

Rüzgar Enerji Sistemlerinde Kontrol Yöntemleri

Elif Gülşah Seçkin*,¹, Mustafa Ergin Şahin²



Derleme Makale

Takvim-i Vekayi
ISSN: 2148-0087

Basım (Published): 31.12.2025
Kabul (Acceptance): 27.12.2025
Gönderi (Submitting): 05.12.2025

Cilt (Vol): 13
No (Issue): 2
Sayfa (Pages): 118-143

Adres:

¹Recep Tayyip Erdoğan
Üniversitesi, Rize, Türkiye.
ORCID: 0009-0001-4876-4814

²Recep Tayyip Erdoğan
Üniversitesi, Rize, Türkiye.
ORCID: 0000-0002-5121-6173

*Sorumlu Yazar (Corresponding);

E-mail:
elifgulsah_seckin23@erdogan.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Rüzgar
Türbinleri, Kontrol Sistemleri,
Yenilenebilir Enerji, Enerji
Verimliliği, Rüzgar Türbini
Verimliliği, Maksimum Güç Noktası
Takibi, PID Kontrol.

TELHİS (ÖZ)

Günümüzde artan nüfus ve teknolojik gelişmeler enerji talebini hızla artırmakta ve ülkeleri sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Türkiye’de enerji ihtiyacının büyük kısmı fosil yakıtlardan karşılanmakta olup, bu durum çevresel etkilerin artmasına ve enerji güvenliği sorunlarına yol açmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle rüzgâr enerjisi, çevre dostu, sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm olarak önem kazanmaktadır. Rüzgâr enerjisinde türbinlerin verimli çalışması kritik olup, kontrol yöntemleri türbin performansını optimize etmek, mekanik zorlanmaları azaltmak ve enerji üretiminde sürekliliği sağlamak açısından hayati bir rol oynamaktadır. Kanat açısı, rüzgâr yönü, frenleme mekanizmaları ve maksimum güç noktası izleme (MPPT) gibi mekanik ve elektronik kontrol sistemleri, türbinin güvenli ve verimli çalışmasını destekler. PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrol yöntemleri, rotor hızı ve kanat açısı gibi parametreleri sürekli izleyerek türbinin değişken rüzgâr koşullarında optimum performans göstermesini sağlar. Günümüzde adaptif kontrol, bulanık mantık ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar da türbinlerin çevresel değişimlere hızlı uyum sağlamasını sağlayarak enerji üretim verimliliğini artırmaktadır.

Bu çalışma, rüzgâr türbinlerinde kullanılan modern kontrol yöntemlerini kapsamlı biçimde inceleyerek sistem verimliliğini artırmaya yönelik teknik yaklaşımları ortaya koymakta ve özellikle MPPT algoritmalarının türbinlerin optimum güç üretmesini sağlama rolünü vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, rüzgâr enerjisi çevresel etkileri düşük, sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmakta; uygun kontrol yöntemleri ile türbinlerin enerji üretim verimliliği önemli ölçüde artırılabilir.



Control Methods in Wind Energy Systems

Review Article

ABSTRACT

Today, the increasing population and technological developments rapidly raise energy demand, directing countries towards sustainable energy sources. In Turkey, a significant portion of energy needs is met by fossil fuels, which leads to increased environmental impacts and energy security concerns. In this context, renewable energy sources, particularly wind energy, have become important as environmentally friendly, sustainable, and economical solutions. Efficient operation of wind turbines is critical in wind energy systems, and control methods play a vital role in optimizing turbine performance, reducing mechanical stress, and ensuring continuity in energy production. Mechanical and electronic control systems, such as blade pitch, wind direction adjustment, braking mechanisms, and Maximum Power Point Tracking (MPPT), support safe and efficient turbine operation. PID (Proportional-Integral-Derivative) control methods continuously monitor parameters like rotor speed and blade pitch to ensure optimal performance under variable wind conditions. Nowadays, adaptive control, fuzzy logic, and artificial intelligence-based approaches also enhance turbines' ability to quickly adapt to environmental changes, increasing energy production efficiency.

This study comprehensively examines modern control methods used in wind turbines, highlighting technical approaches to improve system efficiency and emphasizing the role of MPPT algorithms in ensuring optimal power generation.

In conclusion, wind energy stands out as a sustainable energy source with low environmental impact, and appropriate control strategies can significantly enhance turbine energy production efficiency.

KEYWORDS

Wind Turbines, Control Systems, Renewable Energy, Energy Efficiency, Wind Turbine Efficiency, Maximum Power Point Tracking, PID Control.

1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji talebi, nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte sürekli artmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı rezervleri, çevresel etkileri ve fiyat dalgalanmaları, ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir (Seydioğulları, 2013). Fosil yakıt temelli enerji üretimi, sera gazı emisyonlarının büyük bölümünü oluşturarak iklim değişikliği, çevre kirliliği, ormansızlaşma ve biyolojik çeşitliliğin kaybı gibi sorunlara yol açmakta, bu nedenle sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi gerekmektedir (Seydioğulları, 2013; Ürün & Soyu, 2016).

Türkiye, önemli bir yenilenebilir enerji potansiyeline sahip olmasına rağmen enerji ihtiyacının büyük kısmını dış kaynaklardan karşılamakta ve bu durum ekonomik bağımlılığı artırmaktadır (Ürün & Soyu, 2016; Koç & Kaya, 2015). Özellikle hidroelektrik, rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji alanlarında yapılan yatırımlar, ülkenin mevcut potansiyelini artırmakta, ancak halen enerji ihtiyacının önemli bir kısmı yenilenemez kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji projelerinin hızlandırılması ve enerji iletim altyapısının güçlendirilmesi, Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Koç & Kaya, 2015).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı, Türkiye'nin enerji arz güvenliğini artırmakla kalmayacak; aynı zamanda jeopolitik değerini güçlendirecek ve enerji nakil hatları üzerindeki konumunu stratejik bir avantaja dönüştürecektir (Bekar, 2020). Fosil yakıtların aksine, yenilenebilir enerji kaynakları her ülkede üretilme potansiyeline sahip olduğundan, Türkiye'nin bu alandaki kapasitesini artırması, hem ulusal enerji politikalarında özerklik sağlayacak hem de ekonomik ve politik riskleri azaltacaktır.

Ülke, linyit, hidroelektrik, jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip olmakla birlikte mevcut potansiyelin tamamını kullanamamaktadır. Özellikle hidrolik ve jeotermal enerjide kapasitenin artırılması, rüzgâr ve güneş enerjisi yatırımlarının hızlandırılması ile elektrik üretiminde yerli ve temiz kaynakların payı yükseltilebilir (Yılmaz, 2012). Bu bağlamda, Türkiye'nin enerji politikalarında yenilenebilir kaynakların etkin kullanımı, hem dışa bağımlılığı azaltacak hem de ekonomik kalkınma ve enerji arz güvenliği açısından sürdürülebilir bir yol sağlayacaktır (Yılmaz, 2012; Bekar, 2020).

Özellikle rüzgar enerjisi, düşük maliyetli üretim ve yüksek verimliliği ile dikkat çekmektedir. Rüzgar enerjisi santralleri, genellikle yatay eksenli rüzgar türbinleri (HAWT) kullanılarak inşa edilse de, dikey eksenli rüzgar türbinleri (VAWT) son yıllarda etkili alternatifler olarak öne çıkmaktadır (Boztaş, Demirbaş & Şahin, 2021).

Türkiye’de rüzgâr enerjisi üretimi, özellikle Marmara, Ege ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaşmakta olup, bu bölgeler hem işletmedeki hem de inşa hâlindeki santraller açısından ülkenin en yüksek potansiyeline sahiptir. İç Anadolu, Karadeniz, Güneydoğu Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde rüzgâr enerjisi daha sınırlı düzeydedir. Ülkenin teorik rüzgâr potansiyelinin yalnızca küçük bir kısmı kullanılmakta, bazı iller bu potansiyeli ülke ortalamasının üzerinde değerlendirerek rüzgâr enerjisi üretiminde öne çıkmaktadır. Mevcut gelişim ve devletin yenilenebilir enerji hedefleri doğrultusunda, önümüzdeki yıllarda rüzgâr enerjisi kapasitesinin kayda değer bir artış göstereceği öngörülmektedir (İlhan & Bilgili & Şahin, 2020; Şahin, 2020; Ozcan, 2018).

Yenilenebilir enerji sistemlerinde, özellikle rüzgar türbinlerinde kullanılan generatör verimliliği ve güvenilirliği, genel sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Eksenel bölünmüş yapıya sahip generatör tasarımı ile ısı dağılımı optimize edilerek termal kayıpların azaltılması sağlanmakta ve generatör verimliliği artırılmaktadır. Bu tür motor tasarımı ve optimizasyon stratejileri, rüzgar türbinlerinin enerji üretim verimliliğini artırma noktasında kritik rol oynayabilir. Ayrıca, bu tür çalışmalar, rüzgar türbinlerinin uzun vadeli güvenli çalışması ve enerji üretim kapasitesinin artırılması amacıyla kullanılan teknolojilere katkı sağlamakta ve enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Çabuk & Üstün, 2023).

Yatay eksenli türbinler, yaygın olarak kullanılsa da, dikey eksenli rüzgar türbinleri (VAWT), özellikle şehir içi alanlar için uygun çözümler sunmaktadır. VAWT’ler, daha az yer kaplamaları, düşük hızda rüzgarlarla çalışabilmeleri ve bakım kolaylıkları gibi avantajlarla öne çıkmaktadır (Çetin& Genç & Daldaban, 2019).

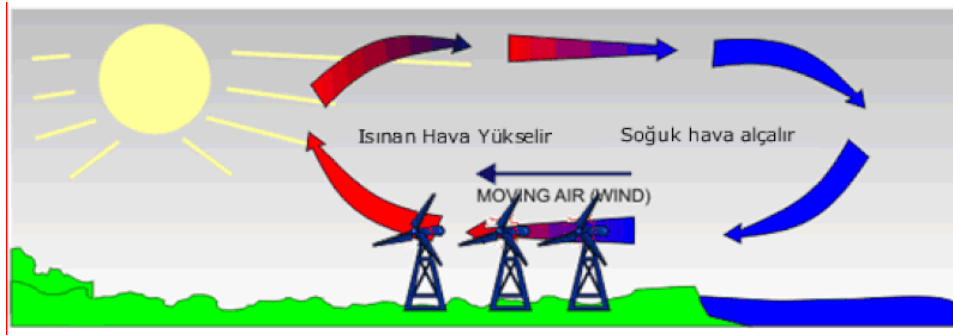
Çift beslemeli indüksiyon jeneratörlerine sahip rüzgar türbinleri için modelden bağımsız uyarlanabilir öğrenme kontrol şeması geliştirilmiştir. Bu yeni kontrol stratejisi, türbinlerin çevresel koşullara ve rüzgar hızındaki değişimlere hızla adapte olabilmesini sağlamak amacıyla önerilmiştir (Abouheaf, Gueaieb & Sharaf, 2018).

Bu çalışmada, rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanılan kontrol yöntemleri derleme niteliğinde bütüncül bir bakış açısıyla incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, rüzgâr türbinlerinin verimliliğini artırmak, sistem güvenliğini sağlamak ve genel performansı iyileştirmek amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan mekanik, elektronik ve yazılım tabanlı kontrol stratejilerini sistematik biçimde ele almaktır. Bu kapsamda; kanat açısı kontrolü, rüzgâr yönü kontrolü, frenleme mekanizmaları, maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve PID kontrol yöntemlerinin çalışma prensipleri, türbin performansına etkileri ve enerji üretimindeki rolleri literatürdeki çalışmalar ışığında değerlendirilmiştir. Ayrıca, güç elektroniği tabanlı kontrol birimleri ve modern kontrol algoritmalarının, özellikle değişken rüzgâr koşullarında türbinlerin kararlı ve verimli çalışmasına sağladığı katkılar vurgulanmıştır. Bu derleme çalışması ile farklı kontrol yaklaşımlarının avantaj ve sınırlılıkları bir arada sunularak, rüzgâr türbini

kontrol sistemleri konusunda Türkçe literatüre kapsamlı ve eğitsel bir kaynak kazandırılması amaçlanmaktadır.

2. RÜZGAR ENERJİSİ VE TÜRBİN ÇEŞİTLERİ

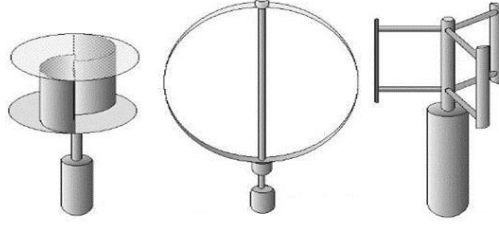
Rüzgar, dünya üzerindeki ısıf farklılıklar neticesinde meydana gelen basınç farklılıklarının neden olduğu hava akımıdır. Rüzgar enerjisi bu akımların taşıdığı kinetik enerjidir. Rüzgarda bulunan bu hareket enerjisi rotor sayesinde önce mekanik enerjiye çevrilir, daha sonrasında rotor mili ile dönüş hızı artırılarak jeneratöre aktarılır. Ortaya çıkan elektrik enerjisi depolanır ya da alıcılara iletilir. Bu dönüştürme işlemlerini yapan mekanizmaya rüzgar türbini adı verilir (Yalçın ve Öztürk, 2018).



Şekil 1. (URL1, 2025)

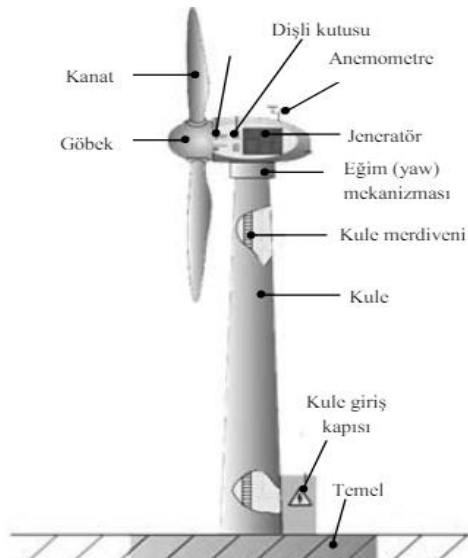
Türkiye’de rüzgâr enerjisi yatırımları son yıllarda önemli bir artış göstermektedir. Karada ve denizde kurulu RES kapasitesi dünya genelinde yükselirken, Türkiye’deki RES kurulumlarının yıllar içinde büyük ölçüde artması ülkenin yüksek rüzgâr potansiyeline bağlıdır. Ülke genelinde Ege, Marmara ve Akdeniz bölgeleri en yüksek kurulu kapasiteye sahip olup, iller bazında İzmir, Balıkesir, Manisa, Çanakkale ve Hatay öne çıkmaktadır. Bu durum, Türkiye’nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin ekonomik olarak değerlendirilebileceğini ve yatırımların sürdürülebilirliğini göstermektedir (Yıldırım & Aksu, 2021).

Dikey eksenli rüzgar türbinleri (Vertical Axis Wind Turbines - VAWT), yatay eksene göre dikey bir şekilde dönen bir rotor miline sahip olan rüzgar türbinleridir. Diğer ismiyle düşey eksenli rüzgar türbinlerinin dönüş açısı rüzgara diktir. Bu sayede rüzgarı her taraftan toplayabilme imkânı sağlamış olur. Bu da düşey eksenli türbinlerin avantajıdır (Akgül, 2019). Dönüş açısı rüzgara dik olan düşey eksenli rüzgar türbinleri; kanatlar, jeneratör kısmı, doğrultucu ve dönüştürücü kısmından oluşur (Yılmaz ve Demir, 2020). Düşey eksenli rüzgar türbini çeşitleri Şekil 2’de verilmiştir. Sırasıyla Savonious, Darrieur ve H rotor olmak üzere üç çeşit verilmiştir.



Şekil 2. Düşey eksenli rüzgar türbinleri (Volker, 2007)

Yatay eksenli rüzgar türbinleri, (Horizontal Axis Wind Turbine - HAWT), modern rüzgar enerjisi üretiminde en yaygın olarak kullanılan türbin türüdür. Bu türbinler, yere paralel şekilde dönen bir şaftın üzerine monte edilmiş rotor kanatlarından oluşur ve genellikle yerden yüksek bir kule üzerine yerleştirilirler. Yatay eksenli rüzgar türbini rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır, temel bileşenleri Şekil 3’ de verilmiştir. Rotor ve kanatlar, rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ana unsurlardır ve aerodinamik tasarımları sayesinde yüksek enerji verimliliği sağlar. Rotor göbeği, kanatları şaft sistemine bağlayarak rotorun dönme hareketini iletir. Şaft, genellikle düşük devirli ve yüksek devirli olmak üzere iki bölümden oluşur ve mekanik enerjiyi jeneratöre iletir; bazı türbinlerde ise doğrudan tahrik sistemi kullanılır. Şanzıman, rotorun düşük hızını jeneratörün ihtiyaç duyduğu yüksek hıza çevirirken, jeneratör bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Kule, türbini yerden yükselterek daha yüksek rüzgar hızlarının elde edilmesini sağlarken, yaw sistemi rotorun rüzgar yönüne optimal şekilde konumlanmasını sağlar. Türbinin güvenli ve verimli çalışmasını kontrol sistemi yönetir; hız, yön ve frenleme gibi operasyonel parametreleri izler ve düzenler. Son olarak, fren sistemi, acil durumlarda rotorun durmasını sağlayarak türbinin güvenliğini garanti altına alır. Bu bileşenler birlikte çalışarak yatay eksenli rüzgar türbinlerinin sürdürülebilir ve verimli bir enerji üretim sistemi oluşturmasını sağlar. (Şenel&Koç, 2014)



Şekil 3. Yatay eksenli rüzgar türbini (Şenel&Koç, 2014)

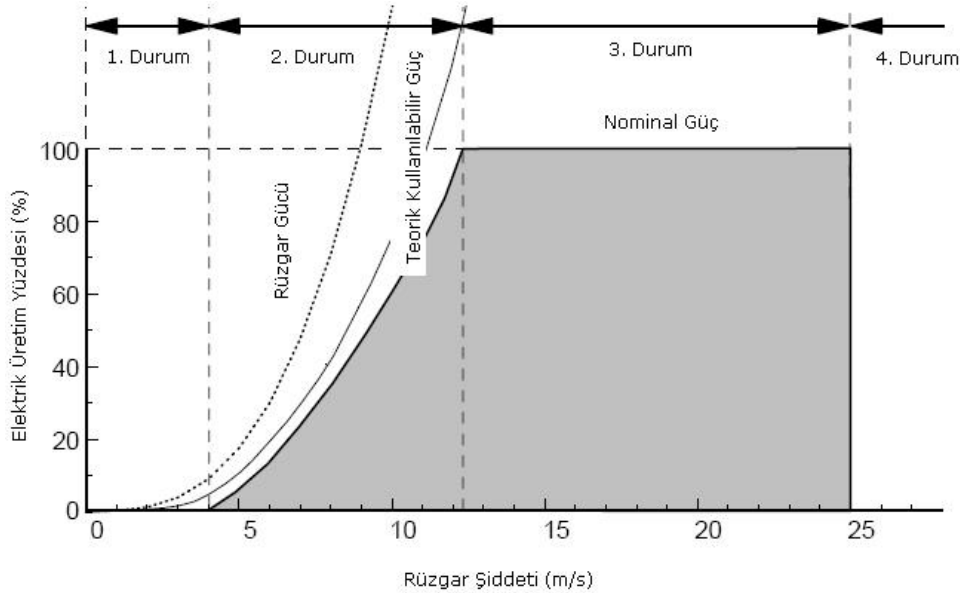
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KONTROL YÖNTEMLERİ

Otomatik kontrol sistemlerinde, elektronik devrelerde ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan kontrol birimleri, temel olarak sistemin hedeflenen değere ulaşmasını sağlamak amacıyla giriş sinyalini sürekli olarak izler, değerlendirir ve buna bağlı olarak çıkış sinyalini düzenler. Bu birimler, mevcut sistem durumunu algılayarak giriş ve çıkış parametrelerini analiz eder ve sistem performansını optimize edecek şekilde gerekli düzeltmeleri uygular.

3.1. Mekanik Kontrol Yöntemleri

Mekanik kontrol yöntemleri, rüzgar türbinlerinde rotor kanatlarının açısı (pitch angle), türbin gövdesinin rüzgara hizalanması ve acil durum frenleme gibi kritik operasyonları içermektedir. Bu yöntemler, potansiyel aşırı yüklenmeleri önlemek, enerji çıkışını optimize etmek ve türbinin yapısal güvenliğini sağlamak için tasarlanmıştır. Örneğin, kanat açısının ayarlanması yoluyla aerodinamik performans kontrol edilirken; rotorun rüzgar yönüne göre konumlandırılması, enerji verimliliğini artırmakta ve uyumlu çalışmayı güvence altına almaktadır.

Şekil 4'te bir rüzgâr türbininin belirli bir süre boyunca üretebileceği güç, güç eğrisinin ortalama değerlerinden yararlanılarak hesaplanabilir. Güç eğrisi, ortalama rüzgâr hızının türbinin ortalama güç üretimi üzerindeki etkisini ortaya koyar ve bu ilişki dört temel çalışma durumuna ayrılır.



Şekil 4. Rüzgar türbininin güç eğrisi (URL2, 2025)

Birinci durumda; ortalama rüzgâr hızı türbinin çalışmaya başlayacağı kesme hızının (cut-in) altında kaldığında, türbin elektrik üretmez ve hareket etmeden bekler. İkinci durumda; rüzgâr hızı cut-in değerini aştığında türbin enerji üretimine başlar, ancak maksimum güce ulaşabilmek için sistem kendi

çalışma hızını optimize etmeye çalışır. Üçüncü durumda; rüzgâr hızı nominal değerin üzerine çıktığında, türbin kanatlarının dönüş hızı çeşitli kontrol ve frenleme mekanizmalarıyla güvenli seviyeye indirilir. Dördüncü ve son durumda ise; rüzgâr hızı türbinin dayanabileceği üst sınır olan cut-off hızını aşarsa, olası yapısal hasarları önlemek amacıyla türbinin durdurulması gerekir ve bu şartlarda güç üretimi yapılamaz (Kaltschmitt, 2007).

Rüzgar türbinlerinin verimli ve güvenli çalışabilmesi için mekanik kontrol yöntemleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu yöntemler, rotor kanatlarının açısının ayarlanması, türbinin gövdesinin rüzgar yönüne hizalanması ve acil durum frenleme sistemlerini içermektedir. Kanat açısı kontrolü, türbinin aerodinamik performansını optimize etmek amacıyla rotor kanatlarının açılarını düzenler ve yüksek rüzgar hızlarında türbini aşırı yüklenmeden korur (Karakaya, 2017). Yaw kontrolü ise türbinin gövdesinin rüzgar yönüne doğru konumlanmasını sağlar, böylece enerji verimliliğini artırır ve türbinin dinamik kararlılığını destekler (Kaya & Şen, 2018). Ayrıca, acil durum frenleme sistemleri, türbinin güvenli bir şekilde durmasını sağlayarak türbinin aşırı hız ve diğer risk faktörlerinden korunmasına yardımcı olur (Demirtaş & Yıldız, 2019). Bu mekanik kontrol sistemleri, türbinin çalışma ömrünü uzatırken, bakım maliyetlerini de düşürmeye yardımcı olmaktadır.

3.1.1. Kanat Açısı Kontrolü

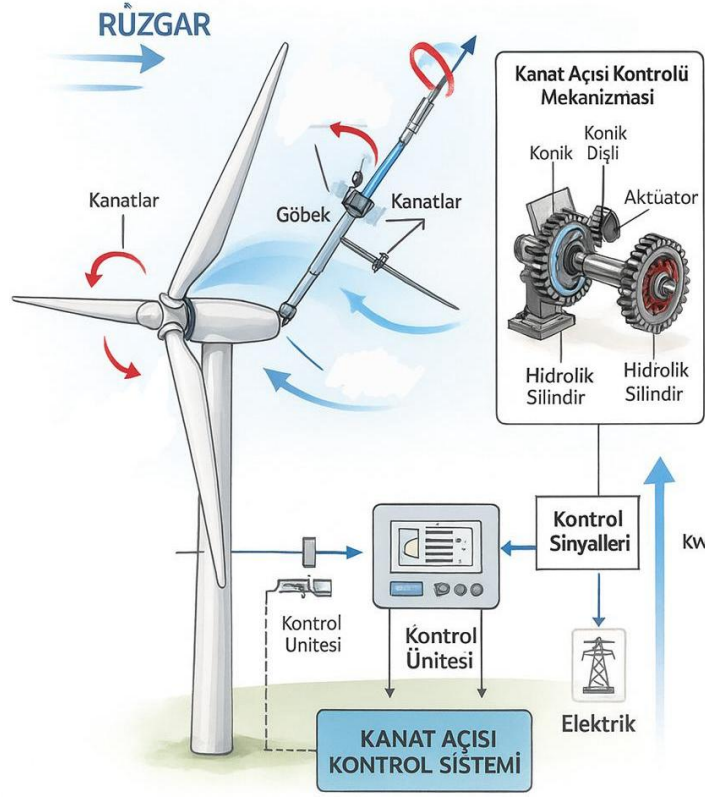
Kanat açısı kontrolü, rüzgar türbinlerinin rotor kanatlarının açısını ayarlayarak enerji üretiminde maksimum verimlilik sağlamayı ve sistemin aşırı yüklenmesini önlemeyi amaçlayan bir mekanizmadır. Özellikle yüksek rüzgar hızlarında, kanat açısı kontrolü rotor hızını sınırlandırarak jeneratörü korur ve türbinin güvenliğini sağlar. Bu kontrol mekanizması, düşük rüzgar hızlarında enerji üretim kapasitesini artırırken, yüksek hızlarda ise mekanik aşınmayı azaltır ve sistemin ömrünü uzatır (Yılmaz, 2016).

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kanat açısı kontrolü , enerji üretimindeki dalgalanmaları azaltarak sistemin dinamik kararlılığını artırır. Özellikle adaptif kontrol tekniklerinin kullanıldığı durumlarda, rüzgar hızındaki ani değişimlere hızlı ve etkin bir şekilde yanıt verilmesi mümkündür (Özkan & Çelik, 2017). Bu özellik, türbinlerin şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırır ve güç elektroniği sistemlerini aşırı yükten korur (Koca & Demir, 2018).

Kanat açısı kontrolü ayrıca rüzgar çiftliklerindeki enerji üretim optimizasyonu için de kritik öneme sahiptir. Rüzgar hızındaki ani değişimlere uyum sağlamak ve türbinlerin güvenli çalışmasını temin etmek için, ileri düzey kontrol stratejileri ile birlikte kullanılmaktadır. Bu sayede hem enerji verimliliği artırılmakta hem de bakım maliyetleri düşürülmektedir (Aksoy & Ergin, 2019).

Kanat açısı kontrolü, türbinin verimliliği ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 5’de kanatların uçlarına yönlendirilmiş oklar, aç

değişimlerini; göbekteki mekanizma ise çalışma koşullarına göre rüzgâr hızına uyumu göstermektedir. Bu sistem, performansı optimize ederken aşırı yüklenmeleri önler.



Şekil 5. Kanat açısı kontrolü

3.1.2. Rüzgar Yönü Kontrolü

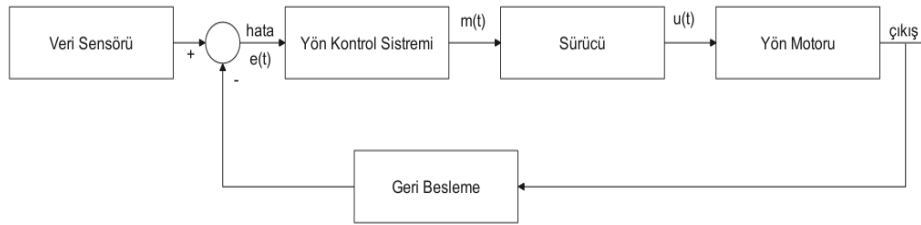
Rüzgar yönü kontrolü, rüzgar türbinlerinin rotorlarını rüzgarın geldiği yöne yönlendirerek enerji üretim verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan kritik bir kontrol mekanizmasıdır. Bu sistem, türbinin rotorunun optimal rüzgar yönüne hizalanmasını sağlayarak enerji üretim kapasitesini maksimize eder ve performans kayıplarını önler. Yönlendirme kontrolü, türbinin çalışma verimliliğini artırarak daha kararlı bir güç üretimi sağlar. Yönlendirme kontrol mekanizmaları, türbinlerin rüzgarın yönündeki değişimlere hızla adapte olmalarını ve rüzgar hızını optimize etmelerini sağlar (Kaya & Şahin, 2018). Yönlendirme kontrol sistemlerinin bir diğer önemli avantajı, türbinlerin daha az mekanik aşınma yaşaması ve ömrünün uzamasıdır (Arslan & Yıldız, 2019). Ayrıca, yönlendirme kontrolü türbinlerin dinamik kararlılığını artırarak, rüzgar hızındaki ani değişimlere uyum sağlamalarını mümkün kılar. Bu sayede türbinin güvenliği sağlanır ve enerji üretimi sırasında şebeke ile entegrasyon kolaylaşır.

Yönlendirme kontrolünün simülasyon ve optimizasyonu da rüzgar türbinlerinin verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Yönlendirme ve kanat açısı kontrolünün bir arada kullanılması türbin performansını daha

da optimize edebilir. Bu kontrol stratejileri, türbinlerin rüzgar yönü ve hızı değiştiğinde daha verimli çalışmasını sağlar (Güneş & Aksoy, 2020).

Rüzgar türbinlerinin rüzgar yönü kontrolü için yapay sinir ağı tabanlı pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning - RL) yaklaşımı da geliştirilmiştir. Bu yöntem, türbinin rüzgar yönü hareketini optimize ederek enerji verimliliğini artırmayı ve genel performansını iyileştirmeyi hedefler (Demirtaş & Koç, 2021).

Şekil 6'da, rüzgar türbinlerinin rüzgar yönünü otomatik kontrol eden sistem gösterilmektedir. Sistemin temel bileşenleri arasında meteorolojik sensör yer almakta olup, bu sensör rüzgar yönünü algılayarak kontrol birimine veri iletir. Kontrol sistemi bu bilgileri değerlendirir, sürücü aracılığıyla yön motoruna komut gönderir ve türbin gövdesi rüzgar yönüne çevrilir. Geri besleme mekanizması sayesinde sistem sürekli olarak güncellenir ve türbinin her zaman rüzgara en uygun açıyla çalışması sağlanır. Bu sayede türbinin verimliliği artırılır.



Şekil 6. Rüzgar yönü otomatik kontrol sistemi

Sonuç olarak, rüzgar yönü kontrolü, rüzgar türbinlerinin dinamik verimliliğini artıran ve enerji üretiminde kararlılığı sağlayan temel bir kontrol mekanizmasıdır. Modern rüzgar türbinlerinde kullanılan bu teknoloji, türbinin güvenli çalışmasını temin ederken, enerji üretiminin verimliliğini ve ömrünü uzatmaktadır.

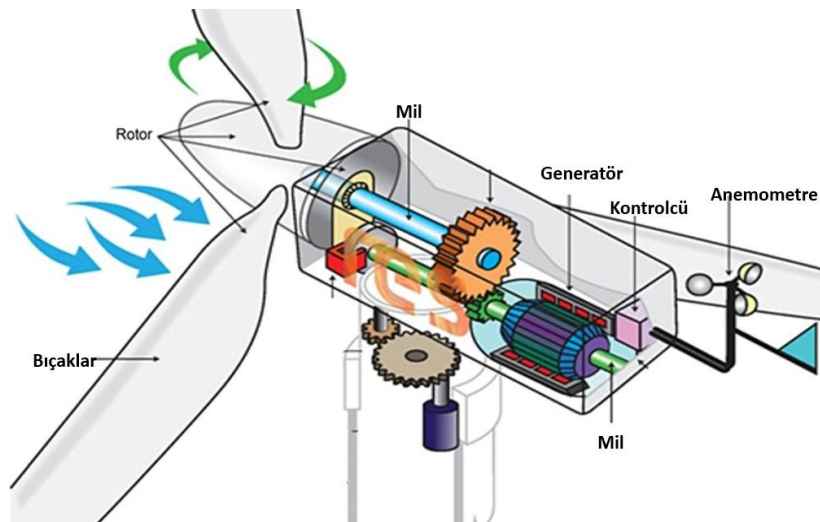
3.1.2. Frenleme Mekanizmaları

Rüzgar türbinlerinde frenleme mekanizmaları, türbinin güvenliğini sağlamak ve aşırı hızlanmasını önlemek için kritik bir öneme sahiptir. Bu sistemler, türbinin verimli ve güvenli çalışmasını sağlarken, türbinin ömrünü de uzatır. Rüzgar türbinlerinde kullanılan frenleme sistemleri genel olarak iki gruba ayrılmaktadır. Yavaşlatma frenleri, türbinin rotoru ve jeneratörünü korumak amacıyla çalışır; özellikle bakım süreçlerinde veya düşük rüzgar hızlarında türbini yavaşlatmak ya da durdurmak için devreye girer. Aşırı hız frenleri ise, rüzgar hızının çok yüksek olduğu durumlarda türbinin aşırı hızlanmasını önleyerek sistemin güvenli bir şekilde durmasını sağlar. Bu frenleme mekanizmaları, türbinin hem güvenli çalışmasına hem de uzun ömürlü olmasına katkıda bulunmaktadır (Demirtaş & Yıldız, 2019).

Frenleme sistemlerinin tasarımı, türbinin verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Frenleme sistemleri, türbinin güvenliğini ve enerji üretim kararlılığını artırarak, türbinin çevresel koşullardaki ani değişimlere hızlı bir şekilde uyum sağlamasını mümkün kılar. Frenleme sistemleri, türbinin rotoru hızla durdurabilmesini sağlayarak, türbinin mekanik sistemlerinin aşırı yüklenmesini engeller ve bu da türbinin uzun vadede daha verimli çalışmasına olanak tanır (Huang & Yang, 2016).

Frenleme mekanizmalarının kapalı çevrimli kontrol sistemlerinin bir parçası olarak, türbinin genel verimliliğini ve güvenliğini nasıl artırdığı tartışılmaktadır. Ayrıca, frenleme sistemlerinin türbin tasarımında kullanılması, sistemin dinamizmini iyileştirir ve işletme güvenliğini sağlar (Johnson, Pao, Balas & Fingersh, 2006).

Şekil 7’de, rüzgar türbininin frenleme mekanizması gösterilmektedir. Bu sistem, türbinin güvenli ve kontrollü bir şekilde durdurulmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Frenleme mekanizmasının temel bileşenleri arasında mekanik frenler, aerodinamik frenleme sağlayan kanat açısı kontrolü ve acil durumlarda devreye giren elektriksel frenleme yöntemleri yer almaktadır. Bu bileşenler, aşırı rüzgâr hızlarında türbinin zarar görmesini engellemekte, bakım işlemlerinin güvenli koşullarda yapılmasına imkân tanımakta ve genel işletme güvenliğini artırmaktadır. Türbinin güvenli bir şekilde yavaşlatılması veya tamamen durdurulması için birden fazla bileşenin birlikte çalıştığı bir sistemdir. Mekanik frenler, genellikle rotor şaftına bağlı disk veya hidrolik frenlerdir ve özellikle acil durumlarda türbini hızlıca durdurmak için kullanılır. Aerodinamik frenleme, kanatların açı değiştirme mekanizmasıyla gerçekleştirilir; kanatlar rüzgârı “kaçıracak” şekilde döndürülerek kaldırma kuvveti azaltılır ve rotor doğal olarak yavaşlar. Elektriksel frenleme ise jeneratöre uygulanan yükü artırarak rotorun dönme hızını düşürür ve kontrollü bir şekilde enerji Emilimi sağlar. Bu üç yöntem bir arada kullanılarak türbin hem aşırı rüzgâr koşullarında korunur hem de bakım veya arıza durumlarında güvenli şekilde durdurulabilir (Rafaat, 2018).



Şekil 7. Rüzgar türbini fren sistemi (Pao&Johnson, 2011)

Sonuç olarak, frenleme mekanizmaları rüzgar türbinlerinde yalnızca türbinin güvenliğini sağlamaz, aynı zamanda türbinin verimliliğini ve ömrünü uzatır. Modern türbinlerde kullanılan bu frenleme sistemleri, yüksek rüzgar hızlarında türbinin kontrolünü sağlayarak, türbinin güvenli bir şekilde çalışmasını ve enerji üretiminde kararlılığın korunmasını temin eder.

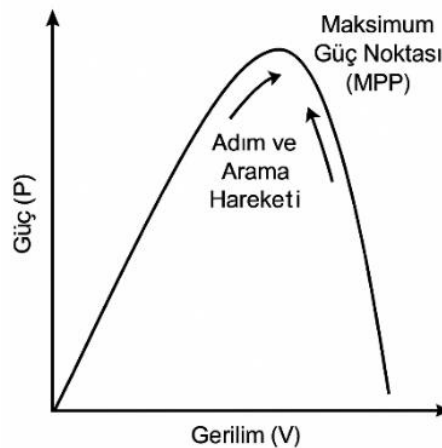
3.2. Elektronik ve Yazılım Tabanlı Kontrol Yöntemleri

3.2.1. Maksimum Güç Noktası Takibi

Rüzgar türbinlerinde Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) (Maximum Power Point Tracking, MPPT), türbinin rüzgar hızına ve çevresel koşullara bağlı olarak en yüksek enerji üretim verimliliğini sağlamak için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu yöntem, türbinin rotor hızını değiştirerek, rüzgarın hızına göre en verimli güç üretimi noktasını belirlemeye çalışır. Rüzgar türbinlerinin güç çıkışını optimize etmek için kullanılan MPPT algoritmaları, özellikle değişken rüzgar koşullarında türbinin verimliliğini artırmak için kritik bir rol oynar.

Değişken hızda çalışan rüzgar türbinlerinde kullanılan sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler, MPPT algoritmaları ile verimli bir şekilde kontrol edilebilir ve böylece yüksek enerji verimliliği elde edilebilir. Bu algoritmalar, rüzgar hızındaki ani değişimlere hızlı bir şekilde uyum sağlayarak türbinin kararlı çalışmasını ve verimli enerji üretimini sağlar (Döşoğlu, 2016).

Şekil 8’de , Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) için kullanılan adım ve arama yönteminin prensibi gösterilmektedir. Güç-gerilim eğrisi üzerinde sistem, küçük adımlar atarak güç değişimini gözlemler; güç artışı olduğunda aynı yönde devam eder, azalış olduğunda ise yön değiştirerek maksimum güç noktasına (MPP) ulaşır.



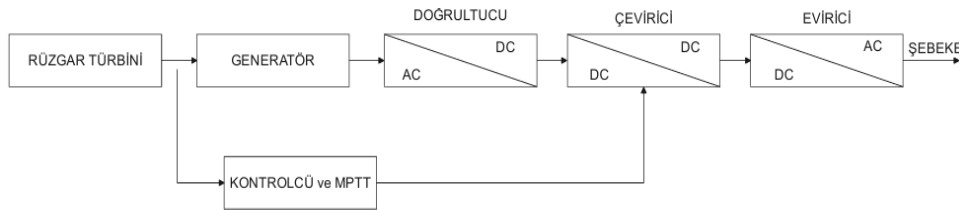
Şekil 8. Güç-gerilim eğrisi ve MPPT noktası

MPPT Kontrol Ünitesi, sistemin çıkış gücünü sürekli olarak izleyen ve maksimum güç noktasına ulaşmayı sağlayan bir kontrol ünitesidir. Bu kontrol ünitesi, genellikle DC-DC dönüştürücüler ile birlikte çalışarak enerji sistemlerinin çıkış gerilimi voltajı ve akımını optimize eder. Kontrol ünitesi,

güneş panelleri veya rüzgar türbinleri gibi sistemlerin çıkışında, panelin veya türbinin maksimum güç noktasına ulaşabilmesi için gerekli ayarları yapar (Govinda vd., 2018).

MPPT'nin etkin bir şekilde çalışabilmesi için buck (azaltan) ve boost (arttıran) tipinde DC-DC dönüştürücüler kullanılır. Bu dönüştürücüler, üretilen gerilimi, bataryalar veya şebeke için uygun seviyeye getirmek amacıyla kullanılır (Döşoğlu, 2016).

Şekil 9'da, rüzgar türbininde üretilen elektriğin şebekeye aktarılmadan önce uygun koşullara dönüştürülme süreci gösterilmektedir. Bu süreçte elektrik, gerekli dönüşümlerden geçirilerek şebeke ile uyumlu hale getirilmekte ve sisteme entegre edilmektedir.



Şekil 9. Rüzgar yönü kontrol sistemi ve güç elektroniği (Hannan, 2019)

Sonuç olarak, MPPT algoritmaları rüzgar türbinlerinin verimliliğini artıran önemli bir araçtır ve gelişmiş kontrol yöntemleri sayesinde türbinlerin daha verimli çalışması sağlanabilir. Modern rüzgar enerjisi sistemlerinde MPPT uygulamaları, türbinlerin dinamik rüzgar koşullarına hızlı bir şekilde uyum sağlamalarına olanak tanır, böylece enerji üretiminde kararlılığı artırır ve verimliliği optimize eder.

3.2.2. Güç Elektroniği Tabanlı Kontroller

Rüzgar türbinlerinde kullanılan güç elektroniği tabanlı kontrol yöntemleri, enerji üretiminin verimliliğini artırırken, sistemin şebeke ile uyumlu çalışmasını ve güç kalitesini iyileştirir. Bu yöntemler, türbinin mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme sürecinde kritik bir rol oynar. Çift beslemeli asenkron jeneratörlerin (DFIG) kullanıldığı rüzgar türbinlerinde, güç elektroniği tabanlı kontrol sistemlerinin türbinin hızını ve jeneratörün çıkış gücünü optimize etmek için nasıl kullanıldığı tartışılmaktadır. DFIG tabanlı sistemler, türbinlerin rüzgar hızındaki değişimlere göre esnek bir şekilde güç üretmesini sağlar; böylece şebekeye daha kararlı bir güç iletimi mümkün olur (Şahin, 2020).

Güç elektroniği, türbinin jeneratörüne bağlanan doğrusal olmayan yüklerin, dinamik güç kalitesi sorunlarını önlemek için kontrol edilmesini sağlar. Bu kontrol yöntemleri sayesinde, türbinin şebekeye uyumlu şekilde enerji vermesi sağlanır ve enerji kayıpları azaltır (Pao & Johnson, 2011).

Ayrıca, güç elektroniği tabanlı sistemler sayesinde, türbin jeneratöründen elde edilen enerjinin verimli bir şekilde kontrol edilmesi, türbinin genel

verimliliğini artırır ve sistemin uzun vadede daha kararlı çalışmasını sağlar. Güç elektroniği bileşenlerinden özellikle çeviriciler ve doğrultucuların doğru çalışması, türbinin çıkış gücünün sürekli olarak optimize edilmesine katkıda bulunur.

Sonuç olarak, güç elektroniği tabanlı kontrol yöntemleri, rüzgar türbinlerinin şebekeye daha verimli enerji iletmesini sağlar ve türbinin ömrünü uzatır. Bu kontrol sistemlerinin entegrasyonu, rüzgar türbinlerinin dinamik çevresel koşullara hızlı bir şekilde adapte olmasını sağlayarak, enerji üretimindeki kararlılığı artırır.

3.3. PID (Oran-İntegral-Türev) Kontrolü

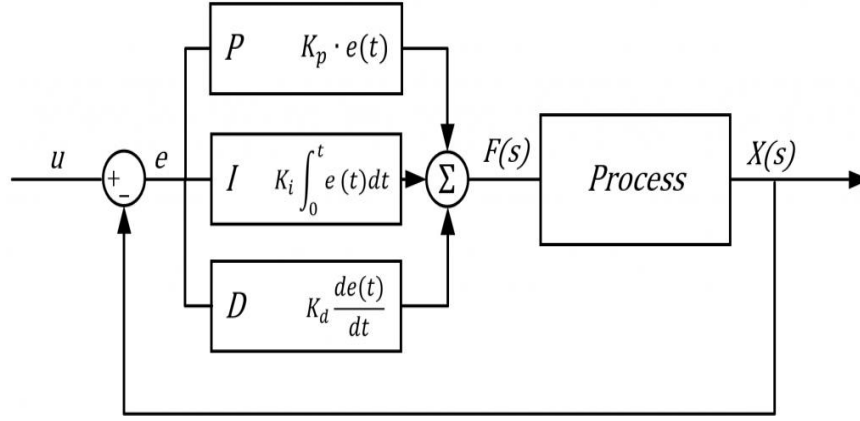
PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrol yöntemleri, rüzgar türbinlerinin verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için sıklıkla kullanılan denetim sistemleridir. Bu yöntem, türbinin çalışma koşullarını sürekli olarak izler ve optimize eder. PID kontrol algoritması, türbinin rotor hızını, kanat açısını ve diğer önemli parametreleri hassas bir şekilde kontrol ederek, türbinin rüzgar hızındaki değişimlere uyum sağlamasını ve enerji üretiminde kararlılığı artırmasını sağlar (Pao & Johnson, 2009).

PID kontrolörleri, türbinin sistem kararlılığını ve güvenliğini sağlamak için de kullanılır. PID kontrol algoritmalarının rüzgar türbinlerinde entegre kanat açısı ayarlarıyla birlikte nasıl verimli çalıştığı incelenmiştir. Bu tür bir entegrasyon, enerji üretiminde yüksek verimlilik sağlar ve türbinin her türlü çevresel koşulda daha stabil çalışmasına olanak tanır (Sayyad, Ramesh & Attarde, 2024).

Rüzgar türbini sistemlerinin performansını artırmak amacıyla sistematik bir PID ayarlama yöntemi geliştirilmiştir. Çalışma, geleneksel PID denetleyicisinin optimizasyonunu sağlayarak türbinin dinamik tepkisini iyileştirmeyi ve enerji üretim verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Simülasyonlar ve deneysel analizler, önerilen PID ayarlama stratejisinin, türbinin kararlılığını artırarak daha hızlı ve hassas bir kontrol sağladığını göstermektedir (Bossanyi, 2000).

Şekil 10'da görüldüğü gibi ve Eşitlik 1 de verilen PID denetleyici (Oransal, integral, türevsel) kontrol geri besleme sistemlerinden oluşur. P, mevcut hatayı hedef değere orantılı şekilde düzeltir. I, zaman içinde birikmiş olan hatayı düzeltir. D, hata değişiminin türevidir ve hata hızının kontrolünü sağlar.

$$u(t) = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(t) dt + Kp \frac{de}{dt} \quad (1)$$



Şekil 10. PID kontrol blok şeması

3.4. İleri Kontrol Yöntemleri

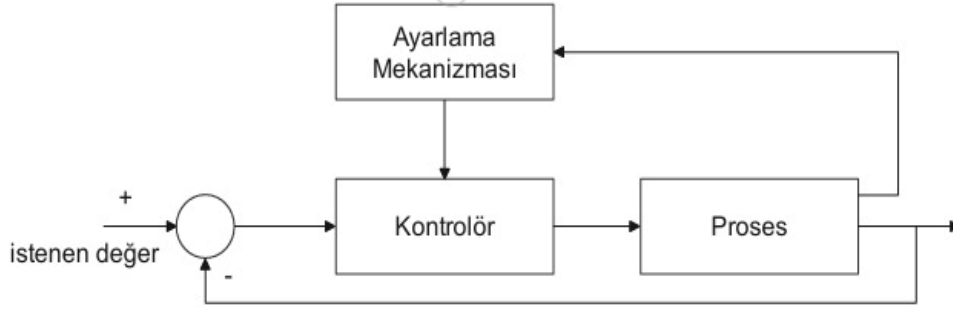
3.4.1. Adaptif Kontrol

Adaptif kontrol, rüzgar türbinlerinin çevresel değişimlere hızlı şekilde uyum sağlayarak verimli çalışmasını sağlamak için kritik bir kontrol yöntemidir. Rüzgar türbinleri, rüzgar hızındaki dalgalanmalar, çevresel koşullardaki değişiklikler ve sistemdeki olası arızalar nedeniyle sürekli olarak değişen çalışma koşullarına sahiptir. Adaptif kontrol, bu değişikliklere dinamik yanıt vererek türbinlerin optimal performansta çalışmasını garanti eder (Bossanyi, 2003).

Rüzgar türbinlerinde aktüatör arızalarına karşı dayanıklı adaptif bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Bu strateji, rotor hızındaki izleme hatalarını düzenlerken, rüzgar dalgalanmaları ve model doğrusal olmayan belirsizlikleri etkili bir şekilde telafi eder. Sonuç olarak, türbin performansı daha stabil hale gelir ve enerji üretimi optimize edilir (Chen, 2018).

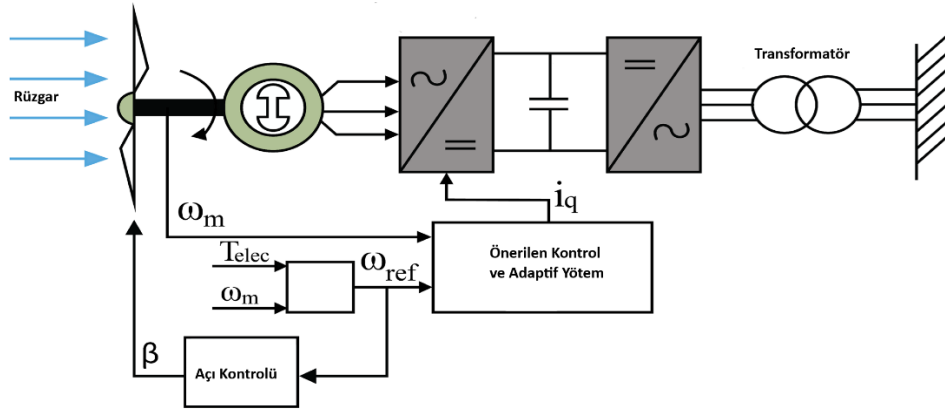
Adaptif anahtarlama kontrol stratejisi, rüzgar türbini jeneratörlerinde frekans yanıtı gerekliliklerini karşılamak amacıyla geliştirilmiştir. Güç dengesizliği tespit edildikten sonra, gerekli frekans yanıtı sağlamak için yalnızca gerektiğinde frekans destek modu etkinleştirilir. Bu yaklaşım, gereksiz anahtarlamalardan kaçınmayı ve türbinin daha verimli çalışmasını sağlar (Singh, 2021).

Şekil 11'de blok diyagramında, sistem dinamiklerine bağlı olarak kontrol performansını gerçek zamanlı optimize eden bir yapı gösterilmektedir. İstenen değer ile sistem çıkışı arasındaki hata, denetleyiciye iletilir ve denetleyici sistem girişini belirler. Sistem çıkışı geri besleme yoluyla denetleyiciye aktarılırken, ayarlama mekanizması denetleyici parametrelerini gerçek zamanlı güncelleyerek değişken veya belirsiz koşullarda performansın korunmasını sağlar.



Şekil 11. Adaptif kontrol blok şeması (Dirim, 2010)

Adaptif kontrol yöntemleri, rüzgar türbinlerinin çevresel değişimlere ve sistemsel aksaklıklara karşı hızlı ve etkin bir şekilde tepki vermesini sağlar. Bu kontrol stratejileri, enerji üretiminin artırılmasına, türbin performansının optimize edilmesine ve sistem kararlılığının korunmasına katkıda bulunur. Şekil 12’de, rüzgar türbininde kullanılan adaptif kontrol yönteminin genel yapısı gösterilmektedir. Sistemde enerji dönüşüm süreçleri kontrol edilmekte, farklı kontrol teknikleri bir arada kullanılarak sistem verimliliği artırılmakta ve kanat açısının düzenlenmesiyle maksimum güç noktasına ulaşılması hedeflenmektedir. Elde edilen enerji ise şebekeye aktarılmaktadır.



Şekil 12. Adaptif kontrol sistemi (Yesudhas, 2022)

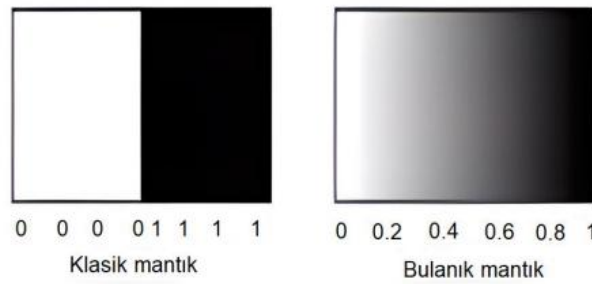
3.4.2. Bulanık Mantık

Bulanık Mantık Kontrolü (BMC), doğrusal olmayan sistemler ve belirsiz çevresel koşullar altında etkin bir kontrol stratejisi olarak rüzgar türbinlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Geleneksel kontrol yöntemlerine göre daha esnek ve adaptif bir yapıya sahip olan BMC, rüzgar hızındaki ani değişimlere ve sistemsel belirsizliklere karşı türbinlerin performansını artırmak için idealdir (Yılmaz & Şahin, 2023).

Rüzgar türbinlerinde bulanık mantık kontrolü, özellikle rotor kanat açısı, rüzgar yönü ve güç çıktısı gibi kritik parametrelerin optimizasyonunda kullanılır. Bu kontrol yaklaşımı, rüzgar hızındaki değişimlere hızlı bir şekilde adapte olabilme yeteneği sayesinde türbinlerin sürekli olarak optimum performansta çalışmasını sağlar (Almaged, 2023).

Bulanık mantık kontrolü, dinamik ve karmaşık sistemlerde çevresel değişikliklere hızlı uyum sağlama ve enerji verimliliğini artırma açısından oldukça faydalıdır. Sistem belirsizliklerini yönetmedeki başarısı ve adaptif yapısı, türbinlerin her koşulda yüksek verimle çalışmasına olanak tanır (Kestane & Ateş, 2022). Bu yöntemin en büyük avantajı, karmaşık ve kesin sınırlarla ayrılmamayan sistemlerde klasik mantığa kıyasla daha etkili ve güvenilir bir kontrol sağlamasıdır.

Şekil 13’de Klasik mantık, değişkenlerin yalnızca iki kesin değerden birine—doğru ya da yanlış, 0 ya da 1—ait olabildiği katı bir yapı sunarken, bulanık mantık gerçek dünya sistemlerinde karşılaşılan belirsizlikleri ve ara durumları modelleyebilme yeteneği ile daha esnek bir yaklaşım sağlamaktadır.



Şekil 13. Klasik ve bulanık mantık

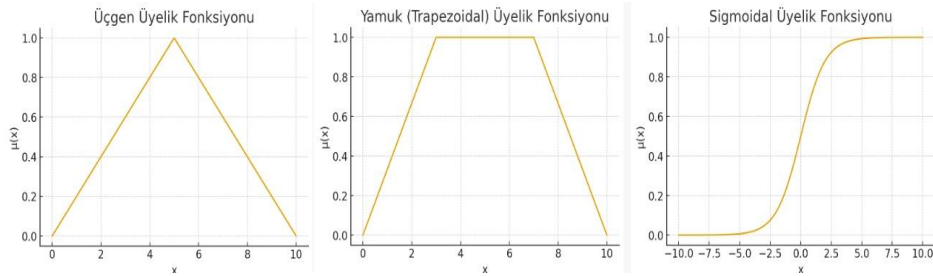
Rüzgar türbinlerinin kanat kontrolü için PID ve bulanık mantık (fuzzy logic) denetleyicilerinin karşılaştırmalı olarak kullanıldığı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmada her iki kontrolörün türbinin pervane açısını optimize etme ve enerji verimliliğini artırma becerileri incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, PID denetleyicisinin hızlı yanıtlar verdiğini, ancak bulanık mantık denetleyicisinin daha esnek ve kararlı bir kontrol sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, bulanık mantık denetleyicisinin rüzgar türbinlerinin verimliliğini artırmada daha etkili bir çözüm sunduğu bulunmuştur (Kaya, 2013).

Rüzgar türbini kanat kontrolünü optimize etmek için bulanık mantık kontrolü ile pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning - RL) birleştirilmiştir. Bu hibrit yöntem, türbinin pervane açısını dinamik olarak ayarlayarak enerji üretimini artırmayı ve mekanik yükleri azaltmayı amaçlamaktadır. Yapılan çalışmalar, bu yaklaşımın rüzgar türbinlerinin verimliliğini artırmada ve kontrol kararlılığını iyileştirmede etkili olduğunu ortaya koymaktadır (Yılmaz ve ark., 2014).

Ayrıca, değişken hızlı rüzgar türbinleri için integral tipi bulanık mantık tabanlı bir denetleyici tasarlanmıştır. Bu yöntem, rüzgar hızındaki dalgalanmalara dinamik olarak uyum sağlayarak enerji üretim verimliliğini artırmayı ve türbinin kararlılığını iyileştirmeyi hedeflemektedir. Yapılan çalışmalar, bu yaklaşımın değişken hızlı rüzgar türbinlerinin kontrol performansını artırmada etkili olduğunu göstermektedir (Demir, 2015).

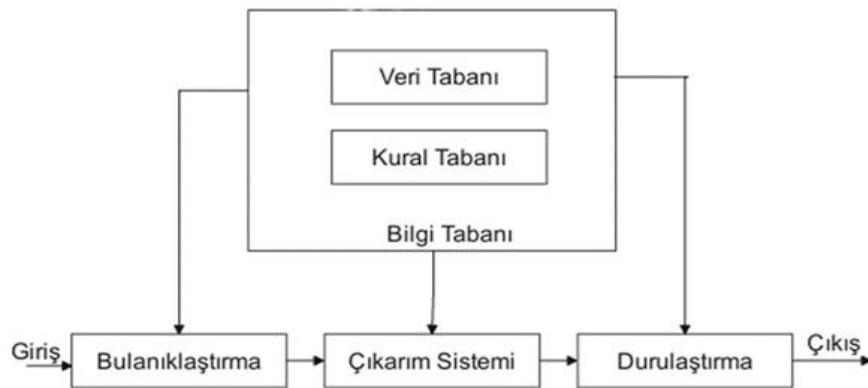
Rüzgar türbini rüzgar yönü kontrol sistemi için model prediktif kontrol (MPC) performansını iyileştirmek amacıyla, akıllı bulanık çıkarım tabanlı derin optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, türbinin rüzgar hareketini optimize ederek enerji verimliliğini artırmayı ve sistemin kararlılığını sağlamayı hedeflemektedir. Yapılan simülasyon çalışmaları, önerilen derin optimizasyon yaklaşımının, geleneksel MPC yöntemlerine kıyasla daha yüksek performans ve hızlı tepki sağladığını göstermektedir (Özdemir, 2013).

Bulanık mantık belirsizliği aralıktaki tüm değerlerle ifade edilir. Bu amaçla kullanılan üyelik fonksiyonları, bir değişkenin ilgili sözel kavrama (soğuk, sıcak vb.) hangi oranda ait olduğunu belirleyen matematiksel yapılardır. En yaygın üyelik fonksiyonları; üç parametrelili üçgen, dört parametrelili yamuk ve geçişi yumuşak biçimde tanımlayan sigmoidal fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar, bulanık mantığın gerçek dünya belirsizliklerini modellendirmesinde önemli rol oynar. Şekil 14’de üyelik fonksiyonları gösterilmiştir (Yılmaz, 2023). Biraz kısalt



Şekil 14. Üyelik Fonksiyonları

Şekil 15’de bulanık kontrol sisteminin temel çalışma prensipleri gösterilmektedir. Sisteme giren veriler, ilk aşamada bulanıklaştırıcı blok tarafından işlenir; bu işlem, sayısal değerleri bulanık kavramlara dönüştürür. Ardından, bulanık veriler çıkarım sistemine iletilir. Çıkarım motoru, sistemin bilgi tabanında yer alan kural ve veri tabanını kullanarak, mevcut duruma en uygun yanıtı üretir. Son olarak, çıkarım motorundan gelen sonuç, beyazlaştırıcı blok tarafından tekrar sayısal bir değere dönüştürülür. Bu süreç, bulanık mantığın gerçek dünyadaki belirsizlikleri daha esnek bir şekilde yönetmesini sağlar (Özdemir, 2013; Kaya, 2013).



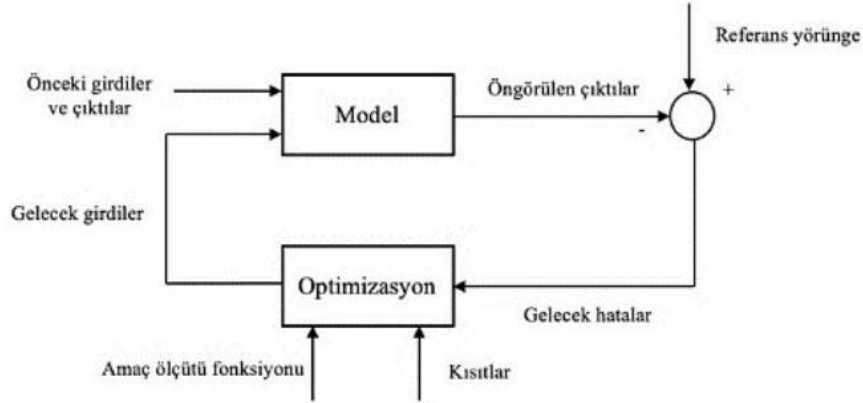
Şekil 15. Bulanık mantık blok diyagramı (Yılmaz &Şahin, 2023)

3.4.3. Model Öngörücü Kontrol

Model Öngörücü Kontrol (MPC, Model Predictive Control), rüzgar türbinlerinin verimli çalışmasını sağlamak için etkili bir kontrol stratejisidir. MPC, gelecekteki sistem davranışlarını tahmin etmek ve bu tahminlere dayanarak mevcut kontrol parametrelerini optimize etmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, rüzgar türbinlerinin çevresel değişikliklere ve sistemsel belirsizliklere uyum sağlamasını sağlayarak, türbinlerin performansını önemli ölçüde artırabilir. (Yaren&Kizir, 2022)

Model Öngörücü Kontrol (MPC), rüzgar türbinlerinin verimliliğini artırmak ve sistemin çalışma koşullarını optimize etmek için geleceğe yönelik güçlü bir kontrol stratejisi sunmaktadır. Bu yöntem, türbinlerin verimliliğini optimize ederken, aynı zamanda çevresel değişimlere uyum sağlamalarını da kolaylaştırmaktadır.

Model öngörücü kontrol sistemi, istenen referans yörüngesine ulaşmayı hedefler. Sistem Şekil 16'da görüldüğü gibi, önce referans yörüngesini belirler, ardından mevcut ve önceki giriş-çıkış verilerini modele dahil eder. Bu model, aynı zamanda optimizasyon sürecinden gelen girdileri de kullanır. Optimizasyon, bir amaç fonksiyonu ve belirli kısıtlar çerçevesinde gerçekleştirilir ve bu süreçte en uygun kontrol sinyalleri belirlenir. Elde edilen bu kontrol sinyalleri, sistemin performansını iyileştirmek amacıyla sürekli olarak güncellenir. Böylece, sistem hem geçmiş verilerden faydalanır hem de sürekli olarak optimize edilerek referans yörüngesine en yakın şekilde hareket eder.



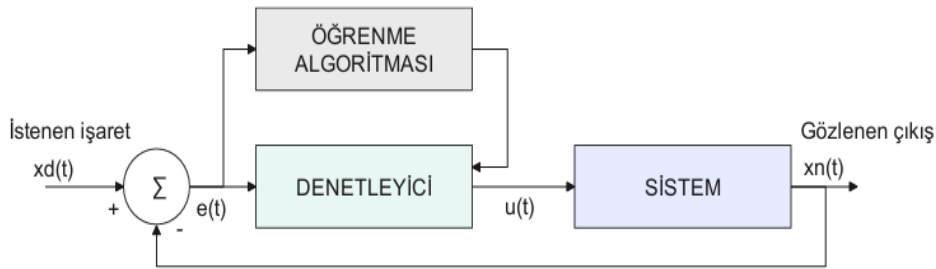
Şekil 16. Model öngörücü kontrol sistemi

3.4.3. Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (ANN), karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için kullanılan bir yapay zeka yöntemidir. Rüzgar türbinlerinde ANN'ler, rüzgar hızı ve yönü gibi çevresel veriler ile türbinin performansını analiz etmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, türbinlerin enerji üretimini tahmin etmek, arıza tespiti yapmak ve verimliliği artırmak için

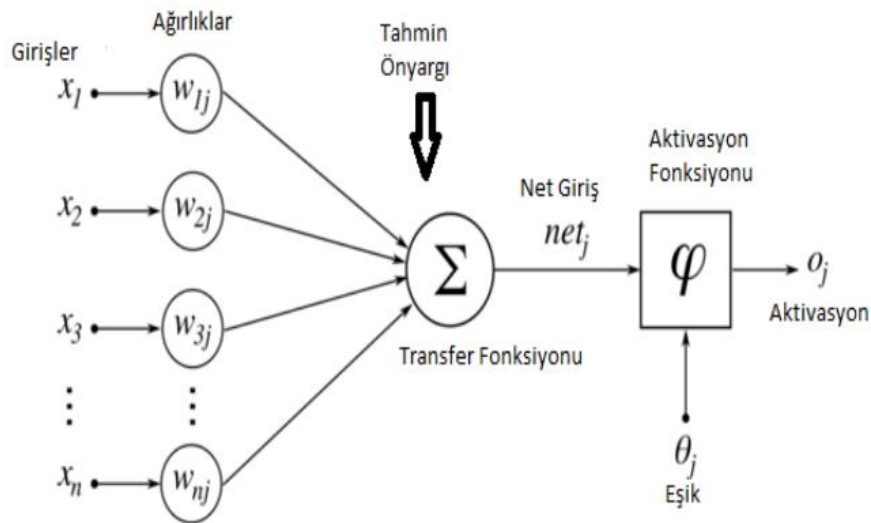
oldukça etkilidir. Rüzgar türbinlerinde çevresel koşulların etkisini analiz etmek ve enerji üretim verilerini tahmin etmek için güçlü bir araçtır. Bu yöntem, türbinlerin uzun vadeli enerji üretim kapasitesini artırırken, verimliliği optimize etmek için önemli bir strateji sunmaktadır. Yapay sinir ağı kullanımı, rüzgar türbinlerinin dinamik koşullara adaptasyonunu hızlandırarak, enerji üretiminde maksimum verim elde edilmesine olanak tanır.

Şekil 17’de rüzgâr türbini için kullanılan yapay sinir ağı tabanlı kapalı çevrim kontrol blok diyagramı göstermektedir. Diyagramda yer alan istenen işaret, sistemin ulaşması hedeflenen referans değeri ifade eder ve bu sinyal hem denetleyiciye hem de denetleyicinin davranışını uyarlamalı olarak güncelleyen öğrenme algoritmasına uygulanır. Denetleyici, referans ile ölçülen çıkış arasındaki farktan elde edilen hata sinyalini işleyerek türbin sistemine gönderilen kontrol sinyalini üretir. Türbin sisteminden elde edilen gözlenen çıkış ise sensörler aracılığıyla geri besleme hattı üzerinden yeniden denetleyiciye iletilir. Bu yapı sayesinde yapay sinir ağı, sistem davranışını sürekli öğrenerek kontrol performansını dinamik olarak iyileştirmektedir.



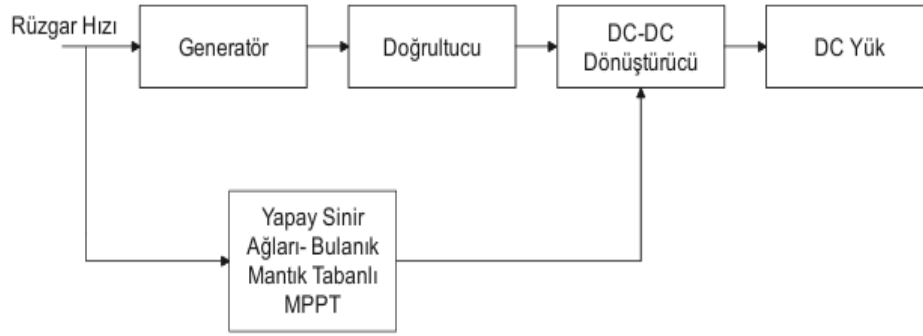
Şekil 17. Yapay sinir ağları denetleyici sistemi

Şekil 18’de yapay sinir ağı modeli gösterilmektedir. Girdiler, ilgili ağırlık katsayılarıyla çarpılarak toplanır ve bu toplam değere önyargı (bias) eklenir. Elde edilen net girdi, aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek sistemin çıktı değeri oluşturulur.



Şekil 18. Yapay sinir ağı modeli (Öztürk, & Şahin, 2018)

Şekil 19’de rüzgâr türbinleri için kullanılan Bulanık Mantık tabanlı MPPT yapısı ile Yapay Sinir Ağı (ANN) modelinin genel çalışma prensibi gösterilmektedir. Bu yapıda sensörlerden alınan anlık rüzgâr hızı, gerilim ve akım gibi giriş verileri hem bulanık mantık denetleyicisine hem de ANN modeline iletilmektedir. Bulanık Mantık denetleyicisi, tanımlanmış üyelik fonksiyonları ve kural tabanına göre maksimum güç noktasına yönlendiren kontrol sinyalini üretirken; ANN modeli, eğitim verilerinden öğrendiği ilişkilere dayanarak sistemin optimum çalışma noktasını tahmin etmektedir. Her iki yöntem de rüzgâr hızının hızlı değiştiği durumlarda daha hızlı tepki vererek MPPT performansını artırmakta ve türbinin maksimum güç üretmesini sağlamaktadır. (Aissaoui&Ougli&Tidhaf, 2021),



Şekil 19. Bulanık mantık tabanlı MPPT ve Yapay sinir ağı modeli
(Aissaoui&Ougli&Tidhaf, 2021)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılan farklı kontrol yöntemlerinin incelenmesi, türbinlerin değişken rüzgâr koşullarında kararlı, güvenli ve yüksek verimle çalışabilmesi açısından kontrol yapılarının kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur. Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde, uygun şekilde tasarlanmış kontrol stratejilerinin yalnızca enerji üretimini optimize etmekle kalmadığı, aynı zamanda mekanik zorlanmaları azaltarak türbin bileşenlerinin ömrünü uzattığı ve bakım maliyetlerini düşürdüğü görülmektedir.

Modern rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan kanat açısı kontrolü, rüzgâr yönüne hizalama sistemleri, maksimum güç noktası takibi (MPPT) algoritmaları ve PID tabanlı kontrol yapıları, enerji sürekliliği ve işletme güvenliğini artıran temel yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Klasik PID denetleyicilerinin basit yapıları ve düşük hesaplama maliyetleri sayesinde endüstride yaygın biçimde kullanıldığı, ancak değişken ve belirsiz rüzgâr koşullarında performanslarının sınırlı kalabildiği literatürde rapor edilmektedir. Buna karşılık, adaptif kontrol, bulanık mantık ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımların rüzgâr hızındaki ani değişimlere daha hızlı uyum sağlayarak kontrol hassasiyetini artırdığı; ancak bu yöntemlerin daha yüksek hesaplama yükü ve tasarım karmaşıklığı gerektirdiği görülmektedir.

Genel bulgular, gelişmiş ve akıllı kontrol tekniklerinin rüzgâr türbinlerinde arıza oranlarını azalttığını, enerji kalitesini iyileştirdiğini ve sistem verimliliğini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Gelecekte, klasik kontrol yöntemlerinin yapay sinir ağları, bulanık mantık ve adaptif algoritmalar ile birlikte kullanıldığı hibrit kontrol yapılarının geliştirilmesiyle, rüzgâr türbinlerinin kendi kendini optimize edebilen daha akıllı sistemlere dönüşmesi mümkün görünmektedir. Bu yaklaşım, yenilenebilir enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği, güvenilirliği ve uzun vadeli performansı açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Etik Beyan

Bu çalışma etik beyan gerektirmemektedir.

KAYNAKÇA

- Abouheaf, M., Gueaieb, W., & Sharaf, A. (2018). Model-free adaptive learning control scheme for wind turbines with doubly fed induction generators. *IET Renewable Power Generation*, 12(14), 1675–1686.
- Acaravcı, A., & Erdoğan, S. (2018). Yenilenebilir enerji, çevre ve ekonomik büyüme ilişkisi: Seçilmiş ülkeler için ampirik bir analiz. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 13(1), 53–64.
- Aissaoui, H. E., Ougli, A. E., & Tidhaf, B. (2021). Neural networks and fuzzy logic based maximum power point tracking control for wind energy conversion system. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(2), 586–592.
- Almaged, M., Mahmood, A., & Alnema, Y. H. S. (2023). Design of an integral fuzzy logic controller for a variable-speed wind turbine model. *Journal of Robotics and Control*, 4(6), 762–768.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık mantık: Bulanık denetim. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 64, 76–81.
- Altınsoy, M., & Bal, G. (2019). Uzun dönem rüzgâr hızı tahmininde yapay sinir ağlarının kullanımı ve performans incelemesi. *Mesleki Bilimler Dergisi*, 8(1), 21–28.
- Boztaş, A., Demirbaş, O., & Şahin, M. E. (2021). Investigation of vertical axis wind turbines and the design of their components. *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 6(2), 64–72.
- Bossanyi, E. A. (2000). The design of closed loop controllers for wind turbines. *Wind Energy*, 3(3), 149–163.
- Çabuk, A. S., & Üstün, Ö. (2023). Thermal optimization of a radial flux permanent magnet synchronous motor with axial division. *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 3(2), 61–68.
- Çelik, H., Karakaya, F., & Toker, O. (2022). Wind energy potential and renewable energy policies in Turkey: A comprehensive assessment. *Renewable Energy*, 182, 1103–1113.
- Çetin, S. K., Genç, M. S., & Daldaban, F. (2019). Dikey eksenli rüzgâr türbinleri: Küçük ölçekli uygulamalar. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 539–551.
- Dirim, S. N. (2010). Adaptif kontrol sistemleri ve gıda endüstrisindeki bazı uygulamaları. *Akademik Gıda*, 8(3), 43–46.
- Döşoğlu, M. (2016). Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde MPPT algoritmalarının uygulanması ve performans analizi.

Elibüyük, U., & Üçgöl, İ. (2014). Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri. *Yekarum*, 2(3).

Goswami, D. Y., & Kreith, F. (2020). *Handbook of renewable energy technology and economics*. CRC Press.

Govinda, C. V., Udhay, S. V., Rani, C., Wang, Y., & Busawon, K. (2018). A review on various MPPT techniques for wind energy conversion system. In *Proceedings of the IEEE ICCPEIC Conference* (pp. 310–326).

Hannan, M. A., Parvin, K., Kit, Y. K., Jern, K. P., & Hoque, M. M. (2019). Particle swarm optimization based fuzzy logic MPPT inverter controller for grid-connected wind turbine. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(1), 164–174.

Hau, E., & Von Renouard, H. (2006). *Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics*. Springer.

Huang, G., & Yang, L. (2016). Design and optimization of emergency braking systems for wind turbines. *Renewable Energy*, 93, 73–81.

URL1: Link: <https://www.fenusbilim.com/2022/09/04/8-sinif-1-unite-iklim-ve-hava-olaylari/>

URL2: Link: <https://web.itu.edu.tr/~kaymak/windpower.html>

Johnson, K. E., Pao, L. Y., Balas, M. J., & Fingersh, L. J. (2006). Control of variable-speed wind turbines: Standard and adaptive techniques for maximizing energy capture. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(3), 70–81.

Kestane, Ö., & Ateş, A. M. (2013). CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi Otonom rüzgâr türbinlerinde bulanık mantıkla kanat açış kontrolü uygulaması.

Kopuri, N. T. S. (2024). *Pitch control of wind turbines using PID and fuzzy logic controllers* (Doctoral dissertation). Flinders University.

Kusiak, A., Zhang, Z., & Verma, A. (2013). Prediction, operations, and condition monitoring in wind energy. *Energy*, 60, 1–12.

López-Flores, D. R., Márquez-Gutierrez, P. R., Baray-Arana, R. E., & Ramirez-Alonso, G. (2024). Efficient and fast wind turbine MPPT algorithm using TS fuzzy logic and optimal relation methods. *IEEE Latin America Transactions*, 22(7), 612–619.

Lozano Silva, J. (2019). *Artificial Neural Network Based Reinforcement Learning for Wind Turbine Yaw Control*.

Muljadi, E., & Butterfield, C. P. (2001). Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(1), 240–246.

- İlhan, A., Bilgili, M., & Şahin, B. (2020). Analyses of Current Wind Energy Status of Turkey and its Future Prospect. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1059-1072.
- Onat, N., & Ersöz, S. (2011). Analysis of wind climate and wind energy potential of regions in Turkey. *Energy*, 36(1), 148-156.
- Öztürk, K., & Şahin, M. E. (2018). Yapay sinir ağları ve yapay zekâya genel bir bakış. *Takvim-i Vekayi*, 6(2), 25-36.
- Pao, L. Y., & Johnson, K. E. (2011). Control of wind turbines. *IEEE Control systems magazine*, 31(2), 44-62.
- Pao, L. Y., & Johnson, K. E. (2009, June). A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms. In 2009 American Control Conference (pp. 2076-2089). IEEE.
- Pao, L. Y., & Johnson, K. E. (2011). Control of wind turbines. *IEEE Control systems magazine*, 31(2), 44-62.
- Rafaat, S. M., & Hussein, R. (2018). Power maximization and control of variable-speed wind turbine system using extremum seeking, *Journal of Power and Energy Engineering*, 6(1), 51-69.
- Reddy, P.R.K., Rao, K.M., Kishore, P.B. (2015). Wind Turbine Pitch and Yaw Control. *International Journal of Science, Technology & Management*, 04(01), 618-623.
- Rende, I. (2023). Sürdürülebilir enerjinin ülke ekonomileri üzerine etkisi (Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- Saenz-Aguirre, A., Zulueta, E., Fernandez-Gamiz, U., Lozano, J., & Lopez-Guede, J. M. (2019). Artificial neural network based reinforcement learning for wind turbine yaw control. *Energies*, 12(3), 436.
- Sayyad, J. K., Ramesh, B. T., & Attarde, K. (2024, July). A Systematic PID Tuning for Enhanced Performance in a Wind Turbine Systems. In 2024 Asia Pacific Conference on Innovation in Technology (APCIT) (pp. 1-7).
- Shao, Y., Liu, J., Huang, J., Hu, L., Guo, L., & Fang, Y. (2022). The implementation of fuzzy PSO-PID adaptive controller in pitch regulation for wind turbines suppressing multi-factor disturbances, *Frontiers in Energy Research*, 9, 828281.
- Şahin, M. E. (2020). Comparison of IG And DFIG for Wind Power Generation Systems. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 230-241.
- Şekerciler, E., Sermet, N., & Ünal, B. K. Kestirim Ufkunun Model Öngörülü Kontrol Yaklaşımı ile Uyarlanabilir Hız Kontrolü Tasarımına Etkisi
- Şenel, M. C., & Koç, E. (2014). Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin dinamik davranışı-teorik bir model. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 5(1), 69-80.

Volker Quaschning: Regenerative Energiesysteme. (2007). Hanser Verlag, München.

Yaren, T., & Kizir, S. (2022). Model Öngörülü Kontrol ile DA Motor Konum Kontrolü. Duzce University Journal of Science and Technology, 10(3), 1151-1164.

Yesudhas, A. A., Joo, Y. H., & Lee, S. R. (2022). Reference model adaptive control scheme on PMVG-based wecs for MPPT under a real wind speed. Energies, 15(9), 3091.

Yıldırım, H. H., & Aksu, M. Rüzgâr Ve Güneş Enerjisi Santral Yatırımlarının Ekonomik Performanslarının Değerlendirilmesi. Uluslararası Bankacılık Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, 4(1), 53-75.

Yılmaz, H., & Şahin, M. E. (2023). Bulanık Mantık Kavramına Genel Bir Bakış. Takvim-i Vekayi, 11(1), 94-129.