



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT
TAHRİK SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL
MODELLEMESİ VE BULANIK MANTIK İLE
KONTROLÜ**

Bilal BEZMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Bilal BEZMEZ tarafından hazırlanan “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Kanat Tahrik Sisteminin Matematiksel Modellemesi ve Bulanık Mantık ile Kontrolü” adlı tez çalışması 02/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ziya ŞAKA
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Danışman

Dr. Koray KAVLAK
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Dr. Ziya ÖZÇELİK
Selçuk Üniversitesi

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Bilal BEZMEZ
02/09/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TAHRİK SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ VE BULANIK MANTIK İLE KONTROLÜ

Bilal BEZMEZ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Koray KAVLAK

2025, 72 Sayfa

**Jüri
Dr. Koray KAVLAK
Prof. Dr. Ziya ŞAKA
Dr. Ziya ÖZÇELİK**

Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbini sistemleri için kullanılan klasik PI denetleyicilerine alternatif olarak, aerodinamik duyarlılığa ($dP/d\theta$) dayalı kazanç zamanlamalı Bulanık-PI denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Mevcut literatürde rotor hızı veya sabit çalışma bölgelerine göre yapılan kazanç ayarlamalarına karşın, bu çalışmada türbinin aerodinamik davranışına duyarlı bir kontrol yapısı önerilmiştir. Geliştirilen yöntem kapsamında, hata (e), hata değişimi (de) ve aerodinamik duyarlılık ($dP/d\theta$) değişkenlerini giriş olarak alan iki adet Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemi (FIS) oluşturulmuş ve K_p ile K_i kazançları ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Önerilen bulanık denetleyici, NREL 5MW referans türbin modeli kullanılarak Simulink ortamında test edilmiş ve klasik PI ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin aşırı salınımları azalttığını, geçici rejim yanıtlarını iyileştirdiğini ve daha kararlı bir rotor hız kontrolü sağladığını göstermiştir. Ayrıca, bu kontrol yapısının rüzgâr hızı değişimlerine daha duyarlı ve adaptif olduğu gözlemlenmiştir. Bulanık-PI ve S-Bulanık PI kontrolcülerinin, PI kontrolcüsüne göre daha az salınım ve daha hızlı stabilizasyon sağladığı, özellikle rüzgâr hızındaki ani değişikliklere karşı daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma, aerodinamik duyarlılık tabanlı kazanç programlamasının, rüzgâr türbini kontrol sistemlerinde uygulanabilir ve etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koymuş, türbinin aerodinamik davranışına duyarlı bir kontrol stratejisinin avantajlarını vurgulamıştır. Sonuçlar, Bulanık-PI denetleyicilerin, türbin sistemlerinin daha verimli ve güvenilir çalışmasını sağlamak için özellikle büyük türbinlerde tercih edilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik duyarlılık, bulanık mantık denetleyici, kanat açısı kontrol sistemi, kazanç zamanlaması, PI denetleyici.

ABSTRACT

MS THESIS

**MATHEMATICAL MODELING AND FUZZY LOGIC CONTROL OF
HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE PITCH
DRIVE SYSTEM**

Bilal BEZMEZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Koray KAVLAK

2025, 72 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Koray KAVLAK

Prof. Dr. Ziya ŞAKA

Asst. Prof. Dr. Ziya ÖZÇELİK

In this thesis, an alternative Fuzzy-PI controller based on aerodynamic sensitivity ($dP/d\theta$) for wind turbine systems is designed, replacing traditional PI controllers. While existing literature commonly adjusts gains based on rotor speed or fixed operating regions, this study proposes a control structure that is sensitive to the turbine's aerodynamic behavior. The developed method involves two Sugeno-type Fuzzy Inference Systems (FIS) that take error (e), change in error (de), and aerodynamic sensitivity ($dP/d\theta$) as inputs, and calculate K_p and K_i gains separately.

The proposed fuzzy controller was tested in the Simulink environment using the NREL 5MW reference wind turbine model and compared with the classical PI controller. The simulation results demonstrated that the proposed method reduced oscillations, improved transient state responses, and provided more stable rotor speed control. Furthermore, it was observed that this control structure is more sensitive and adaptive to wind speed changes. The Fuzzy-PI and S-Fuzzy-PI controllers achieved less oscillation and faster stabilization compared to the PI controller, particularly under rapidly changing wind speeds.

This study demonstrates that aerodynamic sensitivity based gain scheduling is a feasible and effective approach in wind turbine control systems and emphasizes the advantages of a control strategy that is sensitive to the turbine's aerodynamic behavior. The results suggest that Fuzzy-PI controllers can be preferred, especially in large turbines, to ensure more efficient and reliable operation of turbine systems.

Keywords: Aerodynamic sensitivity, fuzzy logic controller, gain scheduling, PI controller, pitch control system.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezim süresince yapıcı geri bildirimleri ve tez yazım aşamasındaki yönlendirmeleri için danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK'a teşekkür ederim.

Bilal BEZMEZ
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	4
1.2. Tezin Önemi	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
2.1. Doğrusal Tahrik Sistemleri.....	6
2.2. Döner Tahrik Sistemleri.....	8
2.3. Kanat Elemanı Momentum (BEM) Modeli:.....	12
2.4. MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	16
2.5. Adaptif Kontrol.....	20
3. RÜZGAR TÜRBİNİ MATEMATİKSEL MODELLEMESİ.....	26
3.1. Rüzgâr Türbini Çalışma Bölgeleri.....	28
3.2. Aerodinamik Model.....	29
3.3. Mekanik Şaft Modeli	32
3.4. Kanat Açısı Eyleyici Modeli.....	34
4. RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT AÇISI KONTROLCÜ TASARIMI.....	36
4.1. Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking, MPPT).....	38
4.1.1. Değişken rüzgâr hızlarında sabit kanat açısı-rotor hızı ile PI kontrolcü tasarımı.....	40
4.1.2. K_p ve K_i değerlerinin değişken sistem parametrelerine göre hesaplanması	42
4.2. Değişken Rüzgâr Hızlarında Kanat Açısı Değişimi ile Güç Kontrolü	45
4.2.1. Aerodinamik duyarlılık kullanılarak PI kontrolcü tasarımı	46
4.2.2. Kanat Açısı Duyarlılığının Doğrusallaştırılması	51
4.2.3. Aerodinamik duyarlılık ile Bulanık-PI kontrolcü tasarımı	54
5. SİMÜLASYON SONUÇLARI	60
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
6.1. Sonuçlar	67
6.2. Öneriler	68
KAYNAKÇA.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$dP/d\theta$	Aerodinamik duyarlılık
e	Hata
de	Hata değişim oranı
K_p	Oransal kazanç
K_i	İntegral kazanç
C_p	Güç katsayısı
C_{pmax}	Maksimum güç katsayısı
λ	Uç hız oranı
λ_{opt}	Optimum uç hız oranı
β	Kanat açısı
\dot{m}	Hava debisi
V	Rüzgâr hızı
ρ	Hava yoğunluğu
S	Rotor süpürme alanı
P_{opt}	Optimum güç
P_{aero}	Aerodinamik güç
T_{aer}	Aerodinamik tork
ω	Rotor hızı
ω_{opt}	Optimum rotor hızı
R	Rotor yarıçapı
J_g	Jeneratör ataleti
J_r	Rotor ataleti
J_t	Türbin toplam ataleti
K_g	Jeneratör sönüm katsayısı
K_r	Rotor şaftı toplam sönüm katsayısı
K_t	Türbin toplam sönüm katsayısı
B_r	Rotor şaftı viskoz sürtünme katsayısı

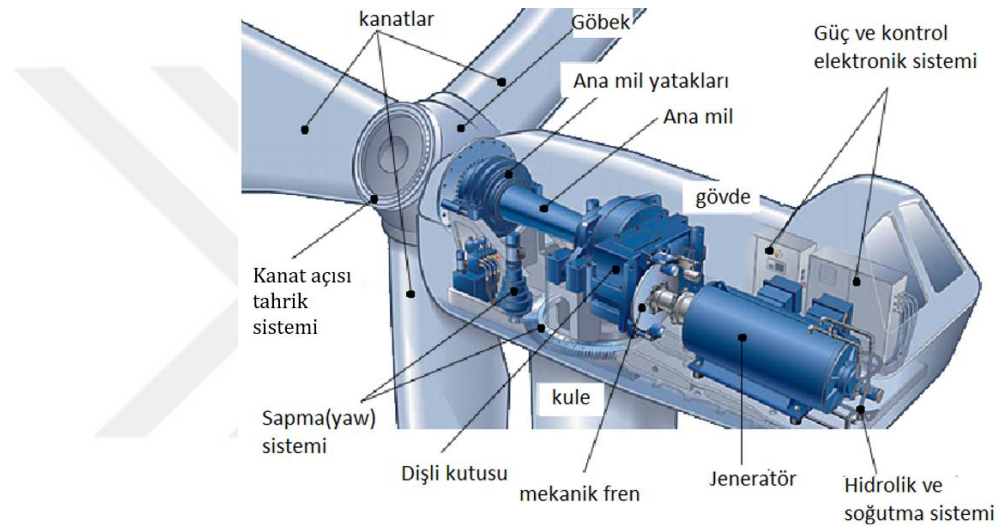
B_g	Jeneratör şaftı viskoz sürtünme katsayısı
J_t	Toplam atalet momenti
K_t	Toplam sönümleme katsayısı
$^\circ$	Derece
$^\circ/s$	Derece/ saniye
m/s	Metre / saniye
n_g	Redüktör oranı
α	Servo motor kazanç katsayısı
τ	Zaman sabiti
ω_n	Doğal frekans
ζ	Sönümleme oranı
M_p	Yüzdece aşım oranı
t_s	Yerleşme süresi
I_{rotor}	Rotor ataleti
I_{Gen}	Jeneratör ataleti
$I_{drivetrain}$	Tahrik sistemi toplam ataleti
θ	Kanat açısı pozisyonu
$\Delta\Omega$	Rotor hız farkı (sapma)
A	Rotor süpürme alanı
$\omega_{\varphi n}$	Sistemin doğal frekansı
ζ_φ	Eşdeğer sönüm oranı
M_φ	Eşdeğer atalet terimi
C_φ	Eşdeğer sönüm terimi
K_φ	Eşdeğer sertlik katsayısı
$GK(\theta)$	Kazanç düzeltme katsayısı

Kısaltmalar

AC	Alternatif akım
ANFIS	Adaptif sinir-bulanık çıkarım sistemi
AS	Aerodinamik duyarlılık
BEM	Kanat elemanı-momentum
DAQ	Veri toplama sistemi
DC	Doğru akım
DDHP	Değişken deplasmanlı hidrolik pompa
DOF	Serbestlik derecesi
FLC	Bulanık mantık denetleyici
GK	Kazanç düzeltmesi
LVDT	Lineer değişken diferansiyel transformatör
MPPT	Maksimum güç noktası takibi
MW	Megavat
NREL	Ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı
OM	Çıkış modülü
P&O	Bozma ve gözlem
PID	Oransal-İntegral-Türev
PMSG	Kalıcı mıknatıs senkron jeneratör
PV	Oransal yön kontrol valfi
PWA	Parçalı doğrusal (affine) model
d/dk	Devir /dakika
RV	Tahliye valfi
S-Fuzzy-PI	Sugeno Bulanık PI
TLBO	Öğretim-öğrenme temelli optimizasyon
TSR	Uç hız oranı
VSVP	Değişken hız değişken kanat açısı
WECS	Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri
WSE	Rüzgâr hızı tahmini

1. GİRİŞ

Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik enerjisini uygun geometride tasarlanmış kanatlar vasıtasıyla mekanik harekete enerjisine dönüştürür. Bu mekanik enerji güç aktarım sistemiyle jeneratöre aktarılır ve elektrik enerjisi üretilir. Rüzgâr türbinleri, karmaşık bir yapıya sahiptir ve birçok alt bileşeni içerir; kanatlar, jeneratör, gövde, şanzıman ve kontrol sistemleri gibi bileşenler Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Her bir bileşenin işlevi, türbinin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak ve elektrik üretimini optimize etmektir.



Şekil 1.1. Rüzgâr türbini bileşenleri (Ma ve diğ., 2021)

Kanatlar, genellikle karbon fiber veya kompozit malzemelerden yapılmış olup, geometrisi rüzgâr enerjisini yakalamak için tasarlanmıştır.

Göbek, kanatların türbin gövdesine bağlandığı kısımdır. Göbek, genellikle gövde içinde yer alır ve kanatların dönüşünü jeneratöre iletmek için bir mekanizma içerir.

Kanat açısı kontrol sistemi, türbinin çalışma esnasında ortaya çıkabilecek aşırı rüzgâr yüklerini azaltmak için tasarlanmıştır. Bu sistem, türbinin kanatlarının aşırı hızda dönmesini önler ve sistemi aşırı rüzgâr yüklerine karşı korur.

Gövde, türbinin en üst kısmındaki yapıdır. Gövde, genellikle jeneratör, şanzıman ve kontrol sistemlerini içerir.

Sapma (Yaw) Sistemi, türbinin kanatlarının rüzgâr yönüne doğru yönlendirilmesini sağlayan bir sistemdir. Bu sistem, kanatların dönme eksenini değiştirerek en uygun rüzgâr alımını sağlar.

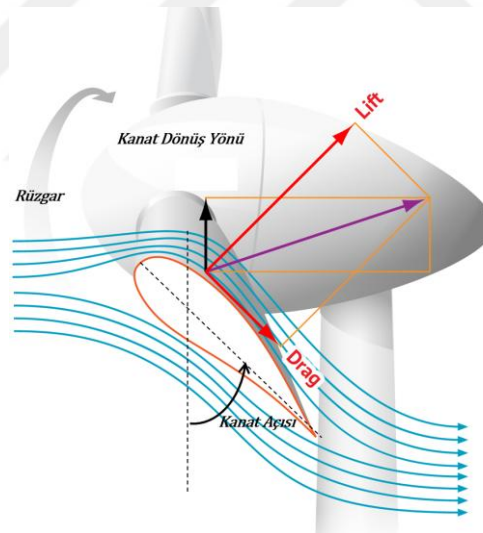
Dişli kutusu, kanatların dönüş hareketini jeneratöre ileten bir mekanizmadır. Dişli kutusu, kanatların düşük hızdaki dönüş hareketini yükselterek jeneratörde elektrik üretimi için uygun hale getirir.

Mekanik fren, acil durumlarda, bakım onarım zamanlarında ve rüzgâr hızının çok fazla olduğu, fırtına zamanlarında türbinin durdurulmasını sağlar.

Jeneratör, rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir bileşendir. Jeneratör, türbinin gövde kısmında bulunur ve türbin kanatlarının dönme hareketini elektrik enerjisine çevirir.

Hidrolik ve soğutma sistemi, türbinin çeşitli bileşenlerinin soğutulması ve hareketli parçalarının yağlanması için kullanılan bir sistemdir. Bu sistem, türbinin verimliliğini ve dayanıklılığını artırır.

Güç ve kontrol elektronik sistemi, türbinin elektrik üretimini kontrol eden ve denetleyen bir sistemdir. Bu sistem, jeneratör çıkışını düzenler, türbinin performansını ayarlar ve güvenlik önlemlerini sağlar.

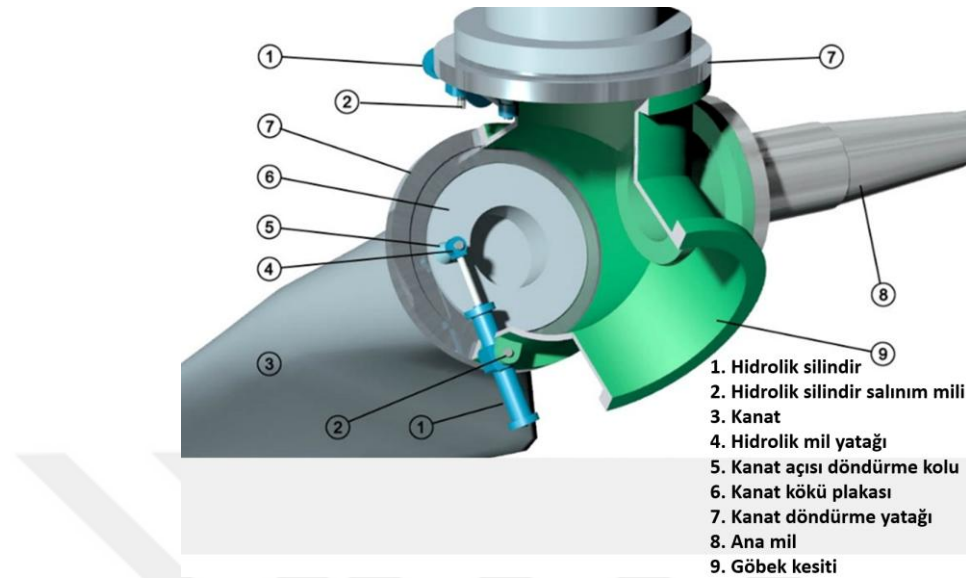


Şekil 1.2. Sürüklenme ve kaldırma kuvveti (pengky.cn)

Şekil 1.2.'de drag (sürüklenme) kuvveti, rüzgâr türbinlerinin kanatları, rüzgârın etkisi altında hareket ederken, kanatların ön yüzeyi yüksek basınçlı, arka yüzeyi ise düşük basınçlı bir hava akımına maruz kalır. Bu basınçlar arasındaki fark, kanatların ön yüzeyinden arkasına doğru sürüklenme kuvveti oluşturur.

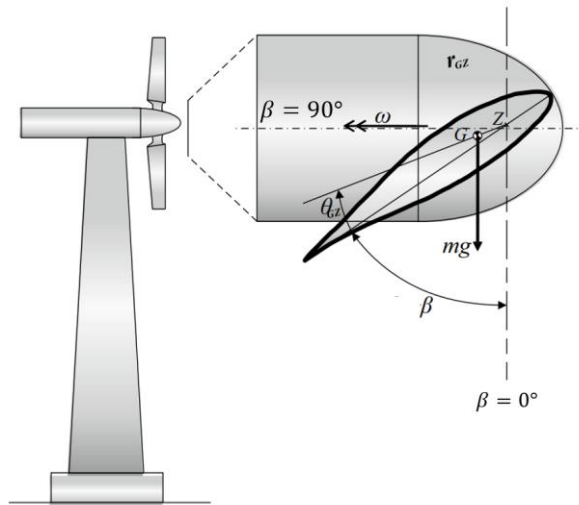
Lift (kaldırma) kuvveti, rüzgâr türbinlerinin kanatları, aerodinamik bir profille tasarlanmıştır. Bu profiller, kanatların üst yüzeyinde düşük basınç ve alt yüzeyinde yüksek basınç oluşturarak kaldırma kuvvetini oluşturur. Kanatlar, bu kaldırma kuvveti

sayesinde yukarıya doğru kaldırılır ve dönme hareketi gerçekleştirilir. Bu dönme hareketi, türbinin jeneratörünü çalıştırarak elektrik enerjisi üretimine katkıda bulunur.



Şekil 1.3. Kanat tahrik mekanizması bileşenleri (pengky.cn)

Rüzgar türbininin kanatlarının açısını ayarlamak için Şekil 1.3.'deki gibi pitch açısı (kanat açısı) tahrik sistemleri kullanır. Bu sistemler, gerekli durumlarda kanatların açısını değiştirerek rüzgarın etkisini optimize eder ve maksimum enerji verimliliği sağlar. Yüksek rüzgar hızlarında kanat açısını Şekil 1.4.'de gösterildiği gibi sıfır dereceden doksan derece konumuna getirerek türbine aşırı yük binmesini önler, yapının korunmasına ve uzun ömürlü olmasına yardımcı olur.



Şekil 1.4. Kanat açısı gösterimi (Nostrani ve diğ., 2020)

Günümüzde, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu bağlamda rüzgâr enerjisi, temiz, yenilenebilir ve yerli bir kaynak olması nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Ancak, rüzgâr türbinlerinin verimli çalışabilmesi; değişken hava koşullarına hızlı tepki verebilen, esnek ve akıllı kontrol sistemlerinin geliştirilmesini gerektirir. Özellikle kanat açısı (pitch) kontrolü, türbinin güvenliğini sağlamak, yapısal yükleri azaltmak ve enerji üretim verimliliğini artırmak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, rüzgâr türbini kontrol sistemlerinin matematiksel olarak modellenmesi ve gelişmiş kontrol stratejileriyle (örneğin Bulanık-PI kontrol, adaptif kazanç ayarlama) optimize edilmesi, hem akademik hem de endüstriyel açıdan son derece önemlidir. Bu çalışma, bu ihtiyaca cevap vermeyi amaçlamaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, değişken rüzgâr hızlarında çalışan bir rüzgâr türbini için adaptif, esnek ve kararlı bir kanat açısı kontrol sistemi tasarlamaktır. Mevcut klasik PI kontrolörlerin yetersiz kaldığı doğrusal olmayan ve değişken çalışma koşullarında, daha gelişmiş ve gerçek zamanlı bilgiye dayalı bir kontrol mekanizması geliştirmek hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, aerodinamik duyarlılık terimi ($dP/d\theta$), sistemin çalışma durumunu yansıtan dinamik bir parametre olarak hem kazanç ayarlama algoritmasında hem de bulanık kontrol sisteminde girdi olarak kullanılmıştır.

Tez kapsamında ilk olarak, klasik PI kontrol sisteminin tasarımı yapılmış ve sistem performansı referans olarak değerlendirilmiştir. Ardından, Mamdani tipi bulanık mantık kullanılarak bir Bulanık-PI kontrolör tasarlanmıştır; hata (e), hata değişimi (de) ve aerodinamik duyarlılık (AS) parametreleriyle karar yüzeyleri oluşturulmuştur. Daha sonra, Sugeno tipi bir bulanık sistem geliştirilerek K_p ve K_i kazançları ayrı ayrı modellenmiş, bu sayede kontrol sisteminin daha esnek ve detaylı ayarlanabilir bir yapıya kavuşması sağlanmıştır. Son olarak, bu yapılar karşılaştırmalı olarak simülasyon ortamında test edilerek, önerilen sistemlerin performansları analiz edilmiştir.

Tezde hedeflenen bir diğer amaç ise, önerilen kontrolcülerin literatürde yaygın olarak kullanılan sabit bölge tabanlı yaklaşımlardan farklı olarak, sistemin anlık çalışma koşullarına göre güç üretimini maksimize eden bir yapıya sahip olmasıdır. Bu durumda, rüzgâr türbinlerinin değişken rüzgâr koşullarına karşı daha etkili, verimli ve güvenilir bir şekilde çalışması sağlanarak hem enerji üretiminde artış hem de sistem güvenliğinde iyileşme hedeflenmektedir.

1.2. Tezin Önemi

Rüzgâr enerjisi, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Özellikle büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, sistemin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmaya yönelik gelişmiş kontrol yöntemlerine duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu bağlamda, kanat açısı kontrolü, rüzgâr türbinlerinde rotor hızını sınırlamak ve çıkış gücünü düzenlemek için kritik bir rol oynamaktadır. Klasik PI kontrol yöntemleri, basit ve uygulanabilir olmalarına karşın, değişken rüzgâr koşullarında istenilen hassasiyeti her zaman sağlayamamaktadır. Bu durum, kontrol performansını artırmak amacıyla daha esnek ve adaptif kontrol yapılarının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu tez çalışmasının önemi, aerodinamik duyarlılık ($dP/d\theta$) kavramının hem kazanç zamanlamasında hem de bulanık mantık tabanlı kontrol sistemine doğrudan bir girdi olarak entegre edilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Literatürdeki birçok çalışmanın aksine, bu çalışmada kullanılan duyarlılık verileri doğrudan bir yazılımdan değil, kullanılan aerodinamik modelden doğrusallaştırma yöntemiyle elde edilmiştir. Bu yaklaşım, sistemin gerçek zamanlı aerodinamik davranışına karşı daha duyarlı ve etkili bir kontrolcü tasarımına olanak tanımaktadır. Böylelikle önerilen yöntem, klasik PI yapılarına göre daha üstün bir kontrol hassasiyeti ve kararlılık sunmaktadır.

Ayrıca, önerilen Sugeno tabanlı Bulanık-PI kontrol yapısında hem oransal (K_p) hem de integral (K_i) kazançların bağımsız olarak ayarlanabilmesi, sistemin dinamik karakteristiğine göre daha uygun cevaplar üretmesini sağlamaktadır. Bu kontrolcü, doğrusal olmayan tepki karakteristiği gösteren 3. bölge koşullarında, rotor hızındaki aşırı salınımları ve geçici rejim hatalarını azaltarak, türbinin daha kararlı ve güvenli çalışmasına katkı sunmaktadır. Bu yönüyle tez, hem akademik anlamda literatüre katkı sağlamakta hem de rüzgâr enerjisi santrallerinde uygulanabilirliği yüksek bir çözüm sunmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Doğrusal Tahrik Sistemleri

Kanat açısı döndürme uygulamaları uçak pervanesi, gemi pervanesi, kaplan tipi hidroelektrik türbini pervanesi, helikopter pervanesi gibi farklı alanlarda uygulanmaktadır. Bu uygulamalarda amaç döner ya da doğrusal tahrik sistemi kullanarak kanat açısını değiştirip istenilen kuvvet girdi/çıkıtısını elde etmektir.

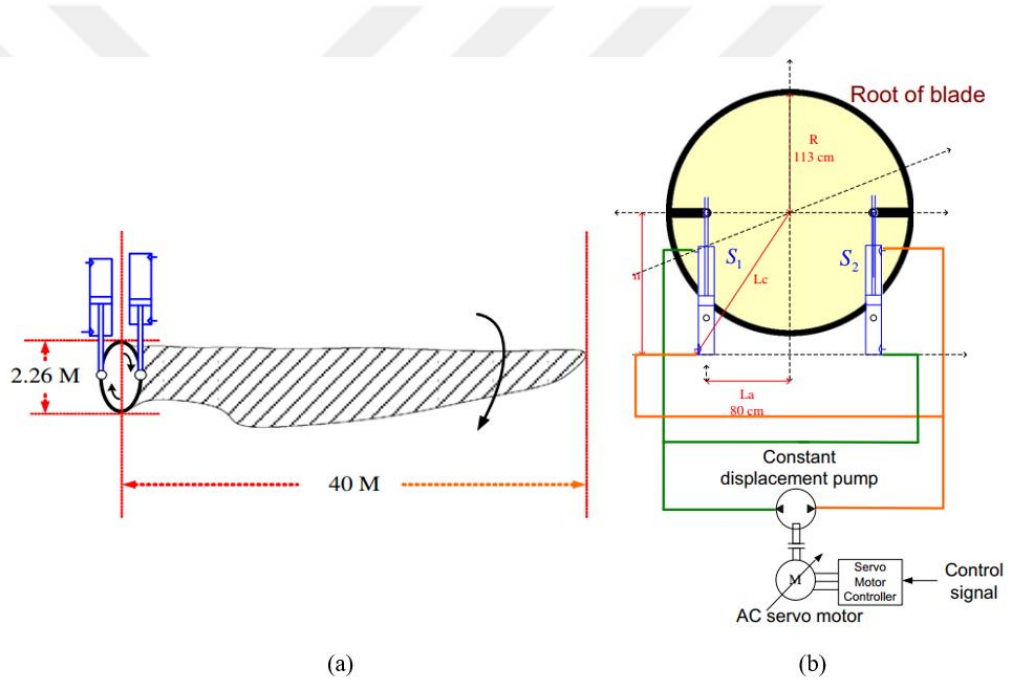
Rüzgâr türbini güç üretimi, rüzgârın rotorla nasıl etkileşime girdiğine bağlıdır. Yatay eksenli rüzgâr türbini, kanat profillerini kullanarak rüzgârdaki kinetik enerjiyi faydalı enerjiye dönüştürür (Sarkar ve Venkaiah, 2020). Kanat açısı kontrol sistemleri, kanatların eksenini etrafında döndürülmesini sağlayarak türbinin performansını optimize eder. Bu sistemler hidrolik veya elektrikli olabilir. Yüksek basınçlı hidrolik olarak çalıştırılan kanat açısı kontrol sistemleri elektrikli sistemine göre daha yüksek kuvvet/kütle oranları üretebilir. Genellikle yüksek basınçlı hidrolik sistemler rüzgâr yüklerine karşı elektrik sistemine göre daha rijit yapıdadırlar. Elektrohidrolik tahrikli sistemler aynı zamanda çok yönlülük, ekonomi, basitlik, güvenlik, sistem dışındaki bozulmalardan bağımsız olarak sabit kuvvet ve tork üretme yeteneğine sahiptir. Elektrohidrolik kanat tahrikli sistemlerin dezavantajları histerezis piston sürtünme karakteristiği, sistem iç ve dış sızıntısı, uzun süreli çalışma nedeniyle ısı üretimi gibi konular olarak belirtilebilir.

Sarkar ve Venkaiah (2020) tek hidrolik silindir tahrikli çalışmalarında rotorun adımını değiştirirken sürekli olarak adım yüklerine dayanabilmek için oransal valf kontrollü elektro hidrolik doğrusal çift etkili hidrolik silindir kullanmışlardır.

Şekil 2.1.'de, elektro-hidrolik kanat açısı tahrik mekanizması, ana bilgisayar, veri toplama sistemi (DAQ), giriş ve çıkış modülleri, pompa, motor, basınç tahliye valfi ve farklı renklere sahip üç doğrusal hidrolik eyleyiciden oluşan bir sistem gösterilmektedir. Bu üç eyleyici, ortak bir hidrolik güç kaynağı ünitesi tarafından beslenmektedir. Her bir eyleyici, düşük maliyetli oransal yön kontrol valfi (PV) ve rüzgâr türbini kanadının açısını ayarlamak için kullanılan asimetrik çift etkili hidrolik silindir içerir.

Tahliye valfi (RV), sistem genelinde sabit basınç sağlar. Oransal valf (PV), akış yönünü kontrol eder ve dört portu (A, B, P, T) ile hareketin yönü ve hızını ayarlar. Valfin sürgüsünün hareketi, ana bilgisayardan gelen sinyaller aracılığıyla elektro-hidrolik voltaj sinyali ile kontrol edilir. Sürgünün hareket yönü, kanat açısı hatasına bağlıdır.

Çift hidrolik silindir tahrikli sistem, değişken hızlı hidrolik pompa kontrollü bir mekanizma tarafından yönetilen iki hidrolik silindirden oluşur. Bu silindirler, kanadın alt gövdesine monte edilmiştir. Sistem, bir AC servo motoru ve sabit deplasmanlı bir piston pompasından meydana gelir. Kapalı hidrolik pompa kontrollü devre yapısı nedeniyle, pompanın giriş ve çıkışındaki hacimsel akışlar eşit olmalıdır. Pompa ile iki silindir arasındaki hidrolik devreler, Şekil 2.2b'de gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Pompadan gelen yağ hortumları, iki silindirin zıt taraflarına bağlanarak, pompanın giriş ve çıkışında piston alanlarının eşitlenmesi sağlanır. Ayrıca, kanat açısı hareketini sağlamak için iki silindirin oluşturduğu torklar aynı yönde birleşir. Bu düzenleme, tek bir silindirle tahrik edilen sistemlere kıyasla daha küçük boyutlu hidrolik silindirlerin kullanılmasına olanak tanır (Chiang ve Wang, 2016).



Şekil 2.2. (a) İki hidrolik silindirli kanat açısı kontrol sistemi (b) DDHP kontrollü sistem

2.2. Döner Tahrik Sistemleri

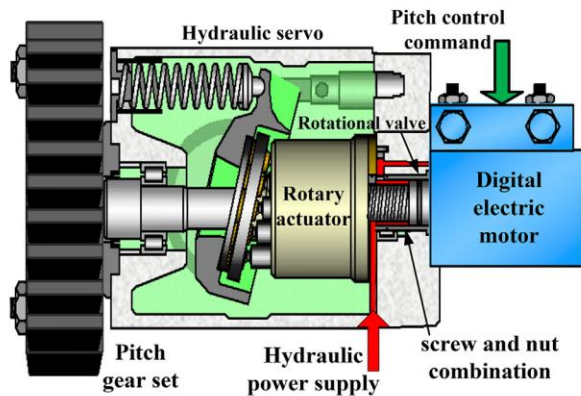
Kanat açısı kontrol sistemleri, genellikle orta ve büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinde kullanılır ve nominal rüzgâr hızının üzerinde yakalanan rüzgâr enerjisinin etkin yönetimini sağlayarak daha iyi kontrol esnekliği ve güç kalitesi avantajları sunar. Bu sistemler ayrıca yapısal rüzgâr yüklerini azaltabilir ve güçlü rüzgâr hızlarında türbinin yorgunluk hasarına karşı korunmasına yardımcı olabilir. Bu nedenle kanat açısı kontrolü,

rüzgâr enerjisi düzenlemesi ve türbinin genel performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Özellikle, gelişmiş kanat açısı kontrol sistemleri, modern türbinlerin daha kararlı performans ve güvenilirlik gereksinimlerini karşılamak için kritik öneme sahiptir (Lin ve diğ., 2015).

Hidrolik tahrikli kanat açısı kontrol sistemleri, yüksek güç/ağırlık oranı ve güvenilirlik avantajları sunmasına rağmen, krank-biyel mekanizmasının kullanımı nedeniyle kontrol hassasiyeti açısından bazı sınırlamalara sahiptir.

Yukarıda bahsedilen hidrolik ve elektromekanik sistemlerin temelde farklı çalışma mekanizmalarını birleştirerek, her iki sistemin avantajlarını taşıyan ve pratik performans sınırlamalarını aşmayı hedefleyen bir model geliştirilmiştir (Şekil 2.3.). Önerilen sistemde, elektrik motoru kontrol amaçlı kullanıldığından, geleneksel elektromekanik kanat açısı sistemlerinde görülen güç/kütle oranı sınırlaması, hidrolik motor entegrasyonu ile artırılabilir. Ayrıca, hidrolik tip kanat açısı kontrol sisteminin hassasiyeti, krank-biyel mekanizması yerine bir döner hidrolik servo eklenerek önemli ölçüde artırılabilir.

Bu sistemin önemli bir avantajı, kanat açısının hidrolik servonun açısız deplasmanı ile doğru orantılı olması ve servo içindeki doğal bir hidromekanik pozisyon kapalı döngü ile hassas bir şekilde kontrol edilebilmesidir. Bu nedenle, yeni sistem sadece kompakt yapı, yüksek güç/kütle oranı, güvenilirlik ve gelişmiş kontrol hassasiyeti gibi avantajlara sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda geleneksel kanat açısı sistemlerine göre daha yüksek doğrulukla orta ve büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinde kullanılabilir. Bu iyileştirmeler, önerilen kanat açısı kontrol sistemini endüstriyel uygulamalar için umut verici bir seçenek haline getirmektedir.



Şekil 2.3. Hidrolik ve elektromekanik kanat kontrol sistemi (Lin ve diğ., 2015)

Şekil 2.3.'de gösterildiği gibi hidrolik servo, bir sürgülü tip döner vana, bir vida ve somun birleşimi ve bir döner eyleyiciden oluşur. Dijital elektrik motorundan gelen dönme hareketi valfi açar ve sürekli bir hidrolik güç kaynağından bu eyleyiciye yağ akışını yönlendirir; bu hareket, vida ve somun birleşimi aracılığıyla geri beslenir ve giriş hareketinden çıkartılarak valfi hareket ettirir ve bu döngüyü kapatır. Bu nedenle, bu hareketler otomatik olarak hidro-mekanik bir pozisyon kontrol döngüsü oluşturur. Döner eyleyici, beklenen kanat yüklerini işlemek için boyutlandırılabilir ve genel tepki gereksinimlerini karşılamak için hidrolik doğal frekansı yeterince büyük olabilir (Lin ve diğ., 2015). Genellikle, hidrolik eğik eksenli piston motoru, döner eyleyici olarak kullanılabilir. Bu sistemin avantajları genel olarak:

a) Kanat açısı kontrolü, diğer kanat açısı sistemlerinde kullanılan bir elektrik motoru veya hidrolik silindir yerine yüksek taşıma kapasitesine ve yüksek güç/ağırlık oranına sahip döner hidrolik eyleyici ile gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, nispeten yüksek kanat açısı kontrol hassasiyeti ve güç/kütle oranı, bu sistemi büyük ölçekli rüzgâr türbinleri için uygun hale getirir.

b) Eyleyicinin direkt olarak kanat sistemine uygulanması kanat açısı sinyal geri beslemesi ve dönüşümü için gerekli ölçüm cihazları olmadan, ölçümsüz kanat açısı kontrolüne imkân sağlamaktadır.

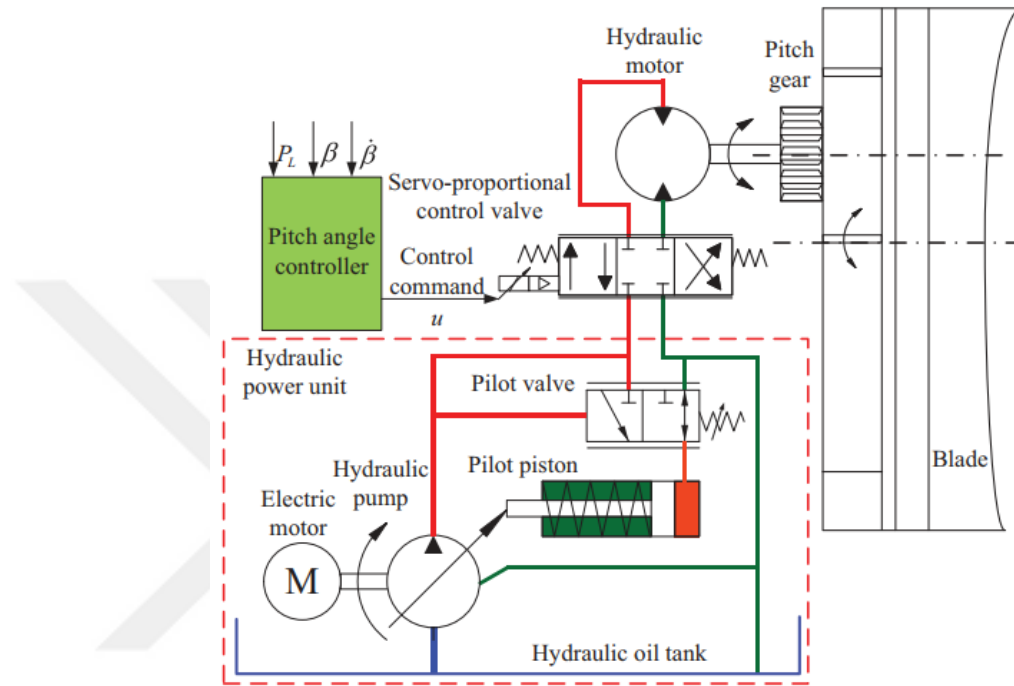
c) Entegre sistem ve kompakt tasarım sayesinde her bir türbin kanadı için bağımsız kanat açısı kontrolüne imkân tanır.

d) Yeni kanat açısı kontrol sistemi, dışta açık döngüde çalışır ve bir hidro-mekanik pozisyon kontrol döngüsüne sahiptir, bu nedenle diğer geleneksel kanat açısı sistemlere göre daha geniş bir kanat açısı hızı aralığına ve daha düşük bakım maliyetine sahiptir.

Geleneksel kanat açısı kontrol sistemi, başlıca bir servovalf kontrolü ile yönetilen hidrolik silindir, silindir miline bağlı bir krank-biyel mekanizması ve bir oransal-integral-türev (PID) açı kontrol cihazından oluşmaktadır.

Şekil 2.4.'de verilen sistemin bileşenleri; hidrolik güç ünitesi, kontrol vanası ve hidrolik motor için sabit hidrolik besleme basıncını korumak için kullanılır. Güç ünitesi genellikle değişken deplasmanlı bir hidrolik pompa, bir elektrik motoru, bir pilot vana ve bir pilot piston içerir. Hidrolik pompa, elektrik motoru tarafından tahrik edilir ve hidrolik yağ, sabit bir besleme basıncıyla, yağ tankından bu sistemin diğer tahrik bileşenlerine teslim eder. Hidrolik yağ, hidrolik motorun işletimi için kullanılır ve kontrol vanası aracılığıyla atmosfer basıncında yağ tankına geri döner. Üç yollu pilot vana, yay geri dönüşü ile pilot pistonu düzenler ve sabit besleme basıncını korumak için pompa debisini

değiştirir. Bu güç ünitesinin, nispeten yüksek verimlilik ve düşük ısı üretimi avantajları vardır. Çalışılan bu sistem, geleneksel açı sisteminden daha fazla açı kontrol hareketi etkin bir şekilde uygulayabilir. Bu açı kontrol hareketleri, daha düzgün bir çıkış gücü ve tork dalgalanmalarını azaltma konusunda geleneksel sisteme göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

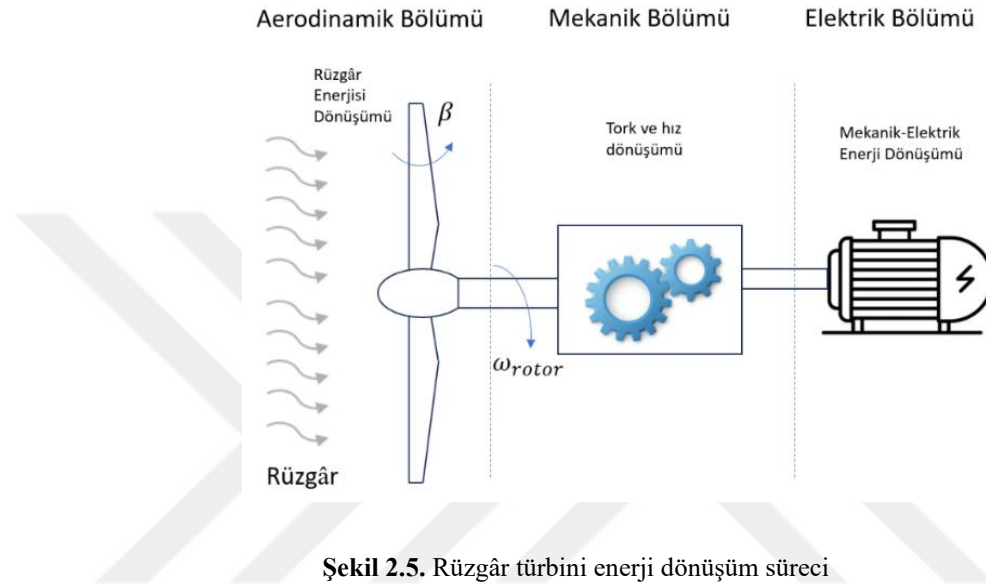


Şekil 2.4. Elektro-hidrolik kanat açısı kontrol sistemi (Yin ve diğ., 2015)

Literatürde, rüzgâr türbinlerindeki kanat kontrol sistemlerinde kullanılan tahrik mekanizmalarının detaylı fiziksel modelleri yaygın olarak incelenmiş olsa da kontrol sistemi tasarımı açısından bu sistemlerin basitleştirilmiş temsilleri sıklıkla tercih edilmektedir. Başlangıçta bu çalışmada da hidrolik tahrik mekanizmasının ayrıntılı dinamik modellemesinin gerçekleştirilmesi planlanmış, ancak sistemin temel dinamiklerinin daha sade ve anlaşılır biçimde analiz edilebilmesi amacıyla, hidrolik eyleyici modeli birinci dereceden bir servo sistem ile temsil edilmiştir. Bu yaklaşım hem modelleme sürecini yalınlaştırmakta hem de kontrolcü tasarımını kolaylaştırmaktadır. Nitekim literatürde de karmaşık fiziksel yapıların yerine birinci veya ikinci dereceden sistemlerle yapılan yaklaşık modellemelerin, kontrol performansı açısından yeterli doğruluk sunduğu ve tasarımı etkin şekilde desteklediği belirtilmektedir.

2.3. Kanat Elemanı Momentum (BEM) Modeli:

Bölüm 3.2. Aerodinamik Model’de türetilen (3.1) – (3.8) numaralı denklemler Blade Element-Momentum (BEM) teorisinden gelmektedir. Momentum teorisi, kontrol hacmi analizine dayanır ve bu kontrol hacmi, rotor kanatlarının açılma hızıyla birlikte döner. Kontrol hacminin sınırları, akım tüpünün yüzeyleri ile belirlenir.

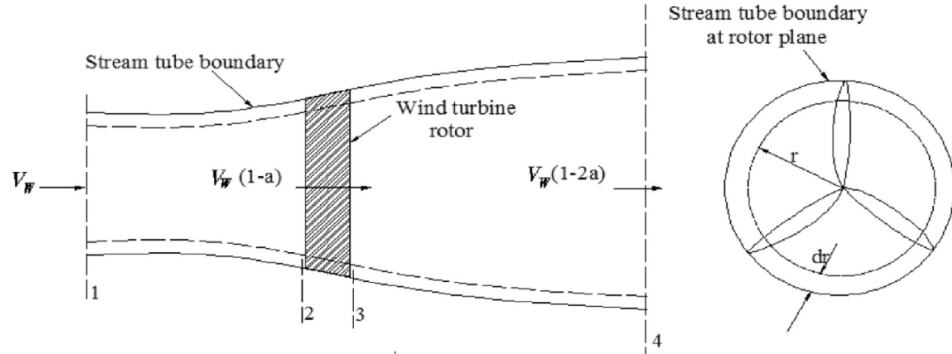


Şekil 2.5.’de gösterildiği gibi rotor kanatları, rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ana bileşenlerdir. Kontrol hacmi türbinin etrafındaki hava akışının analiz edildiği bölgeyi temsil eder. Giriş ve çıkış rüzgâr hızları (V_1 , V_2) farklı bölgelerde gösterilir ve momentum teorisi kullanılarak değerlendirilir.

Kontrol hacmi, rüzgâr türbini rotorunu üç kanat ile temsil eder (Şekil 2.6.). Bu analizde, rüzgâr türbini rotorunun merkezinden r uzaklıkta bulunan ve dr radyal kalınlığına sahip halkasal bir akım tüpü dikkate alınır. Bu tüpün enine kesit alanı $2\pi r dr$ olarak ifade edilir. Akım tüpünün uçlarındaki rüzgâr hızlarının değişimi, 1, 2, 3 ve 4 numaralı farklı kesitlerle gösterilir. Kanat elemanı (Blade Element) teorisine göre türbin kanadı n adet kanat elemanına ayrılmıştır. Rotor merkezinden r yarıçapında bulunan ve dr uzunluğundaki küçük bir kanat elemanına etki eden kuvvetler, kanat geometrisi, yani kaldırma ve sürüklenme katsayıları ile atak açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir (Manwell ve diğ., 2009).

BEM teorisi, kanat profilleri boyunca kuvvetlerin dağılımını ayrıntılı bir şekilde analiz ederken, Bölüm 3.2. Aerodinamik Model’de ele alınan denklemler, türbin

performansını anlamak ve modellemek için daha genel ifadeler sunmaktadır. $C_p(\lambda, \beta)$, TSR (λ) ve kanat açısına (β) bağlı olarak hesaplanan güç katsayısını temsil eder. Örneğin, aerodinamik güç ve tork ifadeleri, rotor hızı ve rüzgâr hızındaki değişikliklerin λ ve dolayısıyla C_p 'yi nasıl etkilediğini yansıtmaktadır.



Şekil 2.6. Yatay eksenli rüzgâr türbini ve kontrol hacmi şematik diyagramı

BEM teorisi, kanat profilleri boyunca kuvvetlerin ayrıntılı bir şekilde dağılımını analiz ederken, aerodinamik modelleme kısmında kullanılan denklemler, türbinin genel performansını anlamak ve modellemek için daha basitleştirilmiş ifadeler sunar. C_p , λ ve β parametrelerine bağlı olarak hesaplanır. Örneğin, aerodinamik güç ve tork ifadeleri, rotor hızındaki ve rüzgâr hızındaki değişimlerin λ parametresini nasıl etkilediğini ve bunun sonucunda C_p 'deki değişiklikleri nasıl yansıttığını açıklar. Bu sadeleştirilmiş yaklaşım, türbin performansını analiz etmek ve modellemek için etkili bir yöntem sağlar (Boukhezzar ve Siguerdidjane, 2011).

BEM teorisi, daha doğru ve detaylı bir aerodinamik modeldir. Türbin kanadını küçük elemanlara böler ve momentum teorisi ile kanat elemanı teorisini kullanarak her bir eleman üzerindeki kuvvetleri hesaplar. Bu kuvvetler:

- Her bir kanat kesitinde oluşan kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri.
- Rotorun rüzgarla etkileşimi sonucu yerel akış koşullarını değiştiren indüksiyon faktörlerinin etkileri.
- Kanat uçlarında ve göbek bölgesinde verimliliğin azalmasına neden olan uç kayıpları ve göbek kayıpları.

BEM modeli, karmaşık aerodinamik etkileşimleri detaylı bir şekilde yakalayarak, farklı çalışma koşullarında güç ve kuvvet tahminlerini daha doğru hale getirir. Ayrıca,

daha basit modellerin ihmal ettiği karmaşık uyandırma (wake) etkileri ve indüklenmiş hızları da hesaba katar.

Kullanılan model C_p için basitleştirilmiş, ampirik bir denkleme dayanmaktadır. Bu denklem, verilere uygun hale getirilmiş veya basitleştirilmiş aerodinamik modellerden türetilmiştir.

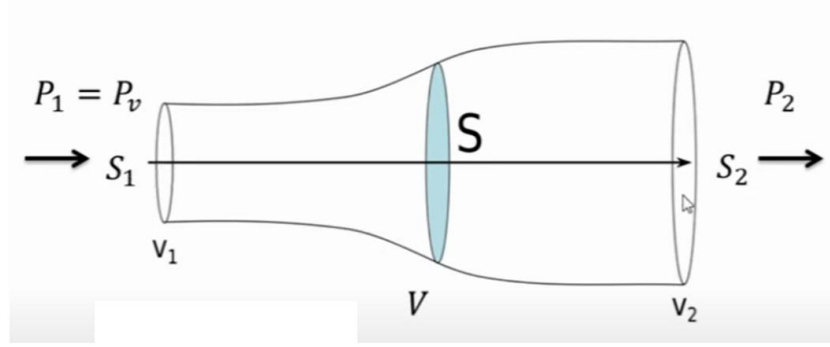
C_p denklemi, rüzgâr türbini kontrolü ve optimizasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, BEM modelinin sunduğu detaylara sahip değildir. Türbinin davranışını yaklaşık olarak ifade eder, fakat her bir kanat elemanının detaylı aerodinamiğini veya BEM modelinin dikkate aldığı uyandırma (wake) etkilerini göz önünde bulundurmaz.

Doğruluk karşılaştırması yönünden incelenirse BEM modeli; türbinin aerodinamiğini daha detaylı bir seviyede simüle ettiği için daha yüksek doğruluğa sahiptir. Kanat şekli, yerel akış koşulları, indüksiyon faktörleri ve kayıplar gibi önemli aerodinamik etkileri dikkate alır. Dinamik çalışma koşullarındaki değişimlere uyum sağlayabilir, genellikle tasarım ve performans optimizasyonu için kullanılır.

C_p modeli ise ampirik ve yarı-analitik bir yaklaşımdır, BEM modeli kadar detaylı bir analiz sunmaz. Ancak, hesaplama açısından daha az maliyetlidir ve kontrol tasarımı ile hızlı performans tahminleri için kullanışlıdır. Türbin performansını iyi bir şekilde yaklaşık olarak hesaplar, ancak değişken rüzgâr koşulları veya kanat dinamiği gibi aerodinamik detayları tam olarak yansıtamayabilir.

Özetle kullanılan C_p denklemi tabanlı model, doğrusallaştırılmış bir model değildir; doğrusal olmayan ancak basitleştirilmiş bir yaklaşımdır. Bu model, ampirik bir C_p denklemi kullandığı için BEM modeli kadar hassas değildir. BEM modeli, daha karmaşık aerodinamik olguları daha ayrıntılı şekilde yakalarken, C_p modeli bu etkileri basitleştirir. Daha doğru sonuçlar elde etmek için, özellikle dinamik veya karmaşık akış koşullarında, BEM tabanlı bir yaklaşım tercih edilmelidir. Ancak, hızlı ve verimli duyarlılık analizi, kontrol tasarımı veya genel türbin performans tahmini için C_p modeli yaygın olarak kullanılmaktadır.

Rüzgâr türbininden elde edilebilecek maksimum teorik güç çıkışı, Bernoulli denklemi kullanılarak türetilir. Bu yaklaşımda, rotor diskinden geçen bir hava akışı düşünülür ve bu akış boyunca enerjinin korunumu (Bernoulli ilkesi) uygulanır (Şekil 2.7.). Akış yönünde hızın azalması, basınç farkı oluşturur ve türbin üzerinden kinetik enerjinin bir kısmı mekanik enerjiye dönüştürülür.



Şekil 2.7. Hava akışının türbin rotor diski boyunca davranışı

Havanın rotor düzlemine giriş ve çıkış hızları sırasıyla V_1 ve V_2 olarak tanımlanır. Rotor düzlemindeki ortalama hız ise:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.1)$$

şeklindedir. Kütle korunumu ile hava debisi:

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot V \quad (2.2)$$

Bernoulli ilkesi kullanılarak, akışın yavaşladığı bölgede (türbin rotorundan sonra) oluşan basınç artışı ve bu akıştan elde edilebilecek aerodinamik güç:

$$P_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.3)$$

Bu denklem, türbinin öncesi ve sonrası arasındaki kinetik enerji farkını temsil eder. Betz Yasası'na göre, bu enerjinin tamamı kullanılamaz. Maksimum verim, yani güç katsayısı C_p , teorik olarak:

$$C_{p\text{max}} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (2.4)$$

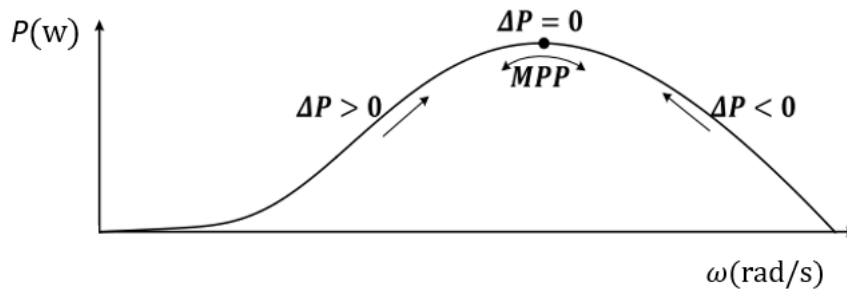
ile sınırlıdır. Bu değer, hiçbir rüzgâr türbininin rüzgâr enerjisinin %59.3'ünden fazlasını mekanik enerjiye çeviremeyeceğini ifade eder.

Betz sınırı, kontrol algoritmalarının ve güç çıkışının değerlendirilmesinde temel referans kabul edilir. Bu nedenle, önerilen bulanık mantık temelli denetleyicilerin değerlendirilmesinde de bu sınıra olan yakınlık önemli bir kriterdir.

2.4. MPPT (Maximum Power Point Tracking)

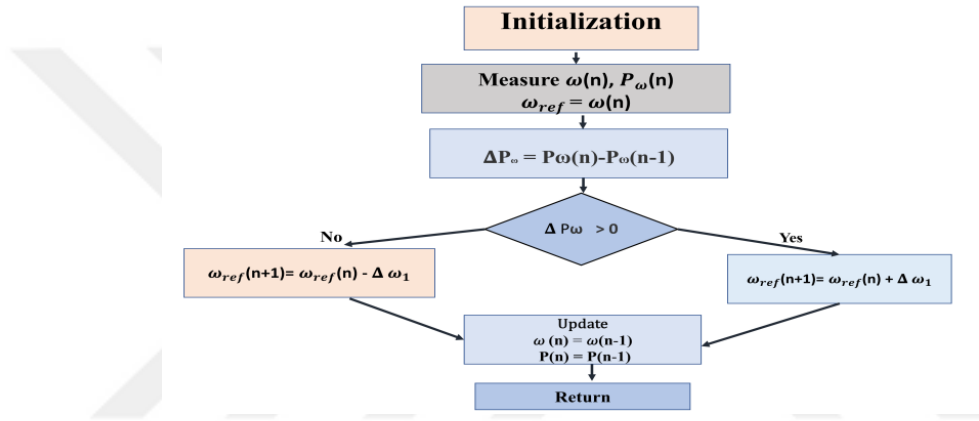
Rüzgar türbinlerinde sensörsüz MPPT kontrolü, sistemin güç kayıplarını ve maliyetini azaltmak için önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Kim ve Lee (2015), anahtarlamalı doğrultucu (switched-mode rectifier) üzerinden kontrol sağlanarak sensörsüz MPPT uygulamasını ele almış, bulanık mantık tabanlı MPPT yöntemi ile geleneksel bir yöntemi karşılaştırarak simülasyon ve deneyler ile performans analizlerini yapmıştır. Benzer şekilde, Shahi ve Bhattacharjee (2018), klasik Perturb & Observe (P&O) algoritması ile bulanık mantık tabanlı P&O algoritmasını karşılaştırmış ve güç salınımları ile hesaplama süreleri açısından değerlendirmiştir. Önerilen sistemlerin performansı, MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonlarla analiz edilerek MPPT kontrol tekniklerinin etkinliği ortaya konmuştur. Bu çalışmalar, rüzgar türbinlerinde maksimum güç noktasına ulaşmak için sensörsüz MPPT yöntemlerinin uygulanabilirliğini ve verimliliğini göstermektedir (Ngo ve Nguyen, 2021).

Rüzgâr türbinlerinde Maksimum Güç Noktası (MPP) takibi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, kontrol değişkenlerini küçük adımlarla değiştirerek (pertürbe ederek) güç çıktısındaki değişimleri gözlemlemeye dayanır. Algoritma, Şekil 2.8.'de gösterildiği gibi $P - \omega$ (Güç – Rotor Hızı) eğrisinin eğimini hesaplayarak maksimum güç noktasını bulur. Bu noktada eğim sıfır olur ve sistem en yüksek verimde çalışır.



Şekil 2.8. Rotor hızı değişimine bağlı maksimum güç noktası

Algoritma, rotor hızını kademeli olarak değiştirerek maksimum güç noktasını (MPP) bulmaya çalışır. Eğer çalışma noktası MPP 'nin sol tarafında ise, algoritma rotor hızını artırarak maksimum güce ulaşmaya çalışır. Çalışma noktası MPP 'nin sağ tarafında olduğunda ise, algoritma rotor hızını azaltarak tekrar MPP 'ye ulaşır. Klasik PO MPPT kontrolcüsü, rotor hızını sürekli ayarlayarak sistemi MPP 'de tutar. Bu yöntem, rüzgâr türbini hakkında önceden bilgi gerektirmez ve anemometre kullanılmadan uygulanabilir, bu nedenle gerçek zamanlı MPPT uygulamaları için pratik bir seçenektir. Ancak, uygun adım boyutunun seçilmesi, hızlı takip ve kararlılık arasındaki dengeyi sağlamak açısından kritik bir faktördür.



Şekil 2.9. Rotor hızına göre güç değişimini izleyerek referans hızı ayarlayan MPPT algoritması

Şekil 2.9.'daki süreç, rüzgâr türbininin her zaman maksimum güç üretimi sağlayacak optimal çalışma noktasına ulaşmasını amaçlamaktadır. Algoritma, kontrol kararlarını sürekli olarak güncelleyerek, değişken rüzgâr koşullarına karşı hızlı ve dinamik bir şekilde tepki vermektedir.

Pande ve diğ. (2021) rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde (WECS) maksimum güç noktasını takip etmek ve maksimum güç çıkışını elde etmek için geçmişten günümüze geliştirilen farklı algoritmaları kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, kullanılan algoritmalar doğrudan ve dolaylı güç ölçümü, hibrit yaklaşımlar ve akıllı algoritmalar temelinde sınıflandırılmış ve karmaşıklık, yakınsama hızı (convergence speed), sensör kullanımı, bellek gereksinimi, sistem parametreleri hakkında bilgi ihtiyacı gibi çeşitli kriterler açısından karşılaştırılmıştır.

P&O yöntemi, sistemin çalışma noktasında küçük değişiklikler yaparak (pertürbasyon) güç değişimini gözleme prensibine dayanır. Güç eğrisinin eğimi

kullanılarak rotor hızı veya tork sürekli değiştirilerek maksimum güç noktasına (MPP) ulaşılmaya çalışılır.

Rüzgâr hızı ölçümüne ihtiyaç duymadan yalnızca güç ve rotor hızı ölçümüyle çalışır. Kontrol algoritması, güç eğrisindeki değişimleri analiz ederek çalışma noktasını iteratif olarak günceller. Ekstra sensör gerektirmediği için TSR yöntemine kıyasla daha düşük maliyetlidir ve önceden belirlenmiş bir TSR değeri gerektirmediğinden her türbin modeline uyarlanabilir. Ancak, sistem deneme-yanılma yöntemiyle çalıştığı için takip hızı daha yavaştır ve MPPT etrafında salınımlar oluşarak güç dalgalanmalarına neden olabilir. Adım büyüklüğünün doğru seçilmesi önemlidir; büyük adımlar hızlı takip sağlarken dalgalanmalara, küçük adımlar ise yavaş tepkiye yol açabilir (Pande ve diğ., 2021).

Tip Speed Ratio (TSR) yöntemi, uç hız oranının (λ) belirli bir optimum değerde tutulmasına dayanır. Uç hız oranı (TSR), rotorun uç hızının rüzgâr hızına oranı olarak tanımlanır:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{V} \quad (2.5)$$

Burada ω rotor hızı, R rotor yarıçapı ve V rüzgâr hızıdır. Rüzgâr hızı ve rotor hızı ölçülmesi gerektiğinden genellikle anemometre gibi sensörler kullanılır. Türbinin aerodinamik karakteristiklerine bağlı olarak optimum TSR değeri önceden belirlenmelidir. Bu yöntem, doğrudan kontrol sağladığı için genellikle daha hızlı MPPT yanıtı verir ve rotor hızının belirli bir değerde tutulması hedeflendiğinden güç dalgalanmaları daha azdır. Ancak, rüzgâr hızı ölçüm hatalarına duyarlı olup, sensör gereksinimi nedeniyle sistem maliyetini artırabilir ve arıza riskini yükseltebilir (Zhang ve diğ., 2022).

Estimated Wind Speed (EWS) yöntemi, rüzgâr hızını doğrudan ölçmek yerine tahmin etmeye dayanan bir sensörsüz MPPT yöntemidir. Rüzgâr hızı, güç denklemlerinden geriye doğru hesaplanır:

$$v_{est} = f(P, \omega, \beta) \quad (2.6)$$

Bu yaklaşım, rüzgâr türbini çıkış gücü (P), rotor hızı (ω) ve kanat açısı (β) gibi sistem değişkenlerini kullanarak rüzgâr hızını hesaplar. Böylece, MPPT kontrolü için ek

Çizelge 1.1. MPP yöntemleri kıyaslama tablosu

Kriter	P&O (Bozma ve Gözlem) (Perturb and Observe)	TSR (Uç Hız Oranı) (Tip Speed Ratio)	EWS (Rüzgâr Hızı Tahmini) (Estimated Wind Speed)
Çalışma Prensipleri	Güç eğrisinde küçük değişikliklerle MPP'yi iteratif arar.	Uç hız oranını (λ) sabit tutarak maksimum C_p 'yi hedefler.	Güç, rotor hızı ve kanat açısıyla rüzgâr hızını tahmin eder.
Sensör Gereksinimi	Sadece güç ve rotor hızı ölçümü yeterlidir.	Rüzgâr hızı ve rotor hızı sensörleri gerekir.	Rotor hızı ve kanat açısı ölçümü gerekir; rüzgâr sensörü gerekmez.
Donanım Maliyeti	Düşük	Yüksek (anemometre gerektirir).	Orta – ek sensör gerekmez, fakat modelleme karmaşıktır.
Tepki Süresi	Orta-yavaş (iteratif yapı)	Hızlı	Orta (modellemeye bağlı)
Güç Dalgalanması Riski	Yüksek – salınımlar oluşabilir.	Düşük – daha kararlı.	Düşük – ani değişimlere karşı kararlı yapı
Yöntemin Uygulanabilirliği	Her türbin tipi için uygundur, model gerektirmez.	Belirli aerodinamik karakteristiğe sahip türbinlere özel.	Farklı türbinlere kolay uyarlanabilir.
Yöntemin Zayıf Yönü	MPPT çevresinde kararsızlık olabilir, adım seçimi kritiktir.	Sensör arızası riski ve ölçüm hatasına karşı hassas.	Aerodinamik modele bağımlılık, karmaşık hesaplama.
Yöntemin Güçlü Yönü	Basit ve düşük maliyetlidir.	Hızlı ve doğrudan kontrol sağlar.	Model bazlı yaklaşım ile sensör hatalarından kaçınır.
MPPT Doğruluğu	Orta	Yüksek	Yüksek (doğru model ile)
Uygulama Karmaşıklığı	Düşük	Orta	Yüksek

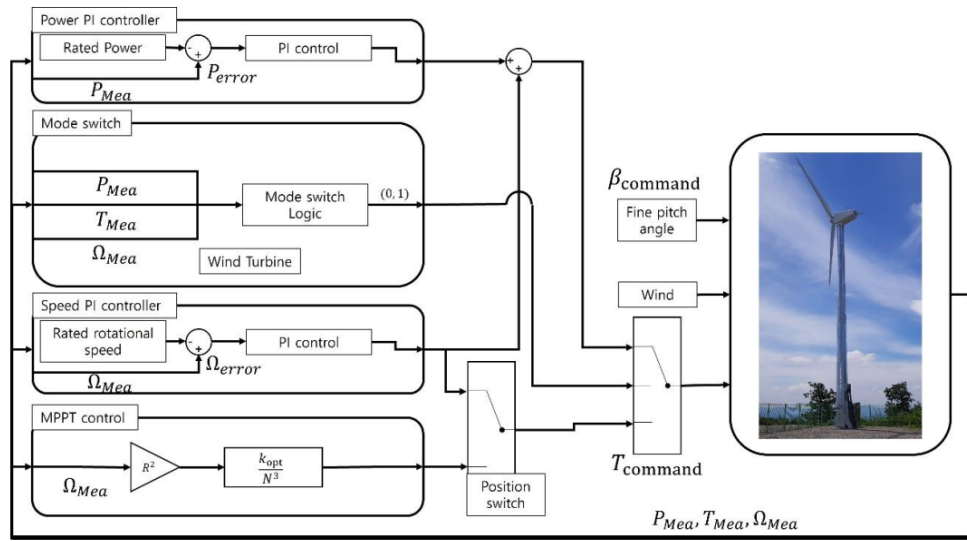
bir rüzgâr hız sensörü (anemometre) kullanmadan optimum çalışma koşulları sağlanabilir (Benbouzid, 2022), (Kharchouf ve Nasser, 2018), (Kraiem ve Abbas, 2023).

EWS yönteminde rotor hızı, jeneratör veya rotor üzerine yerleştirilen bir enkoder ile ölçülürken, kanat açısı sensörler aracılığıyla belirlenir. Rüzgâr türbininin aerodinamik davranışını anlamak için güç katsayısı ile rüzgâr hızı arasındaki ilişkiyi içeren bir matematiksel modele ihtiyaç duyulur.

Avantajları, rüzgâr hızını doğrudan ölçen anemometreye ihtiyaç duymadığı için sistem maliyetini ve bakım gereksinimini azaltır. Rüzgâr sensörleri gürültü ve ölçüm hatalarına açık olabilirken, model bazlı tahmin yöntemi kullanarak daha güvenilir bir kontrol sağlar. Aerodinamik modele dayandığı için farklı türbin tasarımlarına kolayca uyarlanabilir. Ayrıca, rüzgâr değişimlerini doğrudan ölçmediğinden ani salınımları önleyerek sistemin daha kararlı çalışmasını sağlar.

Dezavantajları, rüzgâr hızını tahmin etmek için ek matematiksel modeller ve hesaplamalar gerektirdiğinden daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Kullanılan aerodinamik modelin doğruluğuna bağlı olduğu için yanlış bir model seçildiğinde rüzgâr tahmini hatalı olabilir ve MPPT performansı olumsuz etkilenebilir. Ayrıca, rüzgâr değişimlerini doğrudan algılamadığı için TSR yöntemine kıyasla tepki süresi daha uzun olabilir. Anlatılan bu üç yöntemin kıyaslaması Çizelge 1.1’de yapılmıştır.

2.5. Adaptif Kontrol



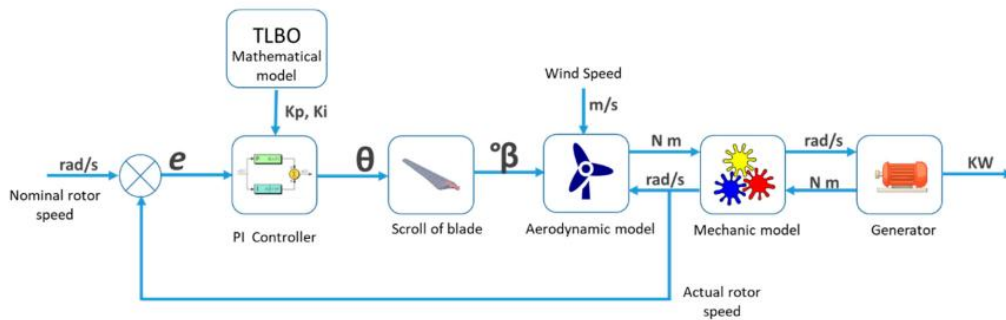
Şekil 2.10. Değişken rüzgâr hızları için kontrol algoritması (Jeong ve diğ., 2023)

Değişken hızlı sabit kanat açılı yatay eksenli bir rüzgâr türbini için geliştirilen güç kontrol algoritması, 2. Bölge’de maksimum güç katsayısını takip etmek ve 3. Bölge’de nominal gücü sabit tutmak üzere tasarlanmıştır (Jeong ve diğ., 2023), (Şekil 4.1.).

Benzer şekilde, bu tezde de değişken rüzgâr hızlarında sabit kanat açısı-rotor hızı PI kontrolcü tasarımı ele alınmış ve K_p ve K_i değerlerinin değişken sistem parametrelerine göre hesaplanması hedeflenmiştir. Literatürde önerilen algoritmada, tüm çalışma bölgelerinde denetleyicinin performansı doğrulanmış ve değişken hızlı değişken kanat açısı (VSVP) kontrolcüsü ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.10.).

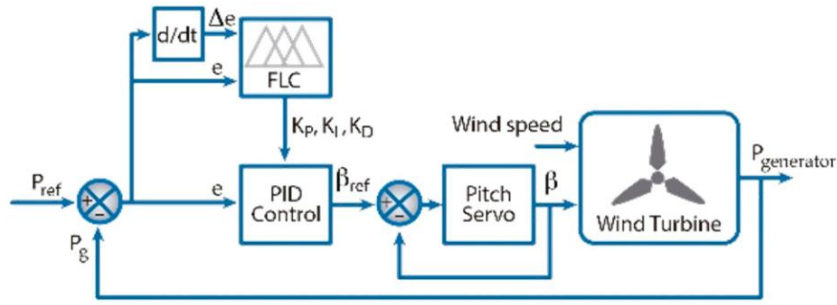
PI kazanç ayarlaması konusunda Chavero-Navarrete ve diğ. (2019), Şekil 2.11.’de değişken rüzgâr hızlarında çalışan küçük rüzgâr türbinleri için Teaching–Learning-Based Optimization (TLBO) algoritmasını kullanarak akıllı bir PI kazanç ayarlama yöntemi önermiştir.

Bu yaklaşım, gerçek zamanlı rüzgâr hızı ölçümlerine ve hız değişimlerinin büyüklüğüne dayalı olarak PI kazançlarını dinamik olarak ayarlayan bir güç üretimi sağlamaktadır



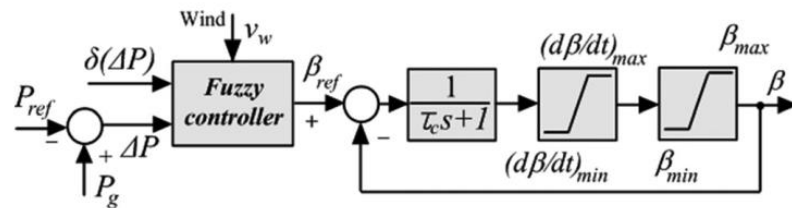
Şekil 2.11. TLBO ya bağlı PI kazanç ayarlama kontrol sistemi (Chavero-Navarrete ve diğ., 2019)

Chavero-Navarrete ve diğ. (2019) tarafından yapılan farklı bir çalışmada, uzman kontrol sistemleri (ECS) önerilmekte; bu sistemler, insan deneyimine ve değişkenlere ait saklanan bilgilerin uygun şekilde yönetimine dayanarak çözüm üretmeyi amaçlayan bir yöntem sunmaktadır. Bu son yıllara ait derleme çalışması, kalıcı mıknatıslı senkron jeneratöre (PMSG) sahip bir rüzgâr türbininde maksimum güç üretim noktasını elde etmek için geliştirilen uzman sistemleri ele almakta ve bu nedenle herhangi bir rüzgâr türbininin gereksinimlerine uyum sağlayan bir kontrol çözümü sunmaktadır (Şekil 2.12.).



Şekil 2.12. PMSG 'li bir rüzgar türbininde maksimum güç noktası takibi için uzman kontrol sistemi (Chavero-Navarrete ve diğ., 2019)

Van ve Lee (2015) tarafından yapılan çalışmada bulanık mantık denetimine dayalı yeni bir kanat açısı kontrol stratejisi önerilmiştir. Bu strateji, tam yük bölgesinde türbin çıkış gücünü ve jeneratör hızını sınırlamak amacıyla geliştirilmiştir. Bulanık mantık denetleyicisinin giriş değişkenleri olarak rüzgâr hızı yerine, jeneratör çıkış gücü ve jeneratör hızı kullanılmıştır ve bu sayede anemometre kullanımına gerek kalmamıştır (Şekil 2.13.). Ayrıca, kontrol değişkenleri olan jeneratör çıkış gücü ve hızı sayesinde, rüzgâr türbini, çıkış gücü ve hızı nominal değerlerde dalgalanma olmadan koruyacak şekilde kontrol edilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği, 2 MW PMSG rüzgâr türbini sistemi için yapılan simülasyon sonuçları ve küçük ölçekli bir rüzgâr türbini simülatörü üzerinde elde edilen deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.



Şekil 2.13. Jeneratör çıkış gücü ve hızı ile bulanık-PI kontrolcü diyagramı

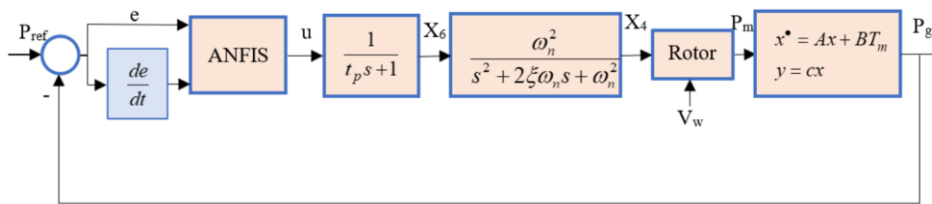
Hand (1999), yaptığı çalışmada kanat açısı tahrik sistemi ile PID kontrolcü kazanç değerlerini, değişken rotor hızına ve değişken rüzgâr hızlarına göre optimize edebilecek bir model üzerine çalışmıştır. Çalışma bölgesine dayanan lineer ve nonlinear model üzerinden karşılaştırmalı sistem performans analizi yapmıştır.

Esfahani ve Pieper (2021) yaptıkları çalışmada, kısmi yük (Bölge-2) bölgesinde çalışan bir rüzgâr türbini için ayrık zamanlı bir parçalı doğrusal (PWA) model sunmaktadır. PWA modeli, aerodinamik tork ve itme kuvveti gibi doğrusal olmayan

rüzgâr türbini fonksiyonlarını, farklı çalışma koşullarında doğrusallaştıran kümeleme tabanlı bir yöntem kullanılarak geliştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerin belirli çalışma noktalarında doğrusallaştırma yapmasının aksine bu yaklaşım, rüzgâr hızı, kanat açısı ve sabit rotor hızını dikkate alarak doğrusal olmayan yapıları PWA fonksiyonlarıyla temsil etmektedir. PWA modelinin doğruluğu, doğrusal olmayan modeller, FAST yazılımı ve SIEMENS PSS/E yazılımı ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Fuzzy-PI kontrolcü tasarımı üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Liu ve diğ. (2016), Zhang ve diğ. (2008) ile Goyal ve diğ. (2024) tarafından yapılan çalışmalarda, klasik PI kontrolcülere kıyasla bulanık mantık tabanlı yaklaşımların rüzgâr türbini sistem performansını iyileştirmede etkili olduğu gösterilmiştir.

Bouregba ve diğ. (2022) çalışmalarında, bulanık mantık denetleyicisi (FLC) yardımıyla klasik PI kontrolcünün oransal (K_p) ve integral (K_i) kazançları, sistemin hata (e) ve hata değişimi (de) bilgilerine göre uyarlamıştır. İlgili çalışmada giriş değişkenleri olarak sistemin hata (e) ve hata değişimi (de) kullanılmış; çıkış olarak kontrol türevi (du) elde edilmiştir. Üyelik fonksiyonları üçgensel ve trapez biçiminde tanımlanmış; kurallar Mamdani ve Sugeno çıkarım yöntemleri ile oluşturulmuştur. Elde edilen bulanık çıkış, ağırlıklı ortalama yöntemiyle durulaştırılarak klasik PI yapısına entegre edilmiştir. Bu yapı sayesinde, denetleyici sabit kazançlara bağlı kalmaksızın sistemin anlık dinamiklerine uyum sağlayabilmiştir. Elde edilen sonuçlar, FLC yapısının türbin çıkış gücü dalgalanmalarını azaltma ve sistem tepkilerini yumuşatma konusunda etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.14. Kanat açısı kontrolü blok diyagramı (Elsisi ve diğ., 2020)

Elsisi ve diğ. (2020) rüzgâr türbini kanat açısı kontrolü için bulanık mantık ile yapay sinir ağlarını birleştiren ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) yaklaşımını kullanan bir çalışma yapmışlardır. Bu yöntem, Şekil 2.14.'de gösterildiği gibi hata (e) ve hata değişimi (de) gibi iki temel giriş değişkenini kullanarak, Sugeno çıkarım yapısına dayalı bir kontrol sinyali üretmektedir. ANFIS mimarisi; üyelik fonksiyonlarının

Çizelge 1.2. Adaptif kontrol yöntemleri kıyaslama

Yöntem	Kullanılan Model	Girişler	Çıkış/ Kazanç Ayarı	Avantaj	Dezavantaj
Jeong ve diğ. (2023)	Sabit kanat açılı, değişken hızlı WT	Çalışma bölgesi, rotor hızı	MPPT Nominal hız Nominal güç bölgesi geçişi	Tüm bölgeler için uygun yapı	Sensör ihtiyacı
Chavero-Navarrete ve diğ. (2019)	TLBO optimizasyonlu PI	Rüzgâr hızı değişimi	K_p ve K_i dinamik hesaplanır	Gerçek zamanlı adaptasyon	Karmaşık yapı
Van ve diğ. (2015)	Bulanık mantık	Güç, jeneratör hızı	Kanat açısı ayarı	Anemometre gerektirmez	Kural tanımı önemli
Bouregba ve diğ. (2022)	Fuzzy tabanlı PI	Hata (e), hata değişimi (de)	du \rightarrow PI'ye aktarılır	Dinamik sistem tepkisine uygun	Üyelik tanımı hassas
Elsisi ve diğ. (2020)	ANFIS	e, de	Sugeno çıkışı kontrol sinyali	Öğrenme yeteneği yüksek	Eğitim süreci gerekli
Bu tez (2025)	dP/d θ tabanlı Fuzzy-PI	e,de, dP/d θ	K_p ve K_i ayrı FIS ile	Aerodinamik duyarlılıkla adaptif yapı	Doğrusal dışı model gerektirir

ayarlanabildiği bir yapay sinir ağı ile, bulanık kuralların çıkarım sürecini birleştirerek güçlü ve esnek bir kontrol yaklaşımı sunmaktadır. Bu yaklaşım, beş katmanlı yapısıyla bulanık mantığın avantajlarını sinir ağı öğrenme yetenekleri ile birleştirerek, kanat açısı kontrolü gibi karmaşık sistemlerde başarıyla uygulamaktadır.

Bu tez çalışmasında Çizelge 1.2.'deki kıyaslama tablosunda belirtildiği gibi değişken rotor hızlarında adaptif PI kazançlarını optimize ederek hem maksimum güç takibini hem de sistem yüklerini dengeleme açısından daha esnek bir yapı sunulmaktadır. Ayrıca, değişken sistem parametrelerine göre hesaplanan K_p ve K_i kazançları ile önerilen kontrolcü, literatürde sunulan algoritmalarından farklı olarak, parametre belirsizliklerine karşı daha dayanıklı bir yapı hedeflenmektedir. Rüzgâr Hızı Tahmini (Wind Speed Estimation, WSE) yöntemi ile sistemin performansını optimize etmek için rüzgâr hızı tahmin edilerek kontrol kazançları dinamik olarak ayarlanır.

Değişken rüzgâr hızlarında rotor hızını düzenlemek amacıyla PI tabanlı bir kanat açısı kontrolörü tasarlanmıştır. Kanat açısı kontrol sisteminde, servomekanizma modeli kullanılmış ve servo zaman sabiti, kanat açısı sınırları (0° - 30°) ile kanat açısı değişim hızı ($\pm 10^{\circ}/s$) dikkate alınmıştır. PI kontrolörünün kazançları, aerodinamik duyarlılığa bağlı olarak kazanç ayarlama yöntemiyle belirlenmiş ve doğrusal olmayan aerodinamik etkiler, bu kazanç programlaması sayesinde telafi edilmiştir. Bu yaklaşım, NREL 5MW türbin modeli kullanılarak doğrulanmış ve aerodinamik duyarlılığın PI kazançları üzerindeki etkisi analiz edilmiştir (Hansen ve diğ., 2005).

Literatürde kazanç ayarlarının genellikle rotor hızı, kanat açısı veya sabit çalışma bölgelerine göre yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise aerodinamik duyarlılığa ($dP/d\theta$) dayalı kazanç zamanlaması kullanılması, yöntemin literatürdeki benzerlerinden ayrılmasını sağlayan önemli bir farklılıktır.

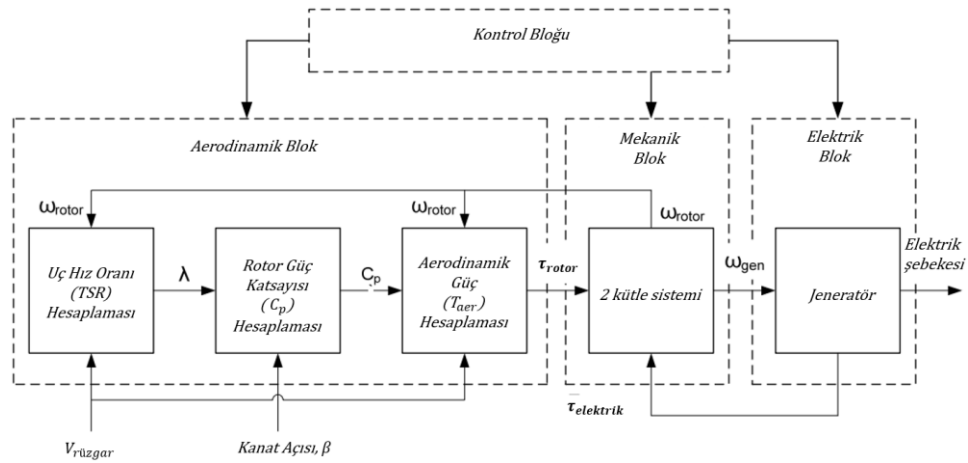
Bu yaklaşımı özgün kılan noktalar şunlardır: Öncelikle, $dP/d\theta$ değerleri doğrudan FAST gibi bir yazılımdan alınmak yerine, çalışmada kullanılan aerodinamik model ya da uygunlaştırılmış verilerden hesaplanmıştır. Ayrıca, aerodinamik duyarlılık terimi bulanık kontrol sistemine dinamik giriş olarak entegre edilmiştir. Bu sayede kontrol sistemi, önceden tanımlı sabit bölgelere değil, gerçek zamanlı aerodinamik davranışa tepki verebilmektedir.

Şekil 2.15. tezin genel yapısını özetlemektedir. En alt kademede literatür taraması yer almakta olup, bu temel üzerine aerodinamik, mekanik ve kanat açısı tahrik modelleri oluşturulmuştur. Bir üst basamakta kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiş, daha sonra simülasyonlarla performans değerlendirmesi yapılmıştır. En üstte ise sonuç ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmaktadır.



Şekil 2.15. Tez çalışması konu başlıkları

3. RÜZGAR TÜRBİNİ MATEMATİKSEL MODELLEMESİ



Şekil 3.1. Rüzgâr türbini alt bileşenleri blok diyagramı (Santoso & Singh, 2008-2011)

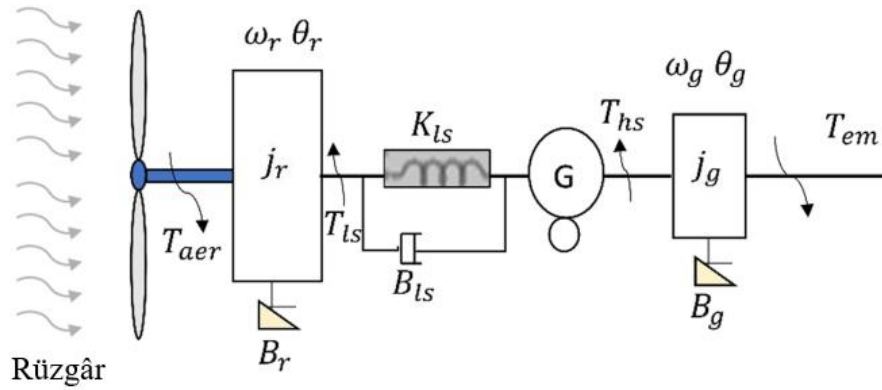
Şekil 3.1.'de verilen rüzgâr türbini üç matematiksel model kullanılarak tanımlanabilir: aerodinamik model, mekanik model ve elektriksel model.

- Aerodinamik model, belirli bir hızda hareket eden hava kütlesi kullanılarak türbinin kanatlarına etki etmesi sonucu dönme hareketi elde edilmesini ve jeneratörün şaftına iletilen mekanik enerjiye dönüşüm sürecini temsil eder.
- Mekanik model, sistemin şaftındaki hız ve torka yansıyan mevcut mekanik gücü tanımlar.
- Elektriksel model, mekanik torkun jeneratör çıkışında elektrik enerjisine dönüşümünü açıklar.

Rüzgâr türbininin simülasyonu veya benzetimi (emulation) için yukarıda bahsedilen üç matematiksel modelin kullanılması gerekmektedir. Bu modeller yardımıyla, verilen bir rüzgâr profiline bağlı olarak mekanik tork ve şaft hızı elde edilir ve bunlar benzetim aşamasında kullanılır (Martinello, 2016). Bu çalışmadan farklı olarak elektriksel model kısmı tez çalışmasına dahil edilmeyecektir. Bunun yerine sistemin mekanik davranışlarının daha iyi anlaşılması ve kanat açısı tahrik sistemi modellenmesi üzerinde durulmuştur. Sadece elektrik modelle ilgili olarak jeneratörden gelen elektromanyetik tork kuvveti Bölüm 3.3. Mekanik Şaft Modeli bölümünde açıklanacaktır.

Şekil 3.2. aerodinamik sistem, dişli kutusu ve jeneratörden oluşan geleneksel bir değişken hızlı rüzgâr türbinini göstermektedir. Mekanik torkun dönme eksenine iletilmesine katkıda bulunan her şey, bir güç aktarma organı veya mekanik iletim sistemi olarak bir araya getirilmiştir.

Mekanik modelleme, basitten karmaşığa kadar değişebilir; bazı modeller, modellenen sistemin karmaşıklığına bağlı olarak altı kütleye kadar kullanır. Modelin girdileri aerodinamik ve elektromanyetik tork iken, çıktısı dönme hızı olacaktır. Modelin basitleştirici varsayımları şu şekildedir:



Şekil 3.2. Rüzgâr türbini dinamiği (Bouregba ve diğ., 2022)

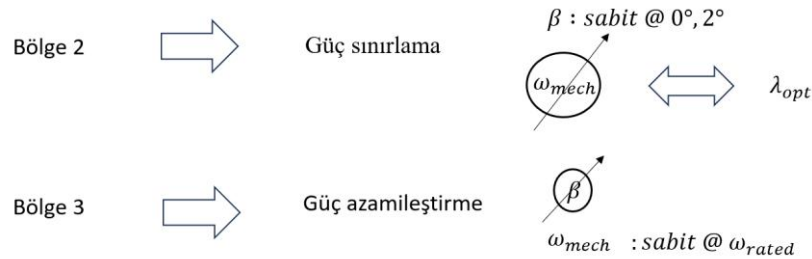
- Kanatların esneklik modlarının yeterince yüksek olduğu ve bu nedenle ihmal edilebileceği düşünülmektedir. Esneklik modları, yavaş şaftın esnek elemanında da bulunur. Ayrıca, hızlı şaftın sonsuz derecede rijit olduğu kabul edilir (Ngo ve Nguyen, 2021).
- Dişli kutusunun ve rotor şaftın ataleti, rotora (J_r) entegre edilmiştir ve bu, bütünü temsil eder.
- Göbeğin ataleti, türbinin toplam ataletinin yalnızca %1 'ini oluşturduğu için ihmal edilebilir. Jeneratöre bağlı jeneratör şaftın ataleti (J_g) ile temsil edilir.
- Türbin ekseninin burulması, geometrik şekli bilindiği sürece, rijitlik sabiti açısından analitik olarak hesaplanabilir.
- Kanatların, göbeğin, çarpanın ve yavaş şaftın burulma kuvvetleri, yavaş şaftın toplam esneklik katsayısına (K_{ls}) dahil edilmiştir.
- Tahrik ünitesinin yataklarındaki viskoz sürtünme, (B_r) ve (B_g) katsayıları ile dikkate alınır.
- Türbinin ataleti, büyük ölçüde kanatların ataletine eşittir (Bouregba ve diğ., 2022).

3.1. Rüzgâr Türbini Çalışma Bölgeleri

Rüzgâr türbinlerinin performansı değişken rüzgâr hızına bağlı olarak değişir. Anlık rüzgâr hızı değişimi sistemin sahip olduğu aerodinamik etkileri de şekillendirir. Türbinin çalışma bölgelerini belirlemek ve aerodinamik parametreleri (β , TSR, C_p) analiz etmek, sistemin dinamik davranışlarını anlama açısından dolayısı ile maksimum güç çıkarımı açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda rüzgâr türbinlerinin dört ana hız bölgesinde çalıştığı söylenebilir:

Bölge 1 (Kesme Hızı Altı Bölgesi 0-5 m/s): Bu bölgede rüzgâr hızı, türbin rotorunun dönmesini sağlayacak yeterli kinetik enerjiye sahip değildir. Türbin bu aralıkta genellikle durur veya yalnızca çok düşük hızlarda serbestçe döner. Üretilen mekanik tork, sistemin ataletini ve sürtünme kuvvetlerini yenmeye yetmediği için jeneratöre güç aktarımı gerçekleşmez.

Bölge 2 (Kısmi Yük Bölgesi 5-12 m/s): Türbin, rüzgâr hızına bağlı olarak kısmi güç üretmeye başlar. Bu bölgede MPPT (Maximum Power Point Tracking-Maksimum Güç Noktası Takibi) yöntemi kullanılarak aerodinamik verimlilik artırılır (Hossam, 2019). Genellikle kanat açısı sabit kalır. Türbin C_{p_max} değerine ulaşmak için TSR'yi optimize eder (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Çalışma bölgesine bağlı güç ayarlama koşulları

Bölge 3 (Nominal Güç Bölgesi 12-25 m/s): Bu bölgede türbin anma/nominal hızına ulaşmıştır. Jeneratör beklenen maksimum gücü üretmesi için kanat açısı kontrol sistemi devreye girer, eğer rüzgâr hızı aşırı yüklemelere ulaşırsa kanat açısı artırılarak aerodinamik yükler azaltılır.

Bölge 4 (Kesme Hızı Üstü Bölgesi 25 m/s ve üzeri): Rüzgârdan elde edilen güç, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olduğu için türbin aşırı rüzgâr hızlarından korunmalıdır. Kanat açısı maksimum değerine (90°) çıkarılarak aerodinamik kuvvet

etkisi en aza indirilir; gerekli durumlarda acil durum freni kullanılarak tamamen durdurulur.

3.2. Aerodinamik Model

Değişken rüzgâr hızları için aerodinamik türbin modeli, güç aktarım sistemi ve jeneratör modeli Şekil 3.1.'de olduğu gibi gösterilmiştir. Aerodinamik türbin nonlineer modeli için elde edilecek güç:

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 C_p(\lambda, \beta) \cdot V^3 \quad (3.1)$$

Burada R rotor yarıçapı, ρ hava yoğunluğudur. Rüzgârdan elde edilecek mekanik güç P_{aer} , rüzgâr hızı V 'nin küpü ile doğru orantılıdır. Güç katsayısı (C_p); kanat açısı (β) ve uç hız oranı (λ) fonksiyonu olarak tanımlanabilir. λ ve rotor açısal dönme hızı ω_r arasında lineer bir bağıntı mevcuttur:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{V} \quad (3.2)$$

Dolayısıyla rotor hızındaki değişim, ya da kanat çapı seçimi doğrusal olarak λ değerini etkileyecektir. Benzer şekilde rüzgâr hızı değişimi ters orantılı olarak λ değerine etki edecektir. Kanat açısı sabit bile olsa rüzgâr hızı değişimi, λ değerini değiştirecek bunun sonucunda da güç katsayısı değeri değişecektir. Bu değişim beraberinde güç üretimine, diğer bir deyişle şaft üzerinde bulunan tork ve hız değeri arasında değişimlere sebep olacaktır:

$$P_{aer} = \omega_r T_{aer} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3) kullanılarak aerodinamik tork denklemi ve katsayısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$T_{aer} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot C_{aer}(\lambda, \beta) \cdot V^2 \quad (3.4)$$

$$C_{aer}(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3.5)$$

Güç katsayısı değerini kullanmak için gerekli sabit değerler aşağıdaki denklemlerden elde edilir:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{R} - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5 \right) e^{-c_6 \frac{1}{R}} \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.7)$$

$$C_1 = 0.5, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 0, C_5 = 5, C_6 = 21 \text{ ve } x = 0 \quad (3.8)$$

Şekil 3.4. rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını anlamak ve optimize etmek için kullanılan temel bir modeldir. BEM kullanılırken yapılan varsayımlar:

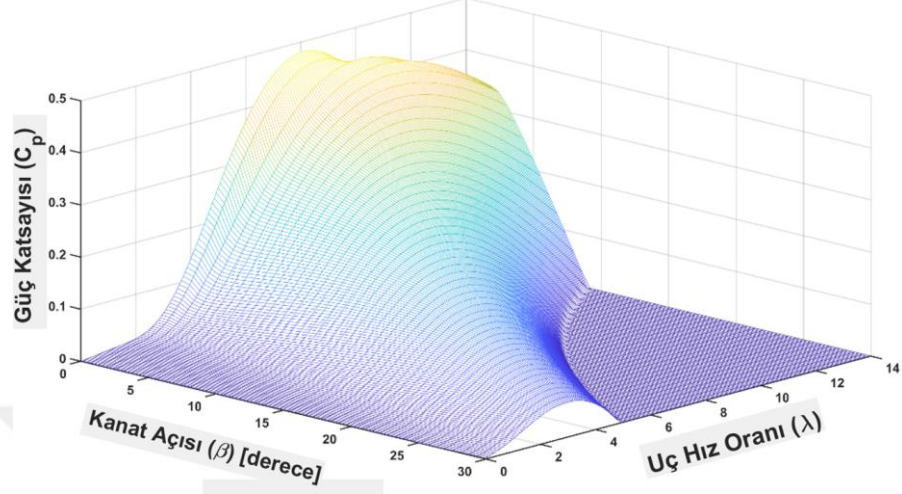
- Gerçek türbin değerlerinden alınarak elde edilmiş deneysel (ampirik) değerlerdir.
- BEM'a göre kanat etrafındaki akışın kararlı (steady), sıkıştırılamaz (incompressible) olduğu varsayılır.
- Uç kayıpları (tip losses) ve dinamik stall (dynamic stall) etkileri ihmal edilebilir.
- Kanat profili (airfoil shape) ve giriş uzunluğu dağılımı (chord distribution) sabit kabul edilir.

Yukarıda verilen (3.1) ile (3.8) arasındaki denklemler kullanılarak farklı TSR ve kanat açısı değerleri için gerekli güç katsayısı değerleri üç boyutlu olarak Şekil 3.4.'de olduğu gibi elde edilir.

Kanat açısının artması durumunda, özellikle $\beta > 15^\circ$ değerlerinden itibaren güç katsayısında hızlı bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu durum, aerodinamik verimliliğin azaldığını ve sistemin daha az güç üretimi gerçekleştirdiğini göstermektedir. Benzer şekilde, çok düşük veya çok yüksek λ değerlerinde de C_p değerleri oldukça düşüktür. (Hansen, 2008).

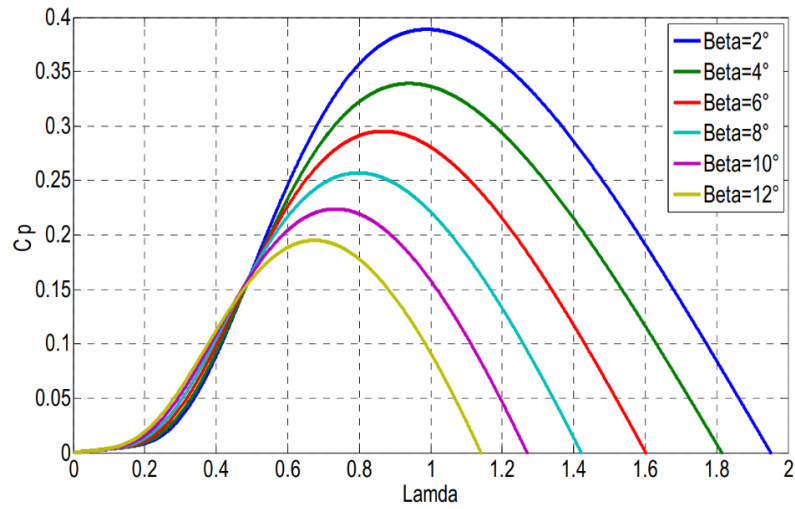
Bu veriler kullanılarak, farklı rüzgâr hızlarına karşılık gelen optimum λ ve kanat açıları belirlenmiş ve bu kombinasyonlar değer tablosu (lookup table) olarak modellenmiştir. Oluşturulan bu tablo, sabit bir aerodinamik verimlilik varsayımı yerine, sistemin her çalışma noktasındaki optimum değerlerini esas alarak daha doğru ve dinamik bir kontrol yaklaşımı sağlamaktadır. Böylece, kontrol sisteminin hem maksimum güç

takibi (MPPT) hem de yük koruma rejimlerinde kararlı ve verimli çalışması hedeflenmiştir.



Şekil 3.4. Kanat açısı ve λ değişimine bağlı C_p grafiği

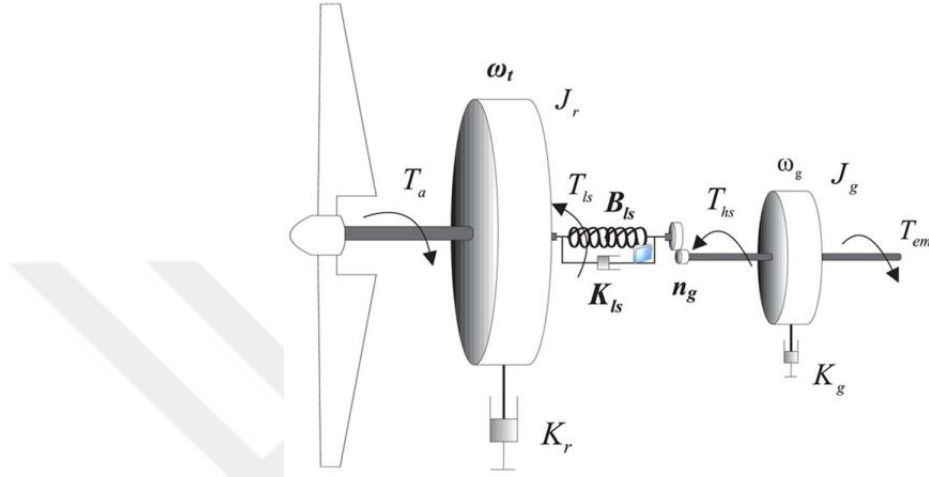
Şekil 3.4.'deki grafik, rüzgâr türbini aerodinamik modelinin doğrulanması ve maksimum güç katsayısını sağlayan optimum çalışma noktalarının belirlenmesi için kullanılabilir. Maksimum C_p değerlerinin hangi λ ve β kombinasyonlarında elde edildiğinin bilinmesi sistemin dinamik davranışlarının belirlenmesinde çok önemlidir. Bu bilgilere göre kontrolcü tasarımı ve sistemin istenilen çalışma koşulları için gerekli girdiler Şekil 3.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. C_p nin λ ve β ya bağlı grafiği (Benbouzid, 2022)

Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi C_p , bazı kanat açıları için yaklaşık 0.4'e kadar çıkmaktadır. Ayrıca, teorik olarak ulaşılabilecek maksimum C_p değeri 0.593'tür ve bu değer literatürde Betz limiti olarak bilinmektedir.

3.3. Mekanik Şaft Modeli



Şekil 3.6. Rüzgâr türbini iki kütle modeli (Boukhezzar ve Siguerdidjane, 2011)

Aerodinamik tork T_a tarafından veya belirli bir hızda tahrik edilen rotorun dinamik tepkisi aşağıdaki gibi gösterilir:

$$J_r \ddot{\theta}_r = T_a - T_{ls} - K_r \dot{\theta}_t \quad (3.9)$$

Düşük hızlı şaft torku T_{ls} rotor üzerinde bir frenleme torku olarak etki eder (Şekil 3.6.). Bu tork, ω_r ile ω_{ls} arasındaki farktan kaynaklanan burulma ve sürtünme etkilerinin bir sonucudur.

$$T_{ls} = K_{ls}(\omega_r - \omega_{ls}) + B_{ls}(\theta_r - \theta_{ls}) \quad (3.10)$$

Jeneratör, yüksek hızlı şaft torku T_{hs} tarafından tahrik edilir ve jeneratörün elektromanyetik torku T_{em} tarafından frenlenir.

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \quad (3.11)$$

İdeal bir dişli kutusu ve aktarım oranı n_g varsayımıyla, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} \quad (3.12)$$

Jeneratör dinamikleri, düşük hız tarafına dönüştürülerek ve (3.11) ile (3.12) denklemleri kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$n_g^2 J_g \dot{\omega}_g = T_{ls} - (n_g^2 K_g) \omega_g - n_g T_{em} \quad (3.13)$$

Eğer düşük hızlı shaftın tamamen rijit olduğu varsayılırsa, türbin tek kütleli bir model olarak ele alınabilir:

$$J_t \dot{\omega}_r = T_a - K_t \omega_r - T_g \quad (3.14)$$

Denklemdaki parametrik değerler:

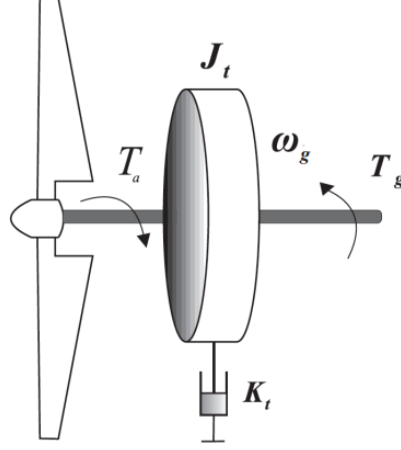
$$J_t = J_r + n_g^2 J_g \quad (3.15)$$

$$K_t = K_r + n_g^2 K_g \quad (3.16)$$

$$T_g = n_g T_{em} \quad (3.17)$$

Burada, tüm türbin ve jeneratör sistemi eşdeğer bir atalet J_t olarak modellenmiş ve shaft esneklik etkileri ortadan kaldırılmıştır. Bu basitleştirme, türbin dinamiklerini yaklaşık olarak temsil ederken hesaplama karmaşıklığını azaltarak kontrol sistemi tasarımı için faydalı hale getirir.

Geçişin etkileri incelendiğinde, iki-kütle modeli shaft esnekliği ve burulma dinamiklerini dikkate alarak ayrıntılı tahrik sistemi çalışmaları ve yorulma analizleri için önemli bir yaklaşım sunar. Buna karşılık, tek-kütle modeli kontrol tasarımını basitleştirir ve dinamik durumların sayısını azaltarak gerçek zamanlı simülasyonlar ve temel kontrol analizleri için daha uygun hale gelir. Benzer olarak Vidal ve diğ. (2012) tek kütle benzetim çalışması yapmıştır (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Rüzgar rübini tek kütle modeli (Boukhezzar ve diğ., 2006)

İki-kütle modelinden bir-kütle modeline geçiş, genellikle sistemin basitleştirilmesi ve kontrol tasarımını kolaylaştırmak için tercih edilmektedir. Bu geçiş süreci, Santoso ve Singh (2008-2011) çalışmasında detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3.4. Kanat Açısı Eyleyici Modeli

Kanat açısı eyleyici sistemleri, rüzgâr türbinlerinin kanat açılarını optimize etmek için kullanılan kritik bileşenlerdir, tahrik sistemleri hidrolik veya elektrikle çalıştırılabilir. Elektrik eyleyicileri, konum hassasiyeti ve dinamik hız tepkisi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu tür sistemlerde, her bir kanat servo motor kullanılarak bireysel olarak kontrol edilir (Hwas ve Kateb, 2012).

Bu çalışmada eyleyici olarak birinci dereceden bir DC servo motor modeli kullanılmaktadır. Kanat açısının dinamik davranışı, doğası gereği doğrusal olmayan bir yapıya sahip olsa da Dorf ve Bishop (2013), kullandıkları modelde sadeleştirme amacıyla bu davranışı doğrusal olarak kabul etmiştir. Bu varsayım, sistemin temel dinamiklerini daha basit bir şekilde modellemeyi mümkün kılar. Servo motor modellemesinde hız kontrolü için motorun transfer fonksiyonu, (3.18) denklemi ile tanımlanmıştır:

$$G(s) = \frac{\alpha}{\tau s + \beta} \quad (3.18)$$

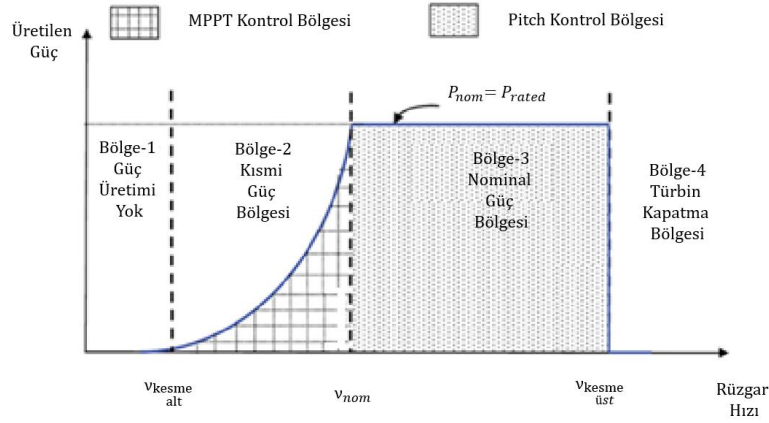
Bu sadeleştirilmiş transfer fonksiyonu, servo motorun dinamik davranışını etkili bir şekilde modelleyerek, konum kontrolünde hassasiyet sağlar ve kontrol sistemi

tasarımı için sağlam bir temel oluşturur. Doğrusal varsayımlar ve sadeleştirilmiş parametreler, sistemin dinamiklerini koruyarak hesaplama açısından verimlilik sunmaktadır (Civelek ve diğ., 2015).

$$\dot{\beta} = -\frac{\beta}{T_c} + \frac{\beta_{ref}}{T_c} \quad (3.19)$$

(3.19) denklemini incelendiğinde daha küçük bir zaman sabiti τ (daha hızlı sistem) genellikle sistemin daha duyarlı olmasını sağlar, yani giriş veya referans değişikliklerine daha hızlı uyum sağlayabilir (Ngo ve Nguyen, 2020). Ancak, bu artan duyarlılık sistemin kararlılığını zorlaştırabilir, çünkü uygun şekilde ayarlanmazsa aşma (overshoot) veya salınımlara neden olabilir. Ayrıca, daha büyük bir zaman sabiti (daha yavaş sistem), kontrol edilmesi ve kararlı hale getirilmesi daha kolaydır, ancak dinamik değişimlere yeterince hızlı tepki veremeyebilir.

4. RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT AÇISI KONTROLCÜ TASARIMI



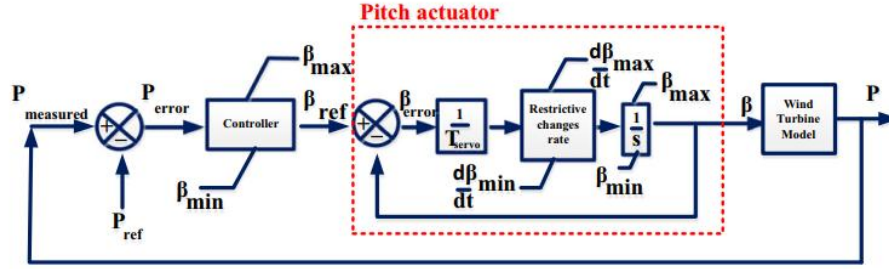
Şekil 4.1. Rüzgâr türbini çalışma bölgeleri

Yüksek güç üretimi yapan üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi iki farklı kontrol bölgesi bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi tork/hız kontrol, diğeri ise kanat açısı kontrolüdür. Hız kontrol mekanizmasında türbin, ikinci bölgede olduğu durumda devreye girer. Buradaki kontrol amacı görece orta seviyedeki rüzgâr hızlarında maksimum güç değerini yakalamaktır. Rüzgâr anma hızına (v_{nom}) ya da anma gücünün (P_{nom}) üzerine çıktığı görece yüksek şiddetteki hızlarda kanat açısı kontrol mekanizması, kanat açısını değiştirerek jeneratör şaft hızının istenilen değer aralığında tutulmasını sağlar. Bu kontrol mekanizması ile rüzgâr hızından kaynaklı dalgalanmalar en aza indirilerek elektrik enerjisi üretimindeki olası kayıplar azaltılmış olur, diğer bir deyişle rüzgârın hareketinden dolayı sahip olduğu kinetik enerjisi en az kayıpla mekanik enerjiye; mekanik kayıplar bir tarafa bırakılırsa bu şaft gücü de jeneratöre aktarılmış olur. 12-25 m/s aralığı bu çalışma bölgesini temsil etmektedir. 25 m/s üzerindeki rüzgâr hızları görece aşırı yüksek şiddetteki hızlarda türbin kontrol sistemi tarafından güvenlik amacıyla devre dışı bırakılmakta ya da türbinin zarar görmesini önlemek amacıyla aktif kanat açısı kontrolü ile aerodinamik frenleme uygulanmaktadır (Boukhezzer ve diğ., 2006).

Rüzgâr türbini performansı yalnızca türbin donanımına bağlı değildir; kontrol sistemi de bu konuda önemli bir rol oynamaktadır. Kontrol sisteminin temel amacı, mümkün olan maksimum gücü emmek ve yük değişimleri ile diğer faktörler karşısında güç seviyesini sabit bir düzeyde tutmaktır.

Rüzgâr türbinlerinin sabit hızdan değişken hıza geçmesiyle birlikte kontrol sistemi de tsr kontrolünden kanat açısı kontrolüne geçmiştir. Kanat açısının değişiminin güç

üretimi üzerinde önemli bir etkisi olduğundan, güç kontrolünü optimize etmek için kanat açısı kontrolü yaygın bir yöntemdir.



Şekil 4.2. Kanat açısı kontrolü blok diyagramı (Kamarzarrin ve Refan, 2020)

Şekil 4.2.'de rüzgâr türbininin kanat açısı modelinin blok diyagramında kanat açısı β ile optimum açı (β_{ref}) arasındaki ilişki ifade edilmektedir, τ bir zaman sabitidir. Türbin gücü $P_{measured}$ nominal değerini ($P_{rated} = P_{ref}$) aştığında, aradaki hata sinyali ile kanat açısına komut gönderilir ve bu durumda güç üretimini azaltan bir β_{ref} değerine neden olur. Genel olarak, kontrolörler ve eyleyiciler kanat açısını 0° ile 90° arasında sınırlar. Bu durumda, kanat açısı kontrolörü açığı yavaş ve sürekli bir şekilde artırarak türbin tarafından üretilen mekanik gücü azaltırken rotor hızının artması önlenmiş olur.



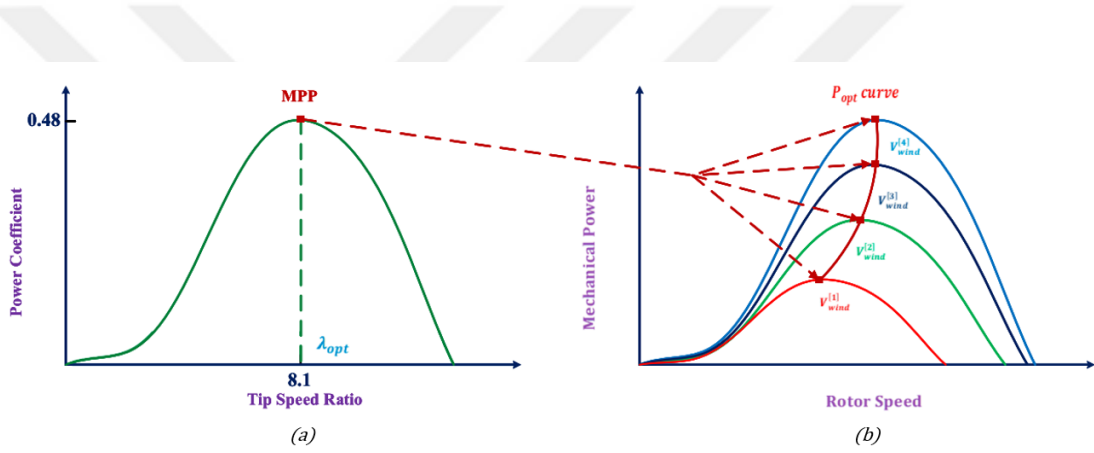
Şekil 4.3. Farklı açılardan (0-90 derece) rüzgâr türbini rotor kanatlarının görünümü (windpowermonthly)

Kanat açıları genellikle 0° ile 35° arasında değişir. 25° üzerindeki kanat açısı değerlerinde λ küçüldüğü için güç katsayısı değeri de küçülecek ve belli bir açının üzerindeki değerlerde güç üretimine etkisi asgari seviyede olacaktır. Bu durum aerodinamik duyarlılık kavramı ile doğrudan ilgili olup 4.1.2. K_p ve K_i değerinin değişken sistem parametrelerine göre hesaplanması bölümünde daha detaylı açıklanacaktır. Şiddetli rüzgarlarda kanat açısını değiştirmek yeterli miktarda güç

kontrolü sağlamayacağı için bu açı 90° ile 95° arasına getirilir ve türbinin güvenliği açısından kapatılması sağlanır (Şekil 4.3.), (Boukhezzar ve diğ., 2006).

4.1. Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking, MPPT)

Rüzgâr türbinlerinde Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT), türbinin değişken rüzgâr koşullarında en yüksek verimle çalışmasını sağlamak için kullanılan bir yöntemdir. MPPT, belirli bir uç hız oranı (λ) ve güç katsayısı (C_p) kombinasyonunda türbinin üretebileceği maksimum gücü belirlemeyi amaçlar. Şekil 4.4. rüzgâr türbininin güç karakteristiklerini göstererek, MPPT'nin temel prensiplerini açıklamaktadır (Chatterjee ve Kumar, 2016).



Şekil 4.4. (a) grafiği, güç katsayısının (C_p) uç hız oranına (λ) bağlı olarak değişimini ve maksimum güç noktasını (MPP) göstermektedir. (b) grafiği ise farklı rüzgâr hızlarında rotor hızına karşılık gelen mekanik güç eğrilerini ve bu eğrilerden elde edilen optimum güç eğrisini (P_{opt}) göstermektedir. (Youssef ve diğ., 2019)

Şekil 4.4.(a) güç katsayısının (C_p) uç hız oranı (λ) ile değişimini göstermektedir. MPPT algoritması, türbinin en yüksek verimle çalışmasını sağlamak için optimum uç hız oranı (λ_{opt}) noktasını belirler. Bu noktada güç katsayısı maksimum değerine (C_{pmax}) ulaşır. Şekil 4.4.(b) ise türbinin mekanik güç çıkışını rotor hızına bağlı olarak göstermektedir. Farklı rüzgâr hızlarında, türbinin güç eğrileri değişmekte ve her rüzgâr hızı için optimum güç noktaları bulunmaktadır.

P_{opt} eğrisi, türbinin farklı rüzgâr hızlarında çalışırken maksimum güç üretimini sağlayan noktaları temsil eder. MPPT kontrol stratejisi, türbinin rotor hızını ve jeneratör torkunu bu eğriye uyacak şekilde ayarlayarak, her rüzgâr hızında türbinin en verimli çalışmasını sağlamayı hedefler. Bu bağlamda, MPPT kontrol sistemi, optimum uç hız

4.1.1. Değişken rüzgâr hızlarında sabit kanat açısı-rotor hızı ile PI kontrolcü tasarımı

Tek kütle modeli (4.1) denkleminde sıfır başlangıç koşulları için Laplace dönüşümü uygulandığında:

$$J_t \dot{\omega}_r = T_{ref} - K_t \omega_r \quad (4.1)$$

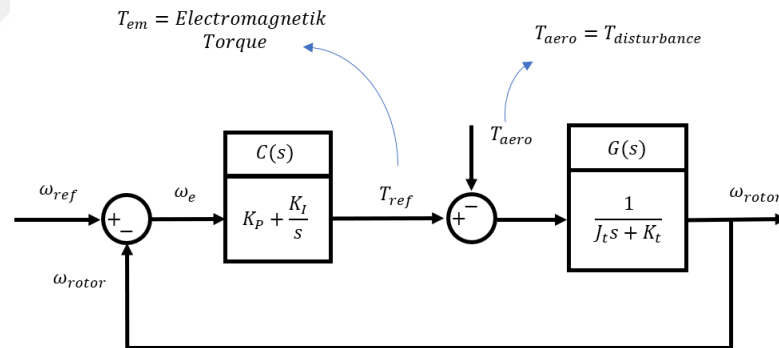
$$J_t s \Omega_r(s) = T_{ref}(s) - K_t \Omega_r(s) \quad (4.2)$$

Açık çevrim transfer fonksiyonu $G(s)$:

$$\Omega_r(s)(J_t s + K_t) = T_{ref}(s) \quad (4.3)$$

$$G(s) = \frac{\Omega_r(s)}{T_{ref}(s)} = \frac{1}{J_t s + K_t} \quad (4.4)$$

(4.4) deki transfer fonksiyonu, giriş torkunun, $T_{ref}(s)$ rotor hızına, $\Omega_r(s)$ olan etkisini gösterir (Dorf ve Bishop, 2013).



Şekil 4.6. Rüzgâr türbini rotor hızı kontrol diyagramı

Şekil 4.6.'da PI, kontrolcü sistemdeki bozucu etkileri en aza indirmek amacıyla tasarlanmıştır.

PI kontrolcü sistemi transfer fonksiyonu:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.5)$$

Sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu:

$$T_{cl}(s) = \frac{C(s)G(s)}{1+C(s)G(s)} \quad (4.6)$$

Denklem (4.4)'te tanımlanan $G(s)$ ve Denklem (4.5)'te tanımlanan $C(s)$ ifadeleri, Denklem (4.6)'da yerine konulduğunda sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu elde edilir.

$$T_{cl}(s) = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \frac{1}{J_t s + K_t}}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \frac{1}{J_t s + K_t}} \quad (4.7)$$

Sadeleştirilirse:

$$T_{cl}(s) = \frac{K_p J_t s + K_p K_t + K_i}{J_t s^2 + (K_t + K_p J_t) s + (K_p K_t + K_i)} \quad (4.8)$$

(4.8) denklemi ikinci dereceden bir sistemdir. Bu transfer fonksiyonu (4.9) denkleminde verilen standart ikinci dereceden sistemle karşılaştırıldığında, pay kısmındaki $K_p J_t s$ terimi normalizasyon sürecinde kaybolur. Bunun sebebi, standart ikinci dereceden sistem modelinde payda kısmının doğrudan karakteristik denklemlerle tanımlanması ve payın yalnızca sistem kazancını belirleyecek şekilde sadeleştirilmesi gerekliliğidir. Bu dönüşüm, sistemin time domain ve frekans domain analizlerinde kullanılabilir hale getirilmesi açısından önemlidir (Franklin ve diğ., 2019).

$$T_{cl}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.9)$$

(4.9) denkleminde ω_n doğal frekansı, ζ sönümlenme oranını ifade etmektedir.

s^1 'li terim eşitlendiğinde:

$$2\zeta\omega_n = \frac{K_t + K_p J_t}{J_t} \quad (4.9a)$$

s^0 'li terim eşitlendiğinde:

$$\omega_n^2 = \frac{K_p K_t + K_i}{J_t} \quad (4.9b)$$

İstenilen aşım ve yerleşme süresi değerleri kullanılarak doğal frekans, ω_n ve sönümlenme oranı, ζ değerleri hesaplanabilir.

Overshoot (aşım) ve damping ratio (sönümlenme oranı):

$$\zeta = \frac{-\ln(M_p/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(M_p/100)}} \quad (4.10)$$

Settling time (yerleşme süresi) ve natural frequency (doğal frekans):

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta \times t_s} \quad (4.11)$$

ζ ve ω_n değerlerini (4.9a) ve (4.9b) denklemlerinde yerine koyularak K_p ve K_i değerleri elde edilir:

$$K_p = \frac{J_t \left(2\zeta\omega_n - \frac{K_t}{J_t} \right)}{K_t} \quad (4.12)$$

$$K_i = \frac{J_t\omega_n^2 - K_p K_t}{K_t} \quad (4.13)$$

Hesaplanılan K_p ve K_i değerleri, sistemin atalet, sönüm ve rijitlik gibi sabit parametrelerine dayalı olarak hesaplanmaktadır. Bu yöntem, sistemin belirli bir çalışma noktasında faaliyet gösterdiği ve bu parametrelerin yaklaşık olarak sabit kaldığı durumlar için uygundur. Ancak, rüzgâr türbini gibi dinamik bir sistemde, çalışma koşulları (örneğin, rüzgâr hızı, rotor hızı ve aerodinamik tork) önemli ölçüde değişebildiğinden, kontrolör kazançlarının bu değişen koşullara uyum sağlayacak şekilde ayarlanması faydalı olacaktır (Hand, 1999).

4.1.2. K_p ve K_i değerlerinin değişken sistem parametrelerine göre hesaplanması

Denklem (4.14) ve (4.15), K_p ve K_i değerlerinin adaptif bir şekilde belirlenmesi için sistem parametrelerine bağlı fonksiyonlar olarak ifade edilmiştir. Burada, doğal frekans ω_n ve sönüm oranı ζ gibi sistemin dinamik özelliklerinin, aşım M_p ve yerleşme

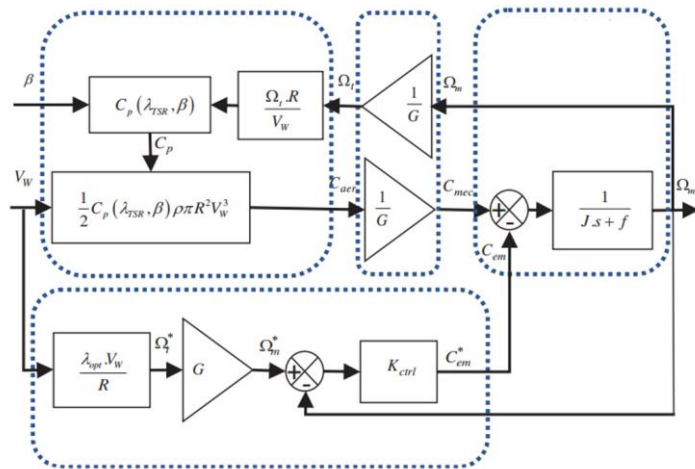
süresi t_s gibi geçici yanıt özellikleriyle ilişkilendirilerek tanımlandığı gösterilmektedir. Özellikle, oransal kazanç K_p , sistemin toplam atalet momenti J_t , rijitlik katsayısı K_t ve doğal frekans ω_n gibi parametrelerin bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir:

$$K_p = f(J_t, K_t, \omega_n, \zeta) \quad (4.14)$$

$$K_i = f(J_t, K_p, K_t, \omega_n) \quad (4.15)$$

Denklem (4.14) ve (4.15) kontrol kazançlarının sistemin fiziksel parametreleri ve dinamik özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğunu ve optimal performans sağlamak için uyarlamalı olarak belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Özellikle değişken çalışma koşullarına sahip sistemlerde, sabit kazançlar yerine değişken parametrelerden türetilmiş uyarlamalı kazançlar kullanılması, sistemin genel performansını ve kararlılığını artıracaktır.

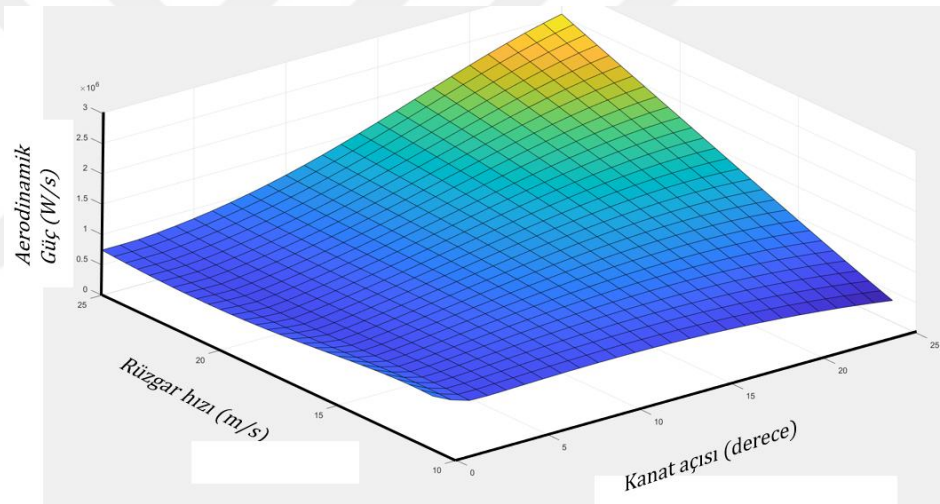
Kontrolcü tasarımının belirli bir çalışma noktası etrafında optimize edilmesi için yukarıda verilen sistem parametrelerinden bazıları sabit kabul edilebilir. Rotor hızı (ω), tork (T), kanat açısı (β) ve rüzgâr hızı (V) gibi değişkenlerin sabitlenmesi, kazançların bu parametrelerden birinin değişmediği bir durumda hesaplandığını ifade eder. Ancak, gerçek sistemde bu parametreler sürekli değiştiğinden, adaptif kazançların kullanılması, değişen çalışma koşullarına daha iyi uyum sağlayarak sistemin performansını artırır. Bu yaklaşım, sabit kazançlarla sadece belirli bir çalışma noktasında sağlanabilen optimum performansın, değişken koşullarda da korunmasına olanak tanır.



Şekil 4.7. Kanat açısı kontrol diyagramı (Kharchouf ve Nasser, 2018)

4.2. Değişken Rüzgâr Hızlarında Kanat Açısı Değişimi ile Güç Kontrolü

Şekil 4.9. aerodinamik gücün (P_{aero}), rüzgâr hızı ve kanat açısı bağlı değişimini göstermektedir. Beklendiği gibi, aerodinamik güç, rüzgâr hızı arttıkça önemli ölçüde artmakta ve belirli bir kanat açısında maksimuma ulaşmaktadır. Düşük kanat açılarında, optimal aerodinamik verimlilik sayesinde güç üretimi en yüksek seviyededir. Ancak, kanat açısı belirli bir eşik değerinin üzerine çıktığında, aerodinamik verimlilik düşerek güç üretiminde azalmaya neden olmaktadır. Bu durum, 3. Bölge’de kullanılan kanat açısı kontrol stratejisiyle uyumludur; türbinin aşırı yüklenmesini önlemek için kanat açısının artırılmasıyla güç üretimi sınırlandırılır. 3D grafik, aerodinamik güç, rüzgâr hızı ve kanat açısı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi ortaya koyarak, kanat açısı kontrolünün türbin performansını dengede tutmadaki kritik rolünü göstermektedir.



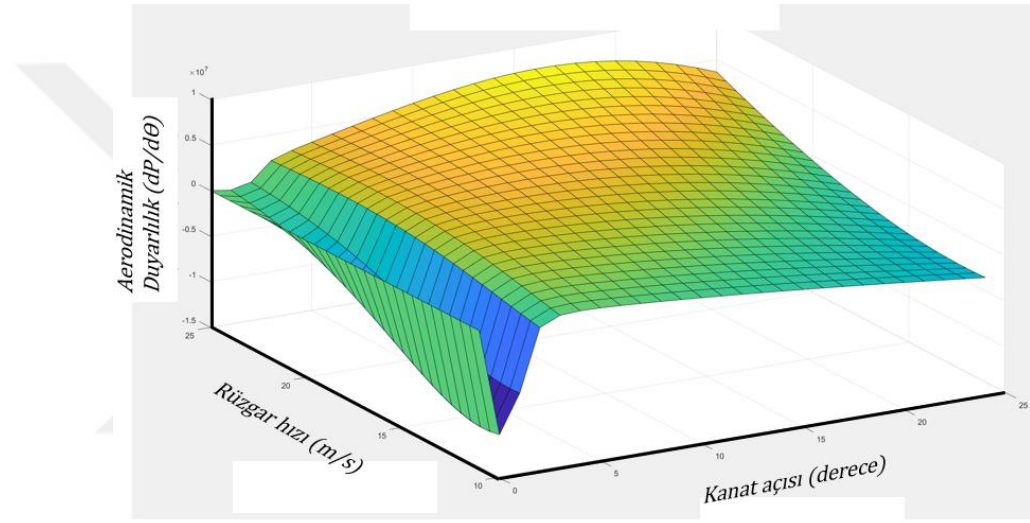
Şekil 4.9. Aerodinamik gücün rüzgâr hızı ve kanat açısı bağlı değişimi

Rüzgâr türbini matematiksel modeli, kanat aerodinamiği, değişken rüzgâr hızı ve rotor, jeneratör ve tahrik sistemi gibi farklı bileşenler arasındaki dinamik etkileşimlerden kaynaklanan doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Türbin tarafından üretilen güç, rüzgâr hızı, rotor hızı ve kanat açısı gibi değişkenlerin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Kontrol tasarımı gibi amaçlar için belirli çalışma noktaları etrafında doğrusal modeller türetilirse de sistemin genel davranışı doğrusal olmayan özelliklerini korur.

Doğrusallaştırılmış rüzgâr türbini modeli, bir rüzgâr türbini sisteminin dinamiklerini, değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri doğrusal denklemlerle yaklaştırarak basitleştirir. Bu yaklaşım, özellikle durum uzayı kontrolü veya klasik PID

kontrolü gibi tekniklerin uygulandığı senaryolarda kontrol tasarımı açısından faydalıdır. Doğrusallaştırma işlemi, genellikle küçük salınımların incelendiği ve sistemin belirli bir çalışma noktasına göre modellenmesi gerektiği durumlarda uygulanır, nominal rotor hızı veya rüzgâr hızı gibi belirli bir çalışma noktası etrafında gerçekleştirilir. Burada nominal rotor hızı, rüzgâr türbininin nominal çalışma koşulları altında çalıştığı rotor hızıdır. Genellikle nominal rüzgâr hızına yakın bir değerde olup, türbinin maksimum güç ürettiği çalışma noktasını temsil eder.

4.2.1. Aerodinamik duyarlılık kullanılarak PI kontrolcü tasarımı



Şekil 4.10. Aerodinamik duyarlılığın rüzgâr hızı ve kanat açısına bağlı değişimi

Şekil 4.10. aerodinamik duyarlılığın ($\partial P/\partial \theta$), rüzgâr hızı ve kanat açısına bağlı değişimini göstermektedir. Bu duyarlılık, kanat açısındaki küçük değişimlerin aerodinamik gücü ne kadar etkilediğini ifade eder ve rüzgâr türbini kontrolünün dinamik yanıtını belirlemede kritik bir rol oynar.

Düşük kanat açılarında, aerodinamik duyarlılık yüksek negatif değerler alır, yani kanat açısındaki küçük değişimler aerodinamik gücü önemli ölçüde azaltır. Kanat açısı arttıkça, duyarlılık azalarak sıfıra yaklaşır, bu durum güç değişimlerinin giderek daha az etkili hale geldiğini gösterir. Aerodinamik duyarlılık değişimi, kazanç ayarlı (gain-scheduled) kontrol tasarımı açısından oldukça önemlidir. Kanat açısı ve rüzgâr hızıyla değişen duyarlılık değerleri, doğrusallaştırma sürecinde dikkate alınmalı ve uygun kazanç düzeltme faktörleri belirlenmelidir.

4.2.2. Aerodinamik duyarlılık ile Bulanık-PI kontrolcü tasarımı bölümünde aerodinamik duyarlılığın kontrol kazançları üzerindeki etkisini inceleyen denklemler türetilenektir. Özellikle, $GK(\theta)$ kazanç düzeltme faktörünü tanımlayan (4.30) ile (4.32) arasındaki denklemler, doğrusallaştırılmış kontrol ayarlamalarında nasıl kullanıldığını gösterecektir.

Kanat açısı kontrol sistemi, jeneratör hızını düzenlemeye yönelik olarak tasarlanmış olup, kontrol sisteminin modellenmesi tek serbestlik dereceli bir rüzgâr türbini modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$T_{Aero} - N_{Gear}T_{Gen} = (I_{Rotor} + N_{Gear}^2 I_{Gen}) \frac{d}{dt} (\Omega_0 + \Delta\Omega) = I_{Drivetrain} \Delta\dot{\Omega} \quad (4.16)$$

Bu modelleme kapsamında, rüzgâr türbini aktarma organları (drivetrain) dikkate alınarak hareket denklemi türetilmiştir. Aktarma organlarının serbest cisim diyagramı kullanılarak, düşük hızlı şaftın aerodinamik torku (T_{Aero}) ve yüksek hızlı şafttaki jeneratör torku (T_{Gen}) arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Dişli kutusu oranı (N_{Gear}), aktarma organlarının ve rotorun atalet momentleri ($I_{Drivetrain}$, I_{Rotor} , I_{Gen}), nominal düşük hızlı şaft dönüş hızı (Ω_0) ve açısal hız değişimleri ($\Delta\dot{\Omega}$) dikkate alınarak hareket denklemi oluşturulmuştur.

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{P(\theta_i) - P(\theta_{i-1})}{(\theta_i) - (\theta_{i-1})} \quad (4.17)$$

Literatürde, rüzgâr türbini sistemlerinin doğrusallaştırma analizleri için sıklıkla FAST yazılımı ve bu yazılımın AeroDyn modülü tercih edilmektedir. Bu yöntemle sistemin aerodinamik tepkileri, özellikle kanat açısındaki küçük değişimlerin aerodinamik güç üzerindeki etkisi, merkezi fark yöntemi ile sayısal olarak hesaplanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, mevcut literatürde kullanılan FAST tabanlı yaklaşımların aksine, aerodinamik duyarlılık ($dP/d\theta$) doğrudan kullanılan aerodinamik modelden veya uygunlaştırılmış verilerden elde edilmiştir. Böylece, dışa bağımlı bir yazılım aracına gerek kalmaksızın, duyarlılık bilgisi gerçek zamanlı olarak hesaplanmakta ve kontrol sistemine entegre edilmektedir. Bu yönüyle önerilen yaklaşım, aerodinamik duruma bağlı olarak kazançları dinamik biçimde ayarlayan daha esnek ve uyarlanabilir bir kontrol yapısı sunmaktadır.

Denklem (4.18) incelendiğinde, güç (P), rüzgâr hızının küpü (V^3) ile orantılı olduğu açıkça görülür. Rüzgâr hızındaki küçük değişimlerin bile üretilen güç üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılır.

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (4.18)$$

TSR (λ) ise güç katsayısını maksimize etmek için önemli bir diğer parametredir. Türbin kontrol sistemi rüzgâr hızına bağlı olarak rotor hızını ayarlayarak TSR (λ) optimum seviyede tutmaya çalışır. Rotor hızı nominal hızın altındayken, güç çıkışı kanat açısı değişimlerine karşı daha hassastır. Rotor hızı nominal değerine ulaştığında, kontrolcü güç üretimini sabit tutmak için kanat açısını ayarlar, bu da güç duyarlılığını doğrudan etkiler. Düşük hızlarda aerodinamik duyarlılık genellikle yüksektir, çünkü kanat açısındaki küçük değişimler güç çıkışını önemli ölçüde etkiler. Rüzgâr hızı arttıkça türbin, maksimum gücü korumaktan çok kendini korumak için daha agresif kanat açısı ayarlamaları yapar.

3. Bölge'de kontrolcü, gücü düzenlemek ve rotor hızını sınırlamak için kanat açısını (β) ayarlamak için çalışır. Rotor hızı nominal değerinde sabit tutulduğundan, rüzgâr hızındaki değişimler, istenen güç çıkışını korumak için gerekli kanat açısını doğrudan etkiler. $dP/d\beta$, güç kontrolünü sağlamak için kanat açısının ne kadar ayarlanması gerektiğini gösteren bir ölçümdür. Bu nedenle, $dP/d\beta$, güç çıkışı ve kanat açısındaki değişimi doğrudan ölçen bir parametredir.

(4.19) denklemi, jeneratör torkunu (T_{Gen}) jeneratör hızıyla ($N_{Gear}\Omega$) ilişkilendirir. Jeneratörün elektriksel güç çıkışını kontrol ettiği ve 3. Bölge'de sabit güç çıkışını ($P_0 = P_{nominal}$) koruduğu varsayılmaktadır.

$$T_{Gen}(N_{Gear}\Omega) = \frac{P_0}{N_{Gear}\Omega} \quad (4.19)$$

(4.20) denklemi kanat açısı (θ) ile rotor hızına (Ω_0) bağlıdır. Ayrıca rotorun nominal hızda olduğunu varsaymaktadır.

$$T_{aero}(\theta) = \frac{P(\theta, \Omega_0)}{\Omega_0} \quad (4.20)$$

Denklem (4.21)'deki ifade, jeneratör torku denklemini doğrusal hale getirerek, torku nominal hızdan olan rotor hızı sapmasının ($\Delta\Omega$) bir fonksiyonu olarak ifade eder. Denklem, rotor hızındaki küçük bir artışın jeneratör torkunda azalmaya neden olduğunu göstermektedir.

$$T_{Gen} \approx \frac{P_0}{N_{Gear}\Omega_0} - \frac{P_0}{N_{Gear}\Omega_0^2} \Delta\Omega \quad (4.21)$$

Denklem (4.22) aerodinamik torku, kanat açısı (θ) değişimleri ($\Delta\theta$) cinsinden doğrusal hale getirir. Aerodinamik tork, gücün kanat açısına göre değişim oranına ($\partial P/\partial\theta$) bağlıdır. Kanat açısı, 3.Bölge'de rotor hızının kararlı kalmasını sağlamak amacıyla rotor hızındaki sapmalara ($\Delta\Omega$) dayalı olarak kontrol edilir.

$$T_{aero} \approx \frac{P_0}{\Omega_0} + \frac{1}{\Omega_0} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) \Delta\theta \quad (4.22)$$

Denklem (4.23), rotor hızındaki sapmaların ($\Delta\Omega$) PID benzeri bir kontrol yapısı ile kanat açısı değişimine ($\Delta\theta$) nasıl dönüştürüldüğünü göstermektedir.

$$\Delta\theta = K_P N_{Gear} \Delta\Omega + K_i \int_0^t N_{Gear} \Delta\Omega dt + K_D N_{Gear} \Delta\dot{\Omega} \quad (4.23)$$

Bu kontrol sisteminde, doğrusallaştırma yöntemi kullanılarak aerodinamik ve jeneratör torkları, kontrol tasarımını ve analizini basitleştirmek için çalışma noktası etrafında doğrusal hale getirilmiştir. Rotor hızı kontrolü, kanat açısı denetleyicisinin rotor hızındaki sapmaya bağlı olarak kanat açısını (θ) artırıp azaltmasıyla sağlanır. Böylece, aerodinamik güç ve tork ayarlanarak rotor hızı hedef değere geri getirilir. Oransal, integral ve türevsel (PID) kontrol, bu sürecin temelini oluşturur. PID kontrol stratejisi ile kanat açısı, mevcut hız sapması ($\Delta\Omega$), kümülatif hız sapması (integral terim) ve hız sapmasının değişim oranı (türev terim) dikkate alınarak ayarlanır. K_P , K_i , ve K_D Kazançları, optimum hız regülasyonu için belirlenir. Bu sistem, 3. Bölge'de türbinin nominal gücü aşmasını önlemek ve kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla kanat açısını ayarlayarak gücü düzenler.

- Denklem (4.21): Rotor hızı nominal değerden saptığında, sabit gücü korumak için jeneratör torkunun nasıl ayarlandığını gösterir.
- Denklem (4.22): Kanat açısındaki değişikliklerin aerodinamik torku doğrudan etkilediğini ve böylece kanat açısı kontrolörünün rüzgâr hızındaki değişimlere karşı aerodinamik tepkiyi ayarlamasına olanak sağladığını ifade eder.

Her iki denklemde, jeneratör ve aerodinamik torkların, nominal çalışma noktası etrafında rotor hızı ($\Delta\Omega$) ve kanat açısı ($\Delta\theta$) değişimlerine bağlı olarak doğrusal şekilde nasıl değiştiğini açıklar. Kanat açısı ve jeneratör torkunu ayarlayarak kontrol sistemi tasarımında kritik bir rol oynar.

$$\underbrace{\left[I_{\text{Drivetrain}} + \frac{1}{\Omega_0} \left(-\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) N_{\text{Gear}} K_D \right]}_{M_\varphi} \ddot{\varphi} + \underbrace{\left[\frac{1}{\Omega_0} \left(-\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) N_{\text{Gear}} K_P - \frac{P_0}{\Omega_0^2} \right]}_{C_\varphi} \dot{\varphi} + \underbrace{\left[\frac{1}{\Omega_0} \left(-\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) N_{\text{Gear}} K_I \right]}_{K_\varphi} \varphi = 0 \quad (4.24)$$

Denklem (4.24), rotor hızındaki sapmaların kanat açısı kontrol sistemi altında nasıl geliştiğini açıklar. Aerodinamik gücün kanat açısı değişimlerine duyarlılığı $\left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)$, sistemin tepkisini belirlemede kritik bir rol oynar. Dişli kutusu oranı (N), mekanik güç dinamiklerini jeneratör tarafına bağlayarak kanat açısı kontrolünün rotor hızını nasıl etkilediğini gösterir. Ayrıca, oransal, integral ve türevsel kazançlar (K_P, K_I, K_D), sistem hız sapmalarına nasıl tepki verdiğini belirleyerek, hız düzenlemesinin düzgün ve kararlı olmasını sağlar. Bu denklem, 3. Bölge'de çalışan rüzgâr türbinleri için kararlı bir kanat açısı kontrolörü tasarlamada temel bir rol oynar. Sönümlenme terimi (C_φ), hız sapmalarının ne kadar hızlı sönümlendiğini belirler ve aşırı salınımları önlemeye yardımcı olur. Sertlik terimi (K_φ), sapmalara karşı direnci sağlayarak sistemin kararlı kalmasını sağlar. Eğer sönümlenme çok düşükse, sistem kontrolsüz salınımlar yapabilir; eğer sertlik çok yüksekse, sistem yavaş ve hantal bir tepki verebilir. Atalet, sönümlenme ve sertlik arasındaki etkileşim dikkatlice dengelenmelidir. Bu denge sağlanmazsa, yüksek rüzgâr hızlarında sistemin kararsız hale gelmesi olasıdır (Jonkman ve diğ., 2009).

Denklem (4.25), sistemin doğal frekansını ($\omega_{\varphi n}$) tanımlar ve bu frekansın sertlik terimi (K_φ) ve atalet terimi (M_φ) ile nasıl ilişkili olduğunu gösterir. Daha yüksek bir sertlik, doğal frekansı artırırken, daha büyük bir atalet sistemin tepki süresini yavaşlatır.

$$\omega_{\varphi n} = \sqrt{\frac{K_{\varphi}}{M_{\varphi}}} \quad (4.25)$$

Benzer şekilde, Denklem (4.26), sönüm oranını (ζ_{φ}) ifade eder ve sistemin salınımlı mı yoksa aşırı sönümlü mü olacağını belirler. Sönüm oranı, sönüm katsayısı (C_{φ}) ile doğru, sertlik ve atalet terimleri ile ters orantılıdır.

$$\zeta_{\varphi} = \frac{C_{\varphi}}{2\sqrt{K_{\varphi}M_{\varphi}}} = \frac{C_{\varphi}}{2M_{\varphi}\omega_{\varphi n}} \quad (4.26)$$

Kanat açısı kontrolörü tasarımında, Hansen ve diğ., (2005) türev kazancının (K_D) ihmal edilmesini, jeneratör tork kontrolöründen kaynaklanan negatif sönümeleme etkisinin ihmal edilmesini ve tepki karakteristiğinin $\omega_{\varphi n} = 0.6$ rad/s ve $\zeta_{\varphi} = 0.6$ ila 0.7 olacak şekilde ayarlanmasını önermektedir. Bu özel gereksinimler, aerodinamik gücün rotor-kolektif kanat açısına duyarlılığı $\left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)$ belirlendiğinde, uygun PI kazançlarının doğrudan hesaplanmasını sağlamaktadır:

$$K_P = \frac{2I_{\text{Drivetrain}}\Omega_0\zeta_{\varphi}\omega_{\varphi n}}{N_{\text{Gear}}\left(-\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)} \quad (4.27)$$

$$K_i = \frac{I_{\text{Drivetrain}}\Omega_0\omega_{\varphi n}^2 m}{N_{\text{Gear}}\left(-\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)} \quad (4.28)$$

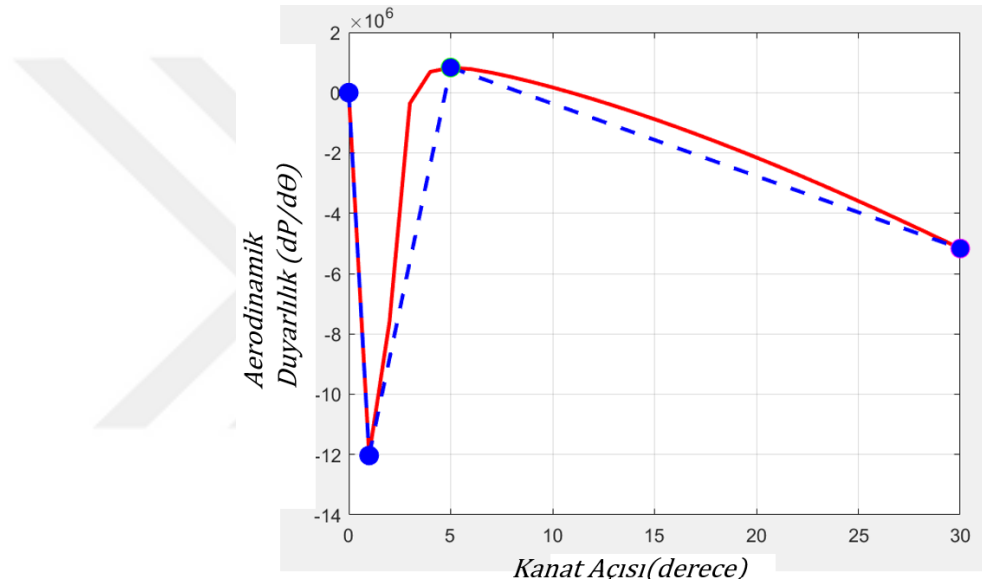
4.2.2. Kanat Açısı Duyarlılığının Doğrusallaştırılması

Bu tez çalışmasında literatürden farklı kanat açısına bağlı aerodinamik güç duyarlılığı $\left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)$, Denklem (4.18)'de nominal rotor hızı, (Ω_0) kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11.'de, farklı aralıklardaki kanat açısı duyarlılığı değişimlerini farklı segmentler için temsil eden eğri uydurma çizgileri bulunmaktadır. Bu veri kümesi, kontrol sistemi tasarımı için basitleştirilmiş matematiksel bir model oluşturmak amacıyla doğrusal hale getirilmiştir.

Her segment, duyarlılığın değişim eğilimine uygun olacak şekilde belirli doğrusal denklemlerle modellenmiştir. Bu yaklaşım literatürden farklı olarak, duyarlılığın keskin

değiştirdiği ve daha dengeli olduğu bölgeleri ayrı ayrı ele alarak doğrusal hale getirme sürecini daha doğru bir şekilde gerçekleştirmeyi sağlar.

Doğrusallaştırılmış duyarlılık denklemleri, kanat açısı duyarlılığını basitleştirilmiş bir model ile ifade etmeye olanak tanır. Çok segmentli yaklaşım, kanat açısına bağlı aerodinamik duyarlılığın daha doğru modellenmesine yardımcı olur. Bu yöntem sayesinde, kanat açısına bağlı duyarlılığın nasıl değiştiği daha doğru şekilde modellenebilir. Böylece, rüzgâr hızındaki değişimlere bağlı olarak sistemin tepkisini ayarlamak amacıyla kullanılan kazanç zamanlaması yöntemleri için adaptif bir kanat açısı kontrol tasarımı yapılmasına imkân tanır.



Şekil 4.11. Aerodinamik duyarlılık dP/dθ eğri uydurma

Denklem (4.29a), aerodinamik güç duyarlılığının $\left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)$ kanat açısı (θ) ile doğrusal olarak değiştiğini göstermektedir. İlk terim, kanat açısı duyarlılığının değişim oranını (eğimini) ifade eder. İkinci terim, sıfır kanat açısındaki ($\theta=0$) başlangıç duyarlılığı değerini temsil eder. Bu denklem, kanat açısı arttıkça duyarlılığın belirli bir eğimle öngörülebilir şekilde değiştiğini gösterir.

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta=0) \right] \theta + \left[\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta=0) \right] \quad (4.29a)$$

Denklem (4.29b), kanat açısı duyarlılığının tersini ifade eder. Duyarlılığın θ ile nasıl değiştiğini doğrudan göstermek yerine, duyarlılık değişim oranının, sıfır kanat açısındaki (θ) başlangıç değerine göre nasıl davrandığını gösterir.

$$\frac{1}{\frac{\partial P}{\partial \theta}} = \frac{1}{\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta=0) \left(1 + \frac{\theta}{\theta_K}\right)} \quad (4.29b)$$

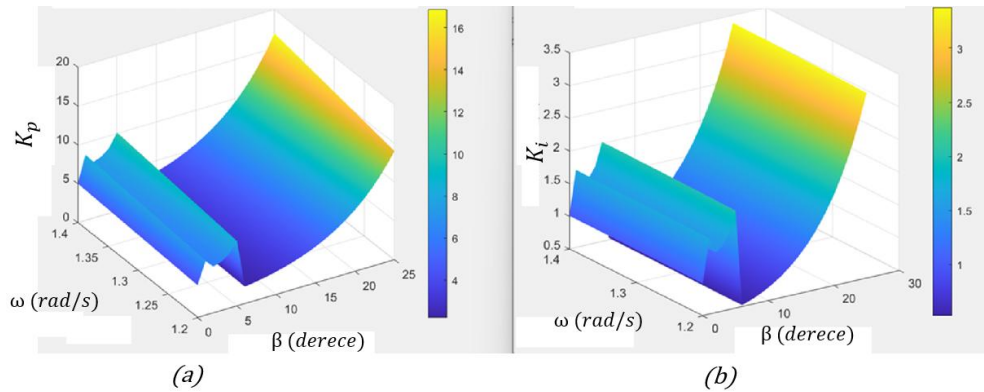
Denklem (4.30) ve (4.31), oransal kazancı (K_p) ve integral kazanç (K_i) kanat açısının (θ) bir fonksiyonu olarak hesaplar. Denklem (4.32)'deki $GK(\theta)$, kazancı kanat açısına bağlı olarak dinamik şekilde ayarlayan kazanç düzeltme faktörüdür. Bu denklemler kullanılarak kanat açısı değiştiğinde oransal kazancın da uygun şekilde ayarlanmasını sağlayarak kontrol performansı optimize edilir.

$$K_p(\theta) = \frac{2I_{\text{Driverain}}\Omega_0\zeta\varphi\omega\varphi n}{N_{\text{Gear}}\left[-\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta=0)\right]} GK(\theta) \quad (4.30)$$

$$K_i(\theta) = \frac{I_{\text{Driverain}}\Omega_0\omega^2\varphi n}{N_{\text{Gear}}\left[-\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta=0)\right]} GK(\theta) \quad (4.31)$$

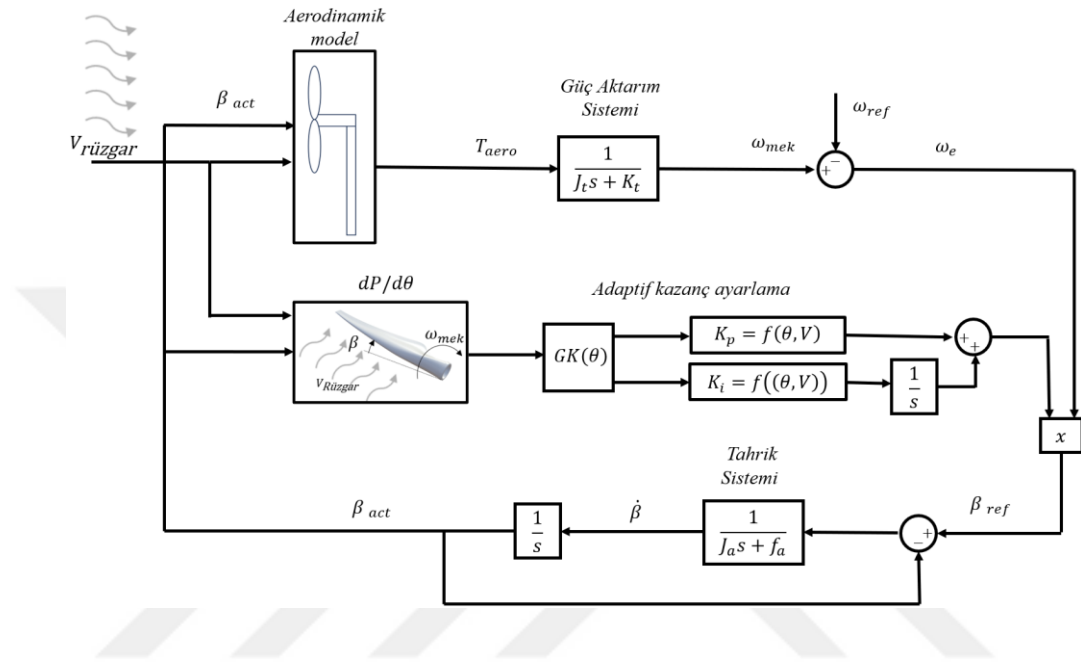
$$GK(\theta) = \frac{1}{1 + \frac{\theta}{\theta_K}} \quad (4.32)$$

Rotor hızı ve kanat açısının bir fonksiyonu olarak belirlenen K_p (Şekil 4.12(a).) ve K_i (Şekil 4.12(b).) kazanç yüzeylerini göstermektedir. Bu yüzeyler, aerodinamik duyarlılık ve düzeltme faktörü $GK(\theta)$ içeren analitik kazanç zamanlama denklemleri (4.30) – (4.31) kullanılarak hesaplanmıştır.



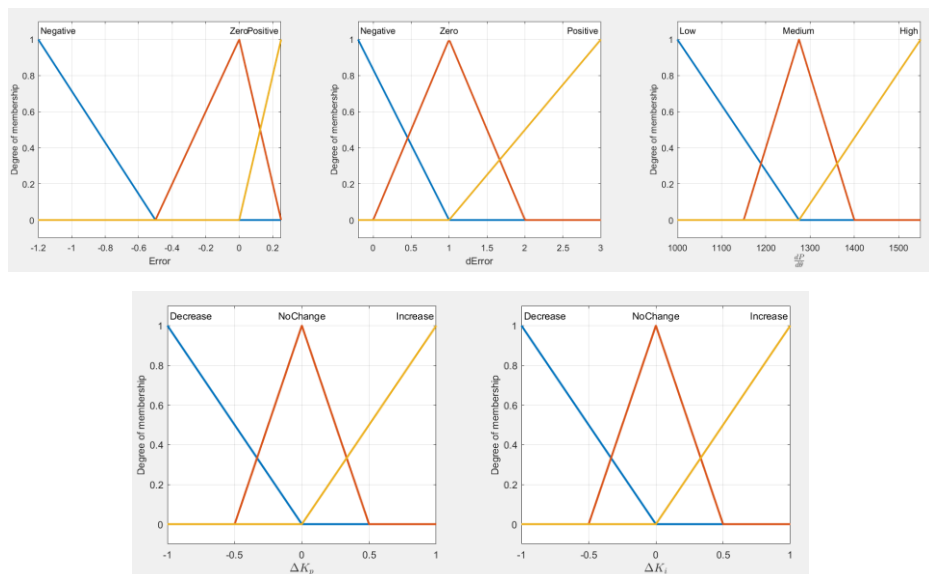
Şekil 4.12. (a) Rotor hızı ve kanat açısına bağlı K_p kazanç yüzeyi, (b) Rotor hızı ve kanat açısına bağlı K_i kazanç yüzeyi

Elde edilen yüzeyler, Şekil 4.13.'de gösterilen kontrol diyagramında kullanıldığında düşük kanat açıları altında daha agresif davranmasını sağlarken, yüksek rotor hızı veya düşük duyarlılık bölgelerinde kazançları yumuşatarak sistemin tepkisini optimize eder.



Şekil 4.13. Aerodinamik duyarlılığa dayalı kazanç ayarlamalı PI denetleyici

4.2.3. Aerodinamik duyarlılık ile Bulanık-PI kontrolcü tasarımı



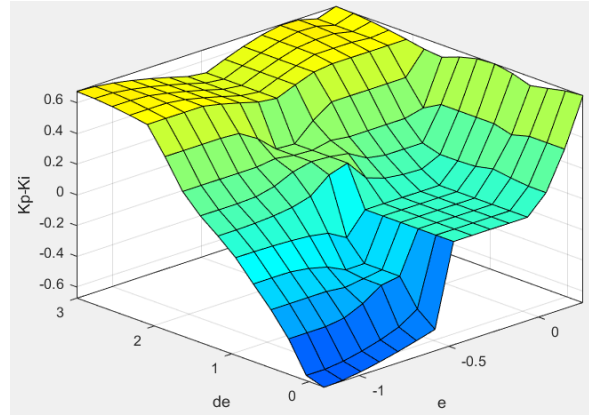
Şekil 4.14. Mamdani-PI üyelik fonksiyonları

Bu çalışmada önerilen Bulanık-PI denetleyici yapısı, klasik PI denetleyicinin hata (e) ve hata değişimi (de) girdilerine ek olarak, sistemin aerodinamik karakteristiklerini temsil eden aerodinamik duyarlılık (AS) ($dP/d\theta$) değerini üçüncü bir giriş olarak kullanmaktadır. Bu yapı sayesinde sistemin sadece dinamik davranışı değil, aynı zamanda çalışma bölgesindeki aerodinamik etkinliği de göz önüne alınabilmektedir. Şekil 4.14.'de yer alan üyelik fonksiyonlarında, hata (e), hata değişimi (de) ve aerodinamik duyarlılık değişkenleri için üçgen ve üçlü (*Negative, Zero, Positive, Low, Medium, High*) üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır. Çıktılar ise oransal kazanç (ΔK_P) ve integral kazanç (ΔK_I) için "Azalt", "Değiştirme", "Artır" olmak üzere üç üyelik fonksiyonuna sahiptir.

Tablo 4.1.'deki bulanık kural tabanında, her bir hata durumu için belirli ΔK_P ve ΔK_I değerleri atanmıştır. Kuralların temel mantığı, sistemin rotor hız hatası ve aerodinamik hassasiyetine göre kazançları uyarlamaktır. Örneğin hem hata hem de duyarlılık yüksekse, sistemin aşırı tepkilerden kaçınması için kazançlar azaltılmaktadır. Düşük duyarlılıkta ise daha agresif (yüksek kazançlı) tepkiler önerilmektedir.

Tablo 4.1. K_P ve K_I kural tabanı-Mamdani.

K_P & K_I	ne		de			ze	de			pe	de		
			N	Z	P		N	Z	P		N	Z	P
a.s.	L	D	D	NC		L	D	NC	I	L	NC	I	I
	M	D	NC	I		M	NC	NC	I	M	I	I	I
	H	NC	I	I		H	I	I	I	H	I	I	I

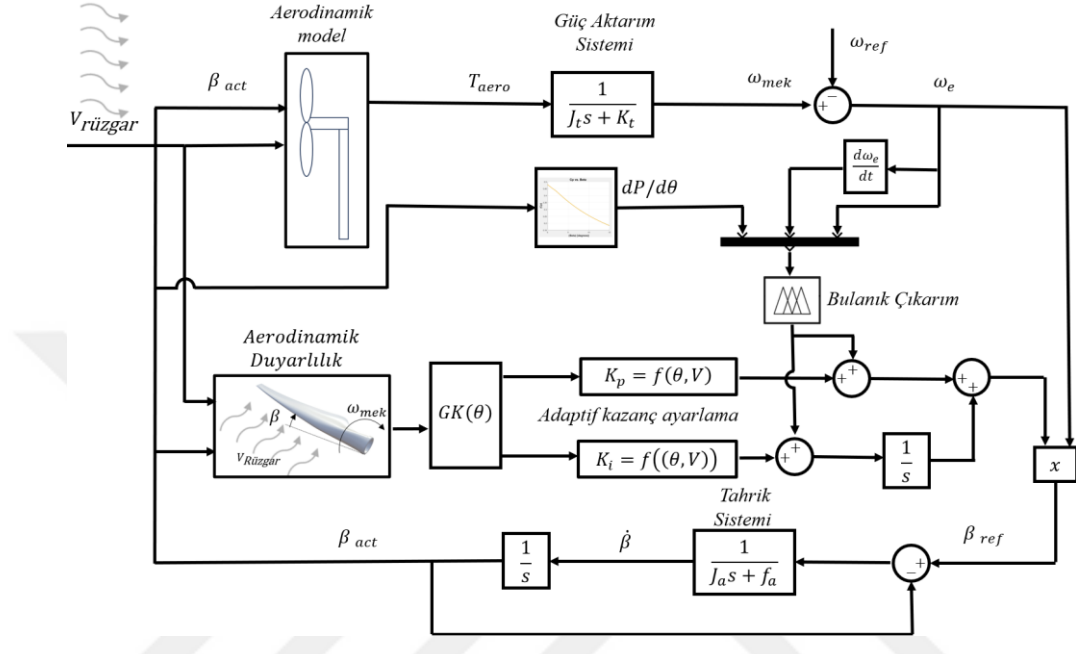


Şekil 4.15. Bulanık çıkarım kuralları ve yüzeyi

Şekil 4.15.'de ise tanımlanan üyelik fonksiyonları ve kural tabanına bağlı olarak elde edilen bulanık çıkarım yüzeyi gösterilmiştir.

Şekil 4.16.'da gösterilen Bulanık-PI kontrol metodolojisinde, aerodinamik duyarlılık terimi $dP/d\theta$ üçüncü bir giriş olarak kullanılmıştır. Bu türev, rüzgâr türbini

güç çıktısının kanat açısındaki değişimlere ne kadar duyarlı olduğunu ifade eder. Bu bilginin bulanık mantık sistemine entegre edilmesiyle, denetleyici türbinin çalışma koşulları hakkında daha fazla bilgi edinmekte ve özellikle değişken rüzgâr hızlarında ya da doğrusal olmayan aerodinamik durumlarda daha hassas tepkiler verebilmektedir.



Şekil 4.16. Aerodinamik duyarlılığa dayalı kazanç ayarlamalı Bulanık-PI denetleyici

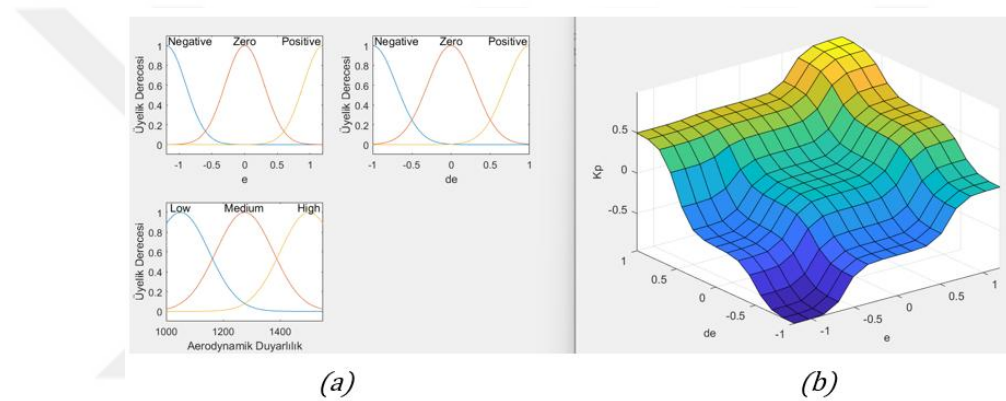
Klasik PI denetleyiciler yalnızca hata ve hata değişimi gibi büyüklükleri kullanırken, $dP/d\theta$ teriminin kullanımı aerodinamik davranışa yönelik ek bir sezgi kazandırır. Duyarlılık yüksek olduğunda, yani küçük bir kanat açısı değişimi bile büyük güç değişimlerine neden oluyorsa, bulanık denetleyici oransal kazancı (K_p) azaltır ya da daha yumuşak bir açı ayarı yapar. Bu sayede ani güç değişimleri ve buna bağlı salınımlar engellenmiş olur. Tersine, duyarlılık düşükse sistem daha agresif davranarak daha büyük düzeltmeler yapabilir; çünkü bu durumda kanat açısındaki değişimlerin güç üzerindeki etkisi sınırlıdır.

Sonuç olarak, aerodinamik duyarlılığın bulanık kurallar tabanına entegre edilmesi kontrol hassasiyetini artırır, sistemin kararlılığını iyileştirir ve türbinin değişken rüzgâr koşullarında optimum aerodinamik verimliliğe yakın çalışmasını sağlar.

Bu bölümde, daha önce Mamdani tabanlı Bulanık-PI kontrolcü ile elde edilen temel yapının ötesine geçilerek Sugeno çıkarım yöntemi kullanılmış, hem oransal (K_p) hem de integral (K_i) kazançlarının ayrı ayrı ayarlandığı gelişmiş bir kontrol yapısı önerilmiştir. Mamdani yapısında yalnızca sabit kurallar üzerinden bulanık çıkışlar

üretilirken, Sugeno yöntemi sayesinde kazanç değerleri doğrudan belirli fonksiyonlara bağlanarak daha hassas ve analitik bir kontrol yüzeyi elde edilmiştir.

Bu çalışmada, klasik PI kontrol yapısının ötesine geçilerek, rüzgâr türbininin aerodinamik koşullarına dinamik olarak uyum sağlayan bir Bulanık-PI denetleyici geliştirilmiştir (Şekil 4.17.). Denetleyici, üç giriş değişkeni olan hata (e), hata değişimi (de) ve aerodinamik duyarlılık ($dP/d\theta$) bilgilerini kullanarak, oransal (K_p) ve integral (K_i) kazançlarını Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemleri (FIS) aracılığıyla değişken rüzgâr hızları ve kanat açısına bağlı olarak hesaplamaktadır. Her bir kazanç için bağımsız olarak oluşturulan kural tabanları, sistemin çalışma koşullarına göre kontrol tepkisinin uyarlanmasına imkân sağlar.



Şekil 4.17. K_p kazancına ait (a) Üyelik fonksiyonları (b) bulanık kontrol yüzeyi

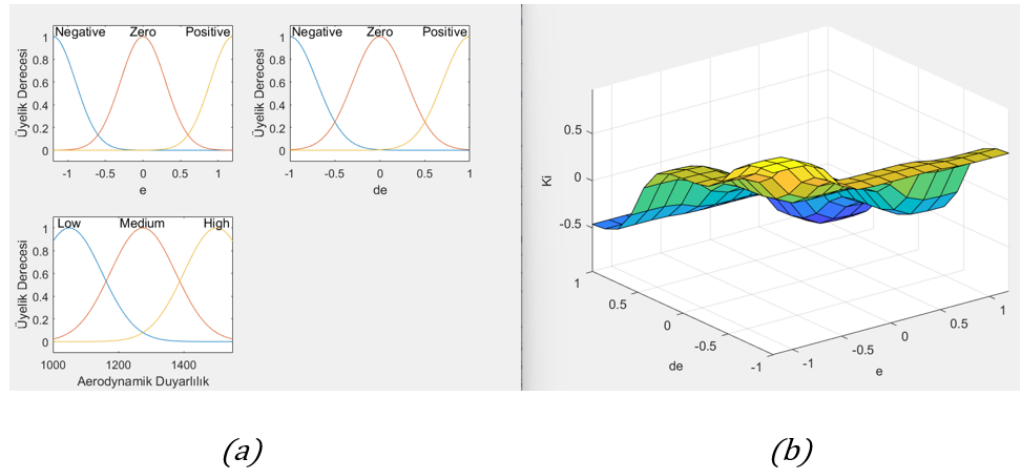
Tablo 4.2. K_p ve K_i kural tabanı-Sugeno

K_p	ne	de			ze	de			pe	de		
		N	Z	P		N	Z	P		N	Z	P
		L	SD	MD	NC	L	MI	NC	MI	L	NC	MI
	M	SD	MD	MI	M	MI	NC	MI	M	NC	MI	SI
	H	MD	NC	SI	H	NC	MI	SI	H	MI	SI	SI

Tablo 4.2.'de giriş değişkenleri için tanımlanan üçgen üyelik fonksiyonları; *Negative*, *Zero*, *Positive* (hata ve hata değişimi için) ve *Low*, *Medium*, *High* (aerodinamik duyarlılık için) olmak üzere üçer dilsel terimden oluşmaktadır. Çıktılar ise, "Azalt (D)", "Değiştirme (NC)", "Artır (I)" gibi sabit değerlere sahip olup Sugeno çıkarımı sonucunda ağırlıklı ortalama yöntemi ile net kazanç ayarlamaları üretmektedir. Özellikle aerodinamik duyarlılığın yüksek olduğu bölgelerde sistemin ani salınımlara karşı hassasiyeti arttığından, kazançların düşürülmesi önerilmiştir. Buna karşılık, duyarlılığın

düşük olduğu durumlarda daha agresif bir kontrol tepkisi elde edebilmek adına kazanç seviyeleri yükseltilmiştir.

Şekil 4.18(a)'da K_i Kazancı; hata (e), hata değişimi (de) ve aerodinamik duyarlılık (AS) değişkenlerine bağlı olarak üç girişli Sugeno tipi bir bulanık çıkarım sistemi (FIS) ile belirlenmiştir. Şekil 4.18(b)'de üyelik fonksiyonları olarak üçlü (*Negative, Zero, Positive*) üçgen dağılımlar kullanılmıştır. Aerodinamik duyarlılık ise (*Low, Medium, High*) olarak üç farklı seviyeye ayrılmıştır. Bu sayede sistemin gerçek zamanlı aerodinamik tepkilerine göre K_i kazancı dinamik olarak ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.18. K_i kazancına ait (a) Üyelik fonksiyonları (b) bulanık kontrol yüzeyi

Tablo 4.3. K_p ve K_i kural tabanı-Sugeno

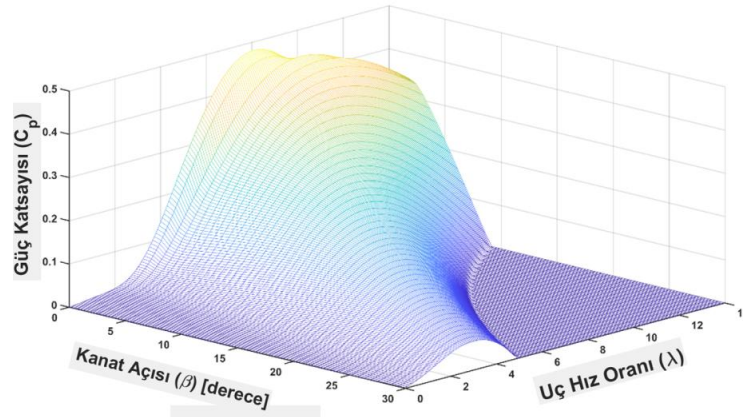
Ki	ne		de			ze		de			pe		de		
			N	Z	P			N	Z	P			N	Z	P
a.s.	L	SI	MI	NC	a.s.	L	SI	MI	NC	a.s.	L	SI	NC	MD	
	M	SI	MI	MD		M	MI	NC	MD		M	MI	MD	SD	
	H	MI	NC	SD		H	MI	NC	MD		H	NC	MD	SD	

Tablo 4.3.'de yer alan kural tabanı, giriş değişkenlerinin kombinasyonlarına karşılık gelen K_i kazanç değişimlerini tanımlar. Kural kümesi; düşük duyarlılıkta daha agresif (*Strong Increase*), yüksek duyarlılıkta ise daha yumuşak (*No Change* veya *Mild Decrease*) tepkiler içermektedir. Bu yapı sayesinde sistem, ani rüzgâr değişimlerinde integral etkisini azaltarak aşırı düzeltmelerden kaçınırken, düşük duyarlılıklı durumlarda daha kararlı bir hata entegrasyonu sağlar. Bu esneklik, klasik PI kontrolcülerde gözlemlenen uzun süreli aşma ve salınımların önüne geçmektedir.

Şekil 4.18(b)'de yer alan yüzey grafiği, tanımlanan üyelik fonksiyonları ve kural tabanına göre K_i kazancının giriş değişkenlerine (e , de , AS) bağlı olarak nasıl şekillendiğini göstermektedir. Görüldüğü üzere, hata ve hata değişimi pozitif bölgelerdeyken (yani sistemin daha agresif kontrol gerektirdiği durumlarda), K_i yüzeyi daha yüksek değerler almakta; negatif ya da düşük duyarlılık bölgelerinde ise daha düşük değerlere inmektedir. Bu davranış, sistemin dinamiklerine uygun olarak integral etkisini esnek biçimde şekillendirmektedir.

Geliştirilen Sugeno tabanlı yapı, Mamdani yaklaşımına göre hem hesaplama açısından daha verimli sonuçlar vermekte hem de kontrol kazançlarının hassasiyetle ayarlanmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle aerodinamik duyarlılık verisinin kurallar içerisine üçüncü bir giriş olarak dâhil edilmesi, sistemin yalnızca hata düzeyine değil, aynı zamanda o andaki aerodinamik koşullara da duyarlı bir şekilde tepki vermesini sağlamaktadır. Bu durum, 3. Bölge gibi aerodinamik doğrusal olmayan alanlarda daha kararlı ve verimli bir kontrol sağlamış, klasik PI ve ilk bulanık kontrolcüdeki aşırı salınımları azaltarak daha yumuşak geçişler sunmuştur.

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI



Şekil 5.1. Kanat açısı ve uç hız oranına bağlı güç katsayısı değişimi

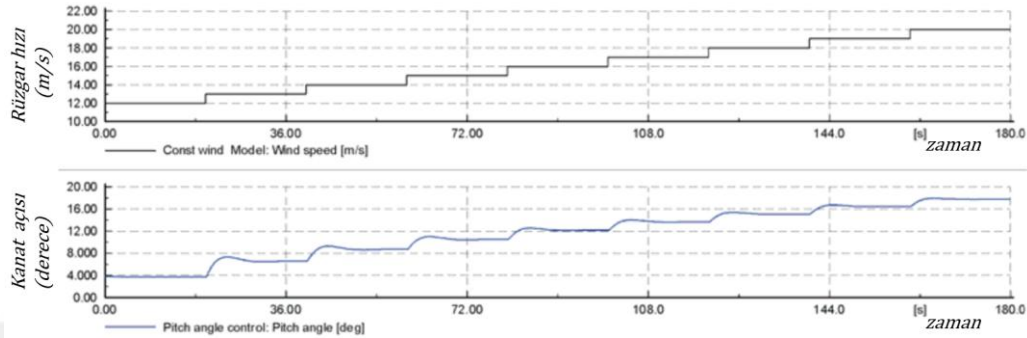
Şekil 5.1. C_p (güç katsayısı) değerinin, uç hız oranı (λ) ve kanat açısı (β) ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Görüldüğü üzere, C_p değerleri düşük kanat açıları ($\beta \approx 0$) ve belirli bir λ aralığında maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Kanat açısı (β) arttıkça, özellikle 15° 'nin üzerindeki açılarda, C_p hızla azalmaktadır. Bu durum, türbinin aerodinamik verimliliğinin kanat açısı arttıkça düştüğünü ve dolayısıyla güç çıkışının azaldığını göstermektedir.

Optimum C_p değeri, uç hız oranı (λ) belirli bir aralıkta, genellikle 6-8 civarında, elde edilmektedir. C_p değerleri, düşük ve çok yüksek λ değerlerinde küçülmektedir. Farklı rüzgâr hızlarında farklı λ değerlerinin olması nedeniyle, her bir hız için optimum λ değerleri belirlenmeli ve bu değerler, türbinin maksimum güç dengesine ulaşmasını sağlamak için optimize edilmelidir.

Şekil 5.2.'de, rüzgâr hızı zamanla adım adım değişmektedir; her adımda rüzgâr hızı artmaktadır ve bu değişimler türbinin çalışma koşullarını etkileyen önemli parametrelerdir. Alt grafikte ise, kanat açısı kontrolü gösterilmektedir. Kanat açısı, rüzgâr hızı değişimlerine tepki olarak kademeli şekilde ayarlanmakta ve zamanla kararlı bir seviyeye ulaşmaktadır.

Simülasyon sonuçlarına göre, kanat açısı türbinin güç üretimini optimize etmek için sürekli ayarlanır. Büyük türbinler, yapıları gereği rüzgâr değişimlerine daha yavaş tepki verir ve bu nedenle kontrol sistemleri, aşınmayı önlemek ve kararlılığı sağlamak amacıyla yavaş tepki süresi dikkate alınarak tasarlanır. Gerçek uygulamalarda, kontrol

stratejileri genellikle yavaş tepki süresini karşılayabilmek için bir miktar yumuşatma veya gecikmeli eylem içerir. Ani ve hızlı rüzgâr değişimlerine karşı anlık tepki beklenmez; bunun yerine, küçük rüzgâr dalgalanmaları genellikle filtrelenir ve uzun vadeli eğilimler dikkate alınır.



Şekil 5.2. Değişken rüzgâr hızlarında kanat açısı kontrol tepkisi (Jonkman ve diğ., 2009)

Kontrol tasarımında, türbinin aerodinamik ve mekanik davranışları ile birlikte, rüzgâr hızındaki hızlı değişiklikler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bulanık mantık denetleyiciler ve kazanç zamanlamalı kontrol sistemleri, özellikle değişken rüzgâr hızlarına adaptasyon sağlamak için etkili yöntemler sunmaktadır. Bu kontrol yapıları, türbinin çalışma koşullarına hızlı bir şekilde uyum sağlayarak sistem verimliliğini arttırmakta ve salınımları azaltmaktadır.

Bu çalışmada, 5 MW NREL rüzgâr türbini modeli kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları, rüzgâr türbininin aerodinamik özellikleri ile birlikte kontrol parametrelerinin etkilerini analiz etmektedir. Tablo 5.1.'de, rüzgâr türbininin temel özellikleri ve bu özelliklere ait değerler verilmiştir. Rotor dinamik modeli, nominal rüzgâr hızı ve nominal rotor hızı gibi önemli parametreler, türbinin performansını belirleyen önemli faktörlerdir.

Rüzgâr türbininin verimli çalışabilmesi için, rüzgâr hızı ve kanat açısı gibi parametrelerin doğru şekilde kontrol edilmesi gerekir. Bu bağlamda, Simulink modeli kullanılarak türbinin dinamik davranış benzetimi yapılmıştır. Modelde, aerodinamik sabitler, shaft özellikleri, eyleyici parametreleri ve diğer fiziksel parametreler dikkate alınarak türbinin performansı analiz edilmiştir (Tablo 5.2.).

Simülasyon, türbinin çeşitli koşullarda nasıl tepki verdiğini ve güç katsayısı (C_p) ile uç hız oranı (λ) gibi parametrelerin optimizasyonunu gözlemlemek için kullanılmıştır.

Sonuçlar, sistemin rüzgâr hızı değişimlerine uyarlanabilir bir şekilde tepki verdiğini ve türbinin verimliliğini iyileştiren kontrol stratejilerinin uygulanabileceğini göstermektedir.

Tablo 5.1. 5 MW NREL Rüzgâr türbini özellikleri (Jonkman ve diğ., 2009)

Özellik	Değer	Birim
Rüzgâr türbini gücü	5	MW
Rotor konfigürasyonu	3 kanat	
Kontrol türü	Değişken Hız, Değişken Kanat açısı	
Rotor çapı	126	m
Rotor göbek çapı	3	m
Göbek yüksekliği	90	m
Kesme-alt hızı	4	m/s
Nominal rüzgâr hızı	12	m/s
Kesme-üst hızı	25	m/s
Nominal rotor hızı	11.46	d/dk
Nominal reneratör hızı	1032	d/dk

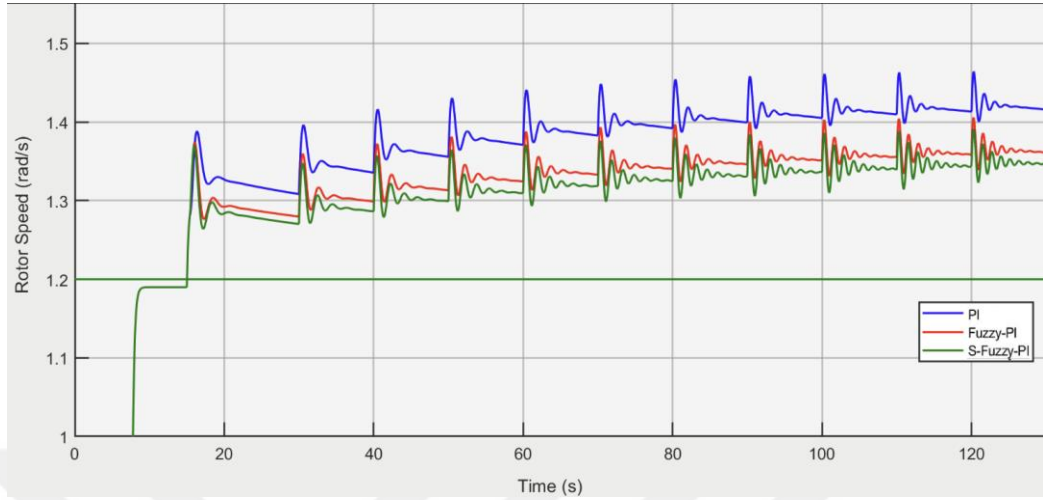
Tablo 5.2. Simulink model parametreleri

Özellik	Değer	Birim
Türbinin aerodinamik sabitleri	$c_1 = 0.5176, c_2 = 116, c_3 = 0.4, c_4 = 5,$ $c_5 = 21, c_6 = 0.0068$	—
Türbinin yarıçapı	$R = 43$	m
Yüzey alanı	$S = \pi R^2$	m^2
Hava yoğunluğu	$\rho = 1.22$	kg/m^3
Çevrim oranı	$n_g = 90$	—
Şaft ataleti	$J_t = 8.1 \times 10^8$	$kg \cdot m^2$
Şaft sönümlenme sabiti	$K_r = 8.2 \times 10^8$	$N \cdot m \cdot s/rad$
Şaft rijitliği	$K_s = 6 \times 10^9$	$N \cdot m/rad$
Eyleyici ataleti	$J_a = 0.2$	$kg \cdot m^2$
Eyleyici katsayısı	$f_a = 1$	—

Kurgulanan simülasyonda, üç farklı kontrolcünün PI, Fuzzy-PI ve S-Fuzzy-PI rüzgâr hızlarındaki değişimlere yanıt olarak rotor hızını nominal değere yakın tutma yetenekleri karşılaştırılmıştır. Simulink modelinde NREL 5MW Rüzgâr türbini modeli parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Rüzgâr hızı girişi, belirli zaman aralıklarında (0s, 2s, 15s vb.) 12 m/s'den 25 m/s'ye kadar artacak şekilde modellenmiştir. Şekil 5.3.'deki sonuçlar her bir kontrolcünün değişen rüzgâr koşulları altındaki dinamik yanıtlarını göstermektedir.

Şekil 5.3.'de üç farklı kontrolcünün rotor hızını rüzgâr hızı değişimlerine karşı nasıl düzenlediği karşılaştırılmaktadır. PI kontrolcüsü, rotor hızının başlangıçta hızlı bir şekilde artıp belirli bir noktada kararlı olduğu tipik bir tepki sergilemektedir. Ancak, rüzgâr hızındaki değişimlerle birlikte hafif salınımlar gözlemlenmektedir. Bu salınımlar,

PI kontrolcüsünün yüksek rüzgâr hızlarında, özellikle aşım (overshoot) gibi problemleri yönetme konusunda sınırlı bir yeteneğe sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.3. Rotor hızı tepkisi ve kontrolcüler arasındaki karşılaştırma

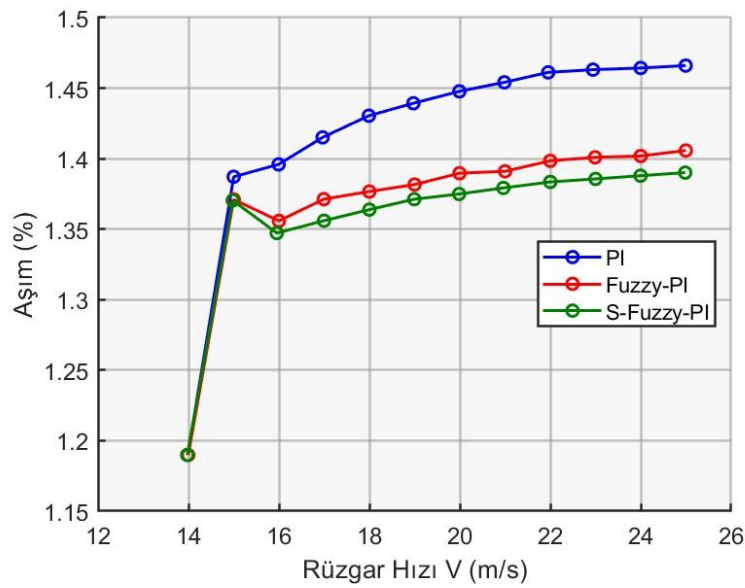
Fuzzy-PI kontrolcüsü, PI kontrolcüsüne göre daha iyi bir performans sunmaktadır. Rüzgâr hızındaki artışla birlikte, aşım miktarını azaltarak daha düzgün bir kontrol sağlamaktadır. Bu kontrolcünün adaptasyon kabiliyeti, PI kontrolcüsünün daha fazla salınım ve aşım yaşadığı durumlara kıyasla belirgin bir iyileşme göstermektedir. Ayrıca, S-Fuzzy-PI kontrolcüsü, Fuzzy-PI kontrolcüsünün sunduğu performansı daha da geliştirerek, rotor hızında daha az salınım ve daha dengeli kontrol sunmaktadır.

Simülasyonda, rüzgâr hızı girişi, belirli zaman dilimlerinde artan bir basamaksal fonksiyon olarak modellenmiştir ve 12 m/s ile 25 m/s arasında değişim göstermektedir. Modellenen rüzgâr hızındaki değişimler, her üç kontrolcünün de rotor hızı üzerindeki etkilerinin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Sonuçlar, her bir kontrolcünün değişen çevresel koşullara adaptasyon kabiliyetini ortaya koymaktadır. Rüzgâr hızı değiştikçe, PI kontrolcüsü yeterli izleme sağlamakla birlikte, yüksek hızlarda yaşanan salınımlar bu kontrolcünün performansının sınırlarını gösterir. Fuzzy-PI kontrolcüsü, rotor hızındaki salınımları azaltarak daha dengeli bir izleme sağlarken S-Fuzzy-PI kontrolcüsü, yüksek rüzgâr hızlarına daha iyi tepki vermektedir.

Genel olarak, üç kontrolcünün elde ettiği rotor hızı dengelemesi tatmin edici seviyededir. Bununla birlikte, S-Fuzzy-PI kontrolcüsü, hız ve doğruluk arasında en iyi dengeyi sağlayarak, daha az salınımla kararlı bir kontrol sunmaktadır. Simülasyon, uyarlamalı kontrol stratejilerinin rüzgâr türbinleri için daha uygun olduğunu ve bulanık

mantık tabanlı kontrolcüler gibi yöntemlerin, türbinlerin dinamik doğasını daha verimli bir şekilde yönetebileceğini ortaya koymaktadır. Bu tür stratejiler, rüzgâr hızındaki ani değişikliklere karşı daha dayanıklı ve esnek kontrol çözümleri sunmaktadır.

Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'de, PI, Fuzzy-PI ve S-Fuzzy-PI kontrolcülerinin rüzgâr hızlarına bağlı olarak kanat açısı değişimi ile rotor hızını düzenleme performansları karşılaştırılmıştır. Rüzgâr hızı girişi, belirli zaman dilimlerinde 12 m/s ile 25 m/s arasında değişen basamaksal fonksiyon olarak modellenmiştir. Sonuçlar, her bir kontrolcünün rotor hızı üzerindeki etkilerini gösterirken aşım ve kararlı durum hatası (e_{ss}) verileriyle kontrolcüler arasındaki farkları ortaya koymaktadır.

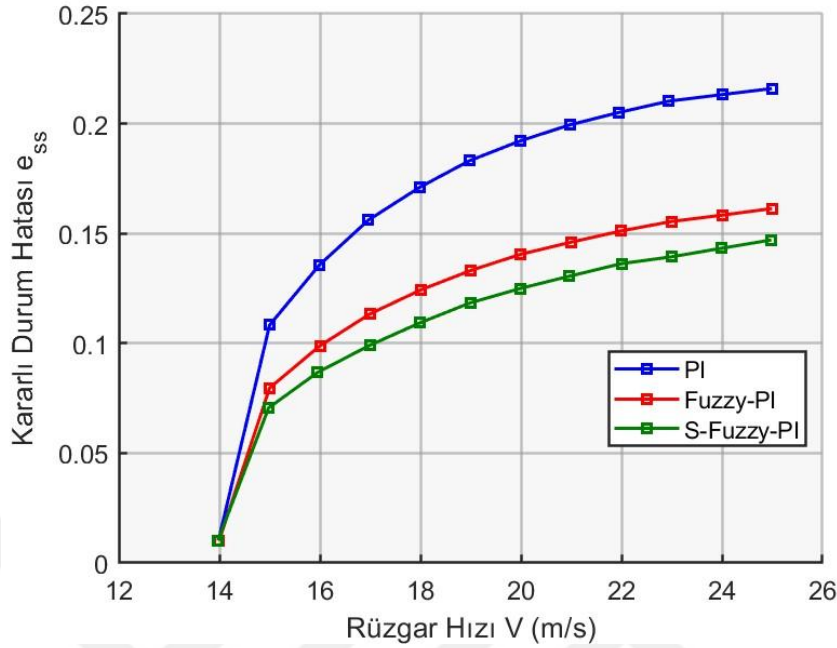


Şekil 5.4. Yüzde aşım karşılaştırması

Şekil 5.4.'de aşım karşılaştırması incelendiğinde, PI kontrolcüsü rüzgâr hızındaki düşük artışlarla hızla tepki verirken, özellikle 14 m/s'den sonraki yüksek rüzgâr hızlarında önemli salınımlar ve aşım yaşanmaktadır. Fuzzy-PI kontrolcüsü, PI kontrolcüsüne göre daha düzgün bir kontrol sağlar, ancak rüzgâr hızındaki artışlarla birlikte belirli düzeyde aşım gözlemlenmektedir. S-Fuzzy-PI kontrolcüsü ise daha yumuşak geçişler ve daha kararlı kontrol sağlayarak salınımları minimize eder. Bu kontrolcü, yüksek rüzgâr hızlarında dahi en az salınımla en iyi performansı sunmaktadır.

Şekil 5.5.'de kararlı durum hatası açısından yapılan karşılaştırmada ise, PI kontrolcüsü yüksek rüzgâr hızlarında kararlı durum hatasını minimize etmekte zorlanırken, Fuzzy-PI kontrolcüsü daha iyi bir hata minimizasyonu sağlar. Ancak, rüzgâr hızı arttıkça hata değeri artmaktadır. S-Fuzzy-PI kontrolcüsü, diğer iki kontrolcüye göre

daha düşük kararlı durum hatası ve daha az salınım sağlayarak genel olarak daha kararlı bir performans sergilemektedir.



Şekil 5.5. Kararlı durum hatası karşılaştırması

Kontrol sistemlerinde salınımlar, özellikle rüzgâr türbini modellerinde, kontrol parametrelerinin yetersiz ayarlanmasından kaynaklanmaktadır. Bu salınımlar, sistemin kararlılığını ve verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Rüzgâr türbini kontrolünde, rotor hızındaki aşırı salınımlar, türbinin mekanik bileşenlerine (kanatlar, dişli kutusu, jeneratör vb.) gerilme uygulayarak, yıpranma ve hasar riskini artırabilir. Bu durum, türbinin ömrünü kısaltabilir. Daha da önemlisi değişen rüzgâr hızlarına karşı en iyi enerji çıkarımı elde etmek için ayarlanması gereken rotor hızı ve kanat açısı kontrol algoritması kritik öneme sahiptir.

Kontrol parametrelerinin, özellikle oransal (K_p) ve integral (K_i) kazançlarının ayarlanması, bu salınımların minimize edilmesinde kritik rol oynamaktadır. Yüksek bir (K_p) değeri, hızlı tepki süreleri sağlasa da, salınım ve aşımı artırabilir. K_i değeri ise sabit durum hatalarını ortadan kaldırmada yardımcı olur, ancak integral rüzgâr artımı nedeniyle sistemde daha yavaş tepki ve artan salınımlar görülebilir. Bu nedenle, K_p ve K_i parametreleri arasındaki dengeyi sağlamak, sistemin hem hızlı tepki vermesini hem de kararlı bir şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde kritik öneme sahiptir.

Bulanık mantık tabanlı kontrolcüler (Fuzzy-PI ve S-Fuzzy-PI), daha karmaşık sistemler için daha esnek çözümler sunar. Bu kontrolcüler, doğrusal olmayan sistemlere

daha iyi uyum sağlayarak salınımları azaltır ve geçişleri yumuşatır. Ancak, bulanık mantık parametrelerinin aşırı ayarlanması, hesaplama süresinin artmasına ve sistemin aşırı yumuşatılmasına yol açabilir. Bu durum, hızla değişen rüzgâr hızlarında performansın düşmesine neden olabilir.

Sonuç olarak, parametre ayarlamaları yapılırken hem hızlı tepki hem de stabilite arasındaki dengeye dikkat edilmelidir. Bu denge, verimli enerji üretimi ve sistemin uzun vadeli güvenilirliği için hayati önem taşır.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, yalnızca adım açısına (β) bağlı olarak kazanç ayarlaması yapılan 1 boyutlu (1D) bakış tabloları ile sistemin daha kararlı ve hızlı bir yanıt verdiği gözlemlenmiştir. Ancak rotor hızı (ω_r) da eklenerek oluşturulan 2 boyutlu (2D) bakış tabloları kullanıldığında, sistemin dinamik performansının zayıfladığı ve salınımların arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, özellikle rotor hızı ve adım açısının birlikte kullanıldığı tablolarda kazançların düzgün enterpolasyonla ayarlanmamış olmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, rotor hızına göre ayarlanan kazançların bazı noktalarda aşırı agresif davranması da sistemin dengesini bozabilmektedir. Bu nedenle, 2D kazanç ayarlamalarında rotor hızının etkisinin daha sınırlı tutulması, ya da rotor hızına bağlı düzeltme katsayısı (GK) fonksiyonunun daha yumuşak geçişlerle tanımlanması önerilmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, 1D sistemlerin yalın yapısı sayesinde daha tutarlı bir kontrol sağladığını, 2D sistemlerin ise daha fazla hassas ayar ve doğrusal geçiş gerektirdiğini ortaya koymuştur.

Bulanık-PI denetleyicinin klasik PI denetleyiciye kıyasla daha iyi performans göstermesinin temel nedeni, kontrol kazançlarını (K_p ve K_i) rüzgâr türbininin çalışma koşullarına göre gerçek zamanlı olarak uyarlayabilmesidir. Sabit kazançlara sahip klasik PI denetleyicinin aksine, bulanık sistem hata (e), hata değişimi (de) ve aerodinamik duyarlılık ($dP/d\theta$) değişkenlerini yorumlayarak daha bağlamsal (durumsal farkındalığı olan) kararlar alır.

Tanımlanan bulanık kurallar, hata büyüklüğüne ve sistemin aerodinamik hassasiyetine göre K_p ve K_i kazançlarının artırılmasına veya azaltılmasına olanak tanır. Örneğin, aerodinamik duyarlılık yüksek olduğunda, denetleyici aşırı tepkileri önlemek için kazançları azaltır. Duyarlılığın düşük olduğu durumlarda ise, hatayı daha hızlı düzeltmek için daha agresif şekilde yanıt verir.

Özellikle 3. Bölge'de (kanat açısı kontrolünün baskın olduğu bölgede) rüzgâr türbinlerinin dinamiği oldukça doğrusal olmayan bir yapı gösterir. Bulanık denetleyici, bu doğrusal olmayan davranışları klasik PI denetleyicilere kıyasla daha etkili şekilde yakalayabilir.

Bulanık çıkarım sistemi, kontrol eylemlerinde ani değişiklikler yerine kurallar arasında yumuşak geçişler sağlar. Bu durum, aşırı salınımların önlenmesine ve daha kısa yerleşme sürelerine katkı sunar. Simülasyon sonuçlarında bu etki açıkça görülmektedir.

$dP/d\theta$ bilgisinin üçüncü giriş olarak sisteme entegre edilmesi, değişen rüzgâr koşullarına bağlı olarak türbinin aerodinamik davranışına daha hassas yanıt verilmesini sağlar. Bu sayede hem geçici rejim performansı hem de kararlı hal doğruluğu iyileştirilir.

Bu çalışmada geliştirilen Sugeno tabanlı Bulanık-PI denetleyici, klasik PI denetleyici ile karşılaştırıldığında sistem performansında anlamlı iyileşmeler sağlamıştır. Her ne kadar sistemde aşım veya salınımlar tamamen giderilememiş olsa da, her iki olguda da belirgin azalmalar elde edilmiştir. Bu iyileşmelerin temel nedeni, aerodinamik duyarlılık ($dP/d\theta$) bilgisinin denetleyiciye üçüncü bir giriş olarak entegre edilmesidir. Böylece denetleyici, rüzgâr değişimlerine karşı daha uyarlanabilir bir yapı kazanmış ve sistemin kararlılığı ile dinamik performansı artırılmıştır. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin özellikle değişken rüzgâr koşulları altında etkili ve uygulanabilir bir kontrol stratejisi sunduğunu göstermektedir.

6.2. Öneriler

Sürüklenme-kaldırma kuvvetleriyle aerodinamik modeller: Türbin kanadı üzerindeki kuvvetlerin ayrı ayrı modellenmesi ile türbin davranışının daha hassas incelenmesi mümkün olur.

Kanat titreşim modeli: Kanat esnekliği, salınım gibi olguların modellenmesi ile yapısal dayanım ve kontrol performansı arasındaki denge gözlemlenebilir.

Servo-hidrolik eyleyici modeli kullanımı: Kanat açısı kontrol sistemi için daha gerçekçi bir kontrol ve hareket iletim dinamiği elde edebilmek amacıyla servo-hidrolik eyleyici modelleri kullanılabilir.

Planet dişli kutusu modellemesi: Rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan planet dişli sistemi ile daha detaylı bir dişli kutusu modeli oluşturulabilir. Bu sayede mekanik kayıplar ve kontrol hassasiyetine etkileri analiz edilebilir.

Hidrolik güç aktarım sistemi: Rotor tarafından üretilen mekanik torkun, geleneksel dişli kutusu yerine hidrolik sistemler aracılığıyla jeneratöre iletilmesi mekanik kayıpların azaltılması ve sistemin kontrol edilebilirliğinin artırılması açısından avantaj sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Benbouzid, M. (2022). Coupled Indirect Torque Control and Maximum Power Point Tracking Technique for Optimal Performance of 12/8 Switched Reluctance Generator-Based Wind Turbines. *Machines*, 10,1046.
- Boukhezzer, B. ve Siguerdidjane, H. (2011). Nonlinear Control of a Variable-Speed Wind Turbine Using a Two-Mass Model. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 26, No. 1.
- Boukhezzer, B., Lupu, L., Siguerdidjane, H. ve Hand, M. (2006). Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines. *Renewable Energy*, 1273-1287.
- Bouregba, H., Hachemi, M., Bey, M. ve Hamidat, A. (2022). Stability analysis of the pitch angle control of large wind turbines using different controller strategies. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 14(11) 1-18.
- Chavero-Navarrete , E., Trejo-Perea, M., Jáuregui-Correa, J. C., Carrillo-Serrano, R. V. ve Ríos-Moreno, J. G. (2019). Expert Control Systems for Maximum Power Point Tracking in a Wind Turbine with PMSG: State of the Art. *applied science*.
- Chiang, M.-H. ve Wang , C.-S. (2016). A Novel Pitch Control System of a Large Wind Turbine Using Two-Degree-of-Freedom Motion Control with Feedback Linearization Control. *Energies*, 9,791.
- Chatterjee, K. ve Kumar, D. (2016). A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 957-970.
- Chavero-Navarrete, E., Mario , T.-P., Jáuregui-Correa, J. C., Carrillo-Serrano, R. V. ve Ríos-Moreno, J. G. (2019). *Pitch Angle Optimization by Intelligent Adjusting the Gains of a PI Controller for Small Wind Turbines in Areas with Drastic Wind Speed Changes*. sustainability.
- Civelek, Z., Lüy, M., Çam, E. ve Barışçı, N. (2015). Control of Pitch Angle of Wind Turbine by Fuzzy Pid Controller. *Intelligent Automation & Soft Computing*., 463–471.
- Dorf, R. ve Bishop, R. (2013). *Modern Control Systems*. Pearson.
- Esfahani, P. ve Pieper, J. (2021). Machine learning based model linearization of a wind turbine for power regulation. *International Journal of Green Energy*, VOL. 18, NO. 15, 1565–1583.
- Elsisi, Mahmoud, Tran, M.-Q., Mahmoud, K., Lehtonen, M. ve Darwish, M. (2020). Controller for Wind Energy Conversion Systems Against Wind Speed Fluctuations. *IEEE Access*.

<https://www.energyencyclopedia.com/en/free-downloads/images/working-principle-of-a-horizontal-axis-wind-turbine-71> [Ziyaret Tarihi: 24 Haziran 2025].

Franklin, Powell ve Emami-Naeini. (2019). *Feedback Control of Dynamic Systems (8th Edition)*. Pearson.

Goyal, S., Deolia, V. K. ve Agrawal, S. (2024). An Adaptive Fuzzy Tuned PID Pitch Controller For Large VSWT Wind Turbine. *Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, 557-561.

Hand, M. (1999). *Variable-Speed Wind Turbine Controller Systematic Design Methodology: A Comparison of Non-Linear and Linear ModelBased Designs*. Nrel.

Hansen, M. H., Hansen, A., Larsen, T. ve Øye, S. (2005). *Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine*. Denmark: Risø-R Report.

Hansen, M. O. (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*. Earthscan.

Hossam, H. (2019). Modified P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of five-phase PMSG based wind generation system. *Springer Nature Applied Sciences*, 1:838.

Hwas, A. ve Kateb, R. (2012). Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller. *Industrial Control Centre, University of Strathclyde*, Pages 241-246.

Jeong, D., Jeon, T., Paek, I. ve Lim, D. (2023). Development and Validation of Control Algorithm for Variable Speed Fixed Pitch Small Wind Turbine. *Energies*, 16.

Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. ve Scott, G. (2009). *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*. NREL/TP-500-38060.

Kamarzarrin, M. ve Refan, M. (2020). Intelligent Sliding Mode Adaptive Controller Design for Wind Turbine Pitch Control System Using PSO-SVM in Presence of Disturbance. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31:912–925.

Kharchouf, I. ve Nasser, T. (2018). Comparative Study of MPPT and Pitch Angle using PI and Fuzzy Logic Controllers. *IEEE*, (978-1-7281-1182-7).

Kim, Y.-S. ve Lee, J. (2015). Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switchedmode rectifier. *IET Renewable Power Generation*, 194-202.

Kraiem, Y. ve Abbes, D. (2023). Modeling, control, and simulation of a variable speed wind energy conversion system connected to the power grid. *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering, First Edition.*, 485–501.

Lin, Y.-g., Yin, X.-x., Li, W., Gu, Y.-j., Lei, P.-f. ve Wang, X.-j. (2015). Design, modeling and implementation of a novel pitch angle control system for wind turbine. *Renewable Energy*, 599-608.

- Liu, J., Gao, Y., Geng, S. ve Wu, L. (2016). Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines Via Fuzzy Techniques. *IEEE*.
- Ma, L., Xiao, L., Sattarov, R. ve Xinhao, H. (2021). Design of Wind Turbine Torque Controller with Second-Order Integral Sliding Mode Based on VGWO Algorithm 0 Introduction. *Researchgate*, DOI: 10.16356/j.1005-1120.2021.02.007.
- Manwell, J., McGowan, J. ve Rogers, A. (2009). *Wind Energy Explained-Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons Ltd.
- Martinello, D. (2016). Emulation of wind turbines. E. G. Diana Martinello, *In Wind Turbines - Design, Control and Applications* (s. 179-196). IntechOpen.
- Ngo, Q.-V. ve Nguyen, T.-T. (2020). The fuzzy-PID based-pitch angle controller for small-scale wind turbine. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, v11.i1.pp135-142.
- Ngo, Q.-V. ve Nguyen, T.-T. (2021). The MPPT algorithm combined with pitch angle control for the small-scale wind turbine in a wide speed range. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Vol. 12, No. 3, pp. 1482~1493.
- Nostrani, M. P., Gonzalez, F. E. ve Negri, V. J. (2020). Analysis and emulation of pitch control forces in wind turbines. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42:262.
- Pande, J., Nasikkar, P., Kotecha, K. ve Varadarajan, V. (2021). A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Conversion Systems. *Marine Science and Engineering*, 9, 1187.
- <https://www.pengky.cn/zz-horizontal-axis-turbine/09-independent-pitch-system/independent-pitch-system.html> [Ziyaret Tarihi: 24 Haziran 2025].
- Santoso, S. ve Singh, M. (2008-2011). *Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants*. The University of Texas at Austin: National Renewable Energy Laboratory.
- Sarkar ve Venkaiah. (2020). Hydraulically actuated horizontal axis wind turbine pitch control by model free adaptive controller. *Renewable Energy*, 55-68.
- Shahi, A. ve Bhattacharjee, C. (2018). A Study & Analysis of Fuzzy Based P&O MPPT Scheme in PMSG Based Wind Turbine. *IEEE International Conference on Technologies for Smart-City Energy Security and Power*.
- Van, T. ve Lee, D.-C. (2015). Advanced Pitch Angle Control Based on Fuzzy Logic for Variable-Speed Wind Turbine Systems. *IEEE*, 578-587.
- Varpe, S. A. (2008). *Control system on a wind turbine*. Norwegian University of Science and Technology.

- Vidal, Y., Acho, L., Luo, N., Zapateiro, M. ve Pozo, F. (2012). Power Control Design for Variable-Speed Wind Turbines. *energies*, 3033-3050.
- Yin, X.-x., Lin, Y.-g., Li, W., Gu, Y.-j., Lei, P.-f., ve Liu, H.-w. (2015). Adaptive back-stepping pitch angle control for wind turbine based on a new electro-hydraulic pitch system. *International Journal of Control*, 2316-2326.
- Youssef, A.-R., Mousa, H. H. ve Mohamed, E. E. (2019). Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system. *Electrical Power and Energy Systems*, 218–231.
- Zhang, X., Zheng, L., Jia, J. ve Zheng, L. (2022). A Maximum Power Point Tracking Control Method Based on Rotor Speed PDF Shape for Wind Turbines. *Applied Science*, 12, 9108.
- Zhang, J., Cheng, M., Chen, Z. ve Fu, X. (2008). Pitch angle control for variable speed wind turbines. *ResearchGate*, 978-7-900714-13-8/08/ ©2008 DRPT.
- <https://www.windpowermonthly.com/>. [Ziyaret Tarihi: 24 Haziran 2025].