
MÜHENDİSLİK

Editör: Doç.Dr. Bahar YILMAZ ALTINOK

MÜHENDİSLİK

Editör

Doç. Dr. Bahar YILMAZ ALTINOK

yaz
yayınları

2024

MÜHENDİSLİK

Editör: Doç. Dr. Bahar YILMAZ ALTINOK

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-6104-68-6

Ekim 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Structural Analysis of Adding Extra Hammers on A Hammer Mill Shaft1

*Nuri CEYLAN, Hasan Donat YILDIZAY, Özer AYDIN,
Mehmet AREL*

Tahmin Doğruluğunun Üretim ve Malzeme Planlamasındaki Rolü13

Ömer ASAL, Erdem MUCUK

Optimization of Hydrogen Evolution using FeCrNi Mesh Electrode in Alkaline Electrolysis: Response Surface Methodology31

*Ceyla GÜNGÖR, Mehmet Erman MERT,
Başak DOĞRU MERT*

Akustik Enerjinin Tıpta Kullanımı ve Bilgisayar Destekli Analiz Yaklaşımları.....52

Çağlar CENGİZLER

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

STRUCTURAL ANALYSIS OF ADDING EXTRA HAMMERS ON A HAMMER MILL SHAFT¹

Nuri CEYLAN²

Hasan Donat YILDIZAY³

Özer AYDIN⁴

Mehmet AREL⁵

1. INTRODUCTION

One of the factors that affect the pulverized coal burning efficiency is the coal particle size that matches the boiler design. For this reason, coal is ground into desired particle size in mills before burning. Especially in hammer mills, coal might be better ground when the number of hammers on the mill shaft is increased. In this study, the impact of increasing the number of hammers on the shaft of a hammer mill which used at a pulverized coal-fired thermal power plant, on the shaft system was analyzed. The main geometry of the mills, shaft bearing distance and other parts of the mills remain the same throughout the study. The existing mill shaft system and the shaft system with additional hammers were analyzed under actual dimensions and operational

¹ This work has been supported by Kutahya Dumlupınar University Scientific Research Projects Coordination Office under grant number 2015-16.

² Assist Prof. Dr., Dumlupınar University, Tavşanlı Vocational School, Tavşanlı, Kutahya / Türkiye, nuri.ceylan@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9311-5418.

³ Assist Prof. Dr., Dumlupınar University, Department of Mechanical Engineering, Kutahya / Türkiye, hasan.yildizay@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2449-8056.

⁴ Prof. Dr., Dumlupınar University, Department of Mechanical Engineering, Kutahya / Türkiye, ozer.aydin@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6397-5601.

⁵ Mechanical Engineer, M.D., CH2 1DQ 100 Uptonpark Upton Chester England, mehmet.arel@medcem.com.tr, ORCID: 0009-0008-7841-7523.

conditions using commercial package software. The structural analysis indicated that the shaft system with additional hammers could bear both static and dynamic loads within safety limits. Yet, a new shaft has to be manufactured since adding additional hammers necessitates a change in shaft geometry. Considering the entire mill, changing only the shaft would be less costly than purchasing a new mill.

Pulverized coal boilers are frequently used at coal-fired thermal power plants as firing system. As the mineralogical and chemical properties of coals differ, boiler manufacturers face various technical difficulties in developing the appropriate design for the efficient combustion of coal. (Gauville et al. 2012, Mokhahlane et al, 2018). Coal is generally broken with drum crushers, hammer crushers, ball mills and pulverizations (Singh et al. 2015). At pulverized coal boilers, mills are used for grinding the coal that comes from coal stockyard and then sending it to furnace via burners (Shin et al. 2009). At modern pulverized coal thermal power plants mill operating conditions play an important role in effective and stable functioning of boiler (Zeng et al. 2015). In such firing systems coal is supposed to be ground into tiny pieces and then burned (Yao et al. 2015). Crushing coal into the ideal size in mills increases burning efficiency in boiler (Ferrin and Saavedra, 2013).

Coal heating value, elemental analysis and particle dispersion values are important parameters in designing of pulverized coal boilers. Firing coals of different qualities than those coals on which design was based affect boiler efficiency negatively. Moreover, they result in an increase in emissions and even problems such as pipe rupture inside the boiler. The ideal coal grain size after milling in pulverized coal-fired thermal power plants are generally; 1 mm and above 1% or lower, 0,09 mm and below about 50-55%, between 0,09 mm-0,2 mm 35%, and between 0,2 mm-1 mm about 25%. The lower calorific value

of the coal burned at Seyitomer Thermal Power Plant ranges between 1400-2000 kcal/kg and the amount of ash and moisture is high. Before the coal is conducted to the mills, they are exposed to the hot gases taken from the boiler and the moisture content is removed. This makes easier coal grinding inside the mills. Unless the moisture is adequately removed the crushers inside the mills are covered by coal and the grinding efficiency decreases. Thus, the flow of coal in mills is important in view of process efficiency and equipment design (Lu et al. 2018; Liu et al. 2017). A more efficient burning is achieved as the air contacted surface area of the coal particles that matches the boiler design conditions increases. The carbon monoxide emission in the flue gas decreases and fuel consumption is decreased. Moreover, the pipe rupture problem that occurs as abrasion effect of bigger coal particles can be diminished.

There are 5 rows of hammers on the shafts of the hammer mills used at the 3rd unit of Seyitomer Thermal Power Plant. It was determined that after this process the amount of coal grains measuring 0,09 mm and below is about 25-30%. This results in the increase of unburned carbon levels in the ash pit up to 15-20 %. In this study, the effect of the increasing number of hammers on the shaft and bearing system is analyzed while the main geometry of the mill is kept constant.

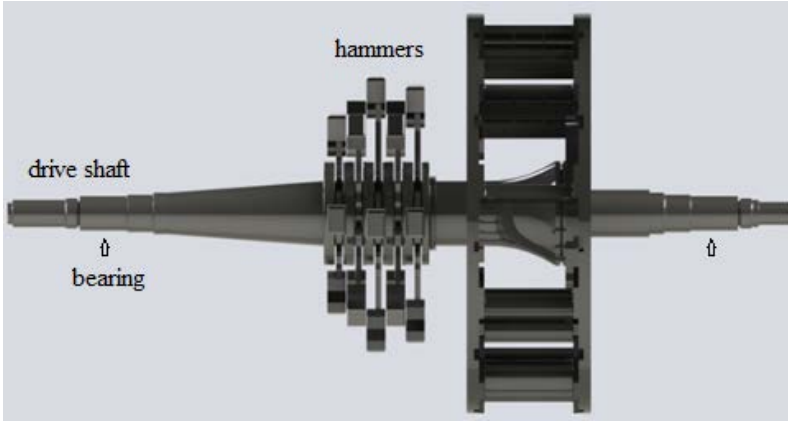
2. STRUCTURAL ANALYSIS OF THE EXISTING MILL SHAFT

There are 6 hammer mills, including one spare mill, at the 3rd unit of Seyitomer Thermal Power Plant. The technical specifications of these hammer mills are presented in Table 1.

Table 1. Main Characteristics of The Hammer Mills at Seyitomer Power Plant

	Unit	Value/Feature
System		Hammer - Fan
Type		DGS-65
Mill Coal Output	t/h	62.2
Mill Max. Coal Output	t/h	80
Mill Speed	rpm	640 / 450
Design Gas Temperature at Mill Output	°C	140
Inlet Temperature in mill gas duct	°C	1000/755
Design Conditions in The Mill Coupling		
Required power	kW	820/860
Motor Power	kW	1100
Motor rotation speed	rpm	1485

Fig. 1. Parts of the 5-Row Hammer-Mill Shaft



The parts of these 5-row hammer mills are presented in Figure 1. These were drawn using SolidWorks 2012 software in their original dimensions. The material used for the shafts, planes and crossbars is 42CrMo4, and the hammers are made of Gx120Mn12. The material used for fasteners is “structural steel”. The strength properties of these parts are given in Table 2.

Table 2. The Strength Properties of Mill Parts

	42CrMo4	Gx120Mn12
Density [kg/m ³]	7890	7890
Elasticity Module [Gpa]	210	210
Poisson Rate	0,3	0,3
Yield Strength [Mpa]	800	410
Tensile Strength [Mpa]	1200	1130

In the structural analysis, the boundary condition was set as the rotation speed of mill shaft at 70 rad/sec and was defined as “Rotational Velocity”. “Frictionless Support” was selected for the bearings of the mill shaft.

The static analysis were conducted for determining the state of parts under the influence of gravity without rotation of the shaft. The static analysis conducted for 5-row hammer mill are presented in Figure 2 and Figure 3. During the static analysis, the maximum stress value on the shaft was calculated as 20.4 MPa and the elastic strain at the most critical section was calculated as 0.0339 mm.

Fig. 1. Static Stress on the 5-Row Hammer Mill Shaft (MPa)

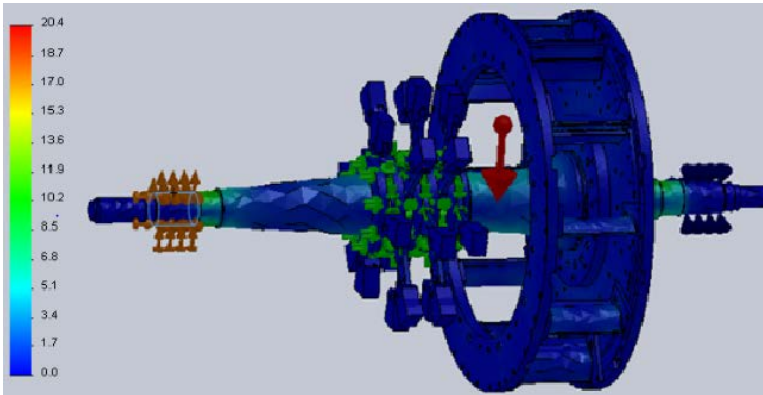
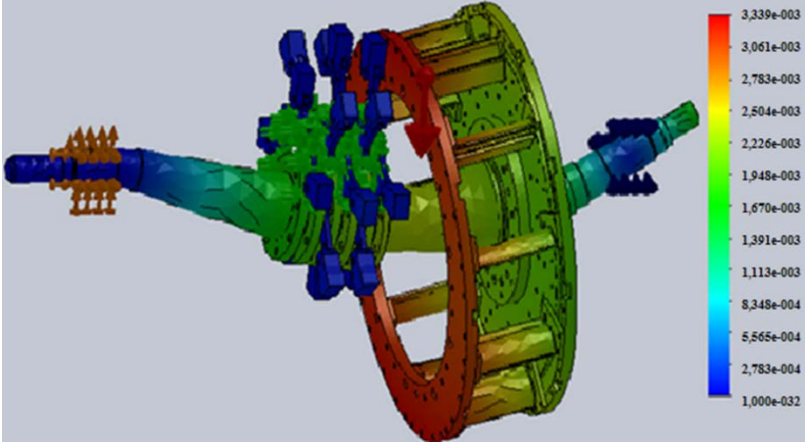
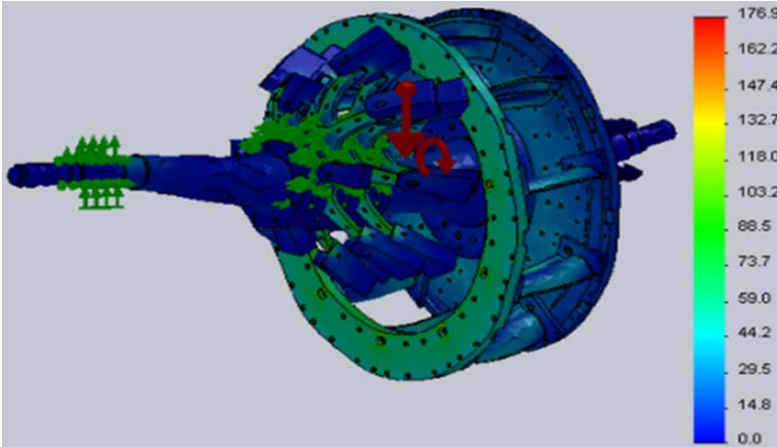


Fig. 3. Displacements on the 5-Row Hammer-Mill Shaft (mm)



The dynamic analysis were conducted on the condition that the mill shaft rotated at 640 d/min angular velocity. The highest stress value recorded during the dynamic analysis was calculated as 176.9 MPa (Figure 4). It has been observed that the mill shaft system has sufficient strength under dynamic conditions and the occurring stress remains within safety limits given the material properties presented in Table 2.

Fig. 4. Dynamic Stress on the 5-Row Hammer Mill Shaft (MPa)



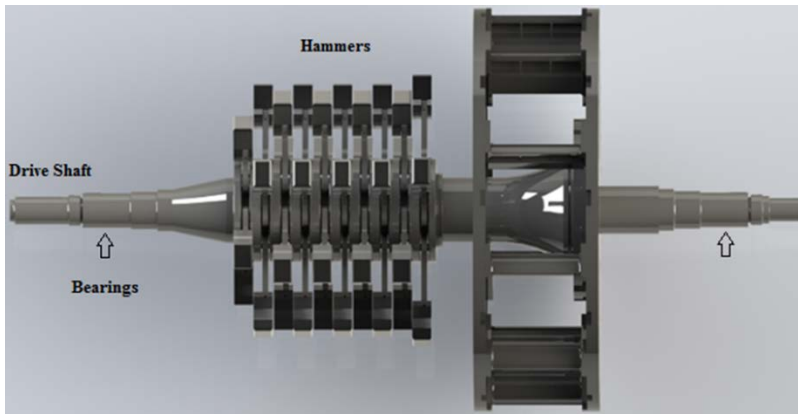
The reaction force on the 5-row hammer mill shaft bearings was calculated as 26732.24 kgf. The largest force

applied on the bearings had 11131.2 kgf value on the radial course. The strength loads of bearings used in these tracks range between 4350000 N and 3350000 N.

3. STRUCTURAL ANALYSIS AFTER ADDITION OF HAMMERS ON THE PRESENT MILL SHAFT

The number of hammers on the present shaft was doubled and 5-rows of hammers were added. The distance between shaft bearings and remaining mill geometry has remained the same. Only the conical section where additional hammers would be placed was designed in the same diameter with the shaft. The distance between the additional hammers was designed to match the distance between the present hammers. The 10-row hammer mill design is presented in Figure 5.

Fig. 5 Parts of the 10-Row Hammer Mill



Static analysis were conducted for determining the state of parts under the influence of gravity without rotation of the shaft. During the static analysis, the maximum stress value on the shaft was calculated as 8 MPa (Figure 6), and the elastic strain at the most critical section was calculated as 0.00674 mm (Figure 7).

The dynamic analysis were conducted on the condition that the mill shaft rotated at 640 d/min angular velocity. The highest stress value recorded during the dynamic analysis was calculated as 139.9 MPa (Figure 8). It has been observed that the mill shaft system has sufficient strength under dynamic conditions and the occurring stress remains within safety limits given the material properties presented in Table 2.

Fig. 6 Static Stress on the 10-Row Hammer Mill Shaft (MPa)

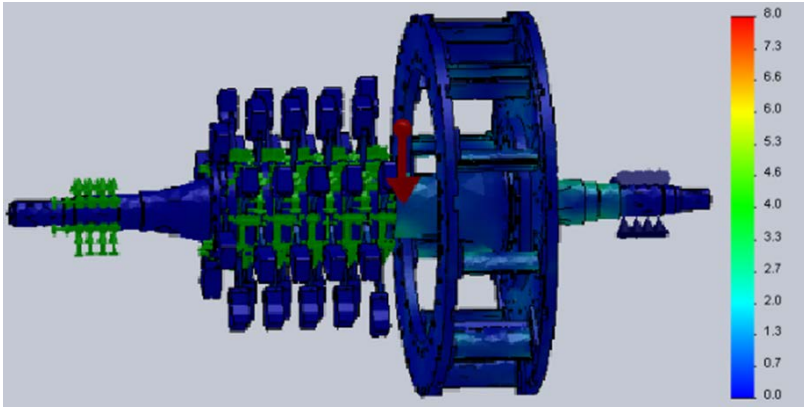
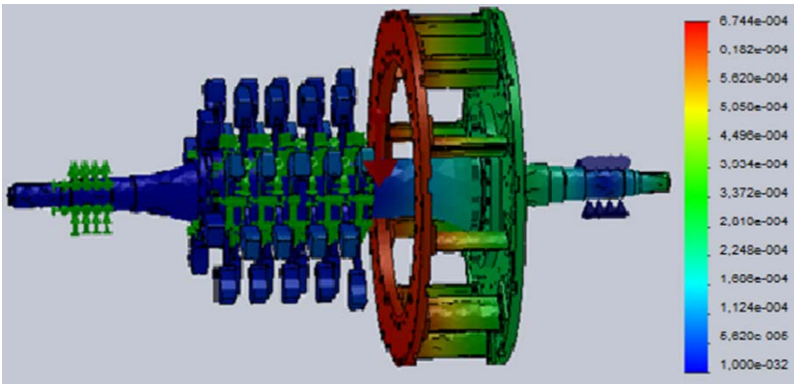


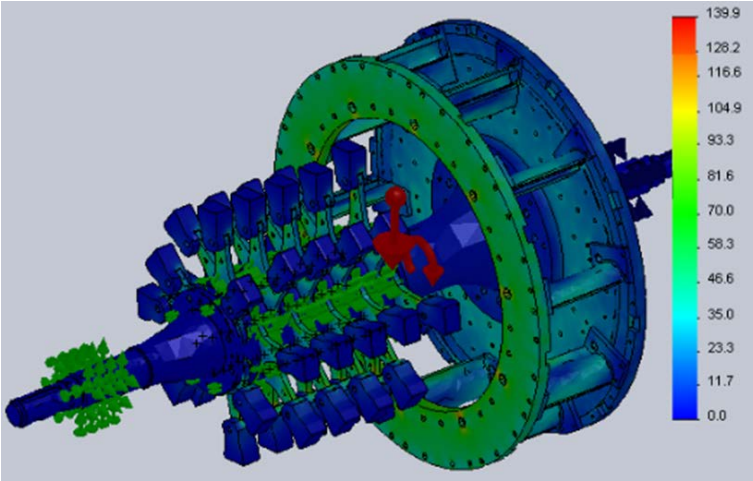
Fig. 7. Displacements on the 10-Row Hammer-Mill Shaft (mm).



The static and dynamic analysis results for the 10-row hammer mill shaft indicate that the system would operate within safety limits. In order to add an extra 5-row of hammers to the

existing 5-row hammer mill the conical sections where hammers would be added need to have identical circular geometry with the shaft diameter. Thus, the designed 10-row hammer mill shaft has to be re-manufactured in the designed geometry. Manufacturing a new shaft would still cost less than purchasing a new 10-row hammer mill. The reaction force on the 10-row hammer mill shaft bearings was calculated as 36647.6 kgf. The largest force applied on the bearings had 34182.1 kgf value on the radial course. This is significantly below the load strength of the ball bearing and the newly designed shaft can be mounted on the existing shells and bearings.

Fig. 8. Dynamic Stress on the 10-Row Hammer Mill Shaft (MPa).



4. RESULTS

In this study, the impact of increasing the number of hammers on the shaft of a hammer mill used at a pulverised coal-fired thermal power plant without changing the main geometry of the hammer mills on the system was analyzed using commercial package software. Initially, the existing mill shaft system was statically and dynamically analyzed under actual dimensions and

operational conditions. Then, additional hammers were placed over the shaft with minor changes in the mill shaft geometry. The structural analysis were repeated as the number of hammers on the existing mill shaft was doubled. The structural analysis indicated that the shaft system could bear both static and dynamic loads within safety limits. Increasing the number of hammers on the shaft only resulted in increased reaction force on shaft shells however it was calculated that the existing shells could stand such loads. A new shaft should be manufactured in order to add extra hammers to the mill shaft that rotates in high speed and bears dynamic load. It would be less costly than purchasing a new mill, as all the parts of the mill except the mill shaft would be used as is.

REFERENCES

- Ferrin, A.L. and Saavedra, L., 2013, Distribution of The Coal Flow in The Mill-Duct System of The As Pontes Power Plant Using CFD Modelling, *Fuel Processing Technology*, 106, pp. 84-94. DOI:10.1016/j.fuproc.2012.07.005
- Gauville P., Foucher J.C. and Moreau D., Achievable combustion efficiency with Alstom CFB boilers for burning discarded coal, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2012, 112(6), 437-447
- Liu. Y., Lu, H., Guo, X., Gong, X., Sun, X. and Zhang, Z., 2016, The Influence of Fine Particles on Bulk and Flow Behaviour of Pulverized Coal, *Powder Technology*, 303, pp. 212-227. DOI:10.1016/j.powtec.2016.07.022
- Lu. H., Guo, X., Jin, Y. and Gong, X., 2018, Effect of Moisture on Flow ability of Pulverized Coal, *Chemical Engineering Research and Design*, 133, pp. 326-334. DOI:10.1016/j.cherd.2018.03.023
- Mokhahlane L.S., M Gomo M. and Vermeulen D., Acid-base accounting of unburned coal from underground coal gasification at Majuba pilot plant, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2018, 118 (10), 1041-1046
- Shin, H.B., Li, X.I., Jeong, I.Y., Park, J.M. and Lee, S., 2009, Modelling and Parameter Identification of Coal Mill, *Journal of Power Electronics*, 9(5), pp. 700-707. eISSN: 2093-4718
- Singh, V., Saxena, V.K., Raj, R. and Venugopal, R., 2015, Artificial Weathering of Coal to Enhance Milling Performance, *Fuel*, 142, pp. 117-120. DOI:10.1016/j.fuel.2014.11.016

- Yao, Z., Wang, G., Song, L., Ma, Y. and Li, X., 2015, Failure Investigation of The Pulverizing Fan of Ventilation Mill, *Engineering Failure Analysis*, 49, pp. 11–19. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.12.006
- Zeng, D.L., Hu, Y., Gao, S. and Liu, J.Z., 2015, Modelling and Control of Pulverizing System Considering Coal Moisture, *Energy*, 80, pp. 55-63. DOI:10.1016/j.energy.2014.11.042

TAHMİN DOĞRULUĞUNUN ÜRETİM VE MALZEME PLANLAMASINDAKİ ROLÜ

Ömer ASAL¹

Erdem MUCUK²

1. GİRİŞ

Globalleşen dünya ekonomisinde, tüm işletmeler arasında rekabet sürekli artmaktadır. Özel, resmi, kamu kurumları da dahil olmak üzere tüm işletmeler için maliyet en önemli etken haline gelmiştir. İşletmelerin ayakta kalabilmeleri, maliyetleri düşürmek ve verimliliği arttırmak hedeflerine bağlıdır. Üretim aşamalarında ve tedarik zinciri süreçlerinde maliyetlerin en aza indirilmesi, rekabet avantajına büyük katkı sağlayacağı gibi sadece şirketlerin değil, aslında o ülkenin ekonomisinin büyümesine direkt olarak katkı sağlayacaktır ve şirketlerin uluslararası pazarlarda rekabet edebilmesine sürdürülebilir olmasına faydası çok büyük olacaktır.

İşletmelerin rekabet edebilmeleri, müşteri taleplerine hızlı cevap verebilmeleri ve üretimde esneklik kazanmaları için maliyet kontrolünü çok iyi yapmaları gerekmektedir. Tüm bunlar için de üretim ve malzeme ihtiyaçlarının doğru tahminlenmesi gerekmektedir. Doğru talep tahmini demek, tüm şirket için stratejik bir yol, harika bir verimlilik için çok önemlidir. (Akgüç Ö. , 1998)

¹ Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, omerasal@gazi.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-6339-9202

² Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, mucukerdem@gmail.com, ORCID No: 0009-0001-2724-5986

Tahminlemenin yanlış olması, üretim planlarının ve malzeme ihtiyaç planlarının yanlış olmasına sebep verir. Sonucunda ise stokların fazla ya da eksik olması, stok alanı yetersizlikleri, üretim kapasitesi yetersizlikleri ya da kapasite boşlukları, fazla işgücü vs. gibi ilerde detaylandıracağımız birçok maliyet olacak israf kaynakları oluşturarak, karlılığın azalmasına neden olacaktır. (Kabak & Ülengin, 2011)

Doğru tahminleme; maliyetleri optimize ederek, tedarik zincirinde dinamiklik ve üretimde esneklik sağlayacak, maliyetleri minimize edecektir. (Stevenson, 2018)

Bu çalışma, Doğru yapılan tahminlemenin şirketlere nasıl avantajlar sağlayacağı, özellikle tüm şirketin ve hatta tedarikçilerin bile üretim tempolarını, yatırım kararlarını ve birçok stratejik konuyu etkileyecek, üretim planlama ve malzeme ihtiyaç planlamasında nasıl bir öneme sahip olduğu incelenecektir. Üretim planlama ve malzeme ihtiyaç planlama en büyük iki ana süreç olarak ortaya çıkar ve tahminleme bu iki süreci koordine ederek işletmenin ve tüm departmanların temposunu belirler. İşletmelerin ayakta kalabilmeleri için doğru tahminlemenin ne kadar önemli olduğunu, ilerleyen yıllarda teknolojinin gelişmesi ve analiz yöntemlerinin iyileşmesi ile işletmeler için çok daha kritik olacağı öngörülmektedir. Tahminlemenin doğru yapılması sadece maliyet kontrolü sağlamayacağı gibi stratejik karar içinde çok önemli rol oynayacaktır. (Özcömert, 2016)

2. ÜRETİM PLANLAMADA TAHMİNLEMENİN ÖNEMİ, ETKİLERİ VE AVANTAJLARI

Üretim planlama, üretim süreçlerini en iyi şekilde koordine ederek, en etkili ve verimli şekilde kaynakların kullanılmasını sağlayan bir süreçtir. Üretim planlama hangi malzemeden ne kadar, ne zaman, hangi yöntemle, hangi işgücü

ve kaynakla üreteceğini organize eder. Asıl amaç israftan arınmış bir üretim yaparak, müşteriye istediği zaman ve miktarda ürün göndermektir. İyi bir üretim planlama yapılması israfın önlenmesi ve daha birçok konuda şirkete avantaj sağlar. (Karabıyık, 2012)

İyi bir tahminleme sonrasında yapılacak olan üretim planlaması, tüm taleplerin karşılanmasını sağlayacağı gibi müşteriye de memnun edecektir. Sahada devam eden süreçlerin iyileşmesine üretim planlaması katkı sağlamaktadır. Her üretim yapan işletmede, kaynaklarının israflardan arınmış bir şekilde etkin kullanılarak müşteri taleplerini karşılamaları açısından çok önemli bir süreçtir. Üretim planlamasının en önemli girdisi tahminlemedir. Planların doğru yapılabilmesi tahminlemenin ne kadar doğru olduğu ile ilgilidir. Bu süreç şirket maliyetlerini düşürerek, üretim aşamasında da sürekli, durmadan üretim yapılmasını sağlayacaktır. Müşterilerin isteklerine tam zamanında ve istediği miktarda karşılayacaktır. (Stevenson, 2018)

Doğru bir tahminleme, şirketin üretim kaynaklarının maksimum kullanılmasını sağlar ve üretim planlarının doğru yapılmasını destekler. Şirketin üretim aşamalarında kullanacağı işgücü, makine, malzeme durumlarını tahminlerle doğru belirleyerek şirketi aksatmadan hedeflerine ulaştırabilecektir. Üretim süreçlerinin optimize edilmesi kapasitenin dengeli kullanımını ve boş kapasite gibi durumları engeller. Şirketin üretim alanındaki tüm makine ve ekipmanların bakım-onarım süreçlerinde bile tahminlemelere dayanarak optimize edilebilir. (Akdi, 2003)

Birçok tahminleme yöntemleri literatürde bulunmaktadır. Bazı tahminleme yöntemleri talep dalgalanmalarını göze almaz iken, bazıları ise talep dalgalanmalarını ve mevsimsel değişiklikleri, geçmiş verileri analiz ederek dikkate alır.

(AKGÜL, 2011) Tahminlemenin doğru bir şekilde yapılması, üretim planına çok büyük avantaj sağlayacağı gibi diğer konu ise taleplerin trendlerini öngörerek buna önlem alması ve buna göre planların yapılmasını sağlaması olacaktır. Talep dalgalanmalarının olduğu aylarda, üretim kapasitelerinin arttırılıp azaltılmasını sağlayacaktır. Yine eğer yanlış tahminleme olacağı düşünülür ise çok fazla üretim, az üretim, kapasitenin yılın belirli zamanlarında boş kalması ya da üretimin yetişmemesi gibi durumlar söz konusu olur olabilir. (Üreten, 2000)

Yanlış tahminlerin yapılması durumunda ise aşırı üretim veya eksik üretim gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu da stok maliyetlerini artırır veya müşteri taleplerinin zamanında karşılanamamasına neden olur. (Özcömert, 2016)

Stok yönetimi konusu çok geniş kapsamlı bir konudur ve üretim planlamanın stoklar üzerinde çok büyük etkisi olduğu bilinmektedir. Tahminleme ne kadar doğru yapılır ise, üretim planlaması o kadar verimli olacaktır, işletme gereksiz stok yapmaktan, stok maliyetlerini düşürecek ve stok alanları içinde, minimum depo alanı ile maliyetlere katkı sağlanacaktır. Silver, E. (Silver, Pyke, & & Peterson, 1998). Taleplerin doğru tahminlenerek, üretim süreçleri tekrar düzenlenir ve işletmenin stok devir hızı arttırılır. Malzemeler depoda ne kadar çok fazla kalır ise o kadar depolama maliyetine firma katlanmak zorunda kalacaktır. Malzeme tedarik süreçleri çok iyileşecektir. Doğru bir üretim planlaması şirketin makine ve işgücü kaynaklarının verimli kullanılmasını sağlayacaktır. Tahminleme ne kadar doğruya yakın olur ise verimlilik o kadar artacaktır. İşletmelerde bazen tahminleme hataları kaynaklı, üretim planları doğru yapılamayabiliyor ve bunlar işletmelerin vardiyaları, çalışmasını, gereksiz fazla mesai yapmasını, hafta sonu mesailerini ve özellikle çalışılmayan resmi tatiller ve pazar günlerinde fazla mesai çalışması yapmasına sebebiyet veriyor. Buna bağlı olarak ta makinelerin kapasitelerinin verimsiz kullanılmasına sebep

oluyor. İşgücü dengelenmesi ve makinaların verimli kullanılması doğru bir tahminleme ile yapılan üretim planlarına bağlıdır. (Makridakis, Wheelwright, & Hyndman, 1998)

Şirketler değişen taleplere göre yatırım kararları alırlar. Talep artacak ise yeni yatırımlar, azalacak ise kapasitede azaltmaya gidebilmektedirler. Bu süreçler yüksek maliyet ve çok büyük stratejik kararlar gerektirir. Tahminleme bu noktada sadece üretimde verimlilik için değil şirketlerin büyük stratejik kararları vermesi içinde çok kritik bir araçtır. Geleceğin doğru tahminlenmesi, pazar talebinin doğru analizi yeni çıkacak veya ilk kez üretilecek bir ürünün geliştirilmesinde gerekli kararların alınması ve yatırım kararlarının alınmasını sağlayacaktır. Tahminlemelere göre üretim kapasitesi artırma çalışmaları hız kazanacak, yeni fırsat yatırımları şirketlere kazandırılacaktır. (AKGÜL, 2011)

3. MALZEME İHTİYAÇ PLANLAMADA TAHMİNLEMENİN ÖNEMİ, ETKİLERİ VE AVANTAJLARI

Üretim yapılan ya da hizmet sağlayan şirketlerde malzeme ihtiyaç planlaması olmaz ise olmazlardandır. Üretim yapan veya hizmet sağlayan şirkette ihtiyaç duyulan malzemeler, tahminlemenin doğru yapılmasından sonra çıkacak üretim planlarından gelecektir. Malzeme İhtiyaç Planlaması (MRP-Material Requirements Planning), işletmenin süreçlerini devam ettirmesi için ihtiyaç duyduğu hammaddelerin, bitmiş ürünlerin, doğru miktar ve zamanda temin edilmesini sağlayan bir süreçtir. Burada en önemli konu uygun maliyetle olması da değerlendirilmelidir. Malzeme ihtiyaç planlaması, üretim planlaması ile koordineli çalışmaktadır. (Erdemir & Çuhadar, 2014)

Sürecin üçüncü adımına geçilmeden, tahminleme doğru bir şekilde yapılmalı, üretim planları oluşturulmalı ve sonrasında malzeme ihtiyaçları yapılarak döngü ilerlemeli. Üretim planı, üretim miktarı ve zamanını belirlenecektir. Sonrasında yapılacak güzel bir malzeme ihtiyaç planı, stokları optimize eder, stok fazlalıklarını önler ve üretim hattının veya hizmet üreten bir kuruluş ise hizmetin devamını, kesintisiz olmasını sağlayacaktır. (Üreten, 2000)

İyi tahminleme, şirketin üretiminin durmadan çalışmasını sağlar ve tedarik zincirinin sorunsuz devamlılığı için en temel araçtır. (AKGÜL, 2011). Malzeme İhtiyaç Planlaması etkin olarak yönetiliyor olması, zincirin en başlangıcı olan hammadde sağlanmasından müşteriye son ürünün teslimine kadar olan zamanda kusursuz işlemlerini sağlar. Malzeme ihtiyaç planının doğruluğu kaynakların kullanımını, maliyetin minimize edilmesini, hem iç süreçleri hem de şirkete malzeme sağlayan tedarikçilerin aslında temposunu belirler. Malzeme ihtiyaç planlama aslında hammadde ve yarı mamullerin 2 temel kriteri sağlaması için yapılır. Doğru zamanda, doğru miktarda olması. Şirketin üretimini devam ettirmesi için tahminlemesini doğru bir şekilde yaparak malzeme ihtiyaçlarını en doğru şekilde belirlemesi gerekir. Tahminleme iyi ise tedarikçiler bu plana uyarak üretimlerini ve sevkiyatlarını sağlar ve uygun zamanda teslim eder. Tedarikçinin temposu ve iş gücü planlaması vs. gibi konulara da çok büyük destek sağlar. (Silver, Pyke, & Peterson, 1998) Tahminleme yapılır iken mevsimsellik ve talep dalgalanmalarını göze almak önemli olabilir. Malzeme ihtiyaç planı beklenmeyen değişikliklere ve dalgalanmalara en iyi şekilde adapte olmasını sağlar. Tedarik zinciri ne kadar esnek olur ise bu değişikliklere o kadar iyi olacaktır, bu sebeple tahminleme doğru olur ise malzeme ihtiyaç planının en azından büyük bir bölümü netleşmiş olacak, kalan bölüm dalgalanmalara daha hızlı uyum sağlayacaktır. İyi bir tahminleme sonrası oluşan malzeme ihtiyaç

planında depolama maliyetleri azalırken stok yetersizliklerinin de önüne geçilebilir. (Üreten, 2000)Tahminleme ile yapılan malzeme ihtiyaç planı tedarikçi firmalar ile gizlilik durumları ve bir sakınca yok ise paylaşılabilir. Tedarikçi bu plana göre talepleri değerlendirir, kendi tahminlemesini ve dalgalanmalarını ekleyerek planlarını yapar. Tedarikçinin yatırımları, kapasite durumları, makine, iş gücü analizleri gibi durumlarını da değerlendirmesi için çok büyük bir etkidir. (Dedeoglu, 2021)

Tedarikçinin üretim tempolarını önceden bilmesi, hem şirket ile tedarikçi arasındaki güveni artırır hem de işbirliği artar. Tedarikçi ile ilişkilerin iyi olması ve bozulmaması aslında tahminlemenin çok iyi yapılmasına bağlıdır. Tedarikçilerde malzemeleri başka yerden alıyor olabilir, üretiyor olabilir, farklı şirketlerden siparişler alıyor olabilir. Bu kapsamda bakıldığında aslında doğru tahminler ve iyi bir malzeme ihtiyaç planı nereleri etkiliyor görünmektedir. Ürünlerin zamanında tedarik edilmesi, teslimat sürelerini etkiler ve müşteri ilişkisine kadar ilerleyen bir süreçtir. (Karabıyık, 2012)Son olarak tahminleme ile yapılacak malzeme ihtiyaç planında değinilmesi gereken konulardan biri de stratejik kararlar ve rekabet konularıdır. (Dedeoglu, 2021)

Malzeme ihtiyaç planlamada, iyi tahminleme yapılmasının avantajı, stratejik kararlar alırken vereceği girdidir. Gelecek dönem tahminleri, piyasanın değişkenlerine uyum sağlama, hızlıca adapte olup hayatta kalmaya devam etmeleri için kritiktir. (Karabıyık, 2012)

4. EN İYİ TAHMİNLEME VE SONRASINDA PLANLARI YAPMAK İÇİN MODEL SEÇİLMESİ

Planların doğru yapılabilmesi için tahminlemenin en iyi şekilde yapılması gerekmektedir. Doğru yöntemi neye göre seçeceğimiz ise bazı temel kriterlere bağlıdır. Şirketin verilerinin

kalitesinin nasıl olduğu önemlidir, verinin yapısı, verilerin ani yükselme ve ani iniş sağlayıp sağlamaması çok kritik konulardır. Veri setlerinin trendler içeriyor olması mevsimsel dalgalanmaları yaşıyor olması analiz edilmesi gereken konulardır. Verilerin durağan ya da dinamik olması, kısa, orta ya da uzun vadeli bir tahminleme mi gerçekleştirilmek isteniyor olması önemli konulardır. Şirket dışsal faktörlerden çok etkileniyor mu? Aslında bulunmuş olduğu sektör bu soruya cevap verebilir. Ne kadar veri var, veriler ne kadar kaliteli ve doğru? , Şirket nasıl bir tahminleme dinamikmi istiyor? İşte doğru tahminleme yöntemini seçmek için bu tarz soruların cevaplarına bakmamız gerekecektir. Bazı basit tahminlemeler hızlıdır, maliyetsizdir ama yüksek doğruluk vermeyebilir. Bazı yöntemler ise karmaşıktır, maliyetlidir ama çok yüksek tahminleme yöntemi verebilir.

Tablo 1. Yöntemlerin Tercih Sebepleri-1

Tahminleme Yöntemleri	Üretim Planlamada Tercih Etme Sebebi	Malzeme İhtiyaç Plan Yaparken Tercih Edilme Sebebi
1.Basit Doğrusal Regresyon	Talebe Göre Üretim Planlama Yapılacak İse	Malzeme İhtiyaçları Ve Talepler Arasında Doğrusal Bir İlişki Vardır.
2. Çoklu Doğrusal Regresyon	Üretim Planlama Yaparken Dışsal Faktörler Çok İse	Dışsal Faktörlerden Etkilenecek İse.
3.Arıma (Autoregressive Integrated Moving Average)	Uzun Vadeli Tahminlemeler Ve Dışsal Faktörler Yok İse	Mevsimsellik Ve Trend Yok İse
4.Sarım (Seasonal Arıma)	Trend İçeren Veriler Çok İse	Mevsimselliğin Çok Fazla Olduğu Tahminlemelerde
5.Var (Vector Autoregression)	Birden Fazla Değişken Var İse	Malzeme Planlaması da Çok Fazla değişken Olacak İse
6.Holt-Winters Yöntemi	Hem Mevsimsellik Hem Trend Var İse	Mevsimsel Dalgalanmalar Çok İse
7.Exponential Smoothing (Üstel Düzleştirme)	Üretim Planı Kısa Vadeli Düşünüyor İse	Malzeme Planlaması Kısa Vadeli Düşünüyor İse

Tablo 2. Yöntemlerin Tercih Sebepleri-2

8.Kırılma Noktası Analizi (Break-Even Analysis)	<i>Üretim Planlama Karlılık İle Belirleniyor İse.</i>	<i>Malzeme İhtiyaçları Ve Üretim Kapasitesi İlişkisini Optimize Eder</i>
9. Zaman Serileri Analizi	Uzun Vadeli Üretim Planlaması Yapılacak İse.	Zaman Serileri İle Malzeme Gereksinimlerini Tahmin Etme
9.1.Basit Yaklaşım	Talepleri Düz Ve Sabit Olan Üretimler Var İse	Talepler Durağan İse
9.2.Hareketli Ortalama	Üretim Süreçlerinde Durağanlık Var İse	Kısa Vadeli Malzeme İhtiyaçlarının Öngörülmesinde Kullanılır
9.2.1. İki Aylık Hareketli Ortalama	Üretim Planları 2 Aylık Periyodlar İle Güncellenecek İse	Malzeme Planlaması Kısa Vadeli Düşünülmüyor İse
9.2.2. Üç Aylık Hareketli Ortalama	Üretim Planları 3 Aylık Periyodlar İle Güncellenecek İse	Üç Aylık Malzeme İhtiyaçlarının Tahmin Edilmesi
9.3.Ağırlıklı Ortalama Yöntmi	Talep Değişiklikleri Kısa Vadeli Oluyor İse	Malzeme Planlaması Kısa Vadeli Düşünülmüyor İse
9.4.Basit Üstel Düzleştirme Yöntemi	Kısa Vadeli Planlama Yapılacak İse	Malzeme Planlaması Kısa Vadeli Düşünülmüyor İse
9.5.Winters Yöntemleri	Mevsimsellik Bulunduran Planlar Yapılacak İse	Dalgalanmalar Çok İse

Yukarıda belirtilen tabloda, genel olarak üretim planlama ve malzeme ihtiyaç planlama yapılırken hangi tahminlemenin kullanılması verimli olacağı özetlenmiştir. İyi tahminleme yapmak, iyi olacak yöntemi seçmek ile başlar. Verilerin yapıları üretim şekli ve miktarı, trendi ve mevsimselliği vb. kritik öneme sahiptir. Veri yapılarının analizleri trendlerin hesaplanması önemlidir. (Akdi, 2003)

Tahminin kısa, uzun, orta vadeli olacağı tahminleme yönteminin seçilmesi için yol gösterir. Kısa vadeli tahminleme

için basit üstel düzeltme, hareketli ortalama yöntemleri kullanılabilir iken, uzun vade de vadeli tahminleme de Arıma regresyon gibi yöntemler tercih edilir. Orta vadelide vadeli tahminlemede de mevsimsellik ve trend dikkate alınır. (Çuhadar & Erdemir, 2014). Tahminleme yaparken verinin miktarı kritiktir, eğer az veri ile çalışılacak ise basit yöntemler seçilir, basit üstel, hareketli ortalama gibi ama veri çok ise daha karmaşık modeller uygulanabilir. Arıma, regresyon bunlar tercih edilmelidir. (Akgül, 2003)Tahminleme modeli seçerken üzerinde durulması gereken konulardan biri şirketin hangi sektörde olduğu ve bu sektörün dinamiklerinin ne olduğudur. Turizm, beyaz eşya, otomotiv(batarya), tarım vb. gibi sektörlerde tahminlemede mevsimsellik olacağından dolayı arıma, holt-winters gibi modeller uygun iken, sabit taleplerin olduğu otomotiv(ana sanayi), inşaat gibi sektörlerde basit üstel ve hareketli ortalama yöntemleri etkili olur. (Üreten, 2000)Talep tahmini yapacak olan sektör, dışsal faktörlerden çok etkilenecek ise, döviz değişimleri, havanın durumu vb. gibi regresyon ve çoklu regresyon modelleri tercih edilmek etmek zorundadır. (Karabıyık, 2012)

Tahminleme yapılacakken, işletmelerin bu tahmin sürecinde, ona ayıracak zamanı ve işgücünün olması bu kapasiteyi sağlaması önemlidir. Eğer kaba bir plan ve az zamanda hızlıca olsun istenir ise, basit üstel düzeltme ve hareketli ortalama (2-3-5 aylık hareketli ortalama yöntemleri) modelleri tercih edilmeli ama veriler karmaşık ve daha doğruya yakın bir tahminleme isteniyor ise, arıma, regresyon yöntemleri kullanılmalıdır. (Aydemir, 1998).Örneğin bir otomobil fabrikasını ele aldığımızda ya da ilaç sektörünü düşündüğümüzde hatanın sıfır olması gerekmektedir. Hata toleransı çok önemlidir. Bu sektörlerde tahminleme karmaşık ve çok doğru yapılması için holt-winters ve regresyon gibi doğru sonuç veren yöntemler kullanılmalıdır. Fakat perakende gibi sektörlerde bu oran daha

yüksektir, tolere edilebilir. Bu sektörlerde basit yöntemler tercih edilebilir. (Stevenson, 2018)

Tablo 3. Tahminleme Kullanan Sektörler ve Avantajları-1

Tahminleme Yöntemleri	Sık Kullanılan Sektörler	Yöntemin İyi Yönleri
1. Basit Doğrusal Regresyon	Pazarlama, Enerji, Finans, Otomotiv	Hızlı hesaplanabilmesi ve kolay uygulanıyor olması
2. Çoklu Doğrusal Regresyon	Emlak, Bankacılık, Üretim, Telekomünikasyon	Geniş analizler yapılabilir, çoklu değişkenler mevcuttur
3. ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)	Elektronik, inşaat, otomotiv, Finans	Yüksek doğrulukla çalışır ve çok yüksek veri setleri vardır.
4. SARIMA (Seasonal ARIMA)	Tarım, Turizm, Perakende	Trend ve mevsimsellik var ise başarılı bir yöntemdir.
5. VAR (Vector Autoregression)	Finans, Teknoloji, Lojistik	Aynı anda birden fazla zaman serisini analiz eder.

Tablo 4. Tahminleme Kullanan Sektörler ve Avantajları-2

Tahminleme Yöntemleri	Sık kullanılan sektörler	Yöntemin İyi Yönleri
6. Holt-Winters Yöntemi	Satış Tahminleri, Gıda, Perakende, Hızlı Tüketim Malları	Hem trend hem de mevsimsellik tahmini yapılabilir
7. Exponential Smoothing (Üstel Düzleştirme)	Üretim Planlama, Perakende, Kısa Vadeli Üretim	Düşük maliyetli kolaydır.
8. Kırılma Noktası Analizi (Break-Even Analysis)	İmalat, Finans, Stratejik Yönetim	Karlılık hesaplamasının destek olur
9. Zaman Serileri Analizi	Üretim Yapan Tüm Sektörler	Çok kapsamlı geçmiş verilerle tahminleme yapılabilir.
9.1. Basit Yaklaşım	Durağan Talepli Sektörler, Finansal Analizler	Kolaydır az veri ile çalışır.
9.2. Hareketli Ortalama	Hisse Senedi Piyasaları, Depolama, Gıda, İlaç	Kısa vadeli tahminlemede etkilidir
9.2.1. İki Aylık Hareketli Ortalama	Kısa Vadeli Üretim Sektörleri, Perakende	Hızlı ve basit hesaplama, kısa vadeli tahmin sağlar
9.2.2. Üç Aylık Hareketli Ortalama	Perakende, Mevsimsellik Az olan sektörler, E-Ticaret	Kısa vadeli tahminlerde başarılı

Tahminleme yöntemi doğru olarak belirlendikten sonra, artık bu tahminlere göre güzel bir üretim planlama yapmak ve üretim hedeflerini belirlemek gerekecektir. Tahminleme aşaması, taleplerin ilerideki zamana yayılmasını ve ilk olarak hangi aylarda ne kadar üretim yapılması gerektiğinin planlandığı aşamadır. Üretim miktarları belirlendikten sonra işletmenin kaynakları analiz edilerek üretim planlarıyla kapasite yeterli olacak mı diye kontrol edilir. (Silver, Pyke, & Peterson, 1998) Üretim planı tamamlandıktan sonra sıra malzeme ihtiyaç planlarının tamamlanmasıdır. Malzeme listeleri BOM (bill of materials) dediğimiz yapıya uygun ürünün üretilmesi için gerekli tüm alt bileşenlerin ihtiyaçlarını oluşturur. Ana ürünü üretmek için hangi malzemeden hangi tarihte ne kadar ihtiyaç olacağını belirler. Burada darboğaz olan tedarikçiler, alternatif tedarikçiler, termin sürelerine uyum sağlayabilecek malzemelerde belirlenmiş olacaktır. Aynı zamanda anlık olarak stokların ve bu stokların plan yapılırken düşülme işlemlerinde burada sağlanarak stokların minimizasyonu sağlanacaktır. (Paksoy, 2005) Makine, ekipman, işgücü planlamaları tamamlandıktan sonra, üretim planı ile zamanlaması master plan olarak netlik kazanır. Tam bu aşamada artık tüm üretim planı ve malzeme ihtiyaç planlaması bu tahminlere göre netlik kazanmıştır. Tedarik zinciri verimliliği ve lojistik departmanı için koordinasyon sağlanmalıdır. İhtiyaç duyulan malzemelerin sipariş edilerek, talep edilen zamanda talep edilen miktar kadar şirkette olması sağlanmalıdır. (Stevenson, 2018)

Tahminleme ile oluşturulan üretim ve malzeme planlarının sürekli canlı takip edilmesi gerekmektedir. Planlanan gerçekleşen takvimi takip edilerek gerekli aksiyonların alınması gerekecektir. Stok durumları, hat verimlilikleri, hatların bakım onarım işlemleri ve hattı ne kadar etkileyeceği, müşterilerin memnuniyeti sürekli takip edilecektir. Amaç yine verimliliği

arttırmak, sürdürülebilir olmak, israflardan arınmış, geleceği görebilen şirketler oluşturmaktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak işletmeler rekabet avantajı sağlamak, ayakta kalabilmek ve sürdürülebilirliğini sağlamaları için doğru tahminleme yapmak zorundadırlar. Tahminlemenin üretim planlama ve malzeme ihtiyaç planlama üzerindeki stratejik önemi yüksektir. Globalleşen ve sürekli gelişen dünyada, müşteri talepleri değişmekte, pazar talepleri değişmekte ve planlamanın doğru yönetilmesi işletmeler için çok hayati önem taşımaktadır. Üretim planlama ve malzeme ihtiyaç planlama şirketlerin beynidir ve tüm şirketin temposunu, krizleri, vardiyaları, stok alanlarını ve tüm departmanları yönetir konumdadır.

Tahminlemenin doğru yapılıyor olması sadece üretim ve malzeme ihtiyaç planlarını değil, tüm şirketin kapasite planlaması, işgücü planlaması, stok yönetimi, stok alanlarının kapasiteleri, makinelerin kullanım oranı, makine tezgahlarının verimlilikleri, sevkiyatın temposu, müşterinin memnuniyetine kadar giden süreçte tüm konuları etkileyen bir olaydır. Her olgunun kendi içerisinde optimizasyonunun sağlaması güzel bir tahminleme ile ve planların oluşması ile sağlanacaktır. İşletmelerin stratejik kararlar almalarını, uzun vadede yapılacak yatırımların kararlarını almalarında büyük etken olur. Dünya'nın ekonomik anlamda artık düzleştiği kaçınılmaz bir gerçektir. Örneğin bir çelik firması artık alacağı yatırımları, gireceği ihaleleri global piyasada takip ederek aksiyonlarını almaktadır.

Belirli çelik parçalarını işleyen çok az sayıda firma olması zaten şirketi mecburen tüm dünyada rekabete itmektedir. Verdiğimiz örnek sadece bir çelik firmasıydı bunun gibi tüm sektörlerden bahsedebiliriz. İşte bu artan rekabet ortamında, şirketler tahminlemelerini çok iyi şekilde yapmak zorundadır. İyi

tahminleme iyi bir üretim planı ve iyi bir malzeme ihtiyaç planı demektir. Aksi halde şirketler ölmeye ve yok olmaya, zamanla sürdürülebilirliklerini kaybetmeye mahkumdurlar. İşletmeler ileriye öngörmek, ellerindeki kaynakları etkili bir şekilde kullanmak, rekabet avantajlarını güçlü tutmak isterler. Tahminleme yöntemleri ve sonrasındaki güzel bir planlama bu koordinasyonu çok iyi sağlayacak kurguyu sunar.

Tedarik zinciri dediğimizde bir ürünün doğru zamanda doğru miktarda üretilip, müşterinin talep ettiği zamanda ona ulaştırmasıdır diyebiliriz, işte tedarik zincirindeki halkalardan herhangi birinin kopması bu teslimatı etkileyecektir. Tedarik zincirindeki ilk halka ise aslında üretilecek ürünün hammadde teminidir ve 2. halka ise üretimin yapılması olarak düşünüldüğünde, iyi bir tahminleme yapılmasının ve sonrasında yapılacak planların çok doğru olmasındaki önemi burada görebiliriz. Herhangi bir malzemenin üretimin başlayacağı anda gelmemiş olması, tedarik zincirinin ilk halkasının yani malzeme tedarikçisinin bozulması demektir. Sonrasında zaten ürünün üretilmemesi, üretim süreçlerindeki aksaklıkları, kapasitenin verimsiz kullanılmasına sebep olacaktır. Bu olumsuzluklar zincirin diğer halkalarını da etkileyerek, depolama alanlarının verimsizliğine ve son tüketiciye kadar uzanan halkanın bozulmasına sebebiyet verecektir.

Tahminlemenin iyi yapılması, hem şirketin kendi iç süreçlerinde tempoyu ayarlamasına olanak sağlayacak hem de dış tedarikçilerin tempolarını organize etmelerini sağlayacaktır. Yapılacak olan malzeme ihtiyaç planı tedarikçiler ile paylaşılarak tedarikçinin de doğru planlar yapmasını ve stratejik yatırım kararları almasını sağlar. Tedarikçi yıl içerisinde gelecek talebi doğruya yakın görür ise ona göre planlamasını yapacak ve sevklerinde tarih kaymaları yaşamayacaktır. Bu şirketin ve tedarikçi arasında oluşan ilişkilerin karşılıklı fayda sağlayacak ve devamlılık oluşturacağı için önemlidir. İyi yapılamayan

tahminlemeler ve dolayısıyla planlar, tedarikçiler ile de güven ilişkilerini zedeleyecek, hızlı çözümler üretilmesini yavaşlatacaktır. Tedarikçi ilişkileri zedelenir ise sevklerde sorunlar ve maliyetlerde artışlar söz konusu olacaktır. Doğru tahminleme ile yapılacak planlar, kapasiteleri verimli kullanır, iş gücünü verimli kullanır ve yönetir, şirketlerin makine ekipman kullanımlarını en verimli şekilde kullandırmasını sağlar.

Üretimin sürekliliği, fabrikaların maliyet kayıplarının önüne geçer. Tahminlemenin hatalı yapılması ile planlamanın doğru yapılmadığı durumda üretim süreçlerinde sürekli aksaklıklar olacaktır. İşgücü, enerji, makine ekipman gibi verimsizliklere yok açarak şirketlerin maliyetlerini arttıracaktır.

Şirketler doğru tahminleme yönteminin hangisi olacağını seçerken en önemli mesele veri yapısı ve bulunduğu sektörün dinamikleridir. Gelecekte o sektör ile gelişmeleri de göz önüne alması gerekmektedir.

Tahmin yönteminin bir kere seçilmiş olması aslında sürekli aynı kalacağı anlamına gelmez. Durağan bir süreç ve her sene aynı yöntem ile ilerlenecek statik bir olay değildir. Sektörün nereye gittiği, seçilen yöntemin ne kadar doğru olduğu ve geçmiş yıllar ile karşılaştırılarak sürekli canlı takip edilmesi gereken bir süreçtir. Tabi ilerleyen teknoloji ile bu tahminlemeler yazılım yavaş yavaş artık hayatımızın içerisine girmesi ile daha teknoloji destekli tahminlemeler sağlanabilir. Şirketlerin bu alana yatırım yapmaları ve iş gücü olarak yine yatırımları desteklemelerinde fayda olacaktır.

Taleplerin tahminlenmesi ve sonrasında yapılacak olan üretim ve malzeme planları, sadece bu departmanın, tüm şirketin ve zincirin koordine etmesi ve tüm bölümlerin entegre olarak çalışması gereken bir durumdur.

Gelecek için, sürdürülebilirlik için, rekabet gücünü korumak ve doğru kararlar almak için doğru tahminleme

yapılmalı, doğru bir üretim planlaması ve malzeme ihtiyaç planlaması yapılması zorunluluktur.

KAYNAKÇA

- Akdi, Y. (2003). Zaman Serileri Analizi: Birim Kökler ve Kointegrasyon. Ankara: Bıçaklar Kitabevi.
- Akgüç, Ö. (1998). Finansal Yönetim. İstanbul: Avcıol Basım-Yayın.
- Akgül, F. (2011). Zaman Serilerinde Kointegrasyon ve Yapısal Kırılma Analizleri Üzerine Bazı Uygulamalar. Yüksek Lisans. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Akgül, I. (2003). Zaman Serilerinin Analizi ve ARIMA Modelleri. . İstanbul: Der Yayınları.
- Aydemir, A. B. (1998). Finansal Yönetim ve Analiz. . İstanbul: Avcıol Basım Yayın.
- Çuhadar, M. T., & Erdemir. (2014). Tahmin Yöntemleri ve Uygulamaları. Ankara: Nobel Yayınları.
- Dedeoglu, T. &. (2021). Sağlık sektöründe hasta talebinin tahmini. Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi E-Dergi, 25-38.
- Erdemir, Ö., & Çuhadar, M. T. (2014). Tahmin Yöntemleri ve Uygulamaları. Ankara: Nobel Yayınları.
- Kabak, Ö., & Ülengin, F. (2011). Talep Tahmini ve Stok Yönetimi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- Karabıyık, L. (2012). Tedarik Zinciri Yönetimi ve Lojistik: Stratejik Yönetim ve Planlama. Bursa: Ekin Yayınevi.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). Forecasting Methods and Applications. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Özcömert, V. B. (2016). Sağlık alanında zaman serileri analiz yöntemlerinin kullanılması ve modellerin

karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi. Mersin: MÜ Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

Paksoy, T. (2005). Tedarik Zinciriyönetiminde Dağıtım Ağlarının Tasarımı Ve Optimizasyonu: Malzeme İhtiyaç Kısıtı Altında Stratejik Bir Üretim-Dağıtım Modeli. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 435-454.

Silver, E. A., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). Inventory Management and Production Planning and Scheduling. New Jersey: John Wiley & Sons.

Stevenson, W. J. (2018). Operations Management. New York: McGraw-Hill Education.

Üreten, S. (2000). Üretim Planlaması ve Kontrolü. Ankara: Nobel Yayınları.

OPTIMIZATION OF HYDROGEN EVOLUTION USING FeCrNi MESH ELECTRODE IN ALKALINE ELECTROLYSIS: RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Ceyla GÜNGÖR¹

Mehmet Erman MERT²

Başak DOĞRU MERT³

1. INTRODUCTION

The synthesis of critical molecules requires the generation of hydrogen, which is not only an energy transporter but also an important component. Hydrogen is named as an energy carrier because of its effective energy storage and transportation capabilities, especially when it comes to renewable energy sources where it may be utilized to balance supply and demand [1, 2]. Beyond its energy-related use, hydrogen is essential to the chemical industry. It is an important feedstock for the Haber-Bosch process, which produces ammonia (NH₃) and is essential for producing fertilizers that sustain world agriculture [3, 4]. Hydrogen is also needed for the production of methanol, which is a fundamental component of many other compounds and

¹ Doç. Dr., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, cozgur@atu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4072-6784.

² Doç. Dr., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi, memert@atu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0114-8707.

³ Prof. Dr., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, bdogrumert@atu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2270-9032.

materials, as well as for the refining procedures that raise the caliber of petroleum products [5, 6]. Thus, hydrogen's significance extends far beyond energy, underpinning various industrial processes that are vital for modern society's functioning and development. There are various ways to generate hydrogen, and each has unique benefits and uses. Steam methane reforming (SMR), coal gasification, partial oxidation of hydrocarbons, and water electrolysis are the main techniques [7, 8]. The most popular technique, known as steam-methane reaction (SMR), creates carbon dioxide and hydrogen when methane reacts with steam [9]. Hydrocarbons and coal are similarly broken down to produce hydrogen through partial oxidation and coal gasification, respectively. On the other hand, electrolysis produces no direct carbon emissions and uses an electric current to split water into hydrogen and oxygen. Because electrolysis can create green hydrogen when driven by renewable energy sources, it is extremely relevant [10]. A popular method with high durability and efficiency, alkaline electrolysis uses a liquid alkaline electrolyte solution to conduct electricity. This technique is an environmentally sustainable choice since it can produce hydrogen without releasing greenhouse emissions when it is connected to the grid and fueled by renewable energy sources like solar or wind power. Because it enables the integration of variable renewable energy sources into the energy system by storing excess energy in the form of hydrogen, this capability is critical to the global transition to clean energy. Furthermore, industries like heavy manufacturing and transportation that are difficult to electrify can be decarbonized with the help of green hydrogen [11, 12]. Therefore, the most promising technique for producing hydrogen sustainably and by efforts to reduce climate change and advance energy security is electrolysis, particularly alkaline electrolysis fueled by renewable energy sources. Liu et al. [13] investigate the impact of porous structure on the performance of alkaline electrolytic water splitting through experiments and multi-

physics field simulation. Specifically, the research focuses on the whole-cell performance test and hydrogen-evolution reaction (HER) test of nickel foam in an electrolytic cell using 1 M KOH [14, 15].

The results indicate that various electrode structure parameters, such as specific surface area, pore density, thickness, and electronic conductivity, significantly influence hydrogen evolution. Increasing the specific surface area or pore density enhances hydrogen evolution under conventional voltage while reducing thickness has a similar effect. Moreover, materials with high conductivity increase the reaction rate. The optimal nickel foam cathode structure identified was 1000 μm thickness and 75 PPI pore density. Stability tests and electrolysis voltage efficiency analysis further support the positive impact of this structure on hydrogen evolution. This study provides valuable insights for designing efficient and stable porous electrode structures.

Esfandiari et al. [16] aims to identify the key challenges associated with the stability of hydrogen evolution reaction (HER) electrodes and provide a comprehensive understanding of various cathodic degradation mechanisms. The study considers genuine conditions encountered by cathodes in the industrial sector, with a focus on Fe-based materials, which are favorable and economical, and examines the deterioration mechanisms of Ni-based counterparts, including advanced materials. The limitations of using the E-pH diagram, a common tool for predicting stable phases under specific conditions, are also discussed. Additionally, the cost implications of developing alkaline water electrolyzer stacks are considered. They declared that currently, alkaline water electrolyzers operate from 60,000 to 90,000 h with plans to extend their lifetime to over 100,000 h by 2050. They observed that the current electrocatalytic activity of Raney Ni towards the hydrogen evolution reaction leads to a

cathodic over potential of approximately 100 mV at 100 °C and 500 mA cm⁻².

Different optimization methodologies are employed to utilize test results for modeling and analyzing the system [17]. ANN, RSM, Taguchi, and genetic algorithms are a few of the most popular artificial intelligence-based computer programs for optimization [18]. Response Surface Methodology (RSM) is a statistical and mathematical technique that is widely applied in many industries, including manufacturing, chemistry, and engineering [19, 20]. One of the most important advantages of RSM is that it saves money and time by reducing the number of experiments [21, 22]. RSM techniques have been utilized in a few studies in hydrogen production [23-25].

2. MATERIAL METHOD

2.1.Characterization and Experimental Part

The electrochemical tests are realized by using the FeCrNi mesh electrode as a cathode. This electrode was symbolized as ME. The electrode surface was 1x1 cm². To activate the ME surface, the 10 mA cm⁻² constant cathodic current was applied for 60 s in 1 M KOH before the electrolysis. Then electrolysis was obtained with a two-electrode configuration with 3 different constant cathodic current density values (50; 100 and 150 mA cm⁻²). In this system, the Pt electrode with a 2 cm² surface area was used as the anode, ME was used as a cathode. The electrolysis was achieved for 3 different temperatures (20; 25 and 30 °C). The electrochemical test solutions were obtained from analytical grade KOH in distilled water. 1 M KOH electrolyte was added into the graduated cylinder, and immersed in a glass beaker and gas volume was detected in this system. The volume correction was done vs vaporization of water on the test temperature. To obtain surface analysis results, the Leo 440 SEM device was used.

An energy-dispersive X-ray (EDX) detector was coupled to the device.

2.2.RSM Analysis

A design of experiments (DOE) was built using the Minitab 22 statistical software (trial version) to determine the most influential factors, their interactions, and the best set of test points. Response surface methodology (RSM), is a statistical technique that involves examining the results of several tests to create a mathematical model. This model is used to optimize the variables for the optimal response, and the experimental results are entirely in agreement [26]. The temperature (X_1), and current density (X_2) are the independent factors that were studied in this study. Hydrogen production was the only response variable that was used. Table 1 lists the 13 planned runs, and a quadratic model fits all of the experimental data that were gathered from the planned experiments.

Table 1. Independent Parameters and Their Corresponding Levels

Symbol	Parameter	Unit	Level		
			-1	0	+1
X_1	Current density	mA cm ⁻²	50	100	15
X_2	Temperature	°C	20	25	30

13 empirical trials were carried out on the system to gather the responses. The first stage of RSM involves establishing an appropriate correlation between input and output parameters. For this correlation, a second-order equation model is applied as shown in Eq. 1. [27].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

Y is a response, β_0 is the constant coefficient, X_i are the main factors, β_{ii} , β_{ij} , are the linear, quadratic, and interaction between the variables i and j coefficients respectively, ε is the residual.

The obtained experimental and predicted values of hydrogen volume are listed in Table 2. The experimental quadratic polynomial model presented below was utilized to predict hydrogen volume by fitting the experimental results.

Table 2. Hydrogen Production Tests Comparison Between Predicted and Experimental Values

No	X ₁ :Current density (mA cm ⁻²)	X ₂ :Temperature (°C)	Experimental Hydrogen volume (ml)	RSM Hydrogen volume (ml)
1	150	20	57.60	57.50
2	150	25	57.89	57.92
3	50	20	18.39	18.26
4	50	25	18.59	18.68
5	100	25	39.20	39.17
6	100	25	39.20	39.17
7	150	30	58.27	58.33
8	100	30	39.69	39.59
9	100	25	39.20	39.17
10	50	30	19.07	19.10
11	100	25	39.20	39.17
12	100	25	39.20	39.17
13	100	20	38.53	38.75

2.3.Desirability

Harrington introduced the desirability function as a method for optimizing multiple responses, and it has since been extensively employed to optimize multiple responses simultaneously [28]. Every response was converted into a dimensionless desirability value (d), which varies between d = 0, implying the response was entirely unacceptable, and d = 1, implying the response was more favorable [29]. It's essential to either maximize, minimize, or keep a constant value for the response variable being optimized to ensure the accuracy of comparisons made with measurement outcomes. As a result, researchers establish the "response target" when developing the RSM model [30].

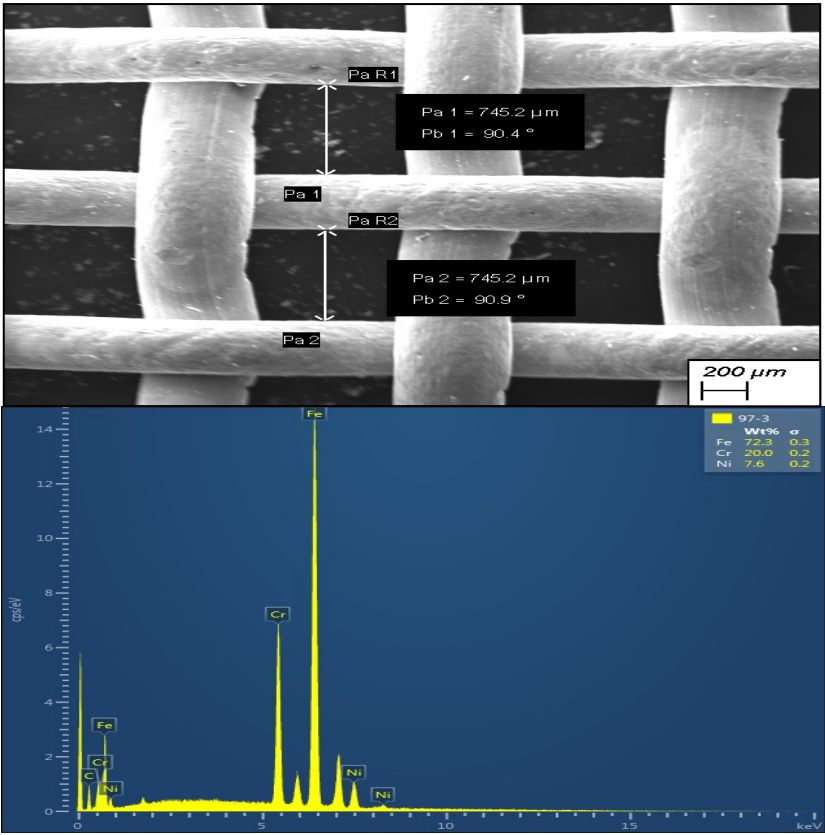
3. RESULTS DISCUSSION

3.1.Characterization of Electrode and Hydrogen Production Experiments

There are numerous important benefits to using a FeCrNi mesh electrode (ME) as the cathode in HER alkaline electrolysis. First of all, a high surface area offered by the mesh structure boosts catalytic activity and speeds up the synthesis of hydrogen. For the electrode to last a long time and be durable, iron (Fe), chromium (Cr), and nickel (Ni) should be incorporated into the electrode material to ensure good electrochemical stability and corrosion resistance in alkaline settings. Furthermore, as compared to conventional electrodes, the synergistic activity of these metals improves catalytic performance and electrical conductivity. Due to its characteristics, the ME is a very affordable and efficient option for HER in alkaline electrolysis, which could result in the development of more environmentally friendly and commercially successful hydrogen generation methods. As seen from Figure 1, the mesh holes were almost 745 μm . This size is beneficial for hydrogen gas evolution as it allows for efficient gas bubble detachment and reduces mass transfer resistance. The large mesh holes facilitate the escape of hydrogen gas bubbles formed during the electrolysis process, preventing their accumulation on the electrode surface. This enhances the overall efficiency of the hydrogen evolution reaction by maintaining optimal contact between the electrode and the electrolyte, ensuring consistent and effective catalytic activity. According to EDX analysis, the elemental composition (wt%) of Fe, Cr, and Ni was 72.3, 20, and 7.6, respectively. The high iron content (72.3 wt%) in the FeCrNi mesh electrode significantly reduces the overall cost of the material, making it economically viable for large-scale applications. The presence of chromium (20 wt%) and nickel (7.6 wt%) enhances the catalytic activity of the electrode. Chromium contributes to improved

corrosion resistance, ensuring long-term stability in alkaline environments. Nickel, on the other hand, increases the catalytic efficiency for the hydrogen evolution reaction (HER). The synergistic combination of these elements results in a cost-effective and highly efficient electrode for HER in alkaline electrolysis, balancing both economic and performance considerations effectively.

Figure 1. The SEM-EDX Results of Mesh Electrode



The HER experiments were achieved for 3 different current density values and 3 different temperatures the obtained data were given in Table 3.

Table 3. The Experimental and Theoretical Results of ME in 1 M KOH for 1 h Electrolysis Time

T (°C)	I (mA cm ⁻²)	V H ₂ Theoretical* (mL)	V H ₂ Experimental (mL)
20	50	20.89	18.39
	100	41.79	38.53
	150	62.67	57.60
25	50	20.89	18.59
	100	41.79	39.20
	150	62.67	57.89
30	50	20.89	19.07
	100	41.79	39.69
	150	62.67	58.27

*The theoretical data were derived using Faraday's laws assuming 100% current efficiency.

The obtained data, presented in Table 3, compare the theoretical and experimental volumes of hydrogen gas produced during a 1-hour electrolysis period in 1 M KOH solution using the ME. At 20°C, the experimental hydrogen volumes for current densities of 50, 100, and 150 mA cm⁻² were 18.39 mL, 38.53 mL, and 57.60 mL, respectively, compared to the theoretical values of 20.89 mL, 41.79 mL, and 62.67 mL. Similarly, at 25°C, the experimental hydrogen volumes were 18.59 mL, 39.20 mL, and 57.89 mL for the respective current densities, closely matching the theoretical values. At 30°C, the experimental volumes were 19.07 mL, 39.69 mL, and 58.27 mL for the respective current densities. These results indicate that the experimental hydrogen production volumes are consistently close to the theoretical values, demonstrating the efficacy and reliability of the ME electrode in alkaline electrolysis across various temperatures and current densities.

For alkaline electrolysis with ME, an additional study of Response Surface Methodology (RSM) provides advantages for optimizing HER. The systematic investigation of the interactions between temperature and current density that affect the efficiency of hydrogen production is made easier by RSM. RSM improves

the overall efficiency of the electrolysis process by allowing the discovery of ideal operating parameters through the generation of predictive models. In addition to lowering the requirement for lengthy experimental trials, this method offers insights into the intricate interactions between process factors, assisting in the design of hydrogen production systems that are both more efficient and financially feasible. To develop sustainable and effective energy conversion technologies, RSM is therefore essential to the advancement of knowledge and optimization of HER processes employing ME.

3.2.RSM Model

Numerical evidence about the probability value is obtained through variance analysis (ANOVA) [31]. Using variance analysis (ANOVA), the significant values between the input variables and responses have been obtained. The fact that the R^2 values gathered from RSM for all responses are greater than 0.95 indicates that these results are statistically meaningful. In ANOVA results, the p-value holds significant importance. Generally, a p-value of 0.05 or less is considered significant. Models with p-values exceeding 0.05 are typically deemed insignificant. A factor is considered to have had a significant impact on the model if its p-value is less than 0.05 [32]. Table 4 demonstrates the stability of the model analyzed using ANOVA and the R^2 , adj. R^2 and pred. R^2 values for the model, respectively. According to the table, it is observed that the model's p-value is less than 0.0001. In Response Surface Methodology (RSM), the primary indicators for assessing a model are the R^2 and adjusted R^2 values. R^2 values approaching 1 indicate strong significance, highlighting the model's explanatory power and goodness of fit [33]. Importantly, the fact that the model has R^2 value exceeding 0.9 indicates a strong fit of the regression model to the data. The regression equations acquired from the model for hydrogen volume is given below in Eq. 2:

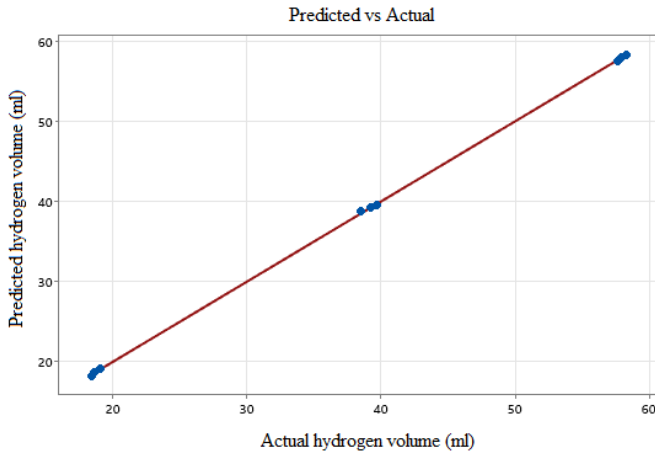
$$\text{Volume} = -5.71 + 0.46237X_1 + 0.088X_2 - 0.00348X_1^2 - 0.00008X_2^2 - 0.00001X_1X_2 \quad (2)$$

Table 4. Variance Analysis (ANOVA)

	Hydrogen volume (ml)		
Source	F-value	P-value	
Model	31018.36	0.000	Significant
X ₁ -Current density (mA cm ⁻²)	154856.41	0.000	
X ₂ -Temperature (°C)	70.41	0.000	
X ₁ ²	140.80	0.000	
X ₂ ²	0.00	0.968	
X ₁ X ₂	0.00	0.968	
Model	Hydrogen volume (ml)		
R ²	99.02%		
Adj. R ²	98.33%		
Pred. R ²	90.32%		

Hydrogen volume was compared between experimental and predicted values to assess the success of the RSM model. As seen in Figure 2, response distribution is along or close to a straight line.

Figure 2. Comparison of Predicted and Experimental Values of Hydrogen Volume



The Pareto chart displays the absolute magnitudes of the standardized impacts arranged from the most significant to the

least significant. Additionally, it includes the vertical dashed red line established by the model to highlight the statistically significant effects. If the bar graph representing selected variables lies to the right of this line, it signifies effectiveness; conversely, if it falls to the left, it denotes ineffectiveness. Figure 3 demonstrates the Pareto chart of hydrogen volume. According to Figure 3, the impact of current density seems to be more significant for hydrogen volume.

The 3D surface plot in Figure 4 illustrates how hydrogen production varies with current density and temperature. As you can see in Figure 4, the hydrogen volume increases as the current density increases

Figure 3. Pareto Charts for Hydrogen Volume

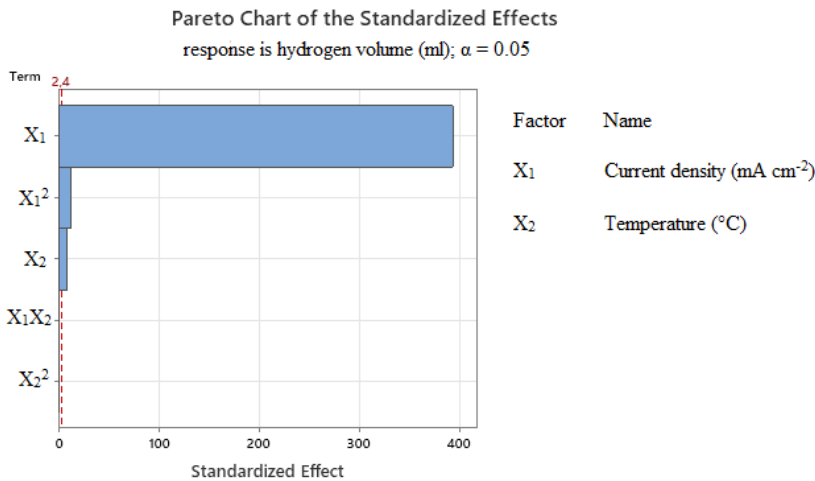
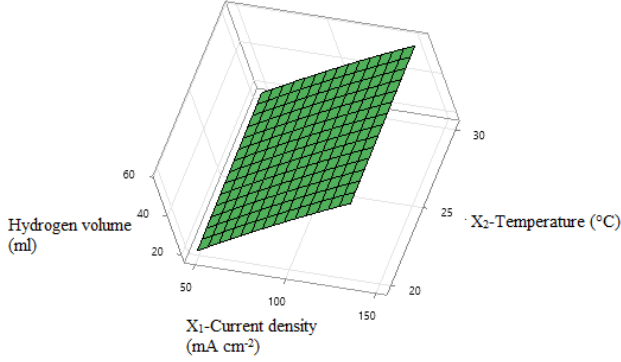


Figure 4. 3D Surface Plot for Hydrogen Volume Versus Current Density and Temperature



3.3.Optimization and Validation

RSM (Response Surface Methodology) is a statistical technique used for optimizing processes and finding the best combination of input variables to achieve desired outputs. Table 5 provides the goals set for each response, the lower and upper limits used, the weights, and the importance of the factors, which are optimization criteria. Figure 5 demonstrates the RSM optimizer outcomes. The optimum current density and temperature were found as 150 (mA cm⁻²) and 30°C, respectively. Validation tests were performed to evaluate both the model's accuracy and the optimization results. Hydrogen volume was compared with the RSM model prediction as detailed in Table 6. The average percentage error for hydrogen volume was found. Based on this percentage error value, it was concluded that there is no statistically significant difference between the result obtained from the validation test and the predicted outcome.

Table 5. Details of RSM optimization

Response	Goal	Lower	Upper	Weight	Importance
Current density (mA cm ⁻²)	In range	50	150	1	1
Temperature (°C)	In range	20	30	1	1
Hydrogen volume (ml)	Maximum	18.39	58.27	1	1

Figure 5. RSM Optimizer

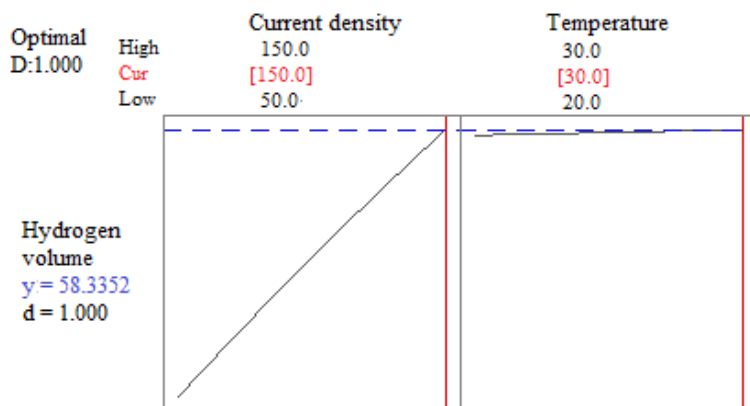


Table 6. Validation tests

Current density (mA cm ⁻²)	Temperature (°C)	Value	Hydrogen volume (ml)
150	30	Optimized	58.33
		Actual	58.27
		Error (%)	0.10

4. CONCLUSION

This study showed the efficiency of FeCrNi mesh electrode (ME) in alkaline electrolysis, employing Response Surface Methodology (RSM) to optimize process parameters. According to SEM and EDX results, the FeCrNi mesh electrode exhibits a well-defined surface morphology with a 72.3, 20, and 7.6% distribution of iron, chromium, and nickel elements,

respectively. Experimental results demonstrated that the electrode consistently performed close to theoretical predictions across varying temperatures and current densities. The stability and reliability behaviors of the ME were underscored by its ability to achieve high hydrogen production efficiencies under different operating conditions. RSM analysis provided insights into the interplay of temperature and current density, facilitating the identification of optimal settings for enhanced hydrogen generation. These findings highlight the potential of ME for efficient and sustainable hydrogen production technologies in alkaline environments.

ACKNOWLEDGEMENTS

Minitab 22 Statistical Software (trial version) was used to design experiments to help find certain responses.

REFERENCES

- [1] Amores, E., Sánchez-Molina, M., Sánchez, M., (2021). Effects of the marine atmosphere on the components of an alkaline water electrolysis cell for hydrogen production, *Results in Engineering* 10, 100235.
- [2] Di Franco, F., Zaffora, A., Pupillo, D., Seminara, B., Pärnamäe, R., Tedesco, M., Santamaria, M., (2024). Optimized base metals electrodeposition on Ni perforated plate type electrodes for high-performance alkaline water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy* 70, 548-56.
- [3] Chen, S., Perathoner, S., Ampelli, C., Centi, G., (2019). Electrochemical dinitrogen activation: To find a sustainable way to produce Ammonia, *Studies in Surface Science and Catalysis* 178, 31-46.
- [4] Zheng, J., Zhou, H., Wang, C.G., Ye, E., Xu, J.W., Loh, X.J., Zheng, Z.L., (2021). Current research progress and perspectives on liquid hydrogen rich molecules in sustainable hydrogen storage, *Energy Storage Materials* 35, 695-722.
- [5] Anwar, S., Khan, F., Zhang, Y., Djire, A., (2021). Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 32284-317.
- [6] Mishra, A., Park, H., El-Mellouhi, F., Suk Han, D., (2024). Seawater electrolysis for hydrogen production: Technological advancements and future perspectives, *Fuel* 361, 130636.
- [7] Awad, M., Said, A., Saad, M.H., Farouk, A., Mahmoud, M.M., Alshammari, M.S., Alghaythi, M.L., Abdel Aleem, S.H.E., Abdelaziz, A.Y., Omar, A.I., (2024). A review of

- water electrolysis for green hydrogen generation considering PV/wind/hybrid/hydropower/geothermal/tidal and wave/biogas energy systems, economic analysis, and its application, Alexandria Engineering Journal 87, 213-39.
- [8] Chen, M., Su, Q., Kitiphatpiboon, N., Zhang, J., Feng, C., Li, S., Zhao, Q., Abudula, A., Ma, Y., Guan, G., (2023). Heterojunction engineering of Ni₃S₂/NiS nanowire for electrochemical hydrogen evolution, Fuel 331, 125794.
- [9] Dincer, I., Rosen, M.A., Al-Zareer, M., (2018). Chemical energy production, Comprehensive Energy Systems 3, 470-520.
- [10] Guo, L., Xie, J., Chen, S., He, Z., Liu, Y., Shi, C., Gao, R., Pan, L., Huang, Z.F., X., Zou, J.J., (2024). Self-supported crystalline-amorphous composites of metal phosphate and NiS for high-performance water electrolysis under industrial conditions, Applied Catalysis B: Environmental 340, 123252.
- [11] Song, Y., Xu, L., Li, J., Taherian, H., Zhang, Y., Liu, D., Li, Z., Hou, G., (2024). Multi-objective optimization and long-term performance evaluation of a hybrid solar-hydrogen energy system with retired electric vehicle batteries for off-grid power and heat supply, International Journal of Hydrogen Energy 62, 867-82.
- [12] Ramakrishnan, S., Delpisheh, M., Convery, C., Niblett, D., Vinothkannan, M., Mamlouk, M., (2024). Offshore green hydrogen production from wind energy: Critical review and perspective, Renewable and Sustainable Energy Reviews 195, 114320.
- [13] Liu, F., Wang, F., Hao, X., Fan, Z., Tan, J., (2024). Effects of foam cathode electrode structure on alkaline water

electrolysis for hydrogen production, Chem Eng Sci 298, 120307.

- [14] Yan, S., Chen, X., Li, W., Zhong, M., Xu, J., Xu, M., Wang, C., Pinna, N., Lu, X., (2024). Highly active and stable alkaline hydrogen evolution electrocatalyst based on Ir-incorporated partially oxidized Ru aerogel under industrial-level current density, Advanced Science 11, 2307061.
- [15] Faïd, A.Y., Foroughi, F., Sunde, S., Pollet, B., (2022). Unveiling hydrogen evolution dependence on KOH concentration for polycrystalline and nanostructured nickel-based catalysts, J Appl Electrochem 52, 1819-26.
- [16] Esfandiari, N., Aliofkhazraei, M., Colli, A.N., Walsh, F.C., Cherevko, S., Kibler, L.A., Elnagar, M.M., Lund, P.D., Zhang, D., Omanovic, S., Lee, J., (2024). Metal-based cathodes for hydrogen production by alkaline water electrolysis: Review of materials, degradation mechanism, and durability tests, Prog Mater Sci 144, 101254.
- [17] Bhan, S., Gautam, R., Singh, P., (2023). Application of response surface approach to optimize CI engine parameters fuelled by newly developed waste cooking biodiesel infused with Al₂O₃ nanoparticle, Environ Prog Sustain 42, 14151.
- [18] Yaman, H., Yeşilyurt, M.K., Uslu, S., (2022). Combined effects of biodiesel – ULSD blends and EGR on performance and emissions of diesel engine using Response surface methodology (RSM), Energy Nexus 7, 100136.
- [19] Yıkılmış, S., (2019). Effect of Thermosonication on Some Bioactive, Sensory Analysis and Microbiological

Properties of Yellow Watermelon Juice Using Response Surface Methodology, BSEU Journal of Science 6(2), 162-179.

- [20] Kumar, S.K., Surakasi, R., Patro, S.G.K., Govil, N., Ramis, M.K., Razak, A., Sharma, P., Alsubih, M., İslam, S., Khan, T.Y.M., Almakayeel, N., Chintakindi, S., (2024). Performance, Combustion, and Emission analysis of diesel engine fuelled with pyrolysis oil blends and n-propyl alcohol-RSM optimization and ML modelling, J. Clean. Prod. 434, 140354.
- [21] Esonye, C., Onukwuli, O.D., Ofoefule, A.U., (2019). Optimization of methyl ester production from Prunus Amygdalus seed oil using response surface methodology and Artificial Neural Networks, Renew. Energy 130, 61-72.
- [22] Kumar, M., Gautam, R., Ansari, N.A., (2024). Optimisation of an experimental and feasibility research on a CRDI diesel engine based on a blend of waste cooking oil and waste plastic oil using RSM: A value addition for disposed waste oil, J Energy Inst.
- [23] Ayodele, B.V., Ghazali, A.A., Yassin, M.Y.M., Abdullah, S., (2019). Optimization of hydrogen production by photocatalytic steam methane reforming over lanthanum modified Titanium (IV) oxide using response surface methodology, Int. J. Hydrog. Energy. 44, 20700-20710.
- [24] Rafiee, M., Bashiri, H., (2020). Application of response surface methodology and dynamic Monte Carlo simulation to study the hydrogen production from formic acid on Ni(100), Materials Science & Engineering B 262, 114729.

- [25] Pourali, M., Esfahani, J.A., (2022). Performance analysis of a micro-scale integrated hydrogen production system by analytical approach, machine learning, and response surface methodology, *Energy* 255, 124553.
- [26] Salahi, F., Zarei-Jelyani, F., Farsi, M., Rahimpour, M.R. (2023). Optimization of hydrogen production by steam methane reforming over Y-promoted Ni/Al₂O₃ catalyst using response surface methodology, *Journal of the Energy Institute*, 108,101208.
- [27] Kahveci, E.E., Taymaz, I., (2022). Hydrogen PEMFC stack performance analysis through experimental study of operating parameters by using response surface methodology (RSM), *Int J Hydrog Energy* 47(24), 12293-12303.
- [28] Aziz, N.A., Awanis, N., Noraziman, S.N., (2018). Modified desirability function for optimization of multiple responses, *J Math Comput Sci* 1(1), 39-54.
- [29] Hirkude, J.B., Padalkar, A.S., (2014). Performance optimization of CI engine fuelled with waste fried oil methyl ester-diesel blend using response surface methodology, *Fuel* 119, 266–73.
- [30] Gokmen, M.S., Dogan, I., Aydogan, H., (2021). Investigation of the Effect of 1-Propanol / Gasoline Fuel Blends on Exhaust Emissions Using Response Surface Methodology, *European Journal of Science and Technology* 24, 67-74.
- [31] Singh, V.K., Ansari, N.A., Sharma, A., Gautam, S., Kumar, M., Singh, Y., (2021). Exhaust gas recirculation effect on the performance of a CRDI diesel engine fuelled with linseed biodiesel/diesel blend through response surface

methodology, Proc Inst Mech Eng C: J Mech Eng Sci 0(0).

- [32] Bharadwaz, Y.D., Rao, B.G., Rao, V.D., Anusha, C., (2016). Improvement of biodiesel methanol blends performance in a variable compression ratio engine using response surface methodology, Alex Eng J 55(2), 1201–9.
- [33] Kumar, T., Mohsin, R., Majid, Z.A., Ghafir, M.F.A., Wash, A.M., (2020). Experimental study of the anti-knock efficiency of high-octane fuels in spark ignited aircraft engine using response surface methodology, Appl Energy 259, 114150.

AKUSTİK ENERJİNİN TIPTA KULLANIMI VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZ YAKLAŞIMLARI

Çağlar CENGİZLER¹

1. GİRİŞ

Vücudun iç yapısına ve işleyişine dair bilgi, tıp pratiğinin kritik unsurlarından birisidir. İnsanlık, tarih boyunca kendi iç yapısını daha iyi anlamak adına pek çok enstrüman geliştirmiştir. Bu enstrümanlardan bazıları, doğrudan incelenmek istenen organik yapıyla etkileşirken, bazıları ise dolaylı etkiler aracılığıyla bilgi sağlamaktadır. Tıpta yaygın olarak kullanılan, eski ve etkin enstrümanlardan biri olan stetoskop, doğrudan bilgi sağlayan, basit yapılı ancak önemli bir örnek olarak gösterilebilir.

Modern tıp teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte, organların işleyişi ve vücudun iç yapısına dair bilgi sağlamak üzere hem gerçek zamanlı hem de gerçek zamanlı olmayan daha gelişmiş ve karmaşık yöntemler geliştirilmiştir. Manyetik rezonans ve röntgen gibi görüntüleme teknikleri ile biyomedikal izleme sistemleri, vücut içi yapıların daha ayrıntılı incelenmesine olanak tanımış, bu sayede klinik karar süreçleri hızlanarak etkinliğini artırmıştır. Modern görüntüleme teknikleri bu noktada karar aşamalarını da optimize etmektedir. Ancak yeni nesil enstrümanların ve pek çok tıbbi görüntüleme modalitesinin yüksek maliyetli olması ve taşınabilirliklerinin sınırlı kalması önemli bir sorundur. Özellikle afet ve kaza gibi acil durumlarda,

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Demokrasi Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Programı, e-mail: caglar.cengizler@idu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6699-5683.

kaynakların kısıtlı olduğu bölgelerde uygun maliyetli ve taşınabilir alternatiflerin mevcudiyeti kritik önem taşımaktadır.

Bu noktada akustik enerji uygun maliyetli, girişimsel olmayan, vücudu zararlı enerjiye maruz bırakmayan ve taşınabilirliği görece olarak kolay olan yaklaşımların geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Akustik enerji yayılan titreşimlerin bir sonucudur ve ses olarak duyumsanmaktadır. Farklı frekanslardaki ses dalgaları enerjiyi iletmek için maddelerin moleküllerini birbirinden farklı karakterde titreştirmektedir. Akustik enerji ilerlediği ortamda hem işitsel hem de işitsel olmayan frekanslar aralığında olabilir. Yayılma ve sönümlenme şekli içinde ilerlediği ortamın fiziksel karakteristiğine bağlı olarak değişmektedir. Akustik enerji, tıpta vücudun içyapılarının görüntülenmesinde, kemiklerin biyomekanik özelliklerinin incelenmesinde veya doku anomalilerinin tespit edilmesinde kullanım bulmuştur. Modern pratikte en yaygınlaşmış ve gelişmiş kullanımlarından birisi ultrasonografidir. Yüksek frekanslı ses dalgaları hem içyapının görüntülenmesinde hem de doppler etkisi sayesinde akışkanların damar içindeki hareketinin izlenmesinde kullanılabilir. Akustik enerjinin tıbbi amaçla kullanılmasında rol oynayan temel kaynaklardan birisi de diyapazonlardır. Genellikle çatalı andıran bu metal gereç vuruş gibi fiziksel bir etkiye cevap olarak frekansı önceden ayarlanmış saf bir ses dalgası üretebilmektedir. Bu ses referans olarak kullanılabilirliği gibi vücudun belli frekans aralıklarına spesifik tepki veren kısımlarının biyomekanik özelliklerinin araştırılması için de kullanılabilir. Örneğin diyapazon ile test tekniği kemik kırığı ya da iç deformasyonlar hakkında bilgi edinmek için geliştirilmiş yaklaşımlardan birisidir. Bu test ilgili bölgeye yerleştirilen stetoskop aracılığı ile diyapazon sesinin dinlenerek ses değişimi aranmasına dayanmaktadır (Munthugan ve ark., 2014). Literatürde, duyulabilir aralıktaki seslerin organik yapının

içinden geçerken uğradıkları değişimlerin, ilgili bölgenin biyomekanik özellikleriyle bağlantılı olabileceği ortaya konmaktadır. Bir başka yaklaşım ise diyaazonun yarattığı titreşimlerin hastaya verdiği acının gözlenmesine dayanmaktadır. Ayrıca geçmişten günümüze diyaazonlar odyoloji testlerinde kullanılmak üzere önemli bir ses kaynağı olarak literatüre geçmiştir (Yüksel ve Kemaloğlu, 2015).

Yapılan önceki çalışmalar göstermektedir ki vücudun içyapısı, özellikle kemik doku dışarıdan uygulanan titreşimlere belli karakterde cevap vermektedir (Saha ve Lakes, 1977). Ayrıca bu karakterin abnormalite durumunda değişiklik gösterdiği ve bu değişikliğin teşhis için kullanılabileceği ileri sürülmektedir (Bediz ve ark., 2010). Ayrıca kemikteki iyileşmenin takibi için ilgili bölgenin titreşimlere verdiği cevabın etkin olabileceği önceki çalışmalarda vurgulanmıştır (Vien ve ark., 2022). Bu noktada radyografik görüntüleme imkanının bulunmadığı durumlarda spesifik frekansta ses dalgası yayan bir diyaazonun kemik kırığı tanısı için işlevsel olabileceği ortaya konmuştur (Moore, 2009). Önerilen yaklaşım stetoskop ile dinlemeye ve değişen karakteri tanımaya dayanmaktadır (Toney ve ark., 2016). Spesifik özelliklerde bir ses dalgasının dokunun içinden geçip giderken uğradığı değişimin karakteri ile dokudaki abnormalitenin ilişkilendirilmesine dair literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Örnek bir çalışmada sabit frekanslı bir ses dalgası dokudan geçtikten sonra tekrar yakalanarak bilgisayar ortamında analiz edilmiş ve kemik kırığının yarattığı spektral farklılık ortaya konmuştur (Qadir ve ark., 2018). Bu çalışmada literatürde ortaya konmuş bu karakter farklılığının makine öğrenimi ile tanınması hedeflenmektedir. Bu noktada kılavuzsuz kümeleme titreşim karakterine dayalı teşhis için adapte edilmiş yaklaşımlardan birisidir (Ali ve ark., 2016). Bir başka çalışmada eğitilmiş bir makine öğrenimi yaklaşımı olan yapay sinir ağları Osteoporoz teşhisi için adapte edilmiştir. Bu

çalışmada kemiğe uygulanan ani darbenin sesi stetoskopla yakalanarak tanılama için kullanılmıştır (Scanlan ve ark., 2018). Görülmektedir ki literatürde sönümlenme ve titreşim karakterine bağlı tanılamamanın mümkün olabileceği vurgulanmaktadır.

Gelişen bilgi işlem teknolojileri hem vücut kaynaklı seslerin tanılanması hem de bir dış kaynaktan vücuda uygulanan akustik uyarının uğradığı değişikliklerin anlaşılmasını sağlayacak yeni imkânlar yaratmaktadır. Bu noktada önerilmekte olan yaklaşımlar yeni görüntüleme modalitelerinin önünü açtığı gibi bilgisayar destekli teşhis için de pratik ve düşük maliyetli uygulamaların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

2. BİLGİSAYAR DESTEKLİ AKUSTİK ANALİZİN TIBBİ UYGULAMALARI

Ses odaklı tıbbi bilgi edinimi hem doğrudan vücut orijinli seslerin sınıflandırılmasını hem de başka kaynaklardan vücuda uygulanmış akustik enerjinin analizini kapsamaktadır. Gelişen bilgi işlem teknolojileri ve makine öğrenimi yaklaşımları iki kategorideki teşhis problemleri için işlevsel olabilmektedir.

Kaynağı insan vücudu olan sesler, insan fizyolojisinin ve iç işleyişinin anlaşılmasında doğrudan ya da dolaylı bilgi sağlayarak tıbbi karar verme süreçlerinde kritik bir rol oynayabilmektedir. En yaygın ve bilinen örneklerden biri, stetoskopla dinlenen kalp atış sesleridir. Kalp atışlarının düzeni, şiddeti ve ritmi, kardiyovasküler sistemin işleyişi hakkında önemli ipuçları sunar. Bunun yanı sıra, damar içindeki kan akışının çıkardığı üfleme sesleri, kan akışındaki olası anomalilerin (örneğin, damar tıkanıklıkları) tespitinde kullanılır. Örnek bir çalışmada araştırmacılar ayırık dalgacık dönüşümü ve yapay sinir ağı tabanlı sınıflandırma kullanarak kalp atış seslerini bölütlemeye ihtiyaç duymadan tanımlayabilen bir yaklaşım

geliştirmişlerdir (Sumeth ve Akinori, 2011). Bir başka benzer çalışmada yazarlar kalp üfürümü tespit edilmiş çocuklar ile oluşturdukları deney grubunda, değişken kalp ritmine rağmen yüksek başarı ile kalp seslerinin yakalanmasını otomatize etmeyi başarmışlardır (El-Segaier ve ark., 2005). Ayrıca en gelişmiş makine öğrenimi yaklaşımlarından birisi olan derin öğrenme metodu ilgili bir araştırmada hem kalp seslerinin otomatik bölütlenmesi hem de sınıflandırılması için adapte edilmiştir. Yazarlar yayınladıkları çalışmada 0.964 doğruluk ile yaklaşımlarının tanılama yapabildiğini bildirmektedirler (He ve ark., 2021).

Kardiyovasküler seslere ek olarak gastroenterolojik sesler de bağırsak hareketleri ve sindirim sistemi işleyişine dair bilgi sağlayarak, çeşitli gastrointestinal hastalıkların teşhisinde destekleyici rol oynayabilmektedir. Bu noktada bağırsak seslerinin analizi birçok patoloji senaryosunda kritik önem taşıyabilmektedir. Bir çalışmada sayısal bağırsak sesleri mel-frekans kepsral katsayıları ve uzun-kısa süreli hafıza yaklaşımları uygulanarak analiz edilmiş, total aktivite miktarı ve aktivite bölgelerinin zamanı yüksek doğrulukla kestirilmiştir (Liu ve ark., 2018). Benzer bir araştırmada bağırsak sesleri arka plan gürültüsünden zaman domeninde uygulanan basıklık tabanlı bir detektörle ayrılmıştır (Hadjileontiadis ve ark., 2003).

Anne karnından toplanan fetal sesler de karar aşamalarını etkileyebilecek önemli akustik veri kaynaklarından birisidir. Bu sesler fetüsün sağlığı ve gelişimi hakkında önemli veriler sunarak doğum öncesi süreçlere katkı sağlamaktadır. 2019 yılında yayınlanan bir çalışmada fetal fonokardiyogram sinyallerindeki gürültü azaltımı ve fetal kalp atış hızının kestirimi için farklı dalgacık dönüşümü tabanlı filtreler karşılaştırılmıştır. Raporlanan sonuçlara göre 4. derece Coiflet ana dalgacığı ile yumuşak eşikleme ve evrensel algoritma kombinasyonu en iyi filtreleme performansını göstermektedir (Tomassini ve ark., 2019). Ek

olarak yapılan son çalışmalar göstermektedir ki yeni doğanların ağlama seslerinin spektral karakteri olası patolojilere ve bu patolojilerin ciddiyetine dair bilgi sağlama potansiyeline sahiptir. Yapılan bir çalışma bebek ağlama seslerinin spektral karakterindeki bazı değişikliklerin hipoksik iskemik ensefalopati ile ilgili olabileceğini ortaya koymuştur (Satar ve ark., 2022).

Kaynağı insan vücudu olmayan akustik enerjinin en yaygın tıbbi kullanım alanlarından birisi ultrasonografidir. Ultrasonografide, dokulardan yansıyan yüksek frekanslı ses dalgaları analiz edilmektedir. Bu yaklaşım özellikle yumuşak dokuların görüntülenmesi için girişimsel olmayan, taşınabilir ve nispeten düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Özellikle gebelik takibi, karaciğer ve böbreklerin değerlendirilmesi gibi birçok farklı tıbbi amaçla dünya çapında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bir araştırmada genetik algoritma tabanlı bir yaklaşımla omurga hasarı bulunan ultrason görüntülerinde omurga aksının deformasyona rağmen bilgisayar tarafından otomatik tespiti gerçekleştirilmiştir (Cengizler ve ark., 2021). Bu noktada yüksek enerjili ses dalgaları sadece bilgi sağlamak için değil aynı zamanda tedavi amacı ile de kullanılabildiği not edilmelidir. En yaygın örneklerden birisi ekstrakorporeal şok dalga tedavisidir. Bu yaklaşımda şok dalgaları tedavi edilecek bölgeye odaklanmalıdır. Doku iyileşmelerini hızlandırabildiği gibi, ağrıyı azaltmak veya bölgedeki inflamasyonu gidermek için de etkin şekilde uygulanabilmektedir. Bir araştırmada araştırmacılar kronik plantar fasiit tedavisinde ekstrakorporeal şok dalga terapisinin başarılı olup olmayacağını öngörmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada bir yapay sinir ağı modeli kullanılarak önemli prognostik faktörler belirlemiş ve yüksek doğruluk oranıyla kestirim yapabilen bir mekanizma sunulmuştur (Yin ve ark., 2019). Ayrıca suni akustik enerji vibroakustik terapi ve akustik mikroskopi ve tümör tedavisi gibi alanlarda kullanım bulabilmektedir.

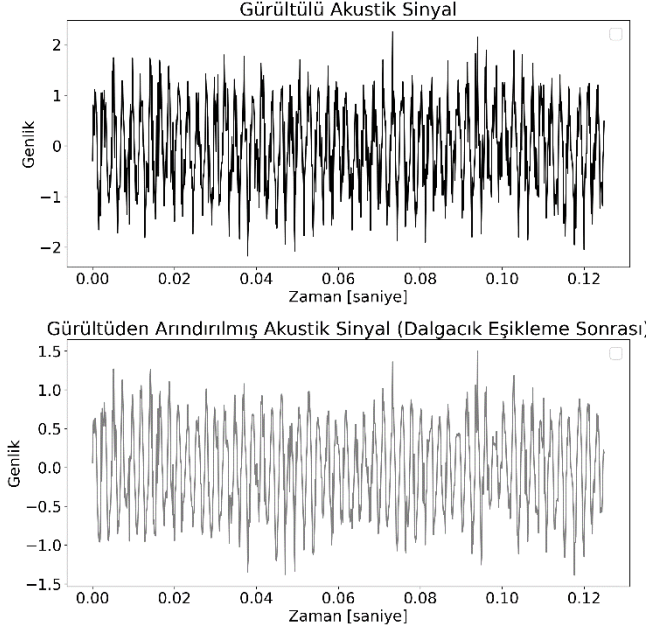
Akustik enerjinin etkin kullanımı için geçmişten günümüze pek çok bilgisayar destekli analiz mekanizması geliştirilmiştir. Akustik sinyallerin analizi, sinyalin içerdiği bilgiyi ortaya çıkarmak için birçok farklı tekniğin kullanılmasını gerektirebilmektedir. Bu analiz yöntemleri, sinyalin frekans ve zaman domenlerindeki özelliklerini inceleyerek, tıbbi tanı ve sınıflandırma süreçlerinde önemli bir rol oynar. Bu noktada akustik enerjinin spektral karakterinin ortaya çıkarılması geniş bir skaladaki tanılama, kestirim veya sınıflandırma görevlerinin güçlü makine öğrenimi yaklaşımları sayesinde yüksek doğrulukla tamamlanabilmesi adına büyük önem arz etmektedir.

3. AKUSTİK ETKİNİN BİLGİSAYAR TABANLI SPEKTRAL ANALİZİ

3.1.Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Bu dönüşüm sinyalin hem zaman hem de frekans bilgisini içeren bir zaman-frekans gösterimini sağlamaktadır. Fourier dönüşümünde olduğu gibi sadece frekans domenine dair bilgi sağlamak yerine sinyalin hangi zaman aralıklarında belirli frekans bileşenlerinin bulunduğunu da göstermektedir Özellikle EKG sinyallerinin analizinde yaygın kullanım bulmuş bir yaklaşımdır. Bu dönüşüm, sinyalin ana dalgacığının zaman ekseninde kaydırılmış ve ölçeklenmiş versiyonları ile çarpılması ve tüm zaman boyunca integralinin hesaplanması ile gerçekleştirilmektedir (Tepe ve Sezgin, 2017). Şekil 1’de temsili bir tek bileşenli akustik sinyalin ayrık dalgacık dönüşümü ile gürültüden arındırılması gösterilmiştir.

Şekil 1. Ayırık dalgacık dönüşümü yaklaşımı ile gürültüden arındırılmış temsili bir akustik sinyal görülmektedir.



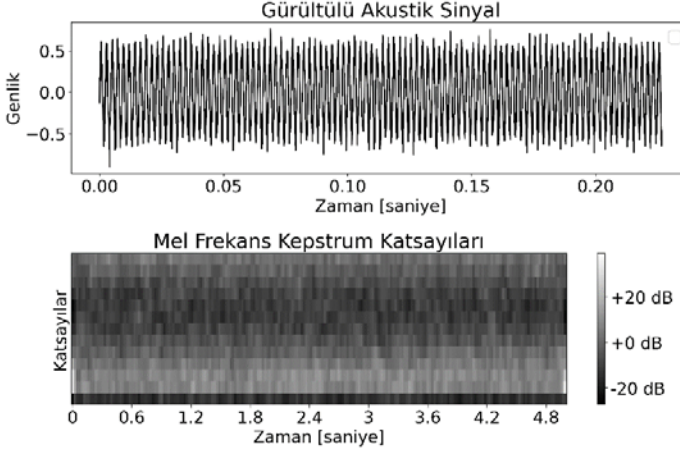
Kalp sesleri, gastrointestinal sesler gibi fizyolojik sinyallerin analizinde, ayırık dalgacık dönüşümünün zaman-frekans çözünürlüğü avantajı sayesinde sinyaldeki anlık değişiklikler yakalanabilir. Olası patolojilerin tespiti için bu önemli bir avantajdır.

3.2.Mel Frekans Kepstrum Katsayıları

Akustik olay tanılama için yaygın kullanım bulan bu spektral özellik, insan kulağının sesleri algılayışını taklit etmek üzere geliştirilmiş matematiksel bir yaklaşımdır (Eskidere ve Ertaş, 2009). Bu yöntemde, ses sinyali bir dizi zaman penceresine bölünür ve her pencere içinde sinyalin frekans bileşenleri analiz edilir (Karhan ve ark., 2016). Mel frekans ölçeği, insan işitme sistemine yakın bir ölçektir; görece düşük frekanslara yüksek hassasiyet gösterirken, yüksek frekanslardaki ayırt ediciliği

azalmaktadır. Şekil 2’de gürültü eklenmiş bir sentetik akustik sinyal ve Mel Frekans Kepstrum Katsayıları grafiği verilmiştir.

Şekil 2. Gürültü eklenmiş bir sentetik akustik sinyal ve Mel Frekans Kepstrum Katsayılarının grafikleri görülmektedir.



3.3.Gammatone Kepstral Katsayıları

Gammatone Kepstral Katsayıları akustik etkinin spektral karakterinin insan duyu algısına daha yakın bir şekilde analiz edilmesini sağlayan bir spektral özellik çıkarımı yaklaşımıdır. Buna göre metodolojik açıdan bu özelliğin hesaplanması Mel Frekans Kepstrum Katsayıları'na benzemektedir ancak daha geniş bir frekans bandında etkin şekilde kullanılabilir. Buna göre benzer şekilde ilk adımda ses sinyallerine pencereleme işlemi uygulanır. Ardından, Fourier dönüşümü uygulanmış sinyale Gammatone filtre bankaları uygulanarak, en önemli frekansların ayırt edilmesi sağlanır. Bu sayede ses frekanslarına daha doğru bir ağırlık vererek sesin ton yapısını daha iyi yakalar (Balli, 2022).

3.4.Spektral Şekil Analizi

Frekans spektrumu Fourier dönüşümü aracılığı ile inşa edilen bir sinyal karakterizasyonu işlemidir. Karmaşık akustik

sinyallerin hangi frekanslarda yoğunlaştığını ve frekans domenindeki karakterini gösteren güçlü bir analiz yaklaşımıdır. Buna göre spektral şekil analizi frekans spektrumunun geometrik özelliklerinin incelenmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde pek çok farklı kaynaktan elde edilmiş ses sinyallerinin sınıflandırılması, tanınması, görüntüleme ve abnormalite tespitinde kullanımı mümkün olmaktadır.

Spektral şekli nitelemede kullanılan pek çok özellik bulunmaktadır. Bunlardan yaygın olarak kullanılanlardan birisi de spektral merkezdir. Bu özelliği spektrumun ağırlık merkezi olarak tanımlamak mümkündür. Spektral merkez, sesin parlaklık algısıyla yakından ilişkilendirilebilir ve yüksek bir merkez genellikle akustik sinyalin yüksek frekanslarda daha fazla enerjiye sahip olduğunu işaret eder (Kulkarni, 2018).

Bir başka yaygın spektral şekil niteleyicisi spektral genişliktir. Ses sinyalinin yoğunlaştığı frekansların spektrum boyunca ne kadar dağıldığını nitelemektedir. Buna göre bu özelliğin düşük değeri dar bir frekans bandına yoğunlaşmış sinyalleri ifade etmektedir.

Spektral entropi yine ses sinyalinin frekans domenini karakterize etmekte yaygın şekilde kullanılan özelliklerden birisidir. Bu özellik sinyalin rastgeleliğini niteler ve yükselmiş bir entropi değeri sinyalin kompleksitesinin arttığını göstermektedir (Kulkarni, 2018).

Bu özelliklere ek olarak spektrumun simetrikliği, sivrililiği ve eğimi de akustik enerjinin diskriminize edilmesinde ve özellik çıkarımı sürecinde tercih edilen bazı karakteristik özelliklerdir.

4. MAKİNE ÖĞRENİMİNİN AKUSTİK ANALİZ UYGULAMALARI

4.1.Yapay Sinir Ağları

Doğrusal olmayan sınıflandırma ve tanılama görevlerinin bilgisayara yaptırılabilmesi pek çok tıbbi problemin çözümünü kolaylaştırmıştır. Buna göre koşullara göre akışı belirlenen konvansiyonel algoritmik yaklaşımlar gerçek dünya problemlerinin çözümünde yetersiz kalabilmektedir. Yapay sinir ağları yaklaşımı ve makine öğrenimi teknikleri sınırları belli mekanik karar verme yöntemlerinin aksine tıp dünyasına genelleme yeteneğine sahip, gürültüye rağmen örüntüleri yakalayabilen otomatik sınıflandırma mekanizmaları kazandırmıştır. Bu sayede hem kaynağı vücut olan seslerin analizinde hem de yapay akustik uyartıların tıbbi teşhis amacı ile kullanılmasında pek çok yeni perspektife kavuşulmuştur. Son yıllarda akustik sinyallerin gürültü içeren kısımlarının filtrelenmesi ve anlamlı özelliklerin çıkarılması gibi görevlerde bir yapay sinir ağı yaklaşımı olan derin öğrenme yöntemleri büyük avantaj sağlamaktadır.

Bu noktada ön plana çıkan yaklaşımlardan birisi de konvolüsyonel sinir ağlarıdır. Bu teknik farklı yapıdaki katmanları sayesinde özellikle çevre gürültüsünün ana sinyalden ayırt edilmesinde faydalı olabilmektedir. Buna ek olarak olay tanıma, otomatik bölütleme gibi görevleri ses sinyalinin büyük boyutlu özellik uzayına rağmen yüksek doğrulukla gerçekleştirebilmektedir. Önemli yeteneklerinden birisi de farklı seviyelerde uyguladığı filtreler sayesinde düşük seviyeli basit özellikleri öğrenebildiği gibi karmaşık örüntüleri de yüksek boyutlu özellik uzayında etkin şekilde ayırt edebilmesidir.

Bir başka yaygın sinir ağı modeli de uzun kısa süreli bellek yaklaşımıdır. En büyük farklılıklarından birisi ardışık veriyi işleyerek zaman dizileri üzerindeki örüntüleri

yakalayabilmesidir. Bir tekrarlayan sinir ağı modeli olmasına rağmen mimarisi sayesinde geçmişe yönelik bilgilerin, gelecekteki örüntüleri etkilediği durumlarda uzun süreli ilişkileri bile etkin şekilde öğrenebilmektedir. Birbirini takip eden olayların oluşturduğu örüntülerin yüksek başarı ile tanınması bu yaklaşımın özellikle EKG ve bağırsak seslerinin sınıflandırılmasında kritik rol oynayabileceğini göstermektedir.

4.2.Meta-sezgisel Yaklaşımlar

Biyomedikal bilgi ediniminin gelişmesi ile birlikte git gide daha karmaşık ve gelişmiş yöntemlerle işlenebilen akustik veri pek çok sınıflama ve tanılama görevinde büyük boyutlu özellik uzayları ile temsil edilmeye başlamıştır. Bu noktada karmaşık özellik uzaylarının optimizasyonu makine öğrenimi yaklaşımlarının başarısı için kritik rol oynayabilmektedir.

Meta-sezgisel yaklaşımlar, çözüm uzayının araştırılması ve hatta büyük boyutlu özellik uzaylarının optimizasyonu için işlem gücü ve zaman kullanımının kritik olabileceği uygulamalarda etkin şekilde uygulanabilmektedir. Buna göre deterministik algoritmalar belirli bir başlangıç koşulu ve kurallar dizisi altında işlerken meta-sezgisel yöntemlerde yeni çözümler rastgeleliğe bağlı olarak bulunur. Bu tür algoritmalar, adaptif stratejiler ile çözüm uzayında global optimumu bulmaya çalışırlar. Deterministik algoritmalar belirli bir kurallar dizisi ile her zaman aynı sonuca ulaşırken, rastgelelik içeren meta-sezgisel algoritmalar başlangıç koşullarına ve arama mekanizmalarına bağlı olarak farklı sonuçlar üretebilir. Arama ve ortaya çıkartma yetenekleri büyük boyutlu özellik uzayları ile karakterize edilmiş akustik sinyallerin analizi ve sınıflandırılması görevlerinde otomasyon sürecinin optimizasyonunda etkin şekilde kullanılabilmelerini sağlamaktadır.

Bir örnek çalışmada araştırmacılar genetik algoritmadan da faydalanarak akustik kardiyak verisinde kalp seslerinin yüksek

başarı ile bölütlenebilmesini başarmışlardır (Alonso-Arévalo ve ark., 2021). Yaygın meta-sezgisel arama yaklaşımlarından birisi olan genetik algoritmalar özellikle hiperparametre optimizasyonunda, özellik seçiminde ve çeşitli karmaşık çözüm alternatiflerinden en uygun olanın seçilmesi amacı ile uygulanabilmektedir.

4.3.Kılavuzsuz Yöntemler

Kılavuzlu makine öğrenimi yöntemlerinin bir dezavantajı da eğitilebilmeleri için sınıflandırılarak etiketlenmiş bir eğitim verisine ihtiyaç duymalarıdır. Bazı modeller çok büyük miktarda veri ile eğitildiğinde daha yüksek performans gösterdiğinden özellikle karmaşık tıbbi verinin büyük miktarlarda eğitim için hazırlanması ciddi insan kaynağı ve zaman gerektirebilmektedir.

Kılavuzsuz öğrenme, etiketlenmemiş verilerle ve ayrı eğitim gözlemlerine gerek kalmadan sınıflandırma, kümeleme ve örüntü keşfi gibi süreçlerin tamamlanmasına imkân tanımaktadır. Bu noktada kılavuzsuz bir makine öğrenimi yaklaşımı gözlemler arasındaki benzerliklere dayalı gruplar veya kümeler oluşturabilmektedir. Bu sayede verilerin hangi kategorilere veya sınıflara ait olduğunu belirlemek yerine, verilerin doğal yapısını ve alt gruplarını ortaya çıkarmaktadırlar.

Tıbbi seslerin analizinde en yaygın kullanım bulmuş yaklaşımların başında kümeleme algoritmaları gelmektedir. K-ortalama ve bulanık C-ortalama gibi yaklaşımlar görece düşük işlem gücü ile herhangi eğitime gerek kalmadan ses sinyallerinin, sinyal bölütlerinin veya pencerelerinin birbirlerine olan benzerliklerine göre kümelenmelerini sağlar. Bu yaklaşım çeşitli patolojilerin sınıflandırılmasında etkili olabilmektedir. Bunlara ek olarak hiyerarşik kümeleme yaklaşımları, küçük alt kümelerden başlayarak verileri daha büyük kümelere kadar birleştirir veya büyük kümeleri kademeli olarak daha küçük

parçalara ayırır. Bu yaklaşım büyük veri setlerinin hiyerarşik yapısını araştırmak için etkin şekilde kullanılmaktadır.

5. SONUÇ

Yapılan araştırmalar akustik enerjinin tıpta kullanımının önemini vurgulamakta, bilgisayar destekli analiz yaklaşımlarının bu alandaki potansiyelini ortaya koymaktadır. Ses dalgalarının kullanıldığı görüntüleme ve enstrümantasyon cihazları uygun maliyetli, portatif ve non-invaziv alternatifler olma potansiyeli taşımaktadır. Özellikle kaynakların kısıtlı olduğu bölgelerde bu gibi alternatiflerin varlığı kritik öneme sahip olabilmektedir. Gelişen bilgi işlem teknolojileri günümüzde vücut kaynaklı sinyallerin yüksek doğrulukla tanımlanabilmesine olanak sağladığı gibi daha karmaşık spektral analizlerin de gerçek zamanlı yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Buna ek olarak gelişmekte olan makine öğrenimi yaklaşımları sayesinde suni ses dalgalarının tıbbi amaçla kullanımı ümit vadetmektedir. Akustik enerjinin vücut içyapılarının incelenmesi, kemik kırıklarının tespiti ve doku anomalilerinin belirlenmesi gibi alanlarda kullanımının yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Ali, R., Offiah, A., & Ramlakhan, S. (2016, July). Fuzzy C-Means clustering to analyze bone vibration as a method of screening fracture. In 2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP) (pp. 1-5). IEEE.
- Alonso-Arévalo, M. A., Cruz-Gutiérrez, A., Ibarra-Hernández, R. F., García-Canseco, E., & Conte-Galván, R. (2021). Robust heart sound segmentation based on spectral change detection and genetic algorithms. *Biomedical Signal Processing and Control*, 63, 102208. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102208>
- Balli, O. (2022). Vücut seslerinden bölge tanımlanması için ideal kayıt süresinin belirlenmesinde MFCC ve GTCC öz niteliklerinin etkisinin karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (43), 36-40. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1034943>
- Bediz, B., Özgüven, H. N., & Korkusuz, F. (2010). Vibration measurements predict the mechanical properties of human tibia. *Clinical Biomechanics*, 25(4), 365-371. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.02.002>
- Cengizler, C., Ün, M. K., & Buyukkurt, S. (2021). A novel evolutionary method for spine detection in ultrasound samples of spina bifida cases. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 198, 105787. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105787>
- El-Segaier, M., Lilja, O., Lukkarinen, S., Sörnmo, L., Sepponen, R., & Pesonen, E. (2005). Computer-based detection and analysis of heart sound and murmur. *Annals of Biomedical Engineering*, 33(7), 937-942. <https://doi.org/10.1007/s10439-005-4063-5>

- Eskidere, Ö., & Ertaş, F. (2009). Mel frekansı kepstrum katsayılarındaki değişimlerin konuşmacı tanımayaya etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 14(2), 33-40.
- Hadjileontiadis, L. J., & Rekanos, I. T. (2003, September). Enhancement of explosive bowel sounds using kurtosis-based filtering. In *Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE Cat. No. 03CH37439)* (Vol. 3, pp. 2479-2482). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2003.1280382>
- He, Y., Li, W., Zhang, W., Zhang, S., Pi, X., & Liu, H. (2021). Research on segmentation and classification of heart sound signals based on deep learning. *Applied Sciences*, 11(2), 651. <https://doi.org/10.3390/app11020651>
- Karhan, M., Cakir, M. F., & Ugur, M. (2016). Mel-frekansı kepstral katsayılarını (MFCC) kullanılarak elektriksel boşalma seslerinin analizi. *Güç Sistemleri Konferansı (GSK2016)*, İstanbul, Türkiye.
- Kulkarni, N. (2018). Use of complexity based features in diagnosis of mild Alzheimer disease using EEG signals. *International Journal of Information Technology*, 10(1), 59-64. <https://doi.org/10.1007/s41870-017-0020-7>
- Liu, J., Yin, Y., Jiang, H., Kan, H., Zhang, Z., Chen, P., ... & Wang, Z. (2018, October). Bowel sound detection based on MFCC feature and LSTM neural network. In *2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BIOCAS.2018.8584719>

- Moore, M. B. (2009). The use of a tuning fork and stethoscope to identify fractures. *Journal of Athletic Training*, 44(3), 272-274. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-44.3.272>
- Mugunthan, K., Doust, J., Kurz, B., & Glasziou, P. (2014). Is there sufficient evidence for tuning fork tests in diagnosing fractures? A systematic review. *BMJ Open*, 4(8), e005238. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-005238>
- Qadir, Z., Ali, M., & Nesimoglu, T. (2018, October). Design and development of a low cost device for bone fracture detection using FFT technique on MATLAB. In 2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS) (pp. 321-324). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MMS.2018.8611957>
- Saha, S., & Lakes, R. S. (1977). The effect of soft tissue on wave-propagation and vibration tests for determining the in vivo properties of bone. *Journal of Biomechanics*, 10(7), 393-401. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(77\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(77)90008-2)
- Satar, M., Cengizler, C., Hamitoglu, S., & Ozdemir, M. (2022). Investigation of relation between hypoxic-ischemic encephalopathy and spectral features of infant cry audio. *Journal of Voice*. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2022.04.015>
- Scanlan, J., Li, F. F., Umnova, O., Rakoczy, G., Lövey, N., & Scanlan, P. (2018). Detection of osteoporosis from percussion responses using an electronic stethoscope and machine learning. *Bioengineering*, 5(4), 107. <https://doi.org/10.3390/bioengineering5040107>
- Sumeth, Y., & Akinori, N. (2011). A framework for automatic heart sound analysis without segmentation. *Biomedical Engineering Online*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-10-13>

- Tepe, C., & Sezgin, H. (2007). EKG sinyallerinde gürültü gidermede ayırık dalgacık dönüşümünde farklı ana dalgacıkların ve ayırıştırma seviyelerinin karşılaştırılması. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Dergisi*, 12, 14-18.
- Tomassini, S., Strazza, A., Sbroliini, A., Marcantoni, I., Morettini, M., Fioretti, S., & Burattini, L. (2019). Wavelet filtering of fetal phonocardiography: A comparative analysis. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 16(5), 6034-6046. <https://doi.org/10.3934/mbe.2019301>
- Toney, C. M., Games, K. E., Winkelmann, Z. K., & Eberman, L. E. (2016). Using tuning-fork tests in diagnosing fractures. *Journal of Athletic Training*, 51(6), 498-499. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-51.6.14>
- Vien, B. S., Chiu, W. K., Russ, M., & Fitzgerald, M. (2022). Modal frequencies associations with musculoskeletal components of human legs for extracorporeal bone healing assessment based on a vibration analysis approach. *Sensors*, 22(2), 670. <https://doi.org/10.3390/s22020670>
- Yin, M., Ma, J., Xu, J., Li, L., Chen, G., Sun, Z., ... & Mo, W. (2019). Use of artificial neural networks to identify the predictive factors of extracorporeal shock wave therapy treating patients with chronic plantar fasciitis. *Scientific Reports*, 9, 4207. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40785-w>
- Yüksel, M., & Kemaloğlu, Y. K. (2015). Diyaazonlar: Tarihi, özellikleri ve günümüz KBB uygulamalarındaki güvenilirliklerinin incelenmesi. *Journal of Ear Nose Throat and Head Neck Surgery*, 23(3), 123-130.

MÜHENDİSLİK

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com