49 621 776-0 • USA +1 330 4253555 • Singapore +65 67799091 • Internet <http://www.pepperl-fuchs.com>

Inductive Speed Monitor ürünü ile birlikte çalışan Elektromanyetik Pot (Elektromıknatıs) ürünü de bu freni farklı kılan diğer bir özelliktir. Burada en önemli özellik, üzerinde enerji olmadığı durumda manyetik özelliğe sahip olan elektromıknatısın, enerji ile yüklendiğinde manyetiklik özelliğini kaybetmesidir.



Frenin tasarımı yapılırken:

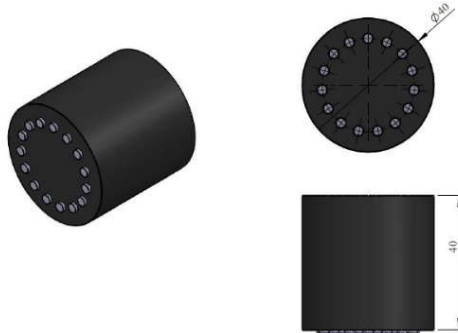
- Klasik fren sistemlerine alternatif,
- Geleceğe yönelik yenilikçi,
- TS-EN 81-20 asansör standartlarına uygun,
- Elektromekanik aktivasyona sahip,
- Hız regülatörü gerektirmeyen,
- Kolay değiştirilebilen,
- Az sayıda parçadan oluşan (kompleks bir yapıya sahip olmayan) bir ürün yapılması amaçlanmıştır.

Elektromanyetik frenin, klasik frenlerden en önemli iki farkı;

- Sistemde regülatör kullanılmamaktadır. Bunun yerine frekans sayıcı cihaz «Inductive Speed Monitor» kullanılmakta ve hız elektronik olarak ölçülmektedir.



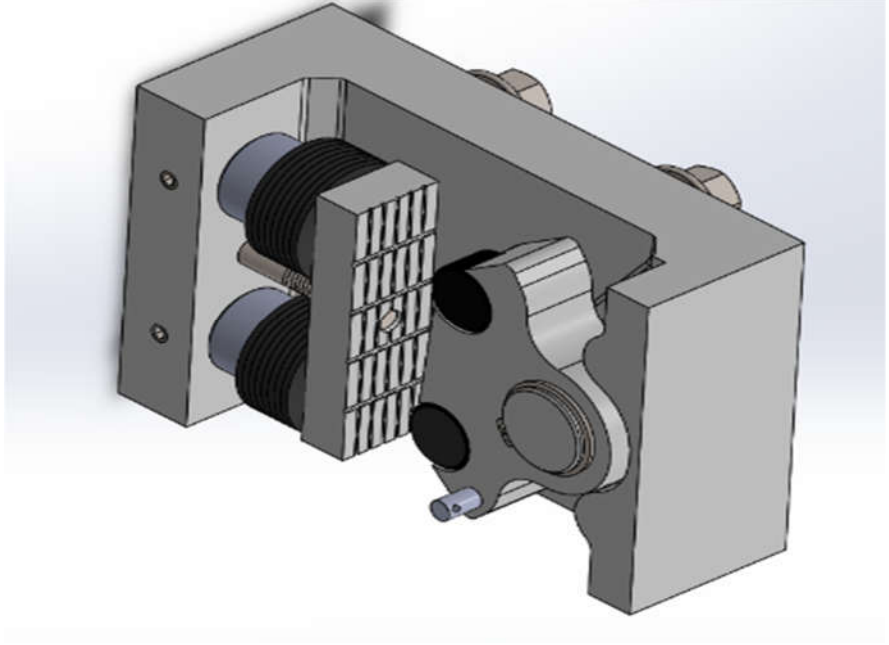
- Frene frekans sayıcı vasıtasıyla enerji geldiğinde manyetik özelliğini kaybeden Elektromanyetik pot kullanılmaktadır.

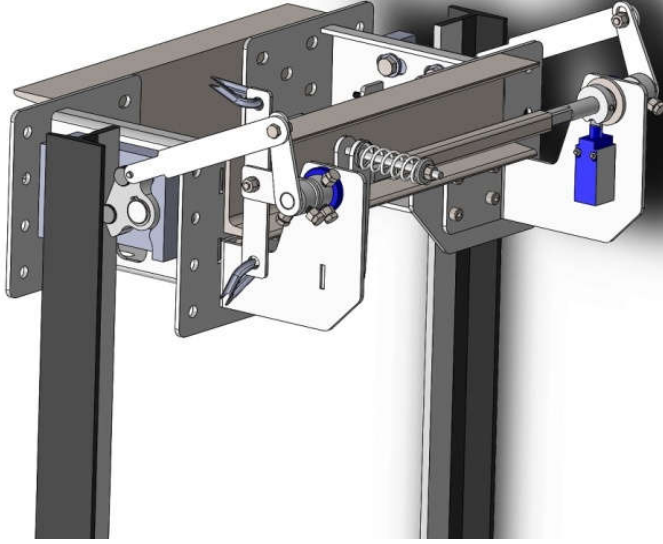


Mevcut fren sistemlerinden farklı olan elektromekanik yapıdaki fren bloğunun alt yapısını oluşturmak için;

İlk etapta mevcut sistemlerde kullanılan fren modellerine benzer mekanik fren tasarımı yapılarak, standartlara uygun bir ürün ortaya çıkartmak üzere çalışmalar başlatıldı.

Bu çalışmalar sonucunda ilk mekanik fren tasarımı yapıldı.

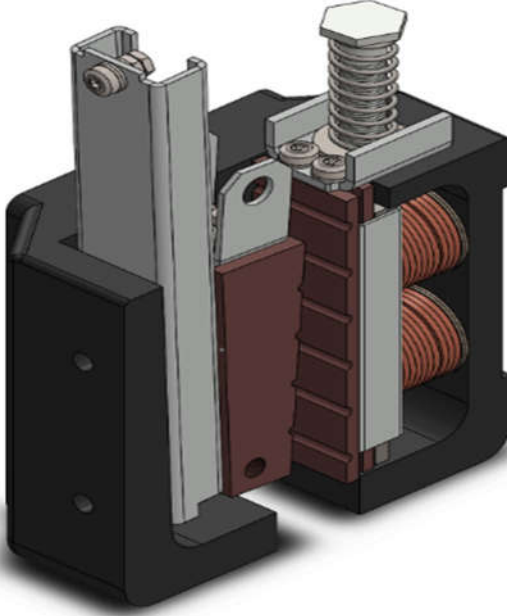




Frenin, kabinin altında, alt süspansiyonda konumlandırılması mukavemet açısından daha uygundur. Test esnasında fren, monte-demonte kolaylığından dolayı üst süspansiyona takılmıştır. Tasarımı ve üretimi yapılan mekanik frenin, süspansiyona montajı da yapıldıktan sonra mekanik testler gerçekleştirilmiştir.

Mekanik Frenden – Elektromekanik Frene Geçiş

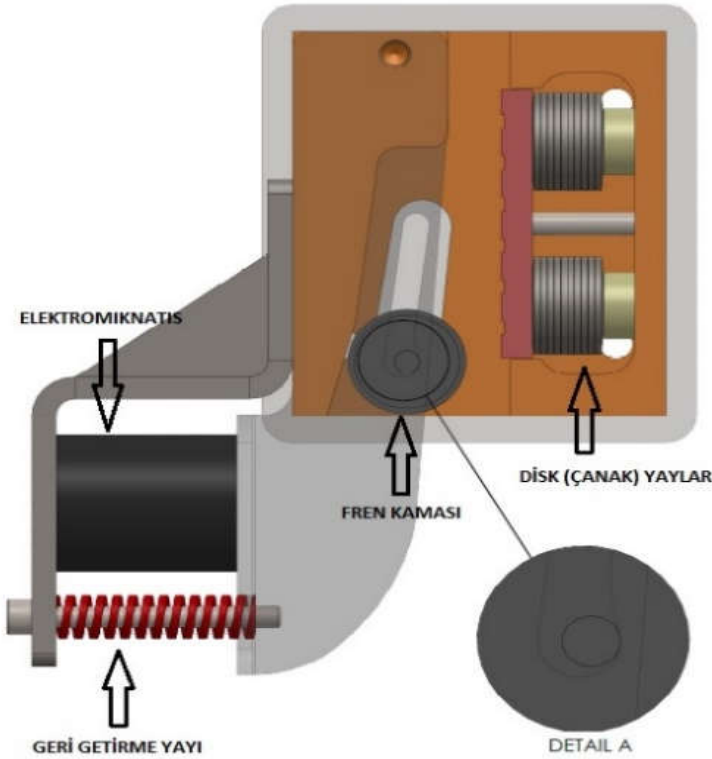
Yapılan tasarımla istenen verilerin elde edilmesi ile beraber; mekanik frenden elektromekanik frene geçişte, frenin üzerine monte edilmesi planlanan elektronik aksam ve fren blokaj sisteminin bu mekanik fren tasarımında kompleks bir yapıya sebep olacağı gözlemlendi. Tasarım değişikliği yapılan mekanik fren aşağıda gösterilmiştir.



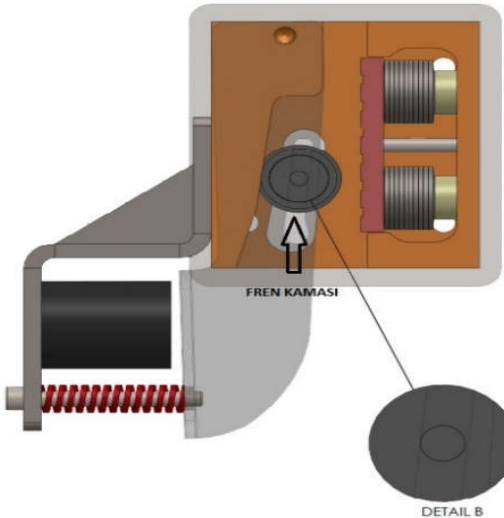
Elektromekanik Fren Çalışma Prensibi

Mekanik ve elektronik bileşenlerle ilerleyen mekanik fren tertibatı, disk (çanak) yaylar, fren bağlantı elemanları, serbest/hareketli makaraya sahip tetikleyici bir mekanizma ve frenin karakteristik ürünlerinden biri olan elektromıknatıstan oluşur. Emniyet tertibatında bir sıkıştırma yayı yer almaktadır. Bu sıkıştırma yayı ile fren, aktif hale getirilir. Burada kullanılan disk yaylar büyük kuvvetler ve küçük yaylanma söz konusu olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılırlar. Bu yaylar aynı zamanda, sistemin ani olarak değil, kayarak durmasını sağlamaktadır. Elektrikli parçalar, sisteme enerji geldiğinde aktif hale gelecek şekilde tasarlanmıştır. Nominal şartlarda asansör çalışma halinde iken, elektromıknatısa enerji gelmemekte ve manyetik özelliği ile bağlı bulunduğu metali çekerek, fren kamasını kılavuz raydan uzakta tutmaktadır. Sistem normal çalışmasına devam etmektedir.

Fren mekanizmasına monte halde bulunan elektromıknatıs sistem normal seyrinde çalışırken paralel bağlı olduğu helisel yayı çekerek frenleme mekanizmasını geride tutmaktadır. (Detail A). Bu durumda fren kaması kılavuz raylardan uzak konumlanmaktadır. Burada en önemli özellik, üzerinde enerji olmadığı durumda, elektromanyetik potta manyetik özellik mevcuttur. Frekans sayıcı, herhangi bir sebeple fazla frekans algıladığında sisteme verilen enerji, elektromanyetik potun manyetiklik özelliğini kaybetmesine ve fren sisteminin çalışmasına sebep olur.



Sistem bu haldeyken, asansör normal hareketine devam edecektir. Asansör, hiçbir olumsuz etki olmadan, yolcu taşıma işlemine devam etmektedir. Sistemin hızı, asansör beyan hızının %15 üzerine çıktığında (1 m/sn beyan hızına sahip asansör için, 1,15 m/sn hızı aştığında) fren devreye girmektedir. Sistem hızı belirtilen değeri aştığında, kabinin üzerine monte edilen dönel cisim (tekerlek) vasıtasıyla frekans ölçümü yapan “Inductive Speed Monitor”, fren üzerine monte halde bulunan elektromıknatıs enerji gönderimini sağlamaktadır. Bu enerji, elektromıknatısın manyetik özelliğini kaybetmesine ve geri getirme yayının metali itmesine sebep olmaktadır. Bu sayede yay tarafından itilen fren kaması, raylardaki kinetik enerji ve sürtünmeyle beraber raya tutunarak asansörü emniyetli şekilde durdurmaktadır. (Detail B) Elektromekanik frende hız ölçümü elektronik olarak yapılmakta (Inductive Speed Monitor cihazının frekans ölçümü ile), frenleme hareketi elektromıknatıs vasıtasıyla sağlanarak, fren kaması kılavuz raylara doğru itilir ve sürtünme kuvvetinin de yardımıyla sistem mekanik olarak durdurulmaktadır.

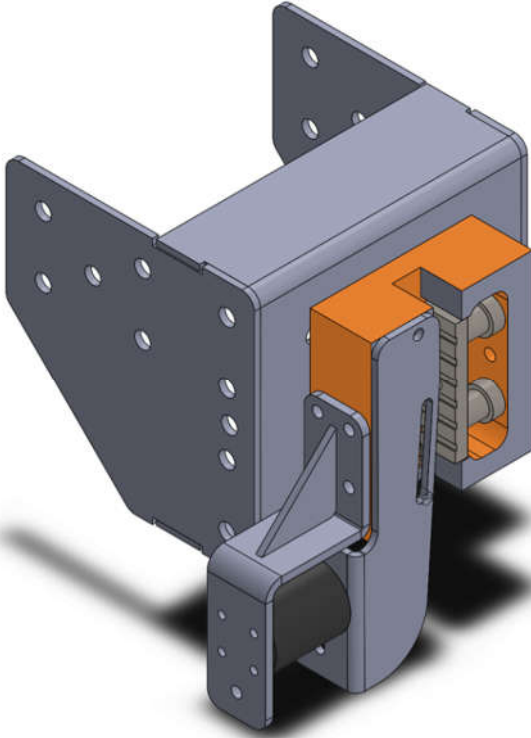


Normal Seyir Pozisyonunda;

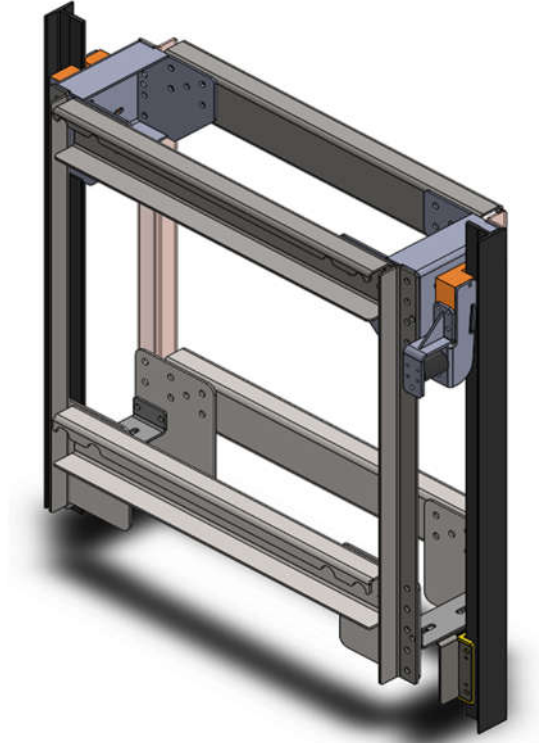
- Inductive Speed Monitor (Frekans sayacı), dönel cisim ayarlanan frekans aralığında dönmekte, sistemde aşırı hızlanma durumu görülmemektedir.
- Elektromanyetik Pot (Elektromıknatıs), manyetik özellik yüklü olarak fren kamasını kılavuz raylardan geride tutmakta, sistemin normal seyretmesini sağlamaktadır.

Frenleme Pozisyonunda;

- Inductive Speed Monitor (Frekans sayacı), ayarlanan frekans değerinden fazla dönüş algıladığında, fren sistemine enerji akışı sağlamakta ve elektromıknatısa gelen bu enerji vasıtasıyla, elektromıknatısın manyetiklik özelliğinin ortadan kalkmasına sebep olmaktadır.
- Elektromanyetik Pot (Elektromıknatıs), Inductive Speed Monitor'den gelen enerji akışı ile birlikte manyetik özelliğini kaybeder (Bu, sürekli bir kayıp değildir, fren tekrar aktif olduğunda yine aynı çalışma şekline dönmektedir.) Elektromıknatısın manyetiklik özelliğini kaybetmesiyle, elektromıknatısa paralel bağlı olan yayın fren kamasını kılavuz raylara doğru itmesiyle frenleme hareketi başlamaktadır.
- Şekilde elektromekanik frene ait parçalar detaylı olarak gösterilmiştir.



Elektronik Fren – Sehpa Montaji



Elektromekanik Fren – Süspansiyon Montajı

Üzerinde çalışmalar yapılan elektromekanik fren ile projede aşağıdaki hedeflere ulaşılmıştır:

- Elektromekanik aktivasyon,
- Kısa sürede frenleme,
- Manyetik pot vasıtasıyla güvenli elektronik harekete geçirme,
- Hız regülatörü gerektirmeme,
- Daha az malzeme, daha az bileşen ve kabin alanını arttıran tasarım.

Sonuç olarak, tez çalışmasına başlarken hedeflediğimiz yeni nesil fren üretme çalışmalarımız başarı ile sonuçlandı. Üretimi ve testleri

gerçekleştirilen elektromekanik fren, asansör sektörünün gelecek yıllarına yön verecek bir ürün olacaktır. Şu an için pazarda kendisine yer edinme ihtimali düşük olsa da, sürekli gelişen günümüz şartlarında, arz-talep dengesi doğrultusunda ilerleyen yıllarda sektörde yerini alacak bir ürün hâline gelecektir.

Aşağıdaki resimlerde genel olarak elektromekanik fren ile süspansiyon montajının görüntüsü verilmiştir. Görseldeki ürün, testini gerçekleştirdiğimiz üründür.





Aşağıdaki resimlerde tez çalışması yapılan elektromekanik fren gösterilmektedir. Elektromanyetik pot, disk yaylar, fren kaması ayrıntılı gösterilmiştir. Çalışmanın içeriğinde de bahsedildiği üzere, fren kamasındaki çentikli yapı görselde görülmektedir.





Aşağıdaki resimlerde frenin karakteristik elemanı elektromanyetik pot gösterilmektedir. Elektromıknatıstan çıkan kablolar, kumanda panosuna bağlanmaktadır. Elektromıknatısın hemen altında bağlı olan yay da, frenleme esnasında, bağlı olduğu metali ve dolayısıyla fren kamasını raya itmektedir.





BÖLÜM 10

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN DUYARLILIK ANALİZİ

Tevfik ATAMAN¹
Mehmet KARAYEL²

Giriş

Küresel ölçekte enerji talebinin sürekli artması, ulaşım sektörünü daha verimli ve çevre dostu teknolojilere yönlendirmiştir. Günümüzde karayolu taşımacılığı, küresel enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır (IEA, 2023). Bu bağlamda, fosil yakıtlı araçlara alternatif olarak geliştirilen elektrikli araçlar (EV – Electric Vehicles), karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir ulaşım hedeflerinin desteklenmesi açısından stratejik öneme sahiptir (Hannan et al., 2018). Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, menzil kaygısı ve batarya ömrü gibi temel konuların yanı sıra, enerji

¹ Öğr. Gör. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0003-1346-5651, tevfikataman@karatekin.edu.tr

² Öğr. Gör. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0001-7155-8288, mkarayel@karatekin.edu.tr

tüketimini etkileyen faktörlerin anlaşılması da ön plana çıkmıştır. Enerji tüketimini doğru tahmin edebilmek, hem tasarım aşamasında optimizasyonu kolaylaştırmakta hem de kullanıcı seviyesinde menzil tahminlerinin doğruluğunu artırmaktadır (Paffumi et al., 2018).

Bir elektrikli aracın enerji tüketimi; araç kütlesi, aerodinamik sürüklenme katsayısı (C_d), frontal alan (A), yuvarlanma direnci katsayısı (C_{rr}), motor ve güç aktarım verimleri, batarya iç direnci gibi çok sayıda fiziksel ve elektriksel parametreye bağlıdır (Boulon et al., 2013). Bu parametrelerdeki küçük değişimler dahi toplam enerji tüketimini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Örneğin, aerodinamik sürüklenme katsayısında %10'luk bir artışın yüksek hız koşullarında enerji tüketimini %6-8 oranında artırdığı bildirilmiştir (Tate et al., 2015). Benzer şekilde, lastik yuvarlanma direnci veya taşıt kütlesindeki değişimlerin düşük hız bölgelerinde menzil üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir (Ribau et al., 2015). Bu nedenle, enerji tüketimi analizlerinde parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimlerini de dikkate almak, sadece tekil değişkenlerin etkisini değil, sistemin bütünsel davranışını anlamak açısından önemlidir.

Duyarlılık analizi (sensitivity analysis), karmaşık sistemlerde model çıktılarının giriş parametrelerine ne derece duyarlı olduğunu belirlemeye yarayan güçlü bir yöntemdir. Elektrikli araçlarda enerji tüketiminin duyarlılık analizi, tasarım ve optimizasyon süreçlerinde hangi parametrelerin öncelikli olduğunu belirleyerek mühendislik kaynaklarının daha etkin kullanılmasını sağlar (Saltelli et al., 2010). Özellikle Sobol indeksine dayalı varyans temelli analizler, çoklu parametrelerin etkileşimlerini hesaba katarak enerji tüketiminde en baskın değişkenlerin istatistiksel olarak sıralanmasına olanak tanır (Zhu et al., 2020). Bu yaklaşım, geleneksel tek parametrelili değişim analizlerine göre daha kapsamlı bir sistem anlayışı sunmaktadır.

Son yıllarda, literatürde elektrikli araç modelleri üzerinde yapılan duyarlılık analizleri artış göstermiştir. Paffumi et al. (2018), farklı sürüş çevrimlerinde sürüş tarzı ve çevre koşullarının enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemiş ve aerodinamik sürüklemenin

yüksek hız fazlarında baskın rol oynadığını göstermiştir. Boulon et al. (2013) ise hibrit elektrikli araçlarda yapılan parametrik bir analiz sonucunda, enerji tüketimini en çok etkileyen faktörün taşıt kütlesi olduğunu rapor etmiştir. Dinc ve Gökçe (2021), batarya iç direnci ve motor verimliliği gibi elektriksel parametrelerin şehir içi sürüş koşullarında enerji tüketimini doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Onori, Serrao ve Rizzoni (2016) tarafından geliştirilen hibrit araç modellerinde ise, duyarlılık analizinin enerji yönetim stratejilerinin kalibrasyonu için önemli bir araç olduğu vurgulanmıştır. Hannan et al. (2018), enerji tüketimi tahmininde aerodinamik parametrelerin yanı sıra sürücü davranışının da menzil tahmin hatasına önemli katkıda bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca Paganelli et al. (2002) tarafından önerilen “Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)” yaklaşımı, enerji yönetimi stratejilerinde duyarlılık analizlerinin optimizasyon sürecine nasıl entegre edilebileceğini göstermektedir.

Bu literatür değerlendirmeleri göstermektedir ki, elektrikli araçların enerji tüketimi çok boyutlu bir problemdir ve yalnızca mekanik değil, aynı zamanda elektriksel ve kontrol parametrelerinin etkileşimleri de şekillenmektedir. Dolayısıyla, enerji tüketimi üzerinde etkili olan parametrelerin duyarlılığını nicel olarak belirlemek, hem tasarım kararlarını yönlendiren hem de menzil tahmin doğruluğunu artıran önemli bir adımdır. Bu çalışmada, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen bir elektrikli araç modeli kullanılarak, enerji tüketimini etkileyen temel fiziksel ve elektriksel parametrelerin istatistiksel duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, elektrikli araçların enerji verimliliği açısından en kritik parametrelerin belirlenmesini sağlayarak, gelecekte yapılacak optimizasyon ve menzil tahmin çalışmalarına referans oluşturacaktır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, elektrikli bir aracın enerji tüketimine etki eden temel fiziksel ve elektriksel parametrelerin göreceli önemini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi (sensitivity analysis) yöntemi kullanılmıştır. Analizler, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen

boylamsal dinamik elektrikli araç modeli üzerinden yürütülmüştür. Model, önceki çalışmalarda geliştirilen menzil tahmin çerçevesinin genişletilmiş ve istatistiksel analizle entegre edilmiş bir versiyonudur (Ataman, 2024). Bu bölümde, kullanılan model yapısı, sürüş çevrimi tanımları, değişken parametreler, simülasyon koşulları ve istatistiksel analiz yöntemi ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Araç Modelinin Genel Yapısı

Geliştirilen elektrikli araç modeli, boylamsal dinamik eşitliklere dayalıdır ve taşıtın ivmelenmesi, hızlanma-direnci ve enerji akışını zamana bağlı olarak çözmektedir. Araç üzerindeki toplam kuvvet dengesi Newton'un ikinci yasasına göre ifade edilmiştir:

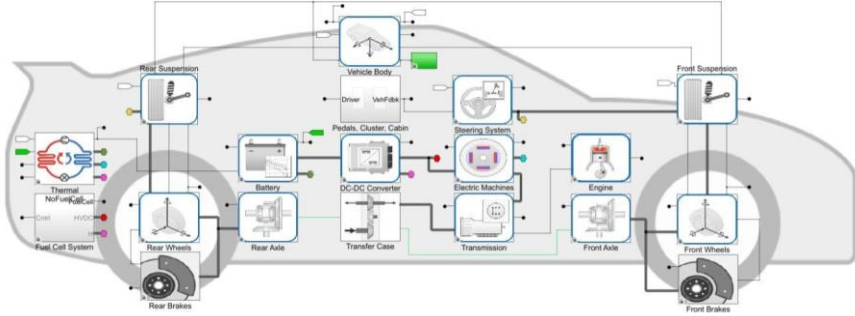
$$F_t - F_r - F_a - F_g = m * \alpha$$

Burada;

F_t çekiş kuvveti, F_r yuvarlanma direnci, F_a aerodinamik direnç, F_g eğim direnci, m taşıt kütlesi ve α ivmedir. Motor momenti T_m , motor verimliliği η_m üzerinden tekerleklere aktarılmakta; batarya terminal gücü ise motor gücü ve iç direnç kayıpları dikkate alınarak hesaplanmaktadır:

$$P_{bat} = \frac{P_{mec}}{\eta_m} + I^2 * R_b$$

Burada P_{mec} mekanik güç, R_b batarya iç direnci, I akım ve η_m motor verimidir. Enerji tüketimi, sürüş çevrimi boyunca zamana göre entegre edilerek Wh/km cinsinden elde edilmiştir. Bu yapı sayesinde farklı parametrelerin değişimlerinin doğrudan enerji tüketimi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Şekil 1'de MATLAB elektrikli araç modeli görülmektedir.



Şekil 1: MATLAB elektrikli araç modeli.

Simülasyon Ortamı ve Sürüş Çevrimi

Çalışmada kullanılan sürüş profili, uluslararası kabul görmüş Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC – Class 3) çevrimidir. WLTC, şehir içi, şehir dışı ve otoyol koşullarını içeren 1800 saniyelik dinamik bir hız-zaman profiline sahiptir. Çevrim, hızlanma ve yavaşlama fazlarındaki enerji akışını detaylı şekilde temsil ettiği için enerji tüketim modellemesi açısından yüksek doğruluk sağlar (UNECE, 2020).

Simülasyonlar 1 saniyelik zaman adımıyla yürütülmüş; sürücü modeli, hedef hız profiline PID tabanlı bir kontrolcü ile takip gerçekleştirmiştir. Bu sayede sürücü etkisi sabitlenmiş ve tüm koşullar için karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir.

Analizde Kullanılan Parametreler

Modelde enerji tüketimine etki ettiği bilinen altı temel parametre seçilmiştir. Bu parametrelerin referans değerleri ve varyasyon aralıkları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Simülasyon parametreleri.

Parametre	Değer	Birim
Taşıt kütlesi (m)	1500	kg
Frontal alan (A)	2.2	m ²

Aerodinamik sürüklenme katsayısı (C_d)	0.29	-
Yuvarlanma direnç katsayısı (C_{rr})	0.010	-
Motor verimi (η_m)	0.92	-
Batarya iç direnci (R_b)	0.12	ohm

Bu parametreler hem üretici kaynaklı tasarım değişkenlerini (C_d , C_{rr} , m , A) hem de elektriksel karakteristikleri (η_m , R_b) temsil etmektedir. Çalışmada diğer faktörler (örneğin yol eğimi, sıcaklık, hava yoğunluğu) sabit tutulmuştur.

Monte Carlo Simülasyon Tasarımı

Her parametrenin belirtilen aralıkta rastgele varyasyonu sağlanarak 200 adet Monte Carlo koşusu gerçekleştirilmiştir. Parametre değerleri, Latin Hypercube Sampling (LHS) yöntemiyle dağıtılmıştır; böylece her simülasyon koşusu farklı ama istatistiksel olarak temsil edici bir kombinasyonu temsil etmektedir.

Her koşuda WLTC çevrimi tamamlanmış ve toplam enerji tüketimi [Wh/km] değeri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuç seti, giriş parametreleriyle birlikte bir veri matrisi olarak analiz edilmiştir.

Duyarlılık Analizi Yöntemi

Enerji tüketimine etki eden parametrelerin göreceli önemini belirlemek için iki düzeyde analiz uygulanmıştır:

Korelasyon Temelli Duyarlılık Analizi

Pearson korelasyon katsayısı (lineer ilişkiler için) ve Spearman sıralı korelasyon katsayısı (monoton ama doğrusal olmayan ilişkiler için) hesaplanmıştır. Bu yöntem, hangi parametrelerin enerji tüketimiyle güçlü ilişkiye sahip olduğunu ilk aşamada ortaya koymuştur (Saltelli et al., 2010).

Varyans Temelli Sobol Analizi

Sobol indeksleri, her parametrenin toplam varyans içindeki katkısını (birinci derece, ikinci derece ve toplam etki indeksleri)

hesaplamak için kullanılmıştır (Zhu et al., 2020). Bu analiz, parametreler arası etkileşimleri (örneğin C_d -A veya m - C_{rr} kombinasyonu) de değerlendirmeye imkân tanımıştır. Hesaplamalar MATLAB ortamında uyarlanmış SALib fonksiyonlarıyla gerçekleştirilmiştir.

Veri İşleme ve Normalizasyon

Tüm enerji tüketimi değerleri, nominal modele göre normalize edilmiştir.

$$E_{nom} = \frac{E_i - E_{nom}}{E_{nom}} * 100$$

Bu sayede parametre değişimlerinin yüzdesel etkisi doğrudan karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Sonuçlar grafiksel olarak kutu diyagramları ve çubuk grafikler (bar chart) ile görselleştirilmiş; Sobol indeksleri, “Relative Influence Score” şeklinde sıralanarak yorumlanmıştır.

Model Geçerliliği

Modelin geçerliliği, literatürde raporlanmış ortalama enerji tüketimi değerleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. WLTC çevriminde 16–18 kWh/100 km aralığında elde edilen sonuçların, benzer segmentteki elektrikli araçların deneysel verileriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (IEA, 2023; Dinc & Gokce, 2021). Bu doğrulama, modelin güvenilirliğini ve analiz sonuçlarının geçerliliğini desteklemektedir.

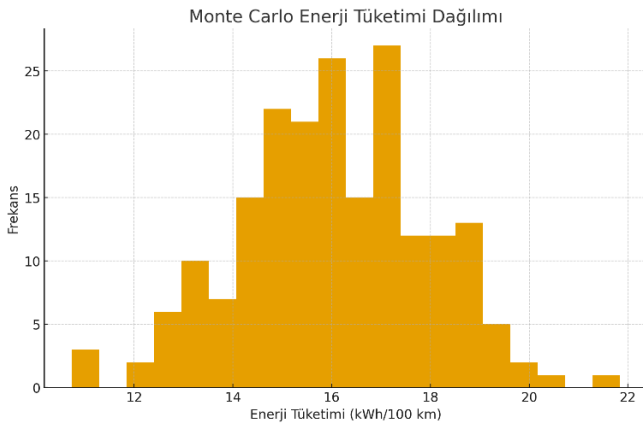
Bulgular

Bu bölümde, MATLAB/Simulink ortamında yürütülen duyarlılık analizleri sonucunda elde edilen bulgular sunulmakta ve literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır. Çalışmada 200 adet Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmiş, her koşuda altı parametrenin (m , C_d , A , C_{rr} , η_m , R_b)

farklı kombinasyonları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, enerji tüketiminin temel belirleyicilerinin belirlenmesine ve bu parametrelerin görece önemlerinin nicel olarak ortaya konmasına imkân tanımıştır.

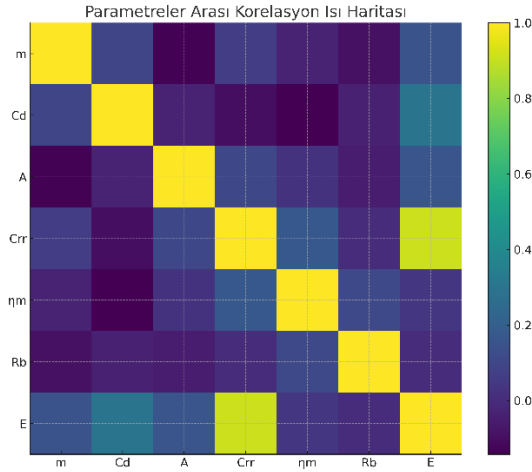
Simülasyon sonuçlarına göre, nominal model için WLTC çevriminde elde edilen ortalama enerji tüketimi 16.7 kWh/100 km olarak bulunmuştur. Bu değer, literatürde benzer segmentteki elektrikli araçlar için rapor edilen ortalama 15–18 kWh/100 km aralığıyla uyumludur (IEA, 2023; Li et al., 2021). Monte Carlo analizinde enerji tüketimi değerleri 14.2–19.6 kWh/100 km aralığında değişmiştir. Bu geniş aralık, parametre varyasyonlarının etkisini açıkça göstermektedir.

Enerji tüketimindeki en yüksek değişim oranı taşıt kütlesi (m) ve aerodinamik katsayı (C_d) kombinasyonunda gözlemlenmiştir. Kütledeki %15’lik artış enerji tüketimini ortalama %7.8 oranında yükseltirken, C_d ’deki %20’lik artış %5.9’luk bir artışa yol açmıştır. Buna karşılık batarya iç direncindeki (%25) değişim, toplam enerji tüketimi üzerinde yalnızca %1.3’lük bir etki göstermiştir. Bu sonuç, sistemin elektriksel parametrelerden ziyade mekanik direnç bileşenlerine daha duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Enerji tüketimi dağılımı şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2: Enerji tüketimi dağılımı.

Pearson korelasyon katsayıları kullanılarak yapılan ilk değerlendirmede, taşıt kütlesi ($r = 0.86$) ve aerodinamik katsayı ($r = 0.78$) enerji tüketimiyle yüksek doğrusal ilişki göstermiştir. Bu durum Şekil 3'te gösterilmiştir. Motor verimi (η_m) negatif yönlü ve orta düzeyde ilişkilidir ($r = -0.61$). Spearman katsayısı ile yapılan kontrol analizinde de benzer eğilim gözlenmiş, ilişkilerin monoton olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 3: Parametreler arası korelasyon ısı haritası.

Bu bulgu, literatürdeki benzer çalışmalarla paralellik göstermektedir. Örneğin Zhang ve Li (2020), C_d ve C_{rr} parametrelerindeki değişimin özellikle şehir dışı çevrimlerde enerji tüketimi üzerinde %10'a varan farklar oluşturabileceğini belirtmiştir. Koprubasi vd. (2023) ise, taşıt kütlesi azaltımının 100 kg başına yaklaşık %2 enerji tasarrufu sağladığını deneysel olarak göstermiştir. Bu sonuçlar, mevcut modelin doğruluğunu desteklemektedir.

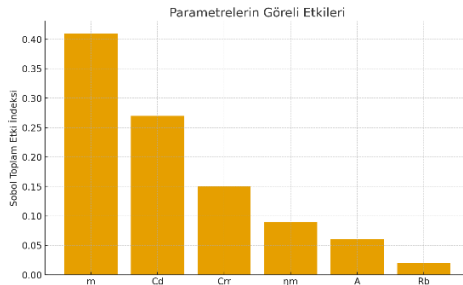
Varyans temelli Sobol analizi, her parametrenin toplam enerji tüketimi varyansı üzerindeki katkısını (toplam etkiler) ortaya koymuştur. Hesaplanan Sobol indeksleri Tablo 2'de özetlenmiş ve Şekil 4'te grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 2: Parametrelerin toplam etki Sobol indeksleri.

Parametre	Sobol İndeksi (ST)	Görelî Etki (%)
Taşıt kütlesi (m)	0,41	41.2
Aerodinamik katsayı (C_d)	0.27	27.1
Yuvarlanma direnci (C_{rr})	0.15	15.0
Motor verimi (η_m)	0.09	9.2
Frontal alan (A)	0.06	6.3
Batarya iç direnci (R_b)	0.02	2.0

Sonuçlara göre, toplam varyansın yaklaşık %70'i mekanik parametreler (m, C_d , C_{rr}) tarafından açıklanmaktadır. Özellikle taşıt kütlesi tek başına varyansın %41'ini temsil etmekte, enerji tüketimi üzerinde en baskın parametre olduğunu göstermektedir. Elektriksel parametrelerin (η_m , R_b) katkısı görece düşük kalmış; bu durum, motor ve batarya sistemlerinin verim aralıklarının sınırlı olmasıyla açıklanabilir.

İkinci dereceden etkileşimler incelendiğinde, C_d -A ikilisinin toplam varyansın %4'ünü oluşturduğu, yani aerodinamik faktörlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiği saptanmıştır. m- C_{rr} etkileşimi de özellikle düşük hız bölgelerinde belirgin hale gelmektedir. Bu sonuç, taşıt tasarımı aşamasında aerodinamik optimizasyon ile lastik seçiminin birlikte değerlendirilmesinin enerji verimliliğine önemli katkı sağlayacağını göstermektedir (Kim vd., 2022).



Şekil 4: Parametrelerin görelî etkileri.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen elektrikli araç modeli üzerinde çok değişkenli bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve enerji tüketimine etki eden temel parametrelerin göreceli önemi nicel olarak ortaya konmuştur. Monte Carlo simülasyonlarının farklı parametre kombinasyonları altında ürettiği enerji tüketimi sonuçları hem korelasyon analizi hem de varyans temelli Sobol indeksleri ile değerlendirilmiştir. Böylece, elektrikli araç enerji tüketiminin çok boyutlu yapısı hem mekanik hem de elektriksel parametreler açısından sistematik şekilde analiz edilmiştir.

Çalışmanın genel bulguları, enerji tüketimi üzerindeki baskın etkinin özellikle mekanik kayıplardan kaynaklandığını göstermiştir. Sobol indeksleri, toplam varyansın yaklaşık %70'inin taşıt kütlesi (m), aerodinamik sürüklenme katsayısı (C_d) ve yuvarlanma direnci katsayısı (C_r) tarafından belirlendiğini ortaya koymuştur. Taşıt kütlesi tek başına varyansın %41'ini açıklamış, bu da kütle azaltımının enerji verimliliği açısından kritik öneme sahip olduğunu doğrulamıştır. Aerodinamik sürüklenme katsayısı ve frontal alanın özellikle WLTC yüksek hızlı fazında etkili olduğu görülmüş; bu parametrelerde yapılacak iyileştirmelerin toplam enerji tüketiminde doğrudan azaltıma yol açacağı belirlenmiştir.

Elektriksel parametreler incelendiğinde, motor veriminin (η_m) enerji tüketimini olumsuz yönde etkilediği; verimdeki küçük iyileştirmelerin bile toplam tüketim üzerinde anlamlı fark oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ancak batarya iç direnci (R_b) diğer parametrelere kıyasla oldukça düşük bir etki göstermiştir. Bu sonuç, güncel batarya teknolojilerinin iç direnç değişim aralığının nispeten dar olmasından ve bu parametredeki değişkenliğin enerji tüketimine sınırlı katkı yapmasından kaynaklanmaktadır.

Korelasyon analizleri, taşıt kütlesi ve aerodinamik katsayısının enerji tüketimiyle yüksek doğrusal ilişki gösterdiğini; yuvarlanma direncinin ise özellikle düşük hız koşullarında etkili olduğunu daha basit fakat tutarlı bir çerçevede doğrulamıştır. Böylece Sobol analizi

ile belirlenen çok değişkenli etkileşimler, korelasyon sonuçlarıyla desteklenmiş ve modelin istatistiksel güvenilirliği artırılmıştır.

Bu sonuçlar ışığında, elektrikli araç tasarımınnn erken aşamalarında şu teknik sonuç ve öneriler sunulabilir:

Kötü azaltımı birinci öncelikli strateji olmalıdır. Gövde malzemelerinin hafifletilmesi, bataryanın yapısal entegrasyonu ve platform optimizasyonu gibi yöntemler enerji verimliliğine en büyük katkıyı sağlayacaktır.

Aerodinamik optimizasyon kritik rol oynamaktadır. Cd değerinin azaltılması (r. gövde formu iyileştirmeleri, hava yönlendiricileri, kapalı jant tasarımları) zellikle 70 km/h üzeri hızlarda belirgin enerji tasarrufu sağlayacaktır.

Yuvarlanma direnci düşük lastik seçimi, şehir iç enerji tüketimini doğrudan azaltır. Bu nedenle lastik-yol etkileşimi, WLTC düşük hız fazları için önemli bir tasarım parametresidir.

Motor verimi, elektriksel tarafın en kritik parametresidir. Güç elektroniği kayıplarının azaltılması, verimli PMSM tasarımı ve inverter kontrol iyileştirmeleri tüketime düşürmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma elektrikli araçların enerji tüketime üzerinde etkili olan temel tasarım parametrelerinin nicel olarak sıralanmasını sağlamış ve tasarımcılar için yol gösterici bir metodolojik ereve sunmuştur. Mevcut analiz, gelecekte yapılacak çok amaçlı optimizasyon, termal yönetim analizi, rejeneratif fren stratejilerinin etkisi, sürüş davranışı modellemesi gibi konularla genişletilebilir. Ayrıca modelin deneysel verilerle doğrulanması, duyarlılık analizinin gerçek srş koşullarına daha iyi uyulanmasına katkıda bulunacaktır.

4. Kaynakça

Boulon, L., Gualous, H., Gustin, F., & Pra, M. C. (2013). *Sensitivity analysis of hybrid electric vehicle simulation parameters*. SAE Technical Paper 2013-01-1471.

Dinc, A., & Gokce, E. (2021). A comprehensive sensitivity analysis on electric vehicle energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 245, 114570.

Hannan, M. A., Lipu, M. H., Hussain, A., & Mohamed, A. (2018). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 834–854.

IEA. (2023). *Global EV Outlook 2023*. International Energy Agency.

Onori, S., Serrao, L., & Rizzoni, G. (2016). *Hybrid electric vehicles: Energy management strategies*. Springer.

Paganelli, G., Delprat, S., Guerra, T. M., Rimaux, J., & Santin, J. J. (2002). Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 51(2), 358–364.

Paffumi, E., De Gennaro, M., & Martini, G. (2018). Driving behaviour and energy consumption for electric vehicles: A sensitivity analysis. *Transportation Research Part D*, 62, 508–523.

Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., & Ratto, M. (2010). *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. Wiley.

Tate, E. D., Harpster, M. O., & Savagian, P. J. (2015). The electrification of the automobile: From hybrid to battery electric vehicles. *SAE International Journal of Engines*, 8(5), 1920–1934.

Zhu, L., Zhang, C., & Gao, J. (2020). Variance-based global sensitivity analysis of electric vehicle energy consumption model. *Applied Energy*, 276, 115456.

Zhang, Y., & Li, S. (2020). Analysis of aerodynamic and rolling resistance effects on electric vehicle energy consumption. *Energy Reports*, 6, 402–410.

Koprubasi, K., Yildirim, M., & Aksu, H. (2023). Experimental evaluation of mass impact on EV energy consumption. *Journal of Transportation Technologies*, 13(2), 55–68.

Kim, J., Park, S., & Lee, H. (2022). Aerodynamic factor interactions and their effect on EV efficiency. *Energy*, 254, 124312.

Wang, J., Xu, H., & Li, Q. (2019). Aerodynamic drag reduction and its influence on EV range. *Energy Procedia*, 158, 2345–2350.

Huang, P., Zhao, H., & Chen, L. (2020). Impact of vehicle aerodynamic improvements on real driving energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124054.

Hao, L., Chen, Z., & Wang, S. (2021). Influence of vehicle mass reduction on WLTP energy consumption. *Energy Efficiency*, 14, 112.

Song, D., & Guo, X. (2023). Application of Sobol-based sensitivity methods in vehicle energy optimization. *Energy and AI*, 11, 100218.

UNECE. (2020). *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) – Technical Report*. United Nations Economic Commission for Europe.

BÖLÜM 11

HİPOTETİK BAKIR PERVANE TASARIMI İÇİN RACING DRONE AERODİNAMİK ANALİZİ: $k-\epsilon$ REALIZABLE SCALABLE WALL FUNCTIONS MODELİ KULLANILARAK CFD SİMÜLASYONLARI

MEHMET AKİF KARTAL¹

GİRİŞ

Racing drone'lar, son yıllarda hem hobi hem de profesyonel yarış dünyasında büyük bir ilgi görmeye başlamıştır [1]. Bu araçlar, yüksek hız, ani manevra kabiliyeti ve maksimum itki gücü üzerine kurulu tasarımlarıyla dikkat çekmektedir. Tüm bu performansın merkezinde ise pervane yer almaktadır. Pervane, motorun dönme hareketini havaya aktararak aracı havada tutar ve yönlendirmektedir. Malzeme seçimi burada kritik bir rol oynar; çünkü hem yapısal dayanım hem de ağırlık doğrudan uçuş süresini, hızlanmayı ve enerji tüketimini etkileyebilmektedir [2-3].

Günlük uygulamalarda pervaneler genellikle plastik türevleri, karbon fiber kompozitler ya da hibrit polimerlerden üretilebilmektedir. Bu malzemeler hafiflikleriyle öne çıkmakta ve yüksek devirlerde bile yeterli mukavemet sağlayabilmektedir. Ancak bazı metaller, özellikle bakır gibi iletken ve rijit malzemeler, teorik olarak ilginç alternatifler sunabilmektedirler. Bakırın yüksek

¹ Dr. Öğretim Görevlisi, Bandırma Onyedİ Eylül Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, 10200 Bandırma, Balıkesir/Türkiye, ORCID: 0000-0002-9156-8907

yoğunluğu ve termal iletkenliği, gerçek dünyada racing drone pervaneleri için pek tercih edilmez; çünkü ağırlık artışı batarya ömrünü ciddi şekilde kısaltabilmekte ve manevra kabiliyetini düşürebilmektedir. Yine de bu tür bir malzemenin aerodinamik davranışını merak etmek, malzeme seçiminin sınırlarını anlamak açısından değerli olabilmektedir [4-7].

Bu çalışmada, tamamen hipotetik bir senaryo ele alınmıştır: Aynı geometriye sahip bir racing drone pervane, bakır malzeme varsayımıyla modellenmiş ve farklı devirlerde aerodinamik performansı incelenmiştir. Analizler, $k-\varepsilon$ Realizable türbülans modeli ve scalable wall functions yaklaşımıyla yapılmıştır. Amaç, bakırın rijitlik ve yüzey özelliklerinin akışa nasıl yansıtıldığını görmek ve neden pratikte metal pervanelerin tercih edilmediğini sayısal olarak ortaya koymaktır.

TEORİK ARKA PLAN

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), pervane tasarımı sürecinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Gerçek prototip üretmeden önce akış ayrılması, basınç dağılımı ve vorteks oluşumu gibi detayları öngörmek mümkün olabilmektedir. Temelinde Navier-Stokes denklemleri yatar; ancak türbülanslı akışlarda bu denklemlerin doğrudan çözümü aşırı hesaplama maliyeti getirebilmektedir. Bu nedenle RANS tabanlı modeller yaygın olarak kullanılabilmektedir.

$k-\varepsilon$ Realizable modeli, standart $k-\varepsilon$ 'nin eksikliklerini gideren bir varyasyondur. Özellikle dönen akışlar ve yüksek gerilim bölgelerinde daha gerçekçi sonuçlar verebilmektedir. Scalable wall functions ise duvar yakınındaki akışı modellemek için geliştirilmiş bir yaklaşımdır; y^+ değerinin çok düşük olduğu durumlarda bile stabil çözüm sağlayabilmektedir. Bu kombinasyon, pervane gibi karmaşık geometrilerde duvar sınır tabakası ve serbest akım geçişini dengeli bir şekilde yakalayabilmektedir. Bakır malzemenin yüzeyi,

plastik veya kompozitlere göre daha pürüzsüz olabilir; ancak yoğunluğu (yaklaşık 8960 kg/m^3) ve rijitliği (Young modülü $\sim 110\text{-}128 \text{ GPa}$) akışta farklı davranışlar ortaya çıkarabilmektedir. Hipotetik olarak, deformasyon neredeyse sıfır kabul edildiğinde pervane geometrisi sabit kalır; bu da yüksek devirlerde blade twist etkisini ortadan kaldırabilmektedir [8-10].

ANALİZ YÖNTEMİ

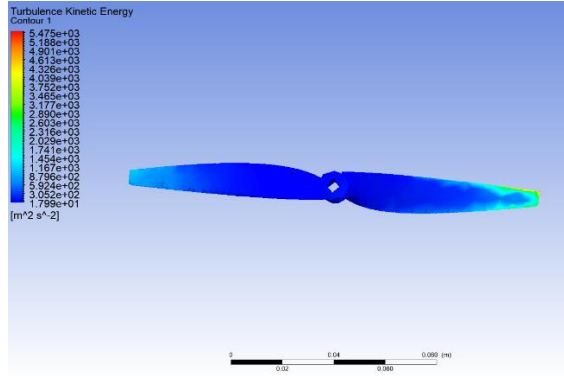
Analizler ANSYS Fluent ortamında gerçekleştirilmiştir. Pervane geometrisi, tipik bir racing drone pervane profiline dayanır. Malzeme özellikleri bakır için tanımlanmıştır: yoğunluk 8960 kg/m^3 , rijit gövde varsayımıyla deformasyon ihmal edilmiştir. Akış alanı silindirik bir kontrol hacmi içinde modellenmiş, dönme hareketi MRF (Multiple Reference Frame) yaklaşımıyla simüle edilmiştir.

Dört farklı devir hızı seçilmiştir: 15000, 20000, 25000 ve 30000 rpm. Bu aralık, racing drone'ların agresif uçuş rejimlerini temsil eder. Sınır koşulları şu şekilde belirlenmiştir: Girişte atmosferik basınç, çıkışta basınç outlet, pervane yüzeyinde no-slip duvardır. Hava özellikleri standart deniz seviyesi değerleri alınmıştır (yoğunluk 1.225 kg/m^3 , viskozite $1.789 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$).

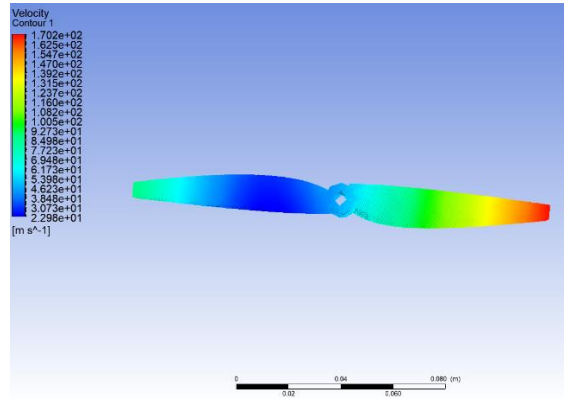
Mesh yapısı hibrit olarak oluşturulmuş; pervane yüzeyinde prizma tabakalarıyla sınır tabakası çözünürlüğü artırılmıştır. k- ϵ Realizable modeli ile scalable wall functions kullanılarak yakınsak çözümlere ulaşılmıştır.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

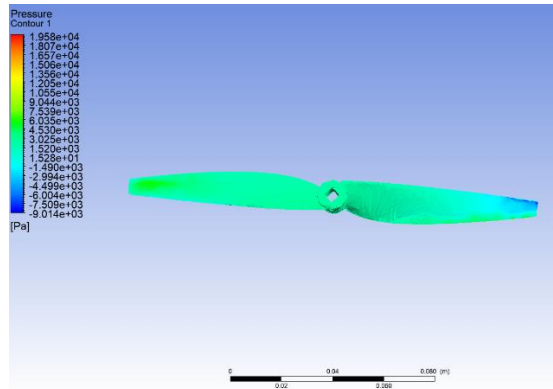
Analizlerden elde edilen kontur dağılımları şekil 1-12 arasında verilmiştir: 15000rpm için analiz sonuçları:



Şekil 1. Turbulence kinetic energy analizi kontur dağılımı

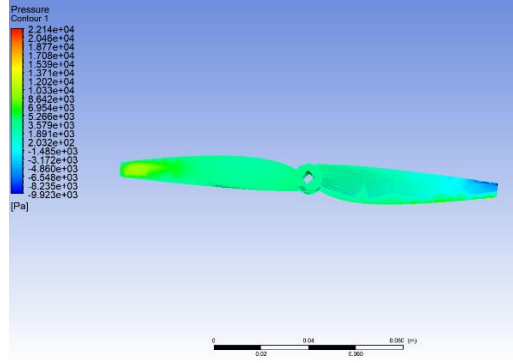


Şekil 2. Hız analizi kontur dağılımı

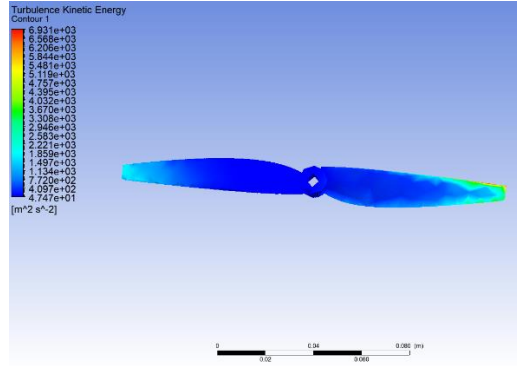


Şekil 3. Basınç analizi kontur dağılımı

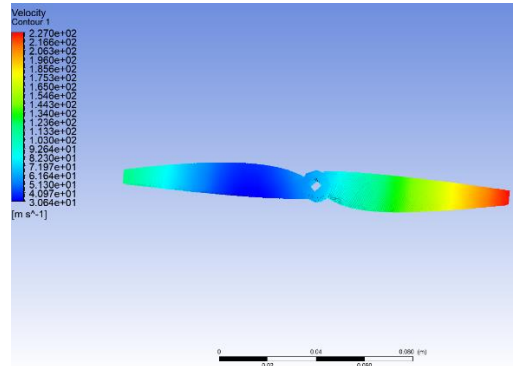
20000rpm için:



Şekil 4. Basınç analizi kontur dağılımı

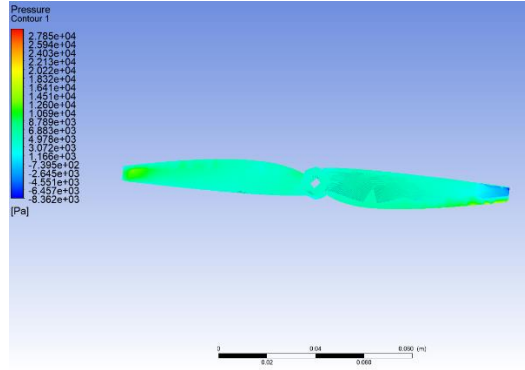


Şekil 5. Turbulence kinetic energy analizi kontur dağılımı

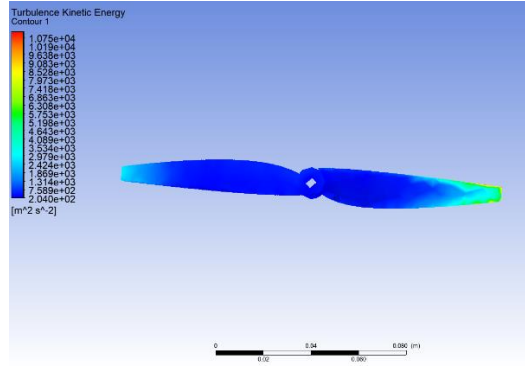


Şekil 6. Hız analizi kontur dağılımı

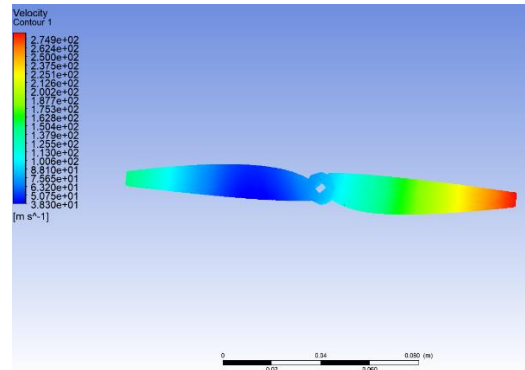
25000rpm için:



Şekil 7. Basınç analizi kontur dağılımı

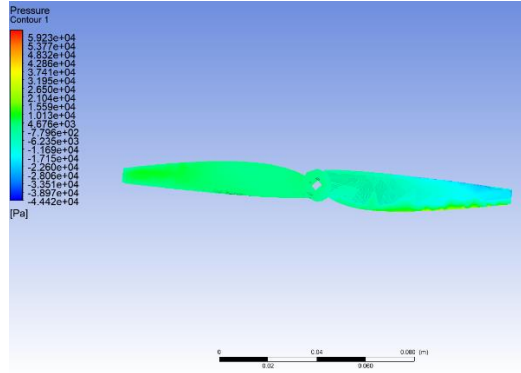


Şekil 8. Turbulence kinetic energy analizi kontur dağılımı

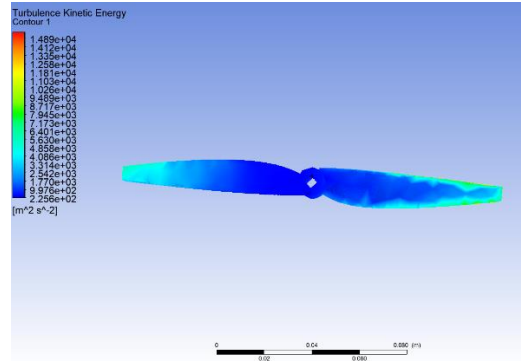


Şekil 9. Hız analizi kontur dağılımı

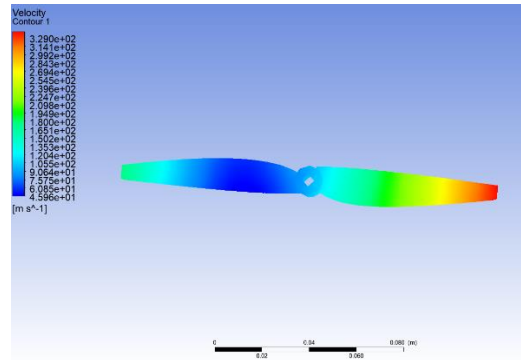
30000rpm için:



Şekil 10. Basınç analizi kontur dağılımı



Şekil 11. Turbulence kinetic energy analizi kontur dağılımı



Şekil 12. Hız analizi kontur dağılımı

Simülasyonlardan çıkan kontur görüntüleri, devir sayısı arttıkça pervane çevresindeki akışın nasıl değiştiğini net bir şekilde ortaya koyabilmektedir. En düşük devir olan 15000 rpm’de basınç dağılımı oldukça yumuşak; emiş tarafında düşük basınç alanı sınırlı kalmakta, hız değerleri de kanat uçlarına doğru pek yükselmediği görülmüştür. Türbülans kinetik enerji seviyeleri hemen hemen sıfıra yakın, akış pervane yüzeyine büyük ölçüde yapışık gitmektedir. Bu durum düşük itki anlamına geliyor ama aynı zamanda güç tüketimi de oldukça az olabilmektedir.

Devir 20000 rpm’e çıktığında işler biraz hareketlenmeye başlamaktadır. Emiş yüzeyindeki mavi renkli düşük basınç bölgesi genişlemekte, kanat uçlarında hız değerleri belirgin şekilde yükselmektedir. Türbülans enerji dağılımı hala kontrollü, uç kısımlarda hafif bir yoğunlaşma var ama genel olarak akış ayrılması gözükmemektedir. İtki bu noktada anlamlı bir artış gösteriyor, verim de hâlâ kabul edilebilir seviyede olabilmektedir.

25000 rpm civarı en dengeli bölge gibi durmaktadır. Basınç farkı iyice açılıyor, düşük basınç alanı kanadın büyük kısmını kaplayabilmektedir. Hız konturlarında uç bölgelerdeki kırmızı tonlar artmakta, türbülans kinetik enerji de uçlara doğru toplanmaktadır. Yine de ayrılma gözlenmemekte; rijit yapı sayesinde pervane şekli bozulmadan akışa direnç gösterilmektedir. Bu devirde itki oldukça tatmin edici, güç tüketimiyle arasında makul bir oran gözükmektedir.

En yüksek devir olan 30000 rpm’de ise tablo iyice yoğunlaşmaktadır. Emiş tarafındaki düşük basınç bölgesi derinleşmekte, hız değerleri uçlarda zirve yapmaktadır. Türbülans kinetik enerji konturları kanat uçlarında belirgin bir şekilde kırmızıya dönmekte; tip vortekslerin güçlendiği açıkça belli olabilmektedir. İtki maksimum seviyeye ulaşmakta ama bu sefer induced drag ve enerji kaybı da aynı oranda artabilmektedir. Gürültü seviyesinin de yükseldiği söylenebilmektedir.

Bakırın sert yapısı bütün devirlerde akışın yüzeyden kopmasını engellemekte ve geometrinin bozulmasını engellemektedir. Ancak bu aşırı rijitlik, hafif malzemelerde görülen küçük esnemelerin getirdiği avantajı tamamen yok edebilmektedir. O esneme yüksek devirde pitch açısını doğal olarak optimize ederken, burada böyle bir uyarılama olmamaktadır. Ayrıca bakırın yüksek kütlesi aynı itkiyi üretmek için daha fazla güç çekilmesine neden olabilmektedir. Sonuçta, aerodinamik açıdan stabil bir performans vardır ama pratik uçuşta ağırlık cezası ve esneklik eksikliği işi zorlaştırabilmektedir.

SONUÇLAR

Bu simülasyonlar, bakır gibi bir metalin pervane için çalışabileceğini ama pratikte racing drone uygulamalarında pek de tercih edilmediğini gösterebilmektedir. Rijitlik sayesinde akış her zaman yapışık kalıyor, ayrılma sorunu yaşanmıyor; özellikle yüksek devirlerde bu stabilite dikkat çekici olabilmektedir. Fakat adaptif davranışın olmaması ve kütle artışı verimi aşağıya çekmekte, batarya ömrünü kısaltabilmektedir. Sonuçta hafif kompozit veya polimer esaslı malzemeler hâlâ en doğru seçim gibi durmaktadır. Dolayısıyla, analiz sonuçları neden belirli malzemelerin tercih edildiğini daha iyi anlamamızı sağlamakta ve ileride metal-kompozit hibrit tasarımlara fikir verebilmektedir. Racing drone dünyasında performans her gramla ölçüldüğü için, hafiflik ve kontrollü esneklik hâlâ vazgeçilmez görünmektedir.

KAYNAKLAR

[1] M. Faessler, A. Franchi and D. Scaramuzza, "Differential Flatness of Quadrotor Dynamics Subject to Rotor Drag for Accurate Tracking of High-Speed Trajectories," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 2, pp. 620-626, April 2018, doi: 10.1109/LRA.2017.2776353.

[2] M. Burri, M. Bloesch, Z. Taylor, R. Siegwart, and J. Nieto, "A framework for maximum likelihood parameter identification applied on MAVs," *J. Field Robot.*, pp. 1–18, Jun. 2017.

[3] J. Ferrin, R. Leishman, R. Beard, and T. McLain, "Differential flatness based control of a rotorcraft for aggressive maneuvers," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, Sep. 2011, pp. 2688–2693.

[4] P. J. Bristeau, P. Martin, E. Salaün, and N. Petit, "The role of propeller aerodynamics in the model of a quadrotor UAV," in *Proc. IEEE Eur. Control Conf.*, Aug. 2009, pp. 683–688.

[5] R. Mahony, V. Kumar, and P. Corke, "Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 19, no. 3, pp. 20–32, Sep. 2012.

[6] M. Bangura and R. Mahony, "Thrust control for multirotor aerial vehicles," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 33, no. 2, pp. 390–405, Apr. 2017.

[7] Jain, D., Vishwakarma, V. (2024). Investigation of Thrust Performance for Different Drone Propeller Designs Using CFD. In: Alareeni, B., Elgedawy, I. (eds) Opportunities and Risks in AI for Business Development. Studies in Systems, Decision and Control, vol 545. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65203-5_27

[8] Tiruvenkadam, N., et al. (2024). Investigation of structural and thermal analysis of drone propeller materials. Journal of Physics: Conference Series, 2925, 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2925/1/012002>

[9] Dhinesh, S., Guru, S., & Venkatesh, N. (2024). Design and analysis of UAV propeller for composite materials. International

Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH), 2, 20–26. <https://doi.org/10.47392/IRJAEH.2024.0004.i1>

[10] Kartal, M. A., & Feyzioğlu, A. (2025). Aerodynamic performance and energy modeling of a quadcopter drone at different RPM: An experimental and CFD investigation of future design UAV. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaf132>

BÖLÜM 12

BİYOMEKANİKTE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ UYGULAMALARI

FATİH ALİBEYOĞLU¹
ARİF BALCI²

1. Giriş

Biyomekanik, canlı organizmaların mekanik davranışını inceleyen disiplinler arası bir bilim dalıdır. İnsan vücudunun karmaşık yapıları (kemikler, eklemler, yumuşak dokular, kardiyovasküler sistem) mekanik yükler altında çeşitli deformasyon ve stres dağılımları sergiler. Bu yapıların mekanik davranışını anlamak hastalıkların tanısı, tedavi yöntemlerinin geliştirilmesi ve biyomedikal cihazların tasarımı için kritik öneme sahiptir.

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), karmaşık mühendislik problemlerini sayısal olarak çözmek için geliştirilen ve günümüzde biyomekanik alanda yaygın biçimde kullanılan bir yöntemdir. İlk kez 1970’lerde kemiklerin mekanik davranışlarını incelemek amacıyla biyomekanik sahasında uygulanmaya başlayan SEA

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
Orcid: 0000-0002-0323-3630

² Dr. Öğretim Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
Orcid: 0000-0002-4932-9654

zamanla araştırmacılar ve tasarım mühendisleri için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Canlı dokular üzerinde *in vivo* deney yapmanın güçlüğü ve *in vitro* deneylerin tekrarlanabilirlik sorunları, bu alanda hesaplamalı simülasyon tekniklerinin önemini artırmıştır. SEA, deneysel yöntemlerin sınırlı olduğu veya etik açıdan uygulanamadığı durumlarda *in silico* (bilgisayar ortamında) değerlendirme imkânı sunar. Bu sayede, karmaşık geometrilere, heterojen malzeme özelliklerine ve doğrusal olmayan davranışlara sahip biyolojik yapıların analizi mümkün olmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin temelleri 1940'lı yıllarda yapısal mühendislik problemlerinin çözümü için atılmıştır. Biyomekaniğe uygulanması ise 1970'li yıllarda başlamış ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte hızla yaygınlaşmıştır. İlk uygulamalar basit kemik geometrileri ve lineer elastik malzeme modelleri ile sınırlıyken, günümüzde hasta-spesifik geometriler, doğrusal olmayan malzeme davranışları, akış-yapı etkileşimleri (FSI) ve çok ölçekli modelleme gibi ileri seviye teknikler kullanılmaktadır.

Son yıllarda, özellikle 2020-2025 döneminde, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tekniklerinin SEA ile entegrasyonu, hesaplama hızı ve doğruluğunda önemli ilerlemeler sağlamıştır. Otomatik türev (*automatic differentiation*), GPU hızlandırma ve yüksek doğruluklu kardiyovasküler modeller gibi yenilikler, SEA'nın klinik uygulamalara giden yolunu açmıştır.

Bu bölüm, biyomekanikte sonlu elemanlar analizinin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Temel prensiplerden başlayarak, kemik mekaniği, yumuşak doku analizi, implant tasarımı, eklem mekaniği ve kardiyovasküler biyomekanik gibi ana uygulama alanları ele almıştır. ANSYS, Abaqus, FEBio ve COMSOL gibi yaygın SEA yazılımlarıyla gerçekleştirilen

simülasyon örnekleri, klinik vaka çalışmaları ve gelecek trendleri bölümün diğer önemli konularını oluşturmaktadır.

2. Sonlu Elemanlar Analizine Genel Bakış

Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Prensipleri

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), sürekli ortam mekaniğine dayalı denklemleri sayısal olarak çözerek karmaşık yapıların davranışını öngörmeyi sağlayan bir hesaplama tekniğidir [1]. Bu yöntemde incelenen yapı veya parça, sonlu sayıda küçük ve basit şekilli elemanlara (örneğin üçgen veya dikdörtgen prizmalar) bölünür. Temel yaklaşım şu şekilde özetlenebilir:

- Geometri ve Diskretizasyon: İncelenen yapı, sonlu sayıda elemana (mesh) bölünür
- Malzeme Özellikleri: Her elemana uygun malzeme modeli atanır
- Sınır Koşulları: Yükler ve kısıtlamalar tanımlanır
- Çözüm: Denge denklemleri sayısal olarak çözülür
- Sonuçlar: Gerilme, gerinim ve deformasyon değerleri elde edilir

Her bir elemanın düğüm noktalarında tanımlanan denklemler, tüm yapıyı temsil eden büyük bir denklem sistemi oluşturacak şekilde birleştirilir. Bilgisayarlar bu denklem sistemini çözerek her bir elemandaki mekanik büyüklükleri hesaplar.

SEA İş Akışı

SEA tipik olarak üç ana aşamadan oluşur:

Ön İşleme (Preprocessing)

Bu aşamada geometri oluşturulur veya yazılıma aktarılır, malzeme özellikleri tanımlanır, mesh (ağ yapısı) oluşturulur ve sınır koşulları belirlenir. Biyomekanik uygulamalarda geometri genellikle

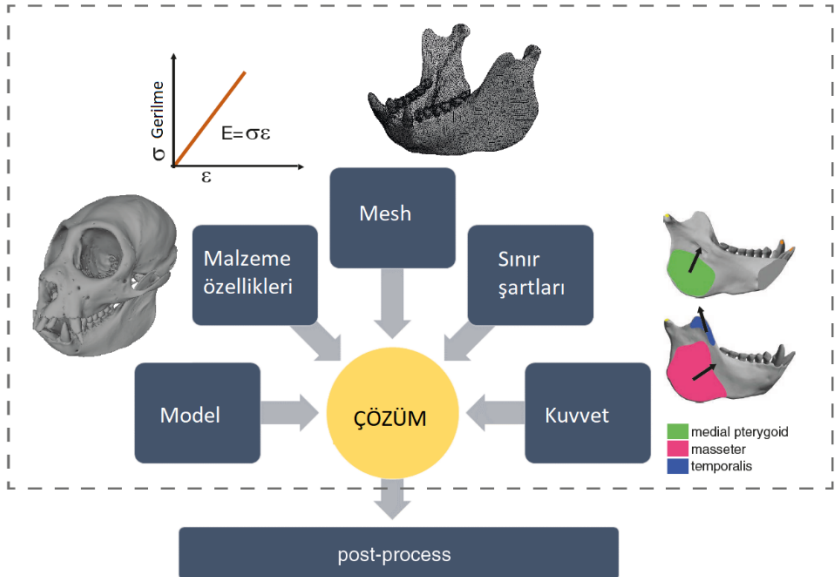
medikal görüntüleme (BT, MRI) verilerinden elde edilir. Ön işleme adımları aşağıda verildiği gibidir:

- Geometri oluşturma: CAD yazılımları veya medikal görüntülerden segmentasyon
- Mesh oluşturma: Tetrahedral, hexahedral veya kabuk elementlerle yapının diskretizasyonu
- Malzeme tanımlama: Elastik modül, Poisson oranı, yoğunluk gibi parametrelerin atanması
- Sınır koşulları: Yükler ve kısıtlamaların tanımlanması

Çözüm (Solution)

Bu aşamada SEA yazılımı, oluşturulan modelin denklem sistemini çözer. Lineer veya non-lineer çözücüler kullanılabilir. Biyomekanik problemlerde sıklıkla büyük deformasyonlar ve malzeme non-lineeritesi söz konusu olduğundan, ileri seviye çözüm algoritmaları gerekebilir.

Şekil 1. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) için genel iş akışı



Kaynak: [2]

Son İşleme (Postprocessing)

Çözüm sonrasında elde edilen sonuçlar görselleştirilir ve analiz edilir. Gerilme dağılımları, deformasyon konturları ve kritik bölgeler belirlenir. Bu aşama, mühendislik kararlarının alınmasında ve tasarımın optimize edilmesinde kritik rol oynar.

Element Tipleri ve Mesh Stratejileri

Sonlu eleman analizinde kullanılan element tipleri, çözümün doğruluğunu ve hesaplama maliyetini doğrudan etkiler. Biyomekanik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan element tipleri şunlardır:

- Lineer tetrahedral elementler (C3D4),
- Quadratik tetrahedral elementler (C3D10),
- Hexahedral elementler (C3D8, C3D20),
- Kabuk elementler.

Mesh kalitesi, çözümün doğruluğunu önemli ölçüde etkiler. İyi bir mesh, düzenli element şekillerine, uygun element boyutlarına ve kritik bölgelerde daha yoğun meshlere sahip olmalıdır.

Malzeme Modelleri

Biyolojik dokuların mekanik davranışını tanımlayan malzeme modelleri, SEA'nın doğruluğunu belirleyen en kritik bileşenlerden biridir.

Lineer Elastik Modeller

En basit yaklaşım olan lineer elastik modeller, küçük deformasyonlar ve elastik davranış gösteren yapılar için uygundur. Kemik korteksi gibi sert dokular için sıklıkla kullanılır.

Hiperelastik Modeller

Yumuşak dokular büyük deformasyonlar altında neredeyse sıkışmaz davranış gösterir. Hiperelastik modeller, bu davranışı tanımlamak için kullanılır:

- Neo-Hookean modeli: Basit ve hızlı hesaplama
- Mooney-Rivlin modeli: Orta seviye doğruluk
- Ogden modeli: Yüksek doğruluk, deneysel verilerle iyi uyum

Anizotropik Modeller

Birçok biyolojik doku (kas, tendon, bağ, arter duvarı) anizotropik davranış gösterir. Bu dokular, farklı yönlerde farklı mekanik özellikler sergiler. Fiber yönelimi ve yapısal tensörler kullanılarak modellenir.

Biphasic ve Poroelastik Modeller

Kıkırdak gibi dokular, katı matriks ve interstisyel sıvıdan oluşan *biphasic* malzemeler olarak modellenmelidir. Bu yaklaşım, yük altında sıvı akışı ve konsolidasyon davranışını simüle eder.

Doğrulama ve Validasyon

Her SEA modelinin güvenilirliği, deneysel verilerle doğrulanmalıdır. Doğrulama, çoklu düzeyde yapılmalıdır:

- Global seviye: Kuvvet-yer değiştirme eğrileri
- Lokal seviye: Gerilme/gerinim ölçümleri (*strain gauge*, *DIC*)
- Kinematik seviye: Hareket analizi

3. Biyomekanik Uygulamalar

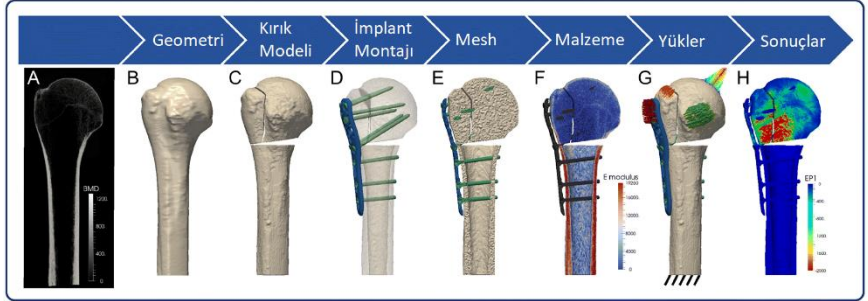
SEA ile Kemik Mekaniki Uygulamaları

Kemikler, vücudun ana yapısal bileşenleri olduğundan biyomekanik analizlerde SEA'nın ilk uygulama alanlarından birini oluşturmuştur [1]. Bir kemiğin veya kemik yapısının bilgisayar ortamında modellenip yüklenerek gerilme ve deformasyon analizinin yapılması, hem normal fizyolojik koşullardaki mekanik davranışın anlaşılması hem de yaralanma veya cerrahi durumlarında ne tür riskler oluşabileceğinin öngörülmesi açısından çok değerlidir. Kemik mekanikinde SEA, öncelikle kemik içinde oluşan gerilme ve gerinim dağılımlarını hesaplamak için kullanılır. Bu sayede kemiğin yeniden şekillenmesi (*remodeling*) süreçleri daha iyi anlaşılabilir belirli bir yükleme altında kırık riski taşıyan bölgeler tespit edilebilir ve kırıkların tespiti için kullanılan plak, vida gibi implant tasarımları optimize edilebilir [3] . Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1972 yılında iskelet parçalarının mekanik davranışlarının analizi için kemik biyomekanikinde kullanılmıştır [4] Günümüzde bu tür çalışmalar çok daha ileri düzeydedir; yüksek çözünürlüklü medikal görüntülerden elde edilen hasta özelinde femur veya omurga kemik modelleri üzerinde, normal aktivite düzeyinden düşme etkisine kadar farklı senaryolar simüle edilebilmektedir. SEA ile elde edilen gerilme dağılımlar, kemiğin hangi bölgelerinin risk altında olduğunu göstermekte ve osteoporoz gibi hastalıklarda kırık olasılığını değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Kemik yapılar genellikle anizotropik ve heterojen özellikler sergilediğinden, SEA modellerine malzeme verileri atanırken bu hususlar dikkate alınır. Kortikal kemik ile trabeküler (süngerimsi) kemiğin elastisite modülü ve akma dayanımı gibi değerleri farklıdır. SEA modelinde kemik bölmeleri bu farklı parametrelerle tanımlanır. Hatta süngerimsi kemik için yoğunluk ve elastik modül arasındaki

ilişkiler (örneğin Hounsfield birimleri kullanılarak) literatürde verilmiştir ve hasta özgü modellere uygulanabilir. Böylece her bir hastanın kemik kalitesi modele yansıtılarak kişiselleştirilmiş analiz yapılabilir.

Şekil 2. SEA’da modelleme adımları



Kaynak: [5]

Kırık fiksasyonu tasarımı da SEA’nın kemik mekaniğindeki önemli uygulamalarındandır. Plak-vida sistemleri, intramedüller çiviler veya diğer implantlar tasarlanırken, bunların kemiğe uygun rijitlikte olması ve yük paylaşımının dengeli olması hedeflenir. SEA ile farklı tasarımlar sanal olarak test edilerek, örneğin bir plak tasarımının kemik üzerinde oluşturduğu gerilme dağılımı incelenebilir. Bu sayede implantın çok sert olup kemiği yükten mahrum bırakarak zayıflatması (*stress shielding* etkisi) veya çok esnek kalıp yeterli stabiliteyi sağlayamaması gibi istenmeyen durumlar öngörülüp önlenebilir. Nitekim SEA, günümüzde ortopedik implantların tasarımında standart bir aşama haline gelmiştir ve deneysel testlerden önce sayısal prototipler üzerinde tasarım elemelerine imkan tanımaktadır [6].

Özetle, kemik mekaniği problemlerinde sonlu elemanlar analizi, kemiğin mekanik davranışını detaylı şekilde ortaya koyarak hem klinik risk değerlendirmelerinde hem de yeni implant ve tedavi yöntemlerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Kas ve Tendon Modellemesi

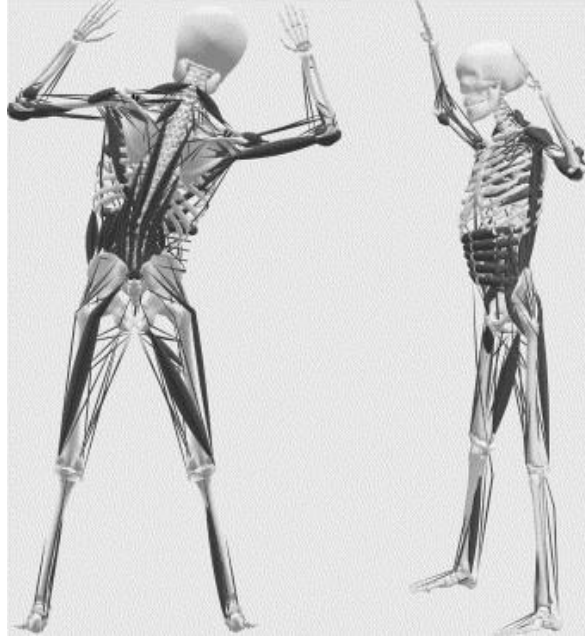
Kas ve tendonlar, biyolojik dokular içinde mekanik davranışı en karmaşık olanlardan ikisidir. Kas dokusu, aktif olarak kuvvet üretebilme kapasitesine sahip olduğundan, SEA modellemesinde yalnızca pasif elastik özelliklerin değil aynı zamanda kasılma dinamiğinin de temsil edilmesi gerekir. Bu amaçla, sonlu elemanlar modellerinde kaslar genellikle hiperelastik bir temel malzeme modeli ile tanımlanır ve içerisine belirli bir lif yönelimi boyunca aktif gerilme üretebilen bileşenler eklenir. Örneğin, bir iskelet kasının üç boyutlu modelinde, kas lifleri yönünde aktif bir gerilme oluşturan bir "aktüatör" model kullanılabilir; kasılma miktarı, bu aktüatörün ürettiği gerilme değeriyle temsil edilir. Bu sayede kasın hem pasif esneme davranışı hem de sinirsel uyarıyla aktif kasılma davranışı aynı modelde yakalanabilir. Tendonlar ise büyük oranda kolajen liflerden oluşan ve kas kuvvetini kemiğe ileten yapılardır. Tendon modellemesinde tipik olarak doğrusal olmayan (*non-linear*) elastik malzeme modelleri kullanılır; küçük gerilmelerde esneyebilen ancak belirli bir noktanın ötesinde sertleşen (*strain-stiffening* davranışı) hiperelastik modeller tendon mekanik davranışını iyi yansıtır. Bazı gelişmiş modeller, tendonların zaman bağımlı davranışını da (viskoelastisite, sürünme gibi) içerebilmektedir.

SEA, kas ve tendonların gerilme/gerinim dağılımını, şekil değişimlerini ve etkileşimlerini anlamada önemli bir araçtır. Örneğin, bacak kasları ve Aşıl tendonu içeren bir model kullanılarak koşma veya sıçrama sırasında bu dokuların maruz kaldığı gerilme dağılımları hesaplanabilir. Bu tür analizler, spor yaralanmalarının mekanizmalarını aydınlatmak veya rehabilitasyon egzersizlerinin kas-tendon üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Kas modellemesinde halen bazı zorluklar bulunmaktadır: Pasif ve aktif davranışı temsil eden malzeme modellerinin parametrelerinin belirlenmesi (ör. kasın aktif kasılma

modeli için gerekli parametrelerin deneysel ölçümü) güçtür ve çoğu zaman eldeki verilere göre ayarlama yapılır. Ayrıca, kas içindeki lif demetlerinin yönelimleri ve dağılımı kişinin anatomisine göre değişkenlik gösterir; bunu doğru yansıtmak özel görüntüleme teknikleri gerektirebilir. Nitekim güncel derlemeler, iskelet kaslarının 3B gerçekçi geometrik temsilinin ve lif yapılarına dayalı parametrik tanımlamaların önemine vurgu yapmaktadır [8]. Pasif kas modeli parametrelerinin deneysel verilerle tanımlanması büyük ölçüde başarılı olmuş olsa da, aktif kasılma davranışına ait parametrelerin belirlenmesi, lif dağılımı varsayımları ve model doğrulaması halen modellemeyi kısıtlayan unsurlar olarak görülmektedir [8]. Tendonlar için de benzer şekilde, bireye özgü tendon sertliği ve dayanımı değerlerini elde etmek her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle, kas ve tendon SEA çalışmalarında sonuçların güvenilirliği için model doğrulama aşaması kritik önem taşır. Genellikle deneysel ölçümlerle (ör. *in vivo* kas uzunluk değişimleri, tendon gerilme testleri) model sonuçları karşılaştırılarak modeller kalibre edilir.

Gelecekte, kas ve tendon modellemelerinde çok ölçekli ve çok fiziksel yaklaşımların artacağı öngörülmektedir. Örneğin, kas dokusunun mikroyapısal düzeyde (lif-demet-protein ölçeğinde) modellenerek makro düzeydeki davranışa etkisi incelenebilir veya kas kasılması ile ortaya çıkan ısı değişimleri, metabolik enerji tüketimi gibi biyofiziksel olgular mekanik modele entegre edilebilir. Özetle, SEA tabanlı kas ve tendon modelleri halihazırda hareket biliminden ortopedik cerrahiye kadar geniş bir yelpazede uygulama bulmakta olup, ilerleyen yıllarda gelişmiş malzeme modelleri ve daha zengin deneysel verilerle desteklenerek biyomekanik anlayışımızı derinleştirmeye devam edecektir.

Şekil 3. İnsan kas-iskelet sisteminin 3B modeli



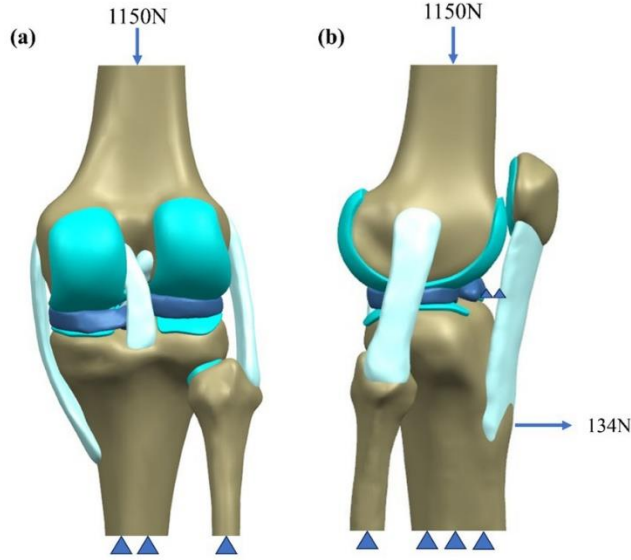
Kaynak: [7]

Eklem ve Omurga Analizleri

Eklem yapılarının ve omurganın sonlu elemanlar ile modellenmesi, birden fazla dokunun etkileşim halinde olduğu karmaşık biyomekanik sistemlerin incelenmesini sağlar. Eklem biyomekaniği alanında en yoğun çalışılan konulardan biri, diz eklemi örneğinde görülebileceği gibi, kemiklerin yanı sıra kıkırdak dokuları, menisküs, bağlar (ligamentler) ve çevre dokuların birlikte değerlendirilmesidir. Diz eklemi vücuttaki en karmaşık eklemlerden biridir; uyluk (*femur*), kaval (*tibia*) ve diz kapağı (*patella*) kemiklerinin yanı sıra bu kemikler arasındaki yastıkçık görevini gören menisküsler, eklem yüzlerini saran kıkırdak tabakaları ve dört ana bağ (ön ve arka çapraz bağlar ile iç ve dış yan bağlar) dahil birçok bileşenden oluşur [9]. Bu karmaşık anatomi, deneysel olarak tüm bileşenlerin aynı anda davranışını incelemeyi zorlaştırırken, SEA sayesinde tüm bu yapılar entegre bir modelde analiz edilebilmektedir. Örneğin, hasarlı bir menisküsün çıkarılması

(menisektomi) veya yırtık bir bağın tamiri sonrasında diz eklemінде yük dağılımının ve hareket açıklığının (*range of motion*) nasıl etkilendiğı, deneysel olarak kadavralar üzerinde sınırlı biçimde incelenebilirken, bilgisayar modelinde aynı dizin ameliyat öncesi ve sonrası durumunu karşılaştırmak mümkün olmaktadır [10]. SEA sonuçları, menisküs yırtığının eklemdeki temas basıncını nasıl artırdığını veya belirli bir tamir tekniğinin bu basıncı ne kadar normale döndürdüğünü nicel olarak ortaya koyabilir. Nitekim son çalışmalar, diz menisküs yırtıkları ve ilgili cerrahi tekniklerin sonlu elemanlar ile incelenmesinin, klinikte cerrahi stratejilerin geliştirilmesine ışık tuttuğunu bildirmektedir [10]. Genel olarak, eklem SEA modelleri sayesinde eklem yüzeylerindeki stres birikimleri, bağların yük paylaşımı, kıkırdak deformasyonları gibi kritik veriler elde edilebilmekte; böylece osteoartrit gibi dejeneratif eklem hastalıklarının gelişimi veya protez uygulamalarının biyomekanik sonuçları öngörülelebilmektedir. Ayrıca, diz ve kalça protezlerinin tasarım aşamalarında hasta hareketleri simüle edilerek, protezin çevre kemik ve dokulara ilettiğı yükler analiz edilmekte ve optimal tasarım parametreleri belirlenmektedir.

Şekil 4. Diz eklemi modelinde tendonların (bağ dokuların) geometrik temsili: (a) ön görünüm, (b) yan görünüm



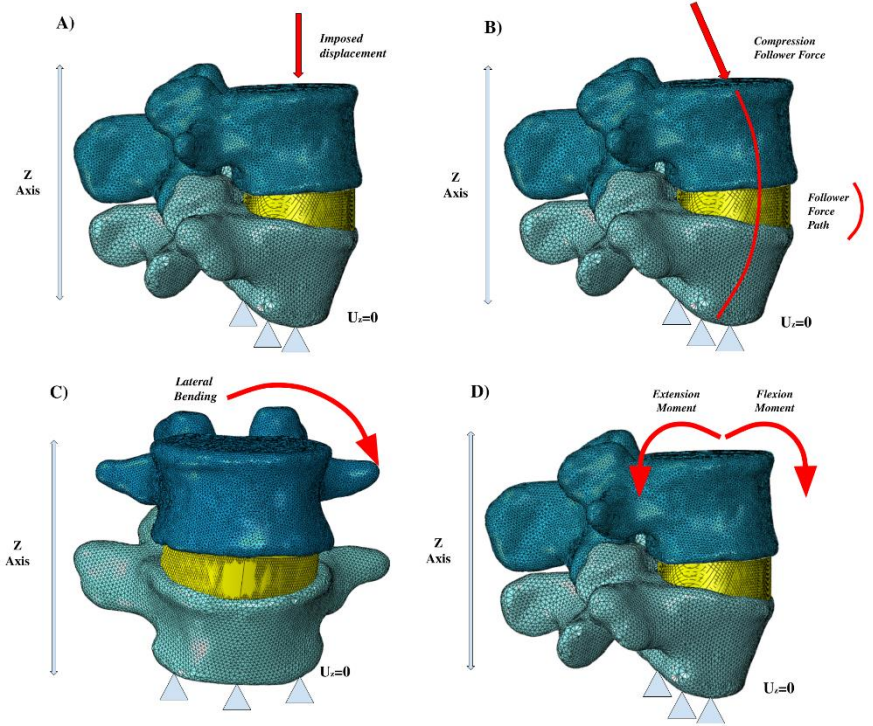
Kaynak: [11]

Omurga (spinal kolon), biyomekanik açıdan çok bileşenli ve kompleks bir yapı olduğundan, SEA uygulamalarının yoğunlaştığı bir diğer alandır. Bir omurganın güvenilir bir sonlu eleman modeli oluşturulabilmesi için omur kemikleri, intervertebral diskler, faset eklemleri ve bağlar gibi tüm ana anatomik bileşenlerin ayrı ayrı uygun biçimde modellenmesi gereklidir [12]. Örneğin bir lomber omurga (bel bölgesi) modeli, tipik olarak beş adet omur gövdesi ve bunların arasındaki diskleri içerir. Her bir omur, kortikal dış kabuk, içte süngerimsi kemik ve posterior elemanlar (faset eklemler ve çıkıntılar) olacak şekilde alt bileşenlere ayrılabilir. Diskler ise jel benzeri nukleus pulpozus merkezi ile onu saran lifli anulus fibrozus tabakasını ayrı malzeme modelleriyle temsil edecek şekilde modellenir [12]. Ayrıca omurlar arası hareketi sınırlandıran yedi ana bağ (ön ve arka longitudinal bağlar, interspinöz, supraspinöz, intertransvers bağlar, lig. flavum ve kapsüler bağlar [12]) modele gerilme-gerinim özellikleri tanımlanarak eklenir. Bütün bu bileşenlerin doğru biçimde bir araya getirilmesi, omurganın bütünsel davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebilmenin anahtarıdır.

Nitekim kapsamlı bir karşılaştırmalı çalışmada, farklı araştırma gruplarınca geliştirilmiş sekiz ayrı omurga modelinin benzer yükleme koşullarında tutarlı sonuçlar verdiği gösterilmiş ve bu başarı, tüm modellerin anatominin yukarıda sayılan bileşenlerini özenle içermesine dayandırılmıştır.

Omurga SEA modelleri hem normal fizyolojik yükleri hem de patolojik durumları analiz etmek için kullanılmaktadır. Örneğin ayakta durma, öne eğilme, dönme gibi hareketler sırasında omurganın belirli segmentlerine binen yükler ve bu yükler altında disklerin içerisindeki intradiskal basınç değerleri, sonlu elemanlar modeli ile hesaplanabilir. Yine aynı model, omurlar arası açılma miktarlarını (her bir segmentin hareket açıklığını) öngörerek omurganın fleksiyon, ekstansiyon gibi hareketlerdeki esneklik değerlerini verebilir [13]. Bu tip veriler, örneğin bel ağrısına yol açan disk dejenerasyonu durumunda veya omurga stabilitesini etkileyen bağ yaralanmalarında, omurganın mekanik dengesinin nasıl değiştiğini anlamaya yardımcı olur. Omurga cerrahisi alanında da SEA önemli katkılar sunmaktadır.

Şekil 5: Vertebra–disk sonlu eleman modelinde sınır koşulları ve yükleme senaryoları



Kaynak: [12]

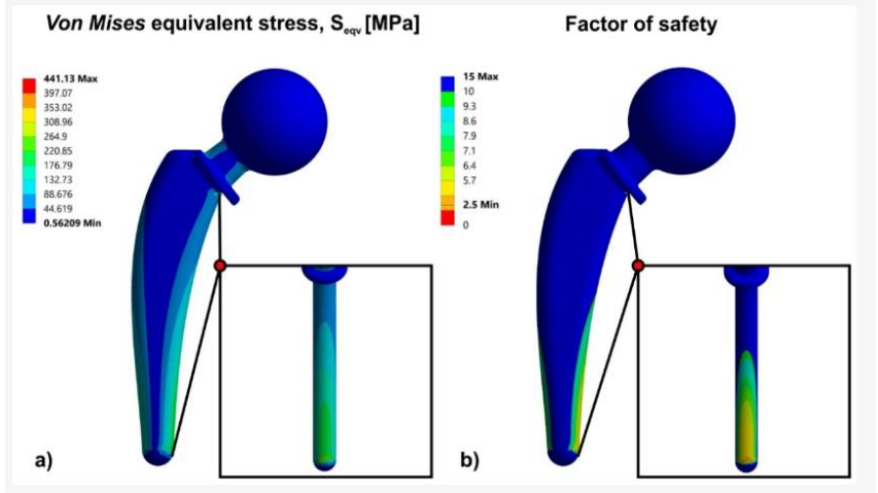
Skolyoz veya kifoz gibi omurga eğriliklerinin düzeltilmesi için uygulanan enstrümantasyonların (rod ve vida sistemleri) tasarımından, omurlar arasına konan *cage* adı verilen kafes implantların optimal biçimine kadar pek çok konuda sonlu elemanlar analizleri yapılmaktadır [14]. Örneğin, farklı bir intervertebral füzyon implantının (*cage*) altı-yedi yıllık literatür taramasını içeren güncel bir çalışmada, SEA kullanılarak bu implantların omurga biyomekaniğine etkilerinin sistematik şekilde incelendiği vurgulanmaktadır [14]. Bu simülasyonlar, bir implantın bitişik disklerdeki basınç dağılımını ya da vida-rod sistemlerinin omurların hareket açıklığını nasıl değiştirdiğini önceden görmeye olanak tanır. Omurga modelleri genellikle deneysel verilerle (ör. kadavra omurgalarda ölçülen intradiskal basınç veya hareket açıklığı verileriyle) doğrulanır ve bu sayede güvenilirlik kazanır [12]. Sonuç

olarak, eklem ve omurga SEA analizleri, çok bileşenli biyomekanik sistemlerin davranışını anlama ve bu sistemlere yönelik cerrahi/ortopedik müdahalelerin etkisini öngörme açısından son derece değerli bilgiler sağlamaktadır.

Ortopedik İmplantların SEA ile Tasarımı

Ortopedik implantlar (örneğin kalça ve diz protezleri, plaka-vida sistemleri, dental implantlar), biyomekanik prensipler göz önüne alınarak tasarlanan ve vücudun hasarlı yapılarını desteklemek veya değiştirmek için kullanılan kritik malzemelerdir. Bu implantların tasarım ve geliştirme süreçlerinde SEA yaygın ve vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir [15]. Özellikle yeni bir implant konsepti geliştirirken, prototip üretip fiziksel testler gerçekleştirmek hem maliyetli hem zaman alıcıdır; buna karşın sanal ortamda oluşturulan bir implant modelini ilgili anatomik yapıya entegre edip yükleyerek test etmek çok daha hızlı geri bildirim sağlar.

Şekil 6. Ortopedik implant SEA sonuçları: (a) Von Mises eşdeğer gerilme dağılımı, (b) güvenlik katsayısı dağılımı



Kaynak: [16]

Total kalça protezi tasarımını ele alırsak, bir kalça implantının (kalça eklemine yerleştirilen yapay *asetabulum* ve femur başı) farklı geometrilerinin ve malzemelerinin kemik üzerindeki etkileri SEA ile incelenebilir. Örneğin femur içine yerleştirilen protez sapının uzunluğu veya çapı değiştirilerek, kemiğin protez kaynaklı gerilme dağılımında nasıl değişimler olduğu hesaplanabilir. Amaç, protezin kemiğe ilettiği yükün doğal yük transferine yakın olması, böylece kemiğin fizyolojik uyarısını koruması ve uzun vadede zayıflamamasıdır. SEA sonuçları, eğer bir tasarım kemiğe binen yükü aşırı azaltıyor (*stress shielding*) ise o tasarımın kemikte rezorpsiyon (erime) riskini artırabileceğini göstererek tasarımcıyı uyarır. Benzer şekilde, eğer bir protez tasarımında belirli bir noktada gerilme yığılması görülüyorsa, oranın çatlak başlangıcına veya yorgunluk kırığına yol açabileceği anlaşılarak tasarım yenilenebilir. Bu şekilde SEA kullanılarak yorgunluk (*fatigue*) analizleri, aşınma (*wear*) tahminleri ve kırık oluşumu simülasyonları yapılarak implantların uzun dönem performansı değerlendirilir [15]. Günümüzde kalça ve diz protezlerinin yanı sıra omurga için pedikül vidaları ve plak sistemleri, omuz ve dirsek eklemi protezleri, kraniyofasiyal implantlar gibi birçok alanda SEA tabanlı tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmektedir [15].

Ortopedik implant tasarımında SEA kullanımının bir diğer avantajı da hasta spesifik uyarlamalara imkân tanınmasıdır. Örneğin, standart bir diz protezi, farklı kemik boyutlarına sahip hastalara farklı boyutlarda sunulur ancak kemik geometrisindeki kişisel farklılıklar tam olarak hesaba katılamayabilir. Son yıllarda, bireyin BT verisinden elde edilen kemik modeline göre özel üretim (3D baskı gibi) implantlar gündeme gelmiştir. Bu hasta-özel implantların tasarımında, her hasta için ayrı bir SEA yapılarak implantın oturma şekli, yük paylaşımı optimize edilebilir. Hatta bazı araştırmalarda, tümör rezeksiyonu gibi durumlar sonrası kişiye özel

implant tasarlamak için SEA destekli tasarım-üretim süreçleri gösterilmiştir.

Özetle, ortopedik implantların tasarımında SEA hem malzeme seçimi hem de geometrik optimizasyon için kritik bir rol oynar. Malzeme tarafında, örneğin titanyum, kobalt-krom veya paslanmaz çelik gibi malzemelerin farklı elastisite ve dayanım özellikleri modele konarak hangi malzemenin istenen performansı verdiği incelenebilir. Geometrik olarak ise implantın kalınlık, uzunluk, yüzey pürüzlülüğü gibi parametreleri değiştirilerek vücutla etkileşimi değerlendirilebilir. SEA sonuçları genellikle deneysel testlerle (ör. maket kemikler üzerinde mekanik testler, veya tribolojik aşınma testleri) desteklenip doğrulanır ve daha sonra klinik kullanıma girecek tasarımlar için düzenleyici onay süreçlerinde de bu veriler kullanılır. Tüm bu süreç, SEA'nın sağladığı hızlı geri besleme ve ayrıntılı iç görü sayesinde önemli ölçüde hızlanmakta ve iyileşmektedir. Nitekim literatürde SEA'nın ortopedik implant tasarımına yaptığı katkılar sayesinde, günümüz implantlarının çok daha güvenilir ve uzun ömürlü hale geldiği, komplikasyon oranlarının azaldığı vurgulanmaktadır [17].

Kardiyovasküler Biyomekanik

Kardiyovasküler sistem; kalp, kan damarları ve kanın birbiriyle olan karmaşık ve dinamik etkileşimini içeren, biyomekanik açıdan son derece zorlayıcı bir sistemdir. Bu sistemin mekanik davranışı, pulsatil kan akışı, büyük deformasyonlar, nonlinear malzeme özellikleri ve akış-yapı etkileşimleri (*Fluid-Structure Interaction, FSI*) nedeniyle klasik mühendislik problemlerine kıyasla daha karmaşık bir yapı sergiler [18]. SEA bu zorluklara rağmen kardiyovasküler sistemin mekanik davranışının anlaşılmasında, hastalık mekanizmalarının aydınlatılmasında ve klinik uygulamaların desteklenmesinde etkin biçimde kullanılmaktadır [19].

Aort biyomekaniği, kardiyovasküler SEA uygulamalarının en önemli alanlarından biridir. Aort, vücudun en büyük arteriyel damarı olup yüksek intravasküler basınca ve zamana bağlı pulsatil akış koşullarına maruz kalır [18]. Aort anevrizması ve aort diseksiyonu gibi patolojiler, duvar yapısındaki mekanik zayıflamalarla doğrudan ilişkilidir ve yaşamı tehdit eden sonuçlara yol açabilir. SEA kullanılarak aort duvarında oluşan gerilme ve gerinim dağılımları hesaplanabilmekte, bu sayede rüptür riski daha güvenilir biçimde değerlendirilebilmektedir [20]. Hasta-spesifik geometriler ve malzeme özellikleri kullanılarak oluşturulan modeller, bireysel risk analizlerine olanak tanımakta ve klinik karar süreçlerini desteklemektedir. Ayrıca *Thoracic Endovascular Aortic Repair (TEVAR)* gibi endovasküler girişimler öncesinde, farklı stent-graft tasarımlarının aort duvarı üzerindeki mekanik etkileri SEA ile karşılaştırılarak optimal tedavi stratejileri belirlenebilmektedir. Son yıllarda izogeometrik analiz yaklaşımları, NURBS tabanlı geometrik temsil sayesinde aortun karmaşık anatomisinin yüksek doğrulukla modellenmesini mümkün kılmakta ve sayısal çözüm kalitesini artırmaktadır.

Kalp kapakları, kanın kalp içinde tek yönlü akışını sağlayan kritik yapılardır ve kapak fonksiyon bozuklukları genellikle biyoprostetik veya mekanik kapak replasmanı ile tedavi edilir. Kapak yaprakçıkları, kan akışı ile sürekli etkileşim hâlinde olduğundan, bu yapıların biyomekaniği yalnızca yapısal analizlerle yeterince temsil edilemez. Bu nedenle kalp kapaklarının davranışı, FSI simülasyonları aracılığıyla modellenmektedir [21]. FSI tabanlı SEA çalışmaları, kapak yaprakçıklarının kinematiklarını, transvalvüler basınç gradyanlarını ve regürjitasyon miktarını öngörebilmekte hem doğal hem de yapay kapakların hemodinamik performansını değerlendirmede önemli bilgiler sunmaktadır. Özellikle biyoprostetik kapak tasarımında, mekanik dayanıklılık ile optimal hemodinamik performans arasında denge sağlanması gerekmektedir.

SEA, farklı kapak tasarımlarının sanal ortamda test edilmesine ve uzun dönem performanslarının karşılaştırılmasına olanak tanıyarak tasarım sürecini önemli ölçüde desteklemektedir.

Miyokard biyomekaniği, kalp kasının aktif kasılma ve pasif diyastolik dolum özelliklerini birlikte içeren karmaşık bir problem alanıdır. Miyokardın mekanik davranışının doğru şekilde modellenmesi; kalp yetmezliği, miyokard enfarktüsü ve kardiyomiyopati gibi kardiyak hastalıkların mekanik temellerinin anlaşılmasında kritik rol oynamaktadır [22]. Güncel SEA çalışmalarında hasta-spesifik parametrisasyon yaklaşımları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bayesian optimizasyon ve ters problem yöntemleri kullanılarak pasif miyokard malzeme parametreleri hasta bazında belirlenebilmekte ve bu parametreler klinik karar destek sistemlerine entegre edilebilmektedir. Bu süreçte MRI ve ekokardiyografi gibi medikal görüntüleme verileri temel girdi olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra kalbin elektriksel aktivitesi ile mekanik kasılması arasındaki güçlü ilişki, elektro-mekanik coupling içeren çok-fizikli modeller ile temsil edilmektedir. Bu tür modeller, aritmilerin mekanik etkilerinin değerlendirilmesi ve tedavi stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Klinik ve Araştırma Uygulamaları

Sonlu elemanlar analizi, akademik araştırmalardan klinik uygulamalara uzanan geniş bir spektrumda kullanılmaktadır. Araştırma ortamında, biyomekanik hipotezlerin test edilmesi, deneysel olarak ölçülmesi zor süreçlerin simüle edilmesi ve yeni cihaz veya tedavi yöntemlerinin ön değerlendirmesi için SEA sıkça başvurulan bir yöntemdir. Örneğin, yeni geliştirilen bir çapraz bağ onarım tekniğinin diz eklemine biyomekanik stabiliteyi ne ölçüde geri kazandırdığını araştırmak isteyen bir bilim insanı, kadavrada deney yapmadan önce SEA ile çeşitli senaryoları sınayabilir. Benzer şekilde, omurga cerrahisinde kullanılan enstrümantasyonların farklı

konfigürasyonlarının omurga hareketine etkisi veya belirli bir hasta pozisyonunda basınç dağılımının nasıl değiştiği SEA ile öngörülebilir. Bu tür araştırmalar, klasik deneysel çalışmalara kıyasla çok daha fazla senaryoyu hızlıca değerlendirme imkânı sunar ve en umut vadeden yaklaşımların belirlenmesine yardımcı olur.

Klinik düzeyde, SEA henüz rutin bir araç haline gelmemiş olsa da belirli alanlarda hastaya özel planlama ve karar destek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle ortopedik onkoloji gibi kompleks vakalarda, ameliyat öncesi hastanın görüntülerinden oluşturulan bir model üzerinde cerrahi planlamanın yapılması ve sonrasındaki implantın mekaniğinin test edilmesi mümkün olabilmektedir [23]. Örneğin, bir kemik tümörü çıkarıldıktan sonra oluşacak boşluğun nasıl doldurulacağı (greft veya protez ile) ve bu yapının kemiğe aktaracağı yüklerin dağılımı, ameliyat öncesi SEA ile analiz edilerek cerrahi strateji şekillendirilebilir. Bu sayede cerrahlar, operasyon sırasında karşılaştıkları durumları önceden görerek daha hazırlıklı olabilir ve hastaya en uygun çözümü seçebilirler. Benzer şekilde, travma cerrahisinde kırık tespiti yaparken farklı plak konfigürasyonlarının kemik stabilitesine etkisi SEA ile değerlendirilip en iyi seçenek belirlenebilir.

Klinik uygulamalarda SEA kullanımının en somut örneklerinden biri, implantların önceden sanal testleridir. Özellikle total eklem protezleri, klinik kullanıma girmeden önce laboratuvar ortamında mekanik testlere tabi tutulur. SEA, bu testlerin sanal ortamda simülasyonunu yaparak olası zayıf noktaları önceden ortaya koyar. Örneğin, bir diz protezinin tasarımı, sanal ortamda milyonlarca adım simülasyonu ile aşınma açısından incelenebilir ve görülen aşınma miktarına göre malzeme veya tasarım değişiklikleri yapılabilir. Bu yaklaşımla, prototip üretimi ve test sayısı azalacak şekilde optimizasyon yapılır.

Sonlu elemanlar analizinin klinik faydaya dönüşmesi açısından önemli bir adım da çok disiplinli iş birlikleridir.

Mühendisler, hekimler ve biyologlar bir arada çalışarak, hastalardan elde edilen gerçek verileri (örneğin yürüyüş analiz verileri, basınç ölçümleri, tork değerleri) SEA modellerine entegre etmekte ve bu modelleri gerçek hasta sonuçlarıyla karşılaştırmaktadır. Bu sayede modellerin doğruluğu artmakta ve güvenilir öngörülerde bulunmaları sağlanmaktadır. Nitekim bir çalışmada, diz menisküs yırtıklarının SEA ile modellenmesi sonucunda elde edilen bulguların, klinik gözlemlerle büyük ölçüde uyduğu ve bu sayede cerrahi tekniklerin geliştirilmesine katkı sunabileceği belirtilmiştir [11].

Gelecekte, SEA'nın klinikte kullanımının artması beklenmektedir. Özellikle hastaya özel dijital ikiz oluşturma konsepti, yani bir hastanın sanal bir kopyasını oluşturup bu üzerinde çeşitli tedavi senaryolarının test edilmesi, giderek gerçeğe yaklaşmaktadır. Bu kapsamda, cerrahi planlamada artırılmış gerçeklik (AR) ve karışık gerçeklik (MR) teknolojileriyle SEA sonuçlarının cerraha anlık olarak sunulması gibi yenilikçi uygulamalar ufukta görünmektedir [24]. Örneğin, bir omurga ameliyatı öncesinde cerrah, MR gözlükleri aracılığıyla hastanın omurgasının SEA simülasyonundan elde edilen stabilite bilgilerini 3 boyutlu olarak görebilir ve vida yerleşim açılarını buna göre hassasça planlayabilir. Tüm bu gelişmeler, SEA' nın laboratuvarlardan klinik karar destek sistemlerine taşınması yönündeki potansiyelini ortaya koymaktadır.

4. Biyomekanikte Sonlu Elemanlar Analizi Yazılımları

Biyomekanik SEA uygulamalarında, problemin doğasına ve araştırma hedeflerine bağlı olarak hem ticari hem de açık kaynaklı yazılımlar yaygın biçimde kullanılmaktadır. Biyomekanik sistemlerin çok-fizikli doğası, büyük deformasyonlar, temas problemleri ve hasta-spesifik modelleme gereksinimleri, kullanılan yazılımların yeteneklerini kritik hâle getirmektedir. Bu nedenle her

SEA yazılımının güçlü yönleri, sınırlamaları ve tipik uygulama alanları dikkatle değerlendirilmelidir.

Yaygın Kullanılan SEA Yazılımları

ANSYS, biyomekanik SEA alanında en yaygın kullanılan ticari yazılımlardan biridir. Gelişmiş çoklu fizik (*multiphysics*) yetenekleri sayesinde yapısal analizlerin yanı sıra akışkanlar mekaniği, termal analizler ve FSI problemleri tek bir platformda çözülebilmektedir. Güçlü ön işleme ve son işleme (*pre/post-processing*) araçları, karmaşık anatomik geometrilerin modellenmesini ve sonuçların ayrıntılı görselleştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca geniş malzeme kütüphanesi, biyolojik dokuların ve implant malzemelerinin modellenmesine olanak tanır. Bununla birlikte, ANSYS'in yüksek lisans maliyeti ve kapsamlı özellikleri nedeniyle nispeten dik bir öğrenme eğrisi bulunması, özellikle akademik başlangıç seviyesindeki kullanıcılar için sınırlayıcı olabilmektedir. ANSYS, ortopedik implant tasarımı, kardiyovasküler FSI analizleri ve genel biyomekanik problemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir (ANSYS Inc., 2023).

Abaqus, biyomekanik toplulukta güçlü ve güvenilir çözücülerıyla öne çıkan bir diğer endüstri standardı yazılımdır. Özellikle doğrulanmış implicit ve explicit çözücülerini sayesinde büyük deformasyonlar, karmaşık temas problemleri ve nonlinear malzeme davranışları yüksek doğrulukla çözülebilmektedir. Abaqus, kemik mekaniği, implant-kemik etkileşimi ve yumuşak doku temas analizleri gibi problemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte yazılımın yüksek maliyeti ve bazı ters problem uygulamalarında hesaplama verimliliğinin sınırlı kalabilmesi, dezavantajları arasında yer almaktadır (Dassault Systèmes, 2022).

FEBio (Finite Elements for Biomechanics), biyomekanik uygulamalar için özel olarak geliştirilmiş açık kaynaklı bir SEA yazılımıdır. Özellikle yumuşak doku mekaniği, eklem biyomekaniği

ve kıkırdak analizi gibi alanlarda güçlüdür. Biphasic, multiphasic ve FSI yetenekleri sayesinde biyolojik dokuların sıvı-katı etkileşimleri ayrıntılı biçimde modellenabilmektedir. Geniş biyomekanik malzeme modelleri (hiperelastik, viskoelastik, aktif kas modelleri vb.) FEBio'nun en önemli avantajlarından. Açık kaynak ve ücretsiz olması, akademik araştırmalar için büyük bir avantaj sağlarken, ticari yazılımlar kadar geniş kullanıcı desteğinin bulunmaması ve bazı yüksek enerjili temas problemlerinde parametre ayarı gerektirmesi sınırlayıcı faktörler olarak değerlendirilmektedir [25].

COMSOL Multiphysics, özellikle çok-fizikli problemler için tasarlanmış, kullanıcı dostu bir arayüze sahip ticari bir SEA yazılımıdır. Elektrofizyoloji-mekanik coupling, termal etkiler ve akışkan-yapı etkileşimi gibi farklı fiziksel alanların tek bir modelde entegre edilmesine olanak tanır. Parametrik çalışma ve optimizasyon araçları, biyomekanik sistemlerin davranışını farklı senaryolar altında incelemeyi kolaylaştırmaktadır. Ancak COMSOL'un lisans maliyetinin yüksek olması ve çok büyük ölçekli problemlerde performans sınırlamaları göstermesi, dezavantajları arasında yer almaktadır. Buna rağmen, özellikle elektro-mekanik coupling içeren kardiyak ve nöromekanik uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir (COMSOL AB, 2023).

Yazılım Seçim Kriterleri

Biyomekanik SEA uygulamaları için uygun yazılım seçimi, analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Öncelikle ele alınan problemin tipi büyük önem taşır; çok-fizikli problemler, büyük deformasyonlar veya karmaşık temas koşulları içeren analizler, gelişmiş çözücülere sahip yazılımlar gerektirir. Hesaplama kaynakları da seçim sürecinde belirleyicidir; yüksek performanslı hesaplama (HPC), GPU desteği ve paralel işlem kabiliyetleri, büyük ölçekli hasta-spesifik modeller için kritik öneme sahiptir. Maliyet ve lisanslama politikaları, akademik ve

endüstriyel kullanım açısından farklılık gösterirken, kullanıcı deneyimi, öğrenme eğrisi ve topluluk desteği de pratik kullanım açısından dikkate alınmalıdır. Son olarak, özellikle klinik ve endüstriyel uygulamalarda, yazılımın deneysel verilerle doğrulanmış çözümler sunabilmesi ve düzenleyici onay süreçlerini desteklemesi önemli bir kriterdir.

Tablo 1 Biyomekanik SEA Yazılımlarının Karşılaştırılması

Yazılım	Lisans	Güçlü Yönler	Sınırlamalar	Tipik Biyomekanik Uygulamalar
Ansys	Ticari	Multiphysics, güçlü pre/post, endüstri standardı	Yüksek maliyet, öğrenme eğrisi	Ortopedik implantlar, kardiyovasküler FSI
Abaqus	Ticari	Doğrulanmış çözücüler, temas ve büyük deformasyon	Yüksek maliyet, ters problemlerde sınırlamalar	Kemik mekanik, implant tasarımı
FEBio	Açık Kaynak	Biyomekanik özel, biphasic/FSI modeller	Sınırlı ticari destek	Yumuşak doku, eklem, kıkırdak
COMSOL	Ticari	Multiphysics, parametrik analiz	Büyük modellerde performans	Elektro-mekanik coupling, kardiyak modeller

Yeni Nesil SEA Araçları

Son yıllarda, yapay zeka entegrasyonu ve GPU hızlandırma teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte yeni nesil SEA araçları ortaya çıkmıştır. PyTorch-SEA gibi framework'ler, otomatik türev alma ve derin sinir ağları (DNN) ile entegrasyon sayesinde ters problem çözümü ve parametre optimizasyonu alanında yeni olanaklar

sunmaktadır. CARDIAX, JAX tabanlı yapısıyla yüksek hızlı kardiyak simülasyonlar gerçekleştirmeyi hedefleyen modern bir araç olarak öne çıkmaktadır. PolyFEM ise otomatik çarpışma tespiti ve inversiyon koruması gibi özellikleriyle karmaşık geometrilere daha kararlı ve güvenilir çözümler sunmaktadır. Bu yeni nesil araçlar, klasik SEA yöntemlerini tamamlayıcı nitelikte olup, özellikle gerçek zamanlı simülasyonlar ve hasta-spesifik dijital ikiz uygulamaları için önemli bir potansiyel taşımaktadır.

5. Karşılaşılan Zorluklar ve Gelecek Yönelimler

Biyomekanik SEA uygulamaları, büyük faydalar sağlamakla birlikte çeşitli zorlukları da beraberinde getirir. Model doğruluğu ve güvenilirliği bunların başında gelir. Biyolojik dokuların mekanik özellikleri karmaşıktır ve bireyden bireye değişkenlik gösterir. Bu nedenle, doğru sonuçlar elde edebilmek için modelde kullanılan malzeme parametrelerinin ve sınır koşullarının gerçek durumu temsil etmesi gerekir. Ancak vücut içi dokuların mekanik özelliklerini ölçmek her zaman mümkün olmadığından, literatürdeki ortalama değerler veya hayvan modelinden elde edilen veriler kullanılır. Özellikle yumuşak doku modellemesinde bu bir kısıt oluşturur; örneğin deri dokusunun mekanik davranışı kişiden kişiye değişir ve mevcut SEA çalışmalarında genellikle standart bir deri malzeme modeli kullanılır. Yapılan bir derlemede, deri mekanik modellemesinin mevcut SEA uygulamalarındaki en büyük sınırlamalardan biri olduğu belirtilmiş ve gelecekte hastaya özel deri özelliklerini invaziv olmayan yöntemlerle ölçmeye odaklanılması önerilmiştir [32]. Benzer şekilde, kas, tendon, bağ gibi dokuların da bireysel farklılıklarının modellere yansıtılabilmesi arzu edilir.

Bir diğer zorluk, hesaplama maliyetleridir. Gelişen bilgisayar teknolojilerine rağmen ayrıntılı insan vücudu modellerinin (örneğin tüm alt ekstremité kasları ve kemikleri içeren bir model) çözümü yüksek işlem gücü ve süre gerektirebilir. Karmaşık malzeme

modelleri ve çok sayıda eleman içeren ağlar, çözüm zamanlarını uzatır. Bu da özellikle klinik uygulamalarda gerçek zamanlıya yakın sonuç almayı zorlaştırır. Ancak, sayısal yöntemlerdeki gelişmeler (ör. model indirgeme teknikleri, paralel hesaplama) ve donanım kapasitesinin artışıyla bu engel günden güne azalmaktadır.

Model doğrulama ve geçerlilik de önemli bir meseledir. Bir SEA modelinin sonuçlarının güvenilir kabul edilebilmesi için deneysel verilerle kıyaslanarak doğrulanması gerekir. Biyomekanikte bazen bu veriler elde edilemeyebilir (örneğin canlı bir insanın omurgasındaki her bir diskin iç basıncını ölçmek pratik değildir). Bu durumda, dolaylı doğrulama yöntemleri kullanılır veya hayvan modellere başvurulur. Yine de her yeni modelleme çalışması sonuçlarına belirli bir güven aralığıyla yaklaşmak ve klinik uygulamaya sokmadan önce mümkün olan en kapsamlı şekilde geçerliliğini sınamak zorundadır. Nitekim bir incelemede, başarılı bir sonlu eleman modelinin oluşturulması için birden fazla faktörün dikkatle ele alınması ve sonuçların mutlaka titiz bir klinik/deneysel doğrulamadan geçirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [10].

Gelecek yönelimlere baktığımızda, SEA uygulamalarının daha entegratif ve akıllı sistemlerle birleşeceğini öngörebiliriz. Güncel çalışmalar, çok modlu veri entegrasyonunun önemine işaret etmektedir; örneğin tıbbi görüntüleme, hareket yakalama ve biyomekanik ölçüm verilerinin hepsini bir araya getirip SEA modellerini beslemek, model doğruluğunu ciddi oranda artırabilir [8]. Ayrıca, mekanik modellerin yanına biyofiziksel fenomenlerin entegre edilmesi gündemdedir. Bu kapsamda, kemik remodelingi, yara iyileşmesi, doku büyümesi gibi süreçlerin mekanik simülasyonlarla eşzamanlı modellenmesi için çalışmalar sürmektedir [8]. Model tekrarlanabilirliği ve standardizasyonu da bir diğer önemli noktadır; farklı araştırmacıların geliştirdiği SEA modellerinin karşılaştırılabilir olması, sonuçların genellenmesi açısından gereklidir [8]. Bu nedenle, açık model paylaşım

platformları ve standartlaştırılmış protokoller üzerinde durulmaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, artırılmış gerçeklik (AR) ve yapay zeka (AI) gibi alanlar SEA ile birleşerek yepyeni ufuklar açmaktadır. AR/MR uygulamalarının cerrahi planlamaya entegre edilmesi sayesinde cerrahlar, SEA sonuçlarını operasyon sırasında görsel olarak kullanabileceklerdir [26]. Örneğin, bir omurga vidalama operasyonunda, vidanın optimal uzunluğu ve açısı SEA ile hesaplanıp cerrahın görüş alanına yansıtılabilir. Yapay zeka ise özellikle tasarım optimizasyonu ve hızlı tahmin modelleri konusunda devreye girmektedir [26]. Büyük SEA veri setleri kullanılarak eğitilen yapay sinir ağları, belirli standart durumlar için anında (real-time) sonuç tahmini yapabilir; böylece anlık karar gereken durumlarda mühendislik muhakemesi için destek sağlayabilir. Hatta AI, deneysel verilerden malzeme modeli parametrelerini otomatik kalibre etmede veya hasta verilerine dayanarak en olası yaralanma mekanizmasını önermede de kullanılabilir.

Sonuç olarak, SEA'nın biyomekanik alanında geleceği son derece parlaktır. Mevcut zorluklar, disiplinler arası işbirliği ve teknolojik yeniliklerle aşılmaya çalışılırken, yöntem her geçen gün daha da olgunlaşmaktadır. Gelecekte dijital insan ikizleri, kişiye özel simülasyonlar ve akıllı karar destek sistemleriyle SEA, klinik pratiğin doğal bir parçası haline gelebilir. Bu süreçte, biyomekanik topluluğu bir yandan modelleme tekniklerini geliştirirken bir yandan da bu modellerin genel sağlık bakımına entegre edilebilmesi için gereken kanıtları ve güvenilirlik düzeyini ortaya koymaya çalışacaktır.

6. Sonuç

Biyomekanikte sonlu elemanlar analizi, kemiklerden yumuşak dokulara, eklemlerden implantlara uzanan geniş bir

yelpazede, canlı yapıların mekaniğini anlamamıza ve iyileştirmemize yardımcı olan güçlü bir araçtır. Bu bölümde ele alınan örnekler, SEA'nın akademik araştırmalarda hücresel düzeydeki fenomenlerden bütün organizma seviyesindeki hareketlere kadar çok farklı ölçeklerde uygulanabildiğini göstermektedir. SEA sayesinde deneysel yöntemlerle elde edilmesi zor veya imkânsız olan içsel gerilme ve deformasyon bilgilerine ulaşarak doku ve organ davranışlarını daha iyi kavırıyoruz. Ortopedik implantların tasarım süreçleri SEA ile hızlanmış, daha güvenli ve uzun ömürlü implantlar geliştirilebilmiştir. Benzer şekilde, yaralanma mekanizmalarının aydınlatılması veya cerrahi tekniklerin değerlendirilmesi konularında simülasyonlar yol gösterici olmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin önemi, mühendislikteki kökenlerinden bugünün biyomedikal dünyasına uzanan yolda giderek artmıştır. 1970'lerde biyomekaniğe girişiyle henüz sınırlı düzeyde bilgiler sunabilen bu yöntem, bilgisayar teknolojilerindeki sıçramalar ve malzeme bilimi ile hesaplama yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde bugün en güvenilir simülasyon araçlarından biri kabul edilmektedir [15]. Gelecekte de SEA'nın, ortopedik implant tasarımı ve kompleks insan vücudu sistemlerinin anlaşılmasında çok önemli katkılar sunmaya devam edeceği öngörülmektedir [15]. Bu ilerlemeler ışığında, mühendislik ile tıp arasındaki bağlar daha da güçlenecek; sanal ortamda elde edilen öngörüler, gerçek hayatta daha iyi tedaviler ve sonuçlar olarak karşımıza çıkacaktır. Sonuç olarak, biyomekanikte sonlu elemanlar analizi hem mevcut bilgi birikimimizi derinleştiren hem de yenilikçi çözümlerin önünü açan vazgeçilmez bir araç olarak konumunu sağlamlaştırmıştır.

KAYNAKLAR

1. S. K. Parashar and J. K. Sharma, **2016**. A review on application of finite element modelling in bone biomechanics. *Perspectives in Science*, 8, pp. 696–698.
2. J. Marcé-Nogué, **2020**. *Mandibular biomechanics as a key factor to understand diet in mammals*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
3. L. Wang, X. You, L. Zhang, C. Zhang and W. Zou, **2022**. Mechanical regulation of bone remodeling. *Bone Research*, 10(1), p. 16.
4. R. Huiskes and E. Y. S. Chao, **1983**. A survey of finite element analysis in orthopedic biomechanics: The first decade. *Journal of Biomechanics*, 16(6), pp. 385–409.
5. G. S. Lewis, D. Mischler, H. Wee, J. S. Reid and P. Varga, **2021**. Finite Element Analysis of Fracture Fixation. *Current Osteoporosis Reports*, 19(4), pp. 403–416.
6. S. Saha and A. Roychowdhury, **2009**. Application of the finite element method in orthopedic implant design. *Journal of Long-Term Effects of Medical Implants*, 19(1), pp. 55–82.
7. M. Damsgaard, J. Rasmussen, S. T. Christensen, E. Surma and M. de Zee, **2006**. Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(8), pp. 1100–1111.
8. T. T. Dao and M.-C. H. B. Tho, **2018**. A Systematic Review of Continuum Modeling of Skeletal Muscles: Current Trends, Limitations, and Recommendations. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2018(1), p. 7631818.
9. M. Yan, T. Liang, H. Zhao, Y. Bi, T. Wang, T. Yu and Y. Zhang, **2024**. Model Properties and Clinical Application in the Finite Element Analysis of Knee Joint: A Review. *Orthopaedic Surgery*, 16(2), pp. 289–302.
10. C. Yu, X. Duan, Y. Gou, K. Liu, W. Zhao, X. Gao, L. Wang, J. Liu, J. Xu, J. Zeng, D. Chen, G. Xing and W. Xu, **2025**. A review

of finite element modeling and surgical simulation of meniscal tear in knee joint: progress and challenges. *Frontiers in Medicine*, 12, p. 1661943.

11. C. Yu, X. Duan, Y. Gou, K. Liu, W. Zhao, X. Gao, L. Wang, J. Liu, J. Xu, J. Zeng, D. Chen, G. Xing and W. Xu, **2025**. A review of finite element modeling and surgical simulation of meniscal tear in knee joint: progress and challenges. *Frontiers in Medicine*, 12.
12. V. Sciortino, S. Pasta, T. Ingrassia and D. Cerniglia, **2023**. On the Finite Element Modeling of the Lumbar Spine: A Schematic Review. *Applied Sciences*, 13(2), p. 958.
13. H.-W. Wei, S.-M. Chuang and C.-S. Chen, **2021**. Biomechanical Evaluation of the Lumbar Spine by Using a New Interspinous Process Device: A Finite Element Analysis. *Applied Sciences*, 11(21), p. 10486.
14. R. Wang and Z. Wu, **2023**. Recent advancement in finite element analysis of spinal interbody cages: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, p. 1041973.
15. S. Saha and A. Roychowdhury, **2009**. Application of the finite element method in orthopedic implant design. *Journal of Long-Term Effects of Medical Implants*, 19(1), pp. 55–82.
16. N. Kladovasilakis, K. Tsongas and D. Tzetzis, **2020**. Finite Element Analysis of Orthopedic Hip Implant with Functionally Graded Bioinspired Lattice Structures. *Biomimetics*, 5(3), p. 44.
17. M. M. Soliman, M. E. H. Chowdhury, M. T. Islam, F. Musharavati, M. Nabil, M. Hafizh, A. Khandakar, S. Mahmud, E. Z. Nezhad, M. N. I. Shuzan and F. F. Abir, **2022**. A Review of Biomaterials and Associated Performance Metrics Analysis in Pre-Clinical Finite Element Model and in Implementation Stages for Total Hip Implant System. *Polymers*, 14(20), p. 4308.
18. G. A. Holzapfel and R. W. Ogden, editors, **2003**. *Biomechanics of Soft Tissue in Cardiovascular Systems*. Springer.

19. C. A. Taylor, T. A. Fonte and J. K. Min, **2013**. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive quantification of fractional flow reserve: scientific basis. *Journal of the American College of Cardiology*, 61(22), pp. 2233–2241.
20. M. F. Fillinger, M. L. Raghavan, S. P. Marra, J. L. Cronenwett and F. E. Kennedy, **2002**. In vivo analysis of mechanical wall stress and abdominal aortic aneurysm rupture risk. *Journal of Vascular Surgery*, 36(3), pp. 589–597.
21. C. S. Peskin and D. M. McQueen, **1992**. Cardiac fluid dynamics. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 20(5–6), pp. 451–459.
22. M. Pesce, G. N. Duda, G. Forte, H. Girao, A. Raya, P. Roca-Cusachs, J. P. G. Sluijter, C. Tschöpe and S. Van Linthout, **2023**. Cardiac fibroblasts and mechanosensation in heart development, health and disease. *Nature Reviews Cardiology*, 20(5), pp. 309–324.
23. Z. Xu, Y. Li, S. Tian, X. Xu, H. Zhou and M. Yang, **2025**. Preliminary exploration of finite element biomechanical preoperative planning for complex tibial plateau fractures. *Scientific Reports*, 15(1), p. 15913.
24. G. Yang, H. Shen, Y. Jang and X. Cheng, **2025**. Finite element analysis-assisted surgical planning and evaluation of flap design in hand surgery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, p. 1611993.
25. S. A. Maas, B. J. Ellis, G. A. Ateshian and J. A. Weiss, **2012**. FEBio: Finite Elements for Biomechanics. *Journal of Biomechanical Engineering*, 134(011005).
26. G. Yang, H. Shen, Y. Jang and X. Cheng, **2025**. Finite element analysis-assisted surgical planning and evaluation of flap design in hand surgery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, p. 1611993.

BÖLÜM 13

BAKIR PERVANELİ İNSANSIZ HAVA ARACININ SST k- ω TÜRBÜLANS MODELİNDE CFD ANALİZİ: HİPOTETİK BİR UYGULAMA

MEHMET AKİF KARTAL¹

Giriş

İnsansız hava araçları alanında pervane tasarımı, yıllardır hafiflik ve dayanıklılık arasında ince bir denge kurma çabasıdır. Pratikte kullanılan pervaneler genellikle polimer bazlı ya da karbon takviyeli malzemelerden seçilir; çünkü her fazla gram uçuş süresini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda bakır metalinin pervane olarak düşünülmesi ilk bakışta alışılmadık gelebilmektedir. Bakır ağırdır, ısıtır ve maliyetlidir; ancak mükemmel termal iletkenliği ve mekanik sertliği bazı aerodinamik artıları ve eksileri de beraberinde getirebilmektedir [1-6].

Bu çalışmada racing drone pervane geometrisi bakır özellikleriyle donatılmış ve SST k- ω türbülans modeli altında CFD analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, metal pervanelerin günlük kullanımda ne kadar kendine yer bulacağını anlamamıza

¹ Dr. Öğretim Görevlisi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, 10200 Bandırma, Balıkesir/Türkiye, ORCID: 0000-0002-9156-8907

yardımcı olurken, aynı zamanda rijit malzeme davranışlarının sınırlarını da aydınlatabilmektedir.

Yöntemin Temelleri

Hesaplama akışkanlar dinamiği çalışmaları artık pervane geliştirme sürecinin ayrılmaz bir parçası konumuna yükselebilmektedir. Fiziksel testlere geçmeden önce çok sayıda varyasyonu denemek, zaman ve maliyet açısından büyük avantaj sağlayabilmektedir. Bu çalışmada CFD analizi yapılarak, döne akışın modellenmesinde Multiple Reference Frame tekniği uygulanmıştır.

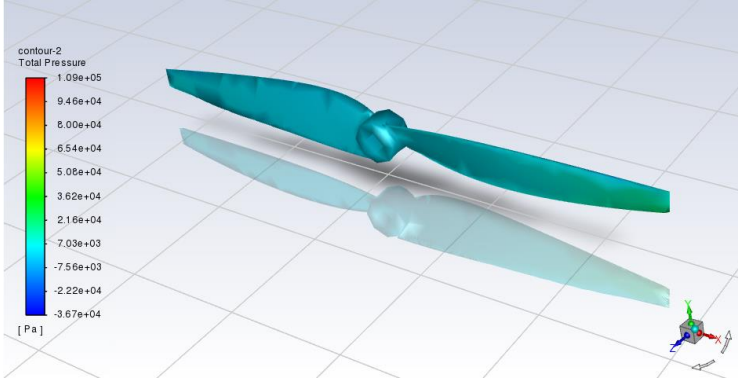
SST (Shear-Stress Transport) $k-\omega$ modeli, türbülanslı akışların sayısal simülasyonunda en yaygın kullanılan RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) tabanlı modellerden biridir. 1990'ların sonlarında Menter tarafından geliştirilmiştir ve temel amacı, standart $k-\omega$ modelinin duvar yakınındaki hassasiyetini korumakla birlikte, $k-\epsilon$ modelinin serbest akım bölgelerindeki sağlamlığını birleştirmektir. Bu hibrit yaklaşım sayesinde, özellikle advers basınç gradyanları, akış ayrılması ve vorteks hakim akışlar (örneğin pervane, kanat, turbomakineler) gibi zorlu problemlerde üstün performans gösterebilmektedir. Türbülans modeli olarak SST $k-\omega$ seçilmiştir; çünkü bu model duvar yakınındaki viskoz alt tabakayı doğru çözerken, serbest akımda da kararlı davranış sergileyebilmektedir. Özellikle pervane ucu vorteksleri gibi karmaşık yapıları yakalamada üstünlüğü bilinmektedir. Duvar fonksiyonları otomatik geçişli olarak bırakılmış, böylece mesh kalitesine duyarlılık azaltılmıştır. Bakır için temel fiziksel özellikler kullanılmıştır: yoğunluk 8960 kg/m^3 civarı, Young modülü 110-130 GPa aralığında olmaktadır. Yapısal deformasyon tamamen ihmal edilmiş; çünkü bakırın sertliği gerçek esnemeyi pratikte sıfıra yakın tutabilmektedir. Analizler dört ayrı dönme hızında yürütülmüştür: 15000rpm, 20000rpm, 25000rpm ve 30000rpm şeklindedir. Bu değerler, yarış drone'larının tipik agresif rejimlerini yansıtmaktadır. Akış alanı geniş bir silindirik domain içinde tanımlanmış, girişte

sakin hava koşulu, çıkışta ise sıfır gradyan basınç uygulanmıştır [7-11].

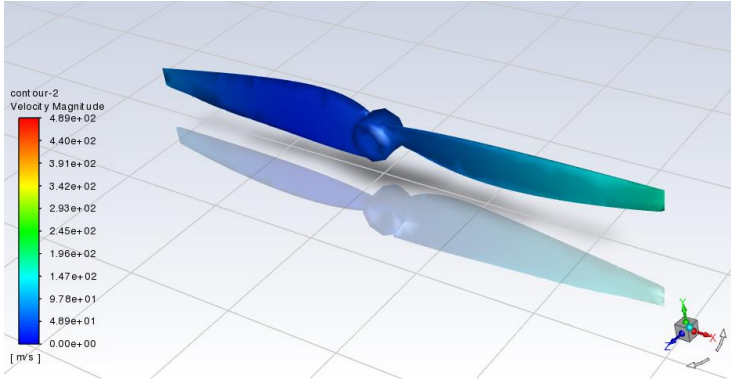
Bulgular ve Tartışma

Hesaplamalı akışanlar dinamiği ile analiz sonuçları şekil 1-12 arasında aşağıda gösterilmiştir:

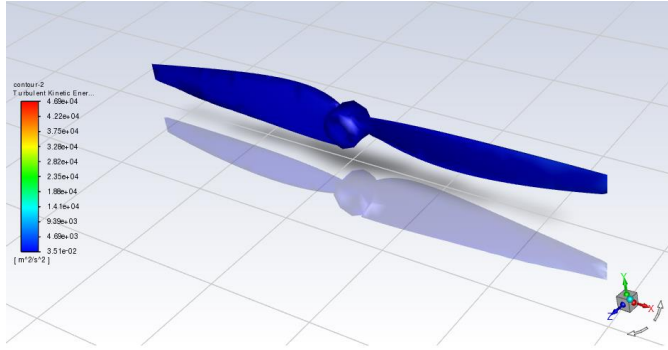
15000rpm için analiz sonuçları:



şekil 1. Toplam basınç analizi kontur dağılımı

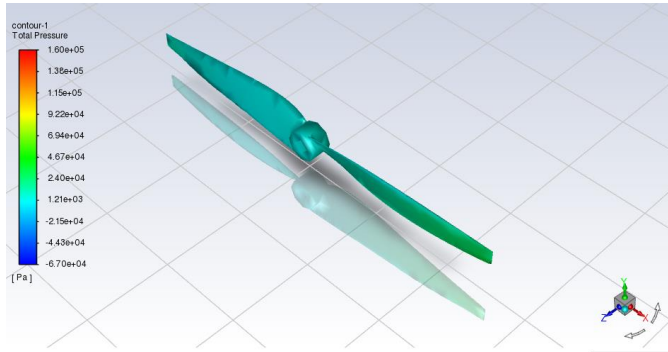


şekil 2. Hız analizi kontur dağılımı

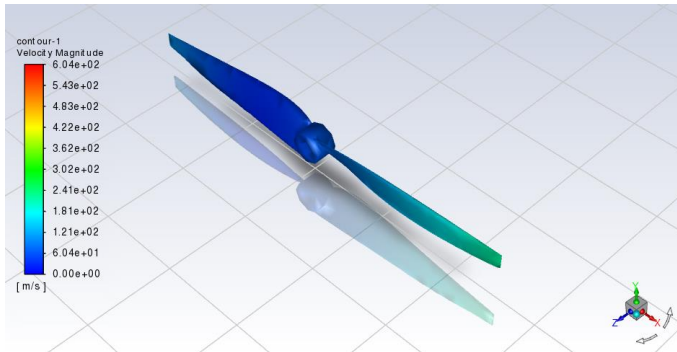


Şekil 3. Türbülans kinetik enerji analizi kontur dağılımı

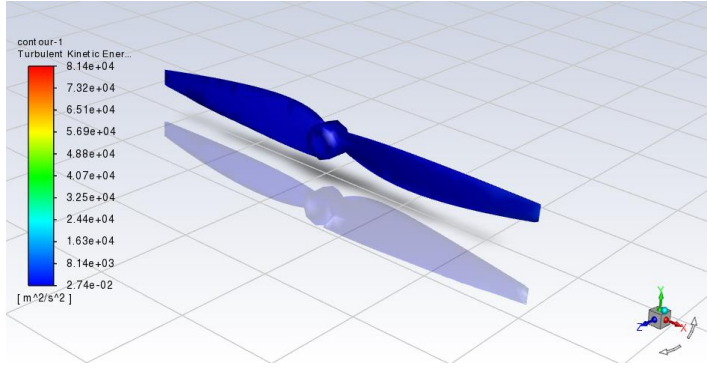
20000rpm için analiz sonuçları:



Şekil 4. Toplam basınç analizi kontur dağılımı

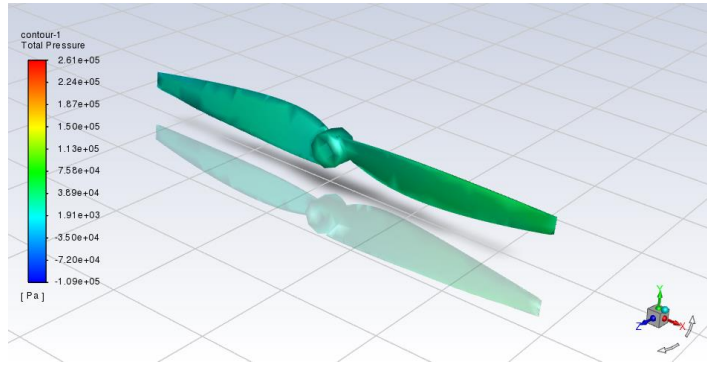


Şekil 5. Hız analizi kontur dağılımı

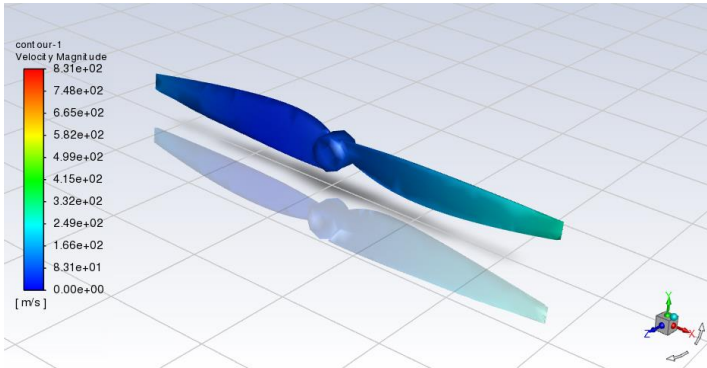


Şekil 6. Türbülans kinetik enerji analizi kontur dağılımı

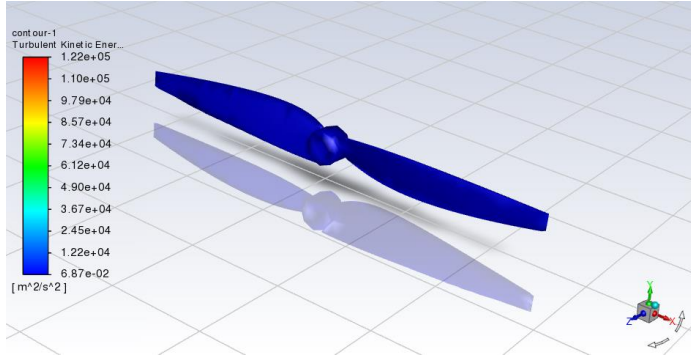
25000rpm için analiz sonuçları:



Şekil 7. Toplam basınç analizi kontur dağılımı

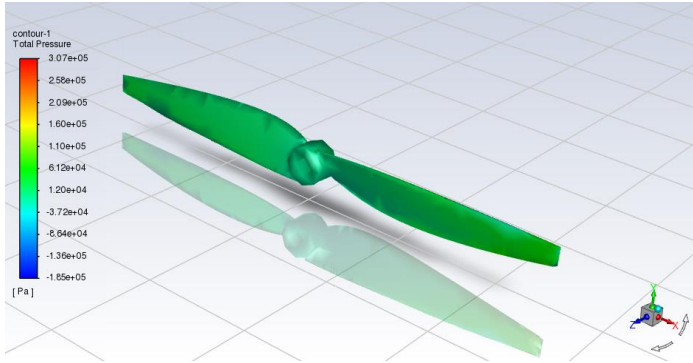


Şekil 8. Hız analizi kontur dağılımı

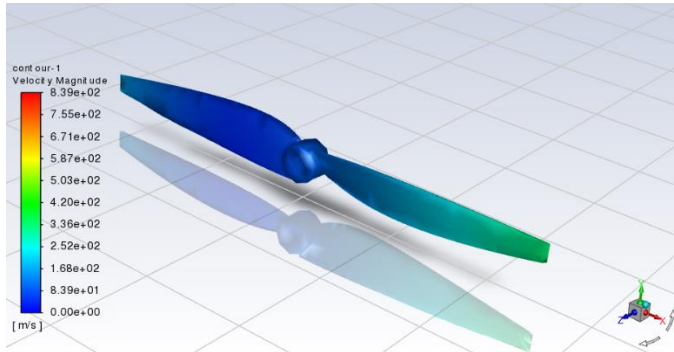


Şekil 9. Türbülans kinetik enerji analizi kontur dağılımı

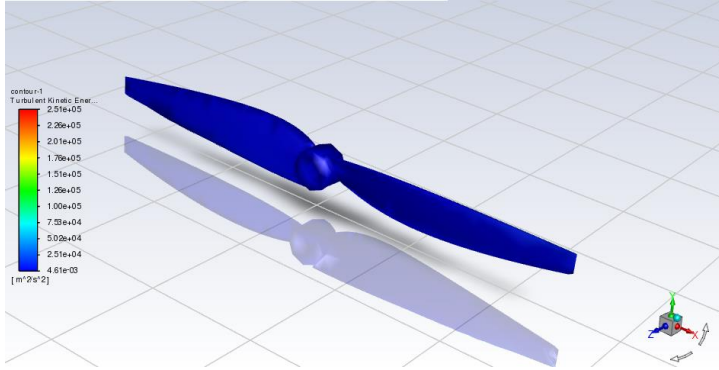
30000rpm için analiz sonuçları:



Şekil 10. Toplam basınç analizi kontur dağılımı



Şekil 11. Hız analizi kontur dağılımı



Şekil 12. Türbülans kinetik enerji analizi kontur dağılımı

Sayısal çözümlerden çıkan kontur haritaları, dönme hızının pervane etrafındaki akış yapısını nasıl dönüştürdüğünü açıkça gözler önüne sermektedir. Dört farklı rejimde –15000, 20000, 25000 ve 30000rpm– elde edilen basınç, hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları Şekil 1’den Şekil 12’ye kadar sırasıyla sunulmuştur.

En düşük hızda (15000rpm), pervane yüzeyindeki basınç farkı oldukça sınırlı kalmaktadır. Emiş tarafında hafif mavi tonlar hakim olmakta; düşük basınç alanı kanadın orta bölgeleriyle sınırlı kalmaktadır. Hız konturları da benzer bir tablo çizmektedir: Kanat uçlarına doğru hız artışı çok mütevazı, maksimum değerler düşük seviyelerde seyretmektedir. Türbülans kinetik enerji dağılımı ise neredeyse sıfır mertebesinde; akış tamamen yapışık karakterde ve vorteks oluşumu minimal düzeyde gözlenmektedir. Bu rejim, düşük itki üretimiyle birlikte oldukça az enerji kaybı anlamına geliyor; ancak yarış drone’ı gibi yüksek performans beklenen bir sistem için yetersiz düzeyde kalabilmektedir.

20000rpm’ye geçildiğinde belirgin bir canlanma gözlenmektedir. Basınç konturları emiş yüzeyinde daha geniş ve derin mavi bölgeler göstermekte; düşük basınç alanı kanadın büyük kısmını kaplamaya başlamaktadır. Hız dağılımı uç bölgelerde kırmızıya dönen tonlarla hızlanmayı işaret etmektedir. Türbülans

kinetik enerji ise uçlarda hafif yoğunlaşma gösterse de hala kontrollü seviyede kalabilmektedir. Akış ayrılmasına dair herhangi bir iz gözlenmemekte; rijit bakır yüzey şekil değişikliği olmadan akımı yönlendirebilmektedir. İtki kuvvetinde gözle görülür bir artış bulunmakta, ancak vorteks kaynaklı kayıplarda henüz kritik eşik aşılmamış durumda belirmektedir.

25000rpm aralığı, simülasyonların en dikkat çekici noktası olarak öne çıkabilmektedir. Basınç haritaları emiş tarafında oldukça derin düşük basınç cepleri oluşturmakta; bu bölgeler kanadın neredeyse tamamını sarmaktadır. Hız konturları uçlarda belirgin kırmızı alanlarla maksimum hız değerlerini sergilemektedir. Türbülans kinetik enerji dağılımı da uç vortekslerinde yoğun kırmızı tonlara sahip gözlenmekte; tip vortekslerin olgunlaştığı açıkça görülebilmektedir. Yine de akış ayrılması gözlenmemekte – bakırın aşırı sertliği sayesinde geometri bozulmadan akışa direnç gösterilmektedir. Bu hız, itki üretimi ile enerji tüketimi arasında en dengeli bölge gibi gözükmemekte; induced drag artışı henüz verim düşüşüne yol açacak kadar baskın olmamaktadır.

Maksimum hız olan 30000rpm’de ise akış oldukça agresif bir yapı kazanmaktadır. Basınç konturları emiş tarafında çok derin düşük basınç bölgeleriyle dikkat çekmekte; renk skalası en düşük değerlere ulaşmaktadır. Hız dağılımı uçlarda zirve yapan kırmızı alanlarla ses hızına yakın yerel Mach sayılarına işaret edebilmektedir. Türbülans kinetik enerji kanat uçlarında yoğun şekilde birikmiş; güçlü tip vortekslerin varlığı ve bunların arkaya doğru uzanan izleri net bir şekilde seçilebilmektedir. İtki kuvveti en üst seviyeye çıkarken, vorteks kaynaklı induced drag ve türbülans kaynaklı enerji kaybı da aynı oranda yükselmektedir.

Sonuçlar

Yapılan çalışma, bakır malzemenin racing drone pervane tasarımında nasıl bir rol oynayabileceğini sayısal olarak

sorgulayarak basınç, hız ve türbülans kinetik enerji değerleri hakkında bazı çıkarımları ortaya koymuştur. SST k- ω türbülans modeli altında yürütülen simülasyonlar, rijit bir metal pervane yüzeyinin akış davranışını tüm hız rejimlerinde stabil tuttuğunu göstermiştir. Özellikle akış ayrılmasına dair izin olmaması, bakırın yüksek mekanik sertliğinin geometriyi bozulmadan koruduğunu kanıtlar niteliktedir. Düşük devirlerden maksimum hıza kadar geçen süreçte, tip vortekslerin oluşumu ve güçlenmesi detaylı bir şekilde izlenmekte; model bu karmaşık yapıları oldukça başarılı bir biçimde yakalayabilmektedir.

Ancak elde edilen veriler aynı zamanda önemli kısıtlamaları da gözler önüne sermektedir. Bakırın aşırı rijitliği, hafif malzemelerde yüksek devirlerde doğal olarak ortaya çıkan esneme mekanizmasını tamamen devre dışı bırakmaktadır. Bu esneme, gerçek pervanelerde hücum açısını kendiliğinden ayarlayarak ek itki ve verim katkısı sağlarken, burada böyle bir avantajdan yoksun kalınmaktadır. Sonuçta aynı geometriyle üretilen itki kuvveti, teorik olarak stabil olsa da toplam enerji verimliliği açısından daha düşük seviyelerde kalabilmektedir.

Ağırlık faktörü ise işin pratik yönünü daha da belirginleştirmektedir. Bakırın yüksek yoğunluğu, aynı itkiyi elde etmek için daha fazla güç talebi doğurmakta; bu da batarya tüketimini arttırmakta ve uçuş süresini kısaltmaktadır. Yarış drone'larının temel gereksinimi olan çeviklik ve uzun menzil, bu senaryoda ciddi ölçüde sınırlandırılmış olabilmektedir.

Yapılan bu analizler, pratikteki racing drone pervane malzemelerinin polimer veya kompozit esaslı malzemelerden neden tercih edildiğini ortaya koyabilmektedir. Rijitlik ve stabilite avantajı teoride çekici görünse de hafiflik ve kontrollü esneklik olmadan toplam performans rekabetçi seviyeye ulaşamayabilmektedir. Bu tür analizler, tasarım sürecinde malzeme seçiminin fiziksel temellerini hatırlatması açısından değerli olmaktadır. Racing drone dünyası hız

ve verim peşinde koşarken, her gramın ve her milimetrenin önemi bir kez daha anlaşılmış olmaktadır. Yapılan çalışmanın racing drone'lar ile ilgili literatüre değerli katkılar sağlaması öngörülmektedir.

Kaynaklar

[1] Li, W., & Wu, B. (2024). Computational fluid dynamics investigation of aerodynamics for agricultural drones. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227(Part 1), Article 109528. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109528>

[2] Kartal, M. A., & Feyzioğlu, A. (2025). Aerodynamic performance and energy modeling of a quadcopter drone at different RPM: An experimental and CFD investigation of future design UAV. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaf132>

[3] Guo, Q., Zhu, Y., Tang, Y., Hou, C., He, Y., Zhuang, J., Zheng, Y., & Luo, S. (2020). CFD simulation and experimental verification of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow of a quad-rotor agricultural UAV in hover. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, Article 105343. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105343>

[4] Rostami, M., & Farajollahi, A. H. (2021). Aerodynamic performance of mutual interaction tandem propellers with ducted UAV. *Aerospace Science and Technology*, 108, Article 106399. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106399>

[5] Wen, S., Han, J., Ning, Z., Lan, Y., Yin, X., Zhang, J., & Ge, Y. (2019). Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quad-rotor drone wake at different flight speeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, Article 105036. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105036>

- [6] Zhu, H., Nie, H., Zhang, L., Wei, X., & Zhang, M. (2020). Design and assessment of octocopter drones with improved aerodynamic efficiency and performance. *Aerospace Science and Technology*, 106, Article 106206. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106206>
- [7] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [8] Yoon, J., Lim, K., Park, S.-i., & Doh, J. (2023). Multi-objective optimization of aerodynamic blade shapes for quadcopter system to enhance hovering thrust and power consumption efficiency. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 24(3), 689–700. <https://doi.org/10.1007/s42405-023-00600-9>
- [9] Hasegawa, M., & Sakaue, H. (2024). Propeller-noise reduction by microfiber coating on a blade surface. *Sensors and Actuators A: Physical*, 371, 115273. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115273>
- [10] Tiruvenkadam, N., Shankar, S., Kumar, P., & Gowtham, S. (2024). Investigation of structural and thermal analysis of drone propeller materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2925, 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2925/1/012002>
- [11] Jain, D., & Vishwakarma, V. (2024). Investigation of thrust performance for different drone propeller designs using CFD. In *Opportunities and Risks in AI for Business Development* (pp. 365-378). Springer.

BÖLÜM 14

ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNİN TASARIM SINIFLANDIRILMASI VE NÜKLEER GÜVENLİK ANALİZİ

Mahmut Cüneyt KAHRAMAN¹

GİRİŞ

Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR), ergimiş tuzun reaktörün birincil soğutucusu olarak görev yaptığı, yakıtın sıvı olarak bu tuz içerisinde çözülebildiği yahut konvansiyonel sistemlerde olduğu gibi katı formda tutulduğu yenilikçi bir reaktör sınıfıdır.

ETR teknolojisinin kökleri, 1950'li yıllarda ABD'de yürütülen Uçak Reaktör Deneyi projesine dayanmaktadır. Ancak teknolojinin uygulanabilirliğini kanıtlayan en önemli kilometre taşı, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirilen ve 1965-1969 yılları

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-1535-3832

arasında başarıyla işletilen Ergimiş Tuz Reaktör Deneyleridir. 8 MWth gücündeki bu deneysel reaktör, hem U-235 hem de U-233 yakıtlarıyla çalışarak sıvı yakıt konseptinin, grafit moderatör uyumunun ve korozyon dirençli malzemelerin performansını doğrulamıştır. Acil tahliye sisteminin çalışabilirliği yapılan deneyler ile araştırılmış ve kanıtlanmıştır. Bugün referans alınan birçok veri de o gün yapılan deneylerden elde edilmiştir [1].

Alınan sonuçlar sistemin güvenli olarak çalıştığını kanıtlamış olsa da su bazlı reaktörlerin geliştirilmesi, bu teknolojileri arka planda bırakmıştır. 1970'lerde duraklayan çalışmalar, 2011 Fukushima Nükleer Kazası sonrası ve suyun soğutucu akışkan olarak kullanılmasının sistem üzerinde oluşturduğu risklerin öğrenilmesi ile nükleer güvenlik endişelerinin artmasıyla yeniden hız kazanmıştır. ETR'ler, 4. Nesil Nükleer Sistemler yol haritasında yer alan altı öncelikli teknolojiye biri olarak seçilmiştir [2].

ETR teknolojisine olan ilginin yeniden canlanmasının temelinde, konvansiyonel nükleer reaktörlerdeki kısıtlara çözüm getiren şu üç temel avantaj bulunmaktadır:

- **Pasif Güvenlik:** ETR'ler, yüksek kaynama noktasına sahip tuzlar sayesinde atmosferik basınca yakın seviyelerde çalışır; bu da yüksek basınçlı patlama riskini ortadan kaldırır. Ayrıca, acil durumlarda yakıtın yerçekimi ile kendiliğinden güvenli tanklara boşalmasını sağlayan acil tahliye sistemi gibi birçok pasif güvenlik sistemi ile donatılmıştır.
- **Atık Yönetimi:** Özellikle hızlı spektrumlu ETR'ler, konvansiyonel sistemlerden çıkan kullanılmış yakıt bünyesinde bulunan uzun ömürlü nükleer atıkları yakarak yapısını değiştirme ve yok etme potansiyeline sahiptir.
- **Toryum Döngüsü:** Özellikle sıvı yakıtlı hızlı nötron spektrumlu tasarımlar, nötron ekonomisi açısından toryum-uranyum döngüsünü gerçekleştirmeye en uygun sistemlerdir.

Bu sayede, nükleer yakıtlar için uranyuma alternatif oluşturularak dünya genelinde bol bulunan toryum rezervleri enerjiye dönüştürülebilir.

Bu çalışmanın amacı, geniş bir tasarım yelpazesine sahip olan ETR teknolojisini sistematik bir yaklaşımla incelemektir. Bu kapsamda çalışmada şu hedefler gözetilmiştir:

- **Sınıflandırma:** Karmaşık ETR tasarımlarını; yakıt fazı, nötron spektrumu ve tuz bileşimi ve diğer parametreler üzerinden sınıflandırmak.
- **Güvenlik Analizi:** Sınıflandırması yapılmış farklı ETR tasarımlarını nükleer güvenlik açısından değerlendirmek ve analizini yapmak.
- **Teknolojik Durum:** Dünyada inşaat ve lisanslama aşamasına gelmiş güncel projelerin teknik özelliklerini ve ticarileşme potansiyellerini ortaya koymak.

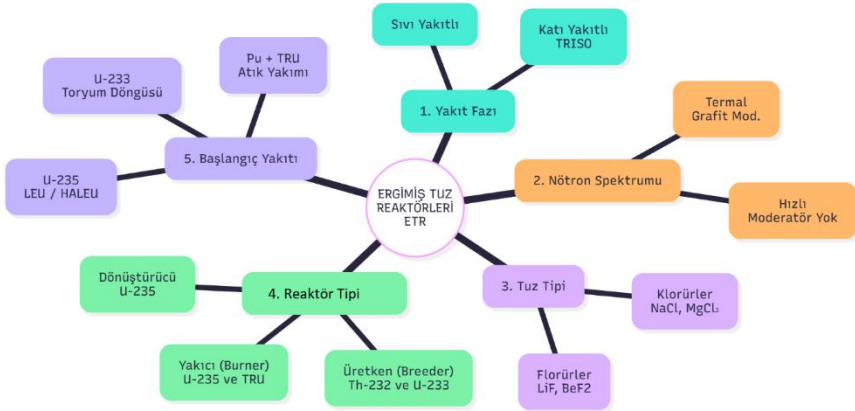
ETR SINIFLANDIRMASI VE TASARIM KONFIGÜRASYONLARI

ETR üzerine süren araştırma ve tasarım çalışmaları, tek bir reaktör tasarımından ziyade, yakıtın fiziksel hali, nötron spektrumu, tuz bileşimi, başlangıç yakıtı ve yakıt çevrimi gibi geniş yelpazeli parametreler kapsamında sürmektedir. Geleneksel nükleer reaktörlerin aksine, ETR teknolojisi tasarımcılara çok sayıda konfigürasyon seçeneği sunar. Bu esneklik, reaktörün enerji üretiminden nükleer atık yakımına, toryum döngüsünün

gerçekleştirilmesine kadar farklı amaçlar için optimize edilmesine olarak tanır.

Bu bölümde, ETR'lerin tasarım parametrelerini oluşturan temel parametreler, Şekil 2.1'de sunulan sınıflandırma ağacı üzerinden detaylı olarak incelenecektir. Tasarımın temelini oluşturan bu beş ana eksen reaktörün nötroniğini, termal-hidroliğini ve güvenlik karakteristiğini doğrudan belirlemektedir.

Resim 1 Ergimiş Tuz Reaktörlerinin Sınıflandırma Ağacı



Yakıt Fazı

ETR tasarımında en temel ayrımlardan biri, fisil malzeme olan yakıtın reaktör içinde hangi fiziksel fazda bulunduğuudur. Bu parametre reaktörü iki ana kategoriye ayırır: **Sıvı Yakıtlı** ve **Katı Yakıtlı** sistemler.

Sıvı Yakıtlı ETR'ler ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

Bu tasarımda yakıt olarak kullanılan malzeme fisil ve doğurgan doğrudan soğutucu akışkan tuzun içinde kimyasal olarak çözünmüş haldedir. Yakıtın sıvı formda olması, konvansiyonel reaktörlere kıyasla ETR'lere benzersiz avantajlar sağlar:

- **Homojen Dağılım:** Yakıt, tuz içinde iyonik seviyede çözüldüğü için reaktör çekirdeğinde mükemmel bir homojenlik sağlanır. Bu durum, katı yakıtlarda görülen yerel sıcaklık artışlarını engeller.
- **Isı Transferi:** Isı, fisyonun gerçekleştiği yakıtın içinde üretilir ve homojen olarak tuzla karışan yakıt, yüksek yüzey alan teması kurar, bu da ısı iletimini artırır.
- **Çevrimiçi Yakıt Besleme:** Yakıt sıvı olduğu için reaktör durdurulmadan yakıt beslemesi yapılabilir. Reaktörün durmadan çalışması enerji modellemesini kolaylaştırır ve şebekede oluşacak dalgalanmaların azalmasını sağlar.
- **Atık Yönetimi:** Yakıt sıvı olduğu için fisyon ürünleri (örneğin gazlar veya uçucu elementler) sistemden sürekli olarak uzaklaştırılabilir. Bu özellik, reaktörün reaktivite marjını korumasını, sistemin daha kararlı çalışmasını ve yüksek yanma oranlarına ulaşmasını sağlar.
- **Güvenlik:** Sıvı yakıt, herhangi bir acil durum veya kaza durumunda yerçekimi kuvvetiyle pasif olarak, kritik altı tahliye borularına boşaltılabilir. Bu şekilde reaktör güvenli olarak kapanır. Normal çalışma sırasında katı formda olan katı tıpa, sıcaklığın artmasına bağlı olarak eridiğinde yakıt, kritikliğin fiziksel olarak mümkün olmadığı güvenli tanklara akar.

Katı Yakıtlı ETR'ler ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

Bu kategorideki reaktörler, literatürde genellikle Florür Tuzu Soğutmalı Yüksek Sıcaklık Reaktörleri olarak adlandırılır. Burada ergimiş tuz sadece bir **soğutucu** olarak kullanılır; yakıt ise katı formdadır.

- **Yakıt Formu:** Genellikle TRISO (Tristructural Isotropic) kaplamalı yakıt parçacıkları kullanılır. Bu parçacıklar plaka veya küresel formda olabilir.
- **Tuzun Rolü:** Tuz fisil malzeme içermez, sadece ısıyı çekirdekten uzaklaştırmak için düşük basınçlı ve yüksek ısı kapasiteli bir soğutucu işlevi görür. Homojen bir karışım olmadığından ısı transferi daha düşük seviyelerde kalır.
- **Kısıtlar:** Katı yakıt kullanıldığından çevrimiçi yakıt besleme ve fisyon ürünlerinin çalışma sırasında sistemden uzaklaştırılması mümkün olmaz. Bu da reaktivite kontrolünü ve sistemin kararlı çalışmasını zorlu hale getirir ve yeni yakıt yüklemesi için sistemin durdurulmasını mecburi hale getirir.
- **Güvenlik:** Konvansiyonel sistemlerde olduğu gibi yakıtın yapısal bütünlüğü bu tasarımda da önem arz etmektedir ve katı yakıtlı sistemlerin getirdiği klasik mühendislik zorluklarını barındırır.

Özetle, sıvı yakıtlı tasarımlar ETR teknolojisinin tam potansiyelini yansıtırken, katı yakıtlı tasarımlar, mevcut yakıt teknolojisi ile ergimiş tuzun soğutma kabiliyetini birleştiren bir ara teknoloji olarak değerlendirilebilir.

Nötron Spektrumu

Bir ETR'nin fiziksel boyutlarını, yakıt envanterini ve atık yönetim stratejisini belirleyen en kritik parametrelerden biri nötron spektrumudur. Tasarımcılar, reaktörün tasarımına bağlı olarak nötronları yavaşlatmayı veya fisyon sonucunda sahip oldukları yüksek enerjide tutmayı seçebilirler.

Termal Spektrumlu ETR'ler ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

İlk geliştirilen ETR konseptleri termal spektrum üzerine kurgulanmıştır. Bu tasarımlarda, fisyon nötronlarını yavaşlatmak için reaktör çekirdeğinde bir moderatör yani yavaşlatıcı kullanılır. Oak Ridge ETRE, Çin'in TMSR-LF1 projesi ve Terrestrial Energy'nin IMSR tasarımı termal spektrumlu olarak tasarlanmıştır.

- **Moderatör Yapısı:** ETR teknolojisinde moderatör olarak grafit kullanılır. Yakıt tuzu, grafit blokların içindeki kanallardan akarak zincirleme reaksiyonun devamlılığını sağlar. Grafitin seçilme nedeni, nötron yutma tesir kesitinin düşük olması ve yüksek sıcaklıklara dayanabilmesidir.
- **Başlangıç Yakıt Envanteri:** Termal spektrumda kritiklik için gereken **başlangıç fisil yakıt envanteri düşüktür**. Bu özellik, reaktörün daha az U-233 veya zenginleştirilmiş uranyum ile başlatılabilmesini sağlar.
- **Grafitin Ömrü:** Grafitin reaktör içindeki ömrü sınırlıdır. Yüksek nötron akısı altında grafit zamanla deforme olur ve mekanik özelliklerini kaybeder. Bu nedenle, yüksek güçlü reaktörlerde grafitin periyodik olarak değiştirilmesi gerekebilir, bu da reaktörün durdurulmasına sebep olur, ayrıca bu durum işletme maliyetini ve katı radyoaktif atık miktarını artırır.

Hızlı Spektrumlu ETR'ler ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

Bu konseptte reaktör çekirdeğinde moderatör bulunmaz; çünkü reaktörde herhangi bir yavaşlatma işlemi yapılmaz. Fisyon nötronları, yavaşlatılmaya ihtiyaç duyulmadan tekrardan fisyon reaksiyonuna girer. Avrupa Birliği destekli ETHR, Rusya'nın MOSART projesi ve TerraPower'ın MCFR tasarımı hızlı spektrumlu olarak tasarlanmıştır.

- **Grafit Probleminin Çözümü:** Moderatörsüz tasarım, grafitin ömür kısıtlamasını ve grafit kaynaklı atık yönetimini tamamen ortadan kaldırır. Bu durum reaktör tasarımını basitleştirir ve güç yoğunluğunu artırır. Reaktörün durdurularak grafit değişim zorunluluğu ortadan kalkar.
- **Üretkenlik ve Atık Yakımı:** Hızlı nötronlar, uranyumdan plütonyum üretimini veya Trans-uranyum radyonüklitlerinin yakılarak yok edilmesini sağlar. U/Pu veya Th/U yakıt çevrimi sadece hızlı spektrumda verimli bir şekilde "üretken" moda geçebilir. Ayrıca aktinitler (MA) fisyonu uğrayana kadar reaktörde tutulabildiği için atık yönetimi daha kolaydır.
- **Sıcaklık Geri Besleme Katsayısı:** Hızlı spektrumlu ETR'ler, çok güçlü negatif sıcaklık geri besleme katsayılarına sahiptir, bu da reaktörün pasif olarak sıcaklık & reaktivite arasında denge kurulmasını ve güvenli çalışmasını sağlar.
- **Başlangıç Yakıt Envanteri:** Hızlı spektrumda fisyon tesir kesitleri düştüğü için kritikliğe ulaşmak adına çok daha **büyük bir yakıt envanteri** gereklidir. Ayrıca reaktör çeperindeki metalik yapı malzemeleri üzerindeki radyasyon hasarı, hızlı nötronlardan dolayı daha yüksektir.

Tuz Seçimi

Reaktörün nötronik performansı ve ısı kapasitesi, seçilen taşıyıcı tuzun özelliklerine doğrudan bağlıdır. Taşıyıcı tuz, fisil malzemeyi çözebilmesi, düşük nötron yutma tesir kesitine sahip olmalı ve radyasyon altında kararlı kalabilmelidir. Bu parametreler değerlendirildiğinde ETR tasarım projelerinde Florür ve Klorür tuzları öne çıkmaktadır. İki tuzun farklı avantajları bulunmasına rağmen, florür tuzunun nükleer uygulamalarda daha fazla kullanılmış olması ve toryum çevriminde klorür tuzuna göre üretkenlik oranının daha yüksek olması (1,040'a karşılık 1,126)

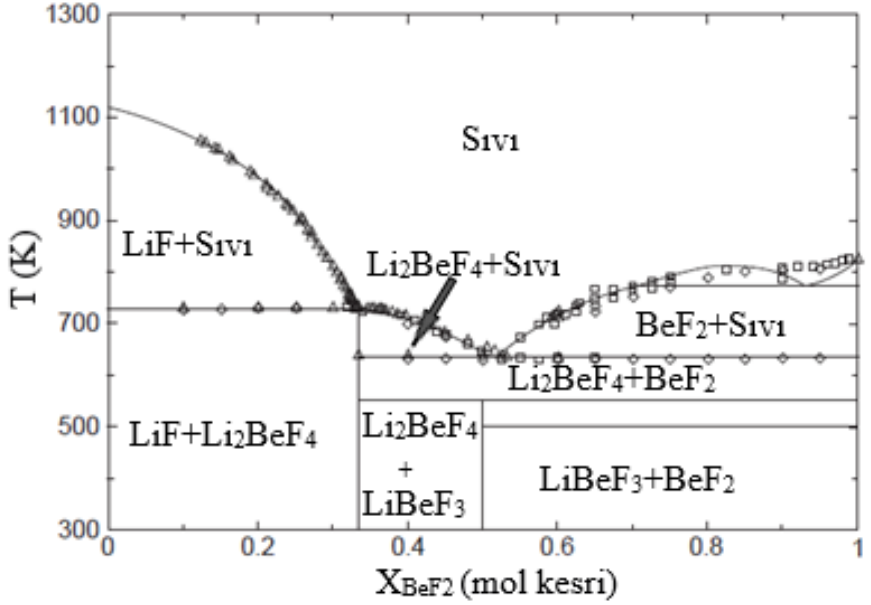
retken reaktörler için florür tuzunu daha avantajlı kılmaktadır [3]. Tablo 2.1’de bu iki tuzun performans kıyaslaması yapılmıştır.

Florür Tuzları ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

Genellikle lityum florür (LiF) ve berilyum florür (BeF₂) karışımları (FLiBe) veya sodyum florür (NaF) kombinasyonları tercih edilir.

- **Uyumluluk:** Florür tuzları, özellikle termal spektrum ve Toryum-Uranyum yakıt çevrimi için en uygun seçenek olarak kabul edilir. Toryumun florür tuzlarındaki znrlg ve nötronik davranışı bu uyumu destekler.
- **Trityum retimi:** LiF kullanılan tasarımlarda, doğal lityum içinde bulunan Li-6 izotopu nötron yutarak trityum üretimine neden olur. Trityum yüksek radyoaktiviteli bir gaz olması nedeniyle reaktörde üretilmemesi hedeflenmektedir. Bu yüzden florürlü ETR’lerde lityumun %99,99 oranında **Li-7 izotopuna zenginleştirilmesi** gerekmektedir.
- **Termo-fiziksel zellikleri:** Düşük buhar basıncına ve yüksek ısı kapasitesine sahiptirler, bu da atmosferik basınçta yüksek sııcaklıklarda çalışmayı mümkün kılar. Saf bileşenlerin erime noktaları oldukça yüksekken (LiF için 848°C), bu iki tuz belirli bir oranda karıştırıldığında erime noktası dramatik bir şekilde düşer. Aşağıdaki şekil 2.2’de görüldügü üzere, karışımdaki BeF₂ oranı %32,8 olduğunda (2 mol LiF’e karşı 1 mol BeF₂), karışım tektik Nokta olarak adlandırılan en düşük erime sııcaklığına 459°C ulaşır. MSR tasarımlarında reaktörün bu noktada çalıştırılması hedeflenir. Bu sayede reaktör, atmosferik basınç altında ve yapısal malzemelerin dayanabileceği sııcaklık aralıklarında (600-700°C) güvenle işletilebilir ve donma riski minimize edilir.

Resim 2 FLiBe tuzunun faz diyagramı [4]



Klorür Tuzları ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

Klorür tuzları "hızlı spektrum" tasarımları ile birlikte tekrardan çalışılmaya başlanmıştır. Genellikle sodyum klorür (NaCl) veya magnezyum klorür (MgCl₂) bazlı karışımlar kullanılır.

- **Aktinit Çözünürlüğü:** Klorür tuzlarının en büyük avantajı, Plütonyum ve diğer trans-uranyum radyonüklitleri için florürlere kıyasla çok daha yüksek çözünürlüğe sahip olmasıdır. Bu özellik, onları Hızlı Spektrumlu Üretken reaktörler ve nükleer atık yakımı için ideal kılar.
- **Klor-36 Sorunu:** Doğal klor, Cl-35 ve Cl-37 izotoplarını içerir. Cl-35 izotopu nötron yutarak, uzun yarı ömre sahip (300.000 yıl) radyoaktif bir atık olan Klor-36 izotopuna dönüşür. Bu sorunu aşmak için, tıpkı lityumda olduğu gibi, klorun da pahalı bir işlem olan izotop ayrıştırmasıyla Cl-37 yönünden zenginleştirilmesi gerekmektedir.

- **Korozyon:** Klorür tuzları, yapısal malzemeler üzerinde florürlere göre daha agresif bir korozyon etkisi yaratabilir, bu da malzeme seçimini zorlaştıran bir faktördür.

Tablo 1 Florür ve Klorür Tuzlarının Kıyaslanması

Karşılaştırma Parametresi	Florür Tuzları (FLiBe)	Klorür Tuzları (NaCl, MgCl ₂)
İdeal Yakıt Çevrimi	Toryum / U-233 Döngüsü	U-Pu Döngüsü ve TRU Yakımı
Üretkenlik Oranı	Daha Yüksek (~1.126)	Daha Düşük (~1.040)
Zenginleştirme İhtiyacı	Lityum-7 (Doğal Li-6, Tritiyum üretir)	Klor-37 (Doğal Cl-35, radyoaktif Cl-36 üretir)
Temel Aktivasyon Sorunu	Tritiyum (³ H) Üretimi: Li-6 nötron yutarak tritiyum gazı oluşturur. (T _{1/2} = 12 yıl)	Klor-36 (³⁶ Cl) Üretimi: Cl-35 nötron yutarak uzun ömürlü atık oluşturur. (T _{1/2} = 301.000 yıl)
Erime Sıcaklığı	Düşük/Orta (459°C - FLiBe için)	Değişken (Genellikle hızlı spektrum için daha düşük erime noktaları sağlanabilir)

Reaktör Tipi

ETR'ler kullanabileceği yakıt açısından çeşitli alternatiflere sahiptir. Reaktör, üretken (fertile) radyonüklit kullanarak fisil yakıt

üreten üretken bir tasarım, nükleer atık niteliğindeki radyonüklitleri kullanan yakıcı bir tasarım veya konvansiyonel sistemlerde olduğu gibi zenginleştirilmiş fisil yakıtı kullanan bir tasarım olabilir.

Üretken Sistemler ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

Bu sistemlerin temel amacı, fisil yakıt üreten üretken radyonüklit kullanarak, tüketilen fisil malzemeden daha fazlasını işletme süresi boyunca üretmektir. Bu sayede yakıt ihtiyacı daha sürdürülebilir bir çözüm ile karşılanır. Örnek tasarımlar MSBR (Molten Salt Breeder Reactor), LFTR (Liquid Fluoride Thorium Reactor), MSFR (Molten Salt Fast Breeder)'dir.

- **Yakıt Çevrimi:** Ağırlıklı olarak Toryum (Th-232) – Uranyum (U-233) döngüsü kullanılır. Doğurgan Th-232 nötron yakalayarak kararsız Th-233'e dönüşür, beta bozunumları ile sonuçta fisil U-233 üretilir ve reaktörde yakıt olarak kullanılır. Şekil 2-3 toryumun fisil yakıt dönüşümü gösterilmiştir.
- **Tasarım Gereklilikleri:** Hem toryumun dönüştürülmesi hem de fisyon için nötron gerektiğinden nötron ekonomisi çok önemlidir. Bu yüzden fisyon ürünlerinin sistemden sık aralıklarla temizlenmesi gerekir. Ayrıca oluşan Protaktinyum-233'ün nötron yutmadan U-233'e dönüşebilmesi için sistemde bekletilmesi veya ayrıştırılması kritik bir tasarım parametresidir.
- **Başlangıç fisil yakıt gerekliliği:** Toryumun dönüştürülmesi için gerekli nötron kaynağı fisil yakıtlardan karşılanmalıdır. Bu yüzden sistem başlangıç yakıtı olarak fisil yakıt da içermelidir.

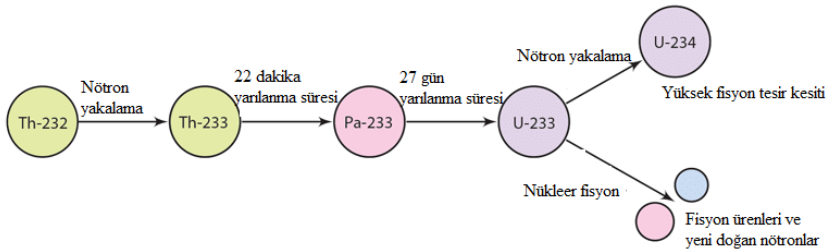
Yakıcı Sistemler ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

Bu tasarımlar hem ETR'lerin yakıt ihtiyacını karşılamayı hem de nükleer atık yönetimi sorununa çözüm üretmeyi amaçlar. Bu

reaktörler, özellikle uzun ömürlü nükleer atıklar olan uranyum ötesi radyonüklitleri ve minör aktinitleri parçalayarak yok etmeyi hedefler. Örnek tasarımlar MOSART (Rusya), SSR-W (Moltex - Wasteburner) , Transatomic Power (WAMSR)'dır.

- **Yakıt:** Konvansiyonel nükleer santrallerden çıkan kullanılmış yakıtların içindeki Plütonyum ve Minör Aktinitler (Neptünyum, Amerikyum, Kuriyum) yakıt olarak kullanılır.
- **Nötron Spektrumu:** Aktinitlerin fisyon olasılığı yüksek enerjili nötronlarda daha fazla olduğu için genellikle hızlı spektrumlu tasarımlar tercih edilir.
- **Transmutasyon:** Atıkların reaktör içinde fisyonla uğratılması nihai depolama sahasına gönderilecek atıkların radyotoksisite süresini binlerce yıldan birkaç yüzyıla indirir. Bu da nükleer atık yönetiminde ciddi avantaj sağlar.

Resim 3 Toryumun fisil yakıtı dönüşümü



Dönüştürücü Sistemler ve Nükleer Güvenlik Açısından Analizi

Bu sistemler, konvansiyonel nükleer yakıt tedarik zinciriyle (U-235) uyumlu çalışarak enerji üretmeyi planlar. Örnek tasarımlar Terrestrial Energy IMSR , ThorCon'dur.

- **Yakıt:** Tasarıma bağlı olmak üzere genellikle düşük zenginlikteki uranyum veya yüksek ayarlı düşük zenginlikteki uranyum (HALEU- %5-%20 U-235) kullanılır.
- **Güvenli ve Basit Yaklaşım:** Konvansiyonel yöntem içerdiği için teknolojinin ticarileşmesini ve lisanslandırmayı hızlandırır ve karmaşık kimyasal işleme tesislerine ihtiyaç duymadan, basit çevrimlerle işletilebilir.

Başlangıç Yakıtı

Bir ETR'nin tasarımında, reaktörün kritikliğe nasıl ulaşacağı da temel bir mühendislik problemidir. Bu bağlamda başlangıç yakıtı kritikliğe ulaşmada önemli rol oynamaktadır. Başlangıç yakıtı, 2.4 başlığında tartışılan reaktör tipine göre değişecektir.

Toryum Döngüsü ve U-233 ile Başlatma

Reaktör tipi üretken ise doğurgan malzeme olarak Th-232'nin yanı sıra toryumu U-233'e dönüştürebilmesi için dışarıdan bir fisil malzeme desteğine ihtiyaç vardır. Fisil malzeme olarak U-233 kullanılması bir seçenektir. Yalnız U-233 doğada bulunmaz. Başka reaktörlerde toryumun ısınlanmasıyla üretilmelidir.

- **Envanter Örneği:** ETHR tasarımı için yapılan analizlerde, bu strateji için yaklaşık başlangıç envateri aşağıda belirtildiği gibi öngörülmektedir [5]
 - **Uranyum (U-233):** ~5060 kg
 - **Toryum (Th-232):** ~38300 kg
- **Nükleer Silahlanma:** Diğer fisil yakıtlarda olduğu gibi nükleer silah üretme teorik olarak mümkündür. Yalnız, U-233 üretiminden gelen yan ürünlerdeki yüksek radyasyon U-233'ü kendinden korumalı hale getirir.

Toryum Döngüsü ve Zenginleştirilmiş Uranyum ile Başlatma

Toryum döngüsü için fisil yakıt olarak zenginleştirilmiş uranyum da kullanılabilir. Bu durumda uranyum zenginleştirme tesisleri gibi konvansiyonel sistemlere gereksinim duyulacaktır. Mevcut nükleer endüstrinin tedarik zinciriyle en uyumlu olan ve ticarileşmesi en muhtemel kısa vadeli çözümdür.

- **Yakıt Tipi:** Genellikle %5'in altında zenginleştirilmiş düşük zenginlikte uranyum veya %5-%20 arasında zenginleştirilmiş yüksek ayarlı düşük zenginlikte uranyum kullanılır.
- **Nükleer Silahlanma:** Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) tarafından halihazırda tedarik ve kontrol sistemi kurulmuş olduğundan, alternatifler arasında en emniyetli seçenektir.

Toryum Döngüsü ve Plütonyum & Trans-uranyumlar ile Başlatma

Alternatif olarak TRU yakıt ile de sistem kritik hale getirilebilir. Bu strateji, ETR teknolojisinin atık yakıcı potansiyelini kullanarak reaktörü başlatmayı hedefler. Konvansiyonel nükleer santrallerden çıkan kullanılmış yakıtların içindeki uzun ömürlü izotoplar, ETR için iyi bir başlangıç yakıtıdır. Bu izotoplar reaktörde yandıkça nötron üretir ve bu nötronlar toryumu uranyuma dönüştürür. Zamanla reaktör, TRU yakıtlı bir sistemden U-233 yakıtlı bir sisteme evrilir.

- **Nükleer Atık:** Konvansiyonel nükleer santrallerde üretilen atıkların miktarını azaltır.
- **Envanter Örneği:** ETHR'nin atık yakıcı konfigürasyonunda başlangıç için toplamda yaklaşık **12.800 kg** TRU elementi gerekmektedir. Bu envanterin detaylı dağılımı şöyledir:
 - **Plütonyum (Pu):** ~11.200 kg

- **Minör Aktinitler:** Neptünyum (~800 kg), Amerikyum (~680 kg) ve K riyum (~115 kg) [5]
- **Nükleer Silahlanma:** Plütonyum, nükleer silahların ana hammaddelerinden biridir. Bu nedenle, Plütonyum ile çalışan sistemler sıkı güvenlik protokollerini gerektirir.

GÜVENLİK ANALİZİ VE PASİF SİSTEMLER

ETRler onlarca farklı tasarım arasından GEN-4 yani yeni nesi nükleer reaktör olarak seçilmiştir. Yeni nesil nükleer reaktörleri konvansiyonel nükleer sistemlerden ayıran en önemli özellikler genelde su yerine, erimiş tuz-kurşun-sodyum gibi akışkanlar kullanması ve pasif güvenlik sistemleri ile donatılmasıdır. Bu sistemler kazaları aktif sistemlerle önlemenin yanı sıra, termodinamik ve fizik yasalarını kullanarak kazanın ilerlemesini engelleyen özelliklere sahip sistemlerdir. Bu bölümde, ETR'lerin güvenlik esasları ve inovatif bir pasif güvenlik sistemi olan Acil Tahliye Sistemi mekanizmasının termo-fiziksel davranışları analiz edilecektir.

Fisyon  r nlerinin Sistemden Uzaklaştırılması ve Güvenli İşletme

Konvansiyonel sistemlerde, yakıt ve fisyon ürünleri yakıt çubuğu içinde birleşiktir. Bu da fisyon ürünlerinin reaktör içerisindeki reaktiviteye etkisini sürdürür ve sistemin kontrolünü zorlaştırır. ETR'lerde ise güvenlik felsefesi, fisyon ürünlerinin devamlı olarak yakıttan ayrıştırılmasına dayanır. Gaz ve uçucu

fisyon ürünleri (Kr, Xe), sıvı yakıtın içinden sürekli olarak kabarcıklanma sistemiyle çekilir. Böylece, reaktör durdurulmadan fisyon ürünleri sistemden çekilerek, hem sistemin daha kolay kontrolü sağlanır hem de bir kaza anında reaktörde bulunan mobil radyoaktif envanter minimize edilerek kaza sonuçları deterministik olarak azaltılır.

Basıncsız İşletme ve Yapısal Bütünlük

Konvansiyonel nükleer santraller tipine göre değişmek üzere 10-15 MPa basınçta çalışırken, ETR'ler tuzların yüksek kaynama noktası (1400°C+) sayesinde atmosferik basınca yakın seviyelerde işletilir. Bu durum yüksek basınçlı patlama riskini ortadan kaldırır ve reaktör tankının daha ince cidarlı üretilmesine olanak tanıyarak hem maliyetleri azaltır hem de üretimi kolaylaştırır.

Pasif Acil Tahliye Sistemi (EDS)

ETRler kaza durumlarında pasif olarak devreye giren ve yakıt tuzunun kritik altı tahliye tankına taşınmasını sağlayan EDSler ile donatılmıştır. EDSler, kaza anında artan sıcaklık ile pasif olarak eriyen katı tıpadan, yakıt tuzunun reaktörden tahliye tankına tahliyesini sağlayan tahliye borusundan ve tahliye tankından oluşur. Tahliye tankına tahliye edilen yakıt tuzu, kritik altı bir sistem olduğu için burada yeni fisyon gerçekleştirmez yalnız bozunum ısısı kaynaklı ısı üretimine devam eder. Üretilen bozunum ısısı, pasif ısı uzaklaştırıcı sistemle uzaklaştırılması gerekir, bunun için pasif olarak çalışan ısı pompaları tasarlanmaktadır.

Katı Tıpanın Geometrisinin Belirlenmesi ve Güvenliğe Etkisi

Reaktörün altında, aktif hava soğutması ile katı halde tutulan tuzdan oluşan katı tıpa bulunur. Kaza anında soğutma otomatik durur, reaktörde de soğutma durur ve sıcaklığın yükselmesi ile tıpa erir ve yakıt tuzu yerçekimiyle tahliye tankına akar.

Katı tıpanın tasarımı, geometrisi ve konumu sistemin pasif olarak çalışması açısından önem arz etmektedir. Yapılan son deneysel ve sayısal çalışmalarda şu kritik parametreler tespit edilmiştir:

- **Geometrinin Erime Süresine Etkisi:** Donma vanasının düzleştirilmiş kesitinin kalınlığı, açılma süresini doğrudan etkiler. Yapılan deneylerde (HITEC tuzu ile), kesit kalınlığı azaldıkça erime süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, 4.7 mm kalınlığındaki bir kesit ortalama 1290 saniyede erirken, 7.5 mm kalınlığındaki kesit 910 saniyede erimektedir. Bu durum, daha ince kesitlerde akışkan hacminin azalması ve ısı transferi dinamiklerinin değişmesiyle açıklanır[6]
- **Erime Mekanizması:** Nümerik analizler, erimenin boru çeperinden başladığını göstermiştir. Boru malzemesinin (Hastelloy-N) ısı iletkenliğinin tuzdan yüksek olması, ısının metal üzerinden hızla iletilmesini ve tıpanın önce çeperle temasını keserek yerçekimi etkisiyle düşmesini sağlar [7].
- **Tıpanın Konumu:** Tıpanın konumu çok iyi belirlenmelidir. Konum belirlenirken, reaktöre gereğinden fazla yakın olması, reaktör sıcaklığının ani değişimlerinden etkilenerek istenmeyen bir erimeye ve tahliyeye sebep olabilir. Diğer taraftan, reaktörden çok uzak olması da hedeflenen süre içerisinde erimeyi ve tahliyeyi engeller. Bu sebeple, konumun belirlenmesi ile ilgili nümerik ve deneysel birçok çalışma yapılmıştır. Literatürdeki sayısal analizler, bu riskleri dengelemek için donma vanası ile reaktör çekirdeği arasında **en az 10 cm** mesafe olması gerektiğini göstermektedir [8].

Tahliye borusunun tasarımı da tahliye süresine etki eden bir diğer önemli parametredir. Tasarım parametreleri boru sayısı, boru çapı ve boru yüksekliğidir. Boru sayısı mümkün oldukça artırılmalı

böylece nükleer güvenlikteki yedeklilik prensibi takip edilmelidir. Boru çapının artırılması tahliye süresini kısaltır, yalnız çok fazla artırılan çap, katı tıpanın erimesini geciktireceğinden bu iki parametre iyi optimize edilmelidir. Literatürden bu optimizasyonu yapan çalışmalar bulunmaktadır [9].

Tahliye tankının güvenlik açısından tasarımı, yedeklik prensibi gereği birden fazla tankın yer alması, yakıt tuzunun tamamını tahliye edecek kapasitede tank geometrisi belirlenmesi ve pasif güvenlik sistemi ile ısı uzaklaştırılırken tank içerisinde oluşacak sıcaklık yükselmelerine dayanacak malzeme seçimi olarak değinilebilir. Literatür çalışmaları, EDS'nin diğer sistem elemanlarında kullanılan Hastelloy-N malzemesinin tahliye tankı içinde kullanılabileceğini göstermektedir [9].

TEKNOLOJİ HAZIRLIK SEVİYESİ VE MEVCUT PROJELER

ETRler, tasarım aşamasından ve laboratuvar ölçeğindeki deneylerden ticari gösterim aşamasına geçmektedir. Yukarıda detaylandırdığımız sınıflandırma doğrultusunda farklı ülke ve araştırma kurumları farklı sınıflandırmaya ait ETRler tasarlamaktadır. Konvansiyonel sistemlerden, küçük modüler ve hatta mikro-tip reaktör tasarımlarına geçiş planlandıkça birçok girişimci özel firma da bu tasarım yarışına girmektedir. IAEA tarafından oluşturulan ARIS (Advanced Reactor Information System) veri tabanı, bu projelerin teknik özelliklerini ve geliştirilme statülerini kayıt altına almaktadır [10]. Bu bölümde farklı

sınıflandırmaya giren tasarımların, teknik parametreleri ve tasarım aşamaları açıklanarak karşılaştırmalı bir analiz yapılacaktır.

Tablo 2 Sıvı Yakıtlı & Termal Spektrumlu Projeler

Reaktör Adı	Geliştirici / Ülke	Güç (MWe)	Yakıt & Moderatör	Mevcut Durum
TMSR-LF1	SINAP / Çin	2 (Pilot)	Yakıt: Th + U Mod.: Grafit	Pilot uygulama çalıştırıldı
IMSR-400	Terrestrial Energy / Kanada	195	Yakıt: LEU (U-235) Mod.: Grafit	Lisanslama
ThorCon (TMSR-500)	ThorCon Power / ABD–Endonezya	250	Yakıt: Th + LEU Mod.: Grafit	Tasarım / Test
MSR-Fuji	TTS / Japonya	200	Yakıt: Th + U-233 Mod.: Grafit	Konsept tasarım

Tablo 3 Katı Yakıtlı & Tuz Soğutmalı Projeler

Reaktör Adı	Geliştirici / Ülke	Güç	Yakıt & Soğutucu	Mevcut Durum
KP-FHR (Hermes)	Kairos Power / ABD	140 MWe	Yakıt: TRISO (katı) Soğutucu: FLiBe	İnşaat izni alındı (ABD NRC onaylı)
TMSR-SF	SINAP / Çin	100 MWth	Yakıt: TRISO (katı) Soğutucu: FLiBe	Konsept / Ar-Ge

Tablo 4 Sıvı Yakıtlı & Hızlı Spektrumlu Projeler

Reaktör Adı	Geliştirici / Ülke	Güç (MWe)	Yakıt & Moderatör	Mevcut Durum
MSFR	CNRS / Avrupa Birliği	1500	Yakıt: Th + TRU Mod.: Yok	Ar-Ge (SAMOSA FER)
MCFR	TerraPower / ABD	~1000	Yakıt: U-Pu Mod.: Yok	Malzeme testleri (SET tesisi kurulumu)
SSR-W	Moltex Energy / İngiltere	300	Yakıt: Atık (Pu) Mod.: Yok	Tasarım
MOSART	Kurchatov Institute / Rusya	1000	Yakıt: TRU (Atık) Mod.: Yok	Konsept tasarım

Sıvı Yakıtlı ve Termal Spektrumlu ETR & IMSR-400

Geliştirici: Terrestrial Energy Inc.-Kanada

IMSR-400 (Integral Molten Salt Reactor), ETR teknolojisinin ticarileşmeye en yakın örneklerinden biri olarak kabul edilmektedir. Tasarım felsefesi, fabrikada üretilen ve ömrünü tamamladığında bütünsel olarak değiştirilebilen modüler bir yapıya dayanır. Reaktör konsepti Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Temel Teknik Parametreler

IMSR-400’ün karakteristik özellikleri şunlardır:

- **Güç Kapasitesi:** 442 MW_{th} / 195 MW_e.
- **Termal Verimlilik:** %44, konvansiyonel nükleer santrallerde verimlilik ortalama %35’dir.

- **Nötron Spektrumu:** Termal.
- **Moderatör:** Reaktör çekirdeğinde dikey olarak yerleştirilen grafit elemanlarından oluşur.
- **Yakıt Tipi:** Standart Düşük Zenginlikte Uranyum (LEU, <5 U-235). Yakıt, florür tuzu içinde çözülmüş UF₄ formundadır.
- **İşletme Sıcaklığı:** 600°C-700°C. Endüstriyel proses ısısı kullanımı için uygundur.
- **Tasarım Ömrü:** Santralin ömrü 60 yıl iken, reaktör çekirdeği her 7 yılda bir yenilenir.

İnovatif Tasarım & Bütünleşik Çekirdek Ünitesi

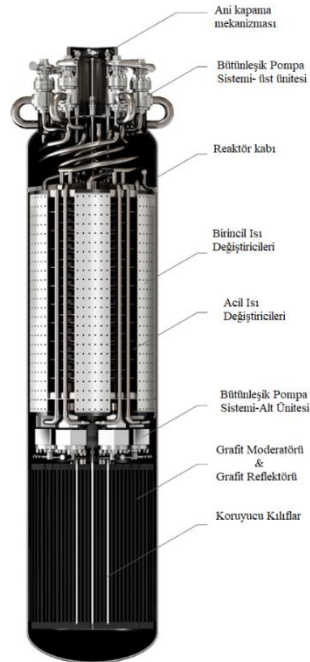
IMSR tasarımını diğer ETR'lerden ayıran en önemli özellik, Ömür Boyu Mühürlü Çekirdek konseptidir.

- **Çalışma Mantığı:** Reaktörün kalbi, grafit moderatör, birincil ısı değiştiriciler ve pompalar tek bir sızdırmaz tankın içine yerleştirilmiştir.
- **7 Yıllık Döngü:** Nötron bombardımanına maruz kalan grafitin ömrünün sınırlı olması ETR için bir sorundur. IMSR bu sorunu, grafitin ömrü dolduğunda reaktör ünitesini tamamen devreden çıkarıp, yanındaki siloda hazır bekleyen yeni bir üniteye geçerek çözer. Eski ünite, yerinde güvenli bir şekilde soğumaya bırakılır ve yüksek seviyeli atık deposu görevi görür.
- **Avantajı:** Bu yöntem, tesiste sıvı yakıtın filtrelenmesi veya grafit bloklarının tek tek değiştirilmesi gibi karmaşık ve riskli bakım operasyonlarını ortadan kaldırır.

Güvenlik ve Yakıt Çevrimi

- **Pasif Güvenlik:** Sistem, atmosferik basınca yakın bir seviyede çalışır. Acil durumlarda, reaktörün dış yüzeyinden doğal hava sirkülasyonu ile pasif soğutma sağlanır. Ayrıca, tuzun yüksek ısı kapasitesi, reaktörün termal ataletini artırarak sıcaklık değişimlerine karşı dirençli olmasını sağlar.
- **Yakıt Çevrimi:** IMSR bir Yakıcı/Dönüştürücü reaktördür. Toryum döngüsü yerine, mevcut nükleer yakıt tedarik zinciriyle tam uyumlu olan Düşük Zenginlikli Uranyum kullanır. Bu strateji, ticarileşme önündeki yeni yakıt türü lisanslama engelini ortadan kaldırarak, ticarileşme sürecini hızlandırır.

Resim 4 IMSR bütünleşik çekirdek ünitesinin kesit görünümü



Sıvı Yakıtlı ve Hızlı Spektrumlu ETR & ETHR

Geliştirici: CNRS-Fransa öncülüğünde Avrupa Birliği Konsorsiyumu (SAMOFAR / SAMOSAFER Projeleri)

Ergimiş Tuz Hızlı Reaktörü (ETHR), Avrupa Birliği'nin ETR araştırmalarındaki referans tasarımıdır. ETHR'yi diğerlerinden ayıran en temel özellik, **moderatörsüz** olması ve toryum döngüsünü "üretken" modda çalıştırabilmesidir.

Temel Teknik Parametreler

ETHR'nin SAMOFAR ve SAMOSAFER projesinde yapılan araştırma ve analizler sonucu belirlenen referans tasarım parametreleri şunlardır:

- **Güç Kapasitesi:** 3000 MW_{th}/ ~1500 MWe.
- **Nötron Spektrumu:** Hızlı. Bu yüzden moderatör kullanılmaz.
- **Yakıt Tipi:** Florür tuzu içinde çözünmüş aktinidler.
 - *Yakıt Tuzu:* %77.5 LiF - %22.5 (Ağır Çekirdek)F4.
 - *Ağır Çekirdekler:* Başlangıç stratejisine göre Th-232 ve U-233 veya TRU karışımı.
- **Tuzun Erime Noktası:** Yaklaşık 459°C.
- **İşletme Sıcaklığı:** 650°C -750°C
- **Yakıt Hacmi:** Toplam yakıt tuzu hacmi 18 m³'dür. Bu tuzun yarısı çekirdekte, yarısı ısı değiştiricilerde dolaşım halindedir.

İnovatif Tasarım & Moderatörsüz Yapı ve Toryum Döngüsü

ETHR, termal spektrumlu ETR tasarımlarının en büyük zayıf noktası olan grafit ömrü sorununu kökten çözer.

- **Grafitin Kaldırılması:** Hızlı nötron spektrumu kullanıldığı için nötronları yavaşlatacak grafitte ihtiyaç duyulmaz. Bu sayede reaktör çekirdeği sadece yakıt tuzunun aktığı katı hiçbir madde bulunmayan boş bir tanktan ibarettir. Grafit kullanılmadığından değiştirme ihtiyacı ve atık yönetimi zorunluluğu da ortadan kalkar.
- **Toryum Üretkenliği:** Hızlı spektrumda, Toryum-232'den U-233 üretimi daha verimlidir.
- **Başlangıç Esnekliği:** Reaktör, U-233 fisil yakıtına erişimin olmadığı durumlarda, konvansiyonel nükleer santrallerin atıkları olan TRU ile de başlatılabilir (Bkz. Bölüm 2.5). Bu senaryoda ETHR, hem enerji üretir hem de nükleer atıkları yakar.

Güvenlik ve Atık Yönetimi

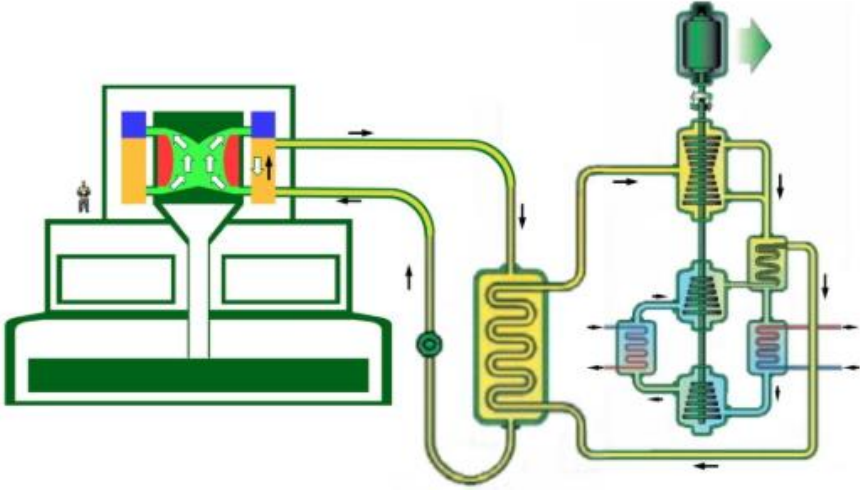
- **Pasif Güvenlik:** ETHR pasif güvenliği merkeze koyan bir anlayış ile tasarlanmıştır. Bölüm 3.3'de detaylı anlatılan EDS ETHR'lerde tamamen pasif olarak çalışır ve kaza durumunda sistemin güvenli bir şekilde kapanmasını ve bozunum ısısının uzaklaştırılmasını sağlar.
- **Kabarcıklama Sistemi:** Hızlı spektrumda nötron ekonomisini korumak için fisyon ürünlerinin temizlenmesi kritiktir. ETHR'de, reaktör çalışırken tuzun içine helyum gazı kabarcıkları enjekte edilir. Gaz halindeki fisyon ürünleri ve metalik parçacıklar bu kabarcıklara tutunarak yüzeye taşınır ve sistemden uzaklaştırılır. Bu işlem ile, reaktörün durdurulmasına gerek kalmadan günde yaklaşık 40 litre tuz sürekli işlenir.

Katı Yakıtlı ve Tuz Soğutmalı ETR & KP-FHR

Geliştirici: Kairos Power -ABD

KP-FHR, sıvı yakıtlı ETR'lerden farklı olarak yakıtı sıvı tuz içinde çözmez; bunun yerine katı formdaki **TRISO** yakıtını, **FLiBe** tuzunun üstün soğutma özellikleriyle birleştiren hibrit bir tasarımıdır. Bu tasarım, henüz ticarileşmemiş sıvı yakıtlı reaktörlerin getirdiği lisanslama zorluklarını aşarken, düşük basınçlı tuz soğutmanın güvenlik avantajlarını kullanmayı hedefler.

Resim 5 ETHR şematik gösterimi



Temel Teknik Parametreler

KP-FHR'nin ticari ölçekli tasarım parametreleri şunlardır:

- **Güç Kapasitesi:** 320 MW_{th} / 140 MW_e
- **Nötron Spektrumu:** Termal.
- **Moderatör:** Grafit hem moderatör hem de reaktör reflektörü olarak kullanılır.
- **Yakıt Tipi:** TRISO
 - **Form:** Tenis topu büyüklüğünde kürecikler.
 - **Zenginlik:** %19,75 U-235 (HALEU).

- **Soğutucu:** FLiBe Tuzu.
- **İşletme Basıncı:** Yaklaşık atmosferik basıncı.
- **Çıkış Sıcaklığı:** ~650°C.

İnovatif Tasarım & TRISO Yakıt ve Çakıl Yatağı

KP-FHR, gaz soğutmalı reaktörlerde kanıtlanmış bir teknoloji olan çakıl yatağı (Pebble Bed) konseptini kullanır.

- **TRISO Güvenliği:** Yakıt, mikroskobik seramik katmanlarla kaplanmış uranyum parçacıklarından oluşur. Bu kaplama, fisyon ürünlerini 1600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bile yakıtın içinde hapseder.
- **Yüzen Yakıtlar:** Kürecikler FLiBe tuzundan daha düşük yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle, yakıtlar reaktörün dibinde durmaz; soğutucu tuzun içinde yüzerler. Yakıt beslemesi alttan yapılır, tükenen yakıtlar üstten toplanır.

Güvenlik ve Lisanslama

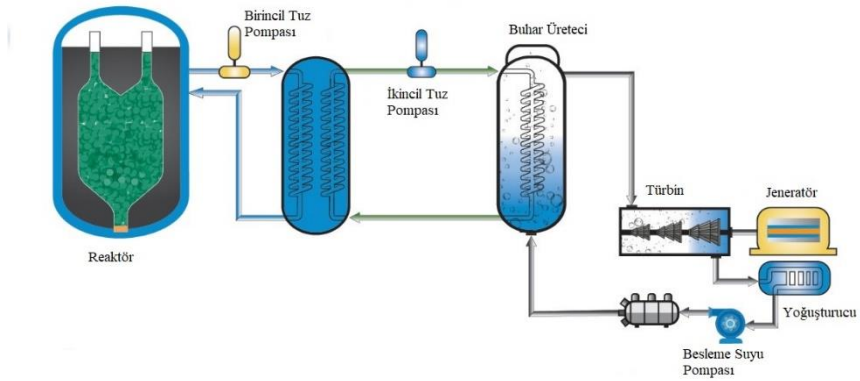
- **Pasif Güvenlik:** Diğer tasarımlardaki pasif güvenlik sistemlerinin yanı sıra ısı ve fisyon ürünleri TRISO yakıtının içinde tutulur. Böylece diğer sistemlerde olmayan yeni bir koruma kılıfı oluşturulmuş olur.
- **Hermes Test Reaktörü:** Kairos Power, bu teknolojiyi kanıtlamak için Tennessee'de "Hermes" adında 35 MW_{th} gücünde, elektrik üretmeyen bir test reaktörü için inşaat izni alarak inşaaata başlamıştır.

SONUÇ VE GELECEK ÖNGÖRÜLERİ

Bu bölüm kapsamında incelenen teknik göstergeler, güvenlik değerlendirmeleri ve tasarım çeşitliliği; ETR teknolojisinin, konvansiyonel nükleer reaktörlerin en kritik iki sorunu olarak kabul edilen kaza riski ile nükleer atık problemlerine, çözüm sunmayı hedeflediğini göstermektedir.

ETR'ler sadece elektrik üreten santraller olarak değil, elektrik dışı uygulamalarda da kullanılabileceklerdir. 750°C 'yi bulan yüksek çıkış sıcaklıkları, bu reaktörleri hidrojen üretimi, sanayide ısı kullanımı, sentetik yakıt eldesi ve su desalinasyonu için ideal kılmaktadır. ETR'lerin sunduğu bu fırsatlar, birçok ülkenin ve girişimci firmanın dikkatini çekmektedir.

Resim 6 KP-FHR şematik gösterimi [11]



Danimarka merkezli Seaborg Technologies, nükleer enerjiyi karaya bağımlı olmaktan çıkarıp yüzer enerji gemileri konseptine taşıyarak yeni bir iş modeli ortaya koymaktadır. Türkiye'nin savunma sanayiindeki öncü firması BAYKAR, nükleer enerji alanına stratejik bir giriş yaparak Küçük Modüler Reaktörler ve özellikle ETRler üzerine Ar-Ge çalışmalarına başladığını duyurmuştur [12].

Sonuç olarak; ETR, malzeme bilimi ve lisanslama alanındaki zorluklara rağmen, sunduğu birçok avantaj ile emre amade temiz enerji portföyünün parçası olma potansiyelini taşımaktadır. Çin'in TMSR-LF1 test reaktöründe yakaladığı başarı ve ilk defa toryumdan fisil uranyum yakıt eldesi, bu teknolojinin teoriden ve laboratuvarlardan çıkarak ticarileşmeye doğru yol katettiğini ispatlamaktadır. ETR teknolojisi, Türkiye gibi gelişmekte olan ve enerji bağımsızlığını hedefleyen ülkeler için stratejik bir fırsat penceresidir.

Kaynakça

- [1] R. C. Robertson, “MSRE Design and operations report : Part I - Description of reactor design,” *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*, pp. 1–534, 1965.
- [2] F. I. GEN-4, “GIF 2020 Annual Report,” 2020.
- [3] E. Merle, “Concept of Molten Salt Fast Reactor,” 2017. [Online]. Available: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2017-05/07_elsa_merle_france.pdf
- [4] O. Beneš and R. J. M. Konings, “Thermodynamic properties and phase diagrams of fluoride salts for nuclear applications,” *J Fluor Chem*, vol. 130, no. 1, pp. 22–29, 2009, doi: 10.1016/j.jfluchem.2008.07.014.
- [5] E. Merle, “CONCEPT OF EUROPEAN MOLTEN SALT FAST REACTOR (MSFR),” 2017.
- [6] M. C. Kahraman and S. Şentürk Lüle, “Numerical investigation of behaviour of small modular molten salt reactor freeze plug under various reactor operating conditions,” *Numeri Heat Transf A Appl*, vol. 85, no. 11, pp. 1747–1766, Jun. 2024, doi: 10.1080/10407782.2023.2210258.
- [7] M. C. Kahraman, T. Korinek, J. Skarohlid, and R. Skoda, “Numerical and experimental investigation of melting and solidification of molten salt in freeze valve,” *Appl Therm Eng*, vol. 269, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126206.
- [8] M. Ilham, I. Kuncoro Aji, and T. Okawa, “Numerical investigation on the effects of fundamental design parameters on freeze plug performance in molten salt reactors,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 403, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.nucengdes.2022.112144.

- [9] M. C. Kahraman and Ş. Lüle, “Calculating Fuel Salt Drain Time in Molten Salt Reactor Emergency Draining Systems: Analytical and Numerical Approaches,” in *Komando 2025*, 2025.
- [10] IAEA, “Advanced Reactor Information System,” <https://aris.iaea.org/>. Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://aris.iaea.org/>
- [11] Kairos Power, “KP-FHR Technology.” Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://kairospower.com/technology/>
- [12] Savunma Hattı, “Selçuk Bayraktar Nükleer Teknoloji Geliştiriyor!,” 2025. Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://savunmahatti.com/selcuk-bayraktar-nukleer-teknoloji-gelistiriyor/>

BÖLÜM 15

DÖNER MAKİNALARDA ERKEN UYARICI BAKIM (EUB) YÖNTEMİYLE ARIZA TESPİTİ: RULMAN HASARLARININ TEŞHİSİ

Recep KILIÇ¹
Recep KOZAN²

Özet

Gelişmiş ülkelerdeki sanayilerde titreşimlerin ölçülmesi ve izlenmesi yolu ile gerçekleştirilen bakım teknikleri sayesinde önemli ölçüde üretim artışı ve tasarruf sağlanmıştır. Titreşim mühendisliğinin sanayide uygulaması ile ortaya çıkan Erken Uyarıcı Bakım (EUB) son yıllarda ülkemizde de ilgi uyandırmış ve birçok işletme konuyu araştırmaya başlamıştır. Çalışmanın amacı sanayileşmiş ülkelerde uygulanmakta olan bu bakım yönteminin ülkemiz sanayisinde de kullanılabileceğini göstermek ve bu bakım sisteminin sanayiye getireceği faydaları araştırmaktır.

Anahtar Kelimeler: Erken uyarıcı bakım, Titreşim analizi, titreşim ölçümü, Arıza Teşhisi

¹ Doç. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Orcid: 0000-0003-1580-1997

² Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Orcid: 0000-0001-8544-883X

Giriş

Günümüzde çeşitli fabrikalarda yer alan makinaların bakım işlemlerini azaltmak ve üretim faaliyetlerini aksatmamak amacıyla titreşim ölçümlerinden giderek artan bir şekilde yararlanılmaktadır. Çok sayıda dönen ekipmanın bulunduğu işletmelerde, titreşimin izlenmesi ve analizi işletmenin güvenliği ve verimliliği açısından son derece önemlidir. Eskiden deneyimli bakım ve işletme mühendisleri dokunarak ve dinleyerek makinaların sağlıklı çalışıp çalışmadığını anlayabilirlerdi. Günümüzde insan-makina arasındaki bu tip bir ilişki ekonomik açıdan verimli değildir. Bir de yeni teknoloji ile üretilmiş makinalar çok yüksek hızlarda çalışmaktadırlar. Bu yüzden titreşimler de çok yüksek frekanslarda oluşmakta ve ancak gelişmiş cihazlar kullanılarak ölçülebilmektedirler.

Titreşim oluşturan kuvvetleri üreten makina elemanlarına (örneğin yataklara) makinayı açmadan ulaşmak ve tahrik kuvvetlerinin oluşturduğu titreşimi makinanın dışından ölçmek mümkündür. Pek çok sistemin tipik bir işletme titreşim düzeyi vardır ve frekans spektrumunun şekli iyi çalışma koşulları için karakteristiktir.

Her makina parçasının karakteristik titreşimi vardır. Rulmanlar belli frekansta titreşim oluştururlar, balans bozukluğundan ileri gelen titreşimler ise bir başka frekansta kendini gösterir, diğer bazı arızaları gösteren titreşimler de aynı kolaylıkla tanımlanabilir. Makinaların titreşimlerinin periyodik ölçümleri yapılarak titreşim seviyesinin değişim hızından makinanın ne kadar daha süre bakım görmeden çalışabileceği kestirilebilir. Bu şekilde makinaların titreşim spektrumlarından, arızaları oluşmadan önce bildirerek arızaların boyutunu küçülten bu yöneme erken uyarıcı bakım (EUB) denilmektedir. EUB tekniklerinden biri titreşim analizinden faydalanarak arıza tespiti ile ilgili literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları;

Aktürk vd. (1997) çalışmalarında açışal temaslı iki rulman ile yataklanmış mil-rulman sisteminde eksenel ve radyal titreşimleri incelemek için matematiksel model oluşturulmuş, bu modelle elde edilen matematiksel ifadeler nümerik olarak çözülmüş, hasarsız bilyelerin sayısında ve ön yükteki değışimlerin mil titreşimine olan etkisi incelenmiştir. Bilye sayısı ve ön yükün doğru seçilmesi durumunda titreşimin genliğinin önemli oranda azaldığı görölmüştür.

Aktürk ve Gohar (1998) çalışmalarında iki açışal bilyeli rulman ile yataklanmış bir mil-rulman sisteminde bilye boyutundaki değışmenin milin eksenel ve radyal titreşimlerine olan etkisi incelenmiştir. Bunun için bir bilgisayar programı oluşturulmuş ve sonuçlar zaman ve frekans ortamında sunulmuştur. Ölçü dışı bilyelerin kafes hızında ve harmoniklerinde titreşimler oluşturduğu görölmüştür.

Belek (1990) pompalarda karşılaşılan titreşim ve gürültü sorunlarını genel olarak ele almıştır. Pompalarda titreşim ve gürültü yaratan etkenler gözden geçirilmiş ve pompa üzerinde yapılan titreşim ölçümlerinin frekans karakteristiğine bağılı olarak sistemdeki problemlerin ne şekilde belirleneceğı üzerinde incelemede bulunmuştur. Daha sonra pompalarda gürültü ölçümlerinin nasıl yapılacağını incelemiştir.

Crawford ve Crawford (1992) yapmış oldukları çalışmalarında öncelikle genel olarak titreşim teorisi hakkında bilgi verdikten sonra titreşim ölçümünde kullanılan algılayıcılar ve genel analiz teknikleri hakkında bilgi vermiştir. Ayrıca makinalarda oluşabilecek rulman arızaları, balanssızlık, eksen kaçıklığı ve mekanik gevşeklik tespitinin titreşim analizi ile nasıl yapılacağını, elektrik motoru, pompalar, dişli kutuları, fanlar ve dizel motorlarında meydana gelecek arızaların titreşim analizi ile nasıl tespit edilebileceğini araştırmıştır.

Titreşim analizi ile arıza tespiti üzerinde en kapsamlı çalışmayı Gelen (1993) yapmıştır. Gelen çalışmasında dönen makinaları gruplara ayırarak her bir makinanın arızalarının titreşim analizi yardımı ile nasıl tespit edilebileceğini anlatmıştır. Ayrıca çalışmasında titreşim spektrum grafiklerinin nasıl analiz edildiğini, bütün arızaların hangi frekansta ortaya çıkacağını ve zaman eksen grafiğinin analizinin nasıl yapılacağını anlatmıştır. Gelen'in yapmış olduğu bu çalışma yarı teorik yarı pratik bir çalışmadır.

Orhan (2002) çalışmasında rulmanlarla yataklanmış dönen makine elemanlarında titreşim analizi kullanılarak kestirimci bakım uygulaması gerçekleştirmiştir. Bu amaçla birçok fan, pompa ve bir kompresörden oluşan makina grubunda periyodik titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiş, elde edilen titreşim bilgileri “frekans analizi” metodu ile değerlendirilerek bu makinalarda zaman içinde oluşan dengesizlik, eksen kaçıklığı, mekanik gevşeklik, rulman ve dişli hasarları ilk oluşma anlarında belirlemiştir. Çalışmada makinalar için büyük risk oluşturan arızaların EUB metodu ile etkili bir şekilde belirlenebileceğini tespit etmiş ve elde edilen sonuçların teori ile uyumunu irdelemiştir.

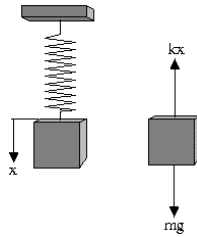
Titreşim Teorisine Giriş

Kütle ve elastisite şartlarına haiz mühendislik sistemleri, izafî hareket yapabilirler. Eğer böyle bir sistemin hareketi, verilen zaman aralığından sonra tekrarlanırsa, böyle bir hareket, titreşim olarak tarif edilir. Diğer bir değışle, Mekanik titreşim bir partikül veya rijit cismin denge konumu etrafında tekrarlı salınımıdır. Dönen makinalardaki ve yapılardaki çoğu titreşimler istenmeyen titreşimlerdir. Eğer dönen makine elemanları dikkatlice dengelenmezse titreşirler. Titreşimler makina ve zeminde hasar meydana getirmelerinin yanı sıra operatörünü de rahatsız eder (Seto,1964; Günay,1998).

Dönen makinaların titreşimlerinin ölçülebilmesi gerek titreşimin önlenmesi gerekse titreşimin meydana getireceği arızaların önceden tespiti açısından önemlidir. Bu nedenle titreşim frekansı ve genliğini ölçebilecek ve ölçülen bu titreşin değerlerini analiz edebilecek ürünler geliştirilmiştir. Bu cihazlar elektronik ve mekanik cihazlardır. Bu cihazlardan istenilen en önemli özellik mekanik titreşimin elektronik sinyale dönüşümünün en iyi bir şekilde yapılmasıdır. Mekanik titreşimin elektronik sinyale dönüştürmek için kullanılan cihazlar algılayıcı olarak adlandırılır. Algılayıcılar makinanın deplasman, hız ve ivmesini ölçerler. Algılayıcı çıkışı olarak ise makinaların hangi frekanslarda ve genliklerde titreşim ürettiğini verir. Frekans makinanın sorununun ne olduğunu ve genlik ise problemin bağıl şiddetini tarif eder. Titreşim hareketleri harmonik, periyodik ve gelişigüzel olabilir.

Basit Harmonik Hareket

Basit harmonik hareket karakteristik olarak sinusoidal veya biraz bozulmuş şeklindedir. Tüm harmonik hareket aynı nokta üzerinden sabit zaman dilimlerinde geçerler, yani periyodiktirler. Aşağıdaki denklemde de görüleceği gibi ivmenin yer değiştirme ile doğru orantılı olduğunu ve sabit noktaya (denge konumuna) yönelmiş olduğunu görülmektedir. Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan çoğu titreşim tipleri bir basit harmonik hareketle temsil edilebilirler.



Şekil 1 Kütle–yay sistemi

$$\ddot{x} = -\frac{k}{m}x \quad (1)$$

Denklem 1 standart tipte bir diferansiyel denklemdir (homojen, ikinci mertebeden sabit katsayılı lineer bir diferansiyel denklem) ve genellikle

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2)$$

formunda yazılır. Birimi rad/s olan katsayısı salınımın frekansı ile ilgilidir. Bu katsayıya doğal dairesel frekans adı verilir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (3)$$

Denklem 2'nin genel çözümü

$$x(t) = B \cos \omega_n t + C \sin \omega_n t \quad (4)$$

Denklem 4'teki ifade

$$x(t) = A \cos(\omega_n t - \phi_c) \quad (5)$$

veya

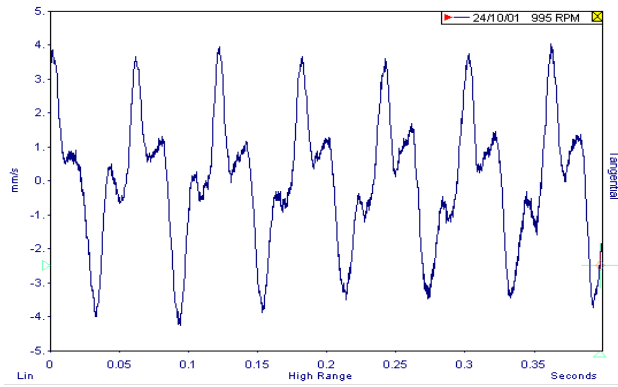
$$x(t) = A \sin(\omega_n t - \phi_c) \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A sistemin titreşim genliğini ϕ_c ise sistemin faz açısını ifade eder (Günay, 1998).

Periyodik Hareket

Titreşimleri periyodik ve periyodik olmayan şeklinde de ikiye ayırabiliriz. Belirli ve eşit zaman aralıkları içinde bütün özellikleri ile aynen tekrarlanan titreşime periyodik titreşim denir.

Periyodik hareket her zaman harmonik hareket olmayabilir. Şekil 2 'de yanlış hizalanmış ve kaplin bağlantısında belirli bir gevşeklik bulunan motor kaplininde şaftın her dönmesinde bir çarpmaya sebep olmakta olduğu görülmektedir. Mekanik gevşeklik olan motor kaplininde şaftın her dönmesinde çarpması olayı periyodik olmasına rağmen, harmonik değildir. Zaman tanım bölgesi grafiğinde belirli bir periyotta bir darbenin olduğu grafikten görülmektedir.



Şekil 2. Periyodik hareket

Gelişigüzel Titreşim

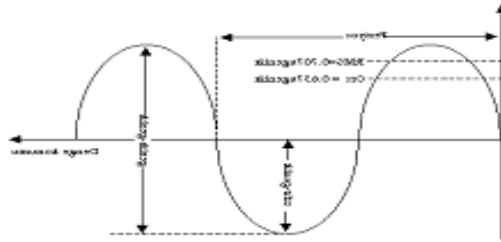
Gelişigüzel titreşim, düzensiz bir tarzda ortaya çıkar ve tüm frekansları içinde barındırır. Gelişigüzel titreşim, tekrar etmeyen herhangi bir harekettir. Gelişigüzel titreşim ses olarak da adlandırılır. Gelişigüzel bir sese ait zaman sinyali verilen aralıkta tüm frekansları ihtiva eder. Makinalarda gelişigüzel titreşimlerin tipik bir kaynağı aşırı mekanik gevşekliliktir.

Gelişigüzel titreşimler, düzenli olarak tekrar etmeleri hariç kompleks titreşim sinyalleri ile aynıdır. Bu yüzden onların frekanslarını işaretlemek zordur. Makinalarda oluşan sürtünmeler, pompalardaki kavitasyon gelişigüzel titreşimlere neden olurlar.

Titreşim Genliği ve Ölçülmesi

Bir kütlenin denge konumundan artı ve eksi yöne yaptığı yer değiştirme miktarına genlik denir. Titreşim genlik seviyesini ifade etmek için dört farklı kavram kullanılmaktadır. Bunlar; sıfır-tepe (Zero-to-peak), tepe-tepe (peak-to-peak), RMS (root mean square) ve ortalama (average) dır. Titreşim genlik seviyelerinin birbirleriyle olan ilişkileri Şekil 2.5’de görülmektedir.

Sıfır-tepe veya tepe genliği sıfır çizgisinden veya denge noktasından pozitif tepe değerinin en üst noktasına veya negatif tepe değerinin en alt noktasına kadar olan mesafedir. Tepe-tepe genliği pozitif tepenin üst noktasından negatif tepenin alt noktasına kadar olan mesafedir. Sinüs dalgası durumunda, tepe-tepe değeri dalga formu simetrik olduğu için tepe değerinin tam olarak iki katıdır.



Şekil 3. Titreşim genliği

Root mean square (RMS) genliği dalga formu hız değerlerinin karelerinin ortalamasının kareköküdür. Sinüs dalga formu durumunda, RMS değeri 0,707X genlik değerine eşittir. Bu durum yalnız sinüs dalgası durumunda geçerlidir. RMS matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir;

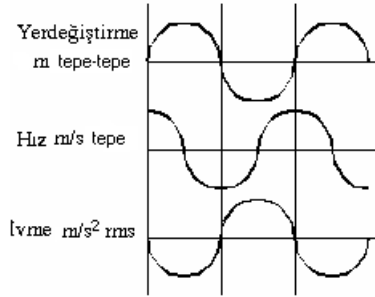
$$RMS = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots V_n^2}{n}} \quad (7)$$

Burada; V_i titreşimin harmonik bileşenleridir. n ise titreşimin harmonik bileşenlerinin sayısıdır.

Yer değiştirme, Hız ve İvme Arasındaki İlişki

Mekanik sistemlerde titreşimin sebebi sistemdeki istenmeyen kuvvetlerdir. Bu kuvvetlere cevap olarak sistemin hareketi ortaya çıkmaktadır. Mekanik sistemlerin hareketi, yer değiştirme, hız ya da ivme olarak tanımlanır. Diğer bir değişle yer değiştirme, hız ve ivme sistem üzerindeki bazı kuvvetlerin sonucudur.

Bir cismin titreşim genliğini ölçmek için titreşim yapan cismin yer değiştirmesine bakılır. Basit harmonik hareket yapan bir cismin yer değiştirme grafiği sinüs dalgası şeklindeyir. Hareketin hız ve ivme grafikleri de sinusoidaldir. Yer değiştirme maksimum noktada iken, hız, cisim yön değiştirdiği için, sıfır, ivme ise maksimum konumdadır. Yer değiştirme denge konumunda iken, hız maksimum durumda ivme ise sıfır olacaktır. Bu durum yer değiştirme, hız ivme arasındaki faz farkının 90° olduğunu göstermektedir (Crawford and Crawford , 1992).

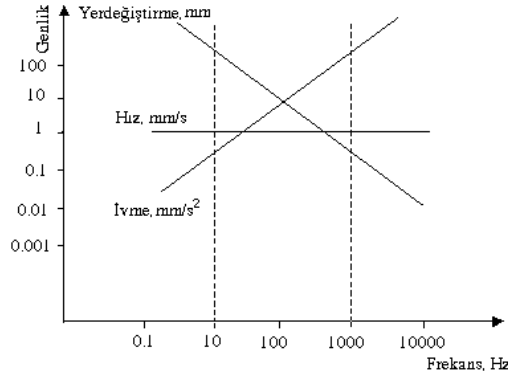


şekil 4. Yer değiştirme, hız ve ivme arasındaki faz açısı ilişkisi.

şekil 5' te Frekans spektrumunda yer değiştirme ve ivmeye karşılık sabit hız grafiği görölmektedir. Yer değiştirme düşük frekanslarda kendisini gösterirken, yüksek frekanslarda kendisini göstermemektedir. Buna karşılık, ivme ise kendisini yüksek frekans bölgesinde gösterirken, düşük frekans bölgesinde kendisini

göstermemektedir. Oysa hız için bu durum bütün frekans bölgesinde sabit genlik olarak kendini göstermektedir (Victor, 1991).

Diğer bir değişle yer değiştirme değeri düşük frekanslarda yüksek değerde iken frekans değeri yükseldikçe yer değiştirme değeri düşmektedir. İvme de ise bunun tam tersi olarak frekans değeri yükseldikçe ivme değeri de yükselmektedir. Bu ise bize düşük frekansların yüksek yer değiştirme seviyeleri, yüksek frekansların ise düşük yer değiştirme seviyeleri ürettiğini göstermektedir. Bu yüzden yer değiştirme algılayıcıları düşük frekanslarda ölçüm yapmak için daha çok etkilidir. Hız algılayıcıları frekans cevabı ise 10 Hz-2000 Hz arasında sabittir. Bu frekans aralığında hız algılayıcılarını kullanmak doğru bir tercihtir. Bununla birlikte yüksek frekanslar yüksek seviyede ivme üreteceğinden, 2000 Hz in üzerindeki frekanslarda ivme algılayıcıları kullanılır (Taylor, 1994).



Şekil 5. Sabit hıza karşılık yer değiştirme ve ivme titreşim genliğinin değişimi (Taylor, 1994)

Bakım Yöntemleri

Yıllar geçtikçe herhangi bir makinanın ya da bir motopompun çalışma performansının analizi, ne zaman bozulabileceğinin kestirilebilmesi büyük önem kazanmıştır. Klasik analiz teknikleri duyu organlarını kullanma esasına dayanır. Bunlar

görme, duyma, dokunma, koklama şeklinde bir bozulma ya da durmaya neden olabilecek farklı çalışma durumlarını saptama yoluna dayanmaktadır. Geleneksel olarak kontrol ve bakım personeli görmeye, dokunmaya dayanan yağ kontrolü, titreşim, gürültü gibi semptomları izler ve değerlendirir. Bu gibi yaklaşımlar makinanın arızalı olup olmadığını anlama konusunda fayda sağlayabilir, ancak motopomp ya da makina tam olarak bozulana dek sorunun ne olduğu hakkında bize hatasız ve güvenilir bilgi veremez. EUB yöntemi ise makina hakkındaki gerekli tüm detaylı bilgileri grafiksel olarak vermektedir (Eyvazian, 1994; Johnson, 1988). Ayrıca gelişen teknoloji ile üretilmiş makinaların eski bakım sistemleri ile serviste tutulabilmeleri düşünülemez. Bakım sistemleri de güncel teknoloji ile paralel olarak gelişmelidir.

Çalışmanın bu bölümünde çağdaş endüstrilerde uygulanan ileri teknolojik bakım yöntemi olan EUB üzerinde durulmakla birlikte diğer bakım türlerine de kısaca göz atılacaktır. Tesislerde uygulanan bakım sistemlerini ayrı ayrı ele almadan önce bakım sisteminin amacının ne olduğuna bir göz atmak gerekmektedir.

Bakım Sisteminin Amacı

Herhangi bir bakım sisteminin en önemli amacı, makinaların arızalanmalarını minimuma indirmek ve mümkünse tamamen önlemektir. Çok sık meydana gelen önemli arızalar makina üzerinde önemli çevresel zararlara sebep olacak ve onarım maliyetini aşırı derecede artıracaktır.

Bakım sisteminin ikinci amacı bakım ihtiyaçlarını önceden tahmin edebilmek ve bu ihtiyaçları tam olarak planlayabilmektir. Eğer bu iki durum gerçekleştirilebilirse yedek parça stoku minimize edilecek ve arızayı gidermek için fazla zaman harcanmayacaktır.

Bakım sisteminin üçüncü amacı ise çalışma süresinde oluşacak arıza olaylarının azalmasının sebep olacağı ürün artışıdır.

Ayrıca kritik makinaların duruş zamanlarını azaltmak vasıtasıyla sistemin çalışma kapasitesini maksimum düzeyde korumaktır.

Bakım Sistemleri

İşletmelerde genel olarak üç tür bakım yöntemi uygulanmaktadır. Aşağıda bu bakım türleri kısaca izah edilmiştir.

Arıza sonrası bakım

Makinaları arıza oluşuncaya kadar çalıştırıp, arızalandığında tamir yoluna gitmeyi esas alan bu sistem bakıma ayıracak kadro ve parası olmayan küçük işletmelerde, çok sayıda yedeği bulunan işletmelerde ve esas olarak henüz işletme planlamasını yapacak teknik düzeye ulaşmamış işletmelerde uygulanan sistemdir. Bu bakım sistemi, işletmelere uzun bir süreden beri hâkim olmuş bakımcılığın en ilkel sistemidir. Bu bakım sisteminin masrafı; önceden planlanmadığı, makinaya zarar verdiği ve fazla zaman aldığı için oldukça yüksektir.

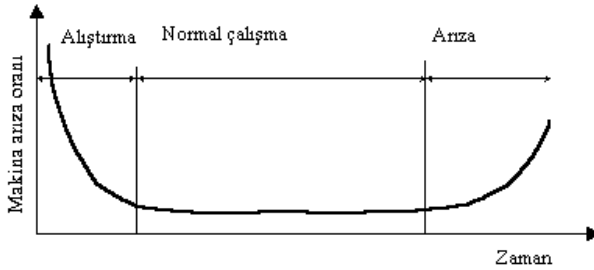
Arıza sonrası bakım sisteminin en büyük zarar kaynağı ikincil arızalardır. Bu sistemle çalışan işletmelerde ufak bir rulman yüzünden bir motor yanabilir. Ayrıca arızanın ne zaman meydana geleceği bilinmediğinden gerçek bir faaliyet planlaması yapmak mümkün olamaz.

Sanayi kuruluşlarında bu bakım sisteminden tamamen vazgeçmek imkânı bulunmamakla birlikte amaç bu bakım sistemi ile gerçekleştirilen bakım oranını minimuma indirmektedir. Çünkü bazen basit arızalar umulmadık arızalara sebebiyet verebilirler.

Periyodik koruyucu bakım

Endüstriyel olarak gelişmiş ülkeler, servis sürecinde oluşmaya başlamış, hasara neden olabilecek hataların, basit düzeltici koruyucu bakım önlemleri ile önlenerek, hasar oluşma sürecinin uzatılabileceğini fark etmişler ve buna bağlı olarak periyodik koruyucu bakım adını verdikleri bakım sistemini geliştirmişlerdir.

Koruyucu bakım, makinaların imalatçısı tarafından önerilen ve gerekirse çalışma şartlarına göre ayarlanan periyotlarda durdurulup bakımının yapılması işlemidir. Bu durumda periyodik koruyucu bakımın rolü, istatistiki olarak olması beklenen arızalar çıkmadan önce planlanarak bakımının yapılmasıdır. Bu durum çalışma sırasındaki arıza oranı ile ilgili “küvet eğrisi” olarak adlandırılan grafikte izah edilmiştir. Bu eğri işletmenin bütün makinalarına uygulanır, eğrinin mantığı iyi şekilde kavranırsa, periyodik koruyucu bakım sistemi işletmeye en iyi şekilde uygulanacaktır (Piotrowski, 2001).



Şekil 6. Makina arıza küvet eğrisi

Hiçbir arızası olmayan makinanın durdurulması üretimi bir süre aksatacaksa da üretim sürerken doğacak ve ikincil arızalara sebep olabilecek arızaların önüne geçilmiş olacaktır. Bakım işlemi makinaların çalışma süreleri, üretilen parçaların sayıları vb. parametreler baz alınarak planlanmalıdır. Periyodik koruyucu bakım sisteminin ana amacı işletmede kullanılan makinaların sürekli olarak aynı güvenilirlikte kalmasını sağlamaktır. Bu bakım sisteminin getirdiği avantajlar; düzenli ve sürekli bakım organizasyonunun sağlanması, beklenmeyen arızaların ortaya çıkma sıklığının azalması, makina ve ekipmanların faydalı kullanım ömürlerini artırmasıdır.

Koruyucu bakım, arıza sonrası bakıma kıyasla daha gelişmiş bir korumadır. Fakat aşırı duruş zamanı oluşturması, arızalı parçalar

ile beraber durumu iyi olan parçaların da gereksiz yere değiştirilmesi sebebiyle yüksek harcamalara sebep olması ve makınayı oluşturan parçaların ömürlerinin farklı oluşu dolayısı ile beklenmeyen arızalardan kaynaklanabilecek üretim kayıplarının tam olarak engelleyememesi dezavantajlarından (Gelen, 1993; Piotrowski, 2000).

Erken uyarıcı bakım (Kestirimci bakım)

EUB makinaların çalışırken performansının izlenmesi esasına dayanır. Bu bakım yöntemi bakım teknolojisindeki son gelişmedir. EUB yönteminde makinalar sürekli bir şekilde izlenirler, bu izleme sadece makinaların ne zaman arızalanabileceğini tahmin etmeyi değil aynı zamanda niçin arızalandığını tahmin etme imkânı da verir. Bu bakım teknolojisi makinalar arızalanmadan önce çoğu makina parçalarının bazı uyarı tipleri vermesi gerçeğine dayanmaktadır. EUB teknolojisinin yararlandığı uyarı tipleri başta titreşim analizi olmak üzere, yağ analizi, sıcaklık analizi, aşınma analizi, basınç analizi ve elektrik motoru akımının izlenmesidir.

Tablo 1 Makinaların çalışma şartlarını belirleyen tablolar (Köse, 1988)

PARAMETRELER	Sıcaklık	Basınç	Sızdırmazlık	Yağ Analizi	Elektrik Akımının İzlenmesi	Titreşim
ARIZA NEDENİ						
Dengesizlik					√	√
Mil Eğilmesi						
Eksen Kaçıklığı	√				√	√
Rulman Arızaları	√			√		√
Kaymalı						
Yatak Arızaları	√	√	√	√		√
Dışlı Arızaları				√		√
Mekanik Gevşeklik						√
Elektrik Motoru Arızaları	√				√	√
Hidrolik ve Aurodinamik Arızalar		√				√

Yukarıdaki tablodan da anlaşılacağı üzere uyarıcı bakım sisteminde en etkili parametre titreşimdir.

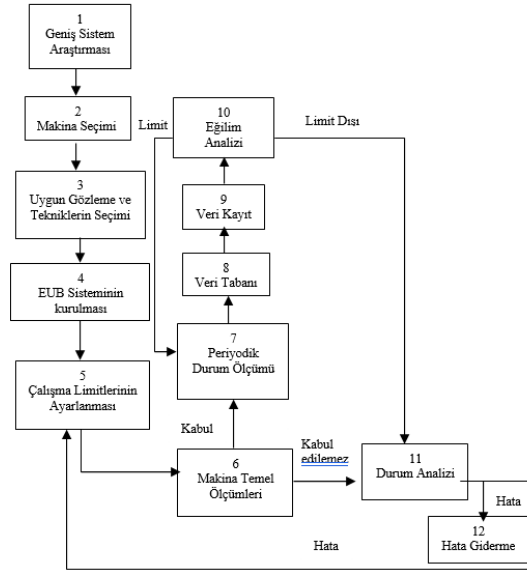
Erken uyarıcı bakım sistemi algoritması

- a. Programa alınacak makinaların listelenmesi
 - Kritik makinaların belirlenmesi
 - Yerleşimlerine göre makinaların gruplar halinde listelenmesi
- b. Her makine için ölçüm alınacak noktaların ve yönlerinin belirlenmesi
- c. Belirlenen her noktada hangi ölçümün yapılacağının belirlenmesi.
- d. Her makine için geçerli titreşim alarm seviyelerinin belirlenmesi.

Makinaların temel ölçüm değerlerinin alınması.

- e. Ölçümler arasındaki zaman aralığının belirlenmesi.

Şekil 7' de EUB sistemi için önerilebilecek bir algoritma şeması görülmektedir.



Şekil 7. EUB algoritma şeması (Köse, 1988)

EUB Sisteminde kullanılan parametreler Titreşim

Tablo 1’de belirtildiği gibi döner hareket yapan makinalarda durum değerlendirmesi yapımında ölçülen ve analiz edilen titreşim bilgileri en önemli ve en değerli parametredir.

Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde EUB sisteminin en önemli parametresi olan titreşim analizi üzerinde durulacaktır. Öncelikle titreşim ölçümlerinin yapılacağı elektrik motoru ve pompa üzerinde titreşim ölçüm noktalarının tespiti, titreşim ölçüm yönlerinin belirlenmesi ve ölçüm periyotları EUB mantığı açısından önemlidir.

Sıcaklık

EUB parametrelerinden önemli bir tanesi de sıcaklık ölçümüdür. Sıcaklık ölçümü, mekaniksel durumun ya da rulman gibi özel parçalara uygulanmış olan yükün tespiti için işe yarar bir parametredir. Elektrik motoru ve santrifüj pompalarda rulman yataklarına yerleştirilmiş olan sıcaklık ölçer ile rulman veya yağdaki

sıcaklık değişimlerinin incelenmesi problemlerin erken fark edilmesine olanak sağlar.

Yağ analizi ve partikül aşınma analizi

EUB sisteminde faydalanılan diğer bir parametre ise yağ ve partikül aşınma analizidir. Bu parametreler özellikle dişli kutuları, rulmanlar ve kaymalı yatakların performansının izlenmesinde önemlidir. Yağdaki yabancı maddelerin miktarındaki artış yağın yağlama özelliklerinin azalmasına neden olur. Bu ise dişli kutularındaki dişlilerin, rulmanların ve kaymalı yatakların aşınmasına neden olur. Ayrıca yağdaki metalik partiküller analiz edilerek hangi parçanın tahrip olduğu ve aşınma miktarı belirlenir.

Elektrik akım analizi

Elektrik motorunun çekmiş olduğu akımın grafiğinin izlenmesi olayıdır. Elektrik motoru çalışırken rotor çubuklarındaki çatlakların ve kırıkların tespitinde çok kullanışlı bir parametredir. Elektrik motoru statorlarının elektrik kaynağı testi henüz başlamakta olan elektrik yalıtımı arızası için kullanılır (Gelen, 1993).

EUB sisteminin işletmelere en iyi bir uygulanabilmesi için bu yöntemde kullanılan parametrelerin hepsinin uygulamaya geçirilmesi gerekir. Tablo 1’de belirtildiği gibi bütün arızaların tespitinde titreşim en belirleyici parametre olduğundan çalışmamızda bu yöntem üzerinde durulacaktır.

Titreşim Ölçüm Teknikleri

Makina performansının izlenmesinde kullanılan titreşim ölçüm cihazları çok çeşitlilik gösterir. Kullanılan titreşim ölçüm cihazları;

- Titreşim metreler
- Titreşim monitörleri
- Titreşim analizörleri

şeklinde üçe ayırmak mümkündür. Titreşim metreler makinalar üzerinden hızlı bir şekilde titreşim değerleri ölçmede kullanılan portatif, şarjlı bataryalarla çalışan ekipmanlardır. Titreşim metrelerin çeşitli tipleri bulunmaktadır. Titreşim monitörleri ise; çok değerli ve üretimde kilit rol oynayan makinalarda kullanılan sabit sistemler, sürekli koruma sağlaması ve arıza halinde makinaı otomatik şekilde devreden çıkarması gibi özellikleri olan cihazlardır. Makina performansının izlenmesinde kullanılan titreşim ölçüm cihazlarından bir diğeri de titreşim analizörleridir. Titreşim analizörleri de titreşim metrelerin ve titreşim monitörlerinin fonksiyonlarını yerine getirebilir, ancak onlardan farklı olarak daha kompleks titreşim karakteristiklerini analiz ve değerlendirme yeteneğine sahiptirler.

Titreşim ölçüm tekniklerinde çok çeşitli algılayıcılar kullanılmaktadır. Bu bölümde algılayıcı tiplerine göre temel özellikleri, algılayıcı seçimi, ölçüm yapılacak makinalarda algılayıcıların yapıştirılma yönleri (ölçüm yönleri) ve ölçüm metotları konuları detaylı olarak incelenmiştir.

Algılayıcı Çeşitleri ve Seçimi

Titreşim algılayıcıları, elektriksel çıkışlarına bağılı olarak, üç farklı grupta ele alınır.

Yer değıştirme algılayıcıları

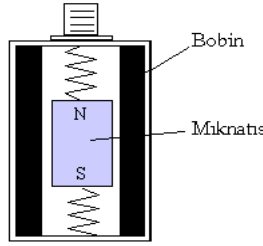
Yüksek hızlarda çalışan çoğı makinalar (Santrifüj pompalar, türbinler, elektrik motorları v.b.) ağır gövdeler, rijit yataklarla bağlanmış hafif rotorlar ve şaftlardan oluşurlar. Ana gövdenin ağırlığından, yatakların rijit olarak bağlanmalarından dolayı ana gövde ve yataklar üzerine yerleştirilmiş olan titreşim algılama algılayıcıları makina rotoru ve şaftına ait gerçek titreşim karakteristiğı konusunda sağlıklı bilgi vermezler. Sağlıklı bilginin alınabilmesi için ölçümlerin makina rotoru ya da şaft üzerinden yapılması gereklidir. Bu da ancak temassız tip algılayıcılar

kullanılarak mümkündür. Yer değiştirme algılayıcıları, mekanik hareketi yer değiştirme ile orantılı olan elektrik sinyaline dönüştürürler. Yer değiştirme algılayıcılarının pek çok değişik tipleri bulunmaktadır. Yer değiştirme algılayıcıları rulman dış bileziği ile rulman yatağı arasındaki izafı hareketi ölçmek için yaygın bir şekilde kullanılır. Yer değiştirme algılayıcılarından okuma aşağıdaki değişkenlerden etkilenir (Crawford, 1992).

- şaft ekseninin değişmesi,
- şaft yüzeyindeki diğer değişkenler ve aşınma,
- şaft malzemesindeki değişmeler,
- Magnetik partikül denetleyicisi tarafından terk edilen magnetik noktaların varlığı,
- Algılayıcı ucunun şaft malzemesinden başka bir metalle temas etmesi,
- Rulman yatağındaki diğer partiküllerle temas etme,

Hız algılayıcıları

Hız algılayıcıları makinaların hareketlerini titreşim hızı ile doğru orantılı olan analog sinyallere dönüştürürler. En yaygın olarak kullanılanı şekil 8’ de görülen sismik hız algılayıcılarıdır. Bu algılayıcılar bir bobin ve mıknatıstan oluşurlar. Magnetik alan ve bobin arasındaki izafı hareket, sistemin hareketinin hızı ile orantılı olan bir elektik akımına neden olur. Bu tertibat böylece direkt olarak titreşim hızı ile orantılı olan bir sinyal üretir. Sismik algılayıcılarda bulunan mıknatıslar sürekli mıknatıslı oldukları için, dış güç kaynağı gerektirmezler.



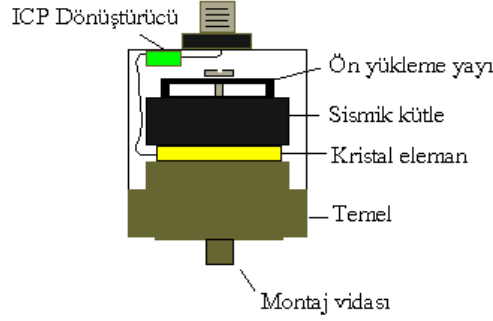
Şekil 8. Hız algılayıcısı

Hız algılayıcıları ile 10 Hz ile 2 kHz'in üzerindeki frekanslar ölçülebilmektedir. Bu tür algılayıcılar çevredeki magnetik alandan etkileneceklerinden güvenilir olmayan ve yanlış olan sonuçlar vermektedirler (Taylor, 1994; Gelen, 1993).

İvme algılayıcıları

İvme algılayıcıları mekanik hareketi sistemdeki titreşim ivmesi ile orantılı olan analog sinyallere çevirirler. İşletmelerde, düşük frekans, orta frekans ve yüksek frekans ivme algılayıcılar olmak üzere üç farklı algılayıcı kullanılır. Düşük frekans ivme algılayıcıları yer değiştirme algılayıcıları ile ölçülemeyen düşük frekansları ölçmek için kullanılır. Bu algılayıcıların frekans aralıkları 0'dan yaklaşık 500 Hz'e kadardır. Orta frekans algılayıcılarının frekans cevapları genellikle 2Hz ile 10 KHz arasındadır. Çoğu işletmelerde yüksek frekans algılayıcılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ivme algılayıcılar 100 KHz in üzerindeki frekansları ölçebilirler.

Çoğu ivme algılayıcılarda en önemlisi duyu bileşenleri olduğu için, quartz veya çok kristalli seramik gibi, piezoelektrik malzemeler kullanırlar. Piezoelektrik ivme algılayıcılar makinaların titreşimlerini ölçmek için standart titreşim algılayıcılar olarak düşünülebilir. Piezoelektrik ivme algılayıcı, algılayıcıları sıkıştırma modu ve shear modu şeklinde çalıştırılacak şekilde iki ayrı modda dizayn edilirler. Sıkıştırılmalı moddaki algılayıcı Şekil 9' da şematik bir şekilde gösterilmiştir (Victor, 1991).



Şekil 9. Piezo-Elektrik ivme algılayıcı

Algılayıcı Seçimi

Algılayıcı seçimi ölçüm yapılacak motopompların hızına bağlıdır. Yüksek hızlarla dönen sürtünmesiz rulmanlardaki etkiler (titreşim oluşturan arızalar) en iyi hız algılayıcıları veya ivme algılayıcıları ile ölçülürler. Düşük hızlardaki sürtünmesiz rulmanlar için ise yerdeğiştirme algılayıcıları gereklidir. Algılayıcı seçimi ile ilgili literatürde pek çok görüş ve tavsiyelerde bulunulmuştur. Aşağıda literatürlerde yapılan öneriler çıkarılmıştır;

1. Eğer 10 Hz'in altındaki frekansların genlikleri veya izafi hareket ölçülmek isteniyorsa, deplasman algılayıcısı kullanılmalıdır. Bazı deplasman algılayıcıları 1000 Hz in üzerindeki frekansları ölçmek için de kullanılabilirler (McConnel, 1995).
2. 10 Hz ile 2000 Hz arasındaki frekansları ölçmek için, hız algılayıcısı çoğu durumlarda en iyi seçimdir (Gelen, 1993).
3. 2000 Hz'in üzerindeki bütün frekansları ölçmek için, ivme algılayıcısı kullanılmalıdır. İvme algılayıcısı kullanıldığı zaman, bunlar motopomplar üzerine ya vidalanmalı ya da yapıştırılmalıdır. İvme algılayıcısı

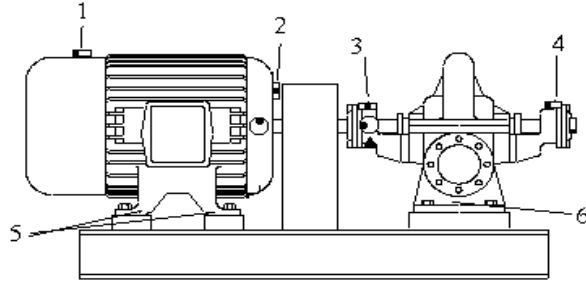
2000 Hz'in altındaki frekansları ölçmek için de kullanılabilirler (Taylor, 1994).

Titreşim Ölçüm Noktalarının ve Ölçüm Yönlerinin Belirlenmesi

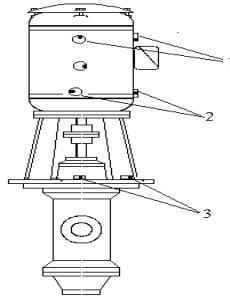
EUB yöntemine geçişte en önemli aşamalardan birisi; motopompların titreşim analizinde titreşim ölçüm noktalarının ve ölçüm yönlerinin belirlenmesidir. Motopomplar üzerinden titreşim ölçümü yapmadan önce ölçüm noktalarının belirlenmesi hem analiz için en iyi data toplama noktalarının belirlenmesinde hem de potansiyel titreşim kaynağının tanımlanmasında bize yardımcı olacaktır. Belirlenen bu ölçüm yönleri titreşim analizi için büyük öneme sahiptir.

Titreşim ölçüm noktalarının belirlenmesi

EUB kapsamına alınan motopomplarda öncelikle yapılması gerekli işlerden birisi de ölçüm yapılacak motopomplar üzerinde ölçüm noktalarının belirlenmesidir. Bunun için motopomplarda ölçüm noktası olarak yataklama noktalarına en yakın noktalar seçilmelidir. Titreşim enerjisi için zayıf iletken olan ince metal yatak başlıklarından kaçınılmalıdır. Mümkünse ölçüm noktaları olarak metal metale eklenmemiş olan bölgeler seçilmelidir. Ayrıca boyalı yüzeylerden, yüksüz rulman alanlarından, yarık veya çatlak yataklardan ve yapısal boşluklardan kaçınılmalıdır. Şekil 10 ve Şekil 11' de herhangi bir motopomp üzerinde titreşim ölçüm noktaları gösterilmiştir.

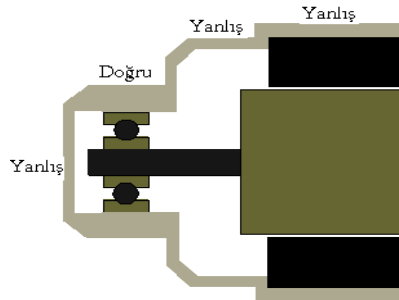


Şekil 10. Yatay motopomplar ölçüm noktaları



Şekil 11 Dikey motopomplar ölçüm noktaları

Pompalarda da yataklar üzerinde ölçüm noktaları doğru bir şekilde belirlenmelidir. Şekil 12’de rulman yataklarında doğru ölçüm noktası şematik olarak gösterilmiştir.

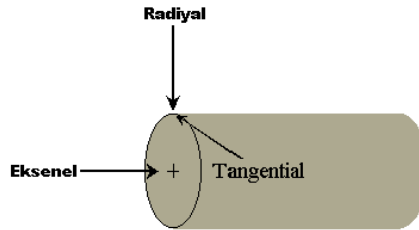


Şekil 12. Rulman yataklarında doğru ölçüm noktasının şematik görünüşü

EUB yönteminin en iyi ve en başarılı bir şekilde uygulanması için gerekli olan en önemli husus ölçüm noktalarının belirlenerek yapılacak olan bütün ölçümlerin aynı noktadan alınmasını sağlamaktır. Eğer ölçümler aynı noktadan alınmazlar ise titreşim grafiklerinin analizleri ve titreşim eğilim eğrileri bizi yanlış yönlendirebilir.

Titreşim ölçüm yönleri

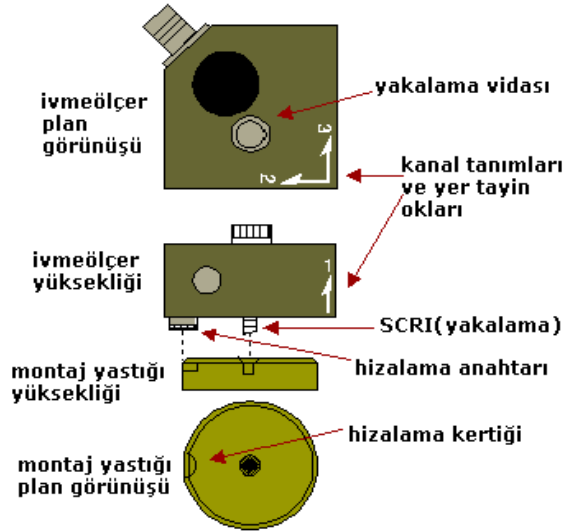
EUB uygulanmasında titreşim ölçümlerinin her zaman aynı nokta ve yönlerde alınması motopomplardan alınan titreşim datalarının karşılaştırma amaçlı olarak saklanması ve motopompların eğilim eğrilerinin izlenmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle elle tutularak titreşim ölçümü yapılan algılayıcılar EUB uygulamalarında tavsiye edilmezler. Motopompların problemlerinin belirlenmesinde, her bir ölçüm noktasında üç yönde titreşim değerlerine sahip olmak son derece önemlidir. Bu yönler eksenel, radyal ve tanjantiyal yönlerdir. Eksenel yön makina miline paralel, radyal yön algılayıcıdan şaft merkezine doğru ve tanjantiyal yön ise radyal yöne diktir.



Şekil 13. Motopomp üzerinden alınan titreşim ölçüm yönleri

EUB esnasında kullanılan ivme algılayıcı ve montaj bloğu Şekil 14' te detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Algılayıcı üzerindeki 1, 2 ve 3 numaralar ile işaretlenmiş kanallar motopompların durumlarına göre farklı ölçüm eksenlerine tahsis edilebilirler. Eğer

algılayıcı yatay bir motopompda rulman yatağının üstüne montaj edilirse kanal 1 radyal, kanal 2 şaft eksenine dik tanjantiyal ve kanal 3 şaft eksenine paralel eksenel yön olacaktır. Bu durum RTA diye adlandırılır. Eğer algılayıcı radyal eksen etrafında 90° döndürülürse, ölçüm yönü RAT diye adlandırılır. Burada R: Radyal, A: Eksenel, T:Tanjantiyaldır.



Şekil 14. Titreşim ölçümünde kullanılmış ivme algılayıcı ve montaj yastığı

Tanjantiyal ölçüm

Tanjantiyal titreşim tipik olarak motopompu yatay yöndeki esnekliği nedeniyle oluşur. Aynı zamanda mekanik dengesizlik motopomplarda sıkça rastlanan bir bozukluktur. Bu durum radyal yönde titreşim olarak kendisini gösterir. Ancak motopomplar yatay düzlemde daha esnek olduğu için tanjantiyal yönde yüksek titreşim mekanik dengesizliğin iyi bir göstergesidir (Eyvazian, 1994; Jungart, 1988).

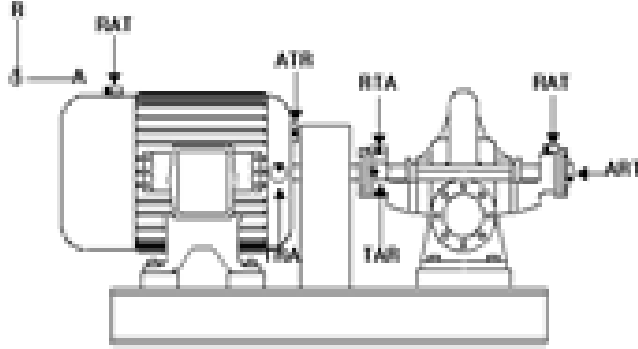
Radyal ölçüm

Radyal ölçümler yerçekimi ivmesi ve yere sabitleme nedeniyle tanjantiyal ölçümlere kıyasla daha düşük genlikli olurlar. Radyal yöndeki yüksek titreşim motopomp gövdesinin zemine bağlantısında gevşeklik olduğunun göstergesidir (Eyvazian, 1994).

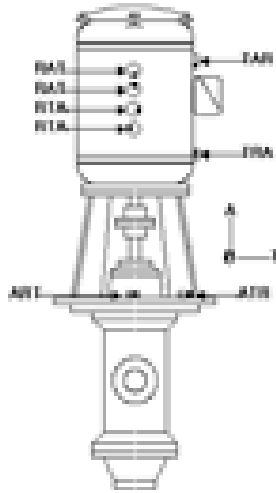
Eksenel ölçüm

İdeal koşullarda eksenel ölçümlerin kuvvetlerin çoğu mile radyal etkidiğinden çok düşük genlikli titreşim göstermesi beklenir. Öte yandan eksen kaçıklığı ya da eğilmiş mil, kaplin ayarsızlığı gibi problemler eksenel titreşime neden olmaktadır.

Yukarıdaki tanımlamalar yatay montaj edilmiş motopomp uygulamaları için verilmiştir. Dikey montaj edilmiş motopomplarda yönler motopomp konumuna göre yeniden uyarlanmalıdır. Motopomplar üzerindeki bu ölçüm yönleri dikey ve yatay motopomplar için Şekil 15 ve Şekil 16’ da detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 15. Yatay motopomp ölçüm yönü



Şekil 16. Dikey motopomp ölçüm yönü

Motopomp’larda Titreşim Analizi ile Tespit Edilebilecek Arızaların Belirlenme Kriterleri

Elektrik motoru ve santrifüj pompalarda titreşim problemleri düzgün çalışma ve performans açısından önem taşımaktadır. Dönel makinalarda görülen aşırı titreşimler, makina ömrünü kısaltmakta, mekanik yorulmaya ve hatta makinada hasara yol açmaktadır. Elektrik motoru ve santrifüj pompalardaki bu titreşimlerin nedenleri mekanik, akışkan kaynaklı ya da elektromekanik olabilir. Mekanik ve elektromekanik kaynaklı titreşimlerin ile belirlenebilir doğrudan makina devri ile ilgili olup, titreşim analizi ile belirlenebilir.

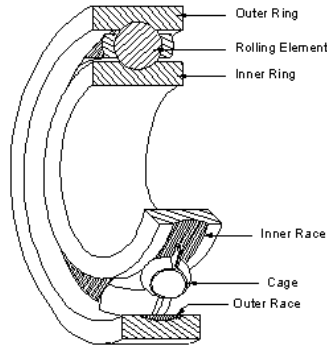
Çalışmanın bu bölümünde elektrik motoru ve santrifüj pompalar üzerinden alınan titreşim değerleri zaman ve frekans ekseninde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda yukarıda bahsedilen, örneğin rulman arızaları gibi, problemlerin frekans ekseninde hangi yönlerde ve hangi frekanslarda tepeler oluşturduğu saptanmıştır. Ayrıca bu tepe değerlerinin zaman eksenindeki grafik üzerindeki etkileri de gösterilmiştir. Bu bölümde

elektrik motoru ve santrifüj pompalarda ortak olan yatak problemleri, incelenmiştir.

Santrifüj Pompa ve Elektrik Motorunda Rulman arızaları

Bu bölümde hareket eden parçaların ürettiği frekansların analiz edilmesi ile rulmanlarda arıza tanımlaması prosedürleri detaylı olarak ele alınacaktır. Rulmanlı yataklar dönel makinaların vazgeçilmez elemanlarındanr. Bu makinalarda (örneğin, elektrik motoru ve santrifüj pompalar) oluşan arızaların çoğu kullanılan rulmanlı yatlardan kaynaklanır. Eğer motopomp da en az dört yataklanın olduğu düşünölürse, bu makinalarda yatak bakımının önemi daha da iyi anlaşılacaktır. Bu sebepten dolayı EUB yönteminin elektrik motoru ve pompalar üzerinde iyi bir şekilde uygulanması çok büyük bir kazanç olacaktır. Rulmanlar üzerinde arıza oluşumunun ve gelişiminin periyodik olarak incelenmesi, arızanın ilerleme durumunun belli bir eşik değeriine ulaşınca yatakların değıştirilmesi yalnız yatakların ömrünü uzatmakla kalmaz, sürekli bir verim sağlar ve erken parça değışimini azaltacağından giderlerin büyük bir kısmını engellemiş olur.

Rulman arızalarının belirlenmesinde, rulmanın çalışma anında ortaya çıkardığı gürültü ve titreşim büyük önem taşımaktadır. Rulmanlardaki titreşim karakteristikleri ve davranışları birçok yöntemler kullanılarak incelenebilirler. Yataklarda arıza oluşmaya başladığı zaman yatak elemanları arasındaki çarpmalar sonunda titreşim enerjisi belirli frekanslarda diğerlerine göre baskın duruma geçmeye başlar (Haris, 1991). Rulman hata frekansları, rulman bileşenlerindeki yorulma, aşınma, yanlış montaj, yanlış yağlama ve imalat hataları sonucu üretilir. Şekil 17’ de bilyeli rulmanların elemanları olan kafes, iç yüzey, dış yüzey ve yuvarlanma elemanları gösterilmektedir (Crawford, 1992; Bently, 2001).



Şekil 17. Bilyeli rulman bileşenleri

Rulman yüzey dalgaları, yuvarlanma elemanları ve kafesler üzerindeki kusurlar farklı frekanslar üretirler. Rulmanların oluşturduğu titreşimler irdelenirken spektrumun şekli, genliği, frekansı, toplam ve farklı frekanslar ve zaman tanım bölgesi sinyali arızaların sebebini, yerini, bileşenlerini ve boyutunu tanımlamada faydalıdırlar. Ayrıca yüzey aşınmaları, korozyon, asitlenme, küresel oyuk ve yetersiz sürtünme gibi arızaların sebebi frekans ve zaman tanım bölgesi bilgisi analiz edilerek tanımlanabilir. Bu teknikler aşırı boşluk olan rulmanları ve şaft etrafında dönen veya rulman yatağında boşluk olan durumlar gibi iyi bir şekilde montajı yapılmamış rulmanları da tanımlayabilir (Taylor, 1994).

Arızalı rulmanlar, ya iç yüzey ve dış yüzey ya da bilyelerin çevresinde düzensizlikler gibi arızalara sahip olacaklardır. Çalışma sırasında bu hatalar temel arıza frekansları olarak adlandırılan periyodik frekanslar üreteceklerdir. Arızalı bir rulmana sahip dönel makina dört temel arıza frekansı üretirler (Haris, 1991).

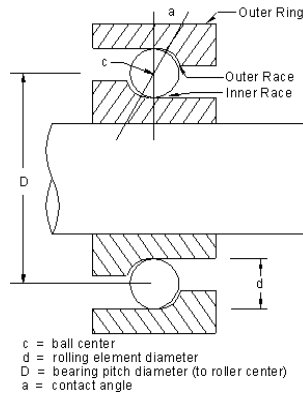
Bu frekanslar;

1. Temel referans frekansı (Fundamental Train frequency) (FTF)

2. İç bilezik bilye geçiş frekansı (BPFI), (bütün bilyeler iç bilezik üzerindeki arızalı bölgeden geçiyorken üretilen frekanstır.)
3. Dış bilezik bilye geçiş frekansı (BPFO), (bütün bilyeler dış bilezik üzerindeki arızalı bölgeden geçiyorken üretilen frekanstır.)
4. Bilye dönüş frekansı (BSF), (bilyeler şaft etrafında devri esnasında dönüyorken her bir bilyenin dairesel frekansdır.)

Temel arıza frekansları hem rulman geometrisine hem de şaft hızına bağlıdır. Eğer makinada ne tip bir rulman kullanıldığı biliniyorsa, bilye çapı, karşılıklı iki bilye arasındaki çap, bilye sayısı ve bilye temas açısını bulmak için üretici verileri kullanılabilir. Bu değerlerin bilinmesi temel arıza frekanslarının doğru bir şekilde hesaplanmasına olanak verir.

Elektrik motoru ve pompalarda ki rulmanlar dış yüzey sabit ve iç yüzey döner şekilde montajı yapılırlar. Temel arıza frekansları Şekil 18’deki montaj şekli göz önüne alınarak aşağıdaki eşitlikler yardımı ile hesaplanır (Noda-Momono, 1999).



Şekil 18. Dış yüzey Sabit İç yüzey hareketli bilyeli rulman geometrisi (Bently, 2001).

$$BPFI = \frac{n}{2} S [1 + \frac{d}{D} \cos a] \quad (8)$$

$$BPFO = \frac{n}{2} S [1 - \frac{d}{D} \cos a] \quad (9)$$

$$BSF = \frac{d}{2D} S [1 - (\frac{d}{D})^2 (\cos a)^2] \quad (10)$$

$$FTF = \frac{S}{2} [1 - \frac{d}{D} \cos a] \quad (11)$$

Burada; BPFI İç bilezik bilye geçiş frekansı (Hz), BPFO Dış bilezik bilye geçiş frekansı (Hz), BSF Bilye dönüş frekansı (Hz), FTF Temel referans frekansı (Hz), d Bilye çapı (mm), D Karşılıklı iki bilye merkezi çapı (mm), a temas açısı, n Bilye sayısı, S Mil dönüş hızı (dev/s) dir.

Uygulamada gerek işletme sorumluları gerekse bakım mühendisleri tarafından elektrik motoru ve pompalarda kullanılan rulmanların geometrileri pek bilinmemektedir. Bu durumda kesin temel hata frekanslarını hesaplamak mümkün değildir.

Bununla birlikte, eğer rulmanlardaki bilye sayıları ve mil dönme hızları biliniyorsa FTF, BPFI ve BPFO değerleri tahmini olarak aşağıdaki eşitlikler yardımı ile hesaplanabilirler (Gelen, 1993).

$$FTF = \left[\frac{1}{2} - \frac{1,2}{n} \right] * S \quad (12)$$

$$BPFI = \left[\frac{n}{2} + 1,2 \right] * S \quad (13)$$

$$BPFO = \left[\frac{n}{2} - 1,2 \right] * S \quad (14)$$

Burada; n bilye sayısı, S Mil hızı (d/d) dir.

Bu eşitliklerden hesaplanacak temel arıza frekansları genellikle gerçek frekans değerlerinde yaklaşık % 5-10 arasında bir sapma gösterecektir.

EUB Planlamasına alınan PTM'lerindeki motopomplarda kullanılan rulmanların temel arıza frekansları marka ve modellerine göre Tablo 2' de verilmiştir.

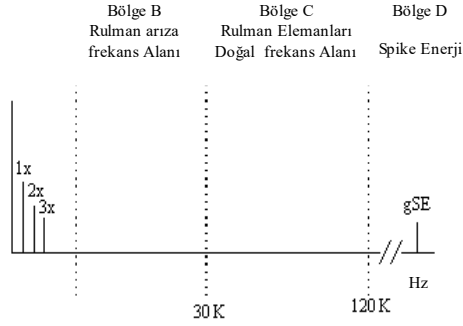
Tablo 2. Rulmanların temel arıza frekansları tablosu

Rulman Modelleri	Bilye Sayısı	Bilye Dönüş Geçiş Frekansı (BS)	Temel Referans Frekansı	İç Bilezik Bilye Geçiş Frekansı	Dış Bilezik Bilye Geçiş Frekansı
SKF2316	13	2,29	0,40	7,82	5,18
SKF1316	15	2,95	0,42	8,73	6,27
SKF7326	12	2,52	0,40	7,15	4,85
SKF23026	30	5,54	0,46	16,34	13,66
SKF6232	12	3,47	0,43	6,85	5,15
SKF6315	8	2,06	0,39	4,92	3,08
SKF6316	8	2,07	0,39	4,92	3,09
SKF29448E	18	2,85	0,45	9,97	8,03
FAG6218	11	2,90	0,42	6,42	4,58
FAGNU218	16	3,40	0,43	9,15	6,85
FAG6244	11	3,29	0,43	6,32	4,68
FAG6230	11	3,23	0,42	6,33	4,67
FAG6220	10	2,67	0,41	5,91	4,09
FAGNU220	16	3,43	0,43	9,14	6,86
FAGNU219	16	3,42	0,43	9,15	6,85
FAGNU224	16	3,42	0,43	9,15	6,85
NTN7328	12	2,23	0,41	7,12	4,88
NTNNU219	16	3,42	0,43	9,15	6,85
NTNNU222	16	3,31	0,43	9,18	6,82
NTNNU226	18	3,68	0,43	10,20	7,80
NTNNU230	18	3,68	0,43	10,20	7,80
NTNNU238	19	3,83	0,44	10,72	8,28

Rulman arızalarının ilerleme safhaları

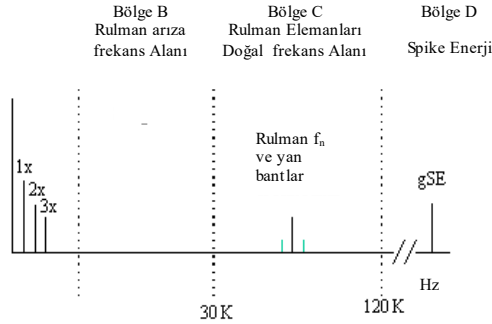
Rulmanlarda oluşacak arızalar, EUB uygulamasının iyi bir şekilde yapılması halinde daha ilk safhalarında saptana bilirler. Rulman arızalarının saptanması dört ana safhada gerçekleşebilir.

Safha 1: Rulman arızalarının en erken göstergeleri yaklaşık 20000 Hz ile 60000 Hz arasında ortaya çıkmaktadır. Bu bölge yüksek frekans bölgesi olarak da adlandırılır ve genlik değerleri ivme cinsinden ölçülür.



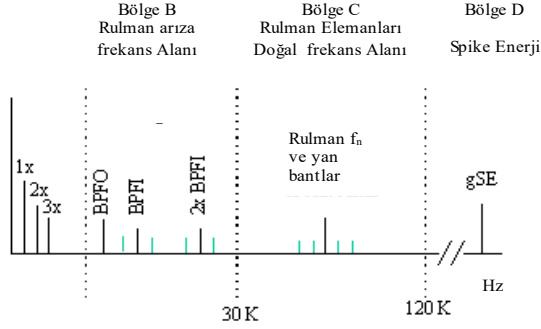
Şekil 19. Rulman arıza ilerlemesinin birinci safha spektrum görünümü (Stevens, 1997)

Safha 2: Yüzeysel rulman arızaları, genellikle 30 K – 120 K CPM (1500 Hz – 6000 Hz) bölgesinde olan rulman bileşenlerinin doğal frekans çevresindeki tepelerinin görülmesiyle başlar. Yan bant frekansları ikinci safhanın sonunda doğal frekans tepelerinin altında ve üstünde ortaya çıkarlar.



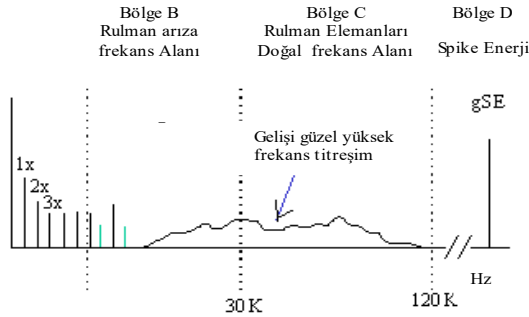
Şekil 20. Rulman arıza ilerlemesinin ikinci safha spektrum görünümü (Stevens, 1997)

Safha 3: Rulmanlardaki aşınmalar ilerlediği zaman, rulman arıza frekansları ve harmonikleri ortaya çıkar. Ayrıca pek çok arıza frekans harmonikleri ortaya çıktığı gibi pek çok yan bantlar da hem bu arıza frekanslarının çevresinde hem de rulman doğal frekansı çevresinde ortaya çıkar.



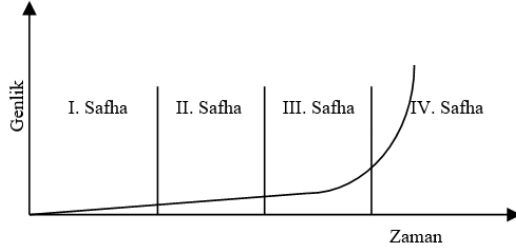
Şekil 21. Rulman arıza safhasının ilerlemesinin üçüncü safhası spektrum görünümü

Safha 4: Rulman dağılmasına yakın 1XRPM genliği tam olarak spektrumda etkilidir. Bu safhada 1XRPM genliği ilerlerken normal olarak çalışma hızı harmoniklerinin büyümesine de sebep olur.



Şekil 22. Rulman arıza ilerlemesinin dördüncü safha spektrum görünümü (Stevens, 1997)

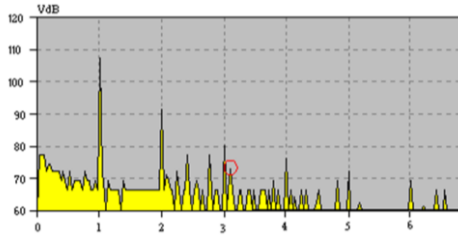
Titreşim analizi ile arıza, II. Safhada tanınmaya başlayabilir ve takip edilir. III. Safhanın son kısımlarından itibaren her an rulman değiştirmesi istenilebilir. IV. Safhaya geçmiş bir rulman her an dağılma ile karşı karşıyadır, bu yüzden her an değiştirilmesi istenilebilir. Rulman yataklarından alınan titreşim genliklerinin safhalara göre genlik zaman ilişkisi Şekil 23'te gösterilmiştir.



Şekil 23. Safhalara göre genlik ilerlemesi

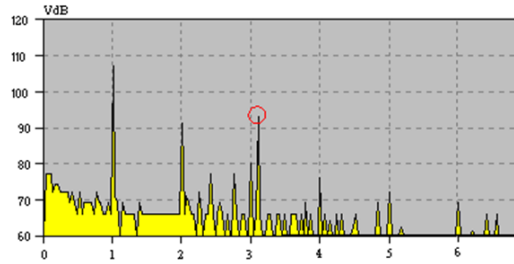
Rulman arızalarının tanımlanması

Rulmanlardaki kusurlar, ilk aşamada rulman arıza frekansları denilen titreşim frekansları ve onların harmoniklerini üretirler. 0.1524 mm/s (81VdB) tepe değerine sahip rulman arıza frekansı ve daha fazla değerdeki tepe değerlerine sahip rulman arıza frekansları önemli olarak düşünülebilir. Bazen yeni bir rulmanlarda da bu rulman arıza frekanslarını üretebilir. Bunun sebebi montaj hataları ve kusurlu imalat olabilir. Rulman bölgelerinin birindeki çatlak gibi, rulmandaki kusur çok küçük ise titreşim sinyalinde ya temel frekanslar oluşmaz veya çok küçük genlikler şeklinde ortaya çıkarlar, fakat rulman arıza frekanslarının harmonikleri grafikte görülecektir. Kusur ilerlemeye başlarsa esas rulman arıza frekansı, seviye olarak harmoniklerden genellikle yüksek olacaktır (Gelen, 1993).



Şekil 24. Rulman üzerinden alınmış rulman temel arıza frekans spektrum görünümü

İlk hatalara, hıza ve yataktaki yüklemeye bağlı olarak rulman arızaları ilerleyeceğinden spektrum görünümüleri değişecektir. Şekil 24 ve Şekil 25’ deki görülen spektrumlardan; makinadaki titreşim sinyallerinin yatağın bozulması ile nasıl değiştiği görülebilir. Şekil 25’ deki spektrum tam olarak; rulmandaki bir arızanın gelişmesi ile birlikte rulman arıza frekansının nasıl değiştiğini göstermektedir. Rulman arızası aşırı ilerlediğinden, spektrumda rulman tonunun genlik seviyesinin arttığı görülmektedir (Gelen, 1993).



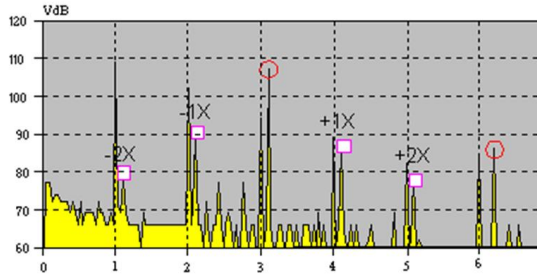
Şekil 25. Rulman arızası ilerlemiş rulman temel arıza frekans spektrum görünümü

Rulman iç bilezik arızası

Eğer rulmandaki arıza iç bilezikte ise; dönüş hızının genliği ile yatak arıza frekansı modüle edilir ve bu 1X’ten uzakta, yatak arıza frekansını etrafında, yan bantların oluşmasına sebep olur. Buradaki genlik modülasyonu, her devirde bir kere yataktaki kusurlu iç bölgenin yatağın yükleme sınırları içinde içeri ve dışında dışarı doğru hareket etmesi gerçeğine dayanır. Yükleme sınırı içerisindeyken, arıza bilye geçiş frekansında bir titreşim üretecek, fakat yükleme sınırı dışına taşıdığı zamanlarda bu frekanstaki titreşimin çok küçük bir miktarı üretilecektir. Bu, rulman tonunun genlik modülasyonuna ve yan bantların alt bileşenlerinin ortaya çıkmasına neden olur.

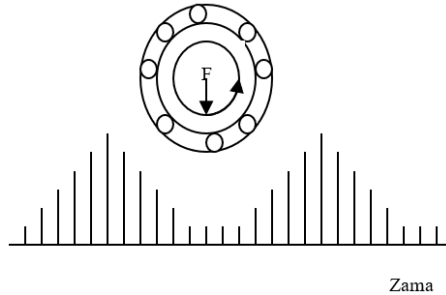
Rulman arıza frekansı etrafında oluşan 1X yan bantları kesinlikle ileri bir yatak aşınmasının göstergesidir ve çoğunlukla iç

bölge arızası olarak ortaya çıkar. Rulmanlardaki boşluğun artması çalışma hızının harmoniklerini de artırır ve ayrıca rulman arıza frekansına ait ikinci bir harmoniğin görülmesine de sebep olabilir. Bazen, eğer bir rotor (pompa fanı veya elektrik motoru rotoru) çok aşırı dengesiz ise, yataktaki iç bölge arızası bir genlik modülasyonu veya yan bantlar oluşturmayabilir. Bunun sebebi dengesizlikten kaynaklanan merkezci kuvvetin, iç bölgeyi, kendi çevresinde aynı yükleme durumunda tutmasıdır.



Şekil 26. İç yüzey arızasından kaynaklanan rulman temel arıza frekansı etrafında oluşan 1X yan bantları

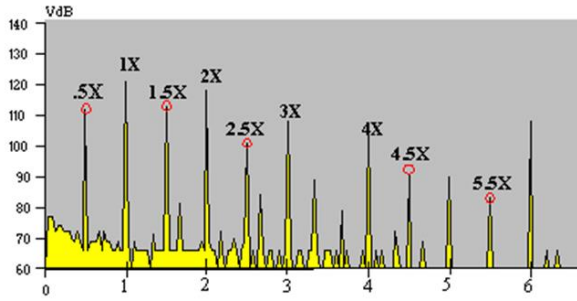
Rulman arızası iç bilezikte olduğundan eşit periyotlarda tekrarlanan darbelerin büyüklükleri sabit olmayacak ancak periyodik olarak değişecektir. Bu durum zaman grafiğinde Şekil 27’ deki gibi kendini gösterecektir.



Şekil 27. Arızalı iç bilezik zaman dalga formu grafiği

Rulmanlarda mekanik gevşeklik

Döner elemanlı (bilyalı) rulmanlardaki aşırı mekanik gevşeklik, genellikle 2X'den 8X'e kadar 1X'in harmoniklerini oluşturur. Bu durumun spektrum görünümü Şekil 28'de verilmiştir. Daha sonraki bölümde uygulamalarının verileceği rulman arızası, özellikle mekanik gevşeklik, probleminin anlaşılmasında burada gösterilen grafikler temel referanslar olacaktır. Şekilde 0.5X'de ve katlarında tepe noktalarının oluşması mekanik gevşekliğin fazla olduğunun bir göstergesidir (Gelen, 1993; Geropp, 2000).



Şekil 28. Rulmanlardaki mekanik gevşeklik probleminin neden olduğu titreşimin spektrumu

Pompa ve elektrik motorundaki diğer mekanik parçalardaki boşluklarda 1X'in, bazen 0.5X'in harmoniklerini oluşturacağından böyle bir durumda kesin olarak rulman problemi var denemez. Kesin bir teşhis için rulman arızalarının belirlenmesindeki safhalar irdelenerek karara varılmalıdır.

Rulmanlarda yanlış hizalama

Rulmanlarda görülen bu problem genellikle ilk montaj sırasındaki dengesiz yerleştirmeden kaynaklanır. Bazı durumlarda ise rulman üzerine gelen aşırı eksenel yüklemelerden dolayı rulman yatağındaki aşınma sonucu da oluşabilir. Hizası bozulmuş bir rulman belirli bir 1X bileşeni ve bazı durumlarda 2X bileşenleriyle birlikte

titreşim spektrum grafiklerinde ortaya çıkar. Bu görünüm eksenel yöndeki spektrum grafiğinde görülür. Bununla birlikte bazen radyal yönde de 1X ve 2X tepeleri görülebilir. Hızası bozulmuş rulman yüksek 1X ve 2X tepeleri gibi güçlü rulman tonları da oluşturur (Taylor, 1994; FAG Tec. Note, 1982).



Şekil 29. Hızası bozulmuş rulman

Tablo 3. Rulman arızaları gösterg tablosu (Gelen, 1993; FAG tec. Note, 1982)

Titreşim Kaynağı	Baskın Titreşim Frekansı	Ölçüm yönü
Rulman arızası • İç bilezik arızası • Dış bilezik arızası • Rulmanlarda hizalama problemi • Rulmanlarda mekanik gevşeklik problemi • Rulman bilye arızası	• 2kHz - 60 kHz • Sinüs eğrisi şeklinde 1X ve katlarında tepe noktalar, • Rulman elemanlarının temel arıza frekanslarında oluşacak tepe noktalar, • Yüksek frekans bölgesinde zeminde kabarma, • Eksenel yönde 2X ve 3X > 1X ve 1X > 3,05 mm/s ise rulman hızasızlığı vardır. Bazı durumlarda buna ilaveten radyal yönde 1X ve 2X de yüksek pikler görülür. • 1/2X ve 8X'e kadar harmonikler oluşmuş ise rulmanda mekanik gevşeklik, • FTF frekansı ayrı bir frekansmış gibi ortaya çıkmış ise rulman yapısında (iç) mekanik gevşeklik, • Frekans ekseninde harmonik grupları var ve bu gruplar 3X ile 9X arasında gözlemlenmiş ise bilye arızası,	Eksenel ve / veya Radyal

Rulmanlarda ortaya çıkacak arızalardan belli başlılarının nasıl analiz edildiğini izah ettikten sonra genel olarak şu söylenebilir;

Rulmanları en güzel koruma yöntemi zamana göre bir eğilim hazırlamaktır. Bazen rulmanda ortaya çıkan küçük bir hata, çok kısa bir zamanda büyük kusurlara dönüşebilir. Dolayısıyla erken teşhis için çok küçük titreşim sinyallerinin bileşenleri üzerinde bile hassasiyetle durulması gerekir. Analiz sırasında bazı makinalardan alınan ortalama titreşim spektrumlarının bile rulman tonları görülür (Gluzman,2001). Arıza teşhisi bu ortalama değerlerdeki artışla birlikte yapılır. Bu yüzden rulman tonlarının işin kötüye gittiğine dair bir gösterge olabileceği düşünülerek dikkatlice incelenmesi gerekir.

Pompa Terfi Merkezlerinde EUB Uygulaması ve Titreşim Analizi ile Tespit Edilen Arızalar

EUB kapsamında yararlanılan uyarı tiplerinin başta titreşim analizi olmak üzere, yağ analizi, sıcaklık analizi, aşınma analizi, basınç analizi ve elektrik motoru akımının izlenmesi olduğu, titreşimin; arıza belirleme parametresi olarak pompa ve elektrik motorlarında en çok görülen titepe arızaların hemen hemen tamamını önceden ikaz etmeleri nedeniyle kullanıldığı üçüncü bölümde izah edilmiştir. Bu sebepten pompa terfi merkezlerinde EUB yöntemi tatbik edilirken titreşim analizinden yararlanılmıştır.

EUB modelinin bir işletmeye en iyi bir şekilde uygulanabilmesi için öncelikle o işletmeye ait makinaların sınıflandırılması, başlangıçta kaç makina üzerinde bu bakım modelinin uygulanacağını belirlenmesi ve ölçüm periyotlarının ne olacağına karar verilmesi gerekmektedir.

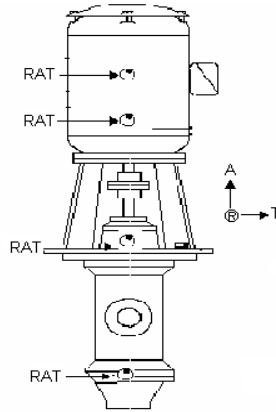
EUB uygulamasına başladıktan sonra PTM'lerde yapılan titreşim ölçümleri neticesinde, önceden tespit edilen pek çok problemle karşılaşmıştır. Burada verilecek, örnekler Bölüm 5 ile

paralellik arz edecektir. Ölçüm yapılan motopompun tüm özellikleri verilecek ve grafiklerin nasıl analiz edildiği Bölüm 5'deki bilgiler ışığında sunulacaktır.

Motopomp'ta Kaynağı Rulman Olan Arızası Belirlemesi

Önceki bölümde anlatılan titreşim analizleri çerçevesinde EUB uygulamasının gerçekleştirildiği pompa terfi merkezlerinde pek çok rulman arızaları önceden tespit edilerek gerekli önlemlerin önceden alınması sağlanabilir. Burada verilen rulman arızası örneği, atıksu arıtma tesislerindeki atıksu PTM'deki pompa ve motor arasındaki şaft yataklarından birinin titreşim grafikleridir. Bu tesisteki sistemin genel bir tanımlaması aşağıda yapılmıştır.

Tesisteki motopomp grupları radyal montaj edilmiştir. Elektrik motoru ve pompa arasındaki hareket iletimi dört yerden yataklanmış 30 m uzunluğundaki mil vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Sistem üzerinden 8 noktadan ve 3 yönde periyodik ölçümler yapılmıştır. Yapılan bu ölçümler sürekli olarak bilgisayar ortamında daha sonraki ölçümler ile karşılaştırılmak ve titreşim eğilimlerini takip edebilmek amacı ile depolanmıştır. Titreşim ölçüm noktaları ve yönleri Şekil 30'da gösterilmiştir. Bu şekilde sadece pompa ve motor üzerindeki ölçüm yönleri gösterilmiştir. Şaft üzerindeki ölçümler şaft üzerindeki yataklamaların olduğu dört ayrı noktadan yapılmıştır. Bu noktalardaki ölçüm yönleri de pompa ve motorda olduğu gibi radyal, eksenel ve tanjantiyal (RAT)dır. Pompa ve elektrik motorunun teknik özellikleri ve rulman temel arıza frekansları aşağıda tablo halinde verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki motopomplar düşük devir ve yüksek debiye sahiptirler.



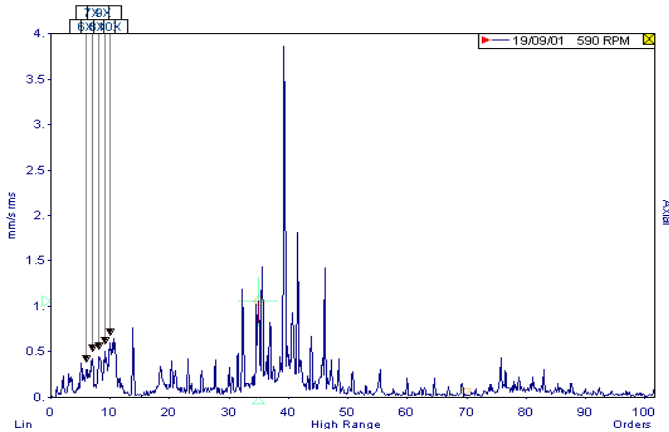
Şekil 30. Ölçüm yapılan motopompun ölçüm noktaları ve yönleri

Tablo 4. Motopomp teknik özellikleri ve rulman temel arıza frekansları

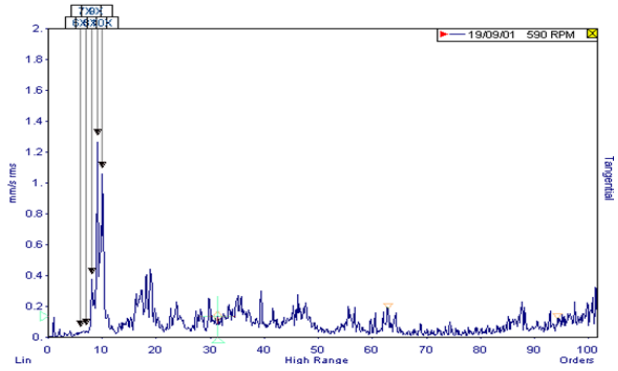
			MOTOR		POMPA	
Marka			CEGELEC		NİJHUIS	
Tip			F3PXC 450 L 10		VMFA1-8080	
Güç			420 kW		372 kW	
Devir			594 RPM		590 RPM	
Motor ve Pompa Kanat Sayısı			11		3	
Kapasite					1465 lt/sn	
Basma Yüksekliği					50 m	
Kaplın Tipi			Kardan Kavrama			
No	Rulman No	Nb	BSF	FTF	BPİF	BPOF
MS	SKF7326	12	2,52	0,40	7,15	4,85
MK	SKF23026	30	5,54	0,46	16,34	13,66
Ş1	SKF2316	12	2,29	0,40	7,82	5,18
Ş2	SKF1316	15	2,95	0,42	8,73	6,27
Ş3	SKF2316	12	2,29	0,40	7,82	5,18
Ş4	SKF1316	15	2,95	0,42	8,73	6,27
PK	SKF7326	12	2,52	0,40	7,15	4,85
PS	SKF23026	30	5,54	0,46	16,34	13,66

Teknik özellikleri ve rulman arıza frekansları (Tablo 4) yukarıda verilen sistemin üç numaralı şaft üzerinden alınan titreşim ölçüm grafikleri aşağıda Şekil 31 ile Şekil 37 arasında verilmiştir. Grafikler incelendiğinde şu görülmektedir. Üç numaralı şaft rulmanının eksenel yöndeki yüksek bant spektrum grafiğinin 41.44XRPM sinde 3.89 mm/ss'lik bir tepe oluşturduğu görülür. Bu ise bizlere rulman temel arıza frekanslarından BPIF'ın harmoniklerinden biri olduğunu göstermektedir. Diğer yönlerdeki spektrumlara bakıldığında radyal yönde yüksek bant spektumunda zeminde ki yükselme ve eksenel yöndeki BPIF'ın yan bantlarının oluşması arızanın ilerlemiş olduğunu göstermektedir (Şekil 33). Ayrıca tanjantiyal yöndeki yüksek tepeler de arızadan dolayı rulmanda oluşan mekanik boşlukların bir göstergesidir (Şekil 35).Yatak üzerinden alınan titreşimlerin zaman grafikleri incelendiğinde periyodik halde vuruşların oluşması tipik rulman arızası göstergesidir (Şekil 36).

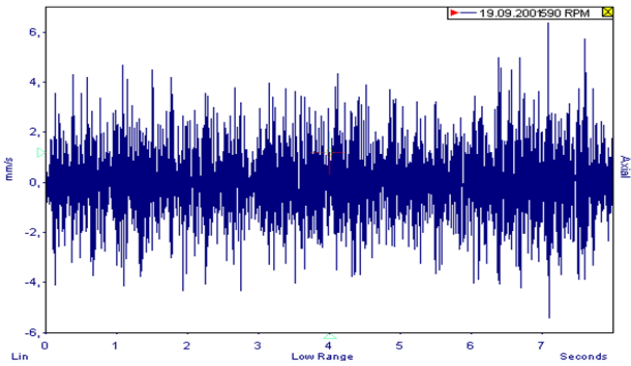
Şekil 6.8'de şaft yatağı üzerinden alınan titreşim ölçümlerinin spektrumları ve zaman grafikleri karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir.



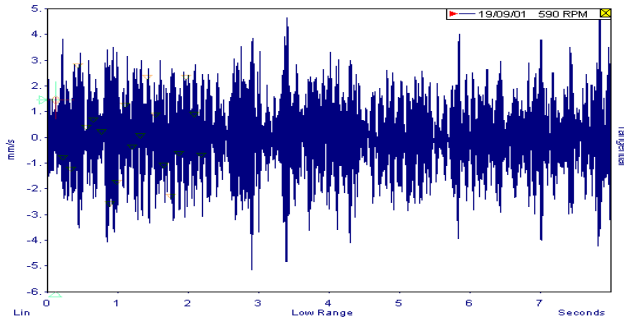
Şekil 31. Şaft rulman yatağı eksenel yön spektrum grafiği



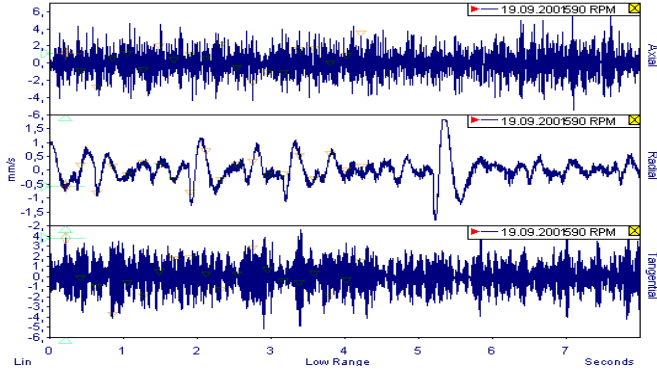
Şekil 32. Şaft rulman yatağı eksenel yön dalgaformu grafiği



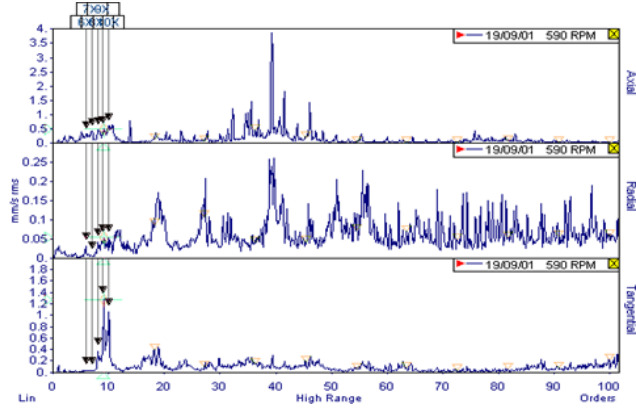
Şekil 33. Şaft rulman yatağı tanjantiyal yön spektrum grafiği



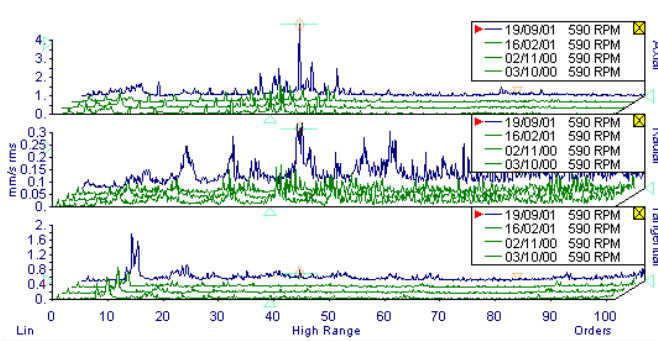
Şekil 34. Şaft rulman yatağı tanjantiyal yön dalgaformu grafiği



Şekil 35. Şaft rulman yatağı üç yöndeki spektrum grafiği



Şekil 36. Şaft rulman yatağı üç yöndeki dalgaformu (zaman) grafiği



Şekil 37. Şaft rulman yatağı spektrum grafiklerinin karşılaştırılması

Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmada öncelikli olarak EUB tekniğinin uygulanmadığı işletmelerde EUB tekniğine geçilebilmesi için gerekli olan kriterler incelenmiştir. EUB tekniğinin bir işletmede uygulanabilmesi için öncelikli olarak yapılması gerekenler ayrı ayrı ele alınmıştır. Makinalarda titreşim ölçümlerinin yapılabilmesi için algılayıcı seçimi yapılırken dikkat edilmesi gerekli hususlar ele alınmıştır. İşletmelerde EUB tekniğinin hangi makinalara uygulanması gerektiği belirtilmiş, belirlenen bu makinalarda ölçüm noktalarının nasıl seçileceği ve seçilen ölçüm noktalarında ki ölçüm yönlerinin ne olacağı izah edilmiştir.

Daha sonra çalışmanın yapılacağı tesiste belirlenen Motopomp'ların özellikleri tespit edilmiştir. Motopomplar da ölçüm noktaları ve ölçüm yönleri belirlenmiştir. Motopompların test ve çalışma kriterleri ve motopomp test zaman planlaması yapılmıştır. Bu noktada çalışma aşamasında şu durum net olarak ortaya çıkmıştır;

- Ölçüm yapılacak motopomplarda ölçüm noktaları ve ölçüm yönleri kesinlikle bir önceki ölçüm noktası ve yönü ile aynı olmalıdır.
- Ölçüm yapılacak motoplarda giriş ve çıkış basıncı bir önceki giriş ve çıkış basıncı ile aynı olmalıdır.
- Ölçüm yapılan motopomp'un sağında ve solunda ki motopomplar bir önceki ölçümde çalışır halde ise yine çalışır halde olmalı, çalışmıyor ise yine çalışmamalıdır.
- Ölçümler en fazla bir aylık periyotlarda yapılmalıdır.

Motopomplarda en fazla rastlanan arıza türü olan rulman arızaları ele alınmış, rulman arızalarının ilerleme safhaları belirtilmiştir. Rulmanlarda oluşacak olan iç bilezik, dış bilezik, mekanik gevşeklik ve rulman hizalama problemlerinin titreşim

analizi ile nasıl belirlendiği çeşitli spektrum grafikleri ile izah edilmiştir. EUB tekniğinin uygulandığı tesislerde karşılaşılan rulman arızalarından bir tanesinin her üç yönde (eksenel, tanjantiyal, radyal) zaman ve spektrum grafikleri bölüm 6’de incelenmiştir.

Rulman arızaları genellikle rulman arızası frekanslarında kendini göstermektedir. Şaft yatağından alınan titreşimler incelendiğinde eksenel yöndeki yüksek genliklerinin rulman iç bilezik arıza frekansı olan frekansta meydana geldiği görülmüştür. Çalışmada tanjantiyal yöndeki yüksek tepeler rulmanda oluşan iç bilezik arızasından kaynaklanan mekanik gevşekliğin oluşturduğu tepelerdir.

- Bu nedenle rulman arızalarının tespiti yapılırken;
- Ölçümlerin yataklara en yakın bölgelerden alınmalı,
- Yatak muhafazası üzerinden ölçüm alınmamalı,
- Rulman arıza frekanslarının hesapları iyi yapılmalı,
- Rulmanlardan alınan titreşim grafiklerinde ki yüksek genliklerin sebebinin tespiti yapılmalı,
- Bir önceki ölçüm grafikleri ile mutlaka karşılaştırma yapılmalıdır.

Kaynaklar

Aktürk N., Uneeb M., and Gohar R. “The effects of number of balls and preload on vibrations associated with ball bearings”, Journal of Tribology, 119, 747-753, October 1997

Aktürk N. and Gohar R. “The effect of ball size variation on vibrations associated with ball-bearings”, Proc. Instn. Mech. Engrs., 212Part J., pp. 101-109, 1998

BELEK T., “Pompalarda Titreşim ve Gürültü”, 2. Pompa Kongresi, pp 185-93, 1990

BELEK T., TOPRAK T., “Endüstriyel Tesislerde Makina Performansının İzlenmesi ve Bilgisayar Destekli Bakım Planlaması”, İTÜ Makina Fakültesi, 1988

BENTLY D., E. “Basic Rotor – to- Stator Thermal Rubs which Exhibit Rotative Speed (1X) Symptom Only”, www.bentlicom/articles/996don.asp, Orbit, September, 1996

BENTLY D, E., “Predictive Maintenance Through the Monitoring and Diagnostics of Rolling Element Bearing,”, Applications Note www.bentlicom/articles/apnotles/an044pxa.asp , 2001

CRAWFORD A.,R. and CRAWFORD S. “ The Simplified Handbook of Vibration Analysis, volum1-2” Computational Systems Inc. 1992

EYVAZIAN G., “Vibration Diagnostic Guide”, SKF Condition Monitoring, USA, 1994

GELEN D. W., “ Introduction to Machine Vibration”, DLI Engineering Corp. , 1993

GEROPP, B., "Envelope Analysis-A Signal analysis Technique for Early Detecting and Isolation of Machine Faults", ACIDA GmbH, Kaiserstr, Germany

GEROPP, B., Kebler H. W. "Diagnosis of Machines Running at Unstable Speeds of Revolution", Institut Für Bergvverks, RWTH Aachen, Germany

GLUZMAN, D., "Recognizing Impending Bearing Failure", Reliability Magazine, June, 2001

GÜNAY D., AYDEMİR A.“Mühendislik Mekaniği Dinamik“, Dğişim yayınları, 1998

HARRİS T., A., “Rolling Bearing Analysis”, John Wilay and Sons, Inc., 1991

JOHNSON M., S., “Vibration Tests for Bearing Wear”,
www.ashraejournal.org, October, 2000

JOHNSON D., and EYVAZIN G., “How to Understand and Buy Condition Monitoring Equipment”, SKF Condition Monitoring, USA, 1988

JUNDGART B., “Using Transducer for Machinery Fault Detection”, Sensors Magazine Helmers Publishing Inc., 1988

KÖSE R. K. " Bilgisayar Destekli Kestirimci Bakım Planlaması", 3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 21-23 Eylül, 1988

McCONNEL G., “ Vibration Testing Theory and Practice” John Wiley & Sons. Inc., 1995

ORHAN S., “Rulmanlarla Yataklanmış Dinamik Sistemlerin Titreşim Analizi İle Kestirimci Bakımı”, Kırıkkale Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Haziran 2002

PIOTROWSKI J., “The Importance of Shaft alignment”,
www.maintenanceresources.com/ReferencLibrary/Alignment, 2001

PIOTROWSKI J., “Why Shaft Misalignment Continues to Befuddle and Undermine Even the Best CBM and Pro-Active Maintenance Programs”,
www.maintenanceresources.com/ReferencLibrary/Alignment, 2001

STEVENS D. “Machinery vibration Diagnostics, Case History No:1-2-3-4-5”, AV Tecnology Limited, 1997

SETO W., W., “Mechanic Vibration”, 1964

TAYLOR J., I. and KIRKLAND D. W, “ Understanding The Time Domain Signal is Required for Diagnostics and Improvements in

Equipment Maintainability and Reliability”,
www.vibcons.com/papers/paper2.html, 2000

VICTOR W., “ Machinery Vibration Measurement and Analysis”,
Mc Graw Hill Book Company, 1991

"Rolling Bearing Damage", FAG Bearings Corporation, Pub. No.

R. Kilic “Elektrik Motoru-Pompalarda Bilgisayar Destekli Frekans
Analizi Yöntemi İle Arızaların Tayini Ve Teşhisi”, Doktora Tezi,
2003

BÖLÜM 16

HİBRİT DIŞLİLERDE KOMPOZİT KATMAN ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN DIŞLI GERİLME VE RİJİTLİĞİNE ETKİSİ

Tufan Gürkan Yılmaz¹

Giriş

Dişli çarklar, kullanım sıklığı ve uygulama çeşitliliği bakımından güç iletim sistemleri arasında en yaygın olarak tercih edilen makine elemanlarıdır. Sabit çevrim oranı sağlamaları, güç ve hareket iletimini kararlı ve düzenli biçimde gerçekleştirmeleri nedeniyle; hassas saat mekanizmalarından büyük ölçekli endüstriyel makinelere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Dişli çark türleri arasında ise evolvent diş profiline sahip olanlar ön plana çıkmaktadır. Üretim kolaylığı ve düşük maliyet avantajları sayesinde makine imalatında neredeyse yalnızca bu tip dişliler kullanılmaktadır. Ayrıca eksenler arası mesafedeki değişimlerin çevrim oranını etkilememesi ve dişlere etkiyen normal kuvvetin dönme süresince sabit kalması gibi önemli üstünlüklere sahiptirler. Evolvent profilli dişliler içinde düz dişli çarklar, uygulamada önemli bir paya sahiptir.

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Orcid: 0000-0003-3772-7871

Dişli çarklar; otomotiv, havacılık, helikopter teknolojileri ve çeşitli makine tasarımlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu sektörlerde enerji tüketimiyle ilişkili yakıt maliyetlerinin azaltılması ve yakıt kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan CO₂ emisyonlarının düşürülmesi günümüzde stratejik bir hedef haline gelmiştir. Bu doğrultuda, taşıyıcı olmayan yapısal elemanlarda yeterli dayanımı sağlayan düşük yoğunluklu metal alaşımları ve metal dışı malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır. Buna karşın, yüksek yük taşıyan ve doğrudan güç ileten bileşenlerde yüksek mukavemetli çelikler hâlen yaygın olarak tercih edilmektedir. Düz dişli çarklar bu tür elemanlara tipik bir örnek oluşturmaktadır.

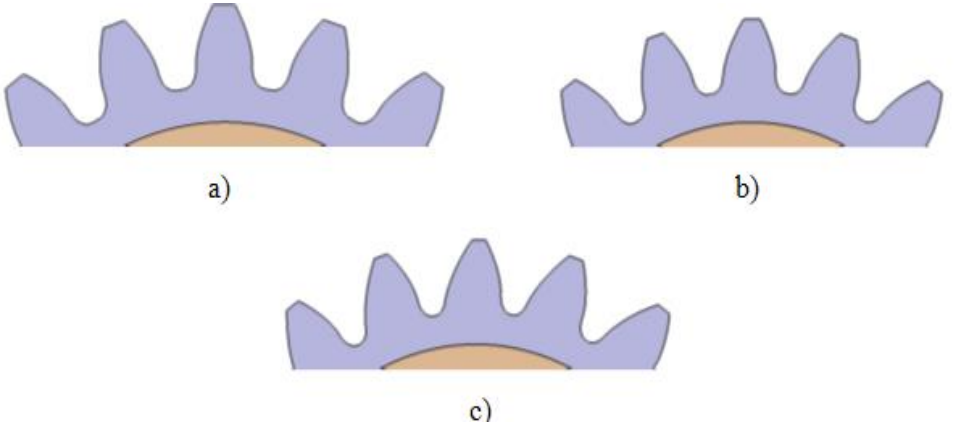
Düz dişli çarklarda güç iletimi sırasında gerilmeler esas olarak belirli bölgelerde yoğunlaşmakta, diğer bölgelerde ise oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu durum dikkate alındığında, uygun ve dayanıklı bir birleştirme yöntemi kullanılması şartıyla dişli çark tasarımında farklı malzemelerin birlikte kullanılması mümkün hale gelmektedir. Yüksek gerilmelere maruz kalan bölgelerde yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı sürdürülürken, düşük gerilme bölgelerinde alüminyum alaşımları veya kompozit malzemeler tercih edilebilir. Bu yaklaşım sayesinde dişli çarkın ağırlığı azaltılabilirken, aynı zamanda dış yüklere karşı güvenli çalışma koşulları korunabilmektedir. Buna ek olarak, kütle azalması ve malzeme özellikleri nedeniyle titreşim seviyelerinde de düşüş sağlanması mümkündür.

Literatürde hibrit dişli çarklara yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Handschuh ve çalışma arkadaşları, çelik–kompozit malzemeden oluşan özel tasarımlı hibrit dişlilerin prototip üretimini havacılık toleransları altında gerçekleştirmiş ve bu dişliler üzerinde

modal ile yorulma testleri uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlarda hibrit dişlinin doğal frekanslarının çelik dişliye kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Modal analizler ayrıca SEM yöntemiyle gerçekleştirilmiş; ancak kompozit malzemenin izotropik kabul edilmesi nedeniyle deneysel sonuçlarla tam uyum sağlanamamıştır. Dinamik testler farklı hız, moment ve dişli mekanizması konfigürasyonları için uygulanmıştır (Handschuh vd., 2014). Gauntt ve Campbell ise hibrit dişli çarklarda kullanılan farklı kompozit plakaların doğal frekanslara etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan altı farklı kompozit plaka arasında, en düşük düzlem elastisite modülüne sahip plakanın en düşük doğal frekans değerini verdiği görülmüştür. Hibrit dişlilerin doğal frekanslarının çelik dişlilere göre yaklaşık %23 oranında daha düşük olduğu rapor edilmiştir (Gauntt & Campbell, 2019). Catera ve arkadaşları, özel bir hibrit dişli tasarımının gerilme analizini sayısal yöntemlerle gerçekleştirerek statik iletim hatalarını incelemiş ve aynı ağırlığa sahip ince gövdeli çelik dişli ile karşılaştırmıştır (Catera vd., 2018). Contartese ve çalışma arkadaşları ise hibrit dişlilerin kavrama rijitliğini, diş ve gövde etkilerini ayrı ayrı modelleyerek belirlemiş; gövdeleri seri bağlı yaylar olarak ele almışlardır. Elde edilen sonuçlar, gövdenin tek parça kabul edildiği yaklaşımla karşılaştırıldığında uyumlu bulunmuştur (Contartese vd., 2019). Yılmaz ve arkadaşları, hibrit dişli çarklarda rim kalınlığının gerilme, rijitlik ve dinamik davranış üzerindeki etkilerini incelemiş ve rim kalınlığının kritik bir tasarım parametresi olduğunu ortaya koymuştur (Yılmaz vd., 2022).

Bu çalışmada hibrit dişlinin göbek bölgesindeki kompozit plakanın elastisite modülünün dişli çarktaki diş dibi gerilmelerine ve rijitliğe etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Bunun için önce dişli çark 3B olarak tasarlanmış daha sonra sonlu elemanlar paket programı kullanılarak yükleme ve sınır şartları verilmiştir.

Şekil 2 Tasarım aşamaları Farklı süren taraf kavrama açısına sahip hibrit dişli çarklar; a) 20°, b) 25°, c) 30°



Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan dişli çarklara ait tasarım parametreleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1 Dişli tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	Değer
Modül (xm)	3
Diş sayısı z	20
Süren taraf kavrama açısı α_d	20°
Sürülen taraf kavrama açısı α_c	20°
Diş başı yüksekliği h_a (xm)	1
Diş dibi yüksekliği h_f (xm)	1,25
Kesici takım uç radyüsü $\rho_{1,2}$ (xm)	0.3
Dişli çark genişliği b (mm)	24
Rim kalınlığı (xm)	0,5-0,75-1-1,5-2
Kavrama oranı i	1

Bu çalışmada incelenen hibrit dişli çarklarda, diş-rim ve göbek bölgeleri çelik malzeme kullanılarak izotropik özellikte tanımlanmış; elastisite modülü $E = 210 \text{ GPa}$ ve Poisson oranı $\nu = 0,3$ olarak kabul edilmiştir. Gövde kısmı ise karbon fiber takviyeli kompozit malzemeden oluşturulmuş ve ANSYS ortamında literatürde yer alan veriler kullanılarak ortotropik malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Benzer şekilde, yapıştırma bölgesi kohezif bölge yaklaşımı kullanılarak modellenmiş ve ilgili malzeme özellikleri literatürden alınmıştır (Yılmaz vd., 2022). Kompozit malzemeye ve yapıştırıcıya ait mekanik özellikler sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2 Kompozit katman özellikleri

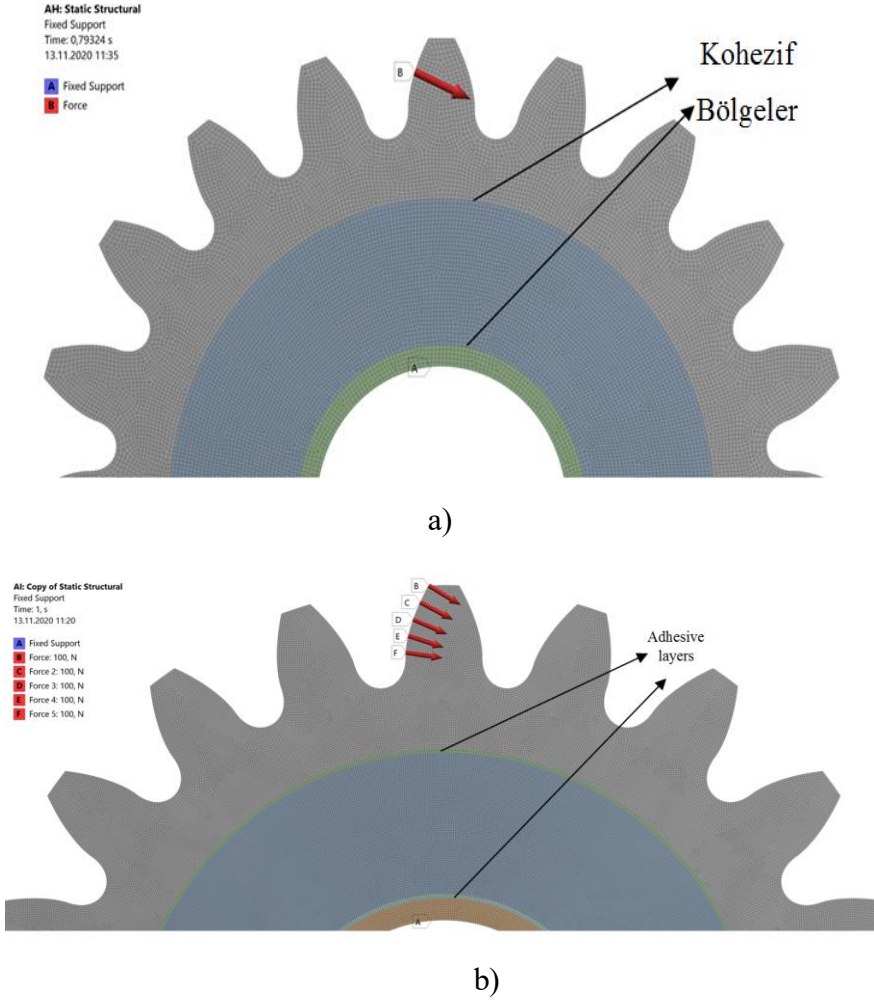
Elastisite modülleri			Poisson oranları			Kayma modülleri		
E_x (GPa)	E_y (GPa)	E_z (GPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy} (GPa)	G_{xz} (GPa)	G_{yz} (GPa)
60- 81,65- 120	60- 81,65- 120	6,81	0,32	0,27	0,27	30,76	2,76	2,76

Tablo 3 Yapıştırıcı parametreleri

Malzeme özellikleri	
Çekme hasar mukavemeti σ_n (MPa)	57
Kayma hasar mukavemeti τ_n (MPa)	32,9
Çekme kırılma enerjisi G_{IC} (J/m ²)	1180
Çekme kırılma enerjisi G_{IIC} (J/m ²)	1500

Analizde kullanılan yükleme ve sınır koşulları Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 3 Yükleme ve sınır koşulları a) Gerilme b) Rijitlik



Sonlu elemanlar ağ yapısında hekzahedral elemanlar tercih edilmiştir. Dişli çark üzerine 100 Nm büyüklüğünde bir momentin etki ettiği varsayılmıştır. Bu momentin dişlide oluşturduğu normal kuvvet (F_N), ilgili bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Mil deliği bölgesi ise tüm dönme ve öteleme hareketlerini engelleyecek şekilde sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar ağ yapısında hekzahedral elemanlar tercih edilmiştir. Analizlerde dişli çark

üzerine 100 Nm büyüklüğünde bir torkun uygulandığı varsayılmıştır. Bu torkun dişli dişlerinde oluşturduğu normal kuvvet (F_N), ilgili bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Mil deliği bölgesi ise dönme ve öteleme hareketlerini tamamen engelleyecek biçimde sabit mesnet koşulu ile sınırlandırılmıştır. Oluşturulan tam dişli modelleri sonlu elemanlar deformasyon analizlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada kuvvetler diş yan yüzeyi boyunca 5 farklı çizgiden uygulanmıştır. Dişli göbeği dönme ve ötelenmeye fırsat vermeyecek şekilde mesnetlenmiştir. 0.15 mm ayırıt uzunluğuna sahip Hekzahedral ağ yapısı kullanılmıştır. (Şekil 3)

Bulgular

Bu kısımda kompozit plaka elastisite modülünün gerilme üzerinde etkilerini incelemek amacıyla temel olarak aldığımız kompozit malzeme sabitlerinden sadece E_x ve E_y değerleri azaltılıp artırılmıştır. Diğer değerlerin ise aynı kaldığı varsayılmıştır. Tablo 4 te ise kompozit plaka elastisite modülünün diş dibi gerilmelerinin üstündeki etkileri verilmiştir.

Tablo 4 Hibrit dişlilerde diş dibi gerilmelerine kompozit plaka elastisite modülünün etkisi

	Plaka elastisite modülü (GPa)		
	60	81,6	120
Rim kalınlığı	Diş dibi gerilmeleri (MPa)		
0,5xm	159,2	152,7	146,34
0,75xm	146,83	142,92	140,39
1xm	140,35	139,34	138,13
1,5xm	134,19	134,11	133,96
2xm	133,18	132,79	132,51

Tablo 4’ teki değerlere göre kompozit plakanın X ve Y yönündeki elastisite modülünün diş dibi gerilmesine düşük bir etkisi bulunmaktadır. Özellikle 1xm rim kalınlığından sonra elastisite modülünün etkisi neredeyse sıfırlanmaktadır (<%1). 0,5xm rim kalınlığında ise elastisite modülü 60 GPa’ dan 120 GPa’ çıkarıldığında diş dibi gerilmesi yaklaşık %8 düşmektedir. 0,75xm rim kalınlığında ise bu oran %4,5’ a düşmektedir. Buradan hareketle plakanın elastisite modülünün diş dibi gerilmeleri üzerine sadece düşük rim kalınlıkları için etkili olduğu sonucu çıkarılabilir.

Tek diş rijitliği direkt olarak diş deplasman miktarına bağlıdır. Elastisite modülü de bu deplasman miktarına etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu sebeple bu kısımda kompozit plaka elastisite modülünün tek diş rijitliğine etkileri süren taraf kavrama açısı 20° için Tablo 5’ te verilmiştir.

Tablo 5 Tek diş rijitliğinin kompozit elastisite modülüne göre değişimi

Tek diş rijitlikleri (N/mm)					
$E_{x,y}=60 \text{ GPa}$					
	Kuvvet uygulama noktaları				
Rim kalınlığı (xm)	1	2	3	4	5
0,5	4594,533	6160,67	7774,855	9384,384	10794,36
1	5482,456	7282,26	8942,942	10497,81	11803,03
1,5	6010,699	7923,93	9601,143	11108,77	12349,03
2	6251,954	8259,684	9948,842	11426,35	12630,41

$E_{x,y}=81,6 \text{ GPa}$					
Rim kalınlığı (xm)	1	2	3	4	5
0,5	4751,948	6389,368	8059,966	9715,341	11152,87
1	5630,314	7500,188	9215,74	10813,85	12147,72
1,5	6143,638	8124,797	9855,13	11408,23	12679,41
2	6363,752	8435,259	10175,01	11695,22	12932,09
$E_{x,y}=120 \text{ GPa}$					
Rim kalınlığı (xm)	1	2	3	4	5
0,5	4846,987	6517,155	8221,165	9909,647	11375,93
1	5777,341	7717,836	9488,957	11130,9	12495,16
1,5	6287,331	8325,008	10110,13	11706,04	13009,65
2	6475,426	8608,815	10399,66	11962,01	13230,14

Tablo incelendiğinde kompozit plaka elastisite modülünün tek dış rijitliğine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Buna göre elastisite modülü iki katına çıkarıldığında rijitlik ortalama %4 olarak artmaktadır.

Sonuç

Bu çalışmada hibrit dişliler farklı rim kalınlıklarında 3B olarak tasarlanmışlar ve sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulmuşlardır. Hibrit dişlinin göbek kısmını oluşturan kompozit plakanın elastisite modülünün değişiminin dış dibi gerilmesi ve tek

rijitliğine etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Buna göre;

- Rim kalınlığının arttıkça elastisite modülündeki değişimin hem gerilme hem rijitlik açısından azaldığı görülmüştür.
- Elastisite modülünün gerilme ve rijitlik üzerine oldukça sınırlı bir etkisi olduğu görülmüştür.

Kaynakça

Catera, Mundo, D., Treviso, A., Gagliardi, F., & Visrolia, A. (2018). On the Design and Simulation of Hybrid Metal-Composite Gears. *Applied Composite Materials*. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9753-6>

Contartese, N., Catera, P. G., & Mundo, D. (2019). Static mesh stiffness decomposition in hybrid metal-composite spur gears. *İçinde Advances in Mechanism and Machine Science (C. 73, ss. 977–985)*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9>

Doğan, O., Yılmaz, T. G., & Karpat, F. (2018). Stress analysis of involute spur gears with different parameters by finite element and graphical method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(4), 1493–1504. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416445>

Gauntt, S. M., & Campbell, R. L. (2019). Characterization of a Hybrid (Steel-Composite) Gear with Various Composite Materials and Layups. January. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0146>

Handschuh, R. F., Laberge, K. E., Deluca, S., & Pelagalli, R. (2014). Vibration and Operational Characteristics of a Composite-Steel (Hybrid) Gear - NASA/TM—2014-216646.

Litvin, F., & Fuentes, A. (2004). *Gear Geometry and Applied Theory (Second Edi)*. Cambridge University Press.

Yılmaz, T. G., Dogan, O., & Karpat, F. (2017). Stress analysis of thin rimmed spur gear with asymmetric trochoid. *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*. <https://doi.org/10.11159/icmie17.132>

Yılmaz, T. G., Doğan, O., & Karpat, F. (2022). A numerical investigation on the hybrid spur gears: Stress and dynamic analysis.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C:
Journal of Mechanical Engineering Science, 236(1), 354–369.
<https://doi.org/10.1177/0954406220982007>

BÖLÜM 17

PLASTİK PARÇALARDA ÇARPILMA VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

1. ONURALP ULUER¹
2.GÖZDENUR COŞTAN²

Giriş

Plastik enjeksiyon kalıplama, otomotiv, beyaz eşya, tıbbi cihazlar, elektronik ve ambalaj endüstrilerinde en yaygın kullanılan üretim yöntemlerinden biridir. Yöntemin temel avantajı, yüksek hacimli üretimde karmaşık geometrilere sahip parçaların yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik ile üretilmesidir. Bu nedenle küresel ölçekte plastik işleme sektörünün büyük bir kısmını enjeksiyon kalıplama oluşturmaktadır. Ancak süreç, çok parametrelili, doğrusal olmayan ve ısı, akışkan dinamiği, malzeme davranışı gibi farklı fiziksel olguların etkileşimini barındıran karmaşık bir yapıdadır. Bu karmaşıklık, üretim sürecinde kalite problemlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Osswald, 2013).

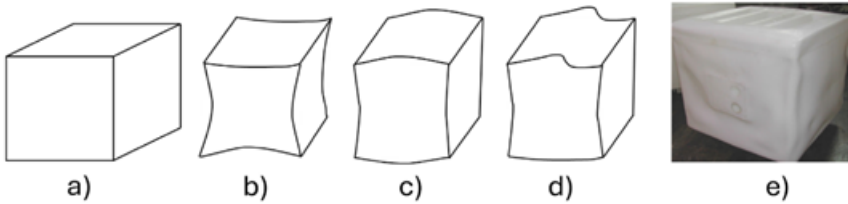
Bu kalite problemleri arasında en kritik olanlardan biri, çarpılma (warp) olarak bilinmektedir. Çarpılma, nihai ürünün

¹ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-7488-3166

² Arş. Gör., Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-4906-1632

tasarlanan geometriye uygun olmamasına yol açmakta, ürün işlevselliğini ve montaj uyumluluğunu düşürmekte, dolayısıyla hem üretim verimliliğini azaltmakta hem de maliyetleri artırmaktadır. Geleneksel yöntemlerde çarpılma sorununu minimize etmek, genellikle deneme-yanılma yoluyla parametre ayarlamaları yapmayı gerektirmektedir, bu da zaman ve kaynak israfına neden olmaktadır (Billmeyer, 1984).

Resim 1 Çarpılma Tipleri a)beklenen şekil b)iç bükey c)dış bükey d)düzensiz e)çarpılan parça



Kaynak: (Coca-Gonzalez, 2025)

Endüstri 4.0 paradigması ile birlikte, üretim süreçlerinde dijitalleşme, yapay zekâ, sayısal modelleme ve büyük veri analitiği gibi teknolojiler ön plana çıkmıştır. Plastik enjeksiyon kalıplamada çarpılmanın önlenmesine yönelik araştırmalar da bu doğrultuda ilerlemekte, gerçek zamanlı izleme, dijital ikiz uygulamaları, optimizasyon algoritmaları ve makine öğrenimi tabanlı tahmin modelleri ile kalite kontrol süreçleri yeniden tanımlanmaktadır. Dolayısıyla çarpılma problemi, yalnızca üretim mühendisliği açısından değil, aynı zamanda dijital dönüşüm ve akıllı üretim stratejileri bağlamında da ele alınması gereken çok boyutlu bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Tsai, 2022).

Plastik Enjeksiyon Sürecinde Çarpılmaya Neden Olan

Faktörler

Çarpılma, plastik enjeksiyon kalıplamada soğuma aşamasında farklı bölgelerin eşit olmayan büzülmesi sonucunda ortaya çıkan

geometrik bozulma problemidir. Parçanın farklı bölgelerindeki sıcaklık gradyanları, malzeme özelliklerindeki anizotropi ve soğuma hızlarındaki farklılıklar, çarpılmanın en temel nedenleri arasında yer almaktadır (Damir Godec, 2025).

Malzeme Özellikleri

Plastik enjeksiyon kalıplamada çarpılmanın oluşumunda malzemenin iç yapısına bağlı fiziksel ve morfolojik özellikler kritik rol oynamaktadır. Polimerin morfolojisi (amorf–yarı kristalin yapısı), kristalizasyon eğilimi, termal genleşme katsayısı, PVT davranışı, higroskopiklik, dolgu/lif katkıları ve viskozite gibi özellikler, soğuma sırasında büzülme davranışını doğrudan etkileyerek düzensiz hacim değişimlerine ve iç gerilmelere yol açmaktadır (Tadmor, 2013)

Polimer tipi ve kristalizasyon eğilimi

Polimerler morfolojik olarak amorf ve yarı-kristalin olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır ve bu morfolojik özellik, enjeksiyon kalıplamada çarpılma davranışını önemli düzeyde belirler. Amorf polimerlerde makromoleküller düzensiz, rastgele sarılmış bir yapıya sahiptir. Kristalin bölgeler bulunmadığından hacimsel büzülme daha sınırlı ve daha homojendir. Yarı-kristalin polimerlerde zincirler hem kristalin hem amorf bölgeler oluşturur. Bu yapı, büzülme ve çarpılma davranışını daha karmaşık ve değişken hale getirir (Osswald, 2013)

Resim 2 Amorf malzeme



Kaynak: (Team, 2019)

Yarı-kristalin termoplastikler (örneğin PP, PE, POM, PA vb.) katılaşma sırasında amorf polimerlere kıyasla daha yüksek hacimsel büzülme (shrinkage) gösterir; bu da malzemenin akış yönüne ve kesit yönüne göre farklı büzülme (anisotropi) anlamına gelir. (McGarry, 2025)

Resim 3 Yarı-kristalin malzeme



Kaynak: (Team, 2019)

Polimerlerde kristalizasyon, eriyik halden katı hale geçiş sırasında zincirlerin düzenli bir yapı oluşturmasıyla gerçekleşir. Bu mekanizma iki ana aşamadan oluşur: çekirdeklenme ve kristal büyümesi (Billmeyer, 1984)

Bu süreç enjeksiyon kalıplamada çarpılmanın temel belirleyicilerinden biridir. Kristalleşme süreci soğuma hızı, kalıp sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır; özellikle soğuma yavaş ve kalıp sıcaklığı yüksek tutulursa, kristalleşme oranı artar, bu da daha yüksek büzülme oranı ve iç gerilmeye yol açarak çarpılma riskini artırır (Damir Godec, 2025)

Dolgu/lif katkıları ve katkı maddeleri

Dolgu maddeleri (cam elyaf, mineral dolgu vb.) polimerin viskozite, büzülme ve yönelim davranışını değiştirdiği için çarpılma üzerinde doğrudan etkilidir. Cam elyaf, mineral dolgular veya benzer katkıları içeren kompozit plastikler katkıları polimer matrisine göre farklı termal genleşme ve büzülme davranışı gösterdiğinden akış yönü ve çapraz yön arasında büzülme düzensizliğine neden olabilir. Bu, parçada yönelim bağımlı büzülmeye ve dolayısıyla çarpılmaya yol açar (West, 2025)

Dolgu ve lif katkılarının varlığı, viskozite, akış ve kristalleşme davranışlarını da değiştirerek, dolgu yoğunluğu, elyaf yönelimi ve dağılımına bağlı olarak iç gerilme ve boyutsal değişkenlik riskini artırır (McGarry, 2025)

Termal genleşme / PVT davranışı / viskozite / higroskopiklik

Termoplastiklerin termal genleşme katsayısı metallere göre genellikle çok daha yüksektir, bu da sıcaklık değişimlerine karşı boyutsal kararsızlık sağlar; kalıplama ve soğuma sürecinde hacimsel değişimler önemli çarpılma potansiyeli doğurur (Ying Yan, 2021)

Polimerin viskozitesi ve PVT (pressure-volume-temperature) davranışı hem akış sırasında hem de soğuma-sertleşme evresinde polimer zincirlerinin yeniden düzenlenmesini ve iç gerilme oluşumunu etkiler; yüksek viskozite ve uygun olmayan PVT davranışı olan malzemelerde homojen büzülme zorlaşır; bu da çarpılmaya yol açar (McGarry, 2025)

Higroskopik polimerler, çevreden nem (su buharı) çekme eğilimi yüksek olan termoplastik malzemelerdir. Bu polimerler atmosferdeki nemle etkileşime girerek moleküler yapılarına su alır; bu nedenle üretim öncesinde ve sonrasında nem kontrolü kritik önem taşır. Higroskopik malzemelerde nem içeriği, kurutma öncesi ve sonrası işlem koşullarına bağlı olarak parçanın nihai boyutlarında değişkenlik olabilir; özellikle nem alma / kurutma yeterli değilse, nemin polimer zincirleri arasına sızması ve sonradan kuruma/kurumama farklılıkları iç gerilmelere ve çarpılmaya neden olabilir (Mold, 2019)

Proses (İşlem) Parametreleri

Enjeksiyon kalıplamada proses parametreleri, eriyik polimerin kalıp içerisine doldurulması, sıkıştırılması, soğutulması ve kalıptan çıkarılması süreçlerini kontrol eden temel işlem değişkenleridir. Bu parametreler; eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı,

enjeksiyon hızı/basıncı, tutma (holding) basıncı ve süresi, soğutma süresi, dolum süresi gibi ayarları kapsar

Bu parametrelerin her biri, polimerin kalıp içinde nasıl aktığını, zincirlerin nasıl yönlendiğini, kristalleşmenin hangi hızla gerçekleştiğini ve soğuma sırasında hacimsel büzülmenin ne ölçüde ortaya çıktığını doğrudan etkiler (Tadmor, 2013)

Proses parametreleri uygun şekilde optimize edilmediğinde, kalıp içindeki sıcaklık dağılımı, basınç profili ve soğuma dengesi bozulur. Bunun sonucunda parça farklı bölgelerde farklı büzülme ve iç gerilme miktarlarına maruz kalır. Bu dengesizlik, çarpılmaya neden olur. Bu nedenle işlem parametrelerinin kontrollü ve birbirleriyle uyumlu şekilde ayarlanması, çarpılmanın önlenmesinde kritik rol oynamaktadır.

Kalıp ve eriyik sıcaklığı:

Kalıp sıcaklığı, plastik parçanın soğuma ve kristalleşme profilini belirler. Düşük kalıp sıcaklığı ani soğuma ile yüzey katmanının erken sertleşmesine, çekirdek kısmın daha geç soğumasına yol açarak iç gerilme oluşturabilir. Tam tersi, çok yüksek kalıp sıcaklığı ise parçanın uzun sürede soğumasına neden olabilir; bu da kristalleşme artışı ve yüksek çarpılma riski demektir (Technology, 2024)

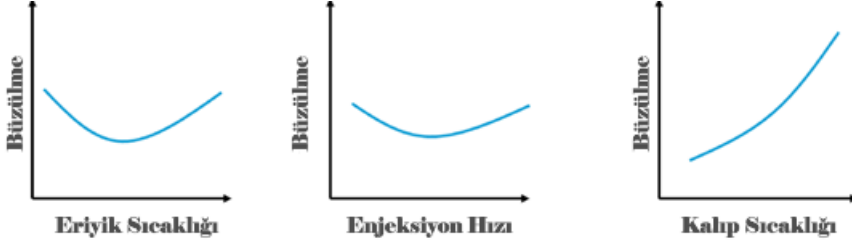
Enjeksiyon basıncı, tutma (packing/holding) basıncı ve süresi:

Yetersiz enjeksiyon veya tutma basıncı, kalıbın tam dolmamasına, boşlukların veya düşük yoğunluklu bölgelerin oluşmasına neden olur; bu da parçanın farklı bölgelerinde farklı çarpılma oranlarına neden olur. Aşırı basınç ise iç gerilme oluşturabilir; her iki durumda da çarpılma riski artar (Melito, 2023)

Soğutma süresi ve soğutma hızı / kalıp soğutma dengesi:

Yeterli ve dengeli soğutma süreci olmadan, kalıp içerisinde farklı bölgeler farklı hızlarda soğur bu da hacim büzülmesinin dengesiz olmasına yol açar. Soğutma kanallarının yetersizliği ya da dengesiz yerleşimi, farklı kristalleşme ve gerilme oluşumuna neden olur (Damir Godec, 2025).

Resim 4 İşlem Parametrelerinin çarpılmaya etkisi



Kaynak: (Coca-Gonzalez, 2025)

Erime viskozitesi / akış özellikleri:

Ergiyik polimer yeterince akışkan değilse, kalıp içinde homojen dolma ve düzgün moleküler yönelim sağlamak zorlaşır, bu da içine kalıntı gerilmelerin artmasına neden olarak çarpılmaya yol açabilir.

Kalıp Tasarımı ve Geometrik Faktörler

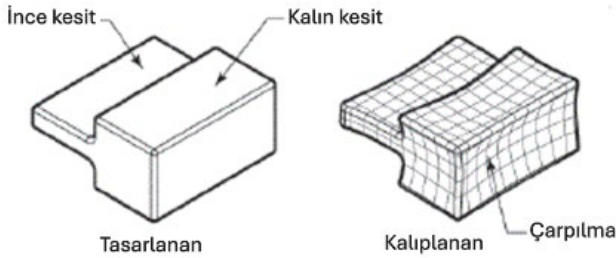
Kalıp tasarımı, bir parçanın istenen şekil ve boyutlarda üretilebilmesi için kalıbın yolluk tasarımı, soğutma sistemi, ayırma yüzeyi ve çıkartıcı mekanizmaları gibi unsurların mühendislik prensiplerine göre planlanması sürecidir ve üretim sonrası oluşabilecek çarpılma (warp) gibi hataların önlenmesinde kritik rol oynar. Ayrıca, parçanın geometrisinde çarpılmayı doğrudan etkiler; et kalınlığı farklılıkları, asimetrik yapı, uzun ve ince formlar, keskin köşeler soğuma dengesizliğine ve iç gerilmelere neden olarak parçanın deformasyona uğramasına yol açabilir. İyi tasarlanmış bir kalıp, malzeme akışını dengeleyen doğru giriş noktaları, eşit

soğutma sağlayan hatlar ve uygun havalandırma ile bu etkileri minimize ederken, parça geometrisiyle uyumlu çekme ve çıkartma tasarımı da kalıcı deformasyon riskini azaltır; böylece hem ürün kalitesi yükselir hem de üretim verimliliği artar.

Duvar kalınlığı değişkenliği:

Parçanın farklı bölgelerinde duvar kalınlığının değişken olması kalın ve ince bölgelerin beraber bulunması soğuma sırasında oluşan sıcaklık farkından dolayı bölgesel büzülme farklarına yol açar; bu da çekme, bükülme veya burulma gibi çarpılmalara neden olabilir (Melito, 2023)

Resim 5 Duvar kalınlığının çarpılmaya etkisi

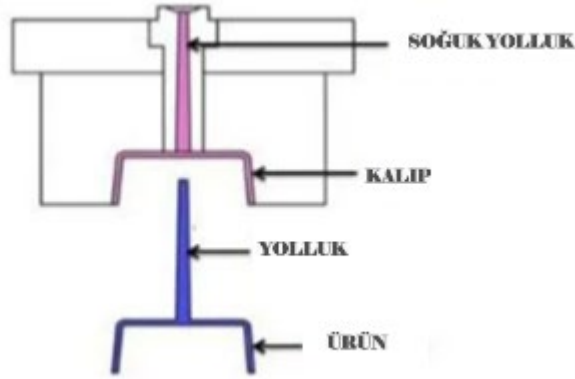


Kaynak: (JackLiu, 2017)

Akış yolları, yolluk konumu, soğutma kanalları:

Akış yönü, giriş konumu ve yolluk tasarımı plastik akışının yönünü, fiber veya filler yönelimini ve dolum düzenini doğrudan etkiler. Dengesiz akış veya dengesiz soğutma kanalları / yetersiz soğutma, parçanın bazı bölgelerinde hızlı, bazılarında yavaş soğumaya yol açarak homojen olmayan bir büzülme oluşturur (Gao, 2014)

Resim 6 Soğuk Yolluk Sistemi



Kaynak: (Tang, 2024)

Parça geometrisi:

Özellikle geniş yüzeyli, ince cidarlı parçalar ya da kalınlık değişkenliği olan parçalar, iç gerilme ve büzülme farklarından dolayı yüksek çarpılma olasılığı taşır. Karmaşık geometri ve büyük yüzey alanı, soğuma ve dolgu sırasında parça içinde iç gerilimlere neden olabilir (West, 2025)

Çevresel Koşullar /Malzeme Hazırlık & Sonrası Süreçler

Çevresel koşullar çarpılmayı doğrudan etkiler. Malzemenin yeterince kurutulmaması, hatalı nem ve sıcaklık koşulları ile düzensiz soğutma, iç gerilme oluşumunu artırarak parçada deformasyonlara yol açabilir. Üretim sonrası ortam sıcaklığı ve nemde meydana gelen ani değişimler de homojen olmayan büzülme davranışına neden olduğu için çarpılmayı artırabilir. Bu nedenle hem malzeme hazırlığının doğru yapılması hem de çevresel şartların kontrollü tutulması çarpılmayı minimize etmek için önem taşır.

Malzeme Hazırlık Süreci:

Özellikle higroskopik plastiklerde: Kalıp öncesi nem alma / kurutma yeterince yapılmadığında veya üretim / depolama ortamının

nemi yüksek olduğunda, malzeme nem alabilir; bu da eriyik viskozitesini, akış ve dolgu davranışını etkileyerek homojen olmayan büzülme ve dolayısıyla çarpılmaya yol açabilir (Mold, 2019)

Soğutma ve kalıp sonrası sıcaklık / nem / saklama koşulları:

Parça kalıptan çıktıktan sonra soğuma ve çevresel sıcaklık / nem değişimleri de boyutsal kararlılığı etkileyebilir; özellikle ince cidarlı ya da yüksek kristalleşmeli parçalar zamanla deformasyona daha duyarlı olabilir (Mold, 2019)

Çarpılmanın Endüstriyel Önemi

Çarpılma, yalnızca parça kalitesini düşürmekle kalmamakta, aynı zamanda üretim sonrası süreçleri de olumsuz etkilemektedir. Örneğin, otomotiv endüstrisinde montaj hatalarında uyumsuzluk, beyaz eşyada sızdırmazlık problemleri, elektronik endüstrisinde ise fonksiyonel bozulmalar çarpılma nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle çarpılma, hem maliyet artırıcı hem de müşteri memnuniyetini azaltıcı kritik bir kusur olarak değerlendirilmektedir.

Çarpılma Tahmini ve Geleneksel Yaklaşımların Sınırlılıkları

Çarpılmanın tahmini, geleneksel olarak deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı simülasyonlar ile yapılmıştır. Ancak bu yöntemler yüksek hesaplama maliyeti, uzun çözüm süreleri ve gerçek zamanlı kontrol eksikliği nedeniyle sanayide sınırlı kullanılabilir. Ayrıca, çarpılmanın çok değişkenli ve doğrusal olmayan yapısı, klasik istatistiksel yaklaşımların ötesinde, daha gelişmiş algoritmalara ihtiyaç doğurmaktadır. İşte bu noktada, dijitalleşme tabanlı yaklaşımlar (makine öğrenimi, yapay zekâ, dijital ikiz vb.) devreye girmektedir.

Dijitalleşme Tabanlı Yaklaşımlar

Enjeksiyon kalıplamada çarpılma probleminin çözümü için dijitalleşme, yalnızca teorik bir eğilim değil, endüstride uygulanabilirliği kanıtlanmış bir strateji haline gelmiştir. Literatürdeki güncel çalışmalar incelendiğinde, dijitalleşme kapsamında öne çıkan dört temel yaklaşım bulunmaktadır: (i) makine öğrenimi ve yapay zekâ yöntemleri, (ii) sayısal simülasyon ve fizik tabanlı modeller, (iii) dijital ikiz ve gerçek zamanlı izleme sistemleri, (iv) istatistiksel ve hibrit yöntemler.

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Uygulamaları

Makine öğrenimi tabanlı yaklaşımlar, çarpılma probleminin çözümünde öne çıkan en güçlü araçlardan biridir. Bu yöntemler, yüksek boyutlu üretim verilerinden anlamlı desenler çıkararak tahmin doğruluğunu artırmaktadır.

Yapay zekâ ve makine öğrenimi uygulamalarına yönelik literatür incelendiğinde, (Lin J.-S. &.-H., 2024) , plastik enjeksiyon kalıplamada sıfır hatalı üretim için PSO ve C4.5 tabanlı bir karar destek sistemi geliştirmiş ve makine öğrenimi ile süreç kalitesini yüksek oranda doğrulukla tahmin etmiştir. (Chiu, 2024), plastik enjeksiyon üretim hatlarında kalite tahmini için XGBoost–GRU–SVM tabanlı bir model oluşturmuş ve KOBİ’lerde dijital dönüşümün uygulanabilirliğini artırmıştır. (Struchtrup, 2021), enjeksiyon kalıplama süreçlerinde parça kalitesini tahmin eden topluluk öğrenmesi modelleri geliştirerek temel modellere göre daha yüksek performans elde etmiştir. (Finkeldey, 2020), plastik enjeksiyon proses parametreleri ile ürün kalitesi arasındaki ilişkileri makine öğrenmesiyle modellemiş ve kalınlık ile ağırlık tahmininde yüksek doğruluk sağlamıştır.

Sayısal Simülasyon ve Fiziksel Modelleme

Sayısal simülasyonlar ve fizik tabanlı modeller, çarpılmanın kökenini anlamada kritik rol oynamaktadır. (Hopmann, 2021), plastik enjeksiyon kalıplamada özgül hacmi Modified Tait Model ile tahmin ederek soğutma hızının büzülme ve çarpılma üzerindeki etkisini doğrulamıştır. (Demirci, 2020) , plastik enjeksiyonla üretilen ince cidarlı bir parçanın çarpılmasını FEM ve RSM ile analiz etmiş ve kalıp sıcaklığının en baskın parametre olduğunu göstermiştir. (Stemmler, 2020), plastik enjeksiyon prosesinde NOILC tabanlı model kontrollü optimizasyonla basınca bağlı olarak gelişen hataları başarılı şekilde kontrol etmiştir. (Tsai, 2022), plastik enjeksiyon makinelerinde uyarlanabilir kontrol algoritması kullanarak basınç eğrisini stabilize etmiş ve ürün kütlesinde meydana gelen değişimi azaltmıştır. (Vukovic, 2022), plastik enjeksiyon süreçleri için doğrusal olmayan model tabanlı basınç kontrolü geliştirerek makine ayarlarına duyarlılığı düşüren adaptif bir çözüm sunmuştur.

Dijital İkiz ve Gerçek Zamanlı İzleme

Dijital ikiz teknolojisi, çarpılma tahmininde gelecek vadeden bir yöntemdir. Gerçek üretim sürecinin sanal kopyası, sensör verileri ile beslenerek süreç boyunca öngörücü analiz yapılmasını sağlamaktadır. (Modoni, 2022), mikro ölçekli plastik enjeksiyon süreçlerinde dijital ikiz teknolojisiyle reolojik modele uymayan parçaları tespit eden ve gerçek süreç için parametre düzeltmesi öneren bir yapı geliştirmiştir. (Hürkamp, 2021), enjeksiyon kalıplama sırasında ara yüz sıcaklığının tahmini için simülasyon ve ML tabanlı dijital ikiz yaklaşımı geliştirerek parça kalitesinin gerçek zamanlı izlenmesini sağlamıştır. (Chen J. Y., 2019), plastik enjeksiyon döngüsü boyunca çekme çubuğunun uzamasını izleyen gerinim ölçer tabanlı bir çevrim içi kalite kontrol sistemi tasarlamıştır. (Gao, 2014), enjeksiyon sürecinde sensör verileriyle çalışan SVR tabanlı bir kalite izleme sistemi geliştirerek parça

ölçülerini çevrim içinde yüksek doğrulukla tahmin etmiştir. (Su, 2022), plastik enjeksiyon proseslerinde sıkıştırma kuvveti ve nozül basıncı temelli adaptif kontrolle ağırlık varyasyonunu azaltan bir izleme ve kontrol yöntemi önermiştir.

İstatistiksel ve Hibrit Yöntemler

İstatistiksel yöntemler, parametre optimizasyonunda ve çarpılmaya etki eden faktörlerin belirlenmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. (Zhang, 2025), plastik enjeksiyon kalıplamada Taguchi ve SolidWorks Plastics ile çarpılma optimizasyonu yaparak ortam ve erime sıcaklığının %83'ten fazla etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. (Chen J. Y., 2021), plastik enjeksiyonla üretilen parçaların V/P geçiş noktasını regresyonla optimize ederek genişlik ve kalınlık farklarını önemli ölçüde azaltmıştır. (Ke, 2020), plastik enjeksiyon sonrası geometrik doğruluğu tahmin eden kalite endeksi–sinir ağı hibrit modelini geliştirerek boyutsal tahmin başarımını artırmıştır. (Chen S.-C. L.-W.-D., 2008), plastik enjeksiyon üretiminde sinir ağı tabanlı hibrit kalite tahmin modeliyle önceki istatistiksel yöntemlere göre daha güvenilir performans göstermiştir.

Tablo 1 Plastik Enjeksiyon Kalıplamada Çarpılma ve Kalite Tahminine Yönelik Çalışmaların Gruplandırılması

Yöntem Grubu	Yazar (Yıl)	Kullanılan Yöntem / Model	Temel Bulgular / Katkı
Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi	Lin et al. (2024)	PSO + C4.5	Süreç kalitesi yüksek doğrulukla tahmin edilmiş, karar destek sistemi geliştirilmiştir.
	Chiu (2024)	XGBoost + GRU + SVM	Hibrit model ile yüksek tahmin başarımı, KOBİ'lerde dijital dönüşüm uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Yöntem Grubu	Yazar (Yıl)	Kullanılan Yöntem / Model	Temel Bulgular / Katkı
	Struchtrup (2021)	Ensemble Learning	Topluluk öğrenmesi ile tekil modellere kıyasla daha yüksek performans elde edilmiştir.
	Finkeldey (2020)	ML tabanlı regresyon modelleri	Proses parametreleri ile kalite arasında güçlü ilişki kurulmuştur.
Sayısal Simülasyon ve Fiziksel Modelleme	Hopmann (2021)	Modified Tait Model	Soğutma hızının çarpılma üzerindeki etkisi doğrulanmıştır.
	Demirci (2020)	FEM + RSM	Kalıp sıcaklığı en baskın parametre olarak belirlenmiştir.
	Stemmler (2020)	NOILC tabanlı model kontrol	Model tabanlı optimizasyon ile süreç kararlılığı sağlanmıştır.
	Tsai (2022)	Uyarlanabilir kontrol algoritması	Ürün kütesindeki değişim azaltılmıştır.
	Vukovic (2022)	Doğrusal olmayan model tabanlı kontrol	Makine ayarlarına duyarlılığı azaltan adaptif çözüm sunulmuştur.
Dijital İkiz ve Gerçek Zamanlı İzleme	Modoni (2022)	Dijital ikiz + reolojik model	Modele uymayan parçalar tespit edilmiş, parametre düzeltmeleri önerilmiştir.
	Hürkamp (2021)	Simülasyon + ML tabanlı dijital ikiz	Gerçek zamanlı kalite izleme sağlanmıştır.
	Chen (2019)	Gerinim ölçer tabanlı izleme	Parça uzaması süreç boyunca izlenmiştir.

Yöntem Grubu	Yazar (Yıl)	Kullanılan Yöntem / Model	Temel Bulgular / Katkı
	Gao (2014)	SVR + sensör verileri	Parça ölçüleri çevrim içinde yüksek doğrulukla tahmin edilmiştir.
	Su (2022)	Adaptif izleme ve kontrol	Sıkıştırma kuvveti ve nozül basıncı temelli kontrolle kalite iyileştirilmiştir.
İstatistiksel ve Hibrit Yöntemler	Zhang (2025)	Taguchi + SolidWorks Plastics	Ortam ve erime sıcaklığının %83'ten fazla etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.
	Chen (2021)	Regresyon analizi	Genişlik ve kalınlık farkları azaltılmıştır.
	Ke (2020)	Kalite endeksi + Yapay sinir ağı	Hibrit model ile tahmin başarımları artırılmıştır.
	Chen et al. (2008)	YSA tabanlı hibrit model	Klasik istatistiksel yöntemlere göre daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

Değerlendirme

Plastik enjeksiyon kalıplamada çarpılma, malzeme davranışı, proses parametreleri, kalıp tasarımı ve çevresel etkilerin birlikte belirlediği çok boyutlu bir problemdir. Literatür çalışmaları, çarpılmanın tek bir kaynaktan değil, süreç boyunca biriken heterojen büzülme ve iç gerilmelerden kaynaklandığını göstermektedir. Geleneksel üretim yöntemlerinde parametre ayarları çoğunlukla operatör deneyimine ve deneme-yanılmaya dayalı olduğundan, süreçteki değişkenliği öngörmek ve sistematik olarak kontrol etmek güçtür. Bu durum, özellikle yarı-kristalin polimerlerde, lif dolgulu kompozitlerde ve karmaşık geometrilili parçalarda çarpılma riskini artırmaktadır.

Simülasyon ve fiziksel modelleme yaklaşımları, soğuma davranışı, PVT ilişkisi ve moleküler yönelim gibi kritik etkilerin analizine olanak tanısa da yüksek hesaplama maliyeti ve uzun çözüm süreleri nedeniyle endüstriyel ölçekte sınırlamalar taşımaktadır. Bu nedenle, üretim hızının yüksek olduğu otomotiv, beyaz eşya ve elektronik sektörlerinde daha hızlı, daha öngörücü ve adaptif yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Dijitalleşme tabanlı çalışmalar, bu gereksinime yanıt niteliğindedir. Makine öğrenimi tabanlı modeller, yüksek boyutlu üretim verilerini işleyerek çarpılmayı klasik yöntemlere göre daha yüksek doğrulukla tahmin edebilmekte; dijital ikiz uygulamaları ise sensör verilerini gerçek zamanlı analiz ederek süreç içi adaptif kontrol imkanı sağlamaktadır. Ancak bu yeni nesil metodolojilerin endüstride geniş ölçekli uygulamaya geçebilmesi için veri entegrasyonu, sensör doğruluğu, model genellenebilirliği ve siber-fiziksel sistemlerin kalıp makineleriyle uyumu gibi konuların olgunlaşması gerekmektedir.

Özetle, çarpılma probleminin yönetimi artık yalnızca proses mühendisliği bakış açısı ile değil, dijital üretim, yapay zekâ ve veri odaklı kontrol stratejileri ile birlikte ele alınması gereken disiplinler arası bir konu haline gelmiştir.

Gelecek Perspektifi

Güncel araştırmalar ve endüstri uygulamaları değerlendirildiğinde, plastik enjeksiyon kalıplamada çarpılmanın yönetimine yönelik gelecek çalışmaların aşağıdaki eksenlerde yoğunlaşacağı öngörülmektedir:

1. Gerçek zamanlı veri temelli kontrol
Enjeksiyon makinesi sensörlerinden alınan basınç, sıcaklık ve viskozite verileri ile anlık kalite tahmini yapılabilen sistemlerin yaygınlaşması beklenmektedir. Bu yapı, çarpılma oluşmadan önce proaktif müdahaleye olanak tanıyacaktır.

2. Dijital ikiz tabanlı kapalı çevrim optimizasyon Yüksek hassasiyetli fiziksel modeller ile makine öğrenimi algoritmalarının birleştirildiği hibrit dijital ikizler, proses boyunca sanal ve fiziksel sistem arasında veri alışverişi yaparak sürekli kendini güncelleyen optimizasyon döngüleri sağlayacaktır.
3. Malzeme davranışının ileri modelleme yöntemleriyle gerçeğe temsil edilmesi Yarı-kristalin polimerlerde kristalizasyon kinetiği, dolgu sistemlerde elyaf yönelim tahmini ve PVT davranışına dair çok ölçekli hesaplamalı modellerin gelişmesi, çarpılma analizlerinin doğruluğunu artıracaktır.
4. Otomatikleştirilmiş parametre ayarı ve uyarlanabilir süreç yönetimi Genetik algoritmalar ve parçacık sürü optimizasyonu gibi yöntemlerle otomatik makine ayarı yapan sistemler, insan faktörüne bağlı değişkenliği azaltarak üretimde tekrarlanabilirliği artıracaktır.
5. Endüstri 5.0 ile insan-makine iş birliği Akıllı yazılımlarla desteklenen operatör karar mekanizmaları, deneyim ve veri odaklı optimizasyonu bir arada kullanarak daha esnek üretim hatları oluşturacaktır.

Bu çerçevede plastik enjeksiyon kalıplamada çarpılmanın gelecekte hem bilimsel araştırmaların hem de endüstriyel inovasyonların odak alanlarından biri olmaya devam edeceği açıktır.

Sonuç

Plastik enjeksiyon kalıplamada çarpılma, üretim verimliliğini ve ürün kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir hata türüdür. Malzeme özellikleri, işlem parametreleri, kalıp tasarımı ve çevresel faktörlerin etkileşiminden doğan bu karmaşık problemin kontrol edilebilmesi için tek bir yöntem yeterli değildir. Geleneksel istatistiksel yöntemler ve fizik tabanlı simülasyonlar, çarpılmanın temel nedenlerini anlamada önemli katkılar sunmakla birlikte,

modern üretim süreçlerinin hız ve adaptasyon gereksinimlerini karşılamakta sınırlı kalmaktadır.

Dijitalleşme tabanlı yaklaşımlar, özellikle makine öğrenimi, dijital ikiz ve gerçek zamanlı izleme çözümleri, çarpılma davranışının daha doğru tahmin edilmesi ve proaktif şekilde kontrol edilmesi açısından güçlü araçlar sunmaktadır. Araştırma sonuçları, bu yöntemlerin parça kalitesini iyileştirme, üretim hatalarını azaltma ve proses optimizasyonunu hızlandırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, çarpılma probleminin etkin yönetimi, hem gelişmiş fiziksel modellerin hem de veri odaklı öğrenme yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bütünlük bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu bütünlük stratejinin, plastik işleme endüstrisinde kalite, maliyet ve zaman parametrelerini önemli ölçüde iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır.

Kaynakça/References

- Billmeyer, F. W. (1984). *Textbook of polymer science*. John Wiley & Sons.
- Chen, J. Y. (2019). Monitoring, prediction and control of injection molding quality. . *Journal of Manufacturing Processes*, 46, 159–169.
- Chen, J. Y. (2021). Determination of process parameters based on cavity pressure characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 180, 121788.
- Chen, S.-C. L.-W.-D. (2008). A neural-network-based approach for quality prediction in injection molding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 1051–1060.

- Chiu, M.-C. H.-J.-J. (2024). Enhancing SMEs digital transformation through machine learning. *Journal of Industrial Information Integration*, 41, 100666.
- Coca-Gonzalez, M. &.-M. (2025). Warpage: Causes, manufacturing processes and future challenges: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 239(6), 1201-1217.
- Damir Godec, F. P. (2025). Molded Part Warpage Optimization Using Inverse Contouring Method. *Polymers MDPI*, 22;17(17):2278.
- Demirci, U. &. (2020). Warpage analysis of injection molded thin-walled chassis part by RSM and FEM. . *Journal of Advances in Manufacturing Engineering*, 1(2), 63-70.
- Finkeldey, F. V. (2020). Learning quality characteristics for plastic injection molding processes using a combination of simulated and measured data. *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 134-143.
- Gao, R. X. (2014). Online product quality monitoring through in-process measurement. *CIRP Annals*, 63(1), 493–496.
- Hopmann, C. X. (2021). Prediction and validation of the specific volume for inline warpage control. *Polymer Testing*, 104, 107393.
- Hürkamp, A. L. (2021). Simulation-based digital twin for thermoplastic composites. *Procedia CIRP*, 100, 1–6.
- JackLiu. (2017, 5 20). *Plastic Injection Mold Design Guidelines in 2017*. Moldchina: <https://www.moldchina.com/post/mold-design-guidelines/> adresinden alındı

- Ke, K. C. (2020). Quality prediction for injection molding by using a multilayer perceptron neural network. *Polymers*, 12(8), 1812.
- Lin, J.-S. &.-H. (2024). A novel decision support system based on computational intelligence and machine learning: Towards zero-defect manufacturing in injection molding. *Journal of Industrial Information Integration*, 40, 100621.
- McGarry, S. (2025, 8 21). *Autodesk*. Injection Molding Parts: Key Factors and Strategies for Minimizing Shrinkage: <https://www.autodesk.com/blogs/design-and-manufacturing/injection-molding-parts-key-factors-and-strategies-for-minimizing-shrinkage/> adresinden alındı
- Melito, S. (2023, 7 23). *Prototype Injection Molding: The Ultimate Guide*. Fictiv: <https://www.fictiv.com/articles/prototype-injection-molding-the-ultimate-guide> adresinden alındı
- Modoni, G. E. (2022). Digital twin for micro injection moulding quality. . *Computers in Industry*, 135, 103568.
- Mold, Y. (2019). *Warpage in injection molding*. Yuco Mold: <https://yucomold.com/> adresinden alındı
- Osswald, T. A.-O. (2013). *Polymer processing: modeling and simulation*. . Carl Hanser Verlag GmbH.
- Stemmler, S. V. (2020). Quality control in injection molding. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10380–10387.
- Struchtrup, A. S. (2021). Adaptive quality prediction in injection molding based on ensemble learning. *Procedia CIRP*, 99, 301–306.
- Su, C. W. (2022). Optimization process parameters and adaptive quality monitoring. *Polymer Testing*, 109, 107526.

- Tadmor, Z. &. (2013). *Principles of polymer processing*. John Wiley & Sons.
- Tang, M. (2024, 10 18). *Enjeksiyon Kalıplamada Soğuk Yolluk Sistemi Hakkında Bilmeniz Gereken Her Şey*. Zetarmold: <https://zetarmold.com/tr/soguk-yolluk-sistemi/#> adresinden alındı
- Team, P. E. (2019, 1 21). *Injection Molding: The Causes of Warpage*. Plastic Technology: <https://www.ptonline.com/articles/injection-molding-the-causes-of-warpage> adresinden alındı
- Technology, B. (2024, 7 2). *Plastik Enjeksiyon Kalıplamada Kalıp ve Eriyik Sıcaklık Kontrolü*. Boyi Technology: <https://tr.boyiprototyping.com/injection-molding-guide/mold-and-melt-temperature-control-in-plastics-injection-molding/> adresinden alındı
- Tsai, M. H.-J. (2022). Development of an online quality control system for injection molding process. *Polymers*, 14(8), 1607.
- Vukovic, M. S. (2022). Adaptive model-based predictive control. *Journal of Manufacturing Processes*, 77, 730–742.
- West, B. (2025, 5 9). *Shrinkage & Warpage in Injection Molding: Causes and Solutions*. Brown Tool and Mold: <https://browntoolandmold.com/shrinkage-warpage-in-injection-molding-causes-and-solutions/> adresinden alındı
- Ying Yan, Y. M. (2021). Machinability of the Thermoplastic Polymers: PEEK, PI,. *MDPI Polymers*, 13,69.
- Zhang, L. C.-L.-C.-C.-Y. (2025). Analysis and optimization of injection molding process on warpage. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*., 137:981–988.

BÖLÜM 18

MAKİNE DİNAMİĞİNDE LAGRANGE KARARLILIĞI VE NEWMARK- β YÖNTEMİ İLE ZAMAN TANIM BÖLGESİNDE MATEMATİKSEL ÇÖZÜM

1. ALİ İHSAN ENGÜR¹

Giriş

Makina dinamiği, mekanik sistemleri hareket halindeyken etkileyen kuvvetleri, momentleri ve enerji değişimlerini matematik dalında diferansiyel denklemler aracılığıyla inceleyen bir bilim dalıdır. Bu alan, titreşim, denge, rotor davranışı, atalet kuvvetleri ve enerji denklemleri üzerine kurulu olup, modern mühendislikte sistem tasarımının ana statüde kabul edilen vazgeçilmez bir bileşenidir. Makinalar, hareket halindeyken sürekli olarak değişen kuvvet ve momentlerle karşılaşır. Bu sistem statik yük altındaki sistemlerden daha tehlikeli ve ani zararlara sebebiyet verebilir. Statik yük altında

¹ Dr. Öğr. Gör. , Kocaeli Üniversitesi, Gölçük MYO,
Orcid: 0000-0003-0124-5491

oluşabilecek zararlar öngörülebilir ancak dinamik yükün olduğu yerlerde mutlak trend analizi gerekmekte sistemde devamlı olarak aynı dinamik yükün olduğu doğrulanmalıdır. Bu etkilerin matematiksel olarak modellenmesi; zaman, amplitüd, frekans, kuvvet ile değişen sisteme uygun olarak kurulan diferansiyel sistem denklemleri aracılığıyla yapılır. Bu denklemler, sistemin hem kararlı hem de kararsız davranışlarını önceden tahmin etmede kullanmakta etkilidirler.

Hareket Denklemleri ve Lagrange Yaklaşımı

Bir mekanik sistemin genel hareket denklemi, Newton–Euler prensibine göre ifade edilir:

$$M(q)q'' + C(q, q')q' + K(q)q = F(t)$$

Bu ifade, çok serbestlik dereceli sistemlerin genel matris diferansiyel denklemi olup, hem lineer hem de nonlineer sistemlerin dinamiğini modelleme de kullanılır. Lagrange yaklaşımında sistemin kinetik (T) ve potansiyel (V) enerjileri tanımlanırsa :

$$L=T-V$$

hareket denklemleri ise şu şekilde elde edilir:

$$d/dt(\partial L/\partial q'i) - \partial L/\partial q_i = Q_i$$

Enerji temelli bu yaklaşım, kompleks mekanizmaların modellenmesinde Newton prensibine göre daha işlenebilir bir yaklaşım sunar.

Çok Serbestlik Dereceli Titreşim Sistemleri

Birden fazla kütle ve yay elemanından oluşan sistemlerde hareket denklemleri, matris şeklinde ikinci mertebeden diferansiyel denklemler olarak yazılabilir ve gösterimi şu şekilde olur:

$$x''+Cx'+Kx=F(t)$$

Serbest titreşim ($F(t)=0$) durumunda sistemin çözümü

$$x(t)=\Phi e^{i\omega t}$$

Sönümün olmadığı durumda ($C=0$) şu karakteristik denklem elde edilir:

$$(K-\omega^2 M)\Phi=0$$

Burada ω doğal frekansları, Φ ise mod modellerini gösterir. Ayrıca bu modal analiz makinalardaki rezonans bölgelerinin tespiti açısından tasarım sürecinde önemli bir araçtır.

Rotor Dinamiği ve Gyroskopik Etkiler

Dönen sistemlerde, özellikle türbin, rotor ve krank millerinde, dinamik denklemlere gyroskopik terimler eklenir, böylece dinamik davranış daha da kompleksleşir. Bu sistemler;

$$M\ddot{x}+(C+G)\dot{x}+Kx=0$$

şeklinde modellenir. Burada G gyroskopik matristir ve rotorun açısal hızıyla doğru orantılıdır. Gyroskopik Matris, kritik hızlar ve FFT (Fast fourier Trasform) analizlerinde önemlidir. Ayrıca Gyroskopik Matrislerin hesabı rotor tasarımlarında kararsız mod oluşturabileceğinden önemlidir.

m : kütle(Mass)

c : sönüm katsayısı (damping Coefficient)

k : yay sabiti (Koefficient)

$F(t)$: uygulanan Kuvvet (Force)

$x(t)$: yer değiştirmedir (X-axis displacement)

G : gyroskopik Matris

Lineer Olmayan (Nonlinear) Dinamik Sistemler

Çalışan makinalarda yay karakteristiği veya sönüm elemanları, genellikle lineer çalışmazlar. Bu durumda sistem:

$$m\ddot{x}+c(\dot{x})+k(x)x=F(t)$$

Duffing tipi nonlinear sistemler şu şekilde tanımlanır:

$$\ddot{x}+2\zeta\omega_n\dot{x}+\omega_n^2x+\alpha x^3=f_0\cos(\omega t)$$

Bu denklemdeki αx^3 terimi sistemin doğrusal olmayan bileşenini temsil eder ve lineer hareket dışı davranışlar tespit edilebilir.

Enerji ve Kararlılık Analizi

Bir sistemin mekanik kararlılığı ve toplam mekanik enerjisinin zamanla değişimi aşağıdaki gibi incelenerek belirlenebilir:

$$E(t)=1/2\dot{x}^T M \dot{x} + 1/2 x^T K x$$

Sönümsüz sistemlerde $dE/dt = 0$ iken, sönümlü sistemlerde enerji zamanla azalacağı için formülümüz aşağıdaki şekle bürünür;

$$dE/dt = -\dot{x}^T C \dot{x} \leq 0$$

Bu ifade, Lyapunov kararlılığı prensibinin temelini oluşturur. Eğer $dE/dt < 0$ tüm t için sağlanıyorsa sistem asimptotik karardır.

Makina dinamiği kapsamında Lyapunov kararlılığı prensibi, sistemlerin titreşim ve hareket denklemleri ile ifade edilen hareketlerini çözmek için kullanılır. Genellikle, makina dinamiğinde sistemlerin ifadesi aşağıda yer alan şekildedir:

$$M\ddot{\{x\}}+C\dot{\{x\}}+Kx=F(t)$$

Burada:

- x : Yer değişimi
- M : K t le matrisi
- C : Sönüm matrisi
- K : Rijitlik matrisi
- $F(t)$: Zamanla değişen kuvvetler

Lyapunov kararlılığı prensibinde; eğer sistemin enerjisi gibi bir Lyapunov fonksiyonu $V(x, \dot{x})$ tanımlanabilir ve bu fonksiyon zamanla azalıyorsa veya sabitse, sistem kararlıdır.

Makina dinamiğinde Lyapunov fonksiyonu olarak genellikle sistemin toplam mekanik enerjisi kullanılarak ifade edilir;

$$V(x, \dot{x}) = \frac{1}{2} \dot{x}^T M \dot{x} + \frac{1}{2} x^T K x$$

Değerlendirme kriterleri aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

- Eğer $\dot{V}(x, \dot{x}) \leq 0$ ise sistem kararlıdır (sönüm varsa).
- Eğer $\dot{V}(x, \dot{x}) < 0$ ise sistem asimptotik olarak kararlıdır (Sistemde oluşan titreşim zamanla matematiksel sıfıra yaklaşırsa).

Özetle, makina dinamiğinde Lyapunov kararlılığı, sistemin enerjisinin analizi ile kararlı olup olmadığını belirlemeye yardımcı olur.

Newmark- β Yöntemi ile Zaman Tanım Bölgesinde Sayısal  z m

Dinamik sistemlerin diferansiyel denklemlerini doğrudan kapalı formda  z mek çoğu zaman mümkün değildir. Özellikle sönüme sahip, değişken kuvvet altında çalışan veya çok serbestlik dereceli makine elemanlarında hareket denklemleri karmaşık bir yapı kazanır. Bu nedenle zaman tanım bölgesinde adım adım  z m üreten sayısal integrasyon yöntemleri tercih edilir. Bu yöntemler arasında mühendislik alanında en yaygın kullanılanlardan biri Newmark- β zaman integrasyon yöntemidir.

Yöntemin Temeli

Bir mekanik sistemin genel hareket denklemi:

$M * x''(t) + C * x'(t) + K * x(t) = F(t)$ şeklindedir.

Newmark yöntemi, ivme, hız ve yer değiştirme arasındaki bağıntıları iki temel parametre (β ve γ) üzerinden tanımlar. Zaman adımı Δt olmak üzere:

$$x_{t+\Delta t} = x_t + \Delta t * x'_t + \Delta t^2[(1/2 - \beta)x''_t + \beta x''_{t+\Delta t}]$$

$$x'_{t+\Delta t} = x'_t + \Delta t[(1 - \gamma)x''_t + \gamma x''_{t+\Delta t}]$$

En yaygın parametre seçimi: $\beta = 1/4$ ve $\gamma = 1/2$ olup bu kombinasyon koşulsuz kararlılık sağlar.

Makine Dinamiği Uygulamaları

Newmark yöntemi özellikle:

- darbe ve çarpma problemlerinde,
 - sönümlü titreşim çözümünde,
 - rotor dinamiğinde,
 - doğrusal olmayan yay ve sönüm elemanlı modellerde
- yüksek kararlılık sağlar.

Sonuç

Newmark- β yöntemi, makine dinamiğinde zaman tanım alanında kullanılan en kararlı ve güvenilir sayısal çözüm yaklaşımlarından biridir. Çok serbestlik dereceli modellerde kararlılık ve doğruluk açısından mühendislikte standart hâline gelmiştir. Gelişmiş makina dinamiği analizi, yalnızca kuvvet ve ivme dengesine dayanmayan;

aynı zamanda çok serbestlik dereceli, sönümlü ve doğrusal olmayan davranışları içeren karmaşık diferansiyel denklemlerle modellenen bir disiplindir. Bu inceleme yöntemleri sayesinde mühendis, sistemin titreşim modlarını, kritik hızlarını ve kararlılık koşullarını önceden belirleyerek tasarım sürecinde optimum çözümler elde eder. Modern analiz yazılımları (ANSYS, MATLAB Simscape, Adams vb.) bu denklemleri sayısal olarak çözüp, makinaların dinamik performansını, titreşim riskini ve rezonans davranışını yakınsak olarak simüle edebilmektedir. Lagrange metodunda ise seri ve paralel robot kolları, eklemlili manipülatörler, mekanizmaların daha kompleks olduğu bu sebeple kuvvet denkleminin daha güç yazıldığı sistemler çözümlenebilir. Ayrıca gyroskopik etkilerin bulunduğu tüm dinamik sistemlerin çözümünde yine lagrange metoduna başvurulur. Eğer bir çalışmada enerji ifadeleri ile ilerlemek gerekiyorsa yine lagrange metodunu seçmek daha sistematik olacaktır.

Kaynakça

Clough, R. W., & Penzien, J. (1995). **Dynamics of Structures**. McGraw-Hill.

Rao, S. S. (2011). **Mechanical Vibrations** (5th ed.). Pearson.

Inman, D. J. (2014). **Engineering Vibration** (4th ed.). Pearson.

Newmark, N. M. (1959). A method of computation for structural dynamics. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 85(3), 67–94.

Chopra, A. K. (2012). **Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering** (4th ed.). Prentice Hall.

Meirovitch, L. (2001). **Fundamentals of Vibrations**. McGraw-Hill.

Meirovitch, L. (1990). **Dynamics and Control of Structures**. Wiley.

Shabana, A. A. (2013). **Theory of Vibration: An Introduction**. Springer.

Craig, R. R., & Kurdila, A. J. (2006). **Fundamentals of Structural Dynamics** (2nd ed.). Wiley.

Thomson, W. T., & Dahleh, M. D. (1998). **Theory of Vibration with Applications** (5th ed.). Prentice Hall.

Kreyszig, E. (2011). **Advanced Engineering Mathematics** (10th ed.). Wiley.

Kelly, S. G. (2018). **Mechanical Vibrations: Theory and Applications**. Cengage Learning.

Blevins, R. D. (2001). *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. Krieger Publishing.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering Mechanics: Dynamics* (14th ed.). Pearson

BÖLÜM 19

MAKİNE DİNAMİĞİNDE SABİT MONİTÖRLÜ VE MODÜLER SİSTEMLİ TREND TAKİBİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ALİ İHSAN ENGÜR¹

Giriş

Bu bölümde , makina sistemlerinde titreşim analizinin teorik temelleri, dinamik davranış üzerindeki etkileri ve mühendislik uygulamalarındaki önemi ele alınmıştır. Makina elemanlarının çalışması sırasında meydana gelen titreşimler, hem sistem performansını hem de dayanıklılığını doğrudan etkiler. Bu nedenle titreşimlerin doğru analiz edilmesi, makinanın güvenli, sessiz, uzun ömürlü çalışması, arıza süresinin ertelenmesi ve doğal olarak bakım aralıklarının azalması, ambarda bekletilen yedek malzeme stokunun

¹ Dr. Öğr. Gör. , Kocaeli Üniversitesi,Gölcük MYO,
Orcid: 0000-0003-0124-5491

azaltılması için kritik öneme sahiptir. kullanılması, daha doğru tahmin ve daha az yanlış alarm olasılığı sağlar.

Engür'ün (2007) Denizli Bakım Teknolojileri Kongresi'nde sunduğu Kestirimci Bakımda kalite anlayışının bakım takvimlerine ve MTBF Analizine Etkisi isimli bildiride, kestirimci bakım uygulamalarının kalite yönetimi üzerindeki etkileri ve bu etkilerin MTBF hesaplamaları ve bakım planlaması üzerindeki sonuçları analiz edilmektedir. Araştırma, bakım süreçlerini titreşim temelli izlemenin pratik sonuçlarını ortaya koymaktadır. Uluslararası literatürde Jardine, Lin ve Banjevic (2006), kestirimci bakım ve durum izleme yöntemlerine ilişkin kapsamlı bir derleme sunmuş; titreşim, termal ve yağ analizi yöntemlerinin prognostik yaklaşımlardaki önemini vurgulamıştır. Randall (2011), rulman arızalarının titreşim imzalarını inceleyerek özellikle spektral demodülasyon ve envelope analizi tekniklerinin FFT çözüm yöntemleri temeli ile prensiplerini açıklamıştır. Sıcaklık analizi alanında Balakrishnan vd., (2022), infrared termografinin elektriksel ve mekanik ekipmanlarda kullanımını değerlendirmiş; çevresel etkiler, emisyon katsayısı ve hata teşhis doğruluğuna ilişkin kapsamlı bir inceleme sunmuştur. Yağ analizinde Zhao vd., (2021), triboelektrik nanogeneratör tabanlı gerçek zamanlı yağ durum izleme sensörlerinin, kontaminasyon ve aşınma partiküllerini hızlı biçimde tespit edebildiğini göstermiştir.

Bu bölümde ise tek serbestlik dereceli modeller, çok serbestlik dereceli sistemler ve modern titreşim analiz yöntemleri temel diferansiyel denklemler ile incelenmiştir.

Makine Dinamiğinde Titreşim Analizi

Titreşim, bir sistemin denge konumu etrafında periyodik olarak hareket etmesi, bu hareketini zaman içerisinde sürdürmesi veya sönümlenmesi olarak tanımlanabilir. Titreşim esnasında makina parçalarının her biri aynı kuvvet kaynağının oluşturduğu

aynı frekansta çalışmayı denese de iç yapıları ve parçacık sayılarına göre farklı frekanslarda modellenebilirler. Örneğin bir motor 3000 RPM de çalışsın, Bu Motora bağlı bir rulman da 3000 RPM’de çalışacaktır. Bu rulmanda 20 bilye olduğunu düşünelim her bir bilye 3000 RPM’de çalışacaktır. Ancak iç bilezikte bir oyukluk olduğunu düşünelim. Bu bilyeler bu oyuğa geldiğinde 3000 RPM’de çalışabilmek için daha uzun bir yolu daha hızlı bir şekilde geçmek zorunda kalacaklardır. Bu da anlık olarak rulmanlardan yüksek frekanslarda düşük genlikler oluşturan verilerin ardı arkasına gelmesi demektir. Tüm bu sistemin modellenmesi işi FFT (Fast Fourer Trasform) gibi bir sistem ile elde edilebilir. Bu örnekte olduğu gibi; makinelerde titreşim; motor, dişli, rulman, rotor ve bağlantı elemanlarında meydana gelen dengesizlikler, sürtünmeler ve dış zorlamalar sonucu ortaya çıkar. Örneğimizde iç bilezikteki çukura ardı ardına giren 20 adet bilyenin oluşturduğu genliklerden ortaya çıkmıştı. Makina dinamiği kapsamında titreşim analizi, bu hareketlerin nedenlerini, frekans karakteristiklerini ve genlik davranışlarını inceleyerek gerek sistemin güvenli çalışma koşullarını belirlemeyi gerekse de belirli makinelerde uygulanması istenen titreşimlerin kontrolünü amaçlar.

Titreşim Türleri ve Temel Kavramlar

Makina dinamiğinde titreşimler üç ana başlıkta sınıflandırılır:

1. Serbest titreşim: $m \ddot{x} + kx = 0$
2. Zorlanmış titreşim: $m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t)$
3. Sönümlü titreşim: $m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0$

m: kütle(Mass)

c: sönüm katsayısı (damping Coefficient)

k: yay sabiti (Koefficient)

$F(t)$: Uygulanan Kuvvet (Force)

$x(t)$: yer deşiştirmedi (X-axis displacement)

Sönüm oranı $\zeta = c / (2\sqrt{km})$ ile tanımlanır ve doğal frekans ile çalışma frekansının örtüşmesinde ortaya çıkan rezonans davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

Tek Serbestlik Dereceli (TSD) Sistemlerin Analizi

Tek serbestlik dereceli sistemin genel diferansiyel denklemi şu şekildedir:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F(t)$$

Harmonik zorlamada sistemin genlik cevabı:

$$X(\omega) = F_0 / \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}$$

Genlik oranı (r):

$$r = 1 / \sqrt{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\zeta(\omega/\omega_n))^2}$$

Bu analiz, doğal frekans ile çalışma frekansının örtüşmesinde ortaya çıkan rezonans frekansının sönümle ilişkisini açıklar.

Çok Serbestlik Dereceli (ÇSD) Sistemler

Gerçek makinalarda birden fazla kütle, yay ve sönüm elemanı bulunur.

Bu sistemlerin genel hareket denklemi:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = F(t)$$

Sönümsüz durumda ($C=0$):

$$(K - \omega^2 M)\Phi = 0$$

Bu denklem, sistemin doğal frekanslarını ve mod şekillerini

belirler. Modal analiz bu temelden ortaya çıkıp gerekli diferansiyel yöntemler ile matematik modellerin ortaya çıkmasıyla oluşmuştur.

Rotor Sistemlerinde Titreşim ve Kritik Hızlar

Dönen sistemlerde dinamik denklemlere gyroskopik terimler eklenir:

$$M\ddot{x} + (C+G)\dot{x} + Kx = 0$$

Burada G, rotorun açısal hızıyla orantılı gyroskopik matristir. Kritik hızlar, rotorun doğal frekansının oluşan frekansla çalışmanın geçişi anında örtüştüğü ve rezonansa girdiği hız değerleridir ve tasarım açısından büyük önem taşırlar.

Deneysel ve Sayısal Titreşim Analiz Yöntemleri

Titreşim analizinde başlıca yöntemler:

- İvmeölçer sensörlerle ölçüm
- Fourier Dönüşümü (FFT) analizi
- Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile modal analiz
- Frekans Tepki fonksiyonlarının (FRF) belirlenmesi

Sonuçta elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak model doğrulaması yapılır. Tüm bu yöntemlerin elde edildiği denklemler ampirik formüllerle karşılaştırıldığında birebir aynı sonuçlara ulaşılmaktadır. Bu sistemde kullanılan farklı titreşim ölçerler sensörler kullanılsa da sonuçta ivme ölçe prensibinde çalışmaktadırlar. Sistemden alınan her bir frekanstaki farklı amplitüd değeri sistem FFT dönüşümü sonrası oluşan grafikler ile bir karşılık vermekte bu oluşan grafikler mühendisler tarafından izlenmektedir. Sistemdeki Sabit bir monitör izleme ile FFT dönüşümü yapılan modüler bir trend analizi arasındaki fark sistemin sadece çalışma frekansında oluşan amplitüd artışlarının yanında farklı frekanslardaki kendini gösterebilecek arızların tespiti. Örneğin

sabit bir izleme monitöründe anlık olarak makinanın çalışma frekansından alınan bir amplitüd değeri sisteme girer. Bu sürekli olarak çalışma frekansında ki amplitüd değerin sisteme girmesinde oluşan ani bir artışı sisteme kritik değer ve alarm değeri diye tanımlar ve aşıldığında bilgi verir. Ancak makinanın çalışma frekansına etki etmeyen arızalarda bu alandaki bildirim sınırlıdır. Örneğin rulmanlar kendilerini makinanın çalışma frekansı X Bilye sayısı işlemi sonucu oluşan frekanslarda düşük amplitüdlü geniş yayımlı olarak kendilerini gösterirler. Bu nedenle FFT dönüşümü yapılan sistemler bize daha geniş spektrumlu arızaların tespitinde daha başarılı sonuç verirler. Günümüz teknolojisinde daimi monitörlere bu FFT dönüşümlü sistemleri inceleme yetisi verilmiş olsa da trend analizinde FFT dönüşümü sonucu oluşan Frekans-Amplitüd grafiği incelenmesi fayda sağlamaktadır. Sonuçta aynı sistemde;

$$M \ddot{x} + (C + G)\dot{x} + Kx = 0$$

Sistemi çalışsa da burada oluşabilecek gyroskobik direnç ve zamanla oluşabilecek sönümlleme değişimleri uzman gözetiminde olur.

Sonuç

Makina dinamiğinde titreşim analizi, sistem davranışını anlamak ve arızaları önceden tespit etmek için temel bir araçtır. Doğru titreşim modeli, sistemin doğal frekanslarını, rezonans bölgelerini ve buralarda oluşan kararlılık sınırlarını ortaya koyar. Modern mühendislikte hem sayısal hem de deneysel analizlerin birlikte kullanılması, sistem güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik önemdedir. Ayrıca yapılacak FFT dönüşümü sonucu elde edilen frekans-amplitüd grafiklerinin trend analizi şeklinde izlenmesi makinanın önceden tahmin edilemeyen parçalarında ortaya çıkacak arızaların tespiti için gereklidir. Tüm bu bağlamda genel kullanım amaçlı makine elemanlarının monitör ile takibi yapılabilecekken kritik makine elemanlarında hibrit yöntem

seçilmeli ve hem monitörler ile anlık genlik değerleri ölçülmeli hem de modüler titreşim ölçer makinalar ile FFT dönüşümlü Genlik-Frekans grafikleri incelenmelidir. Böylelikle makinanın ana çalışma frekansının dışında sistem dinamiğinde oluşan diğer arızalar ilerlemeden tespit edilebilir. Bunun sonucunda makinada oluşabilecek daha hassas parçalardaki arızanın ilerlemesi önceden tespit edilerek kritik duruşlardan kaçınılabılır. Örneğin bir otomotiv fabrikasında hatta oluşabilecek bir arıza ya da bir ilaç fabrikasında yüksek değerli bir kimyasalın soğutma sisteminde oluşabilecek bir arıza önceden belirlenerek önlenabilir.

Kaynakça

- Rao, S. S. (2011). *Mechanical Vibrations*. Pearson Education.
- Inman, D. J. (2014). *Engineering Vibration*. Prentice Hall.
- Thomson, W. T., & Dahleh, M. D. (1998). *Theory of Vibration with Applications*. Prentice Hall.
- Meirovitch, L. (2001). *Fundamentals of Vibrations*. McGraw-Hill.
- Ewins, D. J. (2000). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. Research Studies Press.
- Engür, A. İ. (2007). Kestirimci bakımda kalite anlayışının bakım takvimlerine ve MTBF analizine etkisi. *Bakım Teknolojileri Kongresi (BTK 2007) Tam Metin Bildiri*, Denizli, Türkiye, 21 Ekim 2007, (Sa. 453), 207–212.
- Engür, A. İ. (2007). Titreşim analizi ile kestirimci bakım yaklaşımları. *Mühendis ve Makina*, 48(570), 27–31.
- Ahuett-Garza, H., & Kurfess, T. (2018). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 165–175.
- Alabdulkarim, A., & Ball, P. (2022). Predictive maintenance strategy selection using reliability-centered maintenance and digital twins. *International Journal of Production Research*, 1–18.
- Bai, X., Song, H., & Jiao, L. (2021). Intelligent fault diagnosis for rotating machinery using deep learning: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 150, 107254.
- Cinar, E., Kalay, S., & Saricicek, I. (2022). A predictive maintenance system design and implementation for intelligent manufacturing. *Machines*, 10(11), 1006.

de Araujo, A. P., & Lopes, I. (2018). Reliability modeling and MTBF optimization in industrial maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 176, 248–255.

Ersöz, O. Ö., et al. (2025). Makine öğrenmesi ile kestirimci bakım ve yedek parça yönetimi. *Politeknik Dergisi*, 28(5), 1327–1338.

BÖLÜM 20

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLARDA KULLANILAN SENSÖRLERİN ÜRETİMİ VE KULLANIMI

NEVFEL YUNUS COŞKUN¹
MERVE EREN YAKIŞIKLIER²

Giriş

Elektrikli ve hibrit araç teknolojileri, sürdürülebilir mobiliteye geçişte kritik bir rol oynamaktadır. Bu araçlar, içten yanmalı motorların (ICEs) çevresel etkilerini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Elektrikli araçlar (EV'ler), tamamen elektrikli batarya sistemleri (BEV'ler) ile çalışırken, hibrit elektrikli araçlar (HEV'ler) hem elektrik motorları hem de geleneksel yanmalı motorları bir arada kullanmaktadır (Vishwanath Nagarajan vd., 2023; VikramGoud vd., 2024; Delso-Vicente vd., 2025).

Elektrikli ve hibrit araç sistemlerinde entegre edilen elektronik kontrol sistemleri, bu araçların temel operasyonel fonksiyonlarının sağlanmasında ve sistem optimizasyonunun gerçekleştirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Özellikle batarya yönetim sistemleri (BMS), güç elektroniği modülleri ve motor kontrol üniteleri (MCU)

¹ Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Orcid: 0000-0002-0464-3818

² Dr. Öğr. Üyesi., Yozgat Bozok Üniversitesi, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Orcid: 0000-0002-6920-359X

gibi temel bileşenler, enerji dönüşüm verimliliğinin maksimize edilmesinin yanı sıra sistem güvenilirliğinin ve kararlılığının sürdürülebilirliğini sağlamaktadır (Abo-Khalil vd., 2022). Yapılan araştırmalar, bu elektronik sistemlerin olmaması durumunda, elektrikli ve hibrit araçların güvenlik standartlarını karşılayan, yüksek performanslı ve çevresel sürdürülebilirlik kriterlerine uygun bir şekilde işletilmesinin teknik olarak mümkün olmadığını ortaya koymaktadır (Kakillioglu vd., 2022).

Elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan sensörler, araç performansını, güvenliğini ve enerji verimliliğini optimize etmek için kritik bir rol üstlenmektedir. Bu araçlarda yaygın olarak kullanılan sensörler arasında; batarya sıcaklık ve voltaj sensörleri, motor pozisyon sensörleri, tork sensörleri, basınç sensörleri ve çevresel algılama sensörleri (LiDAR, radar, ultrasonik ve kamera sistemleri) bulunmaktadır. Özellikle, batarya yönetim sistemlerinde (BMS) kullanılan sıcaklık ve akım sensörleri, lityum-iyon bataryaların stabil çalışmasını sağlamak ve termal kaçak riskini önlemek için sürekli izleme yapmaktadır (Bhattacharya vd., 2019). Ayrıca, rejeneratif frenleme sistemlerinde yer alan tork ve hız sensörleri, enerji geri kazanım verimliliğini artırmakta ve sürüş dinamiklerini iyileştirmektedir. Otonom sürüş destek sistemlerinde ise çoklu sensör füzyonu (sensor fusion) teknolojisi, LiDAR, radar ve kamera verilerini entegre ederek çevresel farkındalığı ve karar alma süreçlerini geliştirmektedir. Bu sensörlerin gelişmiş mikroelektronik ve yarı iletken teknolojileriyle üretilmesi, elektrikli ve hibrit araçların güvenilirliğini ve performansını önemli ölçüde artırmaktadır (Yeong vd., 2021; Ali vd., 2024).

Sensör Teknolojisinin Tarihçesi ve Gelişimi

Günümüz dünyasında sensör teknolojileri, endüstriden tıba, ulaşımdan çevre izlemeye kadar geniş bir yelpazede kritik rol oynamaktadır. Nesnelerin interneti (IoT), yapay zeka, otomasyon ve akıllı sistemler gibi modern teknolojilerin temel yapı taşlarından biri olan sensörler, fiziksel dünyadan bilgi toplayarak dijital sistemlerin bu verileri analiz etmesini mümkün kılar. Bu yönüyle sensörler, teknolojik dönüşümün ve dijitalleşmenin merkezinde yer almaktadır. Ancak bu gelişmiş düzeye ulaşmadan önce sensörlerin uzun bir

evrim süreci geçirdiği, mekanik temelli algılayıcılardan mikro ve nanosensörlere kadar önemli aşamalardan geçtiği bilinmektedir (Jiang vd., 2021; Monolithic Power Systems, 2023).

Mekanikten Elektroniğe Geçiş: 1800’ler – 1930’lar

Sensör teknolojisinin başlangıcı, fiziksel olayların ölçülmesiyle ilgili erken keşiflere dayanmaktadır. 1821 yılında Thomas Seebeck, iki farklı metalin uçları arasındaki sıcaklık farkının elektrik gerilimi oluşturduğunu keşfederek, ilk termoelektrik ölçüm prensibini ortaya koydu. Bu buluş, termokupl (thermocouple) gibi sıcaklık sensörlerinin temelini attı. Aynı dönemde piezoelektrik etki (1880, Curie kardeşler) ve galvanometre gibi cihazlar da geliştirildi (Fraden, 2010; Madou, 2018).

Bu dönemde geliştirilen sensörler, doğrudan fiziksel değişkenleri algılayıp mekanik göstergeye dönüştürmek üzerine kuruluydu. Örneğin; cıvalı barometreler ve bimetalik termometreler, çevresel değişimleri doğrudan fiziksel hareketlere dönüştürerek ölçüm yapıyordu (Wilson,2005).

Elektronik Dönem: 1940–1970

20. yüzyılın ortalarında elektronik devrelerin gelişimi, sensörlerin algılama işlevinden sinyal üretimine kadar birçok aşamasının elektronik olarak gerçekleştirilmesini sağladı. Bu dönemde sensörler artık yalnızca fiziksel algılayıcılar değil; elektriksel çıkış üreten dönüştürücüler haline geldi. Örneğin:

- Fotodiyotlar ve fototransistörler sayesinde ışığa duyarlı sensörler geliştirildi.
- Hall etkisi sensörleri, manyetik alanları ölçmekte kullanılmaya başlandı.
- Piezoelektrik sensörler, dinamik basınç ve ivme değişimlerini elektriksel sinyale dönüştürerek otomotiv ve savunma uygulamalarında yer aldı (Bogue, 2014; Fraden, 2010).

Bu sensörlerin tasarımı analog sinyallere dayandığından, çıkış verileri genellikle amplifikatörlerle işlenerek kontrol sistemlerine aktarılıyordu. Özellikle termistör ve RTD (Resistance Temperature

Detector) gibi sıcaklık sensörleri, yüksek doğrulukla ölçüm yapılmasına imkân tanıyordu (Doebelin & Manik, 2017).

Sayısallaşma ve Mikroişlemci Entegrasyonu: 1970–1990

1970’lerle birlikte mikroişlemcilerin ortaya çıkması, sensörlerin dijital sistemlerle entegre edilmesini sağladı. Bu süreçte:

- Akıllı sensör (smart sensor) kavramı gelişti. Sensör yalnızca ölçüm yapmakla kalmayıp, çıkışı dijitalleştiren ve ön işleme tabi tutan bir sistem haline geldi.
- Analog-dijital dönüştürücüler (ADC), sensör verilerini mikroişlemcilere uygun hale getirerek ölçüm hassasiyetini ve sinyal bütünlüğünü artırdı.
- Sayısal çıkış veren sensörler (ör. dijital termometreler) yaygınlaştı (Sze, 1994).

Bu dönemde otomatik kontrol sistemleri, robotik, tıbbi cihazlar ve hava-uzay teknolojileri, sensör entegrasyonu ile büyük ilerleme gösterdi. Ayrıca ratiometrik ölçüm ve köprü devreleri gibi tasarım teknikleri gelişti (Wilson, 2005).

MEMS ve Mikrosensör Devrimi: 1990–2005

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) teknolojisi, mikrometre düzeyinde mekanik yapılar içeren sensörlerin üretimini mümkün kılmıştır. Bu sayede:

- İvme ölçerler, basınç sensörleri, mikro-optik sistemler, mikroakışkan sensörler gibi çok sayıda yeni sensör türü geliştirildi.
- Otomobillerde hava yastığı sistemleri, akıllı telefonlarda hareket algılama, tıbbi implantlarda vücut içi izleme gibi uygulamalarda MEMS sensörler yaygınlaştı.
- LVDT, capacitive MEMS, optomekanik algılayıcılar gibi yapılar yüksek doğrulukla çalışan mikrosistemleri mümkün kıldı (Bogue, 2007; Gardner vd., 2001)

Bu dönemde sensörler sadece ölçüm değil, aynı zamanda karar verme sistemlerinin bir bileşeni haline gelmiştir.

Nanoteknoloji ve Algılama Hassasiyetinde Sıçrama: 2005–2015

Bu yıllarda nanomalzemelerin kullanımıyla birlikte, sensör teknolojisinde duyarlılık (sensitivity) ve seçicilik (selectivity) büyük oranda artmıştır:

- ZnO, SnO₂, TiO₂ gibi metal oksit nanoyapılar, gaz sensörlerinde kullanılmış; ppm ve altı seviyelerde algılama mümkün olmuştur.
- Karbon nanotüpler (CNTs) ve grafen gibi iletken nanomalzemeler, biyosensörlerden kimyasal sensörlere kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmıştır.
- Yüzey fonksiyonelleştirme, sensörlerin yalnızca belirli moleküllere seçici cevap vermesini sağlamıştır (Comini vd., 2009; Kaushik & Khan, 2015).

Bu sayede özellikle tıbbi tanı, çevresel izleme, gıda güvenliği ve giyilebilir sağlık teknolojileri alanında büyük adımlar atılmıştır.

IoT, Yapay Zekâ ve Sensör Ağları Çağı: 2015 – Günümüz

Günümüzde sensörler, siber-fiziksel sistemler, yapay zekâ destekli karar sistemleri ve IoT altyapılarıyla bütünleşmiştir. Gelişmiş sistemlerde sensörler;

- Kablosuz iletişim (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee) ile veri aktarımı yapabilmekte,
- Bulut bilişim ile merkezi veri havuzlarına bağlanarak büyük veri analizine katkı sağlamaktadır,
- Yapay zekâ algoritmaları ile sınıflandırma, tahmin ve hata düzeltme işlemleri gerçekleştirebilmektedir (Jiang vd., 2021; Onio, 2023).

Otomotiv Endüstrisinde Sensörlerin Önemi

Otomotiv endüstrisinde sensörler, araç performansını, güvenliğini ve enerji verimliliğini optimize eden kritik bileşenlerdir. Modern araçlarda kullanılan motor pozisyon sensörleri, ABS sistemlerindeki tekerlek hız sensörleri ve elektronik gaz pedalı sistemleri gibi manyetik sensörler, araç dinamiğinin hassas kontrolünü sağlamaktadır (Ammal vd., 2021). Özellikle elektrikli ve hibrit araçlarda batarya yönetim sistemleri (BMS), termal kaçak riskini önlemek için sıcaklık ve akım sensörlerine dayanırken,

rejeneratif frenleme sistemleri tork ve hız sensörleri ile enerji geri kazanım verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, otonom sürüş teknolojilerinin gelişimiyle birlikte LiDAR, radar ve kamera sistemleri gibi çevresel algılama sensörleri, araçların çevrelerini doğru bir şekilde yorumlamasına olanak tanımaktadır (Khan vd, 2025).

Sensör teknolojisindeki ilerlemeler, otomotiv endüstrisinde veriye dayalı karar verme süreçlerini güçlendirmektedir. Gerçek zamanlı veri izleme ve makine öğrenimi algoritmalarının entegrasyonu, arıza tespiti ve öngörücü bakım gibi uygulamaları mümkün kılmaktadır (Sekhar vd., 2023). Sensör teknolojisindeki bu ilerlemeler sadece otomotiv sektörüyle sınırlı kalmayıp, havacılık ve uzay teknolojileri gibi diğer ileri mühendislik alanlarına da önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle yüksek hassasiyetli ivmeölçerler, jiroskoplar ve basınç sensörleri gibi bileşenler hem otomotiv hem de havacılık/uzay uygulamalarında ortak olarak kullanılmakta ve bu alanlar arasında teknoloji transferini kolaylaştırmaktadır. Aynı şekilde, otonom araçlar için geliştirilen LiDAR ve radar tabanlı algılama sistemleri, uydu navigasyon sistemleri ve insansız hava araçlarında da benzer prensiplerle uygulanabilmektedir (Morales Matamoros vd., 2025).

Elektrikli ve Hibrit Araçlarda Sensör Kullanımı

Elektrikli ve hibrit araçlarda sensör kullanımı, modern otomotiv teknolojisinin en kritik unsurlarından birini oluşturmaktadır. Bu araçlarda kullanılan sensörler, enerji yönetim sistemlerinden motor kontrolüne, batarya performansı izlemeye kadar geniş bir yelpazede hayati fonksiyonları yerine getirmektedir. Mikroelektronik alanındaki gelişmeler, sensör boyutlarının küçülmesine, hassasiyetlerinin artmasına ve maliyetlerin düşmesine olanak sağlamıştır. Elektrik motoru sistemlerinde rotor sıcaklığının doğrudan ölçülmesini sağlayan e-Motor Rotor Sıcaklık Sensörü (eRTS) gibi yenilikçi çözümler, motor performansının optimize edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu sensörler, yazılım tabanlı simülasyonlara kıyasla ölçüm toleransını önemli ölçüde azaltarak sistem verimliliğini artırmaktadır (Chau vd., 2017; Basu vd., 2018). Hibrit araçlarda hem içten yanmalı motorun hem de elektrik

motorunun senkronize çalışmasını sağlamak için gelişmiş sensör sistemleri gereklidir. Güç döngüsünde ana batarya voltajının invertör tarafından AC voltaja çevrilmesi ve motor tarafından tekerleklerle iletilmesi sürecinde çeşitli akım sensörleri kritik rol oynarken, rejeneratif frenleme sırasında motor-jeneratör çıkışının doğrultularak batarya hücrelerinin şarj edilmesi için yüksek hassasiyetli akım ölçümleri gerekmektedir. Batarya yönetim sistemlerinde şönt ve Hall etkisi teknolojilerini birleştiren hibrit sensörler, 2000 amper kadar akımları ölçebilme kapasitesiyle batarya şarj durumu ve sağlığının yönetilmesinde kullanılmaktadır (Takagi vd., 2014). Batarya sistemlerinde sıcaklık izleme, güvenlik ve performans açısından hayati öneme sahiptir ve termal kaçak riskinin minimize edilmesi için yüksek hassasiyetli sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır. Güç elektroniği sistemlerinde Hall etkili akım sensörleri, HEV uygulamalarında hem AC hem de DC akımların ölçülmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu sensörler, galvanik izolasyon sağlamaları ve yüksek çözünürlüklü ölçüm kapasiteleri sayesinde invertör ve DC-DC dönüştürücü uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç fazlı tam köprü sürücülü invertörlerde DC batarya voltajının üç fazlı AC voltaja dönüştürülmesi sürecinde yüksek bant genişlikli akım sensörleri gerekmektedir. Sensör üretiminde mikroelettronik ve mikromekanik sistemler (MEMS) teknolojileri öne çıkmakta, modern sensörler genellikle kablosuz sıcaklık sensörü birimi ve kablolu dönüştürücü eleman gibi bileşenlerden oluşmaktadır (Taraba vd., 2018; Ehsani vd., 2021). Mikroelettronik paketleme teknolojilerindeki gelişmeler, sensör boyutlarının küçülmesine ve çevresel koşullara dayanıklılıklarının artmasına olanak tanımıştır. Özel paketleme çözümleri, yüksek voltaj taşıyan iletkenler ile sensör çıkış uçları arasında gerekli galvanik izolasyonu sağlarken aynı zamanda girdap akımı kayıplarını azaltmaktadır. Şönt ve Hall etkisi teknolojilerinin tek bir hibrit bileşende entegre edilebilmesi, sistem mimarisini basitleştirmekte ve toplam malzeme maliyetini düşürmektedir. Elektrikli ve hibrit araç teknolojileri ile otonom sürüş sistemlerinin yakınsaması, sensör teknolojilerine yönelik gereksinimleri daha da karmaşık hale getirmektedir. Otonom taşıtlar, elektrikli araçların temel sensör sistemlerine ek olarak çevre algılama, konum belirleme ve karar verme için çok sayıda ileri

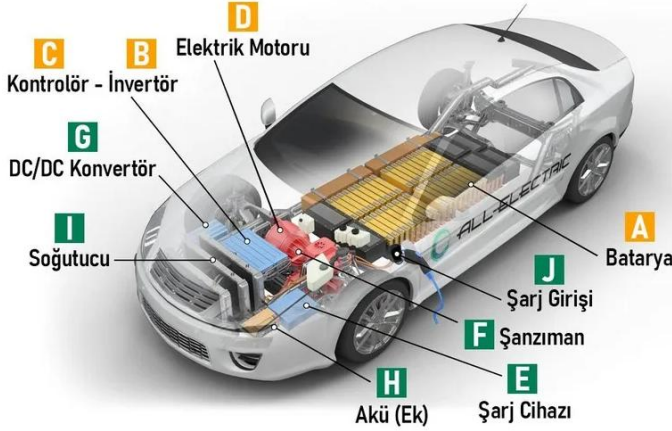
sensör sistemine ihtiyaç duymaktadır (Husain, 2021; Li vd., 2025). Gelecekte elektrikli ve hibrit araç sensörlerinin daha akıllı, daha entegre ve daha az güç tüketen yapılar haline gelmesi beklenmektedir. Yapay zeka destekli akıllı sensör sistemleri ve otonom sürüşle daha derin entegrasyon, bu alandaki araştırmaların öncelikli yönleri olarak öne çıkmaktadır. Sensör teknolojilerindeki bu gelişmeler, elektrikli ve hibrit araçların performans, güvenlik ve verimlilik parametrelerinin sürekli olarak iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Karuppasamy vd., 2023; Rajesh, 2025).

Elektrikli ve Hibrit Araçlarda Kullanılan Sensör Çeşitleri

Elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan sensörler, araç performansının optimizasyonu, enerji verimliliği ve güvenlik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu araçlarda sensör teknolojileri, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha karmaşık ve çeşitlidir. Özellikle batarya yönetim sistemlerinde (BMS) kullanılan sıcaklık, akım ve voltaj sensörleri, lityum-iyon bataryaların termal stabilitesini sağlamak ve enerji verimliliğini artırmak için sürekli izleme yapmaktadır (Başlamışlı vd., 2019). Ayrıca, rejeneratif frenleme sistemlerinde tork ve hız sensörleri, enerji geri kazanım verimliliğini artırmakta ve sürüş dinamiklerini iyileştirmektedir (Chau vd., 2017).

Otonom sürüş teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, LiDAR, radar ve kamera tabanlı sensörler, çevresel algılama ve nesne tanıma için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sensörler, araçların çevrelerini doğru bir şekilde yorumlamasına ve güvenli bir şekilde seyir etmesine olanak tanır (Basu vd., 2018). Öte yandan, ultrasonik sensörler, park asistanı sistemlerinde engel tespiti için kullanılırken, basınç sensörleri lastik basınç izleme sistemlerinde (TPMS) önemli bir rol üstlenmektedir (Al-Sheikh vd., 2015).

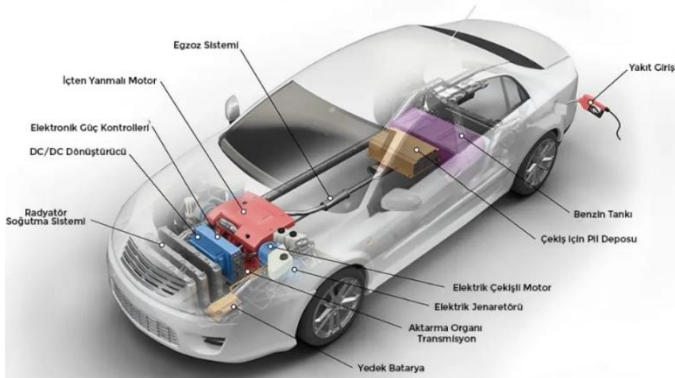
Şekil 1. Elektrikli Arabaların Ana Parçaları



Kaynak: Elektrikli Arabalar, 2025

Şekil 1'de gösterilen elektrikli araç ana parçaları, bu araçların temel bileşenlerinin sistematik organizasyonunu yansıtmaktadır. Görselde öne çıkan batarya paketi, elektrik motoru ve güç elektroniği modülleri, elektrikli araçların enerji yönetim sisteminin (BMS) kritik unsurlarıdır. Bu bileşenler, lityum-iyon hücrelerin termal stabilitesini sağlayan sıcaklık sensörleri ve enerji dönüşüm verimliliğini optimize eden akım/voltaj sensörleri ile desteklenmektedir (Liu vd., 2020; Chauhan vd., 2024).

Şekil 2. Hibrit Araç Parçaları (Hibrit Araçlar, 2025)



Kaynak: Hibrit Araçlar, 2025

Şekil 2'de hibrit araçların paralel güç aktarma organlarını ve bileşenlerini detaylandırmaktadır. İçten yanmalı motor ile elektrik

motorunun entegrasyonu, tork sensörleri ve hız algılayıcılar sayesinde senkronize edilmekte, böylece rejeneratif frenleme sistemlerinden maksimum enerji geri kazanımı sağlanmaktadır (Lee vd., 2021; Chauhan vd., 2024).

Elektrikli ve hibrit araçlardaki sensör çeşitliliği, aşağıdaki başlıklar altında sınıflandırılabilir:

- **Güç Yönetimi Sensörleri:** Batarya ve enerji yönetimi için sıcaklık, akım ve voltaj sensörleri.
- **Sürüş Destek Sensörleri:** Otonom sürüş ve ADAS sistemleri için LiDAR, radar ve kameralar.
- **Güvenlik Sensörleri:** Çarpışma önleme ve yaya algılama için çoklu sensör füzyonu.
- **Çevresel Sensörler:** Sıcaklık, nem ve hava kalitesi algılama için ortam izleme sensörleri.
- **Motor ve Aktarma Organları Sensörleri:** Performans izleme ve hata tespiti için tork, hız ve pozisyon sensörleri.

Güç Yönetimi Sensörleri: Batarya ve enerji yönetimi

Elektrikli ve hibrit araçların en kritik bileşenlerinden biri olan batarya sistemleri, enerji depolama ve dağıtım süreçlerinde yüksek doğrulukla çalışan sensörlerle izlenmek zorundadır. Araçların performansı, menzili, güvenliği ve batarya ömrü büyük ölçüde bu sensörlerin sağladığı veriye bağlı olarak optimize edilmektedir. Bu kapsamda kullanılan güç yönetimi sensörleri, batarya yönetim sistemi (Battery Management System – BMS) ile entegre şekilde çalışarak batarya hücrelerinin sıcaklık, akım, gerilim ve genel sağlık durumlarını sürekli izler.

Özellikle gerilim sensörleri, her hücrenin şarj durumunu (State of Charge – SoC) ve sağlık durumunu (State of Health – SoH) belirlemede önemli rol oynar. Gerilim dalgalanmaları hücreler arası dengesizliklere yol açabileceği için bu sensörlerin hassasiyeti, batarya paketinin uzun vadeli kararlılığı açısından kritik önemdedir. Akım sensörleri, genellikle Hall etkisi prensibine dayalı ya da şönt

dirençli sensörler olarak tercih edilir. Bu sensörler, bataryanın anlık yükünü ve rejeneratif frenleme gibi enerji geri kazanım durumlarını izleyerek sistemin iki yönlü enerji akışına göre denge kurmasını sağlar.

BMS sistemlerinde ısı sensörleri de oldukça önemlidir. Termistör (NTC/PTC) veya dirençli sıcaklık dedektörleri (RTD) türündeki bu sensörler, batarya hücrelerinin termal davranışlarını takip ederek aşırı ısınma durumlarında devreyi kapatma, soğutma sistemini aktive etme gibi güvenlik protokollerini devreye sokar. Isı sensörleri olmadan termal kaçak (thermal runaway) gibi tehlikeli durumların önlenmesi mümkün değildir. Jacob Fraden'ın *Handbook of Modern Sensors* adlı eserinde de belirtildiği gibi, modern sensör sistemleri yalnızca veriyi algılamakla kalmayıp, sistem geri bildirim döngülerini de yöneterek aktif müdahale kapasitesine sahiptir.

Bu sensörler sadece bataryanın anlık durumu için değil, aynı zamanda uzun vadeli enerji yönetimi algoritmalarının uygulanmasında da kullanılır. Örneğin, SoC tahmini için kullanılan modellerde sensör verileri matematiksel filtrelerle işlenir (Kalman filtresi, coulomb sayımı gibi). Bu filtreleme işlemlerinde sensör hassasiyeti doğrudan hesaplamaların doğruluğunu etkiler (Plett, 2004). Ayrıca, yüksek gerilimli batarya sistemlerinde izolasyon güvenliği amacıyla yüzey kaçak akım sensörleri de kullanılır ve bu sayede kullanıcı güvenliği teminat altına alınır.

Elektrikli araçlarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla ayrıca yüksek voltaj inverterleri, DC-DC dönüştürücüler ve on board şarj üniteleri gibi güç elektroniği bileşenlerine entegre edilen sensörler de görev alır. Bu sistemlerde gerilim ve akım izleme sensörleri sayesinde cihazların termal kararlılığı sağlanmakta, aşırı yüklenme ve kısa devre gibi durumlara karşı otomatik koruma sağlanmaktadır (Fraden, 2004).

Sonuç olarak, elektrikli ve hibrit araçlardaki güç yönetimi sensörleri, sadece enerji izleme değil, aynı zamanda sistem güvenliği, batarya ömrü optimizasyonu ve performans yönetimi açısından temel bir rol üstlenmektedir. Bu sensörlerin doğru seçimi ve etkin entegrasyonu, batarya maliyetlerinin yüksek olduğu günümüzde hem üreticiler

hem de kullanıcılar açısından sürdürülebilirlik ve verimlilik adına büyük önem taşımaktadır.

Sürüş Destek Sensörleri: Otonom sürüş ve ADAS sistemleri

Modern otomotiv endüstrisinde Gelişmiş Sürüş Destek Sistemleri (ADAS) ve otonom sürüş teknolojileri, sensör füzyonu ve yapay zekâ algoritmalarının entegrasyonu sayesinde önemli bir evrim geçirmektedir. Uluslararası Otomotiv Mühendisleri (SAE)'nin tanımladığı Seviye 2 (kısmi otomasyon) ile Seviye 5 (tam otomasyon) arasındaki bu sistemler, çarpışma oranlarını %90'a varan oranlarda azaltma potansiyeli taşımaktadır (Bosch Mobility Raporu, 2024). Temel bileşenler arasında LiDAR, radar, kamera sistemleri ve ultrasonik sensörler bulunurken, bu teknolojiler çevresel algılama, nesne sınıflandırma ve gerçek zamanlı karar destek fonksiyonlarını yerine getirir. LiDAR teknolojisindeki son gelişmeler, katı hal sensörlerin ticari uygulamalara girmesiyle dikkat çekmektedir. Geleneksel mekanik tarayıcı sistemlerin aksine, 2024'te Quanergy ve Innoviz tarafından sunulan M-Serisi sensörler, 200 metre menzilde ± 2 cm doğrulukla çalışırken maliyetleri %60 azaltmayı başarmıştır. Bu sensörler özellikle düşük ışık koşullarında kamera sistemlerinin sınırlamalarını telafi etmekte ve 3D nokta bulutu oluşturarak dinamik nesne izleme yeteneklerini geliştirmektedir (Ahmed vd., 2025).

Radar sensörlerindeki dönüşüm ise yapay zekâ destekli System-on-Chip (SoC) tasarımlarıyla gerçekleşmektedir. Bosch'un 2025'te piyasaya sürmeyi planladığı dördüncü nesil 79 GHz radar, geleneksel modellere kıyasla %40 daha yüksek açısallık çözünürlük sunarken, derin öğrenme tabanlı nesne sınıflandırma yeteneği sayesinde yayaların hareket yönünü 0.5 saniye önceden tahmin edebilmektedir. Bu teknoloji aynı zamanda yoğun yağış veya sis gibi olumsuz hava koşullarında performans kaybını minimize etmek için frekans modülasyonu teknikleri kullanmaktadır (Rattan vd., 2025; Han vd., 2025).

Kamera tabanlı sistemlerdeki devrim ise çok spektrumlu algılama ile gelmektedir. Tesla'nın HW4.0 donanımında kullandığı kızılötesi (IR)

destekli kameralar, görünür spektrumun yanı sıra termal verileri de işleyerek gece görüş kabiliyetini artırmaktadır. MobilEye'nin geliştirdiği EyeQ6 yongası, 8K çözünürlükte saniyede 144 frame işleme kapasitesiyle trafik ışığı durum değişikliklerini 100 ms'den kısa sürede tanımlayabilmektedir. Sensör füzyonu alanındaki en kritik gelişme ise heterojen veri entegrasyonu için geliştirilen yeni algoritmalar. Nvidia DRIVE Hyperion 9 platformu, LiDAR nokta bulutları, radar doppler verileri ve kamera piksel bilgilerini Bayesian filtresi tabanlı bir yaklaşımla birleştirerek 360° çevresel farkındalık sağlamaktadır (IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024). Ansys AVXcelerate gibi simülasyon araçları ise 1 milyondan fazla senaryo üzerinde bu sistemlerin ISO 26262 ASIL-D güvenlik standartlarına uygunluğunu test etmektedir (Damsara & Barros, 2025; Da Rosa Pereira vd., 2025).

Güvenlik Sensörleri: Çarpışma önleme ve yaya algılama

Modern araçlarda güvenlik sensörleri, özellikle çarpışma önleme ve yaya algılama sistemleri, trafik kazalarını önlemede kritik rol oynamaktadır. Bu sistemler, çoklu sensör füzyonu ve yapay zeka algoritmaları sayesinde giderek daha karmaşık ve etkili hale gelmektedir. Yapılan araştırmalar, gelişmiş sensör tabanlı sistemlerin yaya kazalarını %40'a varan oranlarda azaltabildiğini göstermektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yaya algılama teknolojileri arasında stereo kamera sistemleri, radar ve LiDAR sensörleri öne çıkmaktadır. Özellikle 77-79 GHz frekans bandında çalışan radar sistemleri, yağmur ve sis gibi olumsuz hava koşullarında dahi %95'in üzerinde doğrulukla yayaları tespit edebilmektedir (Bosch Mobility Raporu, 2024). Kamera tabanlı sistemler ise derin öğrenme algoritmaları sayesinde yalnızca yayaların varlığını değil, aynı zamanda hareket yönlerini ve potansiyel risk seviyelerini de analiz edebilmektedir (Moradloo vd., 2025).

Son dönemde geliştirilen katı hal (solid-state) LiDAR teknolojileri, geleneksel mekanik LiDAR sistemlerine göre %60 daha uygun maliyetle üretilebilmekte ve 200 metre menzilde ± 2 cm doğruluk sunabilmektedir. Bu teknoloji, özellikle dar sokaklarda ve karmaşık

kentsel ortamlarda yaya hareketlerinin izlenmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır (Miyoshi vd., 2025).

Çarpışma önleme sistemlerinde en önemli gelişmelerden biri de V2X (Vehicle-to-Everything) iletişim teknolojileridir. 5G altyapısını kullanan bu sistemler, araçların yayaların akıllı cihazlarıyla iletişim kurmasını sağlayarak, özellikle görüş hattı dışındaki yayaların tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Bu teknoloji sayesinde, park halindeki araçların arkasından aniden yola çıkan yayaların tespit edilme olasılığı önemli ölçüde artmıştır (Safari ve Rahimi, 2025; Arpacı vd., 2025).

Prototip aşamasındaki en ilginç teknolojilerden biri de kuantum tabanlı sensörlerdir. MIT tarafından geliştirilen soğuk atom sensörleri, geleneksel ivmeölçerlere göre 1000 kat daha hassas ölçüm yapabilmekte ve GPS sinyali olmadan konum belirleme imkanı sunmaktadır. Bu teknolojinin ticarileşmesi durumunda, yaya hareketlerinin milimetrik doğrulukla izlenebilmesi mümkün olacaktır. Ancak bu teknolojilerin önünde hala çözülmesi gereken teknik zorluklar bulunmaktadır. Özellikle LiDAR sistemlerinin kar ve yoğun toz koşullarındaki performansı, IEEE P2020 çalışma grubunun üzerinde çalıştığı önemli bir sorundur. Ayrıca, V2X sistemlerinde veri gizliliği ve güvenliği konuları da dikkatle ele alınması gereken diğer zorluklardır (Kittlaus vd., 2025; Hello vd., 2025).

Çevresel Sensörler: Sıcaklık, nem ve hava kalitesi algılama

Elektrikli ve hibrit araçlar yalnızca iç enerji dönüşüm sistemleriyle değil, aynı zamanda çevresel koşullara uyum sağlayabilme yetenekleriyle de yüksek performans sunmaktadır (Isermann, 2017). Bu nedenle araçlarda kullanılan çevresel sensörler, sadece yolcu konforunu değil, aynı zamanda güç aktarma organlarının ve batarya yönetim sistemlerinin kararlılığını desteklemek üzere kritik işlevler üstlenmektedir (Zhang vd., 2020). Sıcaklık, nem ve hava kalitesi sensörleri, özellikle termal kontrol, enerji verimliliği, kabin içi konfor ve sürücü güvenliği gibi çeşitli sistemlere doğrudan veri sağlamaktadır (Fraden, 2004).

Araçlardaki sıcaklık sensörleri, hem kabin içi iklimlendirme sistemlerinde hem de batarya ve inverter soğutma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sensörler, ortamdaki sıcaklık değişimini algılayarak klima, ısıtma, motor soğutma veya batarya termal yönetim sistemlerini optimize eder (Isermann, 2017). Fraden'a göre sıcaklık ölçümünde en sık kullanılan sensörler arasında NTC (Negatif Sıcaklık Katsayılı Termistörler), RTD'ler (Resistance Temperature Detectors) ve yarı iletken tabanlı sıcaklık dedektörleri yer alır. RTD'ler, özellikle platinyum gibi kararlı elementlerin kullanımıyla, uzun vadede yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağlar. NTC termistörler ise araç içi uygulamalarda hızlı tepki süresi ve düşük maliyetleriyle tercih edilmektedir (Fraden, 2004).

Nem sensörleri, modern otomobillerde genellikle kabin içi iklimlendirme sistemleriyle birlikte çalışır ve bu sistemin hava akış hızını, fan ayarlarını ve cam buğulanmasını önleyecek müdahaleleri kontrol eder (Ploennigs vd., 2012). Kapasitif nem sensörleri, havadaki su buharı içeriğini dielektrik sabitindeki değişimlere göre algılayarak doğrusal çıkış verir. Bu sensörler, düşük güç tüketimi ve uzun kullanım ömürleri ile araç içi elektronik sistemlerle uyumludur (Fraden, 2004). Ayrıca sıcaklık ile birlikte entegre olarak çalışan sıcaklık-nem kombine sensörleri, daha doğru klima kontrolü ve yolcu konforu sağlar (Isermann, 2017).

Hava kalitesi sensörleri ise günümüzde yalnızca premium sınıf araçlarda değil, birçok yeni nesil elektrikli ve hibrit araçta standart hale gelmiştir. Bu sensörler; karbonmonoksit (CO), nitrojen dioksit (NO₂), ozon (O₃), uçucu organik bileşikler (VOC) gibi zararlı gazları algılayarak kabin içindeki hava sirkülasyonunun taze hava modundan iç hava resirkülasyon moduna geçmesini otomatik olarak sağlar (Popp vd., 2015 & Sun vd., 2018). Bu sayede hem sürücü ve yolcuların sağlığı korunur, hem de kabin içi hava kalitesi artırılır. Fraden, metal oksit tabanlı gaz sensörlerinin bu tür uygulamalarda yüksek doğruluk, seçicilik ve tekrarlanabilirlik sunduğunu vurgular. Bu sensörler, hedef gazla temas ettiğinde yarı iletken malzemenin elektriksel direncinde meydana gelen değişiklikleri ölçerek çalışır ve araç içi hava kalitesi yönetiminde etkin rol oynar (Fraden, 2004).

Bununla birlikte çevresel sensörlerin araç üzerindeki konumlandırması da oldukça önemlidir. Dış ortam sıcaklık sensörleri, genellikle ön tamponun hava akımı alan bölgelerine yerleştirilerek doğrudan güneş ışığından etkilenmeyecek şekilde tasarlanır (Isermann, 2017). İç ortam sensörleri ise hava yönlendirme kanallarına yakın bölgelerde bulunarak anlık kabin içi değerleri en doğru şekilde tespit eder (Zhang vd., 2020). Ayrıca bazı ileri seviye sistemlerde gelişmiş hava kalitesi modülleri, partikül madde algılamaya da olanak tanımakta ve bu veriler, araç ekranında sürücüye görsel olarak sunulmaktadır (Zhang vd., 2020).

Sonuç olarak, sıcaklık, nem ve hava kalitesi sensörleri, elektrikli ve hibrit araçlarda sadece konforu artırmakla kalmayıp, batarya ve motor sistemlerinin verimli çalışmasını sağlamak, elektronik bileşenlerin aşırı ısınmasını önlemek ve hava kaynaklı sağlık risklerini azaltmak gibi çok yönlü faydalar sunmaktadır (Fraden, 2004; Sun vd., 2018). Bu sensörlerin geliştirilmesi ve sistemlerle entegrasyonu sayesinde, modern araçlar çevresel koşullara adapte olabilen, enerji verimliliği yüksek ve kullanıcı dostu hale gelmektedir (Popp vd., 2015).

Motor ve Aktarma Organları Sensörleri: Performans izleme ve hata tespiti

Elektrikli ve hibrit araçların tahrik sistemlerinde kullanılan sensör teknolojileri, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla çok daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik gereksinimleri talep etmektedir. Motor ve aktarma organları sensörleri, elektrik motorunun ve güç aktarma sisteminin gerçek zamanlı performans izlenmesi, verimlilik optimizasyonu ve öngörülebilir hata tespiti gibi kritik fonksiyonları yerine getirmektedir. Bu sensörler, aracın tahrik sisteminin nominal sınırlar içinde çalışmasını garanti altına alırken, herhangi bir anormal durumun erken teşhisine olanak sağlamaktadır. Elektrik motoru sensörleri arasında en kritik olanları, rotor pozisyon sensörleri ve akım sensörleridir. Rotor pozisyon sensörleri, mutlak encoder ve resolver teknolojileri ile mil konumunu mikrometre seviyesinde hassasiyetle ölçerek vektör kontrol algoritmalarına gerekli geri beslemeyi sağlamaktadır. Akım sensörleri ise shunt direnç veya Hall etkisi prensibi ile faz akımlarını ölçerek aşırı

yüklenme ve kısa devre gibi arızaların milisaniyeler içinde tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. Manyetik alan tabanlı akım sensörleri, galvanik izolasyon avantajı sayesinde yüksek voltajlı ortamlarda güvenli ölçüm kabiliyeti sunmaktadır (Kefalas vd., 2022; Melders vd., 2024).

Aktarma organları sensörleri, tork, hız ve sıcaklık parametrelerini sürekli izleyerek şanzıman ve diferansiyel sistemlerinin sağlık durumunu denetlemektedir. Manyetostriktif tork sensörleri, mil üzerindeki burulma momentini temasız olarak ölçerek güç aktarma verimliliğini optimize etmektedir. Bu sensörler, rejeneratif frenleme sırasında enerji geri kazanım verimliliğinin maksimizasyonunda hayati rol oynamaktadır. Titreşim sensörleri ise rulman ve dişli kutusu arızalarının erken teşhisi için mekanik salınımları analiz etmektedir. Sensör verilerinin işlenmesi, gelişmiş sinyal işleme algoritmaları ve yapay zeka tabanlı anomali tespit sistemleri ile desteklenmektedir. Makine öğrenmesi modelleri, tarihsel arıza verileri ile eğitilerek sistemin normal çalışma envelope'unu tanımlamakta ve sapmaları gerçek zamanlı olarak işaretlemektedir. Bu sayede, potansiyel arızalar operatöre önceden bildirilmekte ve plansız duruş süreleri minimize edilmektedir. Ayrıca, sensör verilerinin araç bulut sistemleri ile entegrasyonu, filo bazlı performans analizleri ve öngörücü bakım stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Bachar vd., 2022; Ayeni, 2025).

Sonuç olarak, motor ve aktarma organları sensörleri, elektrikli ve hibrit araçların güvenilirliği ve performansı üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Bu sensörlerin sağladığı yüksek çözünürlüklü veriler, tahrik sistemlerinin verimliliğini artırırken aynı zamanda öngörülebilir bakım stratejilerinin temelini oluşturmaktadır. Gelecekte, yapay zeka destekli tanılama sistemleri ile daha da gelişmesi beklenen bu teknolojiler, elektromobilité devriminin en önemli enabler'larından biri olmaya devam edecektir (Xia vd., 2024; Belgacem vd., 2025).

Sensör Üretim Süreçleri ve Malzemeleri

Sensör üretim süreçleri, sensörün türüne (örneğin sıcaklık, basınç, gaz, ivme sensörü), kullanım ortamına (örneğin otomotiv,

medikal, endüstriyel), malzeme türüne ve entegre edileceği sistemin gereksinimlerine göre değişiklik gösterir. Ancak temel olarak, modern sensör üretim süreci dört ana aşamaya ayrılabilir (Madou, 2018; Fraden, 2010).

Malzeme Hazırlığı ve Substrat Seçimi

Üretimin ilk adımı, sensörün yapısal ve işlevsel bileşenlerini taşıyacak substrat malzemenin seçilmesidir. Bu malzeme genellikle:

- Silisyum (Si): Mikroelektronik ve MEMS tabanlı sensörlerde,
- Seramik (Al_2O_3 , ZnO, TiO_2): Yüksek sıcaklığa dayanıklı gaz ve piezoelektrik sensörlerde,
- Polimer: Esnek sensörlerde,
- Metal levhalar: Strain gauge gibi mekanik sensörlerde kullanılır (Gardner vd., 2001; Sze, 1994).

Substrat, üzerine film kaplanacak ya da mikro-işleme yapılacak taşıyıcı yapıdır. Mekanik dayanım, termal genleşme katsayısı ve yüzey özellikleri bu seçimde belirleyici olur.

İnce ve Kalın Film Kaplama (Deposition)

Sensörün algılama yüzeyini oluşturan işlevsel tabakalar bu aşamada substrat üzerine kaplanır. Kullanılan teknikler:

- Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD): Buharlaştırılan metal veya oksit malzemelerin vakum altında yüzeye çökertilmesi. Optik ve piezoelektrik sensörlerde yaygındır.
- Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD): Kimyasal reaksiyonla yüzeyde film oluşturulması. Gaz ve sıcaklık sensörlerinde kullanılır.
- Sprey Piroliz / Sol-Gel: Düşük maliyetli, seramik kaplama tekniklerindendir.
- Kalın Film Baskı (Thick Film Printing): Mürekkep formunda iletken/piezoelektrik malzemelerin seramik

yüzeylere yazdırılması (Comini vd., 2009; Yole Développement, 2017).

Bu aşamada sensörün algılama özelliğini sağlayacak olan iletken, yarı iletken ya da yalıtkan tabakalar oluşturulur.

Mikrofabrikasyon ve Yapılandırma

Film kaplamaları ardından, sensör yüzeyinde istenen mikro yapılar oluşturulur. Bu yapılandırma süreçleri arasında:

- Fotolitografi: Işıkla hassas alanların açılması, baskı devre gibi mikro yapılar oluşturulması.
- Etching (Aşındırma): Kimyasal ya da plazma ile seçilen alanların oyulması.
- Mikromachining: MEMS yapılarında; kanal, boşluk veya diyafram gibi mikro yapıların oluşturulması (Elwenspoek & Wiegerink, 2001; Kovacs, 1998).

Bu aşamada sensörün algılayıcı geometrisi ve mikro-mekanik özellikleri belirlenir.

Sensör Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Sensör teknolojilerinin temelini, seçilen malzemelerin fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri oluşturur. Sensörün algılama mekanizması, hedef büyüklüğe (sıcaklık, basınç, gaz, nem, manyetik alan, vb.) bağlı olarak iletkenlik, direnç, kapasite, piezoelektrik etki, optik geçirgenlik gibi parametrelerde oluşan değişimlere dayanır. Bu değişimleri güvenilir şekilde algılayabilmesi için sensör malzemesi, hem duyarlı hem de kararlı yapıda olmalıdır. *Fraden (2004)*, sensör üretiminde en yaygın kullanılan malzeme türlerini yarı iletkenler, metaller, seramikler, polimerler ve kompozit yapılar olarak sınıflandırmaktadır (Fraden, 2004).

En yaygın kullanılan malzeme silisyum (Si) olup, özellikle MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) sensörlerin üretiminde vazgeçilmezdir. Silisyumun avantajı, iyi mekanik kararlılığı, termal iletkenliği, entegre devrelerle uyumlu yapısı ve yüksek üretim olgunluğudur. Bu nedenle ivme sensörleri, sıcaklık dedektörleri, optik dedektörler ve piezorezistif sensörlerde yaygın şekilde tercih

edilir. Ayrıca galyum arsenit (GaAs), yüksek frekanslı veya ışığa duyarlı uygulamalarda kullanılan bir yarı iletken alternatifidir (Fraden, 2004).

Metaller (ör. platinyum, altın, nikel, alüminyum), sensörlerde genellikle iletken yollar, elektrotlar veya sıcaklık algılayıcı elemanlar olarak kullanılır. Özellikle platinyum, yüksek kararlılığı nedeniyle RTD (Resistance Temperature Detector) tipi sıcaklık sensörlerinde tercih edilir. Altın ve alüminyum ise mikro-ölçekli bağlantı hatlarında kullanılır (Gardner, Varadan, & Awadelkarim, 2001).

Seramik malzemeler, özellikle gaz sensörlerinde ve piezoelektrik uygulamalarda tercih edilen başka bir gruptur. Çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO₂), baryum titanat (BaTiO₃) gibi oksit bazlı seramikler, yüksek sıcaklığa dayanıklı, kimyasal olarak kararlı ve piezoelektrik özellik gösteren yapılardır. Fraden, bu malzemelerin gazların varlığına karşı elektriksel özelliklerinde belirgin değişiklikler gösterdiğini ve bu sayede örneğin azotoksit (NO_x), CO veya VOC sensörlerinde kullanıldığını ifade eder (Barsan & Weimar, 2001).

Polimerler, düşük maliyetli, esnek ve hafif sensör üretiminde önem kazanmıştır. Özellikle basınç, nem ve biyosensörlerde kullanılan polimerler, geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Polipirol, polianilin, PVDF gibi iletken veya piezoelektrik özellikli polimerler, elastik sensör yüzeyleri için kullanılır. Ancak Fraden, polimerlerin genellikle yaşlanmaya ve sıcaklığa karşı duyarlılık göstermesi nedeniyle uzun vadeli uygulamalarda dikkatle seçilmesi gerektiğini vurgular (Fraden, 2004).

Gelişen teknolojiyle birlikte nano malzemeler (ör. karbon nanotüpler, grafen, metal nanoparçacıklar) de sensör üretiminde öne çıkmaktadır. Bu malzemeler; yüksek yüzey alanı, kimyasal duyarlılık ve elektriksel iletkenlik gibi özellikleri sayesinde özellikle gaz, biyokimyasal ve çevresel sensörlerde performansı büyük ölçüde artırmaktadır (Novoselov vd., 2004).

Mikroelektromekanik Sistemler (MEMS) ve Sensör Teknolojileri

Mikroelektromekanik sistemler (MEMS), mikron boyutlarında üretilen, hem mekanik hem de elektronik bileşenleri bünyesinde barındıran entegre sistemlerdir. Bu sistemler; sensör teknolojilerinde minyatürleştirme, düşük güç tüketimi, yüksek hassasiyet ve toplu üretim avantajları sayesinde devrim niteliğinde gelişmeler sağlamıştır. MEMS sensörler; özellikle otomotiv, sağlık, havacılık, tüketici elektroniği ve savunma sanayii gibi sektörlerde çok geniş bir uygulama alanına sahiptir.

MEMS teknolojisinin temelinde, mikro-fabrikasyon teknikleri (fotolitografi, ince film kaplama, derin silisyum oyma, iyon implantasyonu) ile üretilen mikroskobik boyutlarda yapılar yer alır. Bu yöntemler sayesinde mikro düzeyde diyaframlar, kirişler, yaylar, kaviteler ve piezoelektrik yüzeyler oluşturularak hem fiziksel algılama (ivme, basınç, titreşim) hem de aktüasyon (hareket, valf kontrolü, mikro akış) sağlanabilir. *Fraden (2004)*, MEMS teknolojisinin modern sensör tasarımında en hızlı büyüyen alanlardan biri olduğunu ve özellikle akıllı sistemlerin temel bileşeni hâline geldiğini vurgulamaktadır.

MEMS tabanlı sensörler; özellikle ivmeölçerler (accelerometer), jiroskoplar, basınç sensörleri, mikro-akış sensörleri ve mikro aynalı optik sistemler (MOEMS) gibi uygulamalarda öne çıkar. Örneğin, modern araçlardaki hava yastığı sistemleri, çarpma algılayan MEMS ivmeölçerlerle çalışır. Bu sensörler milisaniyeler içinde çarpışma kuvvetini algılayarak güvenlik sistemini tetikler. Benzer şekilde, MEMS tabanlı jiroskoplar, sürücü destek sistemlerinde (ör. ESP, ABS) aracın yön değişimlerini hassas şekilde izler.

MEMS sensörlerin avantajları arasında:

- Küçük boyut ve düşük ağırlık
- Düşük üretim maliyeti (toplu üretime uygunluk)
- Yüksek entegrasyon kapasitesi (mikrodenetleyicilerle doğrudan birleşim)
- Düşük enerji tüketimi
- Yüksek frekans tepkisi ve hızlı veri aktarımı yer alır.

Bununla birlikte MEMS üretimi, yüksek hassasiyetli temiz oda koşulları gerektirir ve üretim süreçlerinde oluşabilecek mikroskobik hatalar, sensör performansını doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle özellikle güvenlik ve tıbbi uygulamalarda MEMS cihazlarının kalibrasyonu ve kalite kontrolü büyük önem taşır.

Günümüzde MEMS teknolojisi, nanoelektromekanik sistemler (NEMS) ile birleşerek daha da küçülmekte ve işlevsellik kazanmaktadır. Örneğin, MEMS üzerine entegre edilmiş nano yapıların (ör. karbon nanotüpler, grafen) kullanımı, gaz ve biyosensörlerde eşsiz hassasiyet sağlamaktadır. Bu da sensörlerin yalnızca fiziksel değil, kimyasal ve biyolojik ölçümler için de mikroskobik düzeyde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Fraden, 2004).

Sensör Üretiminde Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler

Son yıllarda sensör teknolojilerinde yaşanan en büyük sıçramalardan biri, nanoteknolojinin ve ileri fonksiyonel malzemelerin entegrasyonu ile gerçekleşmiştir. Nanoteknoloji; boyutları 1 ila 100 nanometre arasında değişen yapıların mühendisliğiyle ilgilenir ve bu ölçekteki malzemelerin gösterdiği yüzey alanı, elektriksel iletkenlik, optik davranış ve kimyasal reaktivite gibi olağanüstü özellikler, sensörlerin hassasiyetini ve seçiciliğini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle gaz sensörleri, biyosensörler, basınç sensörleri ve çevresel izleme sistemleri gibi uygulamalarda nanomalzemeler yeni bir dönemin kapılarını aralamaktadır.

Fraden (2004), sensör malzemelerinin nanoölçekte modifiye edilmesiyle performansın önemli ölçüde artırıldığını ve nano-düzeydeki üretim tekniklerinin, geleneksel mikro-elektromekanik sistemlerle (MEMS) entegre edildiğinde çok daha karmaşık ve akıllı sistemlerin üretilebildiğini vurgulamaktadır (Fraden, 2004).

Kullanılan Başlıca Nanomalzemeler:

1. Karbon Nanotüpler (CNTs): Tek duvarlı (SWCNT) ve çok duvarlı (MWCNT) yapılar, olağanüstü elektriksel iletkenlik ve kimyasal duyarlılıkları sayesinde gaz algılayıcılarda, basınca duyarlı

yüzeylerde ve biyosensörlerde kullanılmaktadır. CNT'ler, belirli moleküllerle yüzey fonksiyonelleştirmesi yapılarak hedef özgüllüğü kazandırılabilir.

2. Grafen ve Türevleri: İki boyutlu karbon atomlarından oluşan bu malzeme, hem kimyasal hem de mekanik sensörlerde yüksek performans sunar. Grafen, yüzeyindeki her atoma doğrudan temas sağlandığı için gaz sensörlerinde ultra düşük konsantrasyonlarda bile algılama yapabilir.
3. Metal Oksit Nanoyapılar (ZnO , SnO_2 , TiO_2): Çinko oksit (ZnO) gibi yarı iletken nanomalzemeler, özellikle gaz sensörlerinde yüksek yüzey hacim oranı ve termal kararlılıkları ile dikkat çeker. ZnO nanorodlar, sol-jel veya hidrotermal yöntemlerle kolayca sentezlenebilir ve düşük sıcaklıkta çalışabilen sensör yapılarında yer alır.
4. Manyetik Nanomalzemeler (Fe_3O_4 , NiO): Bu malzemeler, özellikle manyetosensörlerde ve biyosensörlerde hedef molekülün tanınmasını kolaylaştırmak amacıyla kullanılır. Ayrıca nanoparçacık yüzeylerine bağlanan antikorlar aracılığıyla seçici tespit yapılabilir.
5. Metal Nanoparçacıklar (Au , Ag , Pt): Altın ve gümüş nanoparçacıklar, özellikle optik ve plazmonik tabanlı sensör sistemlerinde kullanılır. Bu malzemelerle yüzey plazmon rezonans (SPR) etkisi kullanılarak biyolojik ve kimyasal maddelerin etkileşimi izlenebilir.

Sensörlerin Karşılaştığı Teknik Zorluklar ve Çözüm Önerileri

Sensör teknolojilerindeki gelişmelere rağmen, sensörlerin gerçek uygulamalarda güvenilir, uzun ömürlü ve hassas biçimde çalışmasını engelleyen çeşitli teknik zorluklar hâlâ varlığını sürdürmektedir. Özellikle otomotiv, biyomedikal, çevresel izleme ve endüstriyel otomasyon gibi zorlu koşullarda çalışan sensörlerde bu

problemler daha belirgindir. Bir sensör sisteminin başarısının yalnızca ölçüm doğruluğuyla değil; aynı zamanda tekrar edilebilirlik, çevresel dayanım, dinamik tepki süresi ve entegrasyon kapasitesi gibi birçok faktörle belirlendiğini vurgular.

Başlıca Teknik Zorluklar:

Hassasiyet ve Gürültü (Noise) Sorunları: Düşük seviyeli sinyallerle çalışan sensörlerde elektriksel gürültü, ölçüm doğruluğunu ciddi biçimde düşürebilir. Bu durum özellikle piezorezistif, optik ve manyetik sensörlerde ön plandadır.

Sıcaklık ve Nemden Kaynaklı Kararsızlık: Dış ortam sıcaklığı, nem oranı ve sıcaklık gradyanları, sensör çıkışında sapmalara neden olabilir. Bu durum, gaz sensörleri, nem sensörleri ve piezoelektrik elemanlar için kritik bir problemdir.

Zamana Bağlı Bozulma ve Yaşlanma: Özellikle polimer ve organik malzeme içeren sensörler, zamanla yapısal ve elektriksel özelliklerini kaybedebilir. Bu da sensörün kalibrasyon dışına çıkmasına ve hatalı veri üretmesine neden olur.

Elektromanyetik Parazit (EMI): Endüstriyel ortamlarda motorlar, invertörler veya kablosuz iletişim kaynaklı elektromanyetik girişimler, sensör sinyallerinde bozulmaya yol açabilir.

Mekanik Dayanım ve Mikrohasar: MEMS ve NEMS tabanlı sensörlerde mikro çatlaklar, termal genleşme kaynaklı stresler ve titreşimler cihazın erken arızalanmasına neden olabilir.

Sensör-Mikrodenetleyici Entegrasyonu: Farklı çıkış formatlarına (analog/dijital) ve voltaj seviyelerine sahip sensörlerin mikroişlemcilerle uyumlu şekilde çalışması, arayüz devreleri açısından tasarım zorlukları yaratır.

Çözüm Önerileri:

Sinyal İşleme ve Filtreleme: Gürültüyü azaltmak için düşük geçiren filtreler, dijital filtreleme algoritmaları (ör. Kalman filtresi) ve ekranlama teknikleri kullanılabilir.

Sıcaklık Telafisi (Temperature Compensation): RTD veya termistör gibi sıcaklık sensörleriyle entegre çalışacak şekilde sensör çıkışı

sürekli izlenmeli ve matematiksel telafi algoritmaları uygulanmalıdır. Özellikle gaz ve basınç sensörlerinde sıcaklık etkisi yazılım yoluyla dengelenebilir.

Malzeme Stabilitesini Artırma: Polimer esaslı malzemeler yerine kararlı seramik ve metal oksit bazlı sensör malzemeleri tercih edilerek yaşlanma etkisi azaltılabilir. Ayrıca yüzey kaplamaları (örn. silikon oksit veya altın) ile korozyona karşı direnç artırılabilir.

EMI Kalkanlama ve Topraklama: EMI kaynaklı bozulmalar için metal muhafazalar, topraklama düzenlemeleri ve diferansiyel sinyal iletimi gibi çözümler kullanılabilir.

Yapısal Optimizasyon ve Paketleme: Sensörlerin titreşim, darbe ve çevresel faktörlere karşı dayanıklı olabilmesi için paketleme (encapsulation) ve mikromekanik tasarım süreçleri iyileştirilmelidir. Bu, özellikle MEMS/NEMS cihazlarda önemlidir.

Otonom Kalibrasyon ve Kendini Tanıma (Self-Diagnostics): Sensörler, belirli periyotlarda kendini test eden devrelerle donatılarak sapmaları tespit edip hata sinyali üretebilir. Bu, özellikle sağlık ve otomotiv gibi güvenlik-kritik sistemlerde önemlidir.

Sensör Hassasiyeti ve Kalibrasyonu

Sensör hassasiyeti, bir sensörün ölçtüğü fiziksel büyüklükteki küçük değişimlere ne kadar duyarlı olduğunu ifade eder. Bir başka deyişle, çıkış sinyalindeki değişimin, girişteki fiziksel değişime oranıdır. Hassasiyet, genellikle sensörün çözünürlüğü, doğruluğu, lineerliği ve gürültüye dayanıklılığı ile birlikte değerlendirilir. Özellikle tıbbi, çevresel ve otomotiv uygulamalarında yüksek hassasiyetli sensörler; güvenlik, doğruluk ve sistem kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir.

Hassasiyeti bir sensörün kalitesini belirleyen en temel parametrelerden biridir. Sensör çıkışının doğrusal olması (yani giriş ile çıkış arasındaki ilişkinin sabit kalması) da hassasiyetin sürdürülebilirliği açısından önemlidir.

Hassasiyeti Etkileyen Faktörler:

1. Sensör Tipi ve Malzeme: Yüksek kaliteli yarı iletkenler (ör. Si, GaAs) ve metal oksitler (ör. ZnO, SnO₂) kullanılan sensörler, daha yüksek hassasiyet sunar.
2. Sıcaklık ve Ortam Koşulları: Ortam sıcaklığı ve nem, sensör malzemesinin elektriksel özelliklerini değiştirerek ölçüm sapmalarına neden olabilir.
3. Sinyal İşleme Devreleri: Zayıf sinyallerin işlenmesinde kullanılan amplifikasyon ve filtreleme yöntemleri, hassasiyeti önemli ölçüde etkiler.
4. Gürültü (Noise) Seviyesi: Elektriksel ya da çevresel gürültü, özellikle düşük genlikli sinyallerde hassasiyeti düşürür.
5. Uzun Süreli Stabilité (Drift): Zamanla ortaya çıkan kalibrasyon kaymaları, sensör çıkışında doğruluk kaybına neden olabilir.

Kalibrasyon: Tanımı ve Önemi

Kalibrasyon, bir sensörün çıkış sinyalini bilinen referanslarla karşılaştırarak doğruluğunun kontrol edilmesi ve gerekiyorsa düzeltilmesi işlemidir. Sensör, belirli bir fiziksel büyüklük için (örneğin sıcaklık, basınç, gaz konsantrasyonu) laboratuvar ortamında referans cihazlarla test edilir ve sapmalar belirlenir. Elde edilen bu sapmalar ya yazılımsal düzeyde (kompanzasyon algoritmaları ile) ya da fiziksel olarak sensörün ayarları değiştirilerek düzeltilir.

Fraden (2004), kalibrasyonun sadece üretim aşamasında değil, periyodik olarak da yapılması gerektiğini ve özellikle yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda kalibrasyonun sistem güvenilirliğini doğrudan etkilediğini vurgular (Fraden, 2004).

Veri Güvenliği ve Sensör Güvenilirliği

Gelişen IoT akıllı sistemler ve otomasyon teknolojileri ile birlikte sensörler, yalnızca veri toplayan fiziksel cihazlar olmaktan

çıkarak dijital ağların kritik bileşenleri hâline gelmiştir. Bu bağlamda veri güvenliği (data security) ve sensör güvenilirliği (sensor reliability), yalnızca mühendislik performansı değil, aynı zamanda siber güvenlik ve sistem bütünlüğü açısından da stratejik önem kazanmıştır.

Sensör Güvenilirliği (Reliability):

Sensör güvenilirliği, bir sensörün belirli koşullar altında belirli bir süre boyunca doğru ve tutarlı şekilde çalışabilme yeteneğini ifade eder. Sensör güvenilirliğinin yalnızca donanımsal dayanıklılık değil; aynı zamanda doğruluk, tekrar edilebilirlik, stabilite ve arıza oranı gibi performans metriklerini de kapsadığını belirtmektedir.

Güvenilirlik Sorunlarına Yol Açan Faktörler:

- Zamanla oluşan ölçüm sapmaları
- Sıcaklık, nem ve titreşim gibi çevresel stresler
- Kalitesiz malzeme seçimi ve yetersiz üretim süreci kontrolü
- Kalibrasyon eksikliği veya yanlış kalibrasyon
- Yazılım hataları ve donanım-software uyumsuzlukları

Güvenilirliği Artırma Yöntemleri:

- Sensörlerin periyodik test ve kalibrasyonu
- Kendi kendini teşhis (self-diagnostics) yetenekleri ile hata tespiti
- Redundant (yedekli) sensör sistemleri ile arızaya karşı dayanıklılık
- Üretim sonrası hızlandırılmış yaşlandırma testleri ve çevresel simülasyonlar
- Arıza öncesi uyarı sistemleri (predictive maintenance) ile bakım planlaması

Elektrikli ve Hibrit Araç Sensörlerinin Geleceği: Üretimde Yapay Zeka ve Otomasyon Trendleri

Elektrikli ve hibrit araç sensörlerinin geleceği, üretim süreçlerinde yapay zeka ve otomasyon teknolojilerinin entegrasyonu ile şekillenmektedir. Bu dönüşümün merkezinde, geleneksel üretim yöntemlerinin dijital teknolojilerle dönüştürülmesi yer almaktadır. Yapay zeka algoritmaları, sensör üretim süreçlerinin her aşamasında kritik roller üstlenmektedir. Özellikle derin öğrenme teknikleri, mikroelektronik sensör bileşenlerinin üretimi sırasında ortaya çıkan milimetrik hataların tespit edilmesini sağlayarak üretim kalitesinde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu sistemler, insan gözünün fark edemeyeceği mikro seviyedeki kusurları bile yüksek doğrulukla belirleyebilmekte ve üretim verimliliğini artırmaktadır. Bu teknolojik ilerlemeler, aynı zamanda üretim hatlarındaki otomasyon seviyesinin artırılmasına da zemin hazırlamaktadır (Farhaoui vd., 2025; Mahale vd., 2025).

Otomasyon teknolojilerindeki ilerlemeler, sensör üretim hatlarında insan müdahalesini en aza indirirken aynı zamanda üretim hızını ve tutarlılığını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu bağlamda, modern üretim tesislerinde robotik sistemlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Robotik sistemler özellikle hassas montaj gerektiren MEMS sensörlerinin üretiminde vazgeçilmez hale gelmiştir. Mikroskobik bileşenlerin milimetrik hassasiyetle yerleştirilmesini sağlayan bu sistemler, üretim hatalarını minimize etmekte ve ürün kalitesini artırmaktadır. MEMS teknolojisinin karmaşıklığı düşünüldüğünde, robotik sistemlerin bu alandaki önemi daha da belirginleşmektedir. Bu gelişmeler, üretim süreçlerinin sanal ortamda modellenmesine olanak tanıyan dijital ikiz teknolojisinin önemini daha da artırmaktadır (Ahmed vd., 2025).

Dijital ikiz teknolojisi, sensör üretim süreçlerinin optimizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji sayesinde üretim hatları sanal ortamda modellenabilmekte ve çeşitli senaryolar test edilebilmektedir. Özellikle yeni nesil sensörlerin üretimine başlamadan önce dijital ikizler üzerinde yapılan simülasyonlar, potansiyel sorunların önceden tespit edilmesini ve çözümler geliştirilmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, üretim süreçlerindeki

riskleri azaltmakta ve ürünün piyasaya sürülme süresini kısaltmaktadır. Bu süreçlerin tasarım aşamasına entegre edilmesi ise yapay zeka destekli tasarım araçlarının önemini ortaya koymaktadır (Odnala vd., 2024).

Yapay zeka destekli tasarım araçları, elektrikli ve hibrit araç sensörlerinin geliştirilme sürecinde devrim yaratmaktadır. Bu araçlar, farklı malzeme kombinasyonlarının ve tasarım parametrelerinin simülasyonunu yaparak en uygun sensör konfigürasyonlarının belirlenmesini sağlamaktadır. Özellikle derin öğrenme algoritmaları, binlerce farklı tasarım varyasyonunu hızlı bir şekilde analiz edebilmekte ve en iyi performans gösteren modelleri belirleyebilmektedir. Bu süreç, geleneksel deneme-yanılma yöntemlerine kıyasla çok daha verimli ve maliyet etkin bir yaklaşım sunmaktadır. Bu gelişmeler, özellikle otonom taşıtların yaygınlaşmasıyla birlikte artan sensör talebini karşılamada kritik bir rol oynamaktadır (Garikapati ve Shetiya, 2024; Singh ve Priya, 2025).

Otonom taşıtların yaygınlaşmasıyla birlikte, elektrikli ve hibrit araç sensörlerine olan talep giderek artmaktadır. Bu artan talebi karşılamak için üretim süreçlerinde yapay zeka ve otomasyon teknolojilerinin kullanımı daha da önem kazanmaktadır. Yapay zeka tabanlı kalite kontrol sistemleri, yüksek hassasiyet ve güvenilirlik gerektiren bu sensörlerin üretiminde kritik bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda, sensörlerin kullanım ömrü boyunca toplanan performans verilerinin analizi, gelecekteki üretim süreçlerinin iyileştirilmesi için değerli bilgiler sağlamaktadır. Bu veriye dayalı yaklaşım, ürün yaşam döngüsü yönetimini dönüştürmekte ve sürekli iyileştirme süreçlerini desteklemektedir. Bu kapsamlı dönüşüm, elektrikli ve hibrit araç sensörlerinin üretiminde yapay zeka ve otomasyon teknolojilerinin benimsenme hızını daha da artırmaktadır (Cavus vd.,2025; Mahale vd., 2025).

Elektrikli ve hibrit araç sensörlerinin üretiminde yapay zeka ve otomasyon teknolojilerinin benimsenme hızı, endüstrinin dijital dönüşümüne paralel olarak artmaya devam etmektedir. Bu teknolojiler, bir yandan üretim maliyetlerini düşürürken diğer yandan ürün kalitesini ve performansını artırmaktadır. Gelecekte,

yapay zeka destekli üretim sistemlerinin daha da gelişmesiyle birlikte, sensör üretim süreçlerinde tam otomasyon hedefine ulaşılması beklenmektedir. Bu dönüşüm, elektrikli ve hibrit araç teknolojilerinin yaygınlaşmasına önemli bir katkı sağlayacak ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Aynı zamanda, yüksek hassasiyetli ve güvenilir sensörlerin seri üretimi, otonom sürüş sistemlerinin güvenli bir şekilde yaygınlaşması için de kritik öneme sahiptir. Bu kapsamlı teknolojik evrim, otomotiv endüstrisinin geleceğini şekillendiren en önemli dinamiklerden biri olmaya devam edecektir (Ogunmolu vd., 2025; Kiları, 2025; Mahale vd., 2025).

Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan sensörlerin gelişim süreci, üretim teknikleri ve kullanım alanları kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Sensörlerin otomotiv endüstrisindeki önemi, yalnızca araç performansını artırmakla sınırlı kalmayıp; güvenlik, enerji verimliliği, emisyon azaltımı ve sürüş konforu gibi çok boyutlu katkılar sunduğu görülmüştür. Özellikle batarya yönetim sistemlerinde kullanılan sıcaklık ve voltaj sensörleri, araçların güvenilirliğini doğrudan etkileyen kritik bileşenlerdir. Aynı şekilde radar, LiDAR ve kamera tabanlı sensörlerin otonom sürüş teknolojilerine yaptığı katkı, gelecekte akıllı ulaşım sistemlerinin temel yapı taşını oluşturacaktır.

Üretim teknikleri açısından değerlendirildiğinde, MEMS ve nanoteknoloji tabanlı sensörlerin minyatür boyutları, düşük enerji tüketimleri ve yüksek hassasiyetleri sayesinde sektörde giderek daha yaygın kullanılacağı öngörülmektedir. Ayrıca grafen, karbon nanotüpler ve metal oksit yarıiletkenler gibi ileri malzemeler, sensör performansını geliştirmede kritik bir rol oynamaktadır. Bu durum, yeni nesil araçlarda hem maliyet etkin hem de dayanıklı sensörlerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

Sensör teknolojisinin yalnızca donanım boyutunda değil, aynı zamanda yazılım, veri analitiği ve yapay zekâ ile bütünlükli biçimde ilerlediğini ortaya koymaktadır. Sensör füzyonu, gerçek zamanlı veri işleme ve öngörücü bakım gibi uygulamalar, elektrikli ve hibrit

araçların daha güvenli, verimli ve akıllı hale gelmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan sensörler, otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada stratejik bir role sahiptir. Gelecekte, dijital ikizler, yapay zekâ destekli üretim süreçleri ve IoT tabanlı çözümlerle sensörlerin daha akıllı, entegre ve ölçeklenebilir hale gelmesi beklenmektedir. Bu bağlamda, sensör teknolojilerinin gelişimi yalnızca otomotiv sektörünü değil, aynı zamanda enerji, ulaşım ve çevre politikalarını da doğrudan etkileyecek niteliktedir.

Kaynakça

Abo-Khalil, A. G., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., Radwan, A., Rezk, H., & Olabi, A. G. (2022). Electric vehicle impact on energy industry, policy, technical barriers, and power systems. *International Journal of Thermofluids*, 13, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100134>

Ahmed, A. M. H., Al-Aswadi, F. N., AlDharhani, G. S., Hamad, O. M., & Iqbal, Z. (2025, February). Development and implementation of an autonomous vehicle prototype with ADAS. In *IET Conference Proceedings CP917* (Vol. 2025, No. 3, pp. 464-471). Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/icp.2025.1154>

Ahmed, T., Bajpai, S., Faisal, M., & Tripathi, S. L. (Eds.). (2025). *Advances in Science, Engineering and Technology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003641544>

Ali, Z. M., Jurado, F., Gandoman, F. H., & Calasan, M. (2024). Advancements in battery thermal management for electric vehicles: Types, technologies, and control strategies including deep learning methods. *Ain Shams Engineering Journal*, 102908. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102908>

Al-Sheikh, H., Hoblos, G., Moubayed, N., & Karami, N. (2015). A sensor fault diagnosis scheme for a DC/DC converter used in hybrid electric vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 48(21), 713-719. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.611>

Ammal, S. M., Kathiresan, M., & Neelaveni, R. (2021). Artificial intelligence and sensor technology in the automotive industry: An overview. In *Automotive embedded systems: Key technologies, innovations, and applications* (pp. 145-164). https://doi.org/10.1007/978-3-030-59897-6_8

Arpaci, I., Al-Sharafi, M. A., & Mahmoud, M. A. (2025). Drivers of vehicle-to-everything (V2X) adoption: A behavioral reasoning theory perspective. *PLoS ONE*, 20(7), e0327084. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327084>

Ayeni, O. (2025). Integration of Artificial Intelligence in predictive maintenance for mechanical and industrial engineering. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 7(3), 1-23. <https://doi.org/10.56726/IRJMETs70039>

Bachar, L., Klein, R., Tur, M., & Bortman, J. (2022). Fault diagnosis of gear transmissions via optic Fiber Bragg Grating strain sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 169, 108629. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108629>

Barsan, N., & Weimar, U. (2001). Conduction model of metal oxide gas sensors. *Journal of Electroceramics*, 7(3), 143–167. <https://doi.org/10.1023/A:1014405811371>

Basu, A. K., Tatiya, S., & Bhattacharya, S. (2018). Overview of electric vehicles (EVs) and EV sensors. In *Sensors for automotive and aerospace applications* (pp. 107-122). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3290-6_7

Başlamışlı, Ç. S., Testik, C. M., & Köprübaşı, K. (2019). Araç Takip Sistemi Verilerini Kullanarak Elektrikli ve Hibrit Taşıtlar için Enerji Yönetim Sistemi Algoritmalarının Optimizasyonu ve Ticari/Kamusal Kullanıma Yönelik Motorlu Taşıtlar için Optimal Hibritleştirme Alternatiflerinin Değerlendirilmesi.

Belgacem, H., & Chihi, I. (2025). Toward Reliable and Intelligent Sensor Systems: A Comprehensive Study of Fault Diagnosis and Mitigation. *IEEE Sensors Reviews*. <https://doi.org/10.1109/SR.2025.3601092>

Bhattacharya, S., Agarwal, A. K., Prakash, O., & Singh, S. (Eds.). (2019). *Sensors for automotive and aerospace applications* (pp. 1-6). Singapore: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3290-6>

Bogue, R. (2007). MEMS sensors: Past, present and future. *Sensor Review*, 27(1), 7–13. <https://doi.org/10.1108/02602280710728719>

Bogue, R. (2014). Sensors: An overview of the market and recent technology developments. *Sensor Review*, 34(2), 106–112. <https://doi.org/10.1108/SR-02-2014-634>

Bosch Mobility Solutions. (2024). Radar and Camera-Based Driver Assistance Systems. Erişim: 08.07.2025. <https://www.bosch-mobility-solutions.com/>

Cavus, M., Dissanayake, D., & Bell, M. (2025). Next generation of electric vehicles: AI-driven approaches for predictive maintenance and battery management. *Energies*, 18(5), 1041. <https://doi.org/10.3390/en18051041>

Chau, K. T., Jiang, C., Han, W., & Lee, C. H. (2017). State-of-the-art electromagnetics research in electric and hybrid vehicles. *Progress in Electromagnetics Research*, 159, 139-157. <https://doi.org/10.2528/PIER17090407>

Chauhan, S. S., Lamba, K., & Yagyasen, D. (2024). Methods of implementation in an electric vehicle conversion and vehicle controller: a review. <https://doi.org/10.5109/7172252>

Comini, E., Faglia, G., Sberveglieri, G., Pan, Z., & Wang, Z. L. (2009). Stable and highly sensitive gas sensors based on semiconducting oxide nanobelts. *Applied Physics Letters*, 81(10), 1869–1871. <https://doi.org/10.1063/1.1504879>

Da Rosa Pereira, V. A., Berri, R. A., & Osório, F. S. (2025). A Review on Computer Vision-Based Object and Safe Navigation Zone Identification for Autonomous Vehicles and ADAS. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 114-131). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-96962-1_8

Damsara, K. D. P., & de Barros, A. G. (2025). A Systematic Review on User Acceptance of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). *Transportation Research Procedia*, 82, 3472-3482. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.082>

Delso-Vicente, A. T., Camperos, M. C., & Almonacid-Durán, M. (2025). The evolution of electric and hybrid vehicles and their influence on sustainable transport: A review and future research lines. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 4(2), 100100. <https://doi.org/10.1016/j.stae.2025.100100>

Doebelin, E. O., & Manik, D. N. (2017). *Measurement systems: Application and design* (7th ed.). McGraw-Hill.

Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O., & Mehrjardi, R. T. (2021). State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967-984. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3072788>

Elektrikli Arabalar. Elektrikli Arabaların Ana Parçaları. Erişim: 08.07.2025. <https://diyot.net/elektrikli-arabalar/>

Elwenspoek, M., & Wiegerink, R. (2001). *Mechanical microsensors*. Springer.

Farhaoui, Y., Herawan, T., Imoize, A. L., & El Allaoui, A. (Eds.). (2025). Intersection of Artificial Intelligence, Data Science, and Cutting-Edge Technologies: From Concepts to Applications in Smart Environment: ICAISE'2024, Volume 2 (Vol. 1397). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-90921-4>

Fraden, J. (2004). Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications (3rd ed.). Springer, (s.547–549, s.225–228). <https://doi.org/10.1007/0-387-27600-4>

Plett, G. L. (2004). Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-Based HEV Battery Packs: Part 1. Background. Journal of Power Sources, 134(2), 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.031>

Fraden, J. (2010). Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6466-3>

Gardner, J. W., Varadan, V. K., & Awadelkarim, O. O. (2001). Microsensors, MEMS, and smart devices. John Wiley & Sons.

Garikapati, D., & Shetiya, S. S. (2024). Autonomous vehicles: Evolution of artificial intelligence and the current industry landscape. Big Data and Cognitive Computing, 8(4), 42. <https://doi.org/10.3390/bdcc8040042>

Han, K., Chen, Y., Gupta, R., & Altintas, O. (2025). Scene-Aware Conversational ADAS with Generative AI for Real-Time Driver Assistance. arXiv preprint arXiv:2507.10500. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.10500>

Hello, S., Snijders, H., Wirschafter, B., Boutin, A., Fulop, L., Segueineau, F., ... & Dupont-Nivet, M. (2025). Miniaturized optical system for a chip-based cold-atom inertial sensor. Applied Optics, 64(11), 2811-2818. <https://doi.org/10.1364/AO.551283>

Hibrit Araçlar. Erişim: 08.07.2025. <https://www.cerayoto.com/hibrit-arac-ne-demek/>

Husain, I. (2021). Electric and hybrid vehicles: design fundamentals. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429296109>

Isermann, R. (2017). Mechatronic systems: Sensors and actuators: Fundamentals and modeling. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55327-3>

Jiang, S., He, Y., Chen, W., & Yang, H. (2021). Recent advances in smart sensors and sensing systems for wearable applications. *Sensors*, 21(23), 7899. <https://doi.org/10.3390/s21237899>

Kakillioglu, E. A., Aktaş, M. Y., & Fescioglu-Unver, N. (2022). Self-controlling resource management model for electric vehicle fast charging stations with priority service. *Energy*, 239, 122276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122276>

Karuppasamy, S. S., Jeyaprakash, N., & Yang, C. H. (2023). The sensors in future vehicles. In *The Future of Road Transportation* (pp. 261-283). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003354901-13>

Kaushik, A., & Khan, R. (2015). Nanostructured metal oxides and their composites for gas sensors. *Journal of Materials Chemistry C*, 3(43), 10666–10683. <https://doi.org/10.1039/C5TC01659D>

Kefalas, A., Ofner, A. B., Pirker, G., Posch, S., Geiger, B. C., & Wimmer, A. (2022). Estimation of combustion parameters from engine vibrations based on discrete wavelet transform and gradient boosting. *Sensors*, 22(11), 4235. <https://doi.org/10.3390/s22114235>

Khan, W. S., Asmatulu, E., & Asmatulu, R. (2025). Nanotechnology safety in the automotive industry. In *Nanotechnology Safety* (pp. 77-96). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15904-6.00006-X>

Kilari, S. D. (2025). The Impact of Artificial Intelligence on Automated Manufacturing and Supply Chain Systems: Advancements, Challenges, and Future Prospects. SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5204723>

Kittlaus, E., Hunacek, J., Bagheri, M., Nejadriahi, H., Langlois, M., Chiow, S. W., ... & Forouhar, S. (2025). Semiconductor optical amplifier-based laser system for cold-atom sensors. *EPJ Quantum Technology*, 12(1), 46. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-025-00348-z>

Kovacs, G. T. A. (1998). *Micromachined transducers sourcebook*. McGraw-Hill.

Lee, C. H., Hua, W., Long, T., Jiang, C., & Iyer, L. V. (2021). A critical review of emerging technologies for electric and hybrid vehicles. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2, 471-485. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2021.3138894>

Li, J., He, X., Zhou, Q., Anthony, C., Wang, B., Lu, G., & Xu, H. (2025). Heuristic Information-Rich Evolutionary Modelling for Engine Soft Sensors of Hybrid

Electric Vehicles. *Applied Soft Computing*, 113468.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.113468>

Liu, C., Chau, K. T., Lee, C. H., & Song, Z. (2020). A critical review of advanced electric machines and control strategies for electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 1004-1028. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3041417>

Madou, M. (2018). *Fundamentals of microfabrication and nanotechnology* (3rd ed.). CRC Press.

Mahale, Y., Kolhar, S., & More, A. S. (2025). A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *Discover Applied Sciences*, 7(4), 243. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3>

Melders, L., Smigins, R., & Birkavs, A. (2024). Data Acquisition System for Vehicle Engine Sensors: A Review. *Res. Rural. Dev*, 39, 277-284. <https://doi.org/10.22616/RRD.30.2024.043>

Miyoshi, T., Yamashita, S., & Yamazaki, T. (2025, March). Enhancing road safety: a pedestrian-to-vehicle collision warning system integrating location-based P2P and LiDAR sensing. In *2025 1st International Conference on Consumer Technology (ICCT-Pacific)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCT-Pacific63901.2025.11012868>

Monolithic Power Systems. (2023). History and evolution of sensors. <https://www.monolithicpower.com>

Moradloo, N., Mahdinia, I., & Khattak, A. J. (2025). Nighttime safety of pedestrians: The role of pedestrian automatic emergency braking systems. *Accident Analysis & Prevention*, 219, 108110. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2025.108110>

Morales Matamoros, O., Takeo Nava, J. G., Moreno Escobar, J. J., & Ceballos Chávez, B. A. (2025). Artificial intelligence for quality defects in the automotive industry: A systemic review. *Sensors*, 25(5), 1288. <https://doi.org/10.3390/s25051288>

Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>

Odnala, S., Shanthi, R., Bharathi, B., Pandey, C., Rachapalli, A., & Liyakat, K. K. S. (2024). Artificial Intelligence and Cloud-Enabled E-Vehicle Design with Wireless Sensor Integration. SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5107242>

Ogunmolu, A. M., Olaniyi, O. O., Popoola, A. D., Olisa, A. O., & Bamigbade, O. (2025). Autonomous Artificial Intelligence Agents for Fault Detection and Self-Healing in Smart Manufacturing Systems. *Journal of Energy Research and Reviews*, 17(8), 20-37. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2025/v17i8445>

Onio. (2023). Sensing the future: Evolution of IoT sensors. <https://www.onio.com>

Ploennigs, J., Schumann, A., & Neugebauer, R. (2012). Application of humidity and temperature sensors in automotive climate control. *IEEE Sensors Journal*, 12(6), 1796–1803. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2178158>

Popp, T., Kroll, A., & Schütze, A. (2015). Intelligent air quality monitoring for automotive applications. *Procedia Engineering*, 120, 737–740. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.706>

Rajesh, K. (2025, May). Hybrid CNN-LSTM-based Intelligent Controller for Accurate Battery Health Prediction in Electric Vehicles. In 2025 7th International Conference on Inventive Material Science and Applications (ICIMA) (pp. 237–244). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIMA64861.2025.11073913>

Rattan, A., Pal, A. R., & Gurusamy, M. (2025). Quantum computing for advanced driver assistance systems and autonomous vehicles: A review. *IEEE Access*, 17554–17582. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3532958>

Safari, A., & Rahimi, A. (2025). Vehicle-to-everything mode of operation technologies: A state-of-art systematic review. *Applied Energy*, 398, 126382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126382>

Sekhar, R., Solke, N., & Shah, P. (2023). Lean manufacturing soft sensors for automotive industries. *Applied System Innovation*, 6(1), 22. <https://doi.org/10.3390/asi6010022>

Singh, P. S., & Priya, R. (2025, March). Artificial Intelligence Controlled Manufacturing Strategies for New Energy Vehicles. In 2025 International Conference on Data Science, Agents & Artificial Intelligence (ICDAAI) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDAAI65575.2025.11011621>

Sun, J., Zhang, H., & Xiong, Y. (2018). Design of cabin air quality monitoring system for electric vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 382(3), 032020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/382/3/032020>

Sze, S. M. (1994). *Semiconductor sensors*. John Wiley & Sons.

Takagi, M., Fujimoto, K., Kawahara, Y., & Asami, T. (2014, September). Detecting hybrid and electric vehicles using a smartphone. In *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing* (pp. 267–275). <https://doi.org/10.1145/2632048.2632088>

Tampuu, A., Aidla, R., van Gent, J. A., & Matiisen, T. (2023). Lidar-as-camera for end-to-end driving. *Sensors*, 23(5), 2845. <https://doi.org/10.3390/s23052845>

Taraba, M., Adamec, J., Danko, M., & Drgona, P. (2018, May). Utilization of modern sensors in autonomous vehicles. In *2018 ELEKTRO* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2018.8398279>

VikramGoud, M., Biswas, P. K., Sain, C., Babu, T. S., & Balachandran, P. K. (2024). Advancement of electric vehicle technologies, classification of charging methodologies, and optimization strategies for sustainable development—a comprehensive review. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39299>

Vishwanath Nagarajan, V. S., Jadoun, V. K., Jayalakshmi, N. S., & Pandey, A. K. (2023, March). An overview of electric and hybrid vehicle technology. In *International Conference on Renewable Power* (pp. 441–456). Singapore: Springer Nature Singapore.

Wilson, J. S. (2005). *Sensor technology handbook*. Elsevier.

Xia, K., Lou, Y., Yuan, Q., Zhu, B., Li, R., & Du, Y. (2024). Optoelectronic Torque Measurement System Based on SAPSO-RBF Algorithm. *Sensors*, 24(5), 1576. <https://doi.org/10.3390/s24051576>

Yeong, D. J., Velasco-Hernandez, G., Barry, J., & Walsh, J. (2021). Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review. *Sensors*, 21(6), 2140. <https://doi.org/10.3390/s21062140>

Yole Développement. (2017). *MEMS & sensors: Technology, industry and market trends*. Yole Développement Market Report.

Zhang, H., Yu, F., & Sun, J. (2020). Review of sensors and control methods for air quality in vehicles. *Journal of Sensors*, 2020, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/8852761>

BÖLÜM 21

ENDÜSTRİYEL ROBOT AKTÜATÖR TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Ebubekir YAŞAR¹

Giriş

Endüstriyel robotlar, üretim süreçlerinde verimlilik, hassasiyet ve esneklik sağlamaları nedeniyle modern endüstrinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Robotik sistemlerin performansı; mekanik yapı, kontrol stratejileri ve görev özellikleri gibi birçok parametreye bağlı olmakla birlikte, bu performansın belirleyici unsurlarından biri aktüatör teknolojileridir. Aktüatörler, robot eklemlerinde gerekli hareketi sağlayarak sistemin dinamik davranışı, enerji tüketimi ve çalışma hassasiyeti üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu nedenle, uygun aktüatör seçimi endüstriyel robot tasarımında kritik bir mühendislik problemidir.

Bu bölümde, endüstriyel robotlarda yaygın olarak kullanılan aktüatör teknolojileri kapsamlı bir literatür taraması doğrultusunda incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elektrik

¹ Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-0780-893X

motor tabanlı aktüatörler, redüktörlü ve redüktörsüz (direct-drive) sistemler ile hidrolik, pnömatik ve akıllı malzeme tabanlı alternatif aktüatörler; performans, enerji verimliliği, hassasiyet, bakım gereksinimleri ve endüstriyel uygulanabilirlik kriterleri açısından ele alınmıştır. Literatürde yer alan deneysel ve simülasyon temelli çalışmaların bulguları sentezlenerek, farklı endüstriyel uygulamalar için aktüatör seçimini kolaylaştıracak bütüncül bir değerlendirme çerçevesi sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, elektrik motor tabanlı aktüatörlerin genel endüstriyel uygulamalarda yüksek verimlilik ve kontrol kolaylığı sunduğunu, direct-drive sistemlerin ise yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda öne çıktığını göstermektedir. Hidrolik ve pnömatik aktüatörlerin yüksek kuvvet gerektiren özel uygulamalarda avantaj sağladığı, ancak enerji verimliliği ve bakım gereksinimleri açısından sınırlamalara sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bölüm, endüstriyel robot tasarımı ve optimizasyonu alanında çalışan araştırmacılar ve uygulayıcılar için aktüatör teknolojilerinin seçimine yönelik yol gösterici bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Enerji verimliliği, endüstriyel üretimde önemli bir ölçüt haline gelmiştir (Bilgin S., 2023). Sınırlı kaynaklardan elde edilen enerji kaynakları tükenme tehdidi altındadır (Bilgin S., 2025). Üretimin temel bileşenlerinin enerji tüketimi, imalat süreçlerinde son derece önemli bir unsurdur (Daş ve ark., 2025). Endüstriyel üretimin otomatikleşmesi, enerji tüketimini kritik bir konu haline getirmiştir (Şimşek ve ark., 2023). Endüstri 4.0'ın ortaya çıkmasıyla birlikte robot kullanımının artması, enerji tüketimini gelecekte ciddi inceleme ve özel çalışmalar gerektirecek bir araştırma alanı haline getirmiştir (Gültekin, N., 2024). Endüstriyel robotlar, imalat süreçlerinde verimlilik, hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlamaları nedeniyle modern endüstrinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir (Craig, 2005; Siciliano & Khatib, 2016). Otomotiv, elektronik, gıda, lojistik ve sağlık gibi sektörlerde robotların giderek

daha yaygın şekilde benimsenmesi, üretim sistemlerinde esneklik ve kaliteye yönelik artan taleplerle doğrudan ilişkilidir (Siciliano & Khatib, 2016). Ayrıca, artan enerji maliyetleri ve sürdürülebilirlik odaklı üretim hedefleri, endüstriyel robotların yalnızca performans odaklı bir bakış açısıyla değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve genel sistem optimizasyonu açısından da değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Mori ve ark., 2011; Carabin ve ark., 2017).

Şekil 1. Robotikte kullanılan çeşitli aktüatör tipleri



Kaynak: Anonim

Bir endüstriyel robotun genel performansı; mekanik yapı, kontrol algoritmaları, görev tipi ve çevresel koşullar dâhil olmak üzere çok sayıda parametreye bağlıdır (Carabin ve ark., 2017; Vergnano ve ark., 2017). Ancak bu parametreler arasında aktüatör sistemleri, robotun hareket kabiliyeti, dinamik davranışı ve enerji tüketimi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Brogårdh, 2007). Aktüatörler, kontrol biriminden alınan komutları fiziksel harekete dönüştürerek robot eklemlerinin konum, hız ve tork kontrolünü mümkün kılar. Bu nedenle aktüatör seçimi, robotun taşıma kapasitesi, hassasiyeti ve uzun vadeli işletme maliyetleri üzerinde doğrudan etkilidir (Craig, 2005).

Endüstriyel robotlar, sahip oldukları hassasiyet ve esneklik özellikleri sayesinde modern imalatın temel bileşenleri arasında yer almaktadır (Siciliano & Khatib, 2016; Craig, 2005). Aktüatör seçimi ise enerji verimliliği ve yaşam döngüsü maliyetleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Carabin ve ark., 2017; Pellicciari ve ark., 2020).

Günümüzde elektrik motoru tabanlı aktüatörler, endüstriyel robotlarda en yaygın kullanılan aktüatör türü olup, bu sistemler genellikle mekanik redüktörlerle birlikte çalışmaktadır (Pellicciari ve ark., 2020; Katalinic ve ark., 2019). Fırçasız doğru akım motorları, senkron motorlar ve adım motorları; kontrol edilebilirlik ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Asada & Slotine, 1986; Spong ve ark., 2020). Harmonik tahrik, sikloidal ve planet dişli sistemleri; kompakt yapıları ve yüksek tork iletim kapasiteleri nedeniyle endüstriyel robot eklemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Harmonic Drive AG, 2019). Ayrıca, yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda doğrudan tahrikli (direct-drive) aktüatörler öne çıkarken; yüksek kuvvet gereksinimi bulunan özel uygulamalarda hidrolik ve pnömatik aktüatörler kullanılabilmektedir (Pfeiffer ve ark., 2018).

Tablo 1. Aktüatör Teknolojilerinin Genel Karşılaştırması

Aktüatör Türü	Avantajlar	Dezavantajlar	Tipik Uygulamalar
Elektrik Motor Tabanlı	Yüksek kontrol hassasiyeti, temiz çalışma	Redüktör kaynaklı kayıplar	Endüstriyel robotlar
Direct-Drive	Yüksek hassasiyet, boşluksuz yapı	Yüksek maliyet, büyük motor boyutu	Hassas montaj
Hidrolik	Yüksek kuvvet kapasitesi	Bakım ihtiyacı, sızıntı, düşük verim	Ağır yük uygulamaları
Pnömatik	Basit yapı, düşük maliyet	Düşük konum hassasiyeti	Pick-and-place işlemleri

Kaynak: Craig, 2005; Siciliano & Khatib, 2016

Literatürde endüstriyel robot aktüatörlerine ilişkin çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, bu çalışmaların büyük bir bölümü belirli bir aktüatör türüne, kontrol yöntemine veya tekil bir uygulamaya odaklanmaktadır. Enerji verimliliği, performans, hassasiyet, bakım gereksinimleri ve endüstriyel uygulanabilirlik çerçevesinde aktüatör teknolojilerini bütüncül ve karşılaştırmalı olarak ele alan çalışmaların ise sınırlı olduğu görülmektedir (Carabin ve ark., 2017; Pellicciari ve ark., 2020). Bu durum, özellikle tasarım

aşamasında uygun aktüatör seçimini zorlaştırmakta ve sistem optimizasyonu açısından önemli bir boşluk oluşturmaktadır.

Bu bölümde, endüstriyel robotlarda kullanılan temel aktüatör teknolojileri kapsamlı bir literatür taramasına dayalı olarak incelenmiş ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir. Elektrik motoru tabanlı aktüatörler, redüktörlü ve redüktörsüz sistemler ile hidrolik, pnömatik ve alternatif aktüatör teknolojileri; performans, enerji verimliliği ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından analiz edilmiştir. Bölümün temel amacı, farklı endüstriyel uygulamalar için aktüatör seçimine rehberlik edecek sistematik bir değerlendirme sunmak ve gelecekteki robot tasarımlarına yönelik araştırma eğilimlerini ortaya koymaktır.

Endüstriyel Robotlarda Aktüatör Kavramı

Aktüatörler, kontrol biriminden gelen komutları mekanik harekete dönüştüren ve endüstriyel robot sistemlerinin temel bileşenlerini oluşturan elemanlardır (Spong ve ark., 2020). Bu bileşenler, elektriksel veya akışkan gücü kullanarak robot eklemlerinde konum, hız ve tork üretir ve robotun görev tanımına uygun şekilde hareket etmesini sağlar. Endüstriyel robotların taşıma kapasitesi, konumlama doğruluğu, tekrarlanabilirliği ve dinamik performansı büyük ölçüde aktüatör sistemlerinin özelliklerine bağlıdır (Craig, 2005; Siciliano & Khatib, 2016). Aktüatörler, elektriksel veya akışkan gücü mekanik harekete dönüştürerek robotun dinamiklerini ve kontrol edilebilirliğini şekillendirir (Spong ve ark., 2020). Entegre aktüatör-sürücü üniteleri ise sistem düzeyinde verimliliği artırmaktadır (Zhao ve ark., 2021).

Bir robotik sistemin genel performansı mekanik yapı, kontrol algoritmaları ve görev tipi gibi çok sayıda parametre tarafından belirlenmekle birlikte, bu parametrelerin fiziksel karşılığını aktüatörler oluşturmaktadır (Zhao ve ark., 2021; Guo ve ark., 2019). Özellikle endüstriyel uygulamalarda aktüatörlerin tork yoğunluğu,

bant genişliği ve kontrol edilebilirliği, robotun çevrim süresi ve enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Spong ve ark., 2020). Bu nedenle, robot tasarım sürecinde aktüatör seçimi yalnızca mekanik bir tercih olarak değil, sistem düzeyinde bir optimizasyon problemi olarak ele alınmaktadır.

Endüstriyel robotlarda aktüatörler genellikle motor, mekanik iletim elemanları ve geri besleme bileşenlerinden oluşan entegre yapılar şeklinde tasarlanmaktadır. Elektrik motorları temel hareket kaynağını oluştururken, redüksiyon sistemleri tork artırımı ve hız düşürme işlevini yerine getirmektedir. Enkoderler, resolverler ve kuvvet sensörleri gibi geri besleme elemanları ise kapalı çevrim kontrolün uygulanmasını mümkün kılmaktadır (Brogårdh, 2007). Bu bileşenler arasındaki uyum, robot eklemlerinde istenen hassasiyet ve kararlılığın sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Aktüatör sistemlerinin dinamik karakteristikleri, robot kontrol algoritmalarının uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir. Düşük ataletli ve yüksek bant genişliğine sahip aktüatörler, hassas konum ve kuvvet kontrolü gerektiren uygulamalarda avantaj sağlarken; yüksek ataletli ve büyük redüksiyon oranına sahip sistemler kontrol performansını sınırlayabilmektedir (Asada & Slotine, 1986). Bu bağlamda aktüatör kavramı, mekanik tasarım, kontrol stratejileri ve enerji yönetimi arasında köprü görevi gören bütüncül bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Günümüzde endüstriyel robot aktüatörlerinin değerlendirilmesi yalnızca maksimum tork veya hız gibi performans ölçütleri ile sınırlı değildir; enerji verimliliği, bakım gereksinimleri ve yaşam döngüsü maliyetleri de ön plana çıkmaktadır. Sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda aktüatörlerin enerji tüketimi ve sistem genel verimliliğine olan etkileri önemli araştırma konuları haline gelmiştir (Mori ve ark., 2011; Carabin ve ark., 2017). Bu durum, aktüatör teknolojilerinin karşılaştırmalı olarak

incelenmesini ve uygulama odaklı değerlendirme kriterlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Sonuç olarak aktüatörler, endüstriyel robotların hareket kabiliyetini tanımlayan temel bileşenler olmanın ötesinde; sistem performansı, enerji verimliliği ve endüstriyel rekabet gücünün belirleyici unsurlarıdır. Bu nedenle aktüatör kavramının sistematik ve literatür temelli bir yaklaşımla ele alınması, hem akademik çalışmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır.

Elektrik Motoru Tabanlı Aktüatörler

Elektrik motoru tabanlı aktüatörler, endüstriyel robotlarda en yaygın kullanılan aktüatör grubunu oluşturmaktadır. Yüksek kontrol hassasiyeti, geniş hız–tork çalışma aralığı ve temiz çalışma ortamı gibi avantajları sayesinde bu sistemler modern üretim hatlarında tercih edilmektedir (Craig, 2005; Siciliano & Khatib, 2016). Elektrik motorlarının güç elektroniği ve gelişmiş kontrol algoritmalarıyla uyumluluğu, robot eklemlerinde konum, hız ve torkun kapalı çevrim olarak etkin biçimde kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır (Spong ve ark., 2020). Yüksek verimlilikleri ve hassas kontrol kabiliyetleri nedeniyle elektrik motoru tabanlı aktüatörler endüstriyel robotik uygulamalara hâkimdir (Craig, 2005; Siciliano ve ark., 2010).

Elektrik motoru tabanlı aktüatörler genellikle elektrik motoru, mekanik iletim elemanları (redüktörler) ve geri besleme sensörlerinden oluşan entegre yapılar şeklinde tasarlanmaktadır (Krishnan, 2010; Boldea & Nasar, 2010). Bu yapı, endüstriyel robotların farklı görev gereksinimlerine uyarlanmasına olanak sağlamakta ve hız, tork ile hassasiyet parametrelerinin optimize edilmesini mümkün kılmaktadır (Brogårdh, 2007).

Doğru Akım (DC) Motorları

Fırçalı doğru akım motorları, basit kontrol yapıları ve düşük maliyetleri nedeniyle robotik uygulamaların erken dönemlerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Gerilim–hız ve akım–tork arasındaki doğrusal ilişki, bu motorların kontrolünü kolaylaştırmaktadır (Asada & Slotine, 1986). Ancak fırça aşınması, yüksek bakım gereksinimi ve sınırlı hizmet ömrü gibi dezavantajlar, endüstriyel robotlardaki kullanımını önemli ölçüde azaltmıştır (Craig, 2005).

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) Motorları

Fırçasız doğru akım motorları, fırçalı DC motorların dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir. Yüksek verim, uzun hizmet ömrü ve düşük bakım gereksinimi, BLDC motorları endüstriyel robot aktüatörlerinde yaygın bir tercih haline getirmiştir (Spong ve ark., 2020). Elektronik komütasyon sayesinde yüksek hassasiyetli hız ve tork kontrolü sağlanabilmekte, bu da robotların dinamik performansını artırmaktadır (Brogårdh, 2007).

Senkron Motorlar (PMSM)

Sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM), yüksek tork yoğunluğu ve enerji verimliliği nedeniyle endüstriyel robotlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. PMSM’ler özellikle yüksek performans gerektiren çok eksenli robot kollarında tercih edilmekte ve doğrudan tahrik uygulamaları için de uygun bir çözüm sunmaktadır (Siciliano & Khatib, 2016). Literatürde yer alan çok sayıda çalışma, PMSM tabanlı aktüatörlerin enerji tüketimi ve hassasiyet açısından avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır (Carabin ve ark., 2017).

Adım Motorları

Adım motorları, düşük maliyetleri ve açık çevrim kontrol imkânı sunmaları nedeniyle bazı endüstriyel robotik uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrık adım açılarıyla hareket üretme kabiliyeti, konum kontrolünü basitleştirmektedir. Ancak rezonans problemleri,

sınırlı hız kapasitesi ve düşük enerji verimliliği gibi faktörler, bu motorların yüksek performanslı endüstriyel robotlardaki kullanımını kısıtlamaktadır (Spong ve ark., 2020).

Performans ve Enerji Verimliliği

Elektrik motoru tabanlı aktüatörlerin endüstriyel robotlardaki başarısı büyük ölçüde enerji verimliliği ve kontrol kabiliyetleriyle ilişkilidir. Yüksek verimli motorların uygun redüktör seçimiyle birlikte kullanılması, robotun toplam enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Mori ve ark., 2011). Literatürde bildirilen çalışmalar, motor, redüktör ve kontrol algoritmaları arasındaki uyumun robot çevrim süresi ve enerji tüketimini belirlemede kritik bir rol oynadığını göstermektedir (Carabin ve ark., 2017; Pellicciari ve ark., 2020).

Endüstriyel Uygulamalar ve Eğilimler

Elektrik motoru tabanlı aktüatörler; montaj, kaynak, paketleme ve al-yerleştir (pick-and-place) işlemleri dâhil olmak üzere çok geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Son yıllarda enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yüksek verimli motorlar ve gelişmiş kontrol stratejileri ön plana çıkmıştır. Ayrıca, entegre sensör ve sürücü birimlerine sahip akıllı elektrikli aktüatörler, endüstriyel robot tasarımında giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Pellicciari ve ark., 2020).

Redüktörler ve Mekanik İletim Sistemleri

Endüstriyel robotlarda aktüatör performansını belirleyen temel faktörlerden biri, motor ile robot eklemi arasında yer alan redüktör ve mekanik iletim sistemleridir (Tuttle & Seering, 1997; Wang & Ghorbel, 2001). Elektrik motorları genellikle yüksek hız–düşük tork karakteristiğine sahip olduğundan, robot eklemlerinde gerekli olan yüksek tork ve hassas konumlama için mekanik iletim elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Craig, 2005; Siciliano &

Khatib, 2016). Redüktörler, motor çıkış hızını düşürürken torku artırarak motorun daha verimli bir çalışma aralığında çalışmasını sağlamaktadır (Li ve ark., 2015). Harmonik, sikloidal ve planet redüktörler; farklı verimlilik ve boşluk (backlash) karakteristikleriyle tork artırımı sunmaktadır (Tuttle & Seering, 1997; Wang & Ghorbel, 2001).

Şekil 2. Robotik uygulamalarda kullanılan farklı redüktör türleri



Kaynak: Anonim

Mekanik iletim sistemlerinin seçimi; bir robotun taşıma kapasitesi, hassasiyeti, dinamik davranışı ve enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Chaudhuri & Albu-Schäffer, 2014). Endüstriyel robotik uygulamalarda kompaktlık, yüksek tork yoğunluğu, düşük boşluk (backlash) ve yüksek verim gibi kriterler özellikle kritik öneme sahiptir (Brogårdh, 2007). Bu nedenle redüktör teknolojileri, endüstriyel robot tasarımında stratejik bileşenler olarak değerlendirilmektedir.

Harmonik Tahrik Sistemleri

Harmonik redüktörler, esnek dişli prensibine dayalı yapıları sayesinde yüksek redüksiyon oranı, kompakt tasarım ve düşük boşluk özellikleri sunmaktadır. Bu karakteristikleri nedeniyle harmonik tahrik sistemleri, özellikle çok eksenli endüstriyel robotlarda ve eklem tahrik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Harmonic Drive AG, 2019). Düşük boşluk davranışı, robotik sistemlerde konumlama doğruluğunu ve tekrarlanabilirliği önemli ölçüde artırmaktadır.

Bununla birlikte, elastik deformasyonlar nedeniyle harmonik tahrik sistemlerinde verim kayıpları ve ısınma problemleri ortaya çıkabilmektedir. Literatürde rapor edilen bulgular, yüksek dinamik yükler altında harmonik redüktörlerin enerji verimliliğinin azaldığını göstermektedir (Carabin ve ark., 2017). Bu sınırlılık, özellikle yüksek hız ve sürekli çalışma gerektiren uygulamalarda dikkatle değerlendirilmelidir.

Sikloidal Redüktörler

Sikloidal redüktörler, çoklu diş temasına dayalı yapıları sayesinde yüksek tork kapasitesi, darbe dayanımı ve uzun hizmet ömrü sunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle özellikle ağır yük taşıma gereksinimi bulunan endüstriyel robot eklemlerinde tercih edilmektedir (Spong ve ark., 2020). Sikloidal sistemlerin bir diğer avantajı, yükün birden fazla diş üzerinden paylaşılması sonucunda elde edilen yüksek mekanik dayanıklılıktır.

Ancak sikloidal redüktörlerin yapısal karmaşıklığı ve nispeten büyük boyutları, kompakt tasarım gerektiren uygulamalarda kısıtlayıcı olabilmektedir. Ayrıca, imalat toleranslarına bağlı olarak titreşim ve gürültü seviyelerinde artış görülebilmektedir (Brogårdh, 2007).

Planet Dişli Sistemleri

Planet dişli redüktörler, basit ve modüler tasarımları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler yüksek verim, etkili yük paylaşımı ve görece düşük maliyet avantajı sunmaktadır (Craig, 2005). Planet dişli redüktörler genellikle orta seviyede tork ve hassasiyet gerektiren robotik uygulamalarda tercih edilmektedir.

Bununla birlikte, geleneksel planet dişli sistemlerinde boşluk (backlash) bulunması, yüksek konumlama hassasiyeti gerektiren uygulamalarda dezavantaj oluşturabilmektedir. Bu nedenle

endüstriyel robotlarda sıklıkla düşük boşluklu veya ön yüklemeli planet dişli tasarımları kullanılmaktadır (Siciliano & Khatib, 2016).

Mekanik İletim Sistemlerinin Enerji Verimliliği ve Dinamik Davranış Üzerindeki Etkileri

Redüktörler ve mekanik iletim sistemleri, bir robotun toplam enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mekanik kayıplar, sürtünme ve elastik deformasyonlar, aktüatör sisteminin genel verimliliğini düşürebilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, uygun redüktör seçiminin endüstriyel robotların enerji tüketimini önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir (Mori ve ark., 2011; Pellicciari ve ark., 2020).

Buna ek olarak, redüktörlerin atalet ve esneklik özellikleri, robotun dinamik tepkisini ve kontrol performansını doğrudan etkilemektedir. Yüksek ataletli ve esnek iletim sistemleri, kontrol algoritmalarının karmaşıklığını artırmakta ve sistem kararlılığını sınırlayabilmektedir (Asada & Slotine, 1986). Bu nedenle redüktör tasarımı ve seçimi, mekanik, enerji ve kontrol odaklı hususlar birlikte değerlendirilerek gerçekleştirilmelidir.

Endüstriyel Değerlendirme ve Tasarım Eğilimleri

Günümüz endüstriyel robot tasarımlarında redüktör ve mekanik iletim sistemlerinin seçimi yalnızca maksimum tork kapasitesine dayalı olarak yapılmamaktadır; enerji verimliliği, bakım gereksinimleri ve yaşam döngüsü maliyeti gibi kriterler de ön plana çıkmaktadır. Enerji verimli üretim hedefleri doğrultusunda, düşük kayıplı ve yüksek verimli redüktör sistemlerine verilen önem giderek artmaktadır (Carabin ve ark., 2017).

Son yıllarda, motor-redüktör entegrasyonu artırılmış kompakt aktüatör modülleri ile boşluğu minimize edilmiş yeni nesil mekanik iletim sistemleri endüstriyel robotlarda yaygınlaşmaktadır. Bu eğilim, robotların hem performans hem de enerji verimliliği

açısından optimize edilmesine katkı sağlamaktadır (Pellicciari ve ark., 2020).

Tablo 2. Redüktör Türlerinin Karşılaştırılması

Redüktör Türü	Tork Yoğunluğu	Boşluk (Backlash)	Verim
Harmonic Drive	Yüksek	Çok düşük	Orta
Sikloidal	Çok yüksek	Düşük	Orta
Planet Dişli	Orta	Orta	Yüksek

Kaynak: (Tuttle & Seering, 1997; Wang & Ghorbel, 2001).

Doğrudan Tahrikli (Direct-Drive) Aktüatörler

Doğrudan tahrikli aktüatörler, elektrik motorunun herhangi bir mekanik redüksiyon elemanı kullanılmadan doğrudan robot eklemine bağlandığı aktüatör sistemleridir (Hollerbach, 1980; Albu-Schäffer ve ark., 2007). Bu yaklaşımda motor torku doğrudan ekleme iletilmekte, böylece dişli sistemlerine özgü boşluk (backlash), elastik deformasyonlar ve mekanik kayıplar büyük ölçüde ortadan kaldırılmaktadır (Asada & Slotine, 1986; Siciliano & Khatib, 2016). Doğrudan tahrikli aktüatörler, özellikle yüksek hassasiyet ve üstün dinamik performans gerektiren robotik uygulamalarda öne çıkmaktadır. Bu aktüatörler, iletim kayıplarını ortadan kaldırarak gelişmiş empedans kontrol stratejilerinin uygulanmasını desteklemektedir (Hollerbach, 1980; Albu-Schäffer ve ark., 2007).

Doğrudan tahrik sistemlerinin temel tasarım felsefesi, yüksek tork yoğunluğuna sahip motorların düşük hızlarda doğrudan çalışmasına dayanmaktadır (Ott ve ark., 2004; Hogan, 1985). Bu amaçla, genellikle yüksek kutup sayısına sahip sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) kullanılmaktadır. Redüktörlerin bulunmaması, sistem ataletini azaltmakta, robotun ivmelenme ve yavaşlama karakteristiklerini iyileştirmekte ve kontrol bant genişliğini artırmaktadır (Spong ve ark., 2020).

Performans ve Hassasiyet Açısından Değerlendirme

Doğrudan tahrikli aktüatörlerin en önemli avantajlarından biri, yüksek konumlama doğruluğu ve tekrarlanabilirlik sağlamalarıdır. Mekanik boşluğun ortadan kaldırılması, özellikle mikrometre seviyesinde konumlama hassasiyeti gerektiren uygulamalarda önemli bir üstünlük sunmaktadır (Craig, 2005). Ayrıca, düşük sürtünme ve düşük esneklik özellikleri; kuvvet kontrolü ve empedans kontrolü gibi gelişmiş kontrol stratejilerinin daha etkin şekilde uygulanmasına olanak tanımaktadır (Asada & Slotine, 1986).

Bununla birlikte, dişlisiz yapı nedeniyle gerekli torkun doğrudan motor tarafından üretilmesi gerekmektedir. Bu durum, motor çapı ve ağırlığında artışa yol açabilmekte ve özellikle yüksek tork gerektiren ağır yük uygulamalarında tasarım açısından sınırlamalar oluşturmaktadır (Siciliano & Khatib, 2016).

Enerji Verimliliği ve Dinamik Davranış

Enerji verimliliği açısından değerlendirildiğinde, doğrudan tahrikli aktüatörler mekanik kayıpların minimize edilmesi nedeniyle teorik olarak yüksek verim sunmaktadır. Redüktörlü sistemlerde görülen dişli sürtünmesi ve elastik kayıplar, doğrudan tahrik konfigürasyonlarında bulunmamaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, özellikle düşük ve orta hızlarda çalışan robot eksenleri için doğrudan tahrikli aktüatörlerin enerji tüketimi açısından avantaj sağlayabildiğini göstermektedir (Carabin ve ark., 2017).

Dinamik davranış açısından ise düşük atalet ve yüksek bant genişliği, robotun ani hız değişimlerine daha hızlı yanıt vermesini mümkün kılmaktadır. Bu özellik, doğrudan tahrik sistemlerini hassas montaj, ölçüm işlemleri ve insan-robot etkileşimi içeren uygulamalar için özellikle cazip hale getirmektedir (Brogårdh, 2007).

Kontrol Stratejileri ile Etkileşim

Doğrudan tahrikli aktüatörler, gelişmiş kontrol algoritmalarının uygulanması için elverişli bir altyapı sunmaktadır. Redüktörlü sistemlerde karşılaşılan boşluk ve esneklik problemleri doğrudan tahrik konfigürasyonlarında bulunmadığından, model tabanlı kontrol, kuvvet kontrolü ve empedans kontrolü gibi yöntemler daha kararlı ve öngörülebilir sonuçlar vermektedir (Spong ve ark., 2020). Bu durum, özellikle hassas fiziksel etkileşim gerektiren robotik görevlerde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Endüstriyel Uygulamalar ve Sınırlamalar

Doğrudan tahrikli aktüatörler yüksek performans ve hassasiyet sunmalarına rağmen, endüstriyel robotlarda kullanımları belirli uygulamalarla sınırlıdır. Yüksek maliyet, artan motor boyutu ve soğutma gereksinimleri, bu sistemlerin genel endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşmasını zorlaştırmaktadır (Craig, 2005). Bu nedenle doğrudan tahrikli aktüatörler genellikle yüksek hassasiyet gerektiren özel robotik sistemlerde veya araştırma odaklı uygulamalarda tercih edilmektedir.

Son yıllarda motor teknolojilerindeki gelişmeler ve manyetik malzemelerdeki iyileştirmeler, daha kompakt ve yüksek torklu doğrudan tahrikli aktüatörlerin geliştirilmesine yönelik araştırmaları artırmıştır. Bu gelişmelerin, gelecekte endüstriyel robotikte doğrudan tahrik sistemlerinin kullanım alanını genişletmesi beklenmektedir (Pellicciari ve ark., 2020).

Alternatif Aktüatör Teknolojileri

Elektrik motoru tabanlı aktüatörler endüstriyel robotlarda yaygın olarak kullanılmakla birlikte, belirli uygulama gereksinimleri için alternatif aktüatör teknolojileri tercih edilmektedir (Merritt, 1967; Rastegar & Pereira, 2003). Bu teknolojiler; yüksek kuvvet gereksinimi, zorlu çevresel koşullar, güvenlik gereksinimleri veya özel hareket karakteristiklerinin söz konusu olduğu durumlarda özellikle önem kazanmaktadır (Bar-Cohen, 2001; Ivshin &

Melnikov, 2018). Hidrolik, pnömatik ve akıllı malzeme tabanlı aktüatörler, elektrik motorlarının sınırlı kaldığı robotik sistemlerde belirgin avantajlar sunabilmektedir (Siciliano & Khatib, 2016). Hidrolik ve pnömatik aktüatörler yüksek kuvvet gerektiren görevler için uygunken, akıllı malzemeler küçük ölçekli ve yüksek hassasiyetli hareketler için öne çıkmaktadır (Merritt, 1967; Bar-Cohen, 2001).

Hidrolik Aktüatörler

Hidrolik aktüatörler, sıkıştırılmaz akışkanlar kullanarak yüksek kuvvet ve tork üretebilme kabiliyetleri sayesinde ağır yük taşıma gerektiren robotik uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek güç yoğunluğu, hidrolik sistemlerin en önemli avantajlarından biri olup; dökümhaneler, inşaat sektörü ve savunma sanayii gibi zorlu endüstriyel ortamlarda bu sistemleri özellikle uygun hale getirmektedir (Craig, 2005).

Bununla birlikte, hidrolik aktüatörler enerji verimliliği, sızıntı riski ve bakım gereksinimleri açısından önemli dezavantajlara sahiptir. Akışkan sürtünmesi ve ısı kayıpları sistem verimliliğini düşürmekte, hidrolik sistemlerin yapısal karmaşıklığı ise temiz ve yüksek hassasiyet gerektiren üretim hatlarında kullanımını sınırlamaktadır (Brogårdh, 2007). Literatürde, yüksek kuvvet üretme yeteneklerine rağmen hidrolik aktüatörlerin enerji verimliliği açısından genellikle elektrik motoru tabanlı sistemlerin gerisinde kaldığı sıklıkla vurgulanmaktadır (Carabin ve ark., 2017).

Pnömatik Aktüatörler

Pnömatik aktüatörler, sıkıştırılmış hava kullanarak hareket üreten ve basit yapıları ile düşük maliyetleriyle öne çıkan sistemlerdir. Hızlı tepki süreleri ve doğası gereği güvenli çalışma özellikleri, pnömatik aktüatörleri al-yerleştir (pick-and-place) işlemleri, kavrama uygulamaları ve basit doğrusal hareket gerektiren görevler için cazip hale getirmektedir (Spong ve ark., 2020).

Ancak havanın sıkıştırılabilir olması, pnömatik aktüatörlerde hassas konum ve kuvvet kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu durum, yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik gerektiren endüstriyel robotik uygulamalarda kullanımını ciddi ölçüde sınırlandırmaktadır. Ayrıca, sıkıştırılmış havanın üretilmesi ve dağıtımı sırasında ortaya çıkan enerji kayıpları, pnömatik sistemlerin genel enerji verimliliğini olumsuz etkilemektedir (Mori ve ark., 2011).

Akıllı Malzeme Tabanlı Aktüatörler

Son yıllarda akıllı malzeme tabanlı aktüatörler, robotik sistemlerde giderek daha fazla araştırılan bir konu haline gelmiştir. Piezoelektrik aktüatörler ve şekil hafızalı alaşımlar (SMA), bu kategoriye ait başlıca örneklerdir. Bu aktüatörler; yüksek hassasiyet, kompakt tasarım gibi avantajlar sunmakta ve özellikle mikro-robotik ve yüksek hassasiyetli konumlama uygulamalarında önemli bir potansiyel sergilemektedir (Siciliano & Khatib, 2016).

Bununla birlikte, sınırlı strok uzunluğu, düşük enerji verimliliği ve karmaşık kontrol gereksinimleri gibi kısıtlar, akıllı malzeme tabanlı aktüatörlerin endüstriyel ölçekte yaygınlaşmasını engellemektedir. Literatür, bu aktüatörlerin ağırlıklı olarak araştırma ve özel uygulama düzeyinde ele alındığını ve henüz endüstriyel robot uygulamaları için uygun teknolojiler olarak değerlendirilmediğini göstermektedir (Spong ve ark., 2020).

Endüstriyel Değerlendirme ve Karşılaştırmalı Bakış

Alternatif aktüatör teknolojileri, endüstriyel robot tasarımında belirli niş uygulamalar için önemli avantajlar sunmaktadır. Hidrolik aktüatörler yüksek kuvvet gerektiren görevlerde, pnömatik aktüatörler hızlı ve basit hareket gereksinimlerinde, akıllı malzeme tabanlı aktüatörler ise mikro ölçekte yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda öne çıkmaktadır. Ancak enerji verimliliği, bakım gereksinimleri ve kontrol doğruluğu gibi kriterler dikkate alındığında, bu teknolojilerin

kısa vadede genel endüstriyel robot uygulamalarında elektrik motoru tabanlı aktüatörlerin yerini almasının olası olmadığı değerlendirilmektedir (Carabin ve ark., 2017; Pellicciari ve ark., 2020).

Bu bağlamda alternatif aktüatör teknolojileri, endüstriyel robotlarda tamamlayıcı veya uygulamaya özgü çözümler olarak ele alınmalı ve uygulama gereksinimlerine dayalı bütüncül bir sistem değerlendirme çerçevesinde seçilmelidir.

Tablo 3. Aktüatör Seçim Kriterleri

Kriter	Etkisi
Enerji Verimliliği	İşletme maliyetlerini belirler
Kontrol Hassasiyeti	Ürün kalitesini etkiler
Bakım Gereksinimi	Sistem duruş süreleri
Maliyet	İlk yatırım bütçesi

Kaynak: (Brogårdh, 2007; Carabin et al., 2017)

Karşılaştırmalı Değerlendirme

Endüstriyel robotlarda kullanılan aktüatör teknolojileri; performans, enerji verimliliği, kontrol doğruluğu, bakım gereksinimleri ve endüstriyel uygulanabilirlik gibi çok boyutlu bir çerçevede değerlendirilmelidir. Önceki bölümlerde ele alınan elektrik motoru tabanlı, redüktörlü, doğrudan tahrikli ve alternatif aktüatör teknolojileri, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak farklı avantajlar ve sınırlılıklar sunmaktadır. Bu bölümde, söz konusu aktüatör teknolojileri literatürde rapor edilen bulgular ışığında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Performans ve Dinamik Davranış

Performans açısından değerlendirildiğinde, elektrik motoru tabanlı ve redüktörlü aktüatör sistemleri; geniş hız–tork çalışma aralıkları ve yüksek taşıma kapasiteleri nedeniyle endüstriyel robotlarda en yaygın kullanılan çözümler olarak öne çıkmaktadır (Craig, 2005; Siciliano & Khatib, 2016). Harmonik tahrik ve

sikloidal redüktörler, yüksek tork yoğunlukları ve kompakt tasarım avantajları sayesinde çok eksenli robot eklemlerinde üstün performans sunmaktadır.

Buna karşılık, doğrudan tahrikli aktüatörler düşük atalet ve yüksek bant genişliği özellikleri sayesinde üstün dinamik tepki ve hassasiyet sağlamaktadır. Literatürde, doğrudan tahrik sistemlerinin özellikle ani hız değişimleri ve hassas temas gerektiren görevlerde daha kararlı bir davranış sergilediği bildirilmektedir (Asada & Slotine, 1986; Spong ve ark., 2020). Ancak yüksek tork gerektiren uygulamalarda motor boyutunun büyümesi, performans açısından sınırlayıcı bir faktör olabilmektedir.

Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği, endüstriyel robot aktüatörlerinin değerlendirilmesinde giderek daha önemli bir kriter haline gelmiştir. Redüktörlü elektrikli aktüatörler, motorların verimli çalışma bölgelerinde çalışmasına olanak sağlasa da dişli sürtünmesi ve elastik kayıplar genel enerji verimliliğini sınırlayabilmektedir (Mori ve ark., 2011). Buna karşılık, doğrudan tahrikli aktüatörler mekanik kayıpların minimize edilmesi sayesinde belirli görev profillerinde daha düşük enerji tüketimi sağlayabilmektedir (Carabin ve ark., 2017).

Yüksek kuvvet üretme kabiliyetlerine rağmen, hidrolik ve pnömatik aktüatörler; akışkan kayıpları ve enerji dönüşümündeki verimsizlikler nedeniyle genel enerji verimliliği açısından dezavantajlıdır. Bu durum, söz konusu teknolojilerin enerji hassasiyetinin yüksek olduğu üretim ortamlarında kullanımını sınırlandırmaktadır (Pellicciari ve ark., 2020).

Kontrol Doğruluğu ve Uygulanabilirlik

Kontrol doğruluğu açısından, doğrudan tahrikli aktüatörler ile yüksek çözünürlüklü geri besleme sensörleriyle donatılmış

elektrik motoru tabanlı sistemler belirgin avantajlar sunmaktadır. Redüktörlü sistemlerde ise boşluk (backlash) ve mekanik esneklik, kontrol algoritmalarının karmaşıklığını artırmakta ve yüksek hassasiyetli konumlama performansını sınırlayabilmektedir (Brogårdh, 2007).

Pnömatik ve hidrolik aktüatörler ise akışkan dinamiğine bağlı belirsizlikler nedeniyle hassas kontrol gerektiren uygulamalarda sınırlı performans sunmaktadır. Bu nedenle bu sistemler, daha çok basit hareket veya kuvvet odaklı görevlerde tercih edilmektedir (Spong ve ark., 2020).

Bakım, Güvenilirlik ve Yaşam Döngüsü Maliyeti

Bakım gereksinimleri ve yaşam döngüsü maliyeti, endüstriyel uygulanabilirlik açısından kritik değerlendirme kriterleridir. Elektrik motoru tabanlı aktüatörler, düşük bakım gereksinimleri ve yüksek güvenilirlikleri nedeniyle endüstriyel robotlarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Craig, 2005). Harmonik tahrik gibi özel redüktör sistemleri yüksek hassasiyet sunmakla birlikte, maliyet ve bakım gereksinimleri açısından dikkatli biçimde değerlendirilmelidir.

Hidrolik sistemler, sızıntı riski ve yüksek bakım maliyetleri nedeniyle uzun süreli işletme açısından dezavantajlıdır. Pnömatik sistemler ise düşük maliyetlerine rağmen sınırlı performans kabiliyetleri nedeniyle genellikle yardımcı veya tamamlayıcı çözümler olarak kullanılmaktadır (Brogårdh, 2007).

Uygulama Odaklı Genel Karşılaştırma

Literatürde rapor edilen ortak bulgular, elektrik motoru tabanlı ve redüktörlü aktüatörlerin genel endüstriyel robot uygulamaları için en dengeli çözümü sunduğunu göstermektedir. Doğrudan tahrikli aktüatörler, yüksek hassasiyet ve dinamik performans gerektiren özel uygulamalarda belirgin avantajlar

sağlarken; hidrolik ve pnömatik aktüatörler belirli niş uygulamalarda tamamlayıcı roller üstlenmektedir (Carabin ve ark., 2017; Pellicciari ve ark., 2020).

Bu karşılaştırmalı değerlendirme, aktüatör seçiminin tek bir performans ölçütüne dayandırılmayacağını; bunun yerine uygulama gereksinimleri, enerji hedefleri ve kontrol stratejilerini dikkate alan bütüncül bir yaklaşımın gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

Tartışma

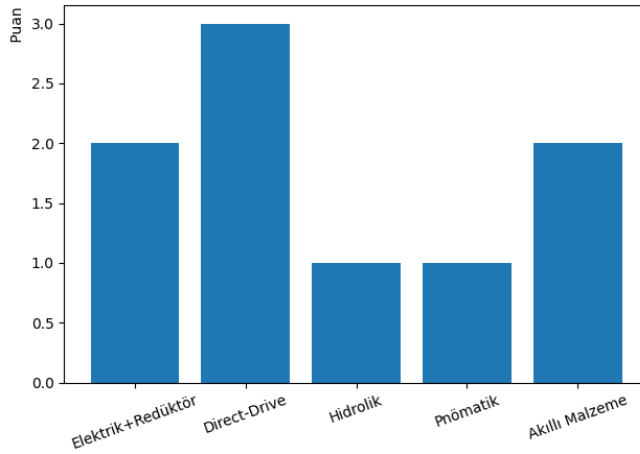
Özellikle endüstriyel kullanımda enerji üretim maliyetlerinin artması, üreticileri önleyici tedbirler almaya yöneltmektedir (Bilgin S. & Nishimura, 2003). Sınırlı kaynaklar, enerjinin değerini daha da artırmaktadır (Şimşek ve ark., 2023). Sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında, enerji tüketimi son yıllarda önemli bir üretim parametresi haline gelmiştir (Gültekin, N. & Ciniviz, 2024). Özellikle endüstriyel imalatda enerji tüketiminin ciddiyeyle ele alınması ve dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir (Gültekin, 2024; Gültekin & Ciniviz, 2024). Robotik sistemlerde içsel faktörlere bağlı enerji tüketimi ise ağırlıklı olarak aktüatör, sürücü ve redüktör bileşenleri ile ilişkilidir.

Bu bölümde sunulan aktüatör teknolojilerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi, endüstriyel robot tasarımında tek bir “en iyi” çözümden ziyade uygulama odaklı ve çok kriterli bir seçim yaklaşımının gerekli olduğunu göstermektedir. Literatürde bildirilen bulgular, aktüatör performansının yalnızca tork veya hız gibi tekil ölçütler üzerinden değil; enerji verimliliği, kontrol doğruluğu, bakım gereksinimleri ve sistem entegrasyonu gibi çok boyutlu faktörler dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Siciliano & Khatib, 2016; Carabin ve ark., 2017). Son dönem karşılaştırmalı çalışmalarda, uygulama temelli aktüatör seçiminin

önemi özellikle öne çıkarılmaktadır (Carabin ve ark., 2017; Villani ve ark., 2018).

Elektrik motoru tabanlı ve redüktörlü aktüatörlerin endüstriyel robotlarda yaygın olarak kullanılmasının temel nedeni, performans–maliyet–güvenilirlik dengesi sunmalarıdır. Harmonik tahrik ve sikloidal redüktörler, yüksek tork yoğunluğu ve kompakt tasarım avantajları sayesinde çok eksenli robotlarda yüksek hassasiyet sağlamaktadır (Guo ve ark., 2019; Zhao ve ark., 2021). Bununla birlikte, bu sistemlerdeki mekanik kayıplar ve esneklik, özellikle yüksek dinamik gereksinimler altında enerji verimliliğini ve kontrol performansını sınırlayabilmektedir (Brogårdh, 2007; Mori ve ark., 2011).

Şekil 3. Endüstriyel robotlarda kullanılan aktüatör teknolojilerinin enerji verimliliğinin göreceli karşılaştırması.



Kaynak: (Carabin et al., 2017; Vergnano et al., 2017; Pellicciari et al., 2020)

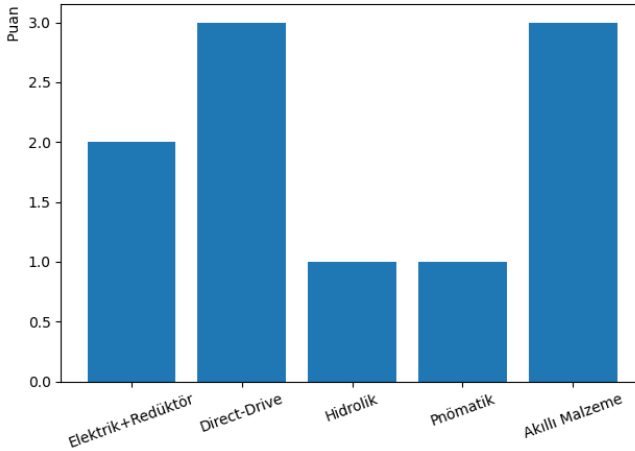
Şekil 3.'e göre direct-drive sistemlerin enerji verimliliği açısından öne çıktığı, hidrolik ve pnömatik aktüatörlerin göreceli olarak düşük performans sergilediği net biçimde görülmektedir.

Buna karşılık, doğrudan tahrikli aktüatörler literatürde sıklıkla üstün dinamik performans ve kontrol doğruluğu ile

ilişkilendirilmektedir. Dişlisiz tasarımlar sayesinde boşluk ve sürtünme etkilerinin ortadan kaldırılması, kuvvet ve empedans kontrolü gibi gelişmiş kontrol stratejilerinin daha kararlı biçimde uygulanmasına olanak tanımaktadır (Asada & Slotine, 1986; Spong ve ark., 2020). Ancak yüksek tork gerektiren uygulamalarda motor boyutu ve maliyetinin artması, doğrudan tahrik sistemlerinin endüstriyel ortamlarda yaygınlaşmasını sınırlayan temel faktörler arasında yer almaktadır.

Alternatif aktüatör teknolojileri incelendiğinde, hidrolik ve pnömatik sistemlerin belirli uygulama alanlarında hâlen önemli avantajlar sunduğu görülmektedir. Hidrolik aktüatörler yüksek kuvvet gerektiren görevlerde öne çıkarken, pnömatik aktüatörler basit ve hızlı hareket gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak enerji verimliliği, bakım ihtiyacı ve hassas kontrol eksikliği, bu teknolojilerin modern endüstriyel robotlarda sınırlı kullanımına neden olmaktadır (Craig, 2005; Pellicciari et al., 2020).

Şekil 4. Endüstriyel robotik sistemlerde farklı aktüatör teknolojilerinin kontrol hassasiyetinin göreceli karşılaştırması.

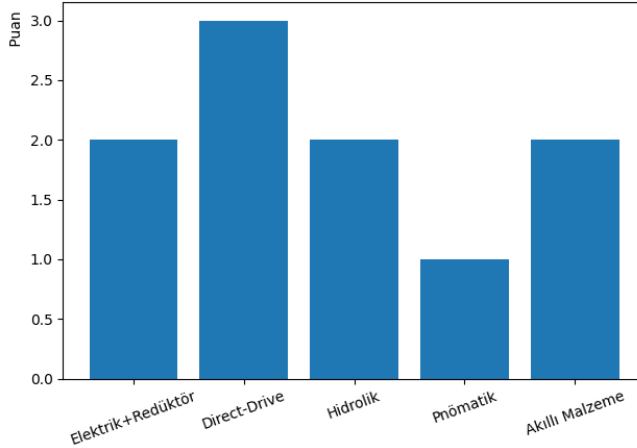


Kaynak: (Craig, 2005; Siciliano & Khatib, 2016; Albu-Schäffer et al., 2007)

Şekil 4.'e göre direct-drive ve akıllı malzeme tabanlı aktüatörlerin yüksek hassasiyet sunduğu ve hidrolik ve pnömatik sistemlerin hassas kontrol açısından sınırlı kaldığı grafiksel olarak vurgulanmaktadır.

Bu bölümün bulguları, enerji verimliliği odaklı üretim hedeflerinin aktüatör seçimi üzerindeki etkisini de açıkça ortaya koymaktadır. Literatürde, motor-redüktör-kontrol algoritması uyumunun sağlanmasının, robotların toplam enerji tüketimini anlamlı ölçüde azaltabildiği vurgulanmaktadır (Carabin et al., 2017). Bu durum, aktüatör teknolojilerinin yalnızca mekanik bileşenler olarak değil, **enerji yönetim stratejilerinin ayrılmaz bir parçası** olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Şekil 5. Endüstriyel robotlarda kullanılan aktüatör teknolojilerinin dinamik performansının görelî karşılaştırması.



Kaynak: (Hollerbach, 1980; Hogan, 1985; Spong et al., 2020)

Şekil 5.'e göre direct-drive aktüatörlerin üstün dinamik yanıt sunduğu, pnömatik sistemlerin dinamik performans açısından geride kaldığı açıkça görülmektedir.

Son olarak, endüstriyel robotlarda aktüatör seçiminin gelecekte daha fazla **entegre, modüler ve akıllı sistemler** yönünde

evrilmesi beklenmektedir. Sensör, sürücü ve kontrol birimlerinin tek bir aktüatör modülünde bütünleştirildiği çözümler, hem performans hem de enerji verimliliği açısından önemli potansiyel sunmaktadır (Siciliano & Khatib, 2016). Bu bağlamda, aktüatör teknolojilerinin gelişimi, endüstriyel robotların esnekliği ve sürdürülebilirliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaya devam edecektir.

Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu bölüm kapsamında, endüstriyel robotlarda kullanılan temel aktüatör teknolojileri kapsamlı bir literatür taramasına dayalı olarak incelenmiş ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir. Elektrik motoru tabanlı aktüatörler, redüktörlü mekanik iletim sistemleri, doğrudan tahrikli aktüatörler ve alternatif aktüatör teknolojileri; performans, enerji verimliliği, kontrol doğruluğu ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından analiz edilmiştir. Literatürden elde edilen bulgular, endüstriyel robot tasarımında aktüatör seçiminin sistem düzeyinde ve çok kriterli bir yaklaşım gerektirdiğini açıkça ortaya koymaktadır (Siciliano & Khatib, 2016; Carabin ve ark., 2017).

Tablo 4. Aktüatör Teknolojilerinin Nicel Karşılaştırması

Aktüatör Teknolojisi	Enerji Verimliliği	Kontrol Hassasiyeti	Dinamik Performans	Bakım Gereksinimi	Maliyet	Endüstriyel Uygunluk
Elektrik Motor + Redüktör	2	2	2	2	2	3
Direct-Drive	3	3	3	1	1	2
Hidrolik	1	1	2	1	1	2
Pnömatik	1	1	1	2	3	1
Akıllı Malzeme Tabanlı	2	3	2	2	1	1

Kaynak: (Carabin et al., 2017; Vergnano et al., 2017; Zhao et al., 2021)

Bu bölümün temel bulguları, elektrik motoru tabanlı ve redüktörlü aktüatörlerin güncel endüstriyel robot uygulamaları için en dengeli çözümü sunduğunu göstermektedir. Bu sistemler;

performans, maliyet ve güvenilirlik açısından kabul edilebilir bir denge sağlamakta ve geniş bir uygulama yelpazesinde etkin biçimde kullanılabilir (Craig, 2005). Özellikle harmonik tahrik ve sikloidal redüktörler, yüksek tork yoğunlukları ve kompakt tasarım avantajları nedeniyle çok eksenli robotlarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Buna karşılık, doğrudan tahrikli aktüatörlerin yüksek hassasiyet ve üstün dinamik performans gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sunduğu ortaya konmuştur. Dişlisiz yapı, mekanik boşlukları ve kayıpları minimize ederek gelişmiş kontrol stratejilerinin daha etkin biçimde uygulanmasına olanak tanımaktadır. Ancak yüksek maliyet ve artan motor boyutu gibi faktörler, bu teknolojinin endüstriyel ölçekte yaygın biçimde benimsenmesini sınırlamaktadır (Asada & Slotine, 1986; Spong ve ark., 2020).

Alternatif aktüatör teknolojilerinin incelenmesi, hidrolik ve pnömatik aktüatörlerin belirli niş uygulamalarda önemli roller üstlenmeye devam ettiğini, ancak enerji verimliliği ve bakım gereksinimleri açısından modern üretim sistemleriyle sınırlı uyumluluk sergilediklerini göstermektedir. Akıllı malzeme tabanlı aktüatörler ise hassasiyet ve kompaktlık açısından potansiyel avantajlar sunmalarına rağmen, büyük ölçekli endüstriyel uygulamalar için henüz yeterli teknolojik olgunluğa ulaşmamıştır (Pellicciari ve ark., 2020).

Gelecekteki araştırmalar açısından, enerji verimliliği, sistem entegrasyonu ve akıllı aktüatör sistemlerinin endüstriyel robot aktüatörlerinin geliştirilmesinde temel odak noktaları haline gelmesi beklenmektedir. Motor, redüktör, sürücü ve sensörleri tek bir modülde birleştiren kompakt aktüatör tasarımlarının, hem performans hem de enerji tüketimi açısından önemli iyileştirmeler sağlayacağı öngörülmektedir (Carabin ve ark., 2017). Buna ek olarak, gelişmiş kontrol algoritmalarının ve veri odaklı yaklaşımların

aktüatör sistemleriyle bütünleştirilmesi, robotların enerji yönetimi ve uyarlanabilir davranış kabiliyetlerini artıracaktır.

Sonuç olarak bu bölüm, endüstriyel robot aktüatör teknolojilerine ilişkin mevcut literatürün kapsamlı bir sentezini sunmakta ve araştırmacılar ile uygulayıcılar için yol gösterici bir değerlendirme ortaya koymaktadır. Deneysel doğrulama ve uygulama odaklı analizlerle desteklenen gelecekteki çalışmaların, aktüatör teknolojilerinin endüstriyel robotikte daha etkin ve sürdürülebilir biçimde kullanılmasına önemli katkılar sağlaması beklenmektedir.

Kaynakça

Albu-Schäffer, A., Ott, C., & Hirzinger, G. (2007). A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots. *The International Journal of Robotics Research*, 26(1), 23–39. <https://doi.org/10.1177/0278364907073776>

Asada, H., & Slotine, J. J. E. (1986). *Robot analysis and control*. New York, NY: John Wiley & Sons.

Bar-Cohen, Y. (2001). *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles*. Bellingham, WA: SPIE Press.

Bilgin, S. (2023). The effect of using activated carbon obtained from sewage sludge as a fuel additive on engine performance and emissions. *Thermal Science*, 27(4), 3313–3322.

Bilgin, S. (2025). Strategic directions for Turkey according to the Global Energy Outlook 2024 report. In *Proceedings of the 4th International Palestra Scientific Research Congress* (ss. 177–178). Azerbaijan.

Bilgin, S., & Nishimura, M. (2003). Implementation of a WIP modeling system at LSI Logic. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing* (ss. 293–296). IEEE.

Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). *Electric drives* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

Brogårdh, T. (2007). Present and future robot control development—An industrial perspective. *Annual Reviews in Control*, 31(1), 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.03.002>

Carabin, G., Palomba, I., Rossi, S., & Del Prete, A. (2017). Energy efficiency in industrial robots: A review. *Robotics and Computer-*

Integrated Manufacturing, 48, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.02.005>

Chaudhuri, A., & Albu-Schäffer, A. (2014). Exploiting variable stiffness in redundant robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(4), 995–1009. <https://doi.org/10.1109/TRO.2014.2305804>

Colledani, M., Tolio, T., Fischer, A., Iung, B., Lanza, G., Schmitt, R., & Váncza, J. (2014). Design and management of manufacturing systems for production quality. *CIRP Annals*, 63(2), 773–796. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.002>

Craig, J. J. (2005). *Introduction to robotics: Mechanics and control* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

Daş, M., Pektezel, O., Şimşek, M., & Akpınar, E. (2025). Thermodynamic and artificial intelligence-based performance analysis of parabolic vacuum tube solar collector assisted greenhouse drying system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 75.

Daş, M., Pektezel, O., & Şimşek, M. (2025). Solar energy for greenhouse drying: Performance evaluation of parabolic trough solar collector with two-axis tracking system. *Solar Energy*, 299(1).

De Luca, A., & Ferrajoli, L. (2008). Exploiting robot redundancy in collision detection and reaction. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13(2), 237–245. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2008.918540>

Guo, Y., Wang, S., & Liu, H. (2019). Design and analysis of actuator systems for industrial robotic applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 478–490. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.007>

Gültekin, N. (2024). Experimental study of the effects of diesel, bioethanol, and hydrogen on combustion, emissions, mechanical

vibration, and noise in a CI engine with different valve lift. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93(1), 1011–1021.

Gültekin, N., & Ciniviz, M. (2024). Experimental investigation of the effects of energy ratio and combustion chamber design on engine performance and emissions in a hydrogen–diesel dual-fuel CRDI engine. *Atmospheric Pollution Research*, 15(9), 1–12.

Gültekin, N., Gülcan, H. E., & Ciniviz, M. (2024). The impact of hydrogen injection pressure and timing on exhaust, mechanical vibration, and noise emissions in a CI engine fueled with hydrogen–diesel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 78(1), 871–878.

Harmonic Drive AG. (2019). *Harmonic drive systems in industrial robotics* (Teknik rapor). Almanya: Harmonic Drive AG.

Hogan, N. (1985). Impedance control: An approach to manipulation. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1), 1–24. <https://doi.org/10.1115/1.3140702>

Hollerbach, J. M. (1980). A recursive formulation of Lagrangian manipulator dynamics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 10(11), 730–736. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1980.4308673>

Ivshin, Y., & Melnikov, A. (2018). Shape memory alloy actuators: Classification and applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(8), 17494–17501. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.016>

Katalinic, B., Modrak, V., & Dombrowski, U. (2019). Energy-efficient manufacturing systems. *Procedia Manufacturing*, 32, 782–789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.279>

Krishnan, R. (2010). *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Li, S., Wang, J., & Liu, Z. (2015). Backlash modeling and compensation in robotic joints with gear transmission. *Mechanism and Machine Theory*, 87, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.003>

Merritt, H. E. (1967). *Hydraulic control systems*. New York, NY: John Wiley & Sons.

Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y., & Oda, Y. (2011). A study on energy efficiency improvement for machine tools. *CIRP Annals*, 60(1), 145–148. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.099>

Ott, C., Albu-Schäffer, A., Kugi, A., & Hirzinger, G. (2004). A passivity-based Cartesian impedance controller for flexible joint robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(2), 416–421. <https://doi.org/10.1109/TRA.2004.825518>

Pellicciari, M., Berselli, G., Leali, F., & Vergnano, A. (2020). A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119024>

Pfeiffer, F., Wahl, F., & Zumel, N. (2018). *Mechanical systems design handbook*. Cham: Springer.

Rastegar, J., & Pereira, C. (2003). *Pneumatic actuators and systems*. New York, NY: Marcel Dekker.

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2010). *Robotics: Modelling, planning and control*. London: Springer.

Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). *Springer handbook of robotics* (2nd ed.). Cham: Springer.

Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2020). *Robot modeling and control* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Şimşek, M., Yusuf, B., Ertuğrul, D., & Uğur, M. (2023). The study of the friction properties of AA6082 and AA7075 material journal bearings coated with micro arc oxidation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(5), 2307–2318.

Tuttle, T. D., & Seering, W. P. (1997). A nonlinear model of a harmonic drive gear transmission. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(3), 368–374. <https://doi.org/10.1109/70.499610>

Vergnano, A., Berselli, G., & Pellicciari, M. (2017). Energy efficiency in robotic machining: A review. *Journal of Cleaner Production*, 147, 360–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.110>

Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings. *Mechatronics*, 55, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>

Wang, J., & Ghorbel, F. (2001). Kinematic analysis and design of cycloidal speed reducers. *Mechanism and Machine Theory*, 36(5), 609–625. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(01\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(01)00008-9)

Zhao, X., Liu, Y., & Wang, L. (2021). Integrated motor–drive–actuator systems for industrial robots: A review. *Machines*, 9(6), 118. <https://doi.org/10.3390/machines9060118>

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*