



ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

EDİTÖR **DOÇ. DR. DİDEM ALTUN**

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © MART 2026

ISBN • 978-625-8671-93-3

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

ELEKTRİK - ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

EDİTÖR **DOÇ. DR. DİDEM ALTUN**

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

GÜÇ SİSTEMLERİNDE HVDC VE SVC İLE STATİK GERİLİM KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

<i>Mehmet Kenan DÖŞOĞLU</i>	1
<i>Bayram KÜÇÜK</i>	1

BÖLÜM 2

MİKRODENETLEYİCİ VE ARAYÜZ KONTROLLÜ İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ

<i>Kenan ALTUN</i>	15
<i>Didem ALTUN</i>	15

BÖLÜM 3

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ BATARYA SİSTEMLERİNE GENEL BİR İNCELEME

<i>Osman ZENK</i>	33
-------------------------	----

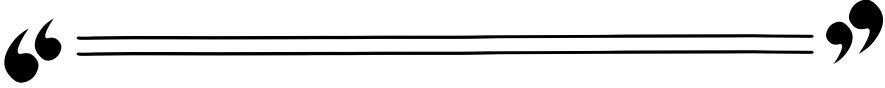
BÖLÜM 4

RÜZGÂR GÜCÜ TAHMİNİNDE YAPAY ZEKÂ

<i>Tuncay ALTUN</i>	53
---------------------------	----



GÜÇ SİSTEMLERİNDE HVDC VE SVC İLE STATİK GERİLİM KARARLILIĞININ İNCELENMESİ



Mehmet Kenan DÖŞOĞLU¹

Bayram KÜÇÜK²

¹ Prof. Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, kenandosoglu@duzce.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-8804-7070

² Arş. Gör., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, bayramkucuk@duzce.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-1423-1905

Giriş

Yakın geçmişte, enerji kuruluşları arasında geniş ilgi gören sorunlardan en önemlilerinden birisi gerilim kararsızlığı durumudur. Yeni üretim ve iletim tesislerinin yetersizliği ile artan yük talebinin etkisiyle mevcut tesislerin aşırı kullanılması bu tür bir sorunun günümüz güç sistemlerinde ortaya çıkma olasılığını artırmaktadır [1-3]. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığının iyileştirilmesi için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığını etkileyen durumlardan birisi statik ve dinamik yük modelleridir. İlgili çalışmalarda hem statik hem de dinamik yük modellerinin sistem çatalanma noktası ve aktif-gerilim eğrilerinin farklı çalışma bölgelerinin kararlılığı arasındaki ilişkiler detaylı olarak incelenmiştir. Statik ve dinamik yük modellerinin çalışma koşullarına bağlı olarak gerilim kararlılığı üzerinde etkili oldukları görülmüştür [4-6]. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizinde çalışma koşulları altında kritik noktanın belirlenmesinde sürekli yük akışı analizi yöntemi geliştirilmektedir. Sürekli yük akışı analizi ile gerilim kararlılığı analizinde sistemdeki yüklenebilirliğin en etkin şekilde belirlenmesi işlemi gerilim çökmesinin en belirgin olduğu noktaya göre yapılmaktadır. Bu şekilde sistemde gerilim kararsızlığı durumunu çalışma koşullarına göre çoklu olarak kontrol edilebilmesi söz konusudur [7,8]. Son yıllarda fosil yakıtların tükenmesi ve fiyatındaki artışlardan dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeler başlamıştır. Bunlardan en önemli olanlarından bazıları rüzgâr ve güneş enerjisidir. Rüzgâr ve güneşin çok baralı güç sistemlerine entegrasyonu ile gerilim kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarının sistemin yüklenebilirliğini arttırdığı ve bara gerilim profillerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir [9,10]. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığını belirleyen pek çok etken vardır. Bunlar arasında güç faktörü, hat uzunluğu, hat kayıp parametreleri, hat başı gerilimi, paralel hat sayısı, seri kompanzasyon ve şönt kompanzasyon yer almaktadır. Bu faktörlerin her birinin, yük barası gerilimi ve sistemin çalışma koşulları üzerinde farklı düzeylerde etkiler oluşturduğu görülmektedir. Gerilim kararlılığı analizlerinin belirlenmesinde kritik nokta üzerinde güç faktörü, hat uzunluğu, hat kayıp parametreleri, hat başı gerilimi, paralel hat sayısı, seri kompanzasyon ve şönt kompanzasyon çok etki oluşturduğu ilgili çalışmalarda gösterilmiştir [11-13]. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizinde farklı çalışma koşulları altında kritik değerlerinin belirlenmesi için önemli yaklaşımlardan birisi de optimum değerlerin belirlenmesi işlemidir. Bunun için güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizlerinde optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Optimizasyon algoritmaları sayesinde sistemin gerilim kararlılığı analizleri için önemli bir yöntem olduğu ilgili çalışmalarda görülmektedir [14,15]. Güç faktörü, hat uzunluğu, hat kayıp parametreleri, hat başı gerilimi, paralel hat sayısı, seri kompanzasyon ve şönt kompanzasyon etkenlerin yanısıra faz kaydırıcı transformatör ve kademe değiştirici transformatörlerinde gerilim ka-

rarlılığı üzerinde etki oluşturdukları ilgili çalışmalarda görülmektedir. Farklı değerlerde analizleri yapılan faz kaydırıcı transformatör ve kademe değiştirici transformatörlerin sistemdeki yüklenme durumları ve gerilim profili üzerinde detaylı olarak değerlendirmeleri ilgili çalışmalarda yapılmıştır [16,17]. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığını ve yük barası gerilim profillerini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biri de güç elektroniği temelli kompanzasyon sistemleridir. Esnek AC İletim Sistemleri (FACTS) olarak adlandırılan bu yapılar; STATCOM, SVC, SSSC, TCSC ve UPFC gibi cihazları kapsamaktadır. Bu FACTS ekipmanlarının kullanımıyla, farklı güç sistemlerinde bara gerilim profili ve maksimum yüklenme sınırı bakımından gerilim kararlılığında iyileşmeler sağlanmaktadır [18–21].

Yapılan bu çalışmada güç sistemlerinde statik gerilim kararlılığının analizi için Yüksek Gerilim Doğru Akım (HVDC) sisteminin kullanılması düşünülmüştür. Çok baralı güç sistemde HVDC'nin kullanılmadığı ve kullanıldığı durumdaki yüklenme parametresindeki değişimler, bara gerilim profilleri, gerilim açısı profilleri, aktif ve reaktif güç değişimleri detaylı olarak yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde sistemde HVDC'nin kullanılması ile özellikle sistemdeki maksimum yüklenme parametresinde düşüş oluşmaktadır.

Statik Gerilim Kararlılığı

Bir güç sistemi yüklenme sonucunda normal çalışma durumundan çıkmaması halinde güvenli şekilde işletilebilir. Sistem değişkenlerinin izin verilen sınırların dışına çıkması ya da üretim ile tüketim arasındaki dengenin bozulması durumunda güç sistemi anormal şekilde çalışır. Güç sistemindeki her olay, şebeke yapısını değiştirir; bu da gerilim-maksimum yüklenme parametresi ($V-\lambda$) eğrisinin daralmasına, dolayısıyla maksimum yüklenme parametresinin ve buna karşılık gelen aktif gücün azalmasına yol açar. İdeal koşullarda, yani sistemin herhangi bir olumsuzluk yaşamadığı ve tüm bileşenlerin doğru çalıştığı durumda, sistem maksimum yüklenme parametresi ve maksimum aktif güç dengesi sağlanabilir. Ancak bir güç sisteminde çok sayıda geçici durum ortaya çıkabilir; bu durum bazı iletim hatlarında aşırı yüke ve/veya bara gerilimlerinin izin verilen sınırların dışına sapmasına neden olabilir. Buna bağlı olarak en zayıf baranın konumu değişebilir [22]. Bu durumlara bağlı olarak çalışma koşullarına göre güç sistemlerinde statik gerilim kararlılığı analizi yapılmaktadır. Güç sistemlerinde yük barasındaki aktif ve reaktif güç arasındaki ilişki Denklem 1 ve Denklem 2'de ifade edilmiştir.

$$P_L = P_{L0}(1 + \lambda) \quad (1)$$

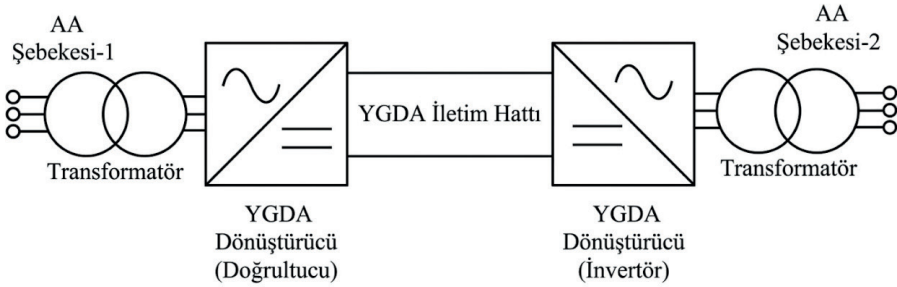
$$Q_L = Q_{L0}(1 + \lambda) \quad (2)$$

burada, P_L ve Q_L yükün aktif güç ve reaktif güç değerlerini, P_{L0} ve Q_{L0} ise

yükün başlangıç aktif güç ve reaktif güç değerlerini göstermektedir. λ ise maksimum yüklenme parametre değeridir [23].

Yüksek Gerilim Doğru Akım (HVDC)

Alternatif Akım (AA) ve Doğru Akım (DA) şebekeleri arasında bağlantı sağlamak amacıyla kullanılan HVDC sistemleri, güç elektroniği eviricilerinden meydana gelir. Elektrik enerjisini doğru akım olarak ileten bu sistemlerde, üretim aşamasında yükseltici transformatörler aracılığıyla gerilim artırılarak enerjinin uzak mesafelere iletimi mümkün hale getirilir. HVDC teknolojisinin farklı kullanım alanları vardır. HVDC'nin iletim hatlarındaki kullanım yapısı Şekil 1'de sunulmuştur.

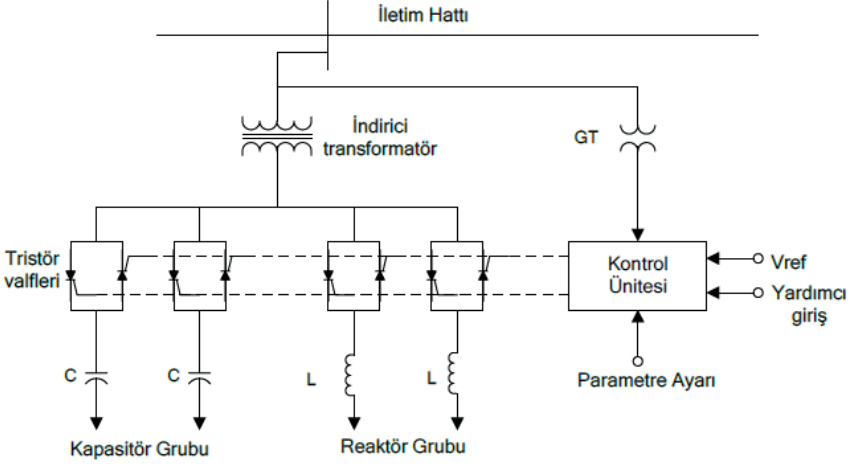


Şekil 1. HVDC'nin iletim hatlarındaki kullanım yapısı

HVDC sistemlerinin iletim hatlarında kullanımında, Şekil 1'de gösterildiği üzere transformatör çıkışında yükseltile AA gerilimi, evirici devre aracılığıyla DA gerilimine çevrilir. HVDC teknolojisi sayesinde uzun mesafeli enerji iletimi doğru akım üzerinden gerçekleştirilir. Enerjinin kullanılacağı yerleşim bölgelerindeki indirici merkezlerde ise DA gerilim yeniden AA gerilime dönüştürülür ve dağıtım seviyesinde iletim alternatif akım ile sürdürülür [24–27].

Statik Var Kompanzator (SVC)

Genel olarak SVC yük barasında paralel olarak bağlanan güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemi olarak tanımlanmaktadır. SVC'nin genel yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. SVC genel yapısı

Şekil 2'de görüldüğü gibi SVC, tristör kontrollü reaktör (TCR), tristör anahtarlama kapasitör (TSC), indirici transformatör ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Baraya paralel bağlı olan SVC indirici transformatör sayesinde tristör valfleri ile kapasitör ve reaktör gurubuna bağlanmaktadır. Burada, yük barasından gerilim transformatör sayesinde ölçülen gerilim kontrol ünitesinde girmektedir. Kontrol ünitesinde belirlenen referans gerilim ve ölçülen gerilim değerine bağlı olarak kapasitör ve reaktör guruplarında bulunan tristörlerin tetikleme açısı belirlenmiş olmaktadır. Sistemin kapasitif ve endüktif çalışmasına bağlı olarak gerilim sabit bir seviyede tutularak ihtiyaca göre reaktif güç üretir veya tüketilir. Bu kontrol çok kısa sürede gerçekleşir ve sistemin hedef gerilim profiline ulaşması sağlanmış olur. SVC kapasitif ve endüktif çalışmasını belirleyen eşdeğer reaktans eşitliği Denklem 3'teki gibi ifade edilmektedir.

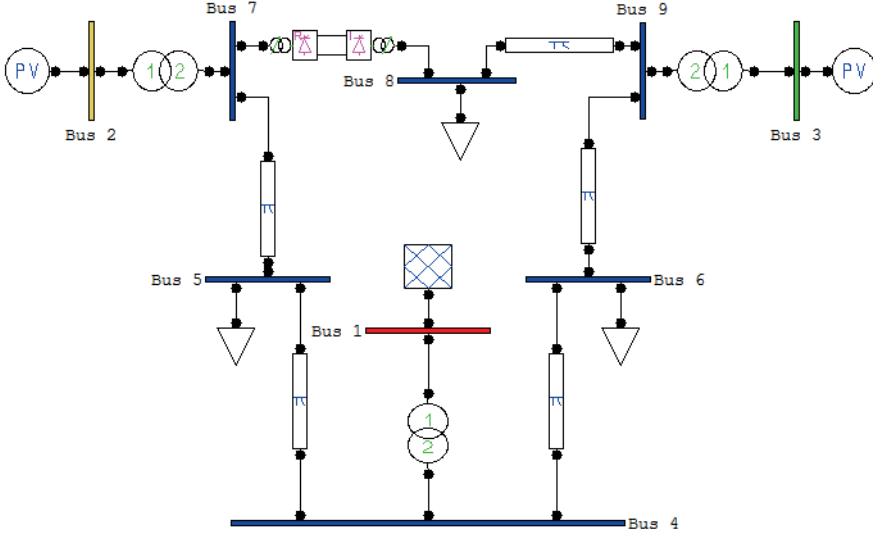
$$X_e = X_c \frac{X_l \pi / X_c}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - X_l / X_c)} \quad (3)$$

burada, X_e eşdeğer reaktans, α tetikleme açısı, X_l endüktif reaktans, X_c ise kapasitif reaktanstır. [28].

Bunun yanı sıra SVC'nin güç sistemlerinde bazı teknik katkıları bulunmaktadır. Bunlar gerilim regülasyonu, geçici kararlılık kontrolünün sağlanması ve harmonik filtrelemedir.

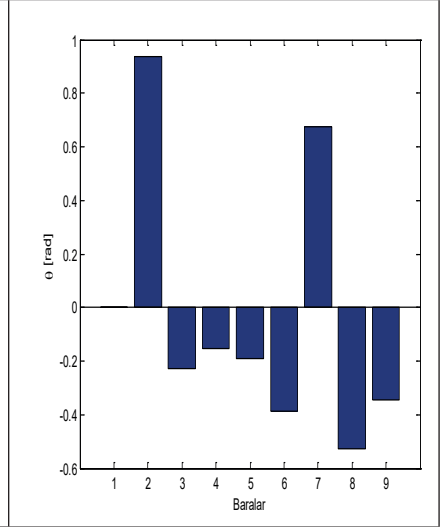
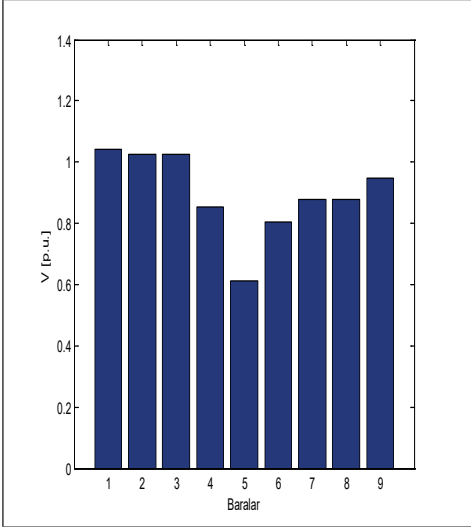
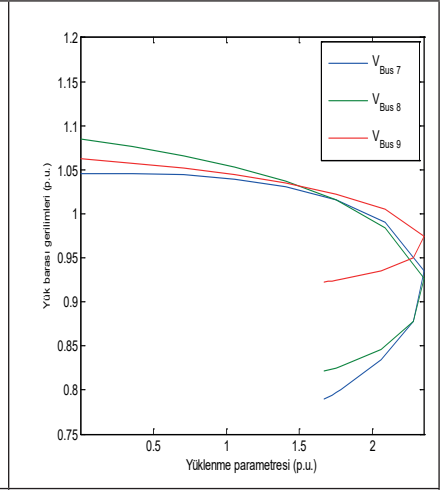
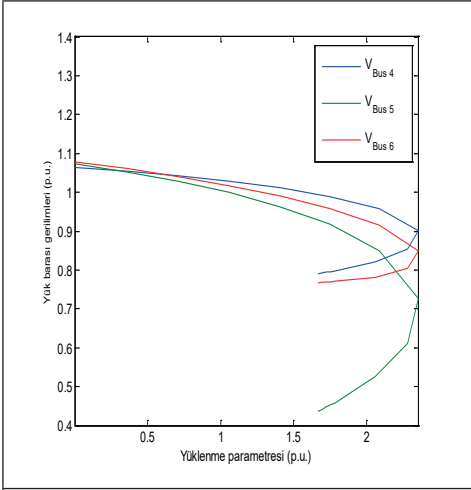
Benzetim Çalışması ve Deneysel Sonuçlar

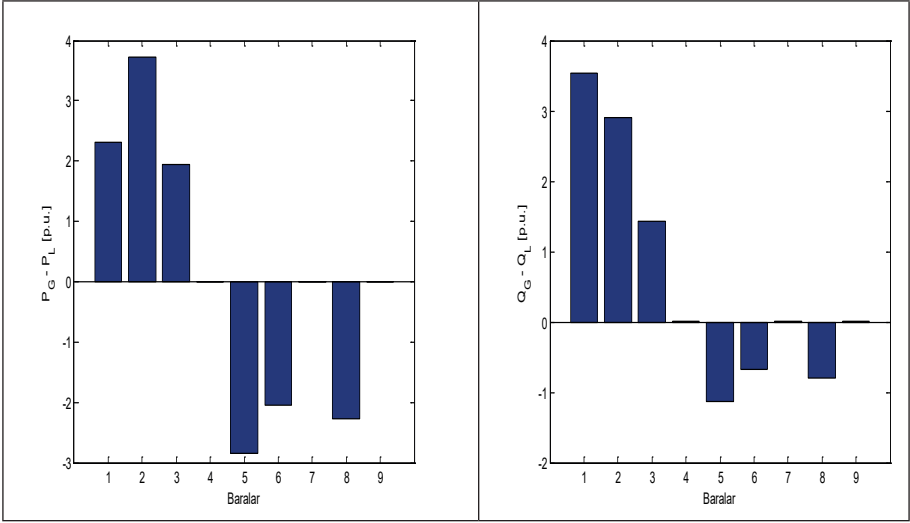
Bu çalışmada analizi yapılan 9 baralı güç sistemi Şekil 3'te gösterilmiştir.



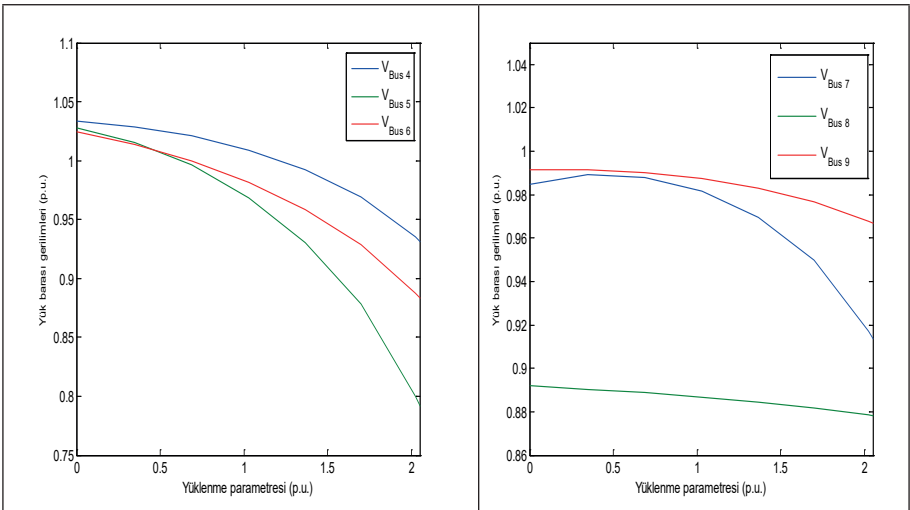
Şekil 3. Analizi yapılan 9 baralı güç sistemi

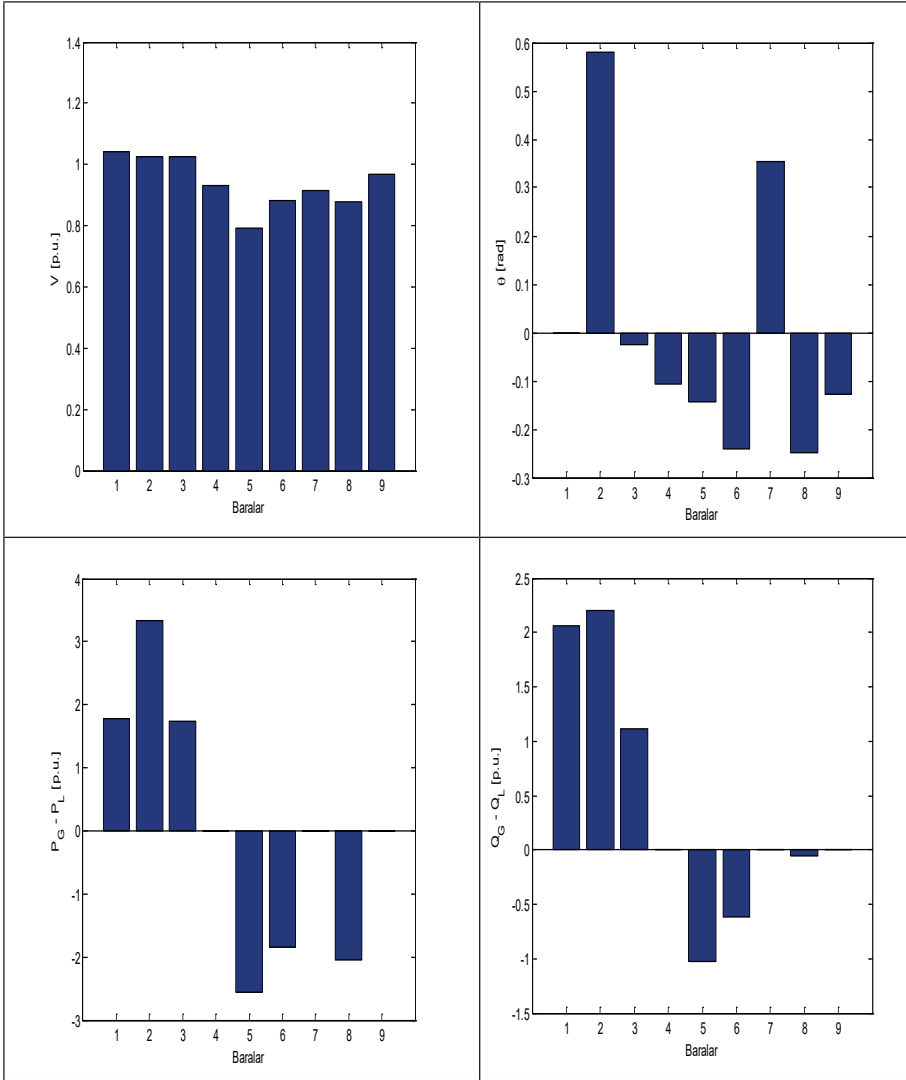
Bu çalışma, Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir [29]. Bu test sisteminde 1 numaralı bara salınım barası, 2 ve 3 numaralı baralar generatör barası ve 4,5,6,7,8,9 numaralı baralar yük barası olarak kullanılmıştır. Bu sistemde 7 ile 8 numaralı baralar arasında iletim hattı çıkarılarak Şekil 3'te gösterildiği gibi 100 MVA gücünde HVDC bağlanmıştır. İlk yapılan analizde sistemde HVDC kullanıldığı durumda sürekli yük akışı analizi gerçekleştirilmiştir. İkinci analizde öncelik sistemde yük akışı analizi yapılarak bara gerilim profili en düşük olan yük barası belirlenmiştir. En düşük gerilim profili 8 numaralı bara belirlenmiştir. Sonrasında sisteme HVDC ile beraber 8 numaralı baraya 100 MVA gücünde SVC bağlanmıştır. Bunun sonucunda sistemde yeniden sürekli yük akışı analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemde HVDC kullanıldığı durumdaki elde edilen sonuçlar Şekil 4'te gösterilirken, sistemde HVDC ve SVC birlikte kullanıldığı durumdaki elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir.





Şekil 4. Sistemde HVDC kullanıldığı durumdaki elde edilen sonuçlar





Şekil 5. Sistemde HVDC ve SVC birlikte kullanıldığında elde edilen sonuçlar

Şekil 4'te sistemdeki yük baralarının maksimum yüklenme parametre-gerilim ilişkisi, bara gerilim profilleri, bara gerilim açı profilleri, baraların aktif-reaktif güç profilleri verilmiştir. Sistemde HVDC'nin kullanılması ile maksimum yüklenme parametre değeri 2.3497 olarak elde edilmiştir. Bara gerilim profili sürekli yük akışı analizine göre en düşük çıkan 5 numaralı bara olmuştur. Bara gerilim açı profilinde en düşük olan 4 numaralı baranın olduğu gözlemlenmiştir. Sistemde HVDC'nin olması esnasında aktif güç profillerinde en düşük olan baralar 4, 7 ve 9 numaralı baralar olmuştur. HVDC'nin 9 baralı sistemde kullanılması ile reaktif güç profillerinde en düşük olan baralar 4, 7 ve 9 numaralı baralar olmuştur.

Şekil 5'te sistemde HVDC ile SVC birlikte kullanıldığı durumdaki analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'teki sonuçlarda sistemdeki yük baralarının maksimum yüklenme parametre-gerilim ilişkisi, bara gerilim profilleri, bara gerilim açısı profilleri, baraların aktif-reaktif güç profilleri verilmiştir. Sistemde HVDC ve SVC'nin birlikte kullanılması ile maksimum yüklenme parametre değeri 2.051 olarak elde edilmiştir. Bu analizde bara gerilim profili sürekli yük akışı analizine göre en düşük çıkan 5 numaralı bara olmuştur. Bara gerilim açısı profilinde en düşük olan 3 numaralı baranın olduğu gözlemlenmiştir. Sistemde HVDC ile SVC'nin kullanılmasında aktif güç profillerinde en düşük olan baralar 4, 7 ve 9 numaralı baralar olmuştur. HVDC ile SVC'nin beraber kullanılmasında reaktif güç profillerinde en düşük olan baralar 4, 7 ve 9 numaralı baralar olmuştur.

Sonuçlar

Bu çalışmada, 9 baralı güç sisteminde HVDC ile HVDC-SVC'nin birlikte kullanılması ile statik gerilim kararlılığı analizi incelenmiştir. İki analiz şeklinde yapılan çalışmada sistemdeki yük baralarının maksimum yüklenme parametre-gerilim ilişkisi, bara gerilim profilleri, bara gerilim açısı profilleri, baraların aktif-reaktif güç profilleri detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda HVDC ile HVDC-SVC'nin birlikte kullanılmasında sistemdeki normal çalışma koşullarına göre maksimum yüklenme parametre değerinin azaldığı görülmektedir. Özellikle HVDC ile SVC'nin birlikte kullanılması ile sistemdeki yüklenebilirliğin çok daha azaldığı bu çalışmada doğrulanmıştır. Buna bağlı olarak bara gerilim profilleri, bara gerilim açısı profilleri, baraların aktif-reaktif güç profillerinde de HVDC ile HVDC-SVC'nin kullanımından çok etkilendiği görülmüştür. Her iki analizde de sürekli yük akışında 4 ve 5 numaralı yük baralarında gerilimlerin azaldığı diğer baralarda ise nispeten değiştiği gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışma ile farklı test sistemlerinde HVDC ile diğer güç elektroniği kompanzasyon sistemleri ile farklı çalışma koşullar altında çalışmaların yapılabilmesi söz konusu olacaktır.

Kaynakça

- [1] Nagao, T., Tanaka, K., & Takenaka, K. (2002). Development of static and simulation programs for voltage stability studies of bulk power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1), 273–281.
- [2] Gao, B., Morison, G. K., & Kundur, P. (1996). Towards the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(3), 1314–1324.
- [3] Sode-Yome, A., Mithulananthan, N., & Lee, K. Y. (2006). A maximum loading margin method for static voltage stability in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 799–808.
- [4] Overbye, T. J. (1994). Effects of load modelling on analysis of power system voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 16(5), 329–338.
- [5] Borghetti, A., Caldon, R., Mari, A., & Nucci, C. A. (2002). On dynamic load models for voltage stability studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(1), 293–303.
- [6] Pérez-Londoño, S., Rodríguez-García, L., & Mora-Flórez, J. (2014, September). A comparative analysis of dynamic load models for voltage stability studies. In *2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition–Latin America (PES T&D-LA)* (pp. 1–6). New York, NY: IEEE.
- [7] Ajarapu, V., & Christy, C. (2002). The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(1), 416–423.
- [8] Aly, M. M., & Abdel-Akher, M. (2012, December). A continuation power-flow for distribution systems voltage stability analysis. In *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)* (pp. 470–475). New York, NY: IEEE.
- [9] Ben-Kilani, K., & Elleuch, M. (2013). Structural analysis of voltage stability in power systems integrating wind power. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4), 3785–3794.
- [10] Rahman, S., Saha, S., Islam, S. N., Arif, M. T., Mosadeghy, M., Haque, M. E., & Oo, A. M. (2021). Analysis of power grid voltage stability with high penetration of solar PV systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(3), 2245–2257.
- [11] Öztürk, A. (2007). *Güç sistemlerindeki gerilim kararlılığının genetik algoritma ile incelenmesi* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [12] Tosun, S., & Öztürk, A. (2020). Investigation of voltage stability in different operating conditions. *El-Cezeri*, 7(1), 179–188.
- [13] Yeşilbudak, M., Bayındır, R., & Çetinkaya, Ü. (2016). Güç sistemlerinde gerilim

- kararlılığını etkileyen faktörler. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(4), 595–602.
- [14] İşcan, S., Kaplan, O., & Lokman, G. (2021). Güç sisteminde meta-sezgisel algoritmalarla güç kaybı ve gerilim kararlılığı optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 199–209.
- [15] Kisengeu, S. M., Muriithi, C. M., & Nyakoe, G. N. (2021). Under voltage load shedding using hybrid ABC-PSO algorithm for voltage stability enhancement. *Heliyon*, 7(10).
- [16] Döşoğlu, M. K., Tosun, S., Öztürk, A., & Poyraz, G. (2013). Faz kaydırıcı transformatörlerin statik gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(3), 43–52.
- [17] Döşoğlu, K., & Uğur Doğan, M. (2019). Gerilim-reaktif güç kontrol modeli kademeli değiştirici transformatörün gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 7(3), 1378–1393.
- [18] Kamarposhti, M. A., & Lesani, H. (2011). Effects of STATCOM, TCSC, SSSC and UPFC on static voltage stability. *Electrical Engineering*, 93(1), 33–42.
- [19] Kamarposhti, M. A., Alinezhad, M., Lesani, H., & Talebi, N. (2008, October). Comparison of SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC controllers for static voltage stability evaluated by continuation power flow method. In *2008 IEEE Canada Electric Power Conference* (pp. 1–8). New York, NY: IEEE.
- [20] Kamarposhti, M. A., & Lesani, H. (2010, June). Comparison between parallel and series FACTS devices on static voltage stability using MLP index. In *SPEE-DAM 2010* (pp. 257–262). New York, NY: IEEE.
- [21] Sode-Yome, A., Mithulananthan, N., & Lee, K. Y. (2005, August). Static voltage stability margin enhancement using STATCOM, TCSC and SSSC. In *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific* (pp. 1–6). New York, NY: IEEE.
- [22] Alinezhad, M., & Kamarposhti, M. A. (2010). Static voltage stability assessment considering the power system contingencies using continuation power flow method. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(5), 316–322.
- [23] Kazemi, A., & Badrzadeh, B. (2004). Modeling and simulation of SVC and TCSC to study their limits on maximum loadability point. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 26(8), 619–626.
- [24] Van Hertem, D., Gomis-Bellmunt, O., & Liang, J. (2016). *HVDC grids: For offshore and supergrid of the future*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- [25] Han, M., & Gole, A. (2020). *Modeling and simulation of HVDC transmission*. London, England: Institution of Engineering and Technology.
- [26] Benasla, M., Allaoui, T., Brahami, M., Denai, M., & Sood, V. K. (2018). HVDC links between North Africa and Europe: Impacts and benefits on the dynamic performance of the European system. *Renewable and Sustainable Energy Re-*

views, 82, 3981–3991.

- [27] Erat, A., & Vural, A. M. (2022). Yüksek gerilim doğru akım güç şebekelerinin ara bağlantıları için DA/DA modüler çok seviyeli dönüştürücüler. In *ELECO 2022* (pp. 1–5).
- [28] Faur, Z. T. (1996). *Effects of FACTS devices on static voltage collapse phenomena* (Doctoral dissertation). University of Waterloo, Ontario, Canada.
- [29] Milano, F. (2005). An open source power system analysis toolbox. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1199–1206.



MİKRODENETLEYİCİ VE ARAYÜZ KONTROLLÜ İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ

“

Kenan ALTUN¹

Didem ALTUN²

¹ Doç.Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Sivas, Türkiye. kaltun@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7419-1901.

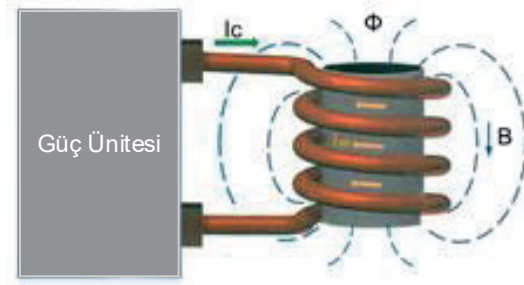
² Doç.Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas, Türkiye. didemaltun@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1964-3538.

1. Giriş

İndüksiyonla ısıtma teknolojisi ilk olarak 1926 yılında ABD'den W.Braun tarafından kullanılmasına rağmen (Bukanin vd., 2018), ilk patent çalışması 1939 yılında Sovyet Vologdin V.P. tarafından alınmıştır (Dawson ve Jain, 1990). Özellikle malzemelerin sertleştirilmesi için ısıl işlem uygulanması çok daha eskilere dayanmaktadır. Geçmişten günümüze çeliğin sertleştirilmesi için ısıl işlem ve soğutulma işlevi kullanılmıştır. Günümüzde de birçok iş parçasının tavlanması, sertleştirilmesi gibi endüstriyel uygulamaların ekonomik, pratik, tekrarlanabilir ve hızlı yöntem olarak indüksiyon ısıtma yöntemi kullanılmaktadır (Jomaa vd., 2013; Lucia vd., 2013). İndüksiyonla ısıtma teknolojisi kullanılarak malzemelerin eritme, sertleştirme, kaynak ve daha pek çok endüstriyel işlemleri gerçekleştirilmektedir (Meziane ve Zeroug, 2016).

Ayrıca mutfak, su ısıtma, alan ısıtma, elektrikli otomobillerde iç mekan ısıtma, demiryolu ısıtma, petrol boru hatlarının ısıtılması gibi birçok uygulamada da indüksiyon ısıtma prensibinden yararlanılmaktadır (Lucia vd., 2013; Manuel ve Khan, 2009; Oh vd., 2019; Makulov ve Alitdinov, 2017). İndüksiyonla ısıtma sistemleri, elektromanyetik enerjinin enerji kaynağından ısıtılan malzemeye aralarında temas olmadan iletilmesi prensibine dayanmaktadır. İndüksiyon ısıtma sisteminde güç yarı iletken kontrollü bir frekans dönüştürücü ile indüksiyon bobinine iletilmektedir. İndüksiyon bobininden geçen akım bir elektromanyetik alan yaratır. Bu elektromanyetik alan malzemenin ısınmasına neden olan girdap akımlarını ortaya çıkarır. Böylece enerji kaynağı doğrudan malzemenin yüzeyinde hareket eder, bu da ısıtma sisteminin verimini artırır.

Bir indüksiyonlu ısıtma sistemi, iş parçası, indüksiyon bobini ve indüksiyon bobinini tahrik eden güç ünitesi olmak üzere üç ana bileşenden oluşur (Lope vd., 2016). Bir indüksiyonla ısıtma uygulamasında, iş parçasının Şekil 1'de gösterildiği gibi iş bobininin içine yerleştirilmesi çok yaygındır.



Şekil 1. İndüksiyon ısıtma prensip şeması.

Bu çalışmada, mikrodenetleyici tabanlı ve bilgisayar arayüzü ile kontrol edilebilen esnek bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı sunulmaktadır. Önerilen sistem, farklı malzeme türleri ve ısıl işlem gereksinimleri için frekans, akım ve gerilim parametrelerinin donanımsal bir değişikliğe ihtiyaç duyulmadan yazılım üzerinden ayarlanabilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, indüksiyon ısıtma sistemlerinde kullanım esnekliğini artırmayı, maliyetleri azaltmayı ve kullanıcıya sezgisel bir kontrol altyapısı sunmayı amaçlamaktadır.

2. İndüksiyon Isıtmanın Fiziksel ve Elektromanyetik Temelleri

İndüksiyon ısıtma sistemleri temel olarak Amper yasasına dayanır. Amper yasasına göre, elektrik akımı taşıyan iletken etrafında manyetik alan indükler. İletkendeki akım değişirse, üretilen manyetik alan da değişir. Manyetik alanı artırmak için iletken bir bobine sarılır. Denklem (1), indüksiyon bobini üzerindeki manyetik akının bobin etrafında indüklenmiş bir elektromotor kuvveti oluşturduğunu belirten Faraday yasasını göstermektedir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (1)$$

Denklem (1)'de $\nabla \times \vec{E}$ elektrik alan döngüsünü, μ malzemenin manyetik geçirgenliğini ve \vec{H} manyetik alan kuvvetini ifade etmektedir. Bir bobinde üretilen manyetik akı, içinden geçen akımla çarpılan dönüş sayısı ile belirlenir. Denklem (2)'de gösterildiği gibi manyetik akı çekirdek malzemenin relüktansı ile ters orantılıdır. Relüktans ise, akının uzunluğuna ve malzemenin manyetik geçirgenliğine bağlı olarak denklem (3)'de gösterildiği gibi bulunur.

$$\Phi = \frac{NI}{\mathfrak{R}} \quad (2)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (3)$$

Denklem (2)'de Φ manyetik akı, N sarım sayısı, I akımı, \mathfrak{R} relüktansı ifade etmektedir. Denklem (3)'de relüktans değeri hesaplanmaktadır. Buna göre, μ manyetik geçirgenlik, l manyetik çekirdeğin uzunluğu A ise manyetik çekirdeğin kesit alanıdır.

Denklem (4)'te gösterildiği gibi birim alan başına manyetik akı olarak tanımlanan manyetik akı yoğunluğu B , denklem (5)'te gösterildiği gibi μ ile manyetik alan kuvveti H çarpımına eşittir. Manyetik alan kuvveti H , temel olarak bir malzemede belirli bir manyetik akı oluşturmak için birim uzunluk başına akıdır ve denklem (6) ile hesaplanabilir.

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (4)$$

$$B = \mu H \quad (5)$$

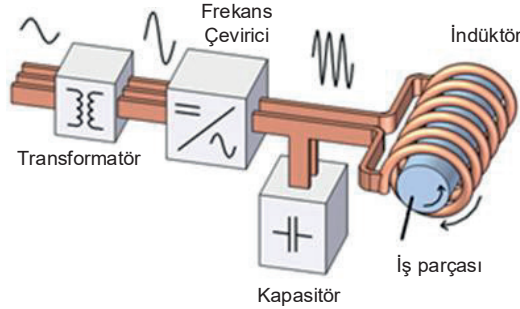
$$H = \frac{NI}{l} \quad (6)$$

Manyetik alan kuvveti ile havadaki manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki doğrusaldır ve bu nedenle akım ve dönüş sayısı ne kadar yüksek olursa bobinden üretilen manyetik akı da o kadar yüksek olur. Faraday yasasına göre ve periyodik bir manyetik akı olduğu varsayıldığında, alternatif bir manyetik akının sonucu olarak indüklenen maksimum voltaj denklem (7) ile belirlenir.

$$V_{max} = N\omega\Phi_{max} \quad (7)$$

Denklem (7)'de ω , radyan cinsinden frekanstır ve $2\pi f$ 'ye eşittir, burada f , Hertz cinsinden frekanstır. Dolayısıyla frekans ne kadar yüksek olursa, indüklenen voltajda o kadar yüksek olur. Manyetik akı ne kadar yüksek olursa, bobinden indüklenen voltaj o kadar yüksek olduğu görülmektedir. Yukarıda belirtilenlere dayanarak, çalışma frekansı ve manyetik akının çarpımının önemli bir tasarım parametresi olduğu sonucuna varılabilir. Diğer taraftan, elemanların geometrisine, konumuna, sıcaklığa ve malzeme yapısına da büyük ölçüde bağlıdır.

Bir indüksiyon ısıtma sisteminin güç ünitesi Şekil 2'deki gibi modellenmektedir. Buna göre AC şebeke öncelikle DC'ye dönüştürülür. Daha sonra istenen frekans için yüksek frekans ve akım değerlerinde çalışabilen yarıiletken devre elemanları ile kurulan tank devreleri hazırlanır. Ancak bu devrelere elde edilen frekans aralığı sabit olduğundan indüksiyon ısıtma sisteminin uygulama amacı da bellidir. Bu durumda farklı amaçlar için tank devresinde değişiklik yapılması gerekmektedir.



Şekil 2. İndüksiyon ısıtma sistemi güç ünitesi ve tank devresi.

Buraya kadar sunulan elektromanyetik ve fiziksel ilişkiler, indüksiyon ısıtma sistemlerinde frekans, manyetik akı ve akım büyüklüklerinin doğrudan ısıtma derinliği ve verim üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Ancak bu parametrelerin sabit donanım yapılarıyla kontrol edilmesi, farklı malzeme ve uygulama koşullarında sistem esnekliğini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, teorik olarak belirlenen bu değişkenlerin yazılım tabanlı ve dinamik olarak ayarlanabildiği mikrodenetleyici kontrollü güç üniteleri, modern indüksiyon ısıtma sistemleri için kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir.

3. İndüksiyon Isıtma Sistemlerinde Frekans Seçimi ve Tasarım Kriterleri

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde ısıtılacak malzemenin ısıl iletkenliği, boyutları, homojen yapısı gibi birçok parametre ısıtma sürecini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle ısıtılacak malzemenin önemli karakteristikleri, güç kontrol ünitesindeki frekans ve manyetik akının belirlenmesinde oldukça önemlidir. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde amaca ve yapılacak işin tanımına göre uygulama frekansı değişmektedir. Dolayısıyla güç

frekansı seçimi karmaşık bir iştir. Çıkış bobininden geçen akımın frekansı ne kadar yüksek olursa, ısıtılmış gövdenin yüzeyinde üretilen indüklenen akımın etki derinliği o kadar az olur. İndüklenen akımın etki derinliğinin hesaplanmasına ve fiili uygulamaya göre, aşağıdaki referans frekans seçimleri bulunmaktadır.

Buna göre, Malzemenin sertleştirilmesi amacıyla yüzey ısıtılması istenen işlemlerde (Rudnev vd., 2017). Sertleştirme derinliği 0.8-1.2mm için ısıtma frekansı 200-400KHz aralığında, sertleştirme derinliği 1-2mm için ısıtma frekansı 60-200KHz aralığında, sertleştirme derinliği 2-4mm için ısıtma frekansı 15-30KHz aralığında olmalıdır. Malzemenin tam ısıtılması istenen işlemlerde ise, iş parçası çapı 20-30mm indüksiyon ısıtıcı frekansı 15-30KHz aralığında, iş parçası çapı 30-50mm, indüksiyon ısıtıcı frekansı 6-15KHz aralığında, iş parçası çapı 50-80mm indüksiyon ısıtıcı frekansı 2-5KHz aralığında, 80 mm'nin üzerindeki iş parçası çapı endüksiyon ısıtıcı frekansı 2KHz içinde olmalıdır. Malzemenin eritilmesi istenen işlemlerde, malzeme ve eritme kapasitesine göre, indüksiyon eritme frekansı 3-30KHz seçmelidir. Malzemenin lehimlenmesi istenen işlemlerde, lehimleme malzemesine, kaynak derinliğine, iş parçası kalınlığına göre indüksiyonla lehimleme frekans aralığı 15-300KHz olmalıdır.

İndüksiyon ısıtma birçok farklı işlemler için kullanıldığından güç kontrol ünitesinin her amaç için ayrı bir tasarım yüksek maliyet olarak endüstride karşımıza çıkmaktadır. Mutfaklarda geleneksel elektrikli ısıtma veya gaz kullanılması son dönemlerde oldukça popülerdir. Özellikle son çalışmalarda derin öğrenme ile verimliliğin artırılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır (Lucia vd., 2019). Benzer çalışmalar endüstri uygulamalarında da derin öğrenme ile frekans adaptasyonu sağlanarak rezonans frekans kontrol ünitesi tasarlanmıştır (Hammouma ve Zeroug, 2022). Ancak bu yapılan çalışmalarda yenilikler donanımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla tasarım üzerinde yapılması düşünülen yeni bir öneri durumunda donanımsal değişiklik zorunlu olacaktır. Bu durum hem maliyeti artıracak hem de zaman alacaktır. Hem bu maliyetleri ortadan kaldırmak hem de kullanıcı tarafından daha basit ve etkin bir indüksiyon ısıtma sisteminin tasarımı gerekli olmuştur. İstenirse çıkış sayısı artırılarak aynı veri tabanı ile mikrodenetleyicinin boş çıkışları kullanılarak birden fazla frekans kontrol devresi kontrol edilerek multi-indüksiyon ısıtma sistemi kurulabilecektir. Önerilen çalışma birçok sistemin aynı anda farklı ısı işlemlerin başlatılabildiği bir kontrol devresine de

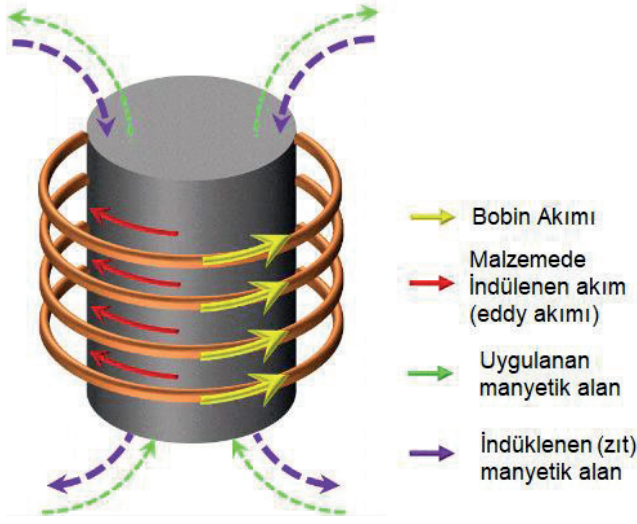
dönüştürülebilir. Bu konu ile ilgili birçok araştırma yapılmış olmasına rağmen mikrodenetleyici tabanlı ve bilgisayar arayüz kontrollü bir indüksiyon ısıtma sistemi literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınmış olup, mikrodenetleyici tabanlı ve bilgisayar arayüz kontrollü bütünlük bir yapı yaygın değildir.

Çalışma kapsamında temel amaç malzemenin yapısına, yapılacak ısı işleme, istenilen süreye göre; frekans, akım, gerilim ile indüksiyon bobininde oluşturulacak manyetik alanın da kontrol edilebileceği bilgisayar arayüz kontrollü mikrodenetleyici tabanlı indüksiyon ısıtma sistemi tasarımıdır. Çalışmada önerilen indüksiyon ısıtma kontrolcüsüyle parçanın boyutsal veya işlevsel değişikliklerinde donanımsal bir değişikliğe gidilmeden (rezonans ve osilatör tetikleme devresini değiştirmeden) ve herhangi bir hesaplama yapılmadan kullanıcı arayüzü kullanılarak verimin artırılması düşünülmüştür. Bu sayede daha küçük bir kontrol devresi, uzaktan kontrol ve kumandanın mümkün hale gelmesi, bir değişiklik gerektiğinde yazılım ile sağlanabilmesi gibi birçok avantaj sağlayacaktır. Ayrıca farklı bir işlev için donanımsal değişiklik gerekli olmayacağından işletme maliyetleri de azalacaktır. Tüm bunların yanında özellikle eğitim amaçlı kullanılması durumunda içerisinde birçok farklı uygulama denenebileceği için oldukça etkili bir eğitim materyal yöntemi de olacaktır. İndüksiyon ısıtma sistemi Faraday'ın indüksiyon yasası ve cilt etkisine dayanmaktadır. Bu çalışmada da bu yasalardan faydalanılmıştır.

3.1 Faraday'ın İndüksiyon Yasası

Elektriksel olarak iletken bir malzeme zamanla değişen bir manyetik alan içerisinde yerleştirildiğinde, uygulanan manyetik alana zıt ikinci bir manyetik alan oluşturarak malzemede girdap akımı olarak bilinen bir elektrik akımı indüklenir. Bu elektrik akımının sebebi zamanla değişen bir manyetik alanın elektriksel olarak iletken malzemenin üzerindeki manyetik akıdır. Malzeme üzerinde indüklenen bu akıya karşı başka bir manyetik alan üreterek bu değişime karşı koymaya çalışır ve denklem (8) ile ifade edilir. Denklem (8)'de ε oluşan zıt manyetik alanı, Φ_B manyetik akıyı göstermektedir. Faraday indüksiyon yasasına göre indüksiyon bobini ve malzemede oluşan akım ve manyetik alan çizgileri Şekil 3 ile verilmektedir.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (8)$$

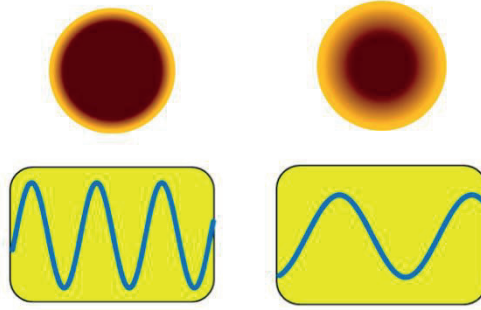


Şekil 3. Faraday'ın indüksiyon yasasına göre malzemedeki akım ve manyetik alan çizgileri.

Tüm bu nedenlerden dolayı, elektriği ileten bir malzeme, alternatif bir manyetik alana maruz kaldığında, malzemeye bağlı olarak, ısı indüklenir. Uygulanan manyetik alanın yön değişikliği nedeniyle yan yana olan manyetik dipollerin dönüşünün sürtünmesi ısıya neden olmaktadır. Bu etki, uygulanan manyetik alanın frekansının artmasıyla artar.

3.2 İndüklenen Isının Derinliği

Elektriksel olarak iletken bir malzeme bir manyetik alana maruz kalırsa, malzemede girdap akımları indüklenir. Bu tür akımların kendine has özellikleri, “İndüksiyonla Isıtma” dediğimiz bir olayla sonuçlanır. Girdap akımları malzemenin yüzeyinde yoğunlaşmıştır. Bunun nedeni, yüksek frekansta uygulanan manyetik alanın yönünü çok hızlı değiştirmesidir. Bu nedenle, bir yönde indüklenen akımlar, süreleri dolmadan metalin derinliklerine nüfuz etmek için yeterli zamana sahip değildir. Malzemede akım penetrasyonunun kalınlığı “Cilt Derinliği” olarak adlandırılır. Cilt derinliği, malzemenin elektromanyetik özelliklerine bağlıdır ve ayrıca frekansla ters orantılıdır. Şekil 4 ile frekansa bağlı sıcaklık değişim gösterilmektedir. Buna göre yüksek frekanslarda girdap akımları yüzeyde kalırken, düşük frekanslara malzemenin derinliklerine ulaşmaktadır.



Şekil 4. Cilt derinliği frekans ilişkisi.

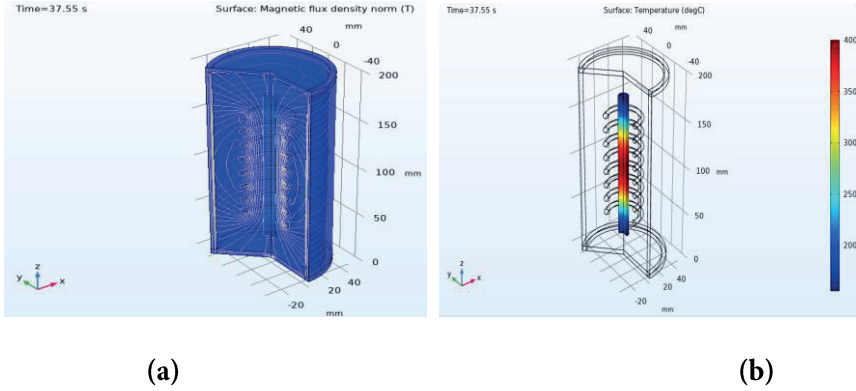
Denklem (9) cilt derinliğinin frekansa bağımlılığını göstermektedir. Burada δ yüzey derinliği, ρ elektriksel direnci, ω radyan cinsinden frekansı ve μ malzemenin manyetik geçirgenliğini göstermektedir.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (9)$$

İndüksiyonla ısıtma endüstrisinde yüksek frekansların kullanılması, metallerde çok ince penetrasyon derinlikleri anlamına gelir (Semiatin, 1988). Bu nedenle önerilen çalışmada işlenecek iş parçasının amacına, malzemenin karakteristiklerine göre frekans seçimi yapılacaktır.

4. Mikrodenetleyici Tabanlı ve Arayüz Kontrol Tasarımı

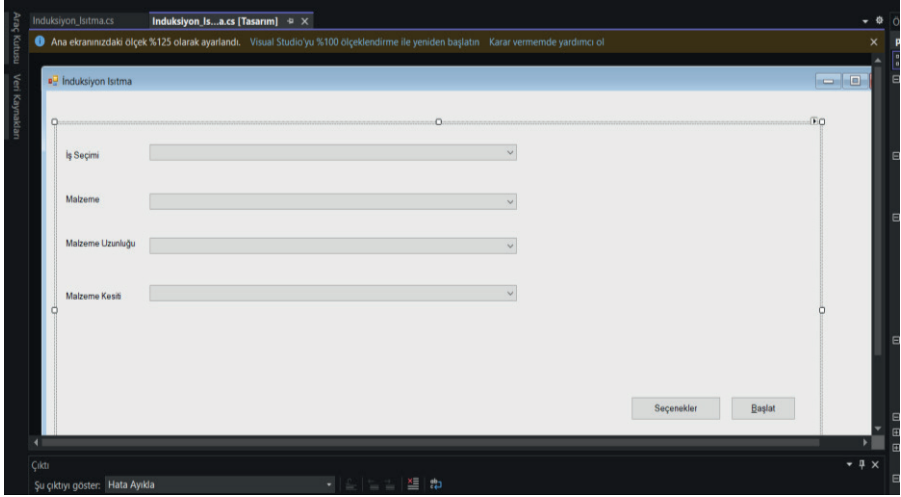
Elektriksel olarak kontrol devresinin tetikleme frekansını seçimi, bir veri tabanı uygulamasıyla belirlenecektir. Arayüz C# programlama dili kullanılarak gerçekleştirilecektir. Arayüzün veri tabanı denklem (9) ile hesaplanan cilt derinliğine göre belirlenen frekanslarda gerçekleştirilecektir. Ancak deneysel uygulamanın daha kısa sürede hedeflere ulaşabilmesi için hesaplanan veri tabanı değerlerine göre ilk olarak Comsol programında bir benzetim gerçekleştirilecektir. Benzetim çalışmasında Şekil 5-(a)'da verilen manyetik alan çizgileri ve Şekil 5-(b)'de gösterilen malzemenin sıcaklık grafiğinden faydalanılacaktır.



Şekil 5. Comsol benzetim çalışmasında, (a) Manyetik akı yoğunluğu, (b) Yüzey sıcaklığı.

Sayısal benzetim ortamında elde edilen manyetik alan dağılımları ve sıcaklık profilleri, deneysel uygulamaya geçmeden önce sistemin çalışma aralıklarının doğrulanmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, hem güç elektroniği katında aşırı zorlanmaların önüne geçmekte hem de mikrodenetleyici tabanlı kontrol algoritmasının daha dar ve güvenli bir parametre aralığında çalışmasına imkân tanımaktadır. Böylece deneysel süreçte deneme-yanılma ihtiyacı azaltılarak sistemin daha kısa sürede kararlı ve verimli çalışması hedeflenmektedir.

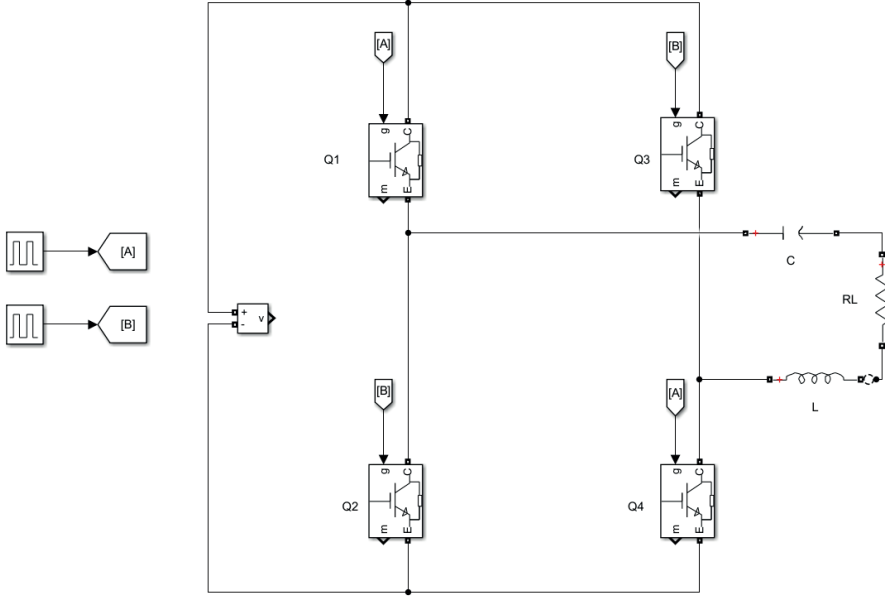
Elde edilen benzetim sonuçlarına göre hazırlanan veri tabanı kullanılacaktır. Böylelikle çalışmanın daha kısa sürelerde uygulama kısmının tamamlanması beklenmektedir. Benzetim çalışmasında kullanılan veri tabanı değerleri daha sonra Şekil 6 ile gösterilen arayüz ile seçimi gerçekleştirilecektir. Arayüz seçimindeki parametreler aşağıdaki gibi açılır pencere seçimleri ile gerçekleştirilecektir. Seçim sonrası belirlenen frekans parametreleri TCP protokolleri kullanılarak mikrodenetleyiciye aktarılacaktır.



Şekil 6. C# arayüz görünümü.

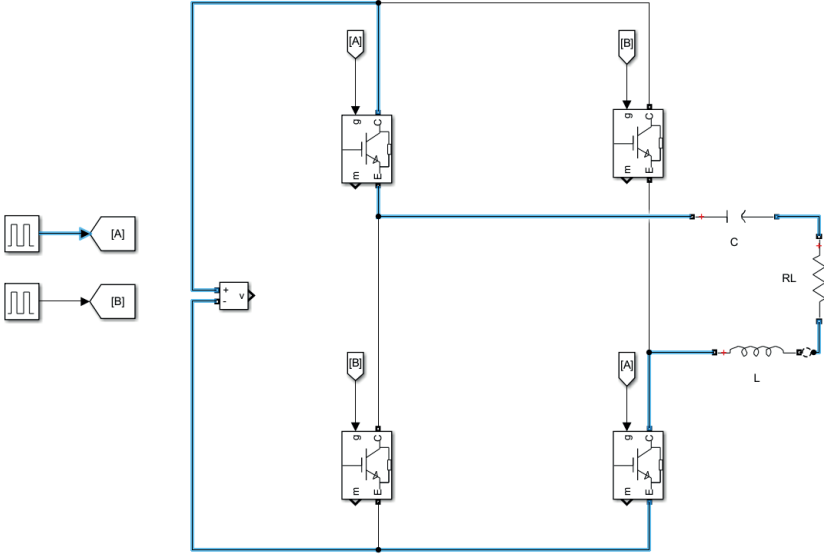
Çalışma frekansı MHz mertebesinde olduğundan çok yüksek frekanslar yerine maliyeti daha düşük mikrodenetleyici kullanılacaktır. 16 MHz çalışma frekanslı Arduino Mega tercih edilmiştir. Ancak mikrodenetleyici çıkış akımı, IGBT gate girişini sürebilecek güce sahip değildir. Bunun için mikrodenetleyici çıkışına motor sürücü shield bağlanacaktır.

İndüksiyon bobinin bağlı olduğu frekans kontrol devresi Şekil 7’de gösterilmiştir. Devrede 4 adet IXXK100N60C3H1 IGBT kullanılacaktır. Kontrol devresinin maksimum çıkış gücü 50kW, 1200 V ve 200 A gücünde olacaktır.

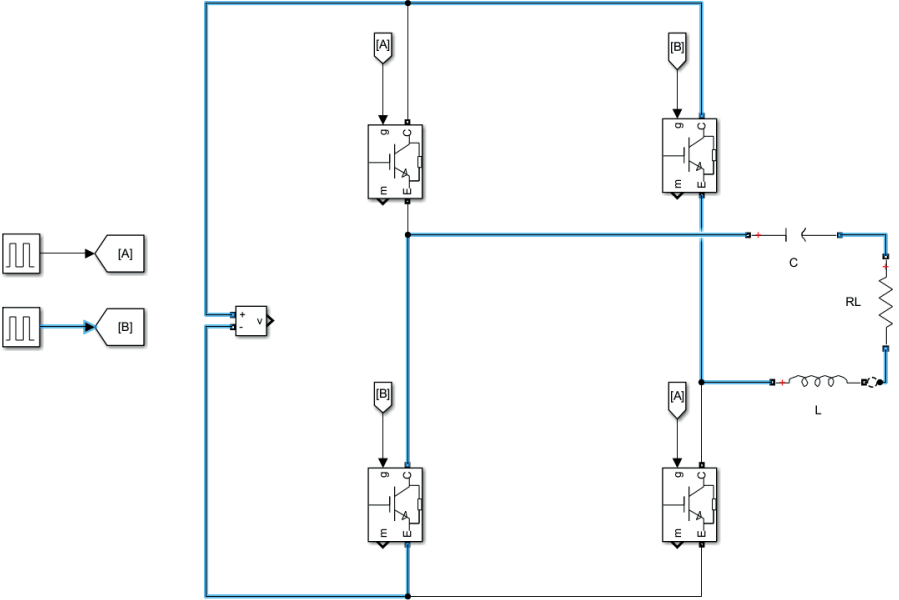


Şekil 7. İndüksiyon ısıtma frekans kontrol devresi.

Frekans kontrol devresi H köprü bağlantısına sahiptir. Buna göre tetikleme sinyali Şekil 8-(a) ve Şekil 8-(b)'da gösterildiği gibi sırayla tetiklenerek istenen frekans ve güç indüksiyon bobinine aktarılacaktır. Aktarılan frekans kontrollü güç ile endüstriyel işlem uygulanan iş parçasının durum termal kamera kullanılarak ölçülecek ve elde edilen sonuçlar gerek Comsol çalışması ile gerekse de teorik olarak hesaplanan cilt derinliği ile karşılaştırılacaktır. Elde edilen sonuçlar hedef olarak gösterilen sonuçları verene kadar gerekli optimizasyon işlemleri gerçekleştirilecektir.



(a)



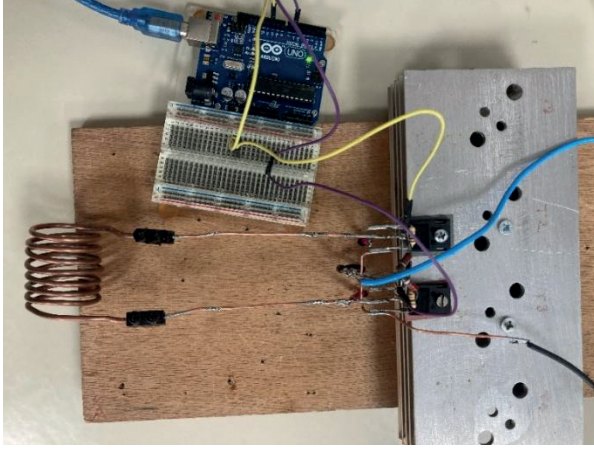
(b)

Şekil 8. İndüksiyon ısıtma frekans kontrol devresi: (a) Pozitif tetikleme, (b) Negatif tetikleme.

Çalışmada kullanılacak tam köprü devresi yüksek çıkış güçlü devrelerde kullanılır. Tam köprü devresi, seri rezonans tankını besler. Devrede dört adet IGBT anahtarlama transistörü kullanılır ve iki transistör aynı anda tetiklenir. IGBT'ler %50 anahtarlama periyotlarında yazılım kontrollü mikrodenetleyiciler ile gerçekleştirilecektir. Şekil 8'de verilen devrede gösterilen Q1 ve Q4 transistörleri A anahtarlama sinyali ile tetiklendiğinde, akım rezonans frekansının yarım döngüsü boyunca indüksiyon bobinini besler. B anahtarlama sinyali uygulandığında Q1 ve Q4 transistörleri iletimden çıkar, Q2 ve Q3 transistörleri iletime girer. A ve B anahtarlama sinyalleri birbirlerinin eşleniği olacak şekilde mikrodenetleyici çıkışından elde edilir. Bu sinyaller indüksiyon ısıtma yapılacak sisteme göre arayüz programı ile belirlenir. Devre board üzerinde kurulmadan önce Matlab Simulink programında benzetimi gerçekleştirilecektir. Her iki iletim durumunda bobin akımı dalga biçimleri ve gerilimleri incelenecektir.

Bu yapı sayesinde frekans ve anahtarlama dizileri yalnızca donanımsal rezonans elemanlarına bağlı kalmadan yazılım üzerinden kontrol edilebilmektedir. Mikrodenetleyici tarafından üretilen tetikleme sinyallerinin arayüz programı ile belirlenmesi, sistemin farklı ısı işlem senaryolarına hızlı bir şekilde adapte olmasına olanak tanımaktadır. Böylece klasik indüksiyon ısıtma sistemlerinde karşılaşılan devre yeniden tasarım zorunluluğu ortadan kaldırılmaktadır.

Bu aşamada, tasarlanan mikrodenetleyici tabanlı ve arayüz kontrollü indüksiyon ısıtma sisteminin gerçek çalışma koşulları altında doğrulanabilmesi amacıyla deneysel bir düzenek oluşturulmuştur. Güç elektroniği katı, kontrol devresi, indüksiyon bobini ve iş parçasını içeren bu deneysel yapı, hem sistemin elektrikselsel olarak kararlı çalışmasını hem de hedeflenen ısı etkinin pratikte elde edilip edilemediğini gözlemlemeye imkân tanımaktadır. Deneysel düzenek ve uygulama sırasında elde edilen sıcaklık artışı Şekil 9'da sunulmaktadır.



(a)



(b)

şekil 9. Deneysel alışma Devresi (a) Genel Görünüm, (b) Metalin ulaştığı sıcaklık.

Şekil 9(a)'da mikrodenetleyici kontrollü tam köprü inverter yapısı ve indüksiyon bobini ile oluşturulan deneysel çalışma devresinin genel görünümü verilmiştir. Şekil 9(b)'de ise uygulanan frekans ve güç seviyeleri altında metal iş parçasının ulaştığı sıcaklık durumu gösterilmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlar, teorik olarak hesaplanan cilt derinliği ve sayısal benzetim sonuçları ile uyumlu olup, önerilen sistemin farklı ısı işlem senaryoları için yazılım tabanlı olarak etkin bir şekilde kontrol edilebildiğini doğrulamaktadır.

Çalışmanın hedefine ulaşması durumunda farklı malzeme türleri, bu malzemelerin çap ve uzunlukları, yapılacak işin türünün seçiminin yapılabileceği bir arayüz geliştirilecek ve bu arayüz ile mikrodenetleyici kontrol edilerek mikrodenetleyiciye bağlı kontrol ünitesindeki yarı iletkenler ile frekans seçimi yapılabilecektir. Kontrol ünitesinin kullanımıyla yüksek ısıtma kalitesi, artan iş verimi, daha kısa işlem süreleri ve enerji verimliliği sağlanmakta; bununla birlikte ekipman yatırım ve üretim maliyetlerinin azaltılması ve indüksiyon ısıtma sürecinin daha kolay yönetilmesi mümkün hâle gelmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, indüksiyon ısıtma sistemlerinin elektromanyetik temelleri esas alınarak, frekans, akım ve manyetik alan parametrelerinin yazılım tabanlı olarak kontrol edilebildiği mikrodenetleyici ve bilgisayar arayüzü destekli bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı sunulmuştur. Önerilen yapı, farklı malzeme türleri ve ısı işlem gereksinimleri için donanımsal değişikliğe ihtiyaç duyulmadan çalışma parametrelerinin ayarlanabilmesine olanak tanımaktadır. Elektromanyetik teori, cilt derinliği analizi ve sayısal benzetim sonuçları, geliştirilen kontrol yaklaşımının fiziksel tutarlılığını desteklemekte; güç elektroniği tabanlı tam köprü inverter yapısı ise yüksek güç seviyelerinde güvenilir bir çalışma sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem endüstriyel uygulamalarda esnek ve maliyet etkin indüksiyon ısıtma sistemlerinin geliştirilmesine katkı sunmakta hem de eğitim ve araştırma amaçlı kullanılabilir bütünlük bir deneysel platform önermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından STMYO-2025-008 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- B. Meziane and H. Zeroug, "Comprehensive Power Control Performance Investigations of Resonant Inverter for Induction Metal Surface Hardening," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6086-6096, Oct. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2581145.
- Bukanin, V. A., Ivanov, A. N., Zenkov, A. E., & Vologdin, V. V. (2018, March). Induction Hardening of External Gear. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 327, No. 2, p. 022016). IOP Publishing.
- Dawson, F. P., & Jain, P. (1990). Systems for induction heating and melting applications: a comparison of load commutated inverter. In *21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists* (pp. 281-290). IEEE.
- H. Oh et al., "A Study on High-Frequency Induction Heating System for Railway Turnout," 2019 IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/PEDS44367.2019.8998755.
- Hammouma, C., & Zeroug, H. (2022). Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 27, 101006.
- I. A. Makulov and A. E. Alitdinov, "The equipment and application features of induction heating in oil and gas industry," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076227.
- I. Lope, J. Acero and C. Carretero, "Analysis and Optimization of the Efficiency of Induction Heating Applications With Litz-Wire Planar and Solenoidal Coils," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 7, pp. 5089-5101, July 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2478075.
- Jomaa, W., Songmene, V., & Bocher, P. (2013). On residual stress changes after orthogonal machining of induction hardened AISI 4340 steel. In *Proceedings of Materials Science and Technology Conference and Exhibition, MS&T* (Vol. 13, pp. 94-103).

- Lucia, O., Acero, J., Carretero, C., & Burdio, J. M. (2013). Induction heating appliances: Toward more flexible cooking surfaces. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(3), 35-47.
- Lucia, O., Navarro, D., Guillén, P., Sarnago, H., & Lucia, S. (2019). Deep learning-based magnetic coupling detection for advanced induction heating appliances. *IEEE access*, 7, 181668-181677.
- Manuel G, Khan, MTE. Design Of An Induction Heating Domestic Water Heater System, MSc Thesis, Cape Peninsula University of Technology, Bellville, South Africa, 2009.
- Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. L. (2017). *Handbook of induction heating*. CRC press. Semiatin, S. L. (1988). *Elements of induction heating: design, control, and applications*. Asm International.



ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ BATARYA SİSTEMLERİNE GENEL BİR İNCELEME

“ ”

Osman ZENK¹

¹ Dr., <https://orcid.org/0000-0002-5627-7231> , Graduate School of Sciences, Giresun University, 28200 Giresun, Turkey. NYC Bike Rental Corp. New York, USA

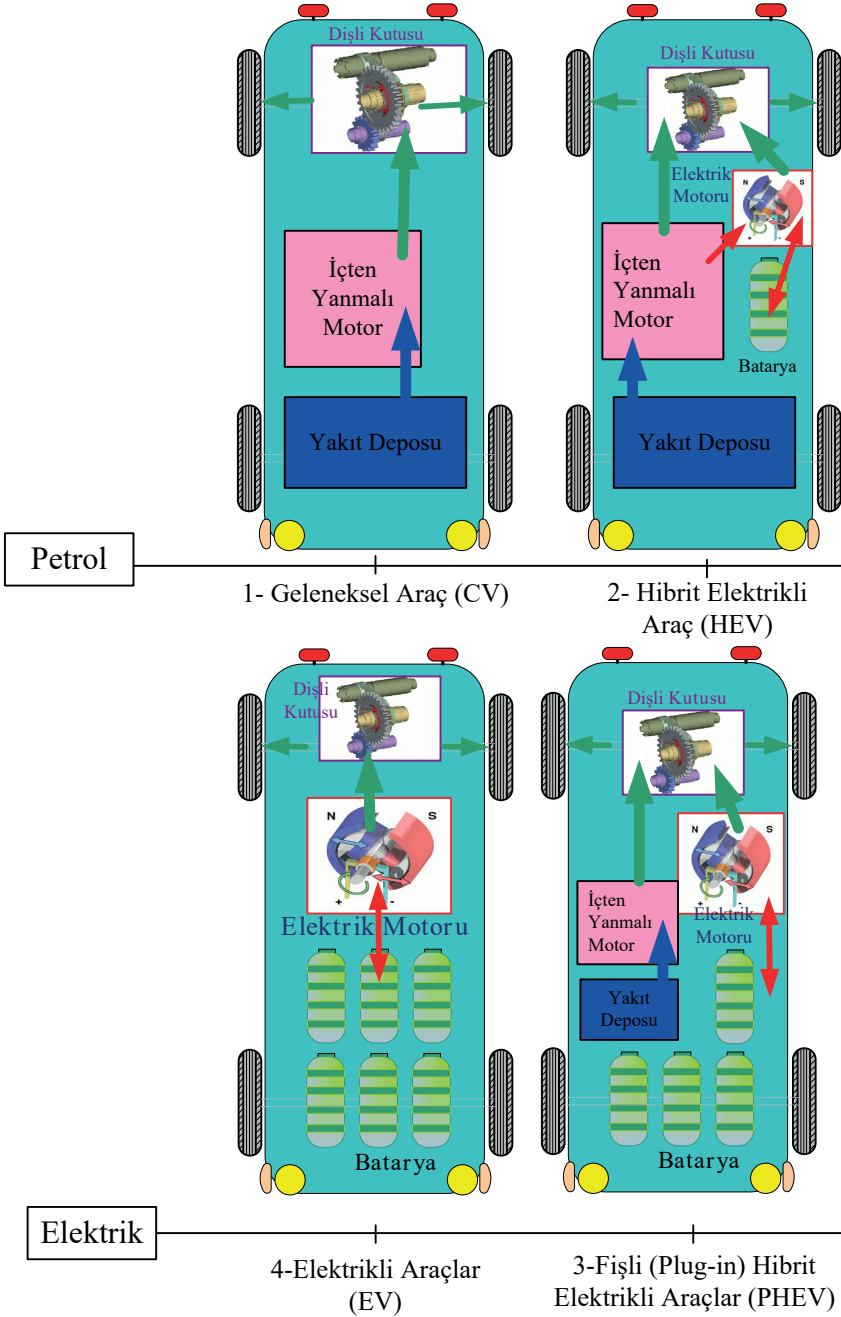
1. GİRİŞ

Bilindiği gibi insanlık fosil kaynaklı yakıtlara aşırı şekilde bağımlı durumdadır. Türkiye’de akaryakıt tüketimiyle ilgili en güncel veriler, 2022 yılına ait olup bu verilere göre, yurt içi petrol tüketimi 29.521.468 ton olarak kaydedilmiştir [1]. Bu rakam, benzin, motorin (mazot), fueloil, havacılık, denizcilik, gazyağı ve diğer ürünleri kapsamaktadır. Kişi başına düşen araç sayısı açısından, 2020 yılında Türkiye’de bin kişi başına 157 otomobil düşmekteydi ve bu oranla Türkiye, Avrupa’da kişi başına en az otomobil düşen ülke konumundaydı [2]. 2023 yılı itibarıyla, trafiğe kayıtlı taşıt sayısı 26,5 milyona ulaşmış ve yaklaşık her 3 kişiye bir araç düşmektedir [3].

Dünyadaki durum ise 2016 yılı verilerine göre, ortalama bir insan 17.600 dakika veya 290 saatini arabada geçirerek o yıl kullanılan 391,73 milyon galon benzini kullanarak atmosferin kirliliğine katkıda bulunmuştur [4-5]. Elektrikli araçların kullanımı ile benzin tüketimi %75’e kadar azaltabilmektedir [6]. Amerika Birleşik Devletleri’nde Elektrikli araç sayısı 2023’e kıyasla %7,3 artarak 1.301.411 adete ulaşarak elektrikli araç pazarı hızlı bir şekilde büyümeye devam etmektedir [7]. 2022’den Şubat 2025’e kadar pazarda %40’lık bir büyüme gerçekleşmiştir [8].

Elektrikli araç türleri hibrit elektrikli araçlar (HEV’ler), plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV) ve elektrikli araçlar (EV’ler) şeklinde isimlendirilmektedir. Her bir elektrikli araç türü farklı bir batarya paketi şarj durumu (SOC) aralığında çalışır. HEV’ler tipik olarak daha yüksek bir SOC’de çalışır ve sürekli olarak şarj ve deşarj durumları arasında çalışır. PHEV’ler ise başlangıçta EA’lara benzer şekilde çalışır, ancak bir batarya paketi belirlenen alt SOC sınırına ulaştığında, PHEV’ler bir HEV aracı gibi hareket ederek sürekli şarj ve deşarj moduna geçer. EV’ler çalışma sırasında, şarj döngüsü için tekrar fişe takılana kadar sürekli çalışarak deşarj durumunda çalışırlar. Bu üç elektrikli araç türü arasındaki farkların bir özeti Şekil 1’de gösterilmiştir [9].

Hibrit elektrikli araçlar, rejeneratif frenleme ve rölanti emisyonlarını azaltmak için daha küçük bir batarya paketi ile birlikte bir içten yanmalı motor kullanır. Batarya paketi kapasiteleri 1 ila 2 kWh arasında değişmektedir [10]. HEV örnekleri arasında 1,3 kWh motorlu Honda Markasının, Accord modeli hibrit, Chevy’nin 1,5 kWh’lik hibrit Malibu modeli, Toyota markasının 1,3 kWh’lik Pruis modeli ve 1,6 kW’lik Camry modelleri ile Ford’un 1,4 kW’lik hibrit Fusion modelleri bulunmaktadır.



Şekil 1. Elektrikli Araçların Karşılaştırılması.

Plug-in hibrit elektrikli araçlar, daha küçük bir içten yanmalı motor ile orta büyüklükte bir bataryaya paketlenir ve bataryayı içten yanmalı motorla

şarj etme özelliğine sahiptir. Batarya paketi kapasiteleri 8kWh ile 20 kWh arasında değişmektedir. PHEV'lere örnek olarak BMW X1 Plug-in Hybrid, Jeep Renegade 4xe Plug-in Hybrid ve Toyota'nın Prius-Prime modelleri verilebilir. Tüm elektrikli araçlar arasında en yüksek pazar paylarından biri, 2016 yılında %46 pazar payına sahip olan plug-in hibrit elektrikli araçlardır (PHEV'ler) [11]. PHEV bataryaları %10 ile %30 arasında bir şarj durumunda (SOC) çalışmaktadır.

Günümüzde elektrikli araçların bataryalarındaki enerjinin daha verimli kullanılmasına yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır [12-13]. Bu çalışmalar DC dönüştürücüler [14-16], anahtarlama metotları [17], batarya yönetim sistemlerinin klasik yada bulanık mantık tabanlı kontrolü [18-22], çeşitli türdeki motor tiplerinin kontrolü, yada yenilenebilir kaynaklı sistemlerdeki dönüştürücülerin modern tabanlı kontrolleri üzerinedir [23-24].

Tam elektrikli araçlarda yalnızca bir batarya paketi bulunur içten yanmalı bir motor yerine elektrik motoru bulunur. Batarya paketinin tipik kapasiteleri yaklaşık 20 kWh ila 100 kWh arasındadır. Mevcut elektrikli araçlar arasında Nissan'ın Leaf modeli, Tesla markasının, S modeli ve Chevy'nin Bolt EV modelleri bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri İleri Batarya Cemiyeti (USABC)'ne göre elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrünün sonunda (EOL), bataryaların başlangıç kapasitesinin yalnızca %80'inin kalması gerekmektedir [25].

Günümüzde pil insan hayatını kolaylaştıran ve çok geniş bir kullanım alanına sahip çok önemli bir enerji depolama aygıtıdır. Bilimsel olarak pil, kimyasal enerjinin depolanabilmesi ve elektrik enerjisi formuna istenildiğine dönüştürülebilmesine elektron ve iyon transferi ile imkân veren karmaşık bir sistem olarak tanımlanabilir. Piller, bir veya daha fazla elektrokimyasal hücre, yakıt hücresi veya akış hücresi gibi, elektrokimyasal aygıtlardan oluşur. Tarihte bilinen en eski insan yapımı pil, kil çömlekten yapılan içerisinde bakır bir silindirin bulunduğu bu silindir içerisinde de demir çubuğun yerleştirildiği yapı olarak değerlendirilmektedir. Arkeolog Wilhelm König'in 1936 yılında Irak'ın başkenti Bağdat'ta keşfettiği MÖ 250 ve MS 640 yılları arasında yapıldığı tahmin edilen bu pille yapısı ile ilgili pil olmadığı konusunda farklı iddialar da bulunmaktadır. Şekil 2'de buluntular gösterilmektedir.



Şekil 2. Bağdat pili buluntuları [26].

Esasen pillerin bilimsel olarak gelişimi, 1780 yılında, çeşitli iletken aletleri ile kurbağa üzerinde deney yapan Luigi Galvani'nin "hayvan elektriği" olarak tanımladığı fenomenin hatalı olduğu ve iki aynı metalin sebep olduğu hipotezini 1791 yılında İtalyan fizikçi Alessandro Volta deneysel olarak kanıtladı. 1800 yılında ise sürekli bir akım üretebilen bakır elektrotlar arasında çinko disklerden oluşan birbirinden tuzlu suya batırılmış bezle ayrılan voltaik pil yapısı bilinen ilk pildir.

Pil yada batarya terimi sıklıkla kullanılsa da, atıfta bulunulan temel elektrokimyasal birim "hücre"dir. Bir pil, istenen çıkış voltajına ve kapasitesine bağlı olarak seri veya paralel veya her ikisine birden bağlı bu hücrelerden bir veya daha fazlasından oluşur. Bir pil hücresi üç ana bileşenden oluşur. Bunlardan ilki, anot olarak isimlendirilen elektronları dış devreye veren ve elektrokimyasal reaksiyon sırasında oksitlenen negatif elektrottur. İkincisi, elektronları dış devreden alan ve elektrokimyasal reaksiyon sırasında indirgenen katot isimli pozitif elektrottur. Sonucusu ise, anot ve katot arasında hücre içinde iyonlar halinde yük transferi için ortam sağlayan elektrolittir.

Anot ve katot malzemelerinin en avantajlı kombinasyonları, yüksek hücre voltajı ve kapasitesi sağlamalarıdır. Pratik sistemlerde, anot seçiminde kriter, indirgeyici madde olarak verimlilik, yüksek kulombik çıkış (Ah/g), iletkenlik, kararlılık, üretim kolaylığı ve düşük maliyettir. Metaller esas olarak anot malzemeleri olarak kullanılır ve en popüler örnekler Çinko ve Lityum'dur. Öte yandan, katot etkili bir oksitleyici madde olmalı, kullanışlı bir çalışma voltajına sahip olmalı ve elektrolit ile temas halindeyken kararlı kalmalıdır. Yaygın katot malzemelerinin çoğu metal oksitlerdir. Elektrolit için gereken özellikler iyi iyonik ancak elektriksel iletkenlik değil, elektrot malzemeleriyle tepkime

vermemeye, sıcaklıkla özelliklerinde çok az değişiklik ve düşük maliyettir. Çoğu elektrolit sulu çözeltilerdir ancak örneğin termal ve lityum anot pillerinde olduğu gibi önemli istisnalar vardır [27].

Anot ve katot elektrotları, hücre içerisinde doğrudan temas ederek kısa devreye neden olmamaları için elektriksel olarak izole edilmiş şekilde yerleştirilir; ancak bu elektrotlar elektrolit ile çevrilidir. Uygulamada, bu iki elektrotu fiziksel olarak birbirinden ayırmak amacıyla, iyon geçişine izin veren özel bir ayırıcı malzeme kullanılır. Bu ayırıcı, iyonik iletkenliği korurken elektriksel yalıtımı da sağlar. Hücreler; yuvarlak, prizmatik ya da zarf tipi gibi çeşitli fiziksel formlarda üretilebilir. İçerdiği bileşenler, hücrenin dış gövdesine uygun biçimde tasarlanır ve sızdırmazlık sağlamak için çeşitli mühendislik yöntemleriyle kapatılır. Bu da hem elektrolit sızıntısını hem de iç nemin kaybını önler.

BÖLÜM 1. 1.1. Hücre ve Pillerin Sınıflandırılması

Elektrokimyasal hücreler ve piller, yeniden şarj edilip edilememelerine göre iki temel gruba ayrılır: birincil (tek kullanımlık) ve ikincil (yeniden şarj edilebilir) hücreler. Bu temel ayrımın yanı sıra, hücrelerin yapısal özelliklerini ya da tasarım prensiplerini belirtmek için farklı alt sınıflandırmalar da kullanılmaktadır [28].

Birincil piller; uygun maliyetli, hafif, taşınabilir ve uzun raf ömrüne sahip olmalarının yanı sıra düşük ya da orta düzey deşarj oranlarında yüksek enerji yoğunluğu sunmalarıyla öne çıkar.

Öte yandan ikincil piller, kullanıldıktan sonra ters yönde bir elektrik akımını uygulanarak tekrar şarj edilebilir. Bu şarj-deşarj döngüsü, hücrenin türüne ve üretim kalitesine göre yüzlerce hatta binlerce kez tekrarlanabilir. Bu tür piller, elektrik enerjisini depolamak amacıyla kullanıldıkları için “depolama hücreleri” ya da daha yaygın adıyla “akümülatörler” olarak da adlandırılır [28].

İkincil pillerin kullanım alanları genel olarak iki temel başlık altında toplanmaktadır. İlk olarak, bu piller birincil bir enerji kaynağına entegre edilmiş bir enerji depolama aracı olarak görev yaparlar. Bu senaryoda, ikincil pil harici bir enerji kaynağı tarafından şarj edilir ve ihtiyaç halinde bağlı bulunduğu yüke enerji sağlar. Bu tür uygulamalara otomotiv ve havacılık sistemleri, kesintisiz güç kaynakları (UPS) ile hibrit elektrikli taşıtlar örnek gösterilebilir.

İkinci kategoride ise ikincil piller doğrudan enerji kaynağı olarak kullanılır; yani birincil pil gibi işlev görür, ancak deşarj olduktan sonra atılmak yerine tekrar şarj edilerek yeniden kullanıma sunulur. Bu kullanım biçimi özellikle taşınabilir elektronik cihazlarda, elektrikli el aletlerinde ve elektrikli araçlarda yaygındır. Bu tür piller, yüksek güç yoğunluğu, hızlı deşarj kabiliyeti ve sabit deşarj profilleri ile dikkat çeker; ancak enerji yoğunlukları çoğunlukla birincil pillere göre daha düşüktür [29].

1.2. Hücre Elektriksel Özellikleri

Bu bölümde, batarya hücrelerinin elektriksel performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan temel terimler açıklanmaktadır.

Gerilim (Voltaj): Hücrenin standart potansiyeli, içerisindeki aktif maddelerin kimyasal yapısına bağlı olarak belirlenir. Bu değer, pilin çalışabileceği maksimum teorik voltajı temsil eder [28].

Kapasite: Bir hücrenin ne kadar elektrik depolayabileceğini gösteren kapasite değeri, aktif madde miktarıyla ilişkilidir. Genellikle coulomb (C) veya amper-saat (Ah) birimleriyle ifade edilir ve elektrokimyasal reaksiyon sonucu elde edilen toplam yük miktarını belirtir.

Enerji: Kapasite ve voltaj değerlerinin çarpımı, teorik enerji miktarını verir. Watt-saat (Wh) cinsinden ölçülen bu değer, bir hücrenin sağlayabileceği maksimum enerjiyi ifade eder.

Enerji Yoğunluğu (Wh/kg): Hücrenin birim kütlesi başına sağlayabildiği enerji miktarıdır. Bu parametre, genellikle “gravimetrik enerji yoğunluğu” olarak da adlandırılır ve hücrenin kimyasal yapısına ve ambalaj tasarımına bağlıdır. Daha hafif sistemlerde daha yüksek enerji taşıma kapasitesini değerlendirirken kritik bir ölçüttür [28].

Güç Yoğunluğu – Özgül Güç (W/kg): Bir hücrenin kısa sürede sağlayabileceği maksimum güç miktarıdır. Bu değer de hücrenin kimyasına ve yapısal özelliklerine bağlıdır ve belirli uygulamalarda gerekli performansa ulaşmak için gereken pil ağırlığını hesaplamada kullanılır.

Sonuç olarak, bir elektrokimyasal hücrenin sağlayabileceği teorik maksimum enerji; kullanılan aktif malzeme türlerinin belirlediği hücre voltajına ve bu malzemelerin miktarının belirlediği kapasiteye (amper-saat) bağlıdır. Ancak pratikte bu teorik enerjinin tamamı elde edilemez. Bunun başlıca nedeni, aktif olmayan bileşenlerin –örneğin hücre kabı, ayırıcı, elektrot yapıları ve elektrolit gibi– hücreye ek ağırlık ve hacim katmasıdır [28].

Buna ek olarak, piller genellikle teorik voltajlarında çalışmazlar; bu durum ortalama çıkış voltajını düşürür. Ayrıca, hücreler genellikle sıfır volta kadar tamamen deşarj edilmez, bu da sağlanan toplam kapasitenin azalmasına neden olur. Tüm bu etkenler bir araya geldiğinde, pilin özgül enerjisinde önemli düşüşler meydana gelir.

Yapılan deneysel çalışmalar, optimuma yakın koşullar altında bile, gerçek deşarjla elde edilebilen enerjinin, aktif malzemenin teorik enerji potansiyelinin yalnızca %25 ila %35'ine karşılık geldiğini göstermektedir [29].

1.3. Pil Terminolojisi

Pillerin performansını değerlendirmek ve işleyişini anlamak adına bazı teknik terimler büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde, pil teknolojisinde yaygın olarak kullanılan kavramlar açıklanmaktadır. Pilin durumunu belirten kavramlar aşağıda verilmiştir.

Açık Devre Gerilimi (OCV): Pil hiçbir yüke bağlı değilken, pozitif ve negatif kutuplar arasında ölçülen voltajdır. Bu değer, pilin mevcut şarj seviyesine göre değişir ve şarj durumu arttıkça genellikle yükselir.

Çalışma Gerilimi: “Kapalı devre gerilimi” ya da “terminal voltajı” olarak da adlandırılan bu değer, pil bir yüke bağlandığında elektrotlar arasındaki voltajı ifade eder. Bu gerilim, hem şarj durumuna hem de şarj/deşarj sırasında geçen akıma göre değişkenlik gösterir.

Deşarj Hızı (C Oranı): Pilin deşarj sürecinde uygulanan akım, kapasiteye oranla değerlendirilerek C oranı şeklinde ifade edilir. Örneğin 1C oranı, pilin bir saat içerisinde tamamen boşalmasını ifade eder. Bu oran, pilin güç sağlama yeteneğini değerlendirmede kullanılır.

Deşarj Derinliği (DoD): Pilin ne kadar kapasitesinin kullanıldığını gösterir. Maksimum kapasitenin yüzde kaçının tüketildiğiyle tanımlanır. Örneğin %80 DoD, pilin %80’lik kısmının kullanıldığı anlamına gelir ve bu durum “derin deşarj” olarak nitelendirilir.

Şarj Durumu (SoC): Pilin mevcut enerji miktarının, toplam kapasitesine oranla ifade edilmiş yüzdesidir. Genellikle zamanla değişen akım değerleri üzerinden hesaplanır ve pilin enerji seviyesini gösterir.

Sağlık Durumu (SoH): Pilin ilk üretildiği zamanki durumu ile şu anki performansı arasındaki farkı yansıtır. İç direnç, kapasite, voltaj, kendi kendine deşarj oranı, şarj kabul etme yeteneği ve bugüne kadar geçen döngü sayısı gibi parametrelerin bileşimiyle belirlenir. Pilin genel ömrü hakkında fikir verir.

İç Direnç: Pilin iki elektrodu arasında, akım toplayıcıları, elektrotlar, ayırıcılar ve elektrolitlerin oluşturduğu toplam elektriksel dirençtir. Düşük iç direnç, yüksek verimli çalışmayı sağlar. Direncin artması, şarj verimliliğini düşürürken, fazla ısınmaya da yol açabilir.

Kendiliğinden Deşarj: Pil kullanılmazken bile iç yapısında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar nedeniyle enerji kaybı yaşanabilir. Bu durum, pilin raf ömrünü kısaltır ve uzun süre bekletilen pillerin ilk kullanıldığında daha az enerjiye sahip olmasına neden olur [30].

1.4. Pil Teknik Özellikleri

Aşağıda açıklanan teknik terimler, pil hücrelerinin, modüllerinin ve paketlerinin performansını tanımlamak amacıyla teknik dokümanlarda sıklıkla kullanılır [30].

Nominal Gerilim: Bir pilin standart bir deşarj oranı olan 0,2C akımında, tam deşarj süresi boyunca sağladığı ortalama voltaj değeridir. Bu değer, genellikle pilin “tipik” çalışma voltajı olarak kabul edilir.

Kesme Gerilimi (Cut-off Voltage): Şarj veya deşarj işlemi sırasında, pilin iki ucu arasındaki gerilimin ulaşabileceği en düşük (veya şarjda en yüksek) değeri temsil eder. Bu sınır değere ulaşıldığında pilin kullanım döngüsü sona erdirilir. Genellikle, pilin tamamen boşalmış olduğu nokta olarak değerlendirilir.

Deşarj Eğrisi: Pilin voltajının, deşarj süreci boyunca zamana bağlı olarak nasıl değiştiğini gösteren grafiksel bir ifadedir. Bu eğri, pilin performansı hakkında önemli bilgiler sunar.

Nominal Kapasite (Ah, belirli bir C oranında): Pilin belirli bir deşarj akımında (örneğin 0,2C) sağladığı toplam kapasitedir. Amper cinsinden akım ile saat cinsinden süre çarpılarak elde edilir. C oranı arttıkça, yani pil daha hızlı boşaltıldıkça bu kapasite değeri düşer.

Nominal Enerji (Wh, belirli bir C oranında): Pilin belirli bir deşarj hızında sağlayabileceği toplam enerji miktarıdır. Watt cinsinden güç ile deşarj süresi (saat olarak) çarpılarak hesaplanır. Tıpkı kapasite gibi, enerji miktarı da yüksek C oranlarında azalır.

Döngü Ömrü: Şarj edilebilir bir pilin, performansından ciddi bir kayıp yaşamadan kaç kez şarj ve deşarj döngüsüne girebileceğini ifade eder. Döngü ömrü; pilin kimyasal bileşimine, üretim kalitesine, kullanım koşullarına (örneğin sıcaklık, nem, deşarj derinliği) bağlı olarak değişir.

Maksimum Sürekli Deşarj Akımı: Pilin herhangi bir hasar görmeden veya kapasite kaybı yaşamadan sürekli olarak taşıyabileceği en yüksek akım değeridir. Bu limit genellikle üretici firma tarafından güvenli kullanım sınırlarını belirlemek amacıyla tanımlanır.

1.5. Geleneksel Pil ve Hücre Kimyaları

Farklı voltajlar, güç ve enerji performansları sunan çok çeşitli farklı hücre kimyaları vardır. Lityum iyon hücreleri, önceki kimyalardan önemli ölçüde daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir ve bu da onları otomotiv uygulamaları için özellikle uygun hale getirir. Ayrıca daha güvenli, daha az toksik ve önemli ölçüde daha uzun çevrim ömrüyle daha fazla enerji verimli olarak kabul edilirler. En popüler kimyalardan bazıları aşağıdaki bölümde sunulmaktadır.

1.5.1. Kurşun-Asit (Pb) Piller

Kurşun-asit tipi aküler, anot olarak sünger formunda kurşun, katot olarak kurşun dioksit ve elektrolit olarak seyreltik sülfürik asit çözeltisi içeren sistemlerdir. İçerdikleri ağır metal nedeniyle toksiktirler ve uygun olmayan biçimde bertaraf edilmeleri çevresel zarar oluşturabilir. Bu tip pillerin tipik hücre voltajı yaklaşık 2 Volt'tur.

Kurşun-asit piller, geniş üretim hacmi, farklı boyut ve yapı seçenekleri ile yaygın biçimde kullanılan düşük maliyetli ikincil (yeniden şarj edilebilir) enerji kaynaklarıdır. Yüksek akım taleplerine iyi cevap verebilmeleri, sıcaklık değişimlerine karşı orta düzeyde dayanıklılık göstermeleri, şarj durumunun kolayca izlenebilmesi ve aralıklı şarj koşullarında enerjiyi uzun süre muhafaza edebilmeleri en önemli avantajları arasındadır. Ayrıca, bu hücrelerin bileşenleri kolaylıkla geri dönüştürülebilir.

1.5.2. Nikel-Kadmiyum (NiCd) Piller

Nikel-kadmiyum hücrelerinde, katot malzemesi olarak nikel hidroksit (Ni(OH)_2), anot olarak ise kadmiyum (Cd) kullanılır. Elektrolit ortamı, potasyum hidroksit gibi alkali bir çözelti ile sağlanır. Bu hücrelerde elektrotlar, genellikle sulu kimyasal emdirme yöntemi ile üretilir. Uzay araştırmalarının ilk dönemlerinden itibaren bu tip piller, uzay araçlarında enerji depolama amacıyla kullanılmıştır.

NiCd piller; uzun çevrim ömrü, düşük sıcaklıklarda ve yüksek deşarj hızlarında istikrarlı çalışma kapasitesi, herhangi bir şarj seviyesinde uzun süre saklanabilirlik ve hızlı şarj olabilmeye gibi pek çok avantaja sahiptir. Bununla birlikte, “hafıza etkisi” adı verilen performans sorunu ve yüksek sıcaklıklarda kendiliğinden deşarj oranının artması, bu pillerin zayıf yönleri arasında yer alır. Kadmiyum elementinin ciddi derecede toksik olması nedeniyle, bu tür pillerin kullanımı çoğu ülkede yasaklanmıştır; yalnızca tıbbi cihazlar ve bazı askeri uygulamalarda istisna sağlanmaktadır [31].

1.5.3. Nikel Metal Hidrit (NiMH) Piller

Bu hücrelerde de yine katot olarak nikel hidroksit (Ni(OH)_2) kullanılır. Anot kısmında ise hidrojen aktif malzeme olarak görev yapar. Bu elektrotlar, genellikle lantan ve nadir toprak elementlerinden oluşan metal hidrit alaşımları ile üretilir. Bu alaşımlar, hidrojenin katı formda tutulabildiği yapılar oluşturarak pilin şarj-deşarj döngüsüne olanak tanır. Elektrolit yine alkali özellik gösterir ve genellikle potasyum hidroksit içerir.

NiMH piller, NiCd pillerine kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sunar. Hızlı şarj edilebilme, uzun çevrim ömrü ve herhangi bir şarj seviyesinde uzun süre saklanabilirlik gibi avantajlara sahiptir. Çevre açısından büyük bir sorun oluşturmazlar. Ancak yüksek akım taleplerinde NiCd piller kadar başarılı değildirler. Ayrıca şarjı koruma yeteneği zayıftır, hafıza etkisi görülebilir ve anot malzemeleri nispeten daha maliyetlidir. Bu piller, bilgisayarlar, cep telefonları ve benzeri tüketici elektroniği ürünlerinde yaygın şekilde kullanılmıştır. Ancak yüksek akım gerektiren el aletleri veya düşük maliyetin öncelikli olduğu uygulamalarda tercih edilmez. Bir dönem hibrit elektrikli araçlarda temel güç kaynağı olarak kullanılmış olsa da, zamanla lityum iyon pillerin ön plana çıkmasıyla pazar payı azalmıştır [31].

1.5.4. Lityum-İyon (Li-Ion) Piller

Lityum, düşük atomik ağırlığı ve yüksek standart elektrot potansiyeli sayesinde şarj edilebilir pillerde oldukça cazip bir elementtir. Bu tür piller, geleneksel şarj edilebilir pillere kıyasla üç kat daha fazla enerji yoğunluğu sunabilir. Son yıllarda, özellikle katı hâl kimyası alanında yapılan çalışmalarla, bu teknolojinin performansını daha da ileri taşımak hedeflenmiştir. Geliştirme çalışmaları; daha yüksek enerji yoğunluğu, daha yüksek güç sağlama kapasitesi, uzun çevrim ömrü, yüksek güvenlik için termal dayanıklılık ve hızlı şarj olanağına odaklanmıştır. Aynı zamanda, üretim maliyetlerini düşürmek için düşük toksisiteye ve çevresel açıdan zararsızlığa sahip hammaddelerin kullanımı ve sentetik süreçler üzerine de çalışmalar yürütülmektedir. Bu sayede, hem performans hem de maliyet açısından daha rekabetçi bir çözüm sunulması hedeflenmektedir [31].

1.5.5. Lityum Kobalt Oksit (LCO) Piller

Lityum Kobalt Oksit, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları ve tabletler gibi taşınabilir elektronik cihazlarda uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan bir pozitif elektrot malzemesidir. LCO hücreleri, orta seviyede çevrim ömrü (<500 çevrim) ve enerji yoğunluğu sunar. Ancak bu hücreler, kimyasal yapıları nedeniyle aşırı kullanım durumlarında—örneğin hücre delinmesi veya kısa devre gibi durumlarda—termal kararlılık açısından diğer geçiş metal oksitleri ya da fosfat bazlı kimyalara kıyasla daha zayıftır. Bu durum, termal kaçak riskini artırır ve dolayısıyla LCO hücrelerinin elektrikli ve hibrit araç uygulamalarında kullanımını sınırlar.

1.5.6. Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA) Piller

NCA kimyası, yüksek özgül enerji yoğunluğu ve tatmin edici güç kapasitesiyle dikkat çeker. LCO'ya kıyasla biraz daha güvenli kabul edilen NCA hücreleri, genellikle daha uzun çevrim ömrü sunar. Bu hücre tipi özellikle büyük formatlı otomotiv pillerinden ziyade, daha çok 18650 tipi silindirik hücrelerde tercih edilir.

1.5.7. Lityum Demir Fosfat (LFP) Piller

Fosfat bazlı lityum iyon teknolojileri, oksit temelli hücre kimyalarına göre daha yüksek termal ve kimyasal kararlılık gösterir. Bu da onları kötü kullanım koşullarında daha güvenli kılar ve termal kaçak riskini azaltır. LFP hücreleri ayrıca uzun çevrim ömrü ve yüksek yapısal kararlılık sunar. Her ne kadar enerji yoğunlukları oksit temelli sistemlere göre daha düşük olsa da, yüksek akım çekim kapasitesi ve uzun ömürleri sayesinde yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Ayrıca, maliyet, güvenlik ve çevresel toksisite açısından LCO hücrelerine göre önemli avantajlar sunarlar.

1.5.8. Lityum Manganez Oksit Spinel (LMO) Piller

Lityum Manganez Oksit Spinel hücreleri, kobalt bazlı hücrelere göre daha yüksek bir hücre voltajı sunar ve termal olarak daha kararlıdır. Ancak, enerji yoğunlukları genellikle yaklaşık %20 daha düşüktür. Manganez, düşük toksisitesi sayesinde daha güvenli ve çevre dostu bir katot malzemesi olarak öne çıkar. Bu kimyanın diğer avantajları arasında düşük maliyet ve yüksek deşarj oran kapasitesi yer alır. Öte yandan, spinel yapısından kaynaklanan düşük kapasite sınırlamaları vardır ve yüksek sıcaklıklarda lityum bazlı elektrolitlerle kararsızlık gösterebilir.

1.5.9. Lityum Nikel Kobalt Manganez Oksit (NCM) Piller

Herhangi bir tek hücre kimyası, enerji yoğunluğu, güç kapasitesi, maliyet, güvenlik ve çevrim ömrü gibi tüm kriterleri aynı anda karşılamasa da, karışık metal oksit bazlı sistemler—özellikle NCM kimyası—bu özellikler arasında dengeli çözümler sunar. NCM hücreleri, LCO ve LFP'ye kıyasla daha güvenli ve maliyet açısından daha avantajlı kabul edilirken; yüksek özgül enerji ve/veya güç sağlayacak şekilde optimize edilebilir. Bununla birlikte, çevrim ömrü genellikle makul seviyededir.

1.5.10. Lityum Titanyum Oksit (LTO) Piller

Bu teknoloji, geleneksel grafit negatif elektrot yerine lityum titanat kullanır. Lityum titanat, yukarıda belirtilen pozitif elektrot malzemelerinin çoğuyla uyumludur, ancak genellikle manganez bazlı katotlarla birlikte tercih edilir. LTO hücreleri, geniş çalışma sıcaklığı aralığına sahiptir ve yüksek hızda şarj/deşarj özellikleriyle dikkat çeker. Ayrıca, grafitte göre Li/Li^+ potansiyeline daha uzak bir çalışma aralığında olduklarından daha güvenli kabul edilirler ve belirli ölçüde aşırı şarj koruması sunarlar. Bununla birlikte, enerji yoğunlukları grafit bazlı sistemlere kıyasla genellikle daha düşüktür.

1.6. Hücre Yapısı Türleri

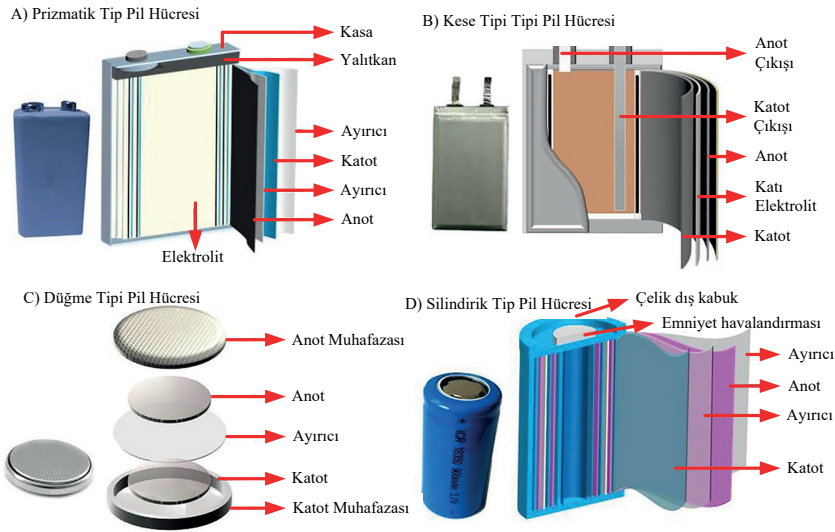
Enerji depolama malzemeleri ve genel hücre kimyası, genel hücre performansını belirlemede büyük bir rol oynar. Ancak, Lityum-İyon hücreleri, hücre mühendisliğinin genel hücreyi ve dolayısıyla son uygulamada pil performansını etkilemede de rol oynadığı çeşitli form faktörlerinde mevcuttur. Enerji depolama hücrelerinin, pil paketi yapısında bağlanmaları ve tutulmaları için tasarlanmış desteklere ve tutma sistemlerine ihtiyaçları vardır.

- Silindirik Tip, Lityum iyon hücresinin en yaygın biçimi, küçük silindirik hücre tipidir. En yaygın çeşidi, 18 mm çapında ve 65 mm uzunluğunda olduğu için 18650 olarak adlandırılan, dizüstü bilgisayarlar, elektrikli aletler ve E-Bisikletler dahil olmak üzere birçok tüketici uygulamasında en olgun ve kullanılan biçimdir. Hedef uygulamalara karşı güç ve/veya enerji için optimize edilmiş çok çeşitli 18650'ler mevcuttur. Hücreler, aşırı sıcaklık ve basınç kesme özellikleri gibi dahili güvenlik özellikleri içerebilir [31].

• Prizmatik Tip, Prizmatik lityum iyon hücrelerinin muhafazası olarak genellikle alüminyum veya çelik kutular kullanılır. Metal kasa, yapısal kararlılık, mekanik sağlamlık ve nem koruması sağlar. Ayrıca, kese hücrelerinde kullanılması mümkün olmayan basınç tahliye delikleri gibi güvenlik özelliklerinin kullanılmasına izin verir. Bazı durumlarda, prizmatik hücreler, form faktörleri nedeniyle paketlemenin silindirik hücrelerden daha verimli olmasını sağlayabilir [32].

• Kese Tipi, Kese hücreleri, iç elektrot yığınının yumuşak bir plastik-alüminyum paket içinde bulunduğu hücrelerdir. Akım toplayıcılar, dış bağlantıya izin vermek için contalardan çıkıntı yapan terminal tırnaklarına içten kaynaklanır [31].

Hücre paketleme malzemesinin en aza indirilmesi, kese hücrelerini metal gövdeli prizmatik hücrelere göre çekici hale getirir ancak aynı kimya türü için potansiyel olarak daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ancak hücreleri paket yapısında sınırlamak ve tutmak için genellikle karmaşık modül yapısı gerektirir. Geniş yüzey alanı termal yönetim için faydalı olabilir.



Şekil 1.3. Pil hücre tipleri (Li ve ark., 2019) [33].

Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunlukları, uzun çevrim ömürleri ve düşük kendi kendine deşarj oranları sayesinde; taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara, hatta yenilenebilir enerji sistemlerine kadar pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmalarının temelinde, lityum iyon pillerin sunduğu eşsiz avantajlar yer almaktadır.

Lityum elementi, tüm elementler arasında en düşük indirgenme potansiyeline sahiptir. Bu özelliği, lityum bazlı pillerin en yüksek hücre gerilimini sağlamasına olanak tanır [33]. Aynı zamanda lityum, periyodik tabloda üçüncü en hafif element olmasının yanı sıra, en küçük iyonik yarıçaplardan birine sahiptir [34]. Bu özellikler, lityum iyon pillerin hem yüksek özgül kapasiteye (ağırlık başına enerji), hem de yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahip olmasını sağlar [35].

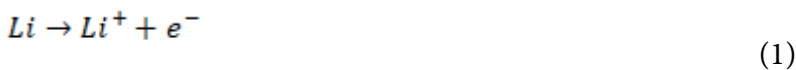
Bunlara ek olarak, lityum iyon pillerin kendi kendine deşarj oranlarının düşük olması, cihazların uzun süre şarj edilmeden bekletilebilmesine imkân tanır. Bu durum, özellikle taşınabilir cihazlar ve elektrikli araçlar gibi uzun bekleme sürelerine ihtiyaç duyan uygulamalarda büyük avantaj sağlar.

Her pil temel olarak; bir anot, bir katot ve bu iki elektrot arasında iyonların hareketini sağlayan bir elektrolitten oluşur. Anot ve katot, kimyasal yapılarından kaynaklanan farklı kimyasal potansiyellere sahiptir. Bu potansiyel farkı, elektrotlar dış devreyle bağlandığında elektron akışını başlatır ve böylece pilin şarj ve deşarj işlemleri gerçekleşir. Pilin sahip olduğu bu üç temel bileşenin özellikleri, sistemin çalışma voltajını, kapasitesini ve ömrünü doğrudan belirler.

Pillerde kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri pillerin kapasiteleri ile fiziksel hacimlerini etkiler, şöyle ki katot malzemesi olarak Li-NiO₂ kullanılan bir lityum iyon pilin kapasitesi yaklaşık 200 mAh/g iken, Li-FePO₄ kullanılan bir pilde bu değer yaklaşık 150 mAh/g civarındadır [36-37].

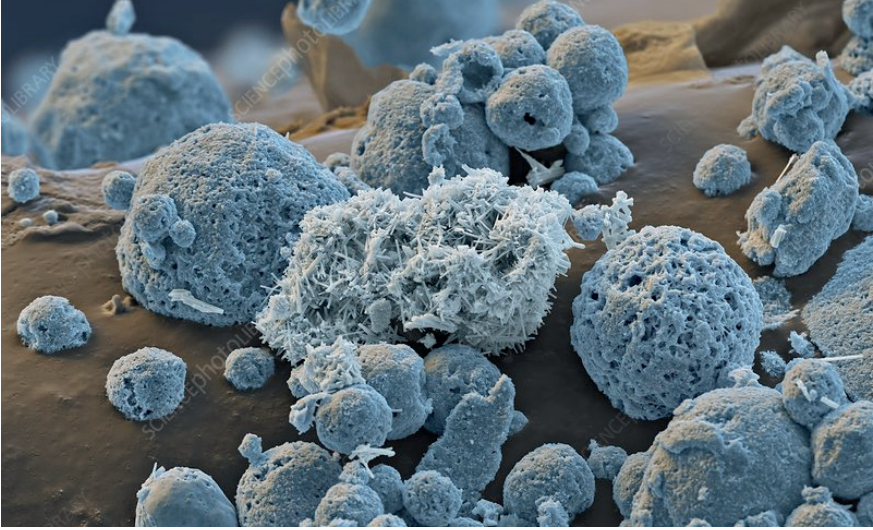
Ancak lityum iyon pillerin yaygınlaşması, bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Özellikle üretiminde kullanılan hammaddelerin giderek azalması, maliyetlerin artmasına neden olmaktadır [38]. Bunun yanı sıra, bileşenlerin oksidasyona yatkın olması, zamanla kimyasal tepkimelere yol açarak yanma ve patlama gibi güvenlik riskleri oluşturabilmektedir [39]. Bu tür sorunlara çözüm üretmek amacıyla; elektrolit bileşenlerinin geliştirilmesi, daha düşük maliyetli elektrot malzemelerinin kullanılması ve yeni üretim yöntemlerinin uygulanması gibi çeşitli araştırmalar sürdürülmektedir.

Bilindiği gibi lityum atomu, periyodik tablonun 1. grubunda (alkali metaller) yer alır. Dış yörüngesinde hareket eden sadece bir adet 2s elektronu vardır. Bu tek değerlik elektronu, atomun kolayca elektron vererek iyonlaşmasını sağlar. Bu özellik, Li⁺ iyonlarının elektrotlar arasında kolayca hareket edebilmesini mümkün kılar.



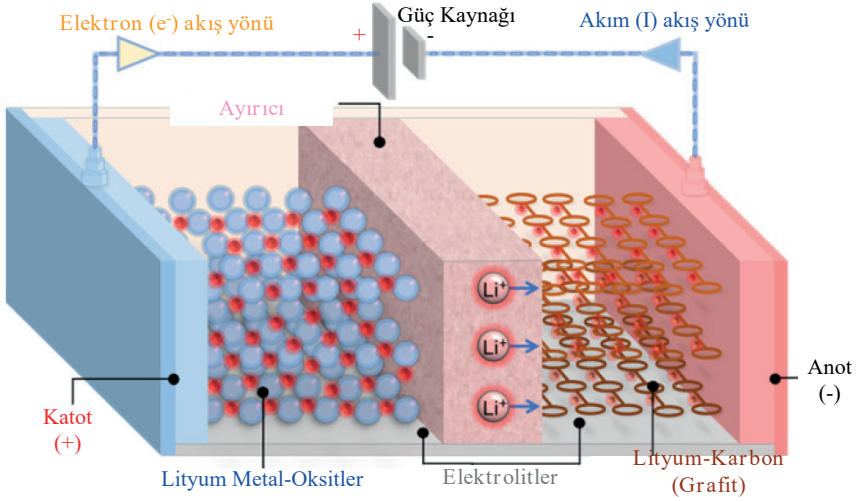
Denklem (1) ile verilen kimyasal dönüşüm, lityum iyon pillerin temel enerji depolama mekanizmasını oluşturur. Lityum iyon pillerin şarj ve deşarj sürecindeki çalışma prensibi, lityum iyonlarının anot ve katot elektrotları ara-

sında iki yönlü hareketine dayanır. Lityum iyonun taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsünün renklendirilmiş hali Şekil 4'te gösterilmiştir.



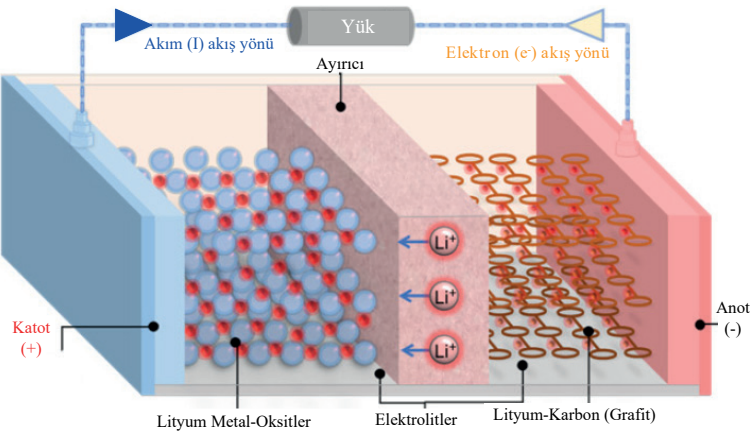
Şekil 4. Lityum iyonunun SEM mikroskobu altındaki görüntüsü (Vıçıl, 2011) [40].

Şarj işlemi sırasında, pile bağlanan harici bir güç kaynağı tarafından sağlanan elektromotor kuvvet, anot tarafında elektron birikmesine neden olur. Bu elektronlar, anot elektrot-separatör yüzeyi boyunca bir elektrik alanı oluşturarak, katotta bulunan pozitif yüklü lityum iyonlarının yerlerinden kopmasına sebep olur. Kopan lityum iyonları, elektrolit aracılığıyla anoda doğru hareket eder ve burada karbon-grafit yapıdaki anot malzemesinin kristal yapısına yerleşir. Burada grafitin katmanlı yapısının arasına lityum iyonu girmektedir. Grafitli yapıya lityum iyonu girdikçe katmanlar arasındaki mesafe artarak kristal yapının fiziksel hacmi artar. Bu durum pil şarj oldukça anodun genişlemesini meydana getirir. Şarj mekanizmasına ait süreç Şekil 5'te gösterilmiştir.



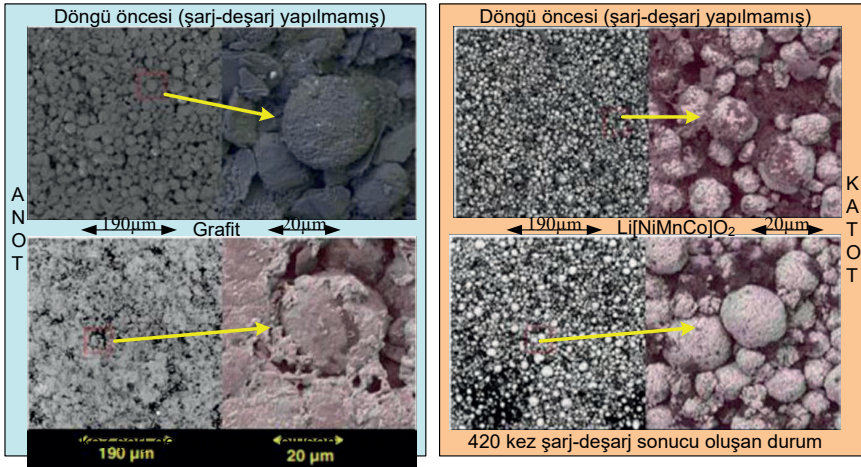
Şekil 5. Şarj mekanizmasının blok diyagramı [41].

Deşarj işlemi sırasında ise, bu süreç tersine döner. Anotta depolanan lityum iyonları yeniden elektrolit üzerinden katoda geri döner ve katot malzemesine entegre olur. Aynı anda, bu iyon hareketine karşılık dış devrede elektron akışı gerçekleşir ve bu akış elektrik enerjisi üretir [44]. Lityum iyonlarının anot ve katot arasında bu şekilde ileri-geri hareket edebilmesi, pilin defalarca şarj edilip kullanılabilmesini, yani yeniden şarj edilebilirliğini mümkün kılar. Pilin çıkış gerilimi ise, kullanılan anot ve katot malzemelerinin elektrokimyasal potansiyelleri arasındaki farktan kaynaklanır. Bu fark ne kadar büyükse, pilin sağladığı gerilim de o kadar yüksek olur. Şarj mekanizmasına ait süreç Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Deşarj mekanizmasının blok diyagramı [41]

Şarj sırasında anotdaki grafit yapısını genişlerken, deşarj sırasında tekrar eski haline döner. Her şarj-deşarj döngüsü sırasında bu kristal yapılar zorlamalara uğrar. Anotun içerisinde sınırlı sayıda lityum iyonu tutulabilmektedir. Anot tarafındaki grafit kırılğan bir yapıda olduğu için, zamanla kırılan grafitler sayısınınca Lityum iyon geçişi azaldığından, hücrenin kapasitesi azalır. Bu durum şarj-deşarj döngü sayısı ile batarya ömrünün ters orantılı olduğu sonucu ortaya çıkarır. Konuyla ilgili yapılan çalışmalardan 420 şarj-deşarj döngüsü sonucunda anot ve katottaki yapı değişikliği Şekil 7'de görülmektedir. Buna göre yaşlanma sırasında grafit parçacıklarının yüzeyindeki katı elektrolit arayüzünün (SEI) büyümesi şekilden gözlemlenmiştir [42]. Bir diğer yaşlanma mekanizması grafit anotlar üzerinde metalik Li'nin birikmesidir. SEM aracılığıyla grafit üzerinde Li birikimi sırasıyla saf ve öğütülmüş karbon üzerinde dendritik ve granüler morfolojiler ortaya çıktığı görülmektedir [43-45].



Şekil 7. Döngü öncesi ve sonrası anot ve katotların SEM görüntüleri [45]

KAYNAKLAR

- [1] www.enerjiatlas.com/akaryakit-tuketimi.,Erişim Tarihi: 26.02.2025.
- [2] <https://teyit.org/dosya/buyutec-turkiyede-kisi-basi-kac-araba-dusuyor>., Erişim Tarihi: 26.02.2025.
- [3] <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/kisi-basina-dusen-arac-sayisinda-3-il-zirvede-yer-aliyor/2798913>.,Erişim Tarihi: 26.02.2025.
- [4] Johnson, T., 2016. Americans spend an average of 17,600 minutes driving each year. AAA. September, 8.
- [5] Newman, P.W. and Kenworthy, J.R., 1989. Gasoline consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey. *Journal of the American planning association*, 55(1), pp.24-37.
- [6] Daniel, C. and Li, J., 2016. Energy Storage Technologies. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- [7] <https://www.electrive.com/2025/01/15/new-record-more-than-1-3-million-evs-sold-in-the-us-in-2024/>., Erişim Tarihi: 26.02.2025.
- [8] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.,Erişim Tarihi: 26.02.2025.
- [9] Williamson, S.S., Rathore, A.K. and Musavi, F., 2015. Industrial electronics for electric transportation: Current state-of-the-art and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5), pp.3021-3032.
- [10] Davis, S.C., Williams, S.E., Boundy, R.G. and Moore, S.A., 2017. 2016 vehicle technologies market report (No. ORNL/TM-2017/238). Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- [11] www.hondaofgreenbelt.com., Erişim Tarihi: 26.02.2025.
- [12] Zenk, H. (2021). Simulink Based Modeling of Fuel Cell and Rechargeable Battery Powered Electric Vehicle.*International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*, 5(12), pp. 31-31.
- [13] Zenk, O., & Ertuğral, B. (2018). An Investigation of Increasing the Performance of Electric Rickshaw-Pedicab Batteries. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*, 2(12), pp. 44-51.
- [14] Zenk, O., & Ertuğral, B. (2021). Electric Vehicle Battery Charging System Design with Dual Flyback Type Converter. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*, 5(12), pp. 12-20.
- [15] Zenk, H. (2018). DC-DC Converters and Simulink Applications.*Innovative Approaches in Engineering*, 167-194.
- [16] Zenk, H. (2016). In push-pull converter output voltage stability comparison with using fuzzy logic, PI and PID controllers. *International Journal of Engineering Research and Management (IJERM)*, 3(12), 1-6.

- [17] Zenk, H. (2018). Comparison of Electrical Performances of Power Electronics Switches and an Effective Switch Selection Algorithm. *Acta Physica Polonica A*, 133(4), 897-901.
- [18] Zenk, H. (2019). Effective Control of the Developmental Current of a Serial DC Motor with a Fuzzy Tuned-PI Controller Zeta Converter. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 196-211.
- [19] Zenk, H., & Akpınar, A. S. (2014). Dynamic Performance Comparison of Cúk Converter with DC Motor Driving and Using PI, PID, Fuzzy Logic Types Controllers. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2(2), 90-96.
- [20] Zenk, H. (2018). An Effective Flyback Converter Design for PMDC Motor Control. *Karadeniz Fen Bil. Dergisi*, 8(2), 207-215.
- [21] Zenk, H., & Altinkök, A. (2017). Output Voltage Control of PI And Fuzzy Logic Based Zeta Converter. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 12(6), 63-70.
- [22] Zenk, H. (2016). A Comparative Application of Performance of the SEPIC Converter Using PI, PID and Fuzzy Logic Controllers for PMDC Motor Speed Analysis. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, 2(12), 1226-1231.
- [23] Zenk, H. (2019). Comparison of the performance of photovoltaic power generation-consumption system with push-pull converter under the effect of five different types of controllers. *International Journal of Photoenergy*, 2019.
- [24] Zenk, H. (2020). Comparison of Voltage Stability of Photovoltaic Power Source Dual Structure Flyback Converter with Fuzzy-Tuned PI and Fractional PID Type Controllers. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 443-465.
- [25] Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M. and Chen, Z., 2020. A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, p.110015.
- [26] <https://web.archive.org/web/20130823151751/http://www.unexplained-mysteries.com/gallery/images/1854/baghdad-battery,> Erişim Tarihi: 26.02.2025.
- [27] Tarascon, J.M. and Armand, M., 2001. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *nature*, 414(6861), pp.359-367.
- [28] Linden, D. and Reddy, T.B., 2002. *Handbook of batteries*. McGraw-Hill Companies.
- [29] Darikas, G., 2018. Design and Implementation of a Battery Management System for Lithium-Ion Batteries suitable for Automotive Applications (Doctoral dissertation, Diploma Thesis.(Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, 2018)).
- [30] Wu, Y. ed., 2015. *Lithium-ion batteries: Fundamentals and Applications*. CRC press.
- [31] J. M. B. Systems, 2015., *Our Guide to Batteries*, Johnson Matthey Battery Systems.

- [32] Y.L. and Yu, H., 2019. A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), pp.6-32.
- [33] Li, M., Lu, J., Chen, Z. and Amine, K., 2018. 30 years of lithium-ion batteries. *Advanced materials*, 30(33), p.1800561.
- [34] Winter, M., Barnett, B. and Xu, K., 2018. Before Li ion batteries. *Chemical reviews*, 118(23), pp.11433-11456.
- [35] Nitta, N., Wu, F., Lee, J.T. and Yushin, G., 2015. Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, 18(5), pp.252-264.
- [36] Dong, B., Poletayev, A.D., Cottom, J.P., Castells-Gil, J., Spencer, B.F., Li, C., Zhu, P., Chen, Y., Price, J.M., Driscoll, L.L. and Allan, P.K., 2024. Effects of sulfate modification of stoichiometric and lithium-rich LiNiO₂ cathode materials. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(19), pp.11390-11402.
- [37] Abdelaal, M.M. and Alkhedher, M., 2024. Dual optimization of LiFePO₄ cathode performance using manganese substitution and a hybrid lithiated Nafion-modified PEDOT: PSS coating layer for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 506, p.145050.
- [38] Orangi, S., Manjong, N., Clos, D.P., Usai, L., Burheim, O.S. and Strømman, A.H., 2024. Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective. *Journal of Energy Storage*, 76, p.109800.
- [39] Chombo, P.V. and Laonual, Y., 2020. A review of safety strategies of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 478, p.228649.
- [40] www.sciencephoto.com/media/90040/view/lithium-ion-crystals-sem., Tarihi: 26.02.2025.
- [41] Menye, J.S., Camara, M.B. and Dakyo, B., 2025. Lithium Battery Degradation and Failure Mechanisms: A State-of-the-Art Review. *Energies*, 18(2), p.342.
- [42] Chawla, N., Bharti, N. and Singh, S., 2019. Recent advances in non-flammable electrolytes for safer lithium-ion batteries. *Batteries*, 5(1), p.19.
- [43] Waldmann, T., Wilka, M., Kasper, M., Fleischhammer, M. and Wohlfahrt-Mehrens, M., 2014. Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries—A Post-Mortem study. *Journal of power sources*, 262, pp.129-135.
- [44] Burns, J.C., Kassam, A., Sinha, N.N., Downie, L.E., Solnickova, L., Way, B.M. and Dahn, J.R., 2013. Predicting and extending the lifetime of Li-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(9), p.A1451.
- [45] Waldmann, T., Iturrondobeitia, A., Kasper, M., Ghanbari, N., Aguesse, F., Beckaert, E., Daniel, L., Genies, S., Gordon, I.J., Löble, M.W. and De Vito, E., 2016. Post-mortem analysis of aged lithium-ion batteries: Disassembly methodology and physico-chemical analysis techniques. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(10), p.A2149.



RÜZGÂR GÜCÜ TAHMİNİNDE YAPAY ZEKÂ

“ ”

Tuncay ALTUN¹

¹ Doç.Dr., Milli İstihbarat Akademisi, Mühendislik ve Bilim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye. t.altun@mia.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1499-3384.

1. GİRİŞ

Enerji sektöründe yaşanan dijital ve yeşil dönüşüm süreçleri ve bu süreçlerin elektrik şebekelerine etkileri hem küresel ölçekte hem de ulusal düzeyde giderek daha önemli hâle gelmektedir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları enerji arz güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik rekabet gücü açısından stratejik bir rol üstlenmektedir. Özellikle rüzgâr enerjisi, çevre dostu olması, teknolojik olgunluğa ulaşmış olması ve maliyetlerde yaşanan düşüşler sayesinde, dünya genelinde hızla büyüyen bir yenilenebilir enerji kaynağı hâline gelmiştir.

Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council, GWEC) verilerine göre, rüzgâr enerjisinin küresel kurulu güç kapasitesi 2024 yılındaki 117 GW'lık artışla 1136 GW'a ulaşmıştır (Global Wind Energy Council, 2025). Türkiye'de ise 2025 yılı Eylül ayı itibarıyla 387 adet rüzgâr santralının toplam kurulu gücü olan yaklaşık 14 GW'lık kapasite üretimin %10,4'üne karşılık gelmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025). Ancak rüzgâr enerjisinin doğasından kaynaklanan kesintililik ve değişkenlik hem üretim planlaması hem de şebeke kararlılığı açısından önemli zorluklar doğurmaktadır. Rüzgâr hızındaki küçük dalgalanmalar bile türbinlerin ürettiği elektrik miktarında ciddi farklılıklar yaratmakta ve bu da arz-talep dengesinin korunmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, güvenilir ve doğru rüzgâr gücü tahminleri, yenilenebilir enerji entegrasyonunun başarısı için kritik bir ihtiyaçtır.

Literatürde ayrıca hibrit modellerin giderek öne çıktığı görülmektedir. Bu modeller, fiziksel ve istatistiksel yöntemlerin güçlü yönlerini yapay zekâ tabanlı yaklaşımlarla birleştirerek doğruluk ve genelleme yeteneklerini artırmayı amaçlamaktadır. Örneğin, (English & Abolghasemi, 2024) çoklu hiyerarşik yapıları kullanarak rüzgâr gücü tahminlerinde doğruluğu artırmayı başarmışlardır. (Jonas et al., 2024) ise denetim kontrolü ve veri toplama sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) verilerini sürekli öğrenme tabanlı yöntemlerle birleştirerek, rüzgâr gücü tahminlerindeki sapmaları önemli ölçüde azaltmıştır. Bu tür yaklaşımlar, gerçek zamanlı veri işleme ve adaptif öğrenme yetenekleri sayesinde özellikle dinamik koşullarda yüksek doğruluk sağlamaktadır.

Son yıllarda, transformer tabanlı modeller rüzgâr gücü tahmininde dikkat çekici bir başarı göstermektedir. Transformer mimarileri, dikkat (attention) mekanizması sayesinde uzun vadeli değişken ilişkilerini yakalama kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, çok değişkenli ve uzun dönemli zaman serilerinde güçlü bir performans ortaya koymaktadır. (Sarkar et al., 2023), geliştirdikleri çok başlıklı dikkat tabanlı transformer (multi-head attention transformer) modeli ile hem tek adımlı hem de çok adımlı tahminlerde LSTM ve tekrarlayan yapay sinir ağları birim (gated recurrent unit, GRU) yöntemine kıyasla %5–20 oranında doğruluk artışı elde etmişlerdir. Benzer şekilde, (Ma, Gao, &

Dai, 2024) tarafından önerilen düşük dereceli matris ayrıştırıcıları kullanarak çok kısa vadeli tahminlerde yüksek doğruluk sağlamıştır. (Liu et al., 2024) ise yorumlanabilirlik odaklı bir transformer modeli geliştirerek, kısa vadeli tahminlerde hem performans hem de şeffaflık sağlamayı başarmışlardır.

Türkiye bağlamında, rüzgâr gücü tahmini çalışmaları hem meteorolojik çeşitlilik hem de veri kalitesi açısından özgün zorluklarla karşılaşmaktadır. Türkiye'deki rüzgâr ölçüm istasyonlarının mekânsal dağılımı, topografik çeşitlilik ve yerel meteorolojik etkiler, uluslararası literatürde geliştirilen modellerin doğrudan uygulanmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle, yerel veri setleriyle uyumlu hibrit, yapay zekâ tabanlı, yüksek doğruluklu yaklaşımlar geliştirmek Türkiye elektrik şebekelerinin operasyonel güvenliği ve enerji stratejileri açısından kritik bir ihtiyaçtır (TEİAŞ, 2025). Bu çalışma, rüzgâr gücü tahminini yalnızca teknik bir problem değil aynı zamanda ekonomik ve stratejik bir gereklilik olarak ele alacak, fiziksel ve istatistiksel yöntemlerden yapay zekâ ve hibrit modellere uzanan süreci, transformer tabanlı yaklaşımları inceleyecektir.

2. RÜZGÂR GÜCÜ TAHMİNİNDE ÖN AŞAMALAR

Rüzgâr gücü tahmini yalnızca uygun bir tahmin modelinin seçilmesi ile sınırlı değildir. Modelin doğruluğu ve güvenilirliği, büyük ölçüde kullanılan verilerin niteliğine, verilerin işleme biçimine ve tahminin yapılacağı zaman aralığının doğru şekilde belirlenmesine bağlıdır. Bu nedenle, tahmin sürecinin ilk basamağında yer alan *ön aşamalar*, rüzgâr enerjisinin üretim tahminine ilişkin çalışmaların başarısında belirleyici bir rol oynamaktadır. Tahmin ufku, veri ön işleme teknikleri, veri anlamlandırma ve hiper parametre optimizasyonu gibi aşamalar doğruluk oranını doğrudan etkilemektedir (Yousuf & Al Bahadly, 2019).

Özellikle hibrit modellerin ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerin son yıllarda öne çıkmasıyla, bu ön aşamalar yalnızca yardımcı süreçler olmaktan çıkmış, doğrudan model performansının temel bileşenleri hâline gelmiştir. Rüzgâr gücü üretiminde yüksek doğruluk elde etmenin yolu, tahmin modellerinin güçlü yönleri kadar, verilerin hazırlanma ve işleme kalitesinden de geçmektedir. Bu bağlamda, aşağıda rüzgâr gücü tahmininde kritik rol oynayan dört temel unsur olan tahmin ufku, veri ön işleme, veri anlamlandırma ve model ön ayarları ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

2.1. Tahmin Ufku

Rüzgâr gücü tahmininde kullanılan yöntemler, tahminin yapılacağı süreye göre farklı kategorilere ayrılmaktadır ve model seçiminde, veri gereksinimlerinde ve doğruluk düzeylerinde doğrudan belirleyici olmaktadır (Hanifi et al., 2020).

Tablo 1. Rüzgâr gücü tahmininde zaman ölçeği sınıflandırması.

Zaman Ölçeği	Aralık	Uygulamalar
Çok kısa vadeli	1 Dakika-1 saat	<ul style="list-style-type: none"> • Frekans kontrolü • Yük dengeleme • Gerçek zamanlı düzenleme eylemleri
Kısa vadeli	1 saat-24 saat	<ul style="list-style-type: none"> • Ekonomik yük sevkiyat planlaması • Günlük üretim kararları • Elektrik piyasasında operasyonel güvenlik
Orta vadeli	24 saat-1 hafta	<ul style="list-style-type: none"> • Birim taahhüt kararları • Rezerv gereksinim kararları • Bakım onarım planlamaları
Uzun vadeli	Ay- yıl ve ötesi	<ul style="list-style-type: none"> • Enerji yatırımları • Politika yapımı • Optimum işletme maliyeti • Stratejik planlama çalışması

Bu sınıflandırma, yalnızca tahmin süresini değil, aynı zamanda hangi veri kaynaklarının kullanılacağını da belirlemektedir. Çok kısa ve kısa vadeli tahminlerde türbin verileri SCADA ön plandayken, orta ve uzun vadeli tahminlerde iklimsel eğilimler, coğrafi özellikler ve makroekonomik göstergeler dikkate alınmaktadır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından geliştirilen rüzgâr gücü izleme ve tahmin sisteminde ünite çalışma durumu ve gücü, rüzgâr hızı ve yönü, gibi bilgileri Şekil 1’de gösterildiği üzere 10 dakikalık aralıklarla güç tahminleri yapılmaktadır (TEİAŞ, 2025).

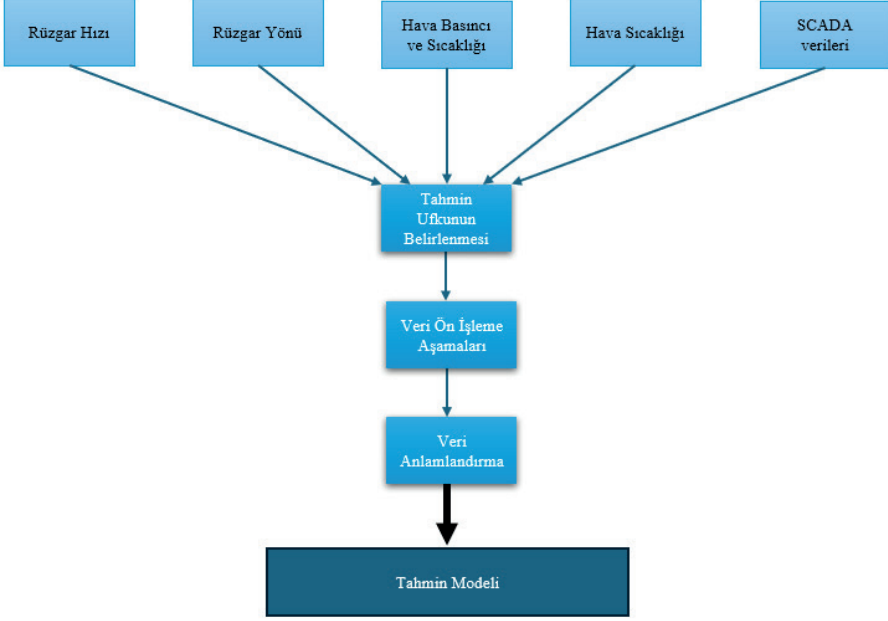


Şekil 1. Rüzgârdan üretilen elektriksel güç izleme ve tahmin sistemi mimarisi (TEİAŞ, 2025).

2.2. Veri Ön İşleme

Rüzgâr gücü tahmininde kullanılan verilerin kalitesi, model başarısında doğrudan belirleyici bir faktördür. Ölçüm istasyonlarından, meteorolojik merkezlerden veya SCADA sistemlerinden elde edilen veriler genellikle eksik, gürültülü veya aykırı değerler içerebilir. Bu nedenle, doğru ve güvenilir bir

tahmin için kapsamlı bir veri ön işleme süreci gereklidir (Kishore et al., 2025). Ayrıca, kullanılacak modelin işlevselliğini artırmak için rüzgâr hızındaki mevsimsellik ve rastgele bileşenler için *veri ayrıştırılması aşaması* veri ön işleme adımlarında olması gerekir (Ma, Gao, & Dai, 2024).



Şekil 2. Rüzgâr gücü tahmininde ön aşamalar diyagramı.

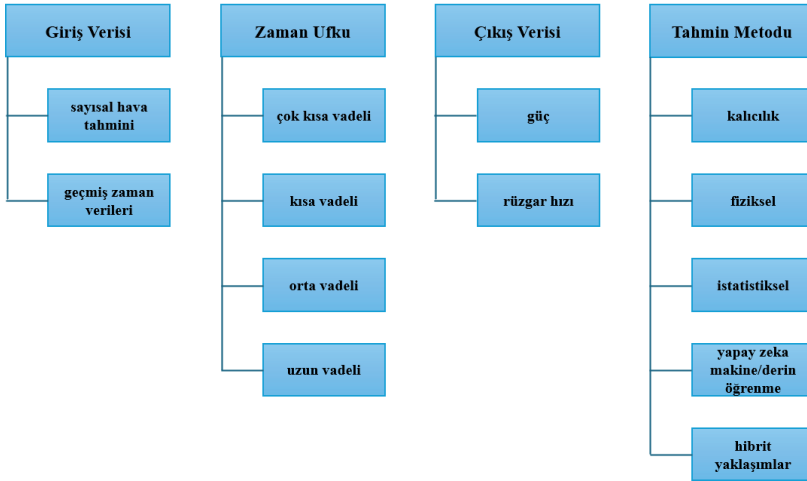
2.3. Tahmin Modeli Doğruluğu için Veri Anlamlandırma

Rüzgâr gücü tahmininde ham verilerin işlenerek daha anlamlı ve tatmin edici niteliklere dönüştürülmesi meteorolojik, zamansal, uzamsal ve türetilmiş özelliklerin doğru şekilde kullanılmasına bağlıdır. Örneğin, rüzgâr hızı ve yönü gibi en temel girdilere ek olarak: sıcaklık, basınç, nem, türbülans ve yağış gibi ek parametrelerin dahil edilmesi model doğruluğunu artırmaktadır (Wang et al., 2021). Benzer şekilde tahmin saati, mevsimsel etkiler, önceki üretim değerleri gibi zaman tabanlı değişkenler, özellikle kısa vadeli tahminlerde yüksek katkı sağlamaktadır. Özellikle nitelikli ölçüm imkanının az olduğu alanlarda yapılan tahminler için, komşu türbinlerden veya farklı ölçüm noktalarından elde edilen verilerin entegrasyonu, mekânsal bağımlılıkları tahmin doğruluğunun artırılmasında kullanılır. Ayrıca türbin güç eğrisi veya rüzgâr hızının karesi gibi fiziksel süreçleri yansıtan türetilmiş değişkenler modelin daha fiziksel temellere oturtulmasını açısından önemlidir.

3. RÜZGÂR GÜCÜ TAHMİNİNDE YÖNTEMLER

Giriş verileri sayısal hava tahmini girdisi ve geçmiş zaman serisi verileri olmak üzere iki alt sınıfa ayrılır. Meteorologlar tarafından geliştirilen NWP modelleri atmosferik denklemlere dayalı simülasyonlar yoluyla hava koşullarını öngörür. Bu modeller, üç boyutlu ızgaralara bölünmüş atmosferi temel alır ve çözünürlük düzeyine bağlı olarak topografik ayrıntıları yansıtır, yüksek çözünürlük daha doğru tahminler sunsa da hesaplama maliyetini artırır.

Tahmin çıktısını elde etmek için SCADA sistemlerinden doğrudan rüzgâr gücü üretimi tahmini ve önce rüzgâr hızını öngörmek, ardından bu tahminleri güç eğrileri yoluyla rüzgâr gücüne dönüştürmek üzere: rüzgâr gücü tahmininde kullanılan yöntemler tarihsel gelişim açısından üç ana grupta ele alınabilir: kalıcılık (persistence) yaklaşımı, fiziksel yöntemler ve istatistiksel yöntemler. Bu yöntemler, rüzgâr enerjisi üretim tahmininin temelini oluşturmuş, daha sonra makine öğrenmesi ve hibrit yapılar gibi ileri tekniklerin gelişmesine zemin hazırlamıştır.



Şekil 3. Rüzgâr hızı ve güç üretim tahmininde kullanılan yaklaşımların sınıflandırılması.

3.1. Kalıcılık Metodu

'Naif Tahminci' olarak da adlandırılan bu yöntem mevcut ve yakın gelecekteki rüzgâr hızı arasındaki yüksek korelasyona dayanmaktadır. Bu yöntem rüzgâr gücü tahmininde kullanılan en basit ve en eski yaklaşım olarak ($t + \Delta t$) zamanındaki rüzgâr hızının (t) zamanındaki hız ile aynı olduğunu varsayar. Kalıcılık yöntemi, çok kısa vadeli tahminlerde yüksek doğruluk sergilerken, yönteminin doğruluğu vade süresi arttıkça hızla düşer. Bu yöntem, yeni geliştiri-

rilen tahmin modellerinin iyileştirmelerini karşılaştırmak amacıyla bir kıyaslama ölçütü olarak kullanılmaktadır (Wu et al., 2022).

3.2. Fiziksel Yöntemler

Fiziksel yöntem, tahmin için meteorolojik faktörlerin yanı sıra basınç, sıcaklık, yerel yüzey pürüzlülüğü ve rüzgâr türbinlerinin güç eğrileri gibi unsurların matematiksel olarak modellenmesini gerektirir. Fiziksel yöntemler iki türe ayrılır: Tanısal Model ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) modeli. Tanısal modeller, sınır tabakası parametrelemelerini kullanırken, CFD modelleri rüzgâr akış alanlarını dinamik olarak simüle eder. Tanısal modeller düz arazi üzerindeki akışlar için uygunken, CFD modelleri karmaşık arazi akışları için daha uygundur (Guo et al., 2025).

3.3. İstatistiksel Yöntemler

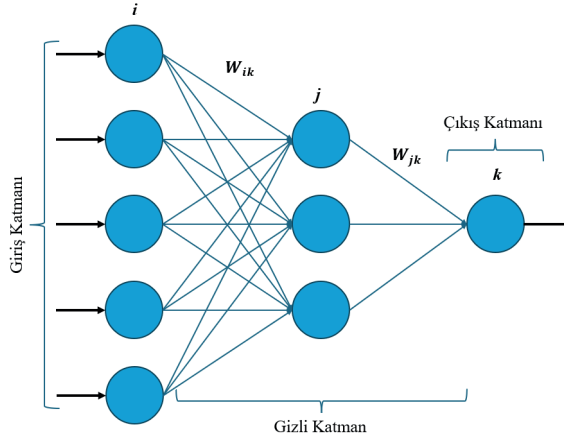
İstatistiksel yöntemler genellikle özyinelemeli (recursive) teknikler aracılığıyla değişkenler arası ilişkileri belirlemek amacıyla geçmiş zaman serisi verilerinden yararlanır (Kumar et al., 2024). Bu modeller, geliştirmesi kolay ve maliyet açısından uygun olup kısa vadeli tahminlerde yüksek doğruluk sağlar. İstatistiksel modellerin doğruluğu zaman arttıkça azalmaktadır. Bu yöntemler önceden tanımlanmış matematiksel bir model kullanmaz ve sadece veri dağılımları üzerine modellemesi yapılır (Wang, Song, & Cheng, 2022). İstatistiksel yöntemler arasında otoregresif hareketli ortalama (ARMA) (Soman et al., 2010), otoregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA) (Chen, Liu, & Wang, 2012), kesirli ARIMA (Zhang et al., 2014), mevsimsel ARIMA (Zameer et al., 2017) yer almaktadır. ARIMA modelleri, en yaygın kullanılan istatistiksel modellerdir. ARIMA, üç aşamalı yinelemeli bir süreçtir. İlk olarak, zaman serisi verileri analiz edilerek geçici bir model belirlenir ve bilinmeyen parametreler tahmin edilir. Sonra, modelin yeterliliği artık analiz yoluyla incelenir. Artık analiz, tanısal kontrollerin gerçekleştirilmesine veya olası iyileştirmelerin belirlenmesine yardımcı olur.

3.4. Yapay Zekâ: Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme

Rüzgâr gücü tahmininde kalıcılık, fiziksel ve istatistiksel gibi klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlar son on yılda yapay zekâ tabanlı yaklaşımların hızla öne çıkmasına yol açmıştır. Klasik yöntemler özellikle uzun vadeli tahminlerde doğruluk kaybına uğrarken, yapay zekâ tabanlı yöntemleri verideki doğrusal olmayan ilişkileri ve karmaşık örüntüleri öğrenme kapasitesi sayesinde daha yüksek performans sergilemektedir. Bu bağlamda, makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar, günümüzde rüzgâr gücü tahmininde en sık başvurulan yöntem grupları hâline gelmiştir.

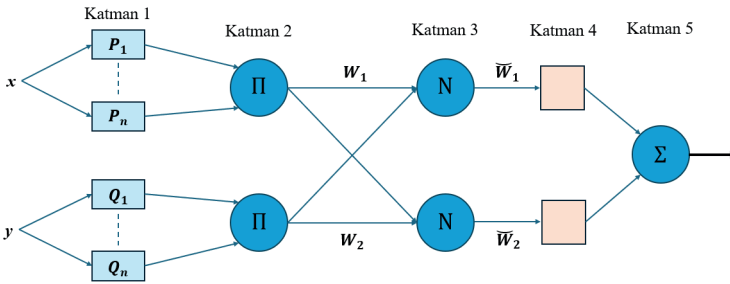
Makine Öğrenmesi teknikleri, geçmiş verileri eğiterek girdi ve çıktı rüzgâr hızları arasındaki ilişkiyi belirler. Yaygın yapay zekâ teknikleri arasında Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network, ANN) (Kong et al., 2017), Destek Vektör

Makinesi (Support Vector Machine, SVM) (Shi et al., 2015) ve Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) (Shi et al., 2015) yer almaktadır. En sık kullanılan yapay zekâ modeli ANN, insan beyninin sorunları çözme biçiminden esinlenmiştir.



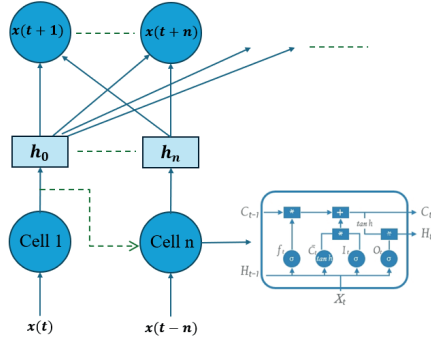
Şekil 4. Temel ANN Modeli.

ANFIS, bulanık mantık ilkelerini ve sinir ağlarını entegre eden uyarlanabilir çok katmanlı ileri beslemeli bir ağ sınıfıdır. Gerekli girdileri ve çıktıları üretmek üzere uygun üyelik fonksiyonlarıyla bulanık kurallar geliştirir.



Şekil 5. Temel ANFIS modeli.

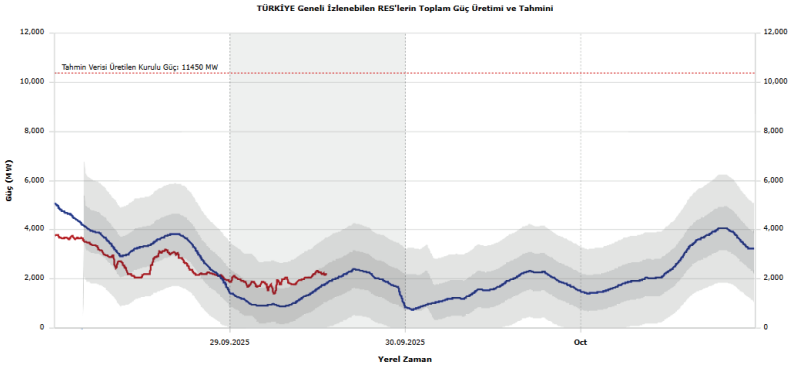
Geleneksel makine öğrenimi modellerinin ötesinde, aşırı öğrenme ve derin öğrenme, rüzgâr hızı ve gücü tahmininde daha yüksek doğruluk sağlar ve daha karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilir. Rüzgâr hızı ve gücü tahmininde kullanılan dikkate değer derin öğrenme mimarileri arasında Derin İnanç Ağı (Deep Belief Network, DBN) (Bai, Kolter, & Koltun, 2018) ve LSTM (Borovykh, Bohte, & Oosterlee, 2017) bulunmaktadır.



Şekil 6. Temel LSTM hücre yapısı ve modeli.

Aşırı Öğrenme Makinesi (Extreme Learning Machine, ELM), tek gizli katmanlı bir ileri beslemeli sinir ağı türüdür. Geleneksel sinir ağlarına kıyasla daha iyi genelleme performansı ve daha yüksek yakınsama hızı sunar. ELM’de, girdi ağırlıkları ve gizli önyargılar yinelemeli ayarlamaya gerek olmaksızın rastgele üretilir. Bu nedenle, gizli ve çıktı katmanları arasındaki çıktı ağırlıkları, verilen doğrusal sisteme en küçük kareler çözümü bulunarak belirlenir. Rüzgâr hızı ve gücü tahmininde kullanılan diğer ELM yöntemleri arasında Histerezis ELM (HELM) (Borovykh, Bohte, & Oosterlee, 2017), Çevrimiçi Sıralı ELM (Online Sequential ELM) (Vaswani et al., 2017), Yığılı ELM (Stacked ELM) (Zhou et al., 2021), Düzenlenmiş ELM (Regularized ELM) (Haq et al., 2024) ve Ağırlıklı RELM (Weighted RELM) (Doshi et al., 2023) yer almaktadır.

TEİAŞ rüzgâr gücü izleme ve tahmin merkezinin geliştirmiş olduğu ve Şekil 1’de gösterilen mimari, santrallerden gelen gerçek zamanlı SCADA verilerini ve güç kalitesi ölçümlerini entegre ederek AR, ARX, ANN ve SVM gibi yapay zekâ destekli tahmin algoritmaları ile farklı zaman dilimleri için tahmin üretme amacı taşımaktadır. Şekil 7 rüzgâr gücü izleme ve tahmin merkezinin 29.09.2025 ve 30.09.2025 tarihleri için tahminlerini göstermektedir.



Şekil 7. Rüzgâr gücü izleme ve tahmin merkezi 29.09.2025-30.09.2025 için ürettiği tahmin eğrileri

Şekil 7'den de görüldüğü üzere hem istatistiksel hem de yapay zekâ yöntemleri sınırlı uygulanabilirliğe ve dolayısıyla sınırlı tahmin doğruluğuna sahiptir. Bu nedenle, istatistiksel ve yapay zekâ modellerinin kombinasyonu olan hibrit modeller daha yüksek tahmin doğruluğu sağlar.

3.5. Hibrit Yaklaşımlar

Hibrit tahmin yöntemleri, farklı tahmin yaklaşımlarını birleştirerek nihai tahminin performansını artırmak amacıyla avantaj sağlar. Her bir modelin sınırlı performans gösterdiği çeşitli senaryolar mevcuttur. Hibrit modeller ise, her bir modelin yeteneklerini entegre ederek üstünlük sunar ve bu sayede daha yüksek performansla zaman tasarrufu sağlar. Hibrit yöntemlerin alt sınıfları arasında ağırlıklı yöntem, ayrıştırma yöntemi, özellik seçimi veya optimizasyon yöntemi ile son işleme veya hata işleme yöntemi bulunmaktadır.

Ağırlıklandırma Yöntemi: Bu yaklaşımda, her bir bireysel modelin tahminine, modelin etkinliğine dayalı bir ağırlık katsayısı atanır. Ağırlıklandırma, Sabit Ağırlık ve Değişken Ağırlık olmak üzere iki farklı düzenleme ile uygulanabilir. Değişken ağırlıklı birleştirme tahmin modelleri, örneklemeledeki değişikliklere daha iyi adapte olabilmeye yetenekleri sayesinde sabit ağırlıklı tahminlere göre daha iyi performans gösterebilir. Değişken ağırlıklı kombinasyon tahmin modeli, örneklemeledeki değişimlere daha iyi adapte olur ve örnekleme noktalarının ilgili modeldeki ağırlığını daha etkin eşleştirir. Optimal ağırlıkları belirlemek amacıyla birden fazla optimizasyon algoritması kullanılmaktadır (Alharthi & Alzahrani, 2024).

Ayrıştırma Yöntemi: Bu yöntemler, durağan olmayan zaman serisi verilerini durağan alt serilere ayırmak için ön işleme teknikleri kullanır. Ana düzenlemede, ayrıştırma modeli, durağan olmayan veriyi durağan alt serilere ayırır ve her bir alt seri için ayrı bir tahmin modeli kullanılır. Dalga Dönüşümü (Wavelet Transform, WT) (Li et al., 2023), Dalga Paket Ayrıştırması (Wavelet Packet Decomposition, WPD) (Zhao et al., 2024), Ampirik Mod Ayrıştırması (Empirical Mode Decomposition, EMD) (Brown et al., 2020), EMD varyantları olan Topluluk EMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) (Pan et al., 2024) gibi yaklaşımlar sıklıkla tercih edilmiştir. Ayrıştırmanın iki alt türü vardır: birincil düzenlemede, ayrıştırma modeli durağan olmayan zaman serisi verilerini birkaç durağan alt seriye ayırır ve ardından her alt seri için bağımsız bir tahmin modeli uygulanır. İkincil düzenlemede ise, en durağan olmayan alt seriyi daha fazla ayırmak amacıyla ikincil bir ayrıştırma modeli kullanılır. Sonraki adımlar birincil düzenlemeyle aynıdır. Ayrıştırılmış seriler için aynı tahmin modelini kullanmak zorunlu değildir.

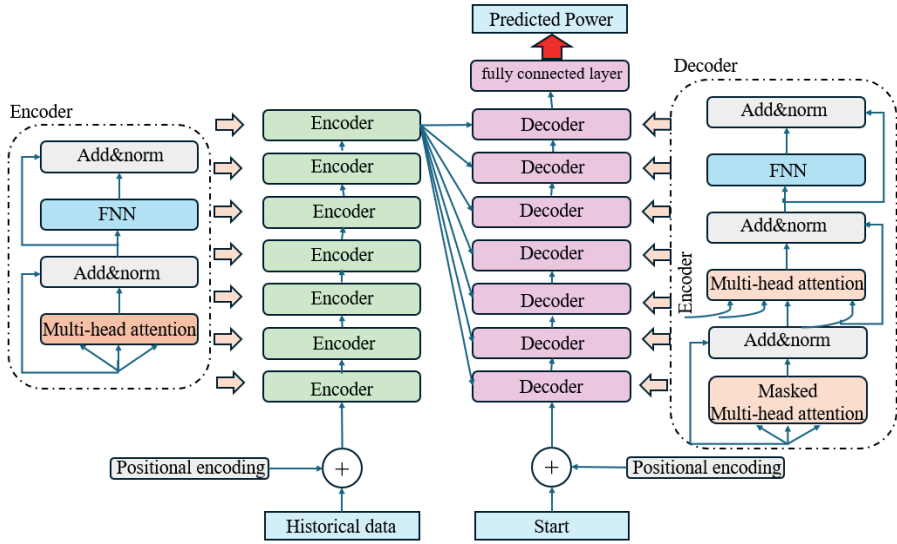
Öznitelik Seçimi veya Optimizasyon Yöntemi: Öznitelik seçimi ve optimizasyon teknikleri, yedekli verileri ortadan kaldırarak model performansını artırır (Chen et al., 2023). Denetimsiz öğrenme için özellik seçimi, iki yöntem ayrılabilir: *sarmalayıcı* ve *filtre*. Sarmalayıcı yaklaşım, özellik alt kümesini

sıralamak için bir arama algoritması kullanır. Bu yöntem, tahmin modeli performansını gerektirir. En iyi tahmin performansını gösteren alt küme, nihai özellik alt kümesi olarak seçilir. Filtre yöntemi ise aritmetik analiz kullanır ve tahmin modeli performansını gerektirmez. Dolayısıyla, filtre yöntemleri sarıcı yöntemlere göre daha hızlıdır, ancak performansları sarmalayıcı yöntemden düşüktür. Bu görüş, Carta ve arkadaşlarının (Li et al., 2023) yürüttüğü çalışma ile desteklenmektedir. Bazı çalışmalar hem sarmalayıcı hem de filtre yöntemlerinin avantajlarını almak üzere kombinasyon yöntemini ele almıştır. Bu yaklaşım, filtre algoritması bilgisini kullanarak sarmalayıcı algoritmasının yakınsamasını hızlandırır (Smith & Smith, 2023).

Hata İşleme Yöntemi: Bu teknikler, birincil tahmin modelinden sonra ortaya çıkan hata faktörlerinin performans üzerindeki etkisini dikkate alır. Amaç, hataları analiz etmek ve hata işleme modelini dahil ederek nihai tahminlerin doğruluğunu artırmaktır. (Zhang et al., 2024) hata faktörünün dikkate alındığı iki aşamalı bir tahmin modeli incelemiştir. İlk aşamada, ayrıştırma modeli (Variational mode decomposition, VMD) olarak kullanılırken, optimize edilmiş ELM tahmin hatası için öngörü modeli olarak kullanılır. İkinci aşamada doğrusal olmayan topluluk yöntemi nihai tahminin elde edilmesinde değişken modları ve tahmin hata öngörücülerini entegre etmek için geliştirilmiştir.

4. HİBRİT MODELLERDE TRANSFORMER MİMARİSİ

Transformer tabanlı modellerin tahmin mimarisi Şekil 8'de resmedildiği üzere rüzgâr gücü üretimi gibi zaman serisi tahmin uygulamalarında encoder, girdi verilerini işleyerek kritik zamansal bağımlılıkları belirlerken, decoder bu bilgileri temel alarak gelecekteki rüzgâr gücü çıkışını öngörür. Encoder rüzgâr hızının yanı sıra sıcaklık ve hava basıncı gibi tarihsel hava verilerini de işlemektedir. Transformer tabanlı modelin bu değişkenler arasındaki karmaşık etkileşimleri ele alma becerisi, rüzgâr gücü üretimi tahminini etkileyen uzun vadeli bağımlılıkların yakalanmasını sağlar.

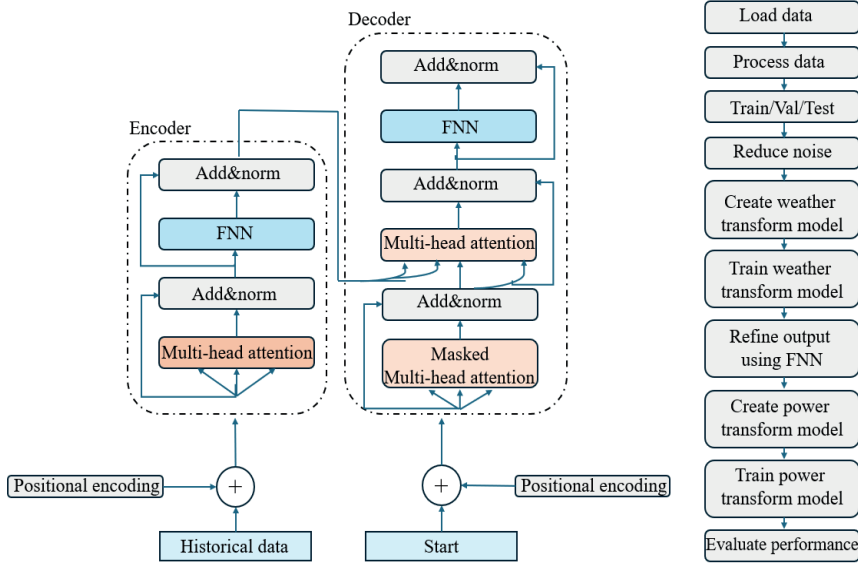


Şekil 8. Transformer tabanlı modellerin tahmin mimarisi

Modelin *çok başlı öz-dikkat mekanizması* (multihead self-attention mechanism) girdi verilerinin ilgili bölümlerini vurgulamada özellikle etkili olup gerekli olmayan unsurları göz ardı ederek tahmin hassasiyetini artırır. Transformer mimarisindeki ileri beslemeli sinir ağları (Feedforward neural network, FNN), dikkat ağırlıklı meteorolojik verileri pratik tahminlere dönüştürür. Bağımsız FNN modelleri karmaşık zaman serisi verilerini yönetmede sınırlı kalsa da transformer tabanlı modellerle bütünleşmeleri doğrusal olmayan bağımlılıkların yakalanmasına olanak tanır. Decoder, encoder yapısında saptanan ilişkilerden faydalanarak rüzgâr gücü tahminleri üretir, rüzgâr esintileri gibi kısa vadeli dalgalanmaları ve mevsimsel değişimler gibi uzun vadeli örüntüleri entegre ederek transformer tabanlı modelleri farklı zaman ölçeklerinde güç çıkışını öngörmeye etkili kılar. *Maskelenmiş öz-dikkat mekanizması* (Masked self-attention mechanism), transformer tabanlı modellerin yalnızca geçmiş ve mevcut verilere dayanarak gelecek tahminleri oluşturmasını temin eder ve gelecek verilerden kaynaklanabilecek önyargıları önler.

4.1. İki Aşamalı Transformer Tabanlı Hibrit Model

Bu çalışma çok kısa vadeli rüzgâr gücü tahmininin doğruluğunu artırmak amacıyla birden fazla gelişmiş makine öğrenimi tekniğini entegre eden bir hibrit model ele almaktadır. Model, veri ön işleme, veri anlamlandırma ve Rassal Orman Regresyonu (Random Forest Regressor), birinci transformer modeli ile ikinci transformer modeli gibi bir dizi tahmin modelinden oluşan bir kombinasyonu kullanmaktadır. Şekil 9, bu hibrit transformer tabanlı modelin akış şemasını göstermektedir.



Şekil 9. İki aşamalı transformer tabanlı hibrit model

Veri ön işleme adımları, veri kümesinin etkili model eğitimi için hazırlanmasında kritik öneme sahiptir. Başlangıçta, veri kümesi yüklenir ve zamana göre sıralanır. Ay, haftanın günü, saat ve dakika gibi tarih-saat özellikleri çıkarılarak zamansal bağlam sağlanır. Rüzgâr yönü özellikleri, dairesel verileri etkili biçimde yönetmek üzere sinüs ve kosinüs fonksiyonları kullanılarak dönüştürülür. Seçilen özellikler arasında sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü gibi çeşitli meteorolojik değişkenler yer almaktadır.

Bağımlı değişkenler ve dinamik özelliklerin birleştirildiği ikinci Transformer Model, rafine edilmiş hava tahminlerini orijinal girdi özellikleriyle entegre ederek güç üretimi tahminini gerçekleştirir. Bağımlı değişkenler, yoğun katmanlar ve yığın normalizasyon yoluyla işlenerek statik kodlamalar oluşturulur. Bu kodlamalar, zaman içinde sabit kalan veri özelliklerini yakalamaya yardımcı olur. Birleştirilmiş statik ve dinamik girdiler yeniden şekillendirilir ve zamansal işlemeyi yöneten LSTM katmanlarından geçirilir. İkinci transformer tabanlı modeldeki LSTM katmanları, güç üretimi verilerindeki zamansal bağımlılıkları yakalamada esastır. LSTM katmanlarının çıktıları, karmaşık bağımlılıkları yakalamak üzere kapılı kalıntı ağı (Gated Residual Network- GRN) üzerinden geçirilir. GRN, modelin girdi özelliklerini işleme yeteneğini artıran ve eğitim sürecini kararlı hale getiren doğrusal dönüşüm, kapı mekanizması ve kalıntı bağlantıları gibi bileşenlerden oluşur.

Nihai güç tahmini, statik ve dinamik girdilerin birleştirilmesi ve düzenli hale getirilmiş yoğun katmanlardan geçirilmesiyle üretilir. Bu yoğun katmanlar, girdi özellikler ile hedef değişken arasındaki doğrusal olmayan iliş-

kileri yakalarken, eğitim sırasında aşırı uyumu önler. Model eğitimi, makine öğreniminde popüler bir çapraz doğrulama tekniği olan K-Katlamalı çapraz doğrulama içerir. Bu teknik, veri kümesini birden fazla alt kümeye bölerek her veri noktasının hem eğitim hem de test kümesinde yer almasını sağlar. Bu yaklaşım, tek bir eğitim-test ayırımından kaynaklanabilecek önyargı ve varyans riskini azaltarak model performansının daha doğru bir ölçümünü sağlar. Öğrenme oranı planlaması ve erken durdurma geri çağrılarını, eğitim sürecini optimize etmek ve aşırı uyumu önlemek amacıyla kullanılır. Değerlendirme metrikleri arasında modelin performansını gösteren Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error, MSE), Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE) ve Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error, RMSE) yer alır. İki aşamalı transformer tabanlı hibrit model, düşük hata metrikleriyle üstün tahmin doğruluğu sergileyerek rüzgâr gücü tahminindeki etkinliğini vurgular. Topluluk öğrenmesi (ensemble learning) ve gelişmiş derin öğrenme mimarilerinin güçlü yönlerinden yararlanan bu hibrit yaklaşım, çok kısa vadeli rüzgâr gücü tahmini için güvenilir bir çözüm sunmakta olup tahmin hassasiyetini önemli ölçüde artırmaktadır.

6. SONUÇ

Rüzgâr gücü tahmini, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu ve enerji piyasalarının güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, rüzgâr gücü tahminine yönelik yöntemler kapsamlı biçimde incelenmiş, klasik yaklaşımlardan yapay zekâ tabanlı modern modellere ve özellikle iki aşamalı transformer tabanlı hibrit yapılara kadar geniş bir perspektif sunulmuştur.

İlk olarak, ön aşamalar incelenmiş ve tahmin başarısında veri kalitesinin, veri ön işleme süreçlerinin ve tahmin ufku seçiminin ne denli önemli olduğu ortaya konulmuştur. Eksik veri işleme, aykırı değerlerin düzeltilmesi, normalizasyon ve veri ayrıştırma gibi işlemler, modelin performansını doğrudan etkileyen unsurlar olarak belirlenmiştir. Veri anlamlandırma ve hiperparametre optimizasyonunun özellikle derin öğrenme tabanlı modellerde tahmin doğruluğunu belirgin biçimde artırdığı vurgulanmıştır.

Klasik yöntemler ele alınmış: kalıcılık yönteminin basitliğiyle referans noktası sunduğu, fiziksel yöntemlerin atmosferik süreçleri doğru modelleyebilmesine rağmen yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle sınırlı kaldığı, istatistiksel yöntemlerin ise kısa vadeli tahminlerde başarılı olmasına rağmen uzun vadede doğruluk kaybına uğradığı tespit edilmiştir.

Genel olarak, yapılan analizler göstermektedir ki, rüzgâr gücü tahmininde klasik yöntemler hâlen referans noktası olarak önemini korumakta, ancak yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda hibrit yapay zekâ modelleri özellikle öne çıkmaktadır. İki aşamalı transformer tabanlı hibrit yapılar, güncel literatürde en gelişmiş yöntemlerden biri olarak kabul edilmekte ve enerji piya-

salari ile Şebeke güvenliği açısından stratejik avantajlar sunmaktadır.

Bununla birlikte, gelecekte yapılacak çalışmalarda üç temel alana odaklanılabileceği öngörülmektedir: (i) daha geniş ve çeşitli veri setleri kullanılarak modellerin genelleme kabiliyetinin artırılması, (ii) gerçek zamanlı tahmin sistemlerinin geliştirilmesi ve (iii) açıklanabilir yapay zekâ yöntemleri ile modellerin karar mekanizmalarının daha Őeffaf hâle getirilmesi. Bu yaklaşımlar sayesinde, rüzgâr gücü tahmini yalnızca akademik bir araştırma alanı olmaktan çıkıp, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği ve güvenliği için daha güçlü bir araç hâline gelecektir.

KAYNAKLAR

- Chang, W.-Y. (2014). A literature review of wind forecasting methods. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2(4), 161–168.
- English, L., & Abolghasemi, M. (2024). Improving the forecast accuracy of wind power by leveraging multiple hierarchical structure. *Sustainable Energy Grids and Networks*, 40, 101517. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101517>
- Global Wind Energy Council. (2025). *Global wind report 2025*. Brussels, Belgium. Retrieved from <https://gwec.net/reports/global-wind-report-2025>
- Guo, C., Wang, Q., Peng, B., & Mei, N. (2025). A review of wind power cluster forecasting techniques. In *Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 1394, pp. 226–240).
- Hanifi, S., Liu, X., Lin, Z., & Lotfian, S. (2020). A critical review of wind power forecasting methods: Past, present and future. *Energies*, 13(15), 3764.
- Heymann, F., Quest, H., Lopez Garcia, T. B., Ballif, C., & Galus, M. D. (2024). Reviewing 40 years of artificial intelligence applied to power systems: A taxonomic perspective. *Energy AI*, 15, 100322.
- Jonas, S., Winter, K., Brodbeck, B., & Meyer, A. (2024). Bias correction of wind power forecasts with SCADA data and continuous learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2767(9), 092061.
- Kishore, B., Kabilan, K., Rahul, L. S., Priyadarshan, G. P., Vishnutheerth, E. P., Sathesh, R., & Kolhe, M. L. (2025). Advancing short-term wind power forecasting by AI-driven models for improved accuracy. *Electrical Engineering*.
- Kumar, K., Prabhakar, P., & Verma, A. (2024). Wind power forecasting technologies: A review. *Energy Storage and Conversion*, 2(3), 538.
- Liu, L., Wang, X., Dong, X., Chen, K., Chen, Q., & Li, B. (2024). Interpretable feature-temporal transformer for short-term wind power forecasting with multivariate time series. *Applied Energy*, 374, 124035.
- Ma, D., Gao, Y., & Dai, Q. (2024). LFformer: An improved transformer model for wind power prediction. *PLOS ONE*, 19(10), e0309676.
- Meng, Z., Guo, Y., & Sun, H. (2024). An adaptive approach for probabilistic wind power forecasting based on meta-learning. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2024.3379835>
- Sarkar, M. R., Anavatti, S. G., Dam, T., Pratama, M., & Al Kindhi, B. (2023). Enhancing wind power forecast precision via multi-head attention transformer: An investigation on single-step and multi-step forecasting. *arXiv preprint*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2304.10758>
- Soman, S. S., Zareipour, H., Malik, O., & Mandal, P. (2010). A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons. In *Proceedings of the North American Power Symposium* (pp. 1–8).

- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025). Elektrik. Ankara, Türkiye. Retrieved from <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- TEİAŞ. (2025). Rüzgar gücü izleme ve tahmin merkezi (RİTM). Retrieved October 16, 2025, from <https://ritm.teias.gov.tr/aboutUs/ritm.php>
- Wang, H.-K., Song, K., & Cheng, Y. (2022). A hybrid forecasting model based on CNN and Informer for short-term wind power. *Frontiers in Energy Research*, 9, 788320.
- Wang, Y., Zou, R., Liu, F., Zhang, L., & Liu, Q. (2021). A review of wind speed and wind power forecasting with deep neural networks. *Applied Energy*, 304, 117766.
- Wu, Z., Luo, G., Yang, Z., Guo, Y., Li, K., & Xue, Y. (2022). A comprehensive review on deep learning approaches in wind forecasting applications. *CAAI Transactions on Intelligent Technology*, 7(2), 129–143.
- Yousuf, M. U., & Al Bahadly, I. (2019). Current perspective on the accuracy of deterministic wind speed and power forecasting. *IEEE Access*, 7, 159547–159564.
- Zhang, Y., Jiang, J., Yan, Y., Yang, L., & Zhang, P. (2025). 2DXformer: Dual transformers for wind power forecasting with dual exogenous variables. *arXiv preprint*. Retrieved from