

EDİTÖR

Doç. Dr. Rukiye UZUN ARSLAN

**ELEKTRİK
ELEKTRONİK VE
HABERLEŞME
MÜHENDİSLİĞİ**

Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler

**ARALIK
2024**

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı
Birinci Basım / Aralık 2024 - Ankara
ISBN / 978-625-7836-18-0

© copyright

2024, Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir
yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE
HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

EDİTÖR

Doç. Dr. Rukiye UZUN ARSLAN

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

MİKRO ŞEBEKELERDE KARARLILIK

Kenan ALTUN, Didem ALTUN 7

BÖLÜM 2

MİKRODALGA TRANSİTÖRÜNÜN OPTİMİZASYON PROBLEMİNDE FARKLI AMAÇ FONKSİYON ÇİFTLERİNİN PERFORMANSLARI

Ahmet Arif ULUSLU 25

BÖLÜM 3

RÜZGAR GÜCÜ TAHMİNİNDE TRANSFORMER MODELLERİNİN İNCELENMESİ

Kenan ALTUN, Didem ALTUN 41



BÖLÜM 1

MİKRO ŞEBEKELERDE KARARLILIK

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 Dr.Öğr.Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas, Türkiye. [dide-maltun@cumhuriyet.edu.tr](mailto:didemaltun@cumhuriyet.edu.tr), ORCID: 0000-0002-1964-3538

1. Giriş

Mikro şebekeler yerel enerji kaynaklarını, enerji depolama sistemlerini ve gelişmiş kontrol mekanizmalarını entegre eden, aynı zamanda bağımsız çalışabilme yeteneğine de sahip esnek enerji ağlarıdır. Bu sistemler, geleneksel enerji şebekelerinin bir parçası olarak faaliyet gösterirken, gerektiğinde tamamen bağımsız bir şekilde çalışabilme özelliğine sahiptirler. Ana şebekede meydana gelebilecek bir arıza, elektrik kesintisi veya ciddi bir güç dengesizliği durumunda, mikro şebekeler hızlı bir şekilde kendilerini ana şebekeden ayırarak "ada modu" olarak adlandırılan bir çalışma moduna geçerler. Bu mod, mikro şebekenin yerel enerji kaynaklarını kullanarak kendi yüklerini beslemeye devam etmesine olanak tanır. Bu özellik, mikro şebekelerin enerji güvenliği ve kesintisiz güç sağlama yeteneklerini önemli ölçüde artırır (El Moubarek Bouzid vd., 2016). Özellikle kasırga, sel, deprem gibi doğal afetlerin sıkça yaşandığı bölgelerde, bu sistemlerin değeri daha belirgin hale gelmiştir. Doğal afetler, genellikle geniş çaplı elektrik kesintilerine ve şebeke altyapısında ciddi hasarlara neden olur. Mikro şebekeler, bu tür durumlarda kritik altyapıların, hastaneler, acil durum merkezleri ve su arıtma tesisleri gibi, kesintisiz çalışmasını sağlamak için devreye girer. Bu sayede, afet sonrası toparlanma sürecinde de hayati bir rol oynarlar. Özellikle ABD'de, Sandy Kasırgası gibi yıkıcı doğal afetlerin ardından, mikro şebekelerin iklim dayanıklılığı üzerindeki etkisi büyük ölçüde fark edilmiştir. Bu tür felaketler, geleneksel enerji şebekelerinin zayıflıklarını ortaya koymuş ve enerji arz güvenliğini sağlamak için yeni çözümler arayışını hızlandırmıştır. Mikro şebekeler, bu bağlamda, enerji altyapısının daha dayanıklı hale getirilmesi için etkili bir çözüm olarak öne çıkmıştır. Bunun sonucu olarak, başta ABD olmak üzere birçok ülke, mikro şebeke teknolojilerine önemli yatırımlar yapmaya başlamıştır (Elsayed vd., 2015). Bu yatırımlar, yalnızca mikro şebekelerin kurulumu için değil, aynı zamanda bu sistemlerin entegrasyonunu kolaylaştıracak yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması için de yapılmaktadır. Mikro şebekelerin geniş çapta benimsenmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılmasına, enerji depolama teknolojilerinin daha etkin bir hale getirilmesine ve genel olarak enerji sistemlerinin daha sürdürülebilir olmasına katkı sağlamaktadır (Charfi vd., 2018). Ayrıca, bu sistemlerin yaygınlaşması, enerji sektöründe yeni iş fırsatları yaratmakta ve yerel ekonomilerin güçlenmesine de katkıda bulunmaktadır.

Mikro şebekeler, enerji arzının güvenliğini sağlamanın ötesinde, toplulukların kendi enerji ihtiyaçlarını karşılayabilme kapasitelerini artırır (Pires vd., 2023). Bu sistemler, sadece acil durumlarda değil, normal

operasyonel süreçlerde de esnek bir enerji yönetimi sunar. Örneğin, enerji talebinin yüksek olduğu zamanlarda yani ana şebekelerin üzerine binen akım yükünün pik yaptığı anlarında mikro şebekelerin devreye girmesi, ana şebeke üzerindeki akım yükünü önemli ölçüde azaltabilir. Çünkü bu dönemlerde, ana şebeke aşırı yüklenme riskiyle karşı karşıyadır, bu da elektrik arzında dalgalanmalara, voltaj düşüşlerine ve hatta ciddi sistem çökmesi gibi durumlarda geniş çaplı elektrik kesintilerine vb. yol açabilir. Mikro şebekeler, bu tür olumsuz senaryoları önlemede doğrudan kritik bir rol oynar. Ayrıca mikro şebekeler, yenilenebilir enerji üretiminin bol olduğu anlarda (güneşli zamanlarda PV, rüzgârlı zamanlarda rüzgâr gülleri), şebekeye enerji sağlayarak katkıda bulunabilir ve enerji maliyetlerini düşürebilir (Nasirian vd., 2015).

Mikro şebekeler fotovoltaik (PV) sistemler gibi yenilenebilir enerji kaynakları da içerdiğinden, özellikle pil gibi enerji depolama çözümlerinde bu sistemlerin verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. DA mikro şebekeler bilhassa tüketimin minimum olduğu zamanlarda depolama imkânlarından dolayı enerji sistemlerinin genel verimliliğini artıracak yeteneklere sahiptir (T. Ma vd., 2014). Yapılan çalışmalar DA mikro şebekelerinin ana şebekede karşılaşılan bazı operasyonel zorlukları çözmeye etkili olabileceğini göstermektedir (Justo vd., 2013). Örneğin, PV üretimi ve hibrit enerji depolama (ultra kapasitörler ve Li-Ion piller) içeren bir DA mikro şebekesi, doğrusal olmayan yüklerin hafifletilmesi amacıyla kullanılabilir (Mohamed vd., 2012). Ayrıca, yapılan deneysel çalışmalar DA mikro şebekelerinin reaktif güç enjeksiyonu yaparak voltaj desteği sağlama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir (Mohamed vd., 2013).

Mikro şebekeler bu şekilde enerji depolama sistemlerini kullanarak, dış şebekeye olan bağımlılığını azaltabilir ve hatta enerji talebini tamamen yerel olarak karşılayabilir. Bu, ana şebekenin yükünün azalmasına ve sistemin daha dengeli ve istikrarlı bir şekilde çalışmasına yardımcı olur. Örneğin, bir mikro şebeke, güneş enerjisi panelleri, rüzgâr türbinleri ve piller gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını ve enerji depolama çözümlerini kullanarak, öncesinde de bahsettiğimiz talebin zirveye ulaştığı pik anlarında şebekeden tamamen bağımsız kendi enerji ihtiyacını karşılayabilir. Bu sayede, ana şebekeye enerji talebinin azalması, şebekenin aşırı yüklenme riskini ve bundan doğacak ciddi birtakım riskleri de minimize eder. Bu yük azaltımı, şebeke operatörlerine esneklik sağlar ve enerji yönetimi stratejilerinin daha etkili bir şekilde uygulanmasına olanak tanır. Örneğin, mikro şebekenin sağladığı bu esneklik, şebeke operatörlerinin enerji kaynaklarını daha verimli bir şekilde dağıtmasına olanak tanır ve kritik durumlarda daha büyük kesintilerin önüne geçebilir. Mikro şebeke, yalnızca kendi topluluğuna

hizmet etmekle kalmaz, aynı zamanda ana şebekenin genel güvenilirliğine de katkıda bulunur. Dahası, mikro şebekelerin şebeke üzerindeki bu destekleyici rolü, şebeke altyapısının ömrünü uzatabilir ve enerji şirketlerinin bakım ve yenileme maliyetlerini azaltabilir. Bu hem kamu hizmeti sağlayıcıları hem de tüketiciler için maliyet tasarrufu sağlar. Ayrıca, şebeke arızalarının azaltılması, enerji güvenliğini artırır ve hizmet sürekliliğini sağlar, bu da özellikle kritik altyapıların ve hizmetlerin kesintisiz çalışması için önemlidir.

Sonuç olarak, mikro şebekeler, modern enerji altyapısının kritik bir bileşeni olarak öne çıkmakta ve enerji güvenliğini artırırken, iklim değişikliği karşısında sistemlerin dayanıklılığını güçlendirmektedir (Pires vd., 2023). Pik yük dönemlerinde ana şebekenin yükünü azaltarak şebeke operasyonlarını daha güvenli ve istikrarlı hale getiren bu sistemler, aynı zamanda uzun vadede enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğine de önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle DA mikro şebekeler, günümüzün enerji ihtiyaçlarına ve teknolojik gelişmelerine daha uygun bir seçenek olarak yeniden değerlendirilmekte olup, gelecekte enerji sistemlerinin esnek, verimli ve dirençli olmasında kritik bir rol oynayacaktır (Hartono vd., 2013). Ancak Mikro Şebekelerin tüm bu faydalarının yanında elektriksel karakteristiklerin kararlı bir şekilde çalışması durumunda bu faydaların sürekliliği söz konusudur. Dolayısıyla kararlı bir Mikro şebeke ancak geleneksel şebekelerin devreden çıktığı ve yetmediği durumlarda hayati öneme sahip olur. Kararsız bir Mikro şebeke mevcut sistemi de kaotik bir duruma sokabilir. Bu nedenle Mikro şebekelerde kararlı bir sistem sunabilmek için bazı özel kontrolcüler kullanılmalıdır.

2. Mikro Şebekelerde Kontrolcüler ve Özellikleri

Mikro şebekelerin performansını artırmak ve kararlılığını sağlamak için çok katmanlı kontrol döngüleri kullanılır. Bu döngülerde gerilim, frekans, akım ve aktif/reaktif güç gibi parametrelerin kontrolü, farklı çalışma modları için kararlılığı sağlayacak geri besleme verisi sağlar. Mikro şebekelerde birçok kontrolcü çalışma modları bulunmaktadır. Bu kontrolcüler bazı durumlarda dezavantajlı olurken sistemin daha hızlı kararsız hale dönmesine neden olur. Bu nedenle mikro şebekelerdeki kararlılık konusu şebekenin kendi içerisinde özel olarak belirlenebilecek bir çalışma modudur. Literatürde var olan bazı kontrolcülerini inceleyelim.

2.1 Droop Kontrol

Droop kontrol, özellikle mikro şebekeler ve dağıtık enerji kaynakları (DER) içinde yaygın bir şekilde kullanılan bir frekans ve

voltaj kontrol yöntemidir. Bu yöntem, birden fazla jeneratör veya inverterin paralel olarak çalıştığı sistemlerde, güç paylaşımını düzenlemek için merkezi olmayan bir yaklaşıma dayanır. Droop kontrolü, her bir enerji kaynağının, sistemdeki diğer kaynaklarla uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlayarak, yük paylaşımını dinamik olarak ayarlar. Kontrol stratejileri arasında inverter çıkış voltajını kontrol etme yeteneği, otonom mikro şebekelerdeki Dağıtık Üretim (DG) birimlerinin tak ve çalıştır özelliğini sağlamak için etkili bir yöntemdir. Düşüş kontrol yöntemi, voltaj kaynakları arasındaki güç akışını kontrol eden denklemler üzerine kuruludur ve hatla ayrılmış sistemlerde bu güç akışını yönetmek için kullanılır. Bu yöntem, mikro şebekelerin kararlı çalışmasını sağlamak adına kritik bir rol oynar (Moslemi & Mohammadpour, 2015).

$$P_{12} = \frac{E_1}{R^2 + X^2} [R(E_1 - E_2 \cos \delta) + X E_2 \sin \delta] \quad (1)$$

$$Q_{12} = \frac{E_1}{R^2 + X^2} [R(E_1 - E_2 \cos \delta) - R E_2 \sin \delta] \quad (2)$$

İnverter çıkış voltajı E_1 , bara voltajı E_2 , X ve R ise hattın endüktansı ve direncini ifade eder. Açısal fark δ , E_1 ve E_2 arasındaki açı farkıdır. P_{12} ve Q_{12} , inverterin iletim hattına enjekte ettiği aktif ve reaktif güçlerdir. Hat direnci ihmal edilip faz açısı küçük varsayıldığında, aktif güç faz açısı farkıyla, reaktif güç ise voltaj büyüklüğü farkıyla orantılı hale gelir. Otonom modda, DG'nin aktif gücü çıkış frekansını, reaktif gücü ise voltaj farkını değiştirerek kontrol edilebilir. Bu nedenle, yüksek endüktanslı hatlara sahip mikro şebekeler için geleneksel düşüş kontrolü bu formu alır.

$$\omega_i = \omega^* - M_{P_i}(P_i^* - P_i) \quad (3)$$

$$E_i = E^* - M_{Q_i}(Q_i^* - Q_i) \quad (4)$$

P_i ve Q_i , sırasıyla, i . DG'nin aktif ve reaktif güç çıkışlarını ifade ederken, P_i^* ve Q_i^* , i . DG'nin şebekeye bağlı modda dağıtılan güçleridir. ω^* ve E^* şebeke bağlı modda frekans ve voltaj büyüklüğünü temsil eder. M_{P_i} ve M_{Q_i} ise sırasıyla frekans ve voltaj düşüş eğimlerini gösterir. Her DG'nin güç kapasitesine orantılı olarak aktif ve reaktif güç üretmesi istendiğinden, düşüş eğimleri bu şekilde yeniden tanımlanır.

$$M_{P_i} = \frac{\omega^* - \omega^{min}}{P_i^* - P_i^{max}} \text{ ve } M_{Q_i} = \frac{E_i^* - E^{min}}{Q_i^* - Q_i^{max}} \quad (5)$$

Maksimum aktif ve reaktif güç çıkışları sırasıyla P_i^{max} ve Q_i^{max} olarak ifade edilirken, ω^{min} ve E^{min} sırasıyla izin verilen minimum

çalışma frekansı ve voltajı temsil eder. Düşüş kontrol stratejisi, basit yapısı sayesinde kolay uygulanabilir ve merkezi olmayan yapısı nedeniyle güvenilir olmasına rağmen, geleneksel düşüş kontrolörleri bazı dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlar aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

Droop kontrolünün temel prensibi, aktif ve reaktif güç değişimlerine karşılık gelen frekans ve voltaj düşüşlerine dayanır. Bu kontrol yöntemi, enerji kaynaklarının, güç taleplerine yanıt olarak frekans ve voltaj değerlerinde küçük değişiklikler yaparak sistemin dengede kalmasını sağlar. Bu davranış, enerji kaynaklarının sistemdeki diğer bileşenlerle senkronize olmasını kolaylaştırır ve merkezi bir denetleyiciye olan ihtiyacı azaltır (Gao vd., 2019).

Frekans droop kontrolünde, enerji kaynağının aktif güç üretimi arttıkça, frekans değeri belirli bir oranda düşer. Bu ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$f = f_0 - k_f(P - P_0) \quad (6)$$

Bu denklemde: f , değeri enerji kaynağının o anki frekansını temsil eder. f_0 , değeri sistemin referans frekansıdır (örneğin; 50 Hz veya 60 Hz). k_f , frekans duyarlılığını belirleyen droop katsayısıdır. P , enerji kaynağının o anki aktif güç çıkışıdır. P_0 ise nominal aktif güç çıkışını ifade eder. Bu denkleme göre, bir enerji kaynağının yükü arttıkça, frekansı da belirli bir oranda düşer. Bu durum, farklı kaynakların birbirine göre yük paylaşmasını sağlar.

DA mikro şebekelerde frekans olmadığından voltaja veya akıma dayalı droop kontrolü kullanılmaktadır. Voltaja dayalı droop kontrolünde ise reaktif güç üretimi arttıkça, voltaj değeri belirli bir oranda düşer:

$$V = V_0 - k_v(Q - Q_0) \quad (7)$$

Burada: V , enerji kaynağının o anki voltajını temsil eder. V_0 , sistemin referans voltajıdır. k_v , voltaj duyarlılığını belirleyen droop katsayısıdır. Q , o anki reaktif güç çıkışıdır. Q_0 ise nominal reaktif güç çıkışını ifade eder. Bu denkleme göre, enerji kaynağının reaktif güç yükü arttıkça, voltajında bir düşüş gerçekleşir. Bu durum, reaktif güç taleplerinin farklı kaynaklar arasında paylaşılmasını sağlar.

Droop kontrolünün en önemli avantajlarından biri, dağıtık enerji kaynaklarının merkezi bir kontrol sistemi olmaksızın senkronize bir şekilde çalışmasını sağlamasıdır. Bu durum, sistemin esnekliğini artırır ve

özellikle mikro şebekelerde modüler genişlemeye olanak tanır. Yeni enerji kaynakları sisteme eklendiğinde, droop kontrolü, bu kaynakların var olan sistemle uyumlu bir şekilde çalışmasına imkân tanır. Ayrıca, ada moduna geçiş gibi durumlarda, droop kontrolü sayesinde mikro şebeke, yerel frekans ve voltaj istikrarını koruyabilir, bu da enerji güvenliği açısından büyük bir avantaj sağlar.

Droop kontrolü, genel olarak güvenilir bir yöntem olmasına rağmen, bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle büyük ölçekli enerji sistemlerinde, droop kontrolü ile sağlanan yük paylaşımında hassasiyet kayıpları yaşanabilir. Bu, yüklerin doğru şekilde dağıtılmaması ve belirli jeneratörlerin aşırı yüklenmesi gibi sorunlara yol açabilir. Ayrıca, droop kontrolünün dinamik yanıtı, ani yük değişikliklerine karşı gecikmeli olabilir, bu da bazı durumlarda istenmeyen sonuçlar doğurabilir.

Droop kontrolünün bu sınırlamalarına rağmen, mikro şebekelerdeki uygulamaları, sistem esnekliği ve güvenilirliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle DA mikro şebekelerde droop kontrolünün kullanımı, enerji verimliliğini artırmak ve sistemin operasyonel stabilitesini sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Sonuç olarak, droop kontrolü, enerji sistemlerinin gelecekteki gereksinimlerine uyum sağlama potansiyeline sahip etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Guerrero vd., 2011).

2.1.1 Sanal Droop Kontrol

Virtual droop kontrolü, DA mikro şebekelerde voltaj ve aktif güç arasındaki dinamik ilişkileri optimize etmek için kullanılan gelişmiş bir kontrol stratejisidir (Haimin Tao vd., 2008). Bu yöntem, mikro şebekelerde enerji akışını denetlemeye ve sistemin genel verimliliğini artırmaya yardımcı olur (He & Li, 2011). Özellikle DA mikro şebekelerde enerji kaynakları ve yükler arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla sanal direnç veya sanal reaktans kavramlarını kullanır. Bu kontrol stratejisi, geleneksel AA (Alternatif Akım) sistemlerde kullanılan droop kontrolünü DA sistemler için uyarlayarak daha etkili bir enerji yönetimi sağlar. (Guerrero vd., 2013)

Virtual droop kontrolü kapsamında kullanılan temel denklem, voltajın aktif güçle olan ilişkisini gösterir:

$$V = V_0 - k_{vP}(P_{virtual} - P_{ref}) \quad (8)$$

Burada; V , Mikro şebekedeki anlık voltaj seviyesi. (Bu voltaj, sistemin çalışma koşullarına ve yük değişimlerine bağlı olarak değişecektir). V_0 , Nominal voltaj. Bu, sistemin ideal koşullarındaki hedef voltaj seviyesidir. k_{vP} , Droop katsayısı. Voltajın aktif güç değişimlerine karşı duyarlılığını belirler. Yüksek bir k_{vP} değeri, voltajın aktif güç değişimlerine karşı daha belirgin bir tepki vermesine neden olur. $P_{virtual}$, Sanal droop kontrolü altında belirlenen aktif güç. Bu, sistemin sanal bileşenlerinin etkisi altında ölçülen aktif güç miktarını ifade eder. P_{ref} , Referans aktif güç. Bu, mikro şebekenin normal çalışma koşullarındaki hedeflenen aktif güç seviyesidir. Bu denklem, aktif güç değişikliklerinin voltaj üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu açıklamaya yeterlidir. Sanal droop kontrolü, voltajı stabilize etmek için aktif güçteki değişimlere tepki verecektir (Bağırın & Erentürk, 2019).

Virtual droop kontrolü, sanal direnç veya sanal reaktans kavramlarını da içerir:

- Sanal Direnç (Virtual Resistance):

$$V = V_{nom} - R_{virtual} \cdot I \quad (9)$$

Burada, V_{nom} sistemin nominal voltajını, $R_{virtual}$ sanal direnci ve I akımı temsil eder. Sanal direnç, sistemin voltaj ve akım ilişkisini dinamik olarak düzenler.

- Sanal Reaktans (Virtual Reactance):

$$V = V_{nom} - X_{virtual} \cdot I \quad (10)$$

Burada, $X_{virtual}$ sanal reaktansı ve I akımı ifade eder. Sanal reaktans, voltajın ve akımın nasıl etkileşime girdiğini belirler ve enerji akışını optimize eder. (Guerrero vd., 2011)

Virtual droop kontrolü DA mikro şebekelerde ve bu şebekelerin çeşitli uygulama alanlarında etkili bir şekilde kullanılır. Enerji Depolama Sistemlerinde batarya sistemleri ve süperkapasitörler gibi enerji depolama birimleri, sanal droop kontrolü sayesinde etkin bir şekilde yönetilmektedir. Bu, enerji akışını dengelemeye ve depolama birimlerinin şarj/deşarj döngülerini optimize etmeye yardımcı olur. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında ise güneş panelleri (solar sistemler) ve rüzgâr türbinleri gibi sistemler sanal droop kontrolü kullanılarak mikro şebekeye entegre edilir. Bu şekilde enerji üretiminin istikrarlı bir şekilde yönetilmesi sağlanır ve sistemin genel verimliliğini artırır. Ayrıca yük dengeleme için Virtual droop kontrolü, yük değişimlerine bağlı olarak

voltaj dalgalanmalarını minimize eder. Bu, sistemin güvenilirliğinin yanı sıra kararlılığını artırarak, enerji arzında meydana gelebilecek kesintileri önler. (Lasseter & Paigi, 2004)

2.1.2 Adaptif Droop Kontrolü

DA mikro şebekelerde gerilim düzenlemesini optimize etmek için geliştirilen ileri seviye bir kontrol stratejisidir. Geleneksel droop kontrolü, sabit bir droop katsayısı kullanarak voltaj ve güç arasındaki ilişkiyi tanımlar. Ancak bu sabit katsayı, değişken yükler, farklı kaynaklar ve diğer dinamik koşullar altında her zaman ideal bir performans sergileyemez. İşte bu noktada, adaptif droop kontrolü devreye girer. Bu strateji, droop katsayısını, sistemin gerçek zamanlı koşullarına göre dinamik olarak ayarlar. (Bidram & Davoudi, 2012)

Droop kontrolü, mikro şebekelerde dağıtık üretim kaynaklarının (DG) ve enerji depolama sistemlerinin (ESS) senkronizasyonu için yaygın olarak kullanılır. Temel olarak, droop kontrolü, bir inverterin çıkış gerilimini, ürettiği aktif veya reaktif güce göre ayarlar (Dragicevic vd., 2016). Klasik bir droop kontrol denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$V = V_o - m \cdot P \quad (11)$$

Bu denklemde: V İnverterin çıkış gerilimi, V_o , Yüksüz durumdaki referans gerilimi, m , Droop katsayısı (gerilim-güç eğimi), P , İnverterin çıkışındaki aktif gücü temsil etmektedir. Adaptif droop kontrolünde ise, m sabit değildir ve sistemin anlık durumuna göre değişir. Yani, droop katsayısı yük talebi, enerji kaynağının durumu, hattın empedansı, direnci ve diğer çevresel faktörlere göre otomatik olarak ayarlanır. Bu durum, aşağıdaki gibi bir formülle ifade edilebilir:

$$m(t) = f(P(t), I(t), Z_{line}, \dots) \quad (12)$$

Burada ise: $m(t)$, Zamanla değişen adaptif droop katsayısını, $P(t)$, Zamanla değişen aktif gücü, $I(t)$, Zamanla değişen akımı Z_{line} , Hattın empedansını, "...” ise, ortam sıcaklığı, yük değişiklikleri vb.ni temsil etmektedir.

Adaptif droop kontrolünün amacı da denklem (12)'de gösterilen dinamik değişkenlerle en uygun droop katsayısını belirleyerek, sistemin en verimli ve en kararlı şekilde çalışmasını sağlamaktır (Vu vd., 2017). Adaptif droop kontrolü, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları gibi değişken güç üretim kaynaklarının yoğun olduğu mikro şebekelerde büyük avantajlar sunar. Örneğin, bir güneş enerjisi sistemi (PV), güneş

ışığı yoğunluğundaki değişimlere bağlı olarak veya panelleri üzerinde biriken toz ve mevsimsel kalıntılar (yağmur ve kar kalıntıları) ürettiği güç miktarını sürekli olarak değiştirir (Venkateswari & Sreejith, 2019). Sabit bir droop katsayısı, bu tür bir değişkenlik karşısında yeterli olmazken, adaptif droop kontrolü bu dalgalanmalara anında uyum sağlayarak en uygun güç akışını sağlar.

Benzer şekilde, rüzgâr türbinleri gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları da adaptif droop kontrolünden faydalanabilir. Bu sistemler, rüzgâr hızındaki ani değişikliklere cevap vermek için droop katsayısını hızla ayarlayarak mikro şebekenin stabilitesini korur. Ayrıca, enerji depolama sistemleri de adaptif droop kontrolü ile optimize edilebilir. Örneğin, pil şarj durumu ve akım sınırlamaları gibi faktörler göz önünde bulundurularak, pilin en verimli şekilde kullanılması sağlanabilir (Wali vd., 2021). Sonuç olarak Adaptif droop kontrolü DA mikro şebekelerdeki dinamik değişikliklere hızlı ve etkin bir şekilde yanıt verme kapasitesine sahiptir. Bu kontrol stratejisi hem enerji güvenliğini hem de sistem verimliliğini artırırken, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu da kolaylaştırır (Nwokediegwu vd., 2024). Adaptif droop kontrolünün uygulanması, mikro şebekelerin daha esnek, sürdürülebilir ve güvenilir bir enerji altyapısı oluşturmaya katkı sağlar (Guerrero vd., 2013).

2.2 Mikro Şebekelerin Hiyerarşik Kontrolü

Mikro şebekeler, modern enerji sistemlerinin merkezinde yer alarak hem şebekeye bağlı hem de ada modlarında çalışabilme esnekliği sunar (Lasseter & Paigi, 2004). Ancak bu sistemlerin yönetimi ve kontrolü kapsamlı araştırmalar gerektirir. Şebekeye bağlı ve bağımsız modlar arasında sorunsuz geçiş sağlayabilmek için mikro şebekelerin topolojileri, mimarileri ve ada tespit algoritmalarının incelenmesi gereklidir (Guerrero, t.y.). Güç elektroniği, telekomünikasyon, enerji üretimi ve depolama gibi farklı teknolojilerin entegrasyonu önemli zorluklar yaratır. Bu süreçte, güvenlik konuları, arıza izleme, tahmini bakım ve koruma gibi unsurlar hayati öneme sahiptir (J. Ma & Zhao, 2017).

Bu çalışmada, mikro şebekelerin dinamiklerini ele alarak sistem verimliliği ve güvenilirliğini artırmayı amaçlıyoruz. Hiyerarşik kontrol yaklaşımıyla ele alınan bu yapı, Elektrik İletimi Koordinasyon Birliği (UCTE, Kıta Avrupası) modeline dayalı olarak geliştirilmiştir. Kıta Avrupası'ndaki büyük güç sistemlerinde kullanılan bu model, yüksek eylemsizlik ve endüktif ağlarla çalışan senkron makineleri kapsar. Ancak güç elektroniği tabanlı mikro şebekeler, düşük eylemsizlik ve direnç ağırlıklı yapılarıyla farklılık gösterir (Guerrero vd., 2011). Mikro

şebekelerde birincil kontrol (Primary Control), DG ünitelerinin iç kontrolüne odaklanırken, ikincil kontrol (Secondary Control) frekans ve genlik sapmalarını düzeltir. Üçüncül kontrol (Tertiary Control) ise şebeke ile mikro şebeke arasındaki güç akışını düzenler. Bu hiyerarşik yapı, esnek ve güvenilir mikro şebeke tasarımları için kritik bir öneme sahiptir (Guerrero vd., 2013).

2.2.1 Mikro şebekelerde birincil kontrol

Paralel olarak bağlanan iki veya daha fazla Gerilim Kaynağı İnvörtörü (VSI) durumunda, aktif ve reaktif güçlerde dolaşım sorunları meydana gelebilir. Bu kontrol seviyesi, iç akım ve voltaj kontrol döngülerine gönderilen voltaj referansının frekansını ve genliğini ayarlayarak bu durumu yönetir. Senkron jeneratörlerin aktif güç arttıkça frekansı düşürme prensibini taklit eden bu yöntem, P/Q düşüş yöntemi kullanılarak VSI'lere entegre edilebilir. $G_p(S)$ ve $G_Q(S)$ kompanzatorlarının tasarımı farklı kontrol teknikleri ile yapılabilir, sistemin senkronizasyonu ve voltaj kararlılığını sağlamak için belirlenen m ve n parametreleri ile statik $\Delta P/\Delta f$ ve $\Delta Q/\Delta V$ sapmaları tasarlanır.

$$m = \frac{\Delta f}{P_{max}} \quad (13)$$

$$n = \frac{\Delta V}{2Q_{max}} \quad (14)$$

Bu ifadeye göre, Δf ve ΔV , izin verilen maksimum frekans ve voltaj değerlerini temsil ederken, P_{max} ve Q_{max} ise invertörün sağlayabileceği maksimum aktif ve reaktif güçleri ifade eder. İnvörtör, aktif gücü emebiliyorsa ve örneğin hat etkileşimli bir UPS gibi aküleri şarj edebiliyorsa, bu durumda $m = \Delta f / 2P_{max}$ olarak tanımlanır (Guerrero & Matas, t.y.).

Birincil kontrol seviyesi ayrıca, çıkış voltajını sanal çıkış empedansı döngüsü aracılığıyla kontrol edebilir, bu döngü (15) sayılı denklemde ifade edilmiştir.

$$V_o^* = V_{ref} - Z_D(S) \cdot i_o \quad (15)$$

Bu denkleme göre, V_{ref} gerilim referansı $V_{ref} = E \sin(2\pi ft)$ şeklinde tanımlanır ve $Z_D(S)$ ise sanal çıkış empedansı transfer fonksiyonudur; bu fonksiyon genellikle hat frekansında indüktif davranış sağlamaya yönelik olarak tasarlanmıştır (Guerrero vd., 2007).

2.2.2 Mikro şebekelerde ikincil kontrol

İkincil kontrol, mikro şebeke içerisindeki frekans ve gerilim sapmalarını düzenlemek amacıyla kullanılır. Bu süreçte, mikro şebeke içerisindeki frekans (f_{MG}) ve genlik (E_{MG}) seviyeleri sürekli olarak izlenir ve bu değerler referans frekans (f_{MG}^*) ve referans gerilim (E_{MG}^*) ile karşılaştırılır. Oluşan sapmalar (δf ve δE), orantılı-integral (PI) kontrolörler aracılığıyla işlenir ve her bir birime uygun frekans ve genlik düzeltme sinyalleri gönderilir. Frekans ve genlik restorasyonu için kullanılan denklemler G_f ve G_E aşağıdaki formüllerle ifade edilir:

$$\delta f = k_{pf}(f_{MG}^* - f_{MG}) + k_{if} \int (f_{MG}^* - f_{MG}) dt + \Delta f_S \quad (16)$$

$$\delta E = k_{pE}(E_{MG}^* - E_{MG}) + k_{iE} \int (E_{MG}^* - E_{MG}) dt \quad (17)$$

Bu ifadede yer alan k_{pf} , k_{if} , k_{pE} , ve k_{iE} parametreleri, ikincil kontrol kompanzatorünün ayar değerleridir. Δf_S ise, şebeke olmadığında sifıra eşitlenen bir senkronizasyon terimidir. Bu durumda, frekans ve gerilim sapmaları olan δf ve δE , izin verilen maksimum frekans ve genlik sınırlarını aşmaması için dikkatlice kontrol edilmelidir (Guerrero vd., 2013).

2.2.3 Mikro şebekelerde üçüncül kontrol (Tertiary Control):

Üçüncül seviye kontrol, mikro şebekelerdeki en üst düzey kontrol seviyesidir ve genellikle birkaç dakika gibi daha uzun zaman dilimlerinde voltaj ve frekans sapmalarını düzeltmek için çalışır. Bu kontrol seviyesi, mikro şebekeler arasında veya bir kamu şebekesiyle enerji alışverişini yöneterek, optimum enerji dağıtımını sağlar. Aynı zamanda işletme maliyetlerini en aza indirme, enerji verimliliğini artırma ve yük tedarikini maksimize etme gibi hedeflere odaklanır.

Merkezi üçüncül kontrol yapısında, mikro şebekelere (MG) dair tüm bilgiler yerel kontrolörlerden toplanır ve güç akışları, talep ve üretim gereksinimleri doğrultusunda değerlendirilir. Bu değerlendirmeler, optimum enerji dağıtımını ve emisyon kontrolü için çeşitli hedef fonksiyonlar doğrultusunda yapılır.

Bu kontrol düzeyi, Model Öngörücü Kontrol (MPC) gibi ileri teknolojiler kullanarak, güç maliyetlerini ve işletme stratejilerini optimize eder. Örneğin, tahmine dayalı enerji yönetimi stratejileri, belirsizlikler altında dahi mikro şebeke performansını ve dayanıklılığını artırarak maliyetleri düşürmeyi hedefler. Üçüncül kontrol, bu şekilde mikro şebekelerin hem iç işleyişlerini düzenler hem de dış şebekelerle

entegrasyonunu koordine eder, bu da mikro şebeke kümelerinin etkin ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar (Rashidi vd., 2021).

$$f_{MG}^* = k_{pP}(P_G^* - P_G) + k_{iP} \int (P_G^* - P_G) dt \quad (18)$$

$$E_{MG}^* = k_{pQ}(Q_G^* - Q_G) + k_{iQ} \int (Q_G^* - Q_G) dt \quad (19)$$

Bu durumda, kontrol parametreleri olan k_{pP} , k_{iP} , k_{pQ} ve k_{iQ} üçüncül kontrol kompanzatorları için ayarlanmıştır. Eğer f_{MG} ve E_{MG} izin verilen sınırların dışındaysa, bu sinyaller doygunluk gösterir. Bu değişkenler, ada modunda ikincil kontrol tarafından içsel olarak üretilir ($f_{MG}^* = f_G$ ve $E_{MG}^* = E_G$). Şebeke bağlantısı mevcut olduğunda, senkronizasyon başlatılabilir ve f_{MG}^* ve E_{MG}^* , şebekedeki değerlere eşit hale gelir. Senkronizasyon sonrası, bu referans sinyalleri üçüncül kontrol tarafından sağlanabilir (Guerrero vd., 2013).

Sonuç olarak gelecekteki mikro şebeke kontrol eğilimleri, enerji yönetim sistemlerine odaklanarak birincil, ikincil ve üçüncül kontrol katmanlarının optimize edilmesini hedeflemektedir. Mikro şebeke kümelerinin, birbirine bağlanan akıllı mikro şebekeler aracılığıyla gelişmesi beklenmektedir. Bu yapılar, enerji hizmetlerinin müzakere edilmesi ve paylaşılmasını mümkün kılacaktır. Çoklu etmenler, bu süreçte enerji alışverişini yönetebilirken, iletişim sistemleri gibi teknolojiler kritik bir rol oynayacaktır. IEEE Standardı 1547.4'ün kabulü, mikro şebeke operasyonları için yeni endüstriyel uygulamaları teşvik edecektir (*IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems*, 2011).

Günümüzde enerji dağıtımının verimliliği ve güvenilirliği, özellikle DA mikro şebekeler için geliştirilen kontrol stratejileri açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmanın temel amacı DA mikro şebekelerde enerji yönetimini ve sistem kararlılığını iyileştirmek için geliştirilmiş kontrol stratejilerini açıklamaktır. Bu kapsamda, belirlenen hedeflere ulaşmak için en uygun kontrol modunun seçilmesi gerekmektedir.

3. Mikro Şebeke Tasarımı ve Kontrol Stratejileri

Bir mikro şebekeye en uygun kontrol modu seçiminde sistemin büyüklüğü ve DG çeşitleri göz önünde tutulmalıdır. İlk adımda DA mikro şebekede kullanılacak kontrol stratejileri belirlenip tasarlanmalıdır. Bu aşamada, geleneksel ikincil kontrol yöntemlerinin yanı sıra, "Virtual Droop Control" ve "Adaptive Droop Control" gibi gelişmiş kontrol teknikleri incelenerek uygulanmalıdır. Bu tekniklerin mikro şebekedeki

enerji dağıtımını optimize etmek ve sistemin genel kararlılığını artırmak üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Tasarımda, bara sayılarına göre kontrolcü sayısı belirlenmelidir. İlk olarak tasarlanacak sistemin benzetimi yapılmalı ve olası kararsız durumların önüne geçilmelidir. Gerekli durumlarda kontrolcü modu tümünden değiştirilmeli veya hibrid bir çalışma modu ortaya konulmalıdır.

3.1 Kontrol Stratejilerinin Uygulaması ve Simülasyonu

İkinci adımda, tasarlanan kontrol stratejileri PLECS, Matlab gibi yazılımlarda simüle edilebilir. Bu aşamada, her dönüştürücünün yerel voltaj ve akım ayarları, belirlenen kontrol stratejileri doğrultusunda optimize edilmelidir. Voltaj regülatörleri, mikro şebekedeki voltaj seviyelerini tahmin etmek için gürültüye dayanıklı gözlemciler kullanarak, yerel voltaj ayar noktalarını optimize edilir. Akım regülatörleri ise komşu dönüştürücülerle akım karşılaştırması yaparak, yük paylaşımını optimize etmek için gerekli voltaj düzeltme terimlerini belirleyecektir.

3.2 Performans Analizi ve Karşılaştırması

İkinci aşamada, uygulanan kontrol stratejilerinin performansı detaylı bir şekilde analiz edilebilir. Mikro şebekedeki voltaj dalgalanmaları, akım dengesi ve enerji verimliliği gibi metrikler değerlendirilmelidir. Bu metrikler, kontrol stratejilerinin mikro şebekenin genel performansına ve enerji dağıtımına olan etkilerini gösterecektir. Performans analizleri, mevcut modellere göre yapılan iyileştirmeleri ve kontrol stratejilerinin etkinliğini değerlendirecek şekilde yapılacaktır. Bu aşamada, sistemin enerji verimliliği ve yük paylaşımındaki iyileşmelerin belirginleşmesi beklenmelidir.

3.3 Dinamik Model Geliştirme ve Sistem Analizi

Son olarak, mikro şebekenin küresel dinamik modeli geliştirilmelidir. Bu model, sistemin dinamik tepkisini optimize etmek için kullanılmalı ve tasarım yönergeleri sunulmalıdır. Modelin doğruluğu ve kontrol stratejilerinin etkinliği, çeşitli simülasyon senaryoları ile test edilmelidir. Ayrıca, sistemin gürültüye dayanıklılığı, bağlantı hatası dayanıklılığı ve genel performansı değerlendirilmelidir.

Bu adımların başarılı bir şekilde tamamlanmasıyla DA mikro şebekelerde enerji yönetimi ve sistem kararlılığı konularında önemli katkılar sağlanacak ve önerilen kontrol stratejilerinin etkinliği doğrulanmış olacaktır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma ile bir mikro şebekede enerji yönetimini ve sistem kararlılığını sağlayacak ve gerekli durumlar için bu kararlı yapıyı artırmayı hedefleyen modlar açıklanmıştır. Ayrıca örnek bir kontrolcü modunun seçim ve tasarım aşamaları teorik olarak vurgulanmıştır. Özellikle günümüzde popüler olan yenilenebilir enerji üretim tesislerinde kullanılabilir "Virtual Droop Control" ve "Adaptive Droop Control" stratejileri açıklanmıştır. Bu sayede tasarlanacak sistemlerin enerji kayıpları azalacak ve mikro şebekelerin performansları iyileşecektir. Ayrıca, bu tekniklerin uygulanması, enerji kaynaklarının daha etkin kullanılmasını ve yük dengesizliğinin minimize edilmesini sağlayacaktır. Ekonomik olarak, bu geliştirmeler enerji maliyetlerini düşürecek ve mikro şebekelerin uzun vadeli işletme maliyetlerini azaltacaktır. Ayrıca, sistemin esnekliği ve güvenilirliği artırılarak, çeşitli uygulama senaryolarında daha geniş bir kullanım potansiyeli sunulacaktır. Bu iyileştirmeler, enerji altyapısının daha sürdürülebilir ve ekonomik bir şekilde yönetilmesine katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

- Bağır, A., & Erentürk, K. (2019). Design of Droop Controller in Microgrid Architectures. 4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences Proceedings, 258-261.
- Bidram, A., & Davoudi, A. (2012). Hierarchical Structure of Microgrids Control System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1963-1976.
- Charfi, W., Chaabane, M., Mhiri, H., & Bournot, P. (2018). Performance evaluation of a solar photovoltaic system. *Energy Reports*, 4, 400-406.
- Dragicevic, T., Lu, X., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2016). DC Microgrids—Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issues. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(5), 3528-3549.
- El Moubarek Bouzid, A., Sicard, P., Yamane, A., & Paquin, J.-N. (2016). Simulation of droop control strategy for parallel inverters in autonomous AC microgrids. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), 701-706.
- Elsayed, A. T., Mohamed, A. A., & Mohammed, O. A. (2015). DC microgrids and distribution systems: An overview. *Electric Power Systems Research*, 119, 407-417.
- Gao, F., Kang, R., Cao, J., & Yang, T. (2019). Primary and secondary control in DC microgrids: A review. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(2), 227-242.
- Guerrero, J. M. (t.y.). Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems.
- Guerrero, J. M., Chandorkar, M., Lee, T.-L., & Loh, P. C. (2013). Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1254-1262.
- Guerrero, J. M., & Matas, J. (t.y.). Wireless-Control Strategy for Parallel Operation of Distributed-Generation Inverters.
- Guerrero, J. M., Matas, J., de Vicuña, L. G., Castilla, M., & Miret, J. (2007). Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance.
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC

- Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172.
- Haimin Tao, Duarte, J. L., & Hendrix, M. A. M. (2008). Line-Interactive UPS Using a Fuel Cell as the Primary Source. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8), 3012-3021.
- He, J., & Li, Y. W. (2011). Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(6), 2525-2538.
- IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. (2011). IEEE.
- Justo, J. J., Mwasilu, F., Lee, J., & Jung, J.-W. (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 387-405.
- Lasseter, R. H., & Paigi, P. (2004). Microgrid: A conceptual solution. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), 4285-4290.
- Ma, J., & Zhao, Z. (2017). Transmission Loss Optimization-Based Optimal Power Flow Strategy by Hierarchical Control for DC Microgrids.
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2014). Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 304-315.
- Mohamed, A., Ghareeb, A., Youssef, T., & Mohammed, O. A. (2013). Wide area monitoring and control for voltage assessment in smart grids with distributed generation. 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 1-6.
- Mohamed, A., Salehi, V., & Mohammed, O. (2012). Real-Time Energy Management Algorithm for Mitigation of Pulse Loads in Hybrid Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1911-1922.
- Moslemi, R., & Mohammadpour, J. (2015). Accurate reactive power control of autonomous microgrids using an adaptive virtual inductance loop. *Electric Power Systems Research*, 129, 142-149.
- Nasirian, V., Moayedi, S., Davoudi, A., & Lewis, F. L. (2015). Distributed Cooperative Control of DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(4), 2288-2303.
- Nwokediegwu, Z. Q. S., Ibekwe, K. I., Ilojianya, V. I., Etukudoh, E. A., & Ayorinde, O. B. (2024). *Renewable Energy Technologies In Engineering:*

A Review Of Current Developments And Future Prospects. *Engineering Science*, 5(2).

- Pires, V. F., Pires, A., & Cordeiro, A. (2023). DC Microgrids: Benefits, Architectures, Perspectives and Challenges. *Energies*, 16(3), 1217.
- Rashidi, R., Hatami, A., & Abedini, M. (2021). Multi-microgrid energy management through tertiary-level control: Structure and case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101395.
- Venkateswari, R., & Sreejith, S. (2019). Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 376-394.
- Vu, T. V., Perkins, D., Diaz, F., Gonsoulin, D., Edrington, C. S., & El-Mezyani, T. (2017). Robust adaptive droop control for DC microgrids. *Electric Power Systems Research*, 146, 95-106.
- Wali, S. B., Hannan, M. A., Reza, M. S., Ker, P. J., Begum, R. A., Rahman, M. S. A., & Mansor, M. (2021). Battery storage systems integrated renewable energy sources: A biblio metric analysis towards future directions. *Journal of Energy Storage*, 35, 102296.



BÖLÜM 2

MİKRODALGA TRANSİSTÖRÜNÜN OPTİMİZASYON PROBLEMİNDE FARKLI AMAÇ FONKSİYON ÇİFTLERİNİN PERFORMANSLARI¹

Ahmet Arif ULUSLU²

¹ Doktora Tezinden Üretilmiştir.

² Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, ORCID ID: 0000-0002-5580-1687

1. MİKRODALGA TRANSİSTÖRÜNÜN OPTİMİZASYONU

Mikrodalga amplifikatör tasarımı, mikrodalga mühendisliğinin en önemli konularından biridir. Yüksek Kazanç G_T içeren tüm zorlu gereksinimleri göz önünde bulundurarak, düşük akımlı düşük güç tüketimi ile birlikte düşük giriş gerilimi dalga boyu (VSWR), geniş bantlı minyatür düşük gürültülü amplifikatör (LNA) tasarımı, ultra geniş bantlı (UWB) alıcı-verici entegrasyonları için en büyük zorluklardan biridir.

Bu zorlu gereklilikleri karşılamak için, her şeyden önce, hızlı ve düşük gürültülü, yüksek kaliteli transistörlere ihtiyaç vardır ki bu elbette mevcut teknolojinin konusudur.

Günümüzde radyo frekans (RF) ve mikrodalga devrelerinde; optimizasyon işlemleri, mühendislik tasarımlarında kullanılan önemli bir yöntemdir. Optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasının çok önemli avantajları olduğu bilinmektedir. Gerçek bir sistem tasarımı için, geleneksel yöntemler deneysel formülleri kullanarak yalnızca fizibilitesini esas alan çözümleri içerirken, optimizasyon yöntemleri gerçekçi fiziksel modellere dayanan optimum çözümleri arar. Mühendislik tasarımlarında kullanılan optimizasyon yöntemleri çok sayıda işlem içerir. Çünkü, optimizasyon yöntemlerinin çözmeye çalıştıkları problemlerde karmaşık fonksiyonların farklı potansiyel çözümler için irdelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada üzerinde durulan parametreler; Kaynak Z_S , yük Z_L 'i (gerçekleyebilir tasarım hedef uzayı, belirli çalışma koşullarında cihazın uygun gürültü faktörü F , giriş-çıkış VSWR, kazanç G_T dörtlüsünün ve karşılık gelen sonlandırma değerlerinin elde edilmesi olarak ifade edilebilir) ayarlama problemi bir optimizasyon problemi olup, gerçek zamanlı optimizasyon modelleme uygulamalarını içermektedir. Dinamik

verilerin kullanıldığı büyük parametre uzaylarına sahip modellerin parametrelerinin ayarlanması, sistemlerin tasarımı ve kontrolü için önemlidir. Parametre ayarlama problemlerinde çözüme ulaşmak için farklı yaklaşımlardan yararlanılabilir. Ancak bütün yaklaşımlarda amaç, deneysel ve modelden alınan veriler arasındaki farkı en aza indirmektir. Model parametrelerinin belirlenmesinde uygun deneysel verilerin elde edilmesi önemlidir. Modelin süreç gösterim kabiliyeti, modelde yer alan parametrelerin doğru bir şekilde belirtildiği gerçeği ile büyük oranda orantılıdır.

Günümüzde, düşük güç tüketimi ile ultra-geniş bantlı (UWB) minyatür düşük gürültü amplifikatörü (LNA) tasarımı, düşük seviye bataryadan, UWB alıcı-verici entegrasyonları için en büyük zorluklardan biridir. Özellikle, alıcıların çoğu el tipi veya batarya ile çalışan cihazlardır; bu nedenle, UWB dalga oranları boyunca çok düşük bir besleme gerilimi, yüksek kazançlı G_T , düşük gürültü oranı F ve düşük giriş V_{in} ve çıkış V_{out} olması çok düşük güç tüketimi olan bir LNA'nın tasarım optimizasyonunda çok önemli bir gereksinim olarak karşılaşılmaktadır.

Yapılan bu çalışma, baskın-olmayan sıralamalı genetik algoritma (NSGA) kullanılarak parametre ayarlama işleminde kullanılan en yeni teknikleri ortaya koymaktadır. Elde edilen nümerik sonuçlar ve incelenen çalışmalardaki analitik sonuçlar [1] ile mukayese edildiğinde başarılı bir optimizasyonun gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Parametre optimizasyonun, yapılan araştırmalar sonucu yeni optimizasyon tekniklerinin keşfedilmesi ile her zaman bir adım daha geliştirilebileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca optimizasyon birçok alanda kullanılabileceği gibi özellikle anten alanında birçok çalışma mevcuttur [2-4]. Ayrıca vekil model çalışmaları da son zamanda popüler olmaya başlamıştır [5].

2. TRANSİSTÖRÜN PERFORMANS ÖLÇÜ FONKSİYONLARI

Bir transistor iki-kapılı devrenin performansı sıklıkla 4 temel ölçüm fonksiyonu ile ölçülebilir: ‘Güç Kazancı G_T , Gürültü Figürü F , Giriş VSWR V_{in} ve Çıkış VSWR V_{out} ’tur. Bu fonksiyonlar transistörün z parametreleri, kaynak ve yük sonlandırmaları cinsinden gerekli temel formülasyonları verdikten sonra ileriki bölümlerde analiz işlemlerine geçilecektir [6].

2.1.1 Gürültü Figürü (F)

İki Kapılı Devre ve Kapı Empedansları bilinen bir transistörün Z_S (2.1) kaynak empedansına ilişkin gürültü faktörü (2.2):

$$Z_S = R_S + jX_S \quad (2.1)$$

$$F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} = F\{Z_S\} = F_{min} + \frac{R_n}{|Z_{opt}|^2} \frac{|Z_S - Z_{opt}|^2}{R_S} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir [7].

Burada optimum kaynak empedansı Z_{opt} (2.3):

$$Z_{opt} = R_{opt} + jX_{opt} \quad (2.3)$$

olmakta ve bu değerler transistör parametreleriyle birlikte verilmektedir.

Ayrıca dB (2.4) cinsinden:

$$F(dB) = 10 \log_{10} F \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilebilir.

2.1.2 Giriş VSWR (V_{in})

Z_S (2.1) kaynak empedansı ve Z_L (2.5) yük empedansına sahip bir iki kapılının Giriş VSWR V_{in} (2.6):

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (2.5)$$

$$V_{in} = \frac{1+\rho_{in}^2}{1-\rho_{in}^2} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada ρ_{in} (2.7):

$$|\rho_{in}| = \left| \frac{Z_S - Z_{in}^*}{Z_S + Z_{in}} \right| \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilen giriş yansıma katsayısı olmaktadır. Buradaki giriş empedansı z_{ij} iki kapılının küçük işaret açık devre z-parametreleri olmak üzere Z_i (2.8) (2.9):

$$Z_i = R_i + jX_i \quad (2.8)$$

$$Z_i = z_{11} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{22} + Z_L} \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilebilir [7].

2.1.3 Çıkış VSWR (V_{out})

Çıkış VSWR V_{out} (2.10) ise:

$$V_{out} = \frac{1+\rho_{out}^2}{1-\rho_{out}^2} \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada ρ_{out} (2.11):

$$|\rho_{out}| = \left| \frac{Z_{out} - Z_L^*}{Z_{out} + Z_L} \right| \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilen çıkış yansıma katsayısı olmaktadır. Buradaki çıkış empedansı Z_{out} (2.12):

$$Z_{out} = z_{22} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{11} + Z_S} \quad (2.12)$$

ters dönüşüm yaparsak Z_S (2.13):

$$Z_S = -z_{11} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{11}-z_{out}} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilebilir [7].

2.1.4 Güç Kazancı (G_T)

İki Kapılı Devrenin Z_S (2.4), Z_L (2.5) ve z- parametrelerine bağlı Güç Kazancı G_T (2.14):

$$G_T\{Z_S, Z_L\} = \frac{P_L}{P_{AVS}} = \frac{4R_S R_L |Z_{21}|^2}{|(z_{11}+Z_S)(z_{22}+Z_L)-z_{12}z_{21}|^2} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Ayrıca dB cinsinden Güç Kazancı G_T (2.15):

$$G_T(dB) = 10 \log_{10} G_T \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilebilir [7].

Detaylandırılmış 1. Yaklaşım (2.16):

$$G_T = \frac{P_L}{P_{AVS}} = \frac{P_{in}}{P_{AVS}} \frac{P_L}{P_{in}} = (1 - |\rho_{in}|^2) G_{op} = \rho_{in}\{Z_S, Z_L\} G_{op}\{Z_L\} \quad (2.16)$$

olarak tanımlanır. Burada G_{op} (2.17) çalışma kazancıdır. Bu kazanç $\frac{P_L}{P_{in}}$ oranı ile tanımlanır ve

$$G_{op}\{Z_L\} = \frac{|z_{21}|^2 R_L}{|z_{22}+Z_L|^2 R_i} \quad (2.17)$$

formülü ile hesaplanır.

Detaylandırılmış 2. Yaklaşım (2.18) (2.19):

$$G_T \triangleq \frac{P_L}{P_{AVS}} = \frac{(P_{Aout} - |\rho_{out}|^2 P_{Aout})}{P_{AVS}} = (1 - |\rho_{out}|^2) \frac{P_{Aout}}{P_{AVS}} \quad (2.18)$$

$$G_T = (1 - |\rho_{out}|^2) G_{av} = M_{out} G_{av} \gg \rho_{out}\{Z_S, Z_L\} G_{av}\{Z_S\} \quad (2.19)$$

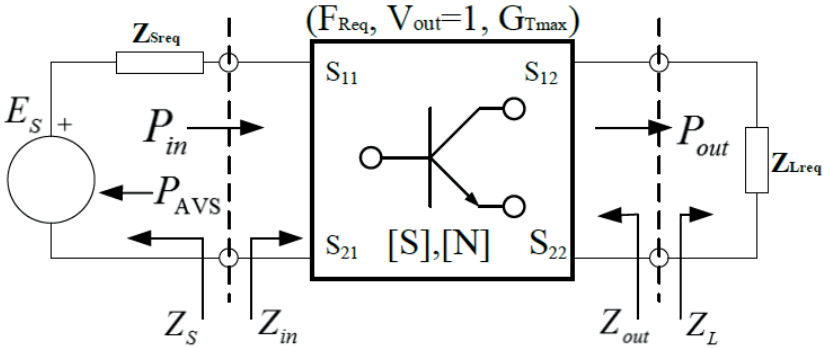
olarak tanımlanır. Burada G_{av} (2.20) çalışma kazancıdır. Bu kazanç $\frac{P_{out}}{P_{AVS}}$ olarak tanımlanır ve

$$G_{av}\{Z_S\} = \frac{P_{out}}{P_{avs}} = \frac{|z_{21}|^2 R_S}{|z_{11} + Z_S|^2 R_{out}} \quad (2.20)$$

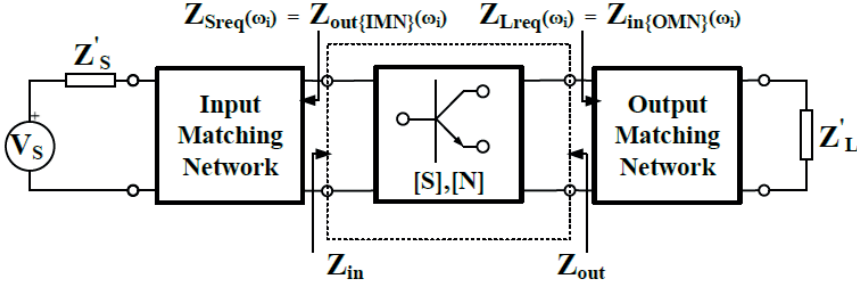
formülü ile hesaplanır.

3. UYGULANABİLİR TASARIM HEDEFİNİN BELİRLENMESİ

Tipik bir amplifikatör tasarım probleminde, bir transistör, $\{(V_{DS}, I_{DS}), f\}$ ile sonlandırılan ($Z_S = r_S + jx_S, Z_L = r_L + jx_L$) işlem noktasında saçılma [S] ve gürültü [N] parametreleri ile karakterize edilen Şekil 3.1'deki bir doğrusal iki port ile temsil edilebilir. Darlington teoremini ultra geniş bant tasarımlarında kullanarak maksimum güç dağıtımı için giriş ve çıkış eşleşmeli devrelerle gerçekleştirilebilen empedanslar Şekil 3.2'de gösterildiği gibi gereklidir [8-9].



Şekil 3. 1 Azami güç iletimi ve gerekli kaynak ve yük sonlandırmalarıyla gerekli gürültü için küçük sinyalli bir transistörün İki-Portlu gösterimi



Şekil 3. 2 Maksimum güç dağıtımı ve gerekli gürültü için tek transistör LNA devresi

Bu çalışmada, maksimum verim, minimum güç tüketimi için performans karakterizasyonu yapılmıştır ve bunlara denk gelen Gürültü Figürü (F) hesaplanmıştır. Gürültü Figürü F, Saçılma Parametresi gücü S'nin giriş ve çıkış bağlantı noktalarındaki Gürültü N oranına oranı olarak tanımlanır ve G_T , yüke verilen güç oranıdır.

Bir LNA transistörünün Performans Ölçüleri aşağıdaki Gürültü Figürü F, Kazanç G_T , Giriş V_{in} ve Çıkış V_{out} eşleşmeyen fonksiyonları ile değerlendirilebilir:

$$F = \frac{\text{giriş}(\frac{\text{ sinyal gücü}}{\text{ gürültü gücü}})}{\text{çıkış}(\frac{\text{ sinyal gücü}}{\text{ gürültü gücü}})} = F(Z_S) = F_{min} + \frac{R_n |Z_S - Z_{opt}|^2}{|Z_{opt}|^2 R_S} \quad (3.21)$$

$$G_T(Z_S, Z_L) = \frac{\text{Yüke verilen güç}}{\text{Mevcut kaynak gücü}} = \frac{4R_S R_L |z_{21}|^2}{|(z_{11} + Z_S)(z_{22} + Z_L) - z_{12} z_{21}|^2} \quad (3.22)$$

Formül (3.22) tarafından verilen G_T kazanımı, çıktındaki empedans uyumsuzluğu olarak hesaplanabilir.

(3.22) de belirtilen Kazanç G_T empedans uyumsuzluğu olarak faktörize edilebilir. Çıkış portunda $M_{out} = 1 - |\rho_{out}|$ buradaki $|\rho_{out}|$ çıkış yansımalarının büyüklüğü ve mevcut güç kazançlarının çıkış $|P_{AVout}|$ ve giriş $|P_{AVS}|$ portlarından oranı olarak tanımlanabilen mevcut G_{AV} kazanımıdır:

$$G_T(Z_S, Z_L) = \frac{P_{AVout}}{P_{AVS}} \frac{P_L}{P_{AVout}} = G_{AV}(Z_S) M_{out}(Z_S, Z_L) \quad (3.23)$$

burada

$$M_{out} = \frac{P_L}{P_{AVout}} = 1 - |\rho_{out}|^2 \quad (3.24)$$

$$G_{AV} = \frac{\text{Mevcut çıkış gücü}}{\text{Mevcut giriş gücü}} = G_{AV}(Z_S) = \frac{|z_{21}|^2}{|z_{11} + Z_S|^2} \frac{R_S}{R_{out}} \quad (3.25)$$

$$V_{in} = V_{in}(Z_S, Z_L) = \frac{1 + |\rho_{in}|}{1 - |\rho_{in}|}, \text{yer } |\rho_{in}|^2 = \frac{\text{Giriş portunda yansıyan güç}}{\text{Giriş gücü}} =$$

$$\left| \frac{Z_{in} - Z_S^*}{Z_{in} + Z_S} \right|^2 \leq 1 \quad (3.26)$$

$$V_{out} = V_{out}(Z_S, Z_L) = \frac{1 + |\rho_{out}|}{1 - |\rho_{out}|}, \text{yer } |\rho_{out}|^2 = \frac{\text{Yükten yansıyan güç}}{\text{Yük gücü}} =$$

$$\left| \frac{Z_{out} - Z_L^*}{Z_{out} + Z_L} \right|^2 \leq 1 \quad (3.27)$$

Fiziksel gerçekleştirilebilirlik koşullarının yerine getirilmesi gereken durumlar:

$$Re\{Z_{in}\} = R_{in} = Re\left\{z_{11} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{22} + Z_L}\right\} > 0 \quad (3.28)$$

$$Re\{Z_{out}\} = R_{out} = Re\left\{z_{22} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{11} + Z_S}\right\} > 0 \quad (3.29)$$

$$F \geq F_{min}, V_{in} \geq 1, V_{out} \geq 1, G_{Tmin} \leq G_T \leq G_{Tmak} \quad (3.30)$$

Ek olarak devrenin üretilebilmesi için R_S ve R_L 'in belirtilen koşulu (3.31) sağlanması gerekmektedir.

$$R_S \geq 10\Omega, R_L \geq 10\Omega \quad (3.31)$$

Bir sonraki bölümde, bir mikrodalga transistörün performans karakterizasyonunun çok amaçlı optimizasyonu için amaç fonksiyonları ve karar değişkenleri verilecektir.

4. AMAÇ FONKSİYON ÇİFTLERİ VE PERFORMANS DÖRTLÜSÜ

(3.21) - (3.31) ile verilen ölçüm fonksiyonları arasında, F ve V_{out} referans noktaları olarak seçilmiştir, bu nedenle performans dörtlüsü ($F_{req}=X, V_{inopt}, G_{Tmaks}, V_{outreq}=Y$) olarak tanımlanmıştır. Buna göre her frekans için amaç fonksiyon çiftleri (4.32) -(4.33), (4.34) - (4.35), (4.36) -(4.37), (4.38) -(4.39) ve maliyet fonksiyonu (4.40) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$AF_{11} = e^{-GT_i/A} + B |F_i - F_{reqi}| \quad (4.32)$$

$$AF_{12} = C |V_{ini}| + D |V_{outi} - V_{outreqi}| \quad (4.33)$$

$$AF_{21} = e^{-GT_i/A} + B |V_{outi} - V_{outreqi}| \quad (4.34)$$

$$AF_{22} = C |F_i - F_{reqi}| + D |V_{ini}| \quad (4.35)$$

$$AF_{31} = e^{-GT_i/A} + B |V_{ini}| + C |V_{outi} - V_{outreqi}| \quad (4.36)$$

$$AF_{32} = D |F_i - F_{reqi}| \quad (4.37)$$

$$AF_{41} = e^{-GT_i/A} \quad (4.38)$$

$$AF_{42} = B |F_i - F_{reqi}| + C |V_{ini}| + D |V_{outi} - V_{outreqi}| \quad (4.39)$$

$$Maliyet = e^{-GT_i/A} + B F_i - F_{reqi} + C |V_{ini}| + D |V_{outi} - V_{outreqi}| \quad (4.40)$$

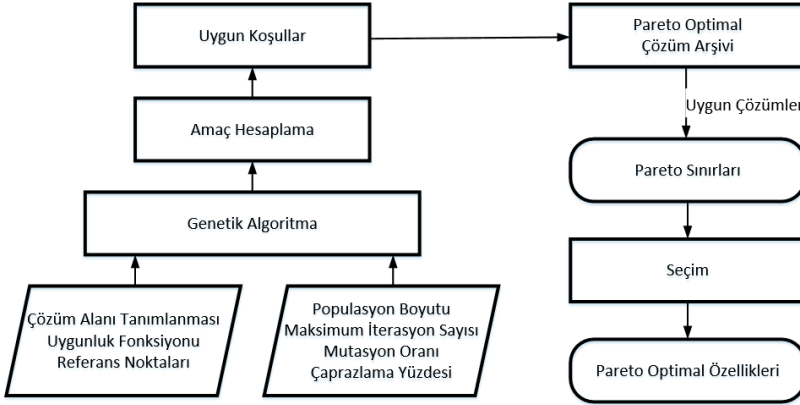
F_{min} , F_{reqi} ve $1/V_{outreqi}$, $i = 1, 5$, ($F_{req}=X$, V_{inopt} , G_T maks, $V_{outreq}=Y$) performans dörtlüsü olarak alan referans noktaları olarak temin edilir. A, B, C ve D ağırlık katsayıları eşit olarak alınır. Bu optimizasyon sürecinde karar değişkenleri, Z_S kaynağı ve Z_L yükleri gerçek (R_S, R_L) ve hayali (X_S, X_L) empedansların parçalarıdır.

Bu çalışmada, aktif cihazın potansiyel performansına bağlı olarak gerçekleştirilebilir tasarım hedef alanı dikkate alınmıştır.

4.1 PARETO OPTİMALİTESİ

Çözüm kümesi içerisinde herhangi bir başka baskın çözüm yoksa çözüm \vec{a} 'nın optimal olduğu söylenebilir. Diğer bir deyişle, en az bir başka çözüm olumsuz etkilenmeden çözüm hedeflerinden biri olumlu olarak geliştirilemez. Hedeflenen vektör $F(\vec{a})$ pareto dominant vektör veya baskın-olmayan vektör olarak adlandırılır. Pareto optimal çözümlerinin tümü Pareto optimal seti olarak adlandırılır. Belirlenen hedef vektörleri pareto sınırındadır.

Genel olarak Pareto sınırının analitik bir ifadesini çıkarmak imkânsızdır. Şekil 4.1'de mikrodalga transistörünün Pareto optimal özelliklerini elde etmek için izlenecek akış diyagramını göstermektedir.



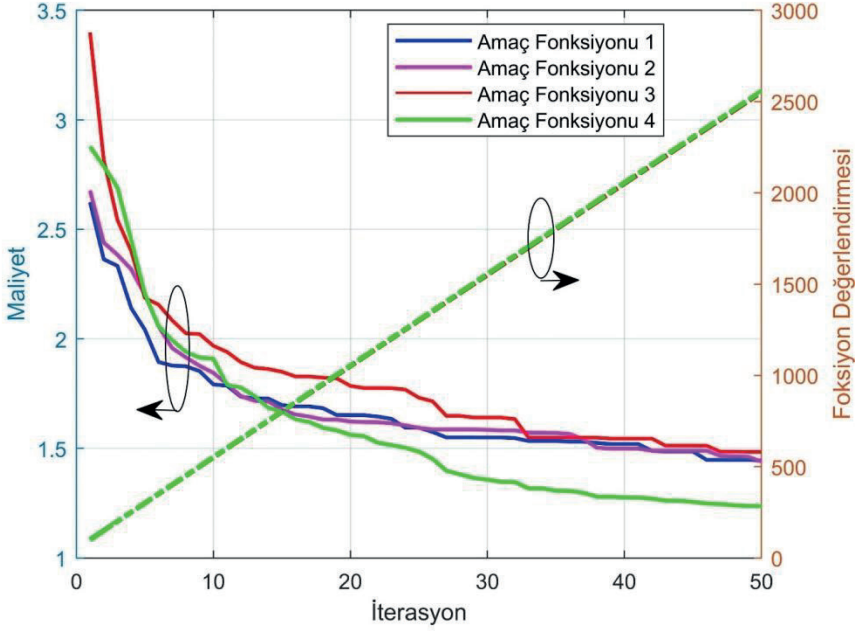
Şekil 4. 1 Pareto optimal karakteristiği

5. AMAÇ FONKSİYON ÇİFTİ SEÇİMİ

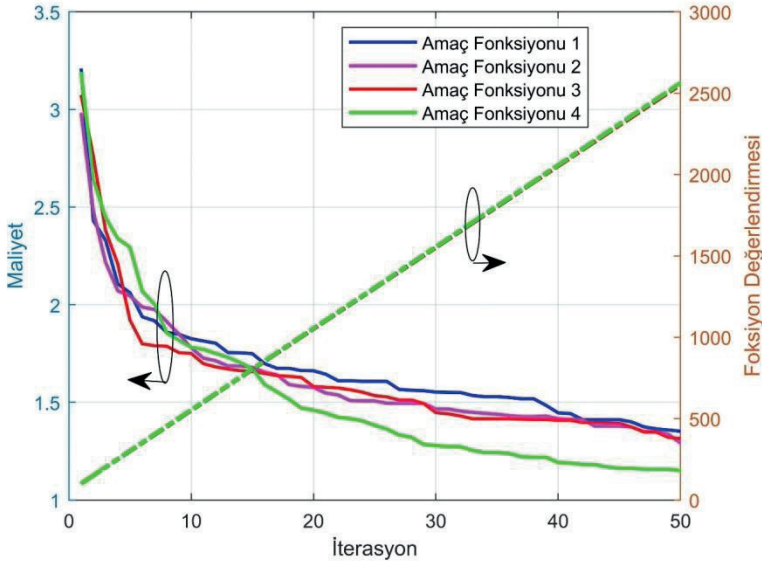
Çalışma kısmında en optimal amaç fonksiyon (AF) çiftini (4.32)- (4.39) belirlemek amacıyla Tablo 5.1’de belirtilen farklı durumlar için 10 GHz-16 GHz’de varsayılan parametreler maksimum iterasyon = 50, popülasyon = 50, çaprazlama yüzdesi = 0,5 ve mutasyon yüzdesi = 0,5 için en iyi maliyet ve fonksiyon değerlendirme numarasının performans değerlendirmeleri yapıyoruz. Sonuçlar maliyet ve fonksiyon değerlendirme numarasının iterasyona göre değişimi düzlemi üzerinde yer alan Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 gösterilmiştir. Sonuç olarak şekillerden de görüleceği üzere en başarılı olan amaç fonksiyon çifti $AF_{41} + AF_{42}$ (4.38) -(4.39) seçilmiştir.

Tablo 5.1 Performans dörtlülerinin tanımı

Durum	F_{req}	V_{outreq}	V_{in}	G_T , dB
Durum-1	F_{min}	1,2	optimum	maksimum
Durum-2	1,2	1,2		
Durum-3	1,3	1,0		
Durum-4	1,3	1,1		
Durum-5	1,3	1,2		



Şekil 5.1 NE3511S02 transistörünün ($F_{req} = F_{min}$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$) dörtlülerinin farklı amaç fonksiyon çiftleri için maliyet ve fonksiyon değerlendirme numarasının iterasyona göre değişimi ($V_{DS} = 2V$ & $I_{DS} = 10\text{ mA}$ & 10-16 GHz ortalama)



Şekil 5.2 NE3511S02 transistörünün ($F_{req} = 1,2$, V_{inopt} , G_{Tmak} , $V_{outreq} = 1,2$) dörtlülerinin farklı amaç fonksiyon çiftleri için maliyet ve fonksiyon değerlendirme numarasının iterasyona göre değişimi ($V_{DS} = 2V$ & $I_{DS} = 10$ mA & 10-16 GHz ortalama)

KAYNAKÇA

- F. Güneş ve S. Demirel, “Performance Characterization of a Microwave Transistor Subject to the Noise and Matching Requirements,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, (DOI: 10.1002/cta.2120), 2015.
- Mahouti, P., Kızılay, A., Tari, O., Belen, A., Belen, M. A., & ÇALIŞKAN, A., (2021). Design Optimization of Ultra-Wideband Vivaldi Antenna using Artificial Intelligence. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol.36, no.12, 1594-1601.
- PİLTAN, O. C., KIZILAY, A., Belen, M. A., & MAHOUTİ, P., (2023). Data driven surrogate modeling of horn antennas for optimal determination of radiation pattern and size using deep learning. *Microwave and Optical Technology Letters*.
- MAHOUTİ, P., KIZILAY, A., Tari, O., Belen, A., & Belen, M. A., (2021). Design Optimization of Ultra-Wide Band Vivaldi Antenna Using Artificial Intelligence. *International Symposium of the Applied-Computational-Electromagnetics-Society (ACES), ELECTR NETWORK*
- Yurt, R., TORPİ, H., KIZILAY, A., Koziel, S., Pietrenko-Dabrowska, A., & MAHOUTİ, P., (2023). Buried object characterization by data-driven surrogates and regression-enabled hyperbolic signature extraction. *Scientific Reports*, vol.13, no.1.
- R. E. Collin, *Foundation for Microwave Engineering*, 978-0-7803-6031-0, Mcgraw-Hill, 1992.
- F. Güneş, M. Güneş ve M. Fidan, “Performance Characterization of a Microwave Transistor,” *IEE Proceedings- Circuits Devices and Systems*, 141(5):337–344, 1994.
- S. Darlington, “Synthesis of Reactance 4-poles,” *Journal of Math and Physics*, 18:257-353, 1939.
- B. S. Yarman, *Design of Ultra-Wideband Power Transfer Networks*, Willey, 2010.



BÖLÜM 3

RÜZGAR GÜCÜ TAHMİNİNDE TRANSFORMER MODELLERİNİN İNCELENMESİ

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 Dr.Öğr.Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas, Türkiye. [dide-maltun@cumhuriyet.edu.tr](mailto:didemaltun@cumhuriyet.edu.tr), ORCID: 0000-0002-1964-3538

1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik küresel olarak ilginin artması, bu kaynakların etkili bir şekilde yönetmek için tahmin yöntemlerinde önemli gelişmelere neden olmuştur. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının arasında önemli bir rol oynayan rüzgar enerjisi, tahmin edilemeyen davranışsal yapısından dolayı enerji tahminlerini zorlaştırmaktadır. Rüzgar hızı ve yönünün kesin ve güvenilir bir şekilde öngörülmesi sadece teknik bir zorluk değil, aynı zamanda bu kaynaktan elde edilebilecek verimin de en üst düzeye çıkarmak, neticesinde ise elektrik fiyatlarını düşürmek için kritik bir ekonomik rol oynamaktadır. Ancak bu noktada mevcut rüzgar enerjisi tahmin yöntemleri genellikle karmaşık yapılarından dolayı zorlanmakta veya yorumlanmasında eksikliğe neden olmaktadır. Bu çalışmada, insan beyninin bilgi işleme yeteneklerinden esinlenerek önerilen yeni iki aşamalı Hibrid Transformer tabanlı bir yöntem açıklanmaktadır. Hibrit Transformer modeli kullanıldığında rüzgar enerji tahmini konusunda birçok avantaj sunacağı öngörülmektedir. Bunları kısaca sıralamak gerekirse;

- *Arttırılmış Doğruluk:* Veriler arsandaki uyum ile rüzgar hızı, yön ve dolayısıyla enerji üretimi öngörüsünü önemli ölçüde kesinleştirerek doğruluğunu artırır.
- *Optimize Edilmiş Enerji Üretimi:* Önerilen modelin modüler bir tasarıma sahip olması ve giriş parametrelerinin optimum kullanılmasıyla enerji üretimini artırırken aynı zamanda maliyeti yüksek diğer enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmaktadır.
- *Minimum Maliyet:* Kesin tahminler, talebi karşılamak için üretimi özel olarak uyarlayarak enerji üretim sürecinde kısıtlamayı ve enerji maliyetinin azaltmayı mümkün kılar.

Hibrid Transformer modelinde iki aşamalı bir çözüm kullanılır. Öncelikle; rüzgar parametrelerini artırılmış doğrulukla tahmin ederken, ikincisi bu tahminleri kullanarak enerji üretim tahminin gerçekleştirilmesidir. Böylelikle, önerilen yöntemlerin geliştirilmesi ve analizi ile bu araştırma, doğru ve güvenilir rüzgar enerjisi tahminine anlamlı bir katkıda bulunmayı amaçlamakta, uygun maliyetli, sürdürülebilir ve etkili elektrik enerjisinin planlanmasına öncülük etmeyi hedeflemektedir.

2. Rüzgar Gücü ve Bölgesel Tarihçesi

Yenilenebilir enerjiye doğru artan ilgi, bu kaynakların dinamik çıkışını öngörmek ve yönetmek için analiz yeteneklerimizde temel bir dönüşümü zorunlu kılmaktadır (IEA, 2023). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi, önemli ve hızla kurulum gücü aratarak bu gelişime önemli katkı sağlarken, enerjinin doğasındaki düzensizlik nedeniyle tahmin edilebilirliğini zorlaştırmaktadır (Bossavy et al., 2014). Rüzgar hızı ve yönünün kesin ve güvenilir bir şekilde öngörülmesi, sadece teknik bir engel değil, aynı zamanda bu kaynağın değerini en üst düzeye çıkarmak ve nihayetinde elektrik fiyatlarını düşürmek için ekonomik bir zorunluluktur (Gonzalez-Aparicio et al., 2017). Mevcut rüzgar enerjisi tahmini yöntemleri önemli kısıtlamalarla karşılaşmaktadır. Geleneksel istatistiksel modeller genellikle rüzgar parametreleri ile enerji üretimi arasındaki karmaşık bağımlılıklarla başa çıkarken, yanlış öngörülere ve etkisiz şebeke entegrasyonuna yol açmaktadır (Hong et al., 2020). Tekrarlayan sinir ağı gibi veri odaklı yaklaşımlar, performanslarını artırmakla birlikte hesaplama maliyetine sahip olabilir, yorumlanmasındaki eksiklikler ile geniş miktarda veri gerektirirler (Fan et al., 2016).

Bu sınırlayıcı problemlerini aşmak için, insan beyninin dikkate değer bilgi işleme yeteneklerinden esinlenerek yeni bir Hibrid Transformer tabanlı tahmin modeli sunulmuştur (Vaswani et al., 2017). Bu önemli mimariler, rüzgar enerjisi kullanımını optimize etme ve elektrik maliyetlerini azaltma konusunda birçok avantaj sunmaktadır: Transformer modelleri sıralı veriler içinde uzun zamanlı bağımlılıkları ve önemli parametreleri yakalamalarına olanak tanır, bu da rüzgar hızı, yön ve sonuç olarak enerji üretimi için önemli ölçüde artmış tahmin doğruluğuna yol açar (Liu et al., 2018). Modüler tasarımları ve çeşitli girdi özelliklerini işleme yetenekleri sayesinde Transformer modelleri enerji üretimini optimize edebilir ve maliyeti yüksek fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilir (Chen et al., 2023). Doğru tahminler ile üretimi talebe göre hassas bir şekilde uyarlamayı mümkün hale getirir. Böylelikle kullanılmayacak fazla enerji üretiminin önüne geçerek enerji israfının azaltılması sağlar.

Küresel enerji piyasası, iklim değişikliği ile mücadele etme aciliyeti ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını güvence altına alma gerekliliği tarafından yönlendirilen kritik bir dönüşüme ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji, özellikle rüzgar enerjisi, fosil yakıtlara nazaran çevreci ve hızla genişleyen bir alternatif enerji kaynağı seçeneği sunarak hayati bir rol oynamıştır. Farklı araştırmalar, rüzgar kaynaklarının içsel değişkenliğini yakalama ve tahmin hassasiyetini

artırma yöntemlerine odaklanmıştır. Rüzgar enerjisinin kullanımı binlerce yıla dayanmaktadır; eski medeniyetler rüzgar değirmenlerini tahıl öğütme ve su pompalama gibi çeşitli amaçlar için kullanmışlardır. Ancak, rüzgar türbinlerinin elektrik üretimi için geliştirilmesi 19. ve 20. yüzyılın sonlarına kadar gerçekleşmemiştir. Bu rüzgar türbinleri genellikle küçük ölçekli olup, genellikle kırsal alanlarda off-grid enerji sağlamak için kullanılmıştır. Rüzgar enerjisinin tüm Dünya'daki kullanımı ve gelişimini kısaca özetleyelim.

Avrupa, kurulu kapasite ve teknolojik inovasyon konularında Almanya, İspanya ve Danimarka gibi ülkelerin öncülüğünde rüzgar enerjisi gelişiminde öncü rol oynamıştır. Kuzey Denizi'ndeki açık deniz rüzgar çiftlikleri, bölgenin güçlü ve sürekli rüzgarlarını temiz elektrik üretmek için kullanarak Avrupa enerji manzarasının önemli bir özelliği haline gelmiştir. Ayrıca, enerji tarifeleri ve yenilenebilir enerji hedefleri gibi destekleyici politikaları, kıta genelinde rüzgar enerjisi altyapısına yatırım yapmayı teşvik etmiştir.

Kuzey Amerika'da, ABD ve Kanada, uygun coğrafi koşullar ve destekleyici düzenleyici ortamlar tarafından yönlendirilen rüzgar enerjisi kapasitesinde önemli bir büyüme yaşamışlardır. Teksas ve California gibi bölgelerdeki rüzgar çiftlikleri hem karada hem de denizde kurulumlarla elektrik şebekesine önemli katkı sağlamıştır. Ancak, izin gecikmeleri ve şebeke entegrasyonu sorunları gibi zorluklar, daha fazla genişleme önünde engeller oluşturmuştur.

Asya, özellikle enerji talepleri hızla artan Çin ve Hindistan gibi ülkelerde, rüzgar enerjisi gelişimi için önemli bir pazar olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle Çin, ciddi yenilenebilir enerji hedefleri ve hükümet teşvikleri tarafından yönlendirilen dünyanın en büyük rüzgar enerjisi pazarı haline gelmiştir. Japonya ve Güney Kore gibi ülkelerdeki deniz rüzgarı projeleri de bölgenin geniş sahil şeritlerini ve güçlü rüzgarları değerlendirmektedir.

Avustralya, uygun rüzgar kaynakları ve Yenilenebilir Enerji Hedefi (REEF) gibi politika mekanizmalarının desteğiyle rüzgar enerjisi kapasitesinde önemli bir büyüme yaşamıştır. Yeni Zelanda ve Tanzanya gibi bölgelerde de deniz rüzgarı projeleri incelenmektedir, ancak çevresel etkiler ve paydaş katılımıyla ilgili zorlukların ele alınması gerekmektedir.

Afrika, bol miktarda rüzgar kaynağına sahip bölgeler olan Afrika Boynuzu ve Sahra Çölü gibi bölgelerde rüzgar enerjisi gelişimi için büyük bir potansiyele sahiptir. Mısır, Fas ve Güney Afrika gibi ülkeler, enerji karışımını çeşitlendirmek ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak amacıyla rüzgar enerjisi dağıtımında ilerleme kaydetmişlerdir.

Ancak, sınırlı altyapı ve finansman kısıtlamaları geniş çapta benimsenmenin önündeki önemli engeller olarak kalmaktadır.

Dünyada rüzgar enerjisinin kullanımına bakıldığında enerji tahmininin birim enerji maliyetine olan etkisi daha da anlaşılmaktadır. Kıtalarda rüzgar enerji tahminine yönelik kullanılan yöntemler aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo-I: Bölgesel tahmin sistemleri ve kullanılan yöntemler.

Bölge	Tahmin Sistemi	Kullanılan Yöntem
Avrupa	Weather Research and Forecasting (WRF) model	Numerical Weather Prediction
Kuzey Amerika	Long Short-Term Memory (LSTM) neural network	Derin Öğrenme
Asya	Support Vector Regression (SVR) model	Hybrid Statistical / Machine Learning
Okyanusya	Ensemble Kalman Filter (EnKF)	Data Assimilation
Afrika	Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) model	Time Series Analysis

3. Rüzgar Gücü Tahmini ve Optimizasyon Modelleri

Rüzgar enerjisi tahminine yönelik ilk yaklaşımlar genellikle istatistiksel modellere ve sayısal hava tahmin tekniklerine dayanmaktaydı. Bu yöntemler, değerli içgörüler sağlamalarına rağmen, rüzgar parametreleri ile elektrik üretimi arasındaki karmaşık ilişkileri yakalama konusunda sık sık sınırlamalarla karşılaşmıştır. Sonuç olarak, bu tahminlerin doğruluğu sınırlıydı ve bu da alt-optimal şebeke entegrasyonuna ve operasyonel verimsizliklere yol açmıştır (Pinson & Kariniotakis, 2012).

Rüzgar enerjisi tahminine yönelik son yıllarda, yapay zeka (AI) ve makine öğrenimi (ML) alanındaki ilerlemeler, rüzgar enerjisi tahmin alanını devrim niteliğinde değiştirmiştir. Dikkate değer bir ilerleme, rüzgar enerjisi üretiminde doğal olan karmaşık olmayan ilişkileri modellemek için sinir ağları gibi derin öğrenme mimarilerinin kullanılmasıyla gerçekleşmiştir. Bu modeller, rüzgar değişkenliğinin

şebeke istikrarı üzerindeki etkisini azaltmada tahmin doğruluğunu artırmada umut verici sonuçlar göstermiştir (Zhang vd., 2020).

Geleneksel istatistiksel modeller, otoregresif bütünselik hareketli ortalama (ARIMA) ve mevsimsel otoregresif bütünselik hareketli ortalama (SARIMA) gibi zaman serisi analizi tekniklerine dayanır. Bu modeller, rüzgar verilerinde gözlemlenen zamansal bağımlılıkları ve desenleri yakalamayı amaçlar. Böylece gelecekteki rüzgar davranışını tahmin etmeye imkan tanır. Tarihsel rüzgar hızı ve yönü verilerini analiz ederek, istatistiksel modeller, trendleri, mevsimsellikleri ve diğer alta yatan davranışları doğru tahminler yapmak için kullanır (Pinson & Kariniotakis, 2012).

Geleneksel istatistiksel modellerin ana avantajlarından biri, basitlik ve yorumlanabilirliktir. ARIMA ve SARIMA modelleri, anlaşılır metodolojiler sunar, bu da araştırmacıların ve uygulayıcıların temel varsayımları ve parametreleri anlamasını kolaylaştırır. Ayrıca, bu modeller, rüzgar kaynaklarında gözlemlenen uzun vadeli trendler ve döngüsel desenler hakkında değerli içgörüler sağlayabilir, yenilenebilir enerji sistemlerinin planlanması ve yönetimine yardımcı olabilir (Wüstenhagen vd., 2007).

Faydalı olmalarına rağmen, geleneksel istatistiksel modellerin tahmin doğruluğunu ve güvenilirliğini etkileyen birkaç kısıtlama ile karşılaşmaktadır. Temel zorluklardan biri, rüzgar enerjisi üretiminde doğal olan karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri yakalayamamalarıdır. Rüzgar kaynakları, arazi, atmosfer koşulları ve günlük desenler gibi faktörlerden kaynaklanan önemli değişkenlikler gösterir. Bu durum geleneksel istatistiksel modellerin bunları yeterince hesaba katmakta zorlanabileceği anlamına gelir (Bossavy vd., 2014).

Geleneksel istatistiksel modellerin kısıtlamalarını ele almak için araştırmacılar, istatistiksel yöntemleri makine öğrenimi teknikleriyle birleştiren hibrit yaklaşımları ortaya koymuşlardır. ARIMA'nın destek vektör regresyonu (SVR) ile bütüleştirildiği gibi hibrit modeller, her iki yaklaşımın güçlerini kullanarak tahmin doğruluğunu artırmayı amaçlarlar (Hong vd., 2020). Ayrıca, meteorolojik veriler ve coğrafi bilgi sistemleri (GIS) gibi yardımcı veri kaynaklarının entegrasyonu, geleneksel istatistiksel modellerin karmaşık arazi ortamlarında performansını artırmak için umut vermektedir.

Veri odaklı yaklaşımlar, rüzgar enerjisi tahmininde güçlü araçlar olarak ortaya çıkmıştır. Geniş veri kümelerinden elde edilen veriler tahmin doğruluğunu artırmak için makine öğrenimi tekniklerinden yararlanmaktadır. Rüzgar enerjisi tahmininde veri odaklı yaklaşımlar,

özellikle de yinelemeli sinir ağları (RNN'ler) ve türevleri, tarihsel rüzgar verilerini analiz etmek ve gelecekteki rüzgar davranışı hakkında tahminler yapmak için makine öğrenimi algoritmalarına dayanır. RNN'ler, sıralı veri analizi için uygun olup, rüzgar hızı ve yönündeki zamansal bağımlılıkları ve desenleri yakalama yeteneğine sahiptir. Tarihsel veriler üzerinde eğitim yaparak, veri odaklı modeller, meteorolojik değişkenler ile rüzgar enerjisi üretimi arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenerek doğru tahminler yapabilirler (Fan vd., 2016). Veri odaklı yaklaşımların temel güçlerinden biri, rüzgar verilerindeki doğrusal olmayan ilişkileri ve karmaşık davranışları yakalama yetenekleridir. Geleneksel istatistiksel modellerin aksine, dinamik doğası olan rüzgar kaynaklarını modelleme konusunda zorlanabilecekleri yerde, veri odaklı modeller, zamansal bağımlılıkları ve mekânsal korelasyonları yakalamada başarılıdır. Sonuç olarak, veri odaklı yaklaşımlar, özellikle değişken rüzgar koşullarının olduğu bölgelerde üstün tahmin doğruluğu göstermiştir (Zhang vd., 2020).

Faydalı olmalarına rağmen, veri odaklı yaklaşımlar birkaç kısıtlama ve zorlukla karşı karşıyadır. Temel zorluklardan biri, karmaşık sinir ağı mimarilerini etkili bir şekilde eğitmek için büyük miktarda eğitim verisine ihtiyaç duymalarıdır. Ayrıca, veri odaklı modeller, sınırlı veri kümeleri veya gürültülü veriler üzerinde eğitildiğinde özellikle aşırı uyum sorunuyla karşılaşabilirler. Model yorumlanması başka bir zorluktur, çünkü derin öğrenme modelleri genellikle siyah kutular olarak görülür, bu da tahminleri yönlendiren temel mekanizmaları anlamayı zorlaştırır (Hong vd., 2020).

Veri odaklı yaklaşımların kısıtlamalarını ele almak için, araştırmacılar model yorumlanabilmesi ve sağlamlığını artırmak için teknikler geliştirmektedirler. Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI) yöntemleri, makine öğrenimi modellerinin karar verme sürecini açıklığa kavuşturmayı amaçlayarak tahminlerin nasıl üretildiğine dair veriler sunar. Ayrıca, birden fazla modelin tahminlerini birleştiren birleşik yöntemler, bireysel modellerin çeşitliliğinden yararlanarak tahmin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırabilir (Huang vd., 2019).

Rüzgar enerjisi tahmininde hibrit yaklaşımlar, geleneksel istatistiksel modelleri gelişmiş makine öğrenimi teknikleriyle birleştiren, her iki metodolojinin güçlerini kullanmayı amaçlayan bir birleşim olarak temsil edilir. Hibrit yaklaşımlar, geleneksel istatistiksel modellerin şeffaflığı ve yorumlanmasını makine öğrenimi algoritmalarının esnekliği ve tahmin gücü ile birleştirir. Bir yaygın hibrit yaklaşım, otoregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA) modellerini destek vektör regresyonu (SVR) veya yapay sinir ağları (YSA) gibi makine öğrenimi

teknikleriyle entegre etmeyi içerir. ARIMA'nın zaman serisi analiz yeteneklerini makine öğrenimi algoritmalarının doğrusal olmayan modelleme yetenekleriyle birleştirerek, hibrit modellerin tahmin doğruluğunu ve sağlamlığını artırmayı amaçlar (Hong vd., 2020).

Hibrit yaklaşımlar, geleneksel istatistiksel modeller veya yalnızca makine öğrenimi teknikleri yerine birçok avantaj sunar. Birden çok metodolojiyi bütünleştirerek, hibrit modeller rüzgar verilerinde hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilir ve daha doğru ve güvenilir tahminlere yol açabilir. Ayrıca, hibrit yaklaşımlar, farklı veri tiplerine ve tahmin senaryolarına uyum sağlayabilirler, bu da onları rüzgar enerjisi tahmin uygulamaları için çok yönlü araçlar haline getirir (Liu vd., 2018).

Tüm bunlara rağmen, hibrit yaklaşımlarda model seçimi, parametre ayarlama ve yorumlanabilmesi gibi zorluklarla karşılaşır. Hibrit modellerin karmaşıklığı, tahmin sonuçlarını etkileyen temel mekanizmaları anlamının zor olabileceği için şeffaflıklarını ve yorumlanmasını sınırlayabilir. Ayrıca, hibrit modellerin performansı, eğitim verisinin kullanılabilirliği ve kalitesi, makine öğrenimi algoritmaları ve optimizasyon tekniklerinin seçimi gibi faktörlere bağlı olabilir (Hong vd., 2020).

Hibrit yaklaşımların sınırlamalarını ele almak için araştırmacılar yeni metodolojiler ve entegrasyon stratejileri üzerinde çalışmaktadır. Birden çok modelin tahminlerini birleştiren ensemble teknikleri, tahmin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir. Bireysel yaklaşımların zayıflıklarını hafifletebilmek ve genel tahmin performansını artırabilmek için ensemble yöntemleri, bireysel modellerin çeşitliliğinden yararlanır (Huang vd., 2019). Ensemble teknikleri, rüzgar enerjisi tahmininde güçlü araçlar olarak ortaya çıkmıştır. Birden fazla tahmin modeli aracılığıyla artırılmış doğruluk ve güvenilirlik sunmaktadır.

Rüzgar enerjisi tahmininde ensemble teknikleri, bireysel modeller tarafından üretilen tahminlerin birleştirilerek bir konsensüs tahmini oluşturulmasını içerir. Temel prensip, çeşitli tahminlerin birleştirilmesinin bireysel modellerin zayıflıklarını hafifletebileceği ve genel doğruluğu artırabileceği fikrine dayanır. Ensemble yöntemleri, basit ortalama, ağırlıklı ortalama ve daha sofistike teknikler olan torba (bagging), arttırma (boosting) ve yığın (stacking) gibi çeşitli yaklaşımları içerir (Gneiting & Raftery, 2007).

Ensemble tekniklerin temel güçlerinden biri, tahmin modellerinin çeşitliliğinden yararlanarak sağlam tahminler üretme yetenekleridir.

Farklı algoritmalar tarafından üretilen tahminlerin birleştirilmesiyle, ensemble yöntemleri rüzgar verilerinde daha geniş bir davranışsal ve belirsizlik yelpazesini yakalayarak daha doğru ve güvenilir tahminlere yol açabilir. Ayrıca, ensemble teknikleri model seçiminde esneklik sunar, araştırmacıların çeşitli tahmin yaklaşımlarını tek bir çerçeveye entegre etmelerine olanak tanır (Tong et al., 2017).

Avantajlarına rağmen, ensemble tekniklerin de bazı sınırlamaları vardır. İlk kısıtlama, bireysel tahminlerin ağırlıklarının dikkatlice kalibre edilmesi gerekliliğidir. Ayrıca, çok sayıda modelin birleştirilmesi veya sofistike birleştirme stratejilerinin uygulanması özellikle hesaplama maliyeti ve karmaşıklık getirebilir. Üye modellerin çeşitliliğinin sağlanması ve bireysel tahminlerdeki potansiyel önyargıları veya hataları ele almaları da ensemble tasarımında önemli eksikliklerdir (Wilks, 2001).

Rüzgar enerjisi tahmini için ensemble tekniklerin kullanılacağı araştırmalarda, mevcut sınırlamaları ele almayı ve performansı artırmak için yenilikçi yaklaşımların keşfedilmesine odaklanılmıştır. İstatistiksel yöntemleri makine öğrenimi teknikleriyle birleştiren hibrit ensemble modeller, daha büyük tahmin doğruluğu ve sağlamlığına ulaşmak için umut vaat etmektedir. Ayrıca, ensemble yöntemlerin gelişmiş veri asimilasyon teknikleriyle entegrasyonu, gözlem verilerinin asimilasyonunu ve tahmin kalitesini artırmada önemli potansiyele sahiptir (Wang et al., 2018). Bu yöntemler, rüzgar enerjisini şebekeye etkili bir şekilde entegre etmek ve aralıklı doğasıyla ilişkili zorlukları hafifletmek için hayati öneme sahiptir.

Ayrıca, makine öğrenimi algoritmalarının entegrasyonu, rüzgar enerjisi tahmin doğruluğunu artırmak için umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Chen, Wang ve Feng (2023), dikkat mekanizmasıyla hibrit bir CNN-LSTM modeli önermektedir. Zamansal bağımlılıkları ve rüzgar verilerindeki uzamsal davranışları yakalamak için hem konvolüsyonel sinir ağlarını (CNN) hem de uzun kısa vadeli bellek (LSTM) ağlarını kullanır. Bu yenilikçi yaklaşım, geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi tahmin performansı sunmayı amaçlamaktadır.

Huang, Tian ve Chen (2019), entegre benzerlik ölçümü ve En Küçük Kareler Destek Vektör Makinesi (LSSVM) üzerine dayalı yeni bir ensemble model önermektedir. Çeşitli modellerden gelen tahminleri birleştirerek, bu ensemble yaklaşım, değişen çevresel koşullar altında daha güvenilir rüzgar enerjisi üretimi tahminleri sağlayarak tahmin doğruluğunu ve sağlamlığı artırır. Genel olarak, rüzgar enerjisi tahminlerine ilişkin devam eden araştırmalar, yenilenebilir enerji entegrasyonunun ve iklim değişikliği ile enerji geçişinin zorluklarını ele

almak için yenilikçi çözümlere acil ihtiyaç duyan çok çeşitli metodolojiler ve uygulamaları içermektedir.

Tahminde dönüşüm tabanlı modellere dair çeşitli çalışmalara rağmen, çoğunluk, güç üretimini doğrudan rüzgar verilerinden tahmin eden tek aşamalı yaklaşımlara odaklanmaktadır. Bunun aksine, bu çalışmada, iki aşamalı bir hibrit Dönüşüm modeli sunulmaktadır. Bu çerçevede, birinci aşama rüzgar parametrelerini tahmin eder ve ikinci aşama bu tahminleri güç üretimini tahmin etmek için kullanılır. Bu yenilikçi yaklaşım, rüzgar enerjisi üretiminin temel dinamiklerini açıkça modelleyerek doğruluğu ve yorumlanabilmeyi artırmayı amaçlamaktadır.

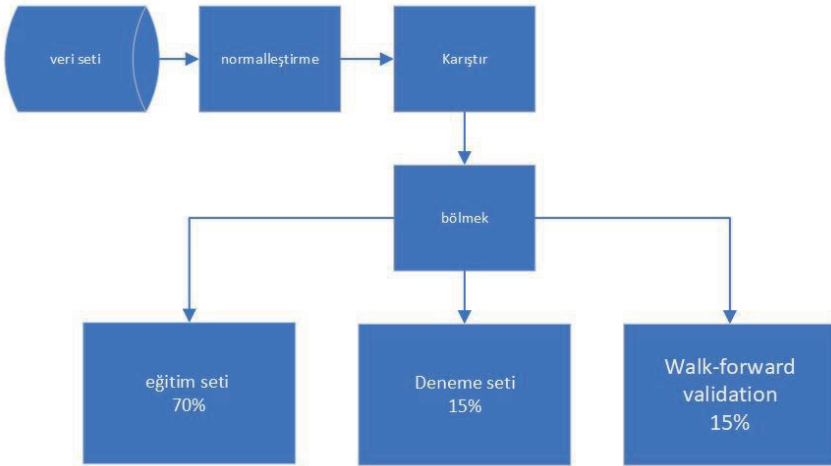
Sonuç olarak, rüzgar enerjisi tahmin tekniklerinin geleneksel istatistiksel modellerden gelişmiş derin öğrenme mimarilerine evrimi, yenilenebilir enerji entegrasyonunun güvenilirliğini ve verimliliğini artırmaya yönelik sürekli bir çabanın bir yansımasıdır. Dönüşüm tabanlı modellerin ve ensemble tekniklerin benimsenmesi, gelecek araştırmalar için umut verici bir yönelimi temsil etmektedir ve önceki yaklaşımların sınırlarını ele almak ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine doğru yol açmak için önemli potansiyele sahiptir.

4. Transformer Model ve Uygulama Örneği

Bu çalışmada, iki aşamalı hibrid Transformer tabanlı çerçeve aracılığıyla rüzgar enerjisi tahminlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırmayı amaçlamaktadır. Rüzgar parametreleri ile enerji üretimi arasındaki ilişkileri açıkça modelleyerek neticesinde birçok hususta iyileştirmeler amaçlamaktadır. Bunlar; doğru tahminler kullanılarak daha verimli şebeke entegrasyonu ve optimize enerji üretimi ile elektrik maliyetlerini düşürmeyi amaçlayan bu araştırma, tüketiciler için elektrik fiyatlarını düşürmeyi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş bir şekilde benimsenmesini teşvik etmeyi hedeflemektedir. İyileştirilmiş tahmin doğruluğu, rüzgar enerjisine daha fazla güvenilmesini teşvik edebilir, bu da azalmış bir karbon ayak izi ve daha sürdürülebilir bir enerji geleceği anlamına gelir. Hibrid Transformer modeli ile, enerji tahmininde güvenilirliği artırmak ve bu alanda yapılacak çalışmalara katkıda bulunarak doğru ve verimli yenilenebilir enerji kullanımını artırmaktır. Bu hedeflere ulaşarak; güvenilir ve öngörülebilir rüzgâr enerjisi sağlanarak sürdürülebilir ve düşük maliyetli enerjiye geçişte bir rol oynamayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmadaki modelin uygulamasında ve eğitilmesi için kullanılan veri seti, kapsamlı bir analiz için özenle birleştirilen iki ayrı veri setinin bir kombinasyonudur. Birincil veri seti tarihsel hava durumu

bilgilerini içerirken, ikincil veri seti, 2018 yılında İstanbul'da kaydedilen türbin verilerine dayanmaktadır. Her iki veri seti de NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer'dan elde edilmiştir. Bu veri setinde 2018 yılında İstanbul ilindeki rüzgâr hızı, yönü, sıcaklık ve atmosfer basıncı dahil olmak üzere geniş bir meteorolojik parametre yelpazesini içerir. Bu veri setinin zamansal kapsamı birden fazla yılı içerir ve belirli bir bölgedeki iklim koşullarını anlamak için sağlam bir temel sağlar. Türbin özel veri seti sadece 2018 yılına odaklanmış olup, özellikle İstanbul'daki türbinlerin işletme özellikleri ve performans metriklerine odaklanmaktadır. Bu veri seti, rüzgâr koşullarını ilgili türbin güç üretimiyle ilişkilendirmek için önemli bir bileşen oluşturur ve hibrit modelin eğitim verisinin kritik bir parçasını oluşturur. Bu veri setlerini birleştirmek, tarihsel hava durumu davranışları ile türbin güç üretimi arasındaki ilişkinin holistik bir şekilde keşfedilmesine olanak tanır. Meteorolojik değişkenlerin türbin özel verileriyle entegrasyonu, modelin rüzgâr hızı, yön ve türbin güç üretimi tahminlerinin doğruluğuna ve güvenilirliğine katkıda bulunur. NASA POWER Data Access Viewer'dan alınan verilerin kullanımı, önerilen hibrit modelin güvenilirliğini göstermektedir. Her iki veri seti (Hava durumu veri seti ve türbin veri seti) 1 saatlik aralıklarla örneklenmiştir, ilgili hava durumu veri setleri ile birleştirilmiş ve nihayetinde tüm boş gözlemler temizlenmiştir. Şekil 1'de gösterilen veri ön işleme işlemi aşağıda verilmiştir. Buna göre;



Şekil 1. Veri işlemenin Blok Şeması

Doğal dil işleme görevleri için ilk kez tanıtılan Transformer model yapısı, rüzgar gücü tahminleri de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda büyük ilgi görmüştür. Transformer mimarisinin temelinde, modelin giriş dizisi içindeki ilgili bilgiye odaklanmasını sağlayan öz-

dikkat mekanizması bulunur (Vaswani et al., 2017). Geleneksel tekrarlayan sinir ağları (RNN'ler) veya evrişimli sinir ağları (CNN'ler) gibi değildir, Transformer modeller ardışık işleme bağımlı değildir. Bunun yerine, tüm giriş dizisini paralel olarak işlerler, uzun menzilli bağımlılıkların ve zamansal korelasyonların daha etkin bir şekilde yakalanmasına izin verirler. Öz-dikkat mekanizması, giriş dizisindeki her çift pozisyon arasında dikkat skorlarını hesaplayarak çalışır. Bu dikkat skorları, modelin girişin her bir elemanının diğerlerine göre önemini belirler ve modelin farklı dizi parçalarına değişen derecelerde önem atamasını sağlar. Birden fazla katman öz-dikkat mekanizmasıyla, Transformer modeli giriş verileri içindeki karmaşık desenleri ve ilişkileri öğrenir. Öz-dikkat mekanizmalarının çıktısını işleyen besleme ileri sinir ağı katmanları da Transformer mimarisinin bir parçasıdır. Bu katmanlar, modelin giriş elemanları arasındaki yüksek düzeyde etkileşimleri yakalaması için doğrusal olmayan dönüşümler yapar.

Transformer modelinin dikkate değer bir özelliği, dikkat mekanizmasının pozisyonel kodlamayı dahil etme yeteneğidir. Pozisyonel kodlama, modelin paralel işleme doğasına rağmen giriş elemanlarının ardışık sırasını dikkate almasını sağlar. Bu kodlama düzeni, modelin giriş dizisi içinde farklı pozisyonlardaki elemanlar arasında ayırım yapmasını sağlar, böylece zamansal bağımlılıkların öğrenilmesini kolaylaştırır. Ayrıca, Transformer mimarisi, eğitimi stabilize etmek ve ağ üzerinden gradyan akışını kolaylaştırmak için arta kalan bağlantılar ve katman normalleştirme kullanır. Bu teknikler, derin sinir ağlarında sıkça karşılaşılan kaybolan gradyan sorununu hafifletmeye yardımcı olur, bu da daha etkili bir eğitim ve yakınsama sağlar.

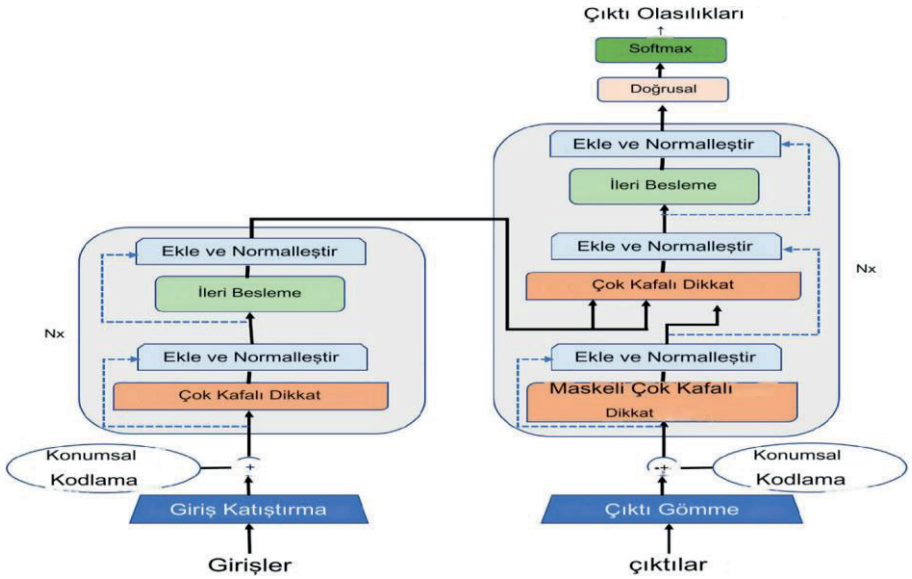
Genel olarak, Transformer model yapısı, bir dizi öz-dikkat ve besleme-ileri katmanlarını, pozisyonel kodlamayı, arta kalan bağlantıları ve katman normalleştirmeyi içerir. Bu mimari, uzun menzilli bağımlılıkları yakalama, karmaşık desenleri öğrenme ve doğru tahminlerde bulunma yeteneği ile, rüzgâr gücü tahminleri de dahil olmak üzere çeşitli ardışık veri analizi görevleri için uygundur.

Dönüştürücü modellerin temel yeniliği, modelin ilgili bilgiye odaklanmasını ve girdi verilerindeki karmaşık desenleri tanımlamasını sağlayan kendi dikkat mekanizmasında yatar (Vaswani et al., 2017). Geleneksel tekrarlayan sinir ağlarının (RNN'ler) aksine, Dönüştürücüler sıralı işleme üzerine dayanmaz, bu da uzak bağımlılıkları daha verimli bir şekilde yakalamalarına olanak tanır. Bu özellik, zaman serisi tahmininde, veri noktaları arasındaki uzak ilişkilerin anlaşılmasının doğru tahminler için kritik öneme sahip olduğu durumlarda özellikle avantajlıdır.

Rüzgâr enerjisi tahminleri bağlamında, Dönüştürücüye dayalı modeller, rüzgâr verilerindeki doğrusal olmayan ilişkileri yakalama konusunda umut verici sonuçlar göstermiştir. Kendi dikkat mekanizmalarını kullanarak, bu modeller tarihsel rüzgâr verilerinden etkili bir şekilde öğrenip gelecekteki rüzgâr davranışları hakkında doğru tahminler yapabilirler. Ayrıca, Dönüştürücü mimarilerinin modüler tasarımı, meteorolojik veriler ve coğrafi bilgiler gibi çeşitli girdi özelliklerinin entegrasyonunu kolaylaştırır, bu da tahmin doğruluğunu daha da artırır (Liu et al., 2018).

Sonuç olarak, Dönüştürücü modellerin zaman serisi veri analizine entegrasyonu, rüzgâr enerjisi tahminleri alanında önemli bir ilerleme temsil etmektedir. Kendi dikkat mekanizmalarını ve modüler mimarilerini kullanarak, Dönüştürücüye dayalı modeller, karmaşık ilişkileri yakalama ve dinamik çevresel bağlamlarda tahmin doğruluğunu artırma konusunda umut verici bir yaklaşım sunar.

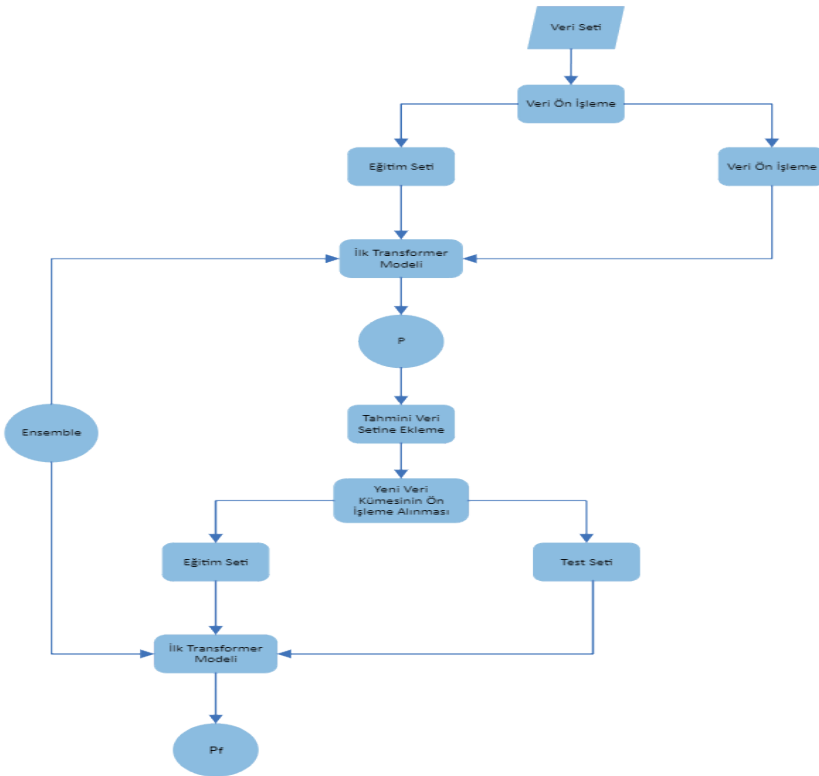
Şekil 2'de gösterilen Transformer model mimarisi aşağıda verilmiştir.



Şekil 2. Transformer modeli yapısı

Bu çalışmada rüzgâr gücü tahmin sürecinde farklı amaçlarla kullanılan iki bağlantılı Transformer modelini içerir. İlk Transformer modeli, geçmiş veri girişlerine dayanarak gelecekteki rüzgâr hızı ve rüzgâr gücünü tahmin etme görevlidir. Bu model, Transformer modellerinde bulunan kendi dikkat mekanizmasını kullanarak verideki

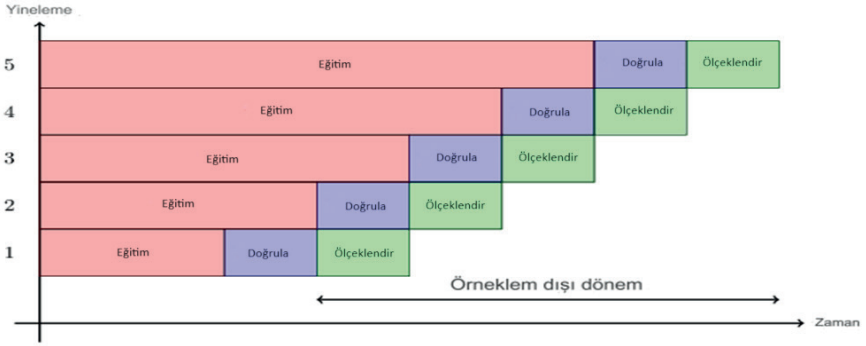
zamansal bağımlılıkları ve desenleri yakalar, böylece rüzgâr davranışlarının doğru tahminlerini sağlar. Rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü tahminleri ilk Transformer modelinden elde edildikten sonra, bunlar veri setine entegre edilir ve ikinci Transformer modeli için ek girdi özellikleri olarak kullanılır. Bu ikinci model, güncellenmiş veri setine dayanarak rüzgâr elektrik üretimini tahmin etmek üzere özel olarak tasarlanmıştır ve tahmin doğruluğunu artırmak için ilk modelin en son tahminlerini içerir. Modelin tahmin yeteneklerini daha da artırmak için, bir ensemble tekniği iki bağlantılı Transformer modelinin çıktılarını birleştirir. Bu ensemble yaklaşımı, her bir bireysel modelin tamamlayıcı güçlerini kullanarak, potansiyel zayıflıkları hafifletir ve genel tahmin performansını artırır. Önerilen modelin işleyişi, Şekil 3'te gösterildiği gibi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen Modelin Blok Şeması

Çalışmadaki geriye dönük test, geçmiş verileri kullanarak bir tahmin modelinin performansını ve doğruluğunu değerlendirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, geçmişte konuşlandırılmış olsaydı modelin nasıl performans göstereceğini simüle eder. Araştırmacılar, modelin tahminlerini gerçek sonuçlarla karşılaştırarak modelin gerçek

dünya senaryolarındaki güvenilirliğini ve etkinliğini değerlendirebilirler. Geriye dönük test, modeldeki potansiyel sorunların veya önyargıların belirlenmesine yardımcı olur ve modelin tahmin yeteneklerine ilişkin öngörüler sağlar. İleriye dönük çapraz doğrulama, zaman serisi tahmininde yaygın olarak kullanılan bir doğrulama tekniğidir ve bir tahmin modelinin ardışık zaman dilimlerindeki performansını değerlendirmek için kullanılır. Veri kümesini rastgele eğitim ve test kümelerine bölen geleneksel çapraz doğrulama yöntemlerinden farklı olarak ileri doğrulama, modeli geçmiş veriler üzerinde yinelemeli olarak eğitir ve gelecekteki veri noktalarındaki performansını değerlendirir. Bu süreç, modelin sürekli olarak yeni bilgilere uyum sağlaması gereken gerçek zamanlı tahmin senaryolarını simüle eder. İleriye doğru doğrulama, modelin görünmeyen verileri genelleştirme yeteneğini daha doğru bir şekilde değerlendirir ve modelin aşırı veya yetersiz uyumuyla ilgili sorunların tespit edilmesine yardımcı olur.



Şekil 4. İleriye dönük eğitim doğrulama testi şeması.

Optimizasyon ve karşılaştırma için kullanılan kayıp MSE (Mean Squared Error) Denklem (1)'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Hibrit modeller, kayıp hesaplaması için SARIMA artık serisini hedef olarak kullanmıştır.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Z_t - \hat{Z}_t)^2 \quad (1)$$

Performans karşılaştırması için iki değerlendirme metriği kullanılmıştır. Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE). RMSE (Denklem (2)), MSE'ye benzer bir değerlendirme metriğidir. Hata, veri ile aynı ölçeğe dönüştürmek için karekök alınır. MSE ve RMSE, diğer metriklerle kıyasla aykırı değerlere daha duyarlıdır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_t - \hat{Z}_t)^2} \quad (2)$$

Burada Z_t ve \hat{Z}_t sırasıyla zaman t 'de gerçek seri ve tahminlemelerdir. $CV(RMSE)$ (RMSE'nin Katsayısı) (Denklem (3)), standart sapmanın ortalamaya oranını hesaplar, elde edilen RMSE'yi Z zaman serisinin ortalamasına böler. Veri ile tahmin edilen değerler arasındaki rastgeleliğin miktarını göstermek için kullanılır.

$$CV(RMSE) = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_t - \hat{Z}_t)^2}}{\bar{Z}} \quad (3)$$

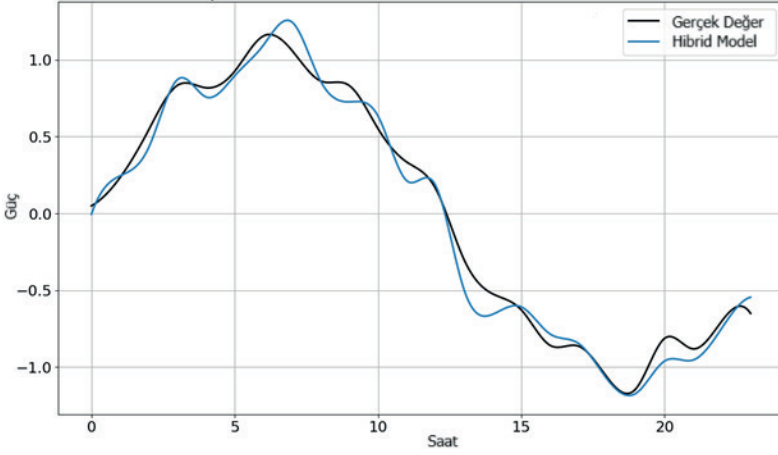
MAE, Denklem (4)'te gösterildiği gibi, aykırı değerlere MSE ve RMSE'ye kıyasla daha az duyarlıdır ve ayrıca veri ile aynı ölçüğe sahip bir hata değeri sağlar.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_t - \hat{Z}_t| \quad (4)$$

Yüzde fark, burada Kazanç (Denklem (5)), karşılaştırma için kullanılan diğer yöntemlere göre H-Transformer modelinin performansını karşılaştırmak için kullanılır.

$$Kazanç = \frac{Metric_{literature} - Metric_{proposed}}{Metric_{literature}} .100 \quad (5)$$

Burada $Metric_{proposed}$, önerilen H-Transformer tarafından elde edilen RMSE veya MAE'yi, $Metric_{literature}$ ise karşılaştırma için kullanılan hibrid yaklaşım modelleri için elde edilen RMSE veya MAE'yi temsil eder. Pozitif yüzde değerleri, önerilen H-Transformer'ın ilgili literatür yöntemine göre daha yüksek bir performans metriği elde ettiğini gösterir. Hibrid model ile kullanılan veri setleri yukarıda açıklanan hesaplamalar ile hesaplandığında aşağıdaki gibi gerçek değerlere oldukça yakın bir rüzgar enerjisi güç tahmini gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Günlük rüzgâr gücü enerjisi gerçek değer ve tahmin edilen değer.

5. Sonuçlar

Önerilen modelin rüzgâr enerjisinin etkin kullanımını optimize etmesiyle, geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltması, enerji bağımsızlığına ulaşmayı amaçlayan ülke ekonomisine önemli katkı sağlayacaktır. Rüzgâr enerjisinin potansiyelini kullanarak, arz edilecek enerjinin çeşitlenmesini sağlayacaktır. Güvenilir yenilenebilir kaynakların entegrasyonu ile tek bir enerji kaynağına bağımlılığı azaltarak genel enerji güvenliğini mümkün hale getirecektir. Rüzgâr enerjisi tahminlerinin enerji planlamasına dahil edilmesi, enerji altyapısının güvenliğini ve dayanıklılığını artırır. Güvenilir tahminler, enerji kaynaklarının daha iyi yönetilmesine olanak tanır. Böylece kesintilerin en aza indirilmesine ve yakıt fiyatları veya jeopolitik belirsizlikler gibi küresel enerji dinamiklerindeki değişikliklerin etkisinin hafifletilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak, önerilen rüzgâr enerjisi tahmin modeli sadece tahmin doğruluğunu artırmakla kalmaz, aynı zamanda enerji bağımsızlığını ilerletmede kritik bir rol oynayacaktır.

KAYNAKLAR

- Bird, L., Lew, D., Milligan, M., Carlini, E. M., Estanqueiro, A., Flynn, D., ... & O'Malley, M. (2010). Wind power forecasting error distributions: An international comparison. *Wind Energy*, 13(5), 475-484.
- Boerema, N., Sombatpanit, S., Harries, D., & Fitchett, J. (2017). Assessing the environmental impacts of tidal energy extraction in a global energy system: An integrated life cycle approach. *Renewable Energy*, 114, 848-857.
- Bossavy, S., Girard, R., & Kariniotakis, G. (2014). Statistical forecasting of wind power for grid integration with a focus on short-term forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 84-91.
- Cochran, J. A., Renne, D. S., Greely, K. J., & DeClerck, J. F. (2013). The WIND Toolkit: Validation and application of an integrated mesoscale wind resource assessment tool. *Applied Energy*, 111, 77-88.
- Cochran, J. A., Renne, D. S., Greely, K. J., & DeClerck, J. F. (2013). The WIND Toolkit: Validation and application of an integrated mesoscale wind resource assessment tool. *Applied Energy*, 111, 77-88.
- Gonzalez-Aparicio, I., Zucker, A., & Jerez, S. (2017). Short-term wind power forecasting: A review of existing methods and a proposal for local forecasting based on spatial correlations. *Energies*, 10(6), 691.
- González-Aparicio, I., Zucker, A., & Jerez, S. (2017). Short-term wind power forecasting: A review of existing methods and a proposal for local forecasting based on spatial correlations. *Energies*, 10(6), 691.
- Hirth, L., Ueckerdt, F., & Edenhofer, O. (2016). Integration costs revisited – An economic framework for wind and solar variability. *Renewable Energy*, 99, 198-208.
- Hong, T., Fan, S., & Wu, W. (2020). A hybrid wind power forecasting model based on support vector regression and ARIMA. *Applied Energy*, 262, 114483.
- Huang, S., Tian, H., & Chen, Y. (2019). A novel ensemble wind power forecasting model based on the integrated similarity measurement and LSSVM. *Energy Conversion and Management*, 181, 288-297.
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Cameron, M. A., & Frew, B. A. (2012). Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(26), 16469-16474.

- Liu, X., Wang, C., & Qin, Z. (2018). A hybrid forecasting model for wind speed based on ARIMA and SVR. *Energies*, 11(10), 2555.
- Liu, Y., Zhou, Y., Qin, Z., & Wang, R. (2018). Multi-step wind speed forecasting via hybrid deep learning model with variable selection. *Energy*, 144, 322-330.
- Lu, X., & McElroy, M. B. (2009). Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(27), 10933-10938.
- Macintosh, A., Wilkinson, R., & Outhred, H. (2014). Integrating variable renewable energy in electric power markets: Best practice and emerging trends. *Energy Policy*, 73, 544-553.
- Mulugetta, Y., & Jackson, T. (2012). Carbon lock-in: Types, causes, and policy implications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(7), 692-724.
- Ramachandran, P., Liu, Z., Polosukhin, I., & Vaswani, A. (2018). Deep sparse transformer models for machine translation. arXiv preprint arXiv:1808.07507.
- Sovacool, B. K., & Watts, D. (2009). Going completely renewable: Is it possible (Let alone desirable)? *The Electricity Journal*, 22(4), 95-111.
- Walters, J., Hirth, L., & Schumacher, K. (2016). Wind power and natural gas in Europe: Challenges of integrating intermittent electricity generation. *Applied Energy*, 163, 67-77.
- Wiser, R., Bolinger, M., & Seel, J. (2020). Utility-scale solar: Empirical trends in project technology, cost, performance, and PPA pricing in the United States – 2019 Edition. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35(5), 2683-2691.
- Zhang, J., Wu, H., & Zhao, S. (2020). Wind speed forecasting based on long short-term memory neural networks optimized by an improved fruit fly optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*, 214, 112873.
- Zhang, W., Mauzerall, D. L., Peng, W., Li, H., Wang, J., & Zhu, T. (2019). Particulate air pollution from electricity generation in China: Geographical distribution and source apportionment. *Nature Energy*, 4(7), 564-573.