

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Bulanık PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbininin Hatve Açısının Kontrolü

Zafer CİVELEK

HAZİRAN 2013

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Zafer CİVELEK tarafından hazırlanan BULANIK PID KONTROLÖR İLE RÜZGÂR TÜRBİNİNİN HATVE AÇISININ KONTROLÜ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ediz POLAT
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Necaattin BARIŞCI _____
Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY _____
Üye : Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

BULANIK PID KONTROLÖR İLE RÜZGÂR TÜRBİNİNİN HATVE AÇISININ KONTROLÜ

CİVELEK, Zafer

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat Lüy

Haziran 2013, 119 sayfa

Bu çalışmada, bir rüzgâr türbininin kanat hatve açısı kontrolörünün PID katsayılarının bulanık mantık algoritması ile ayarlanması üzerine bir inceleme yapılmıştır. Klasik PI, bulanık kontrol ve bulanık PID kontrol olmak üzere üç ayrı kontrol yöntemi kullanılarak, yüksek rüzgâr hızlarında sistemin zarar görmemesi ve nominal çıkış gücünün korunması amaçlanmıştır. Matlab/Simulink programı ile kontrolörlerin simülasyonu yapılarak, değişik rüzgâr hızlarında rüzgâr türbini kanat hatve açısının kontrolü ve çıkış gücünün ayar noktasında sabit tutulması hedeflenmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen çıkış gücünün kararlı hale gelme zamanı ve kararlı hâl hataları değerlendirilerek, kontrol sistemlerinin performansları ölçülmüş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda bulanık PID kontrolörün, PI ve Bulanık Kontrolörlere göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bulanık PID, klasik PI, bulanık kontrol, rüzgâr türbini, hatve açısı

ABSTRACT

CONTROL OF PITCH ANGLE OF WIND TURBINE WITH FUZZY PID CONTROLLER

CİVELEK, Zafer

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Eng., M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Murat LÜY

June 2013, 119 pages

In this study, presents a research on set of PID parameters of blade pitch angle controller of wind turbine with fuzzy logic algorithm. Intended for holding the system harmless and saving the nominal output power by using three individual control methods such as Classic PI, fuzzy control and fuzzy PID control. It is aimed to the control of wind turbine blade pitch angle in different wind speeds and to hold the output power stable in the set point, by simulation of controllers with Matlab/Simulink programme. By evaluating the steady state time of output power received from the simulation results and steady state errors, the performances of the control systems have been measured and compared with each other. As a result of these comparisons, it is seen that fuzzy PID controller performed better than PI and Fuzzy Controllers.

Key Words: Fuzzy PID, classic PI, fuzzy control, wind turbine, pitch angle

TEŐEKKÖR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımcı esirgemeyen, tez yöneticisi hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY'e, tez çalışmalarım esnasında daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM'a ve hocam Sayın Doç. Dr. Necaattin BARIŞCI'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür taraması	2
1.2. Tezin Kapsamı.....	5
1.3. Tezin Amacı	5
2. MATERYAL	6
2.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi	6
2.2. Rüzgâr Türleri	8
2.3. Rüzgâra Sebep Olan Etkenler.....	9
2.3.1. Gradyan Kuvveti.....	9
2.3.2. Coriolis Kuvveti.....	10
2.3.3. Merkezkaç Kuvveti.....	10
2.3.4. Sürtünme Kuvveti	10
2.4. Rüzgârın Hızı ve Yönü.....	10
2.5. Rüzgâr Enerji Sistemlerinde Yaygın Olarak Kullanılan Kavramlar	11
2.5.1. Hava Yoğunluğu	11

2.5.2. Rotorun Süpürdüğü Alan	11
2.5.3. Rüzgârdan Elde Edilebilecek Teorik Güç	12
2.5.4. Kanat Hız Oranı	12
2.5.5. Güç Performans Katsayısı	13
2.6. Rüzgâr Türbinleri	14
2.6.1. Rüzgâr Türbininin Yapısı	15
2.6.2. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	17
2.6.3. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler.....	23
2.6.3.1. Doğru Akım Jeneratörleri	23
2.6.3.2. Senkron Jeneratörler	24
2.6.3.3. Daimi Mıknatıslı Senkron Jeneratör	25
2.6.3.4. Asenkron Jeneratörler	26
2.6.3.5. Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörler.....	27
2.6.3.6. Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör	28
2.7. Klasik Kontrol Sistemi Tasarımı	29
2.7.1. Kontrolör Yapıları.....	29
2.7.2. PID Ayarı	37
2.7.3. Genel PID Denetleyici Tasarım Kuralları	38
2.8. Modern Kontrol Sistemi Tasarımı.....	40
2.8.1. Bulanık Mantık	40
3. YÖNTEM.....	58
3.1. Giriş	58
3.2. Rüzgâr Türbini Kontrol Eşitlikleri	59
3.3. Rüzgâr Türbininin Matlab’da Modellenmesi	64
3.4. Hareketlendirici Modeli	67
3.5. Rüzgâr Türbini için PI kontrolör Dizaynı	69
3.6. Rüzgâr Türbini için Bulanık Mantık Kontrolör Dizaynı.....	77

3.7. Rüzgâr Türbini için Bulanık PID Kontrolör Dizaynı	88
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	100
4.1. Matlab Simülasyon Sonuçları	100
4.2. Sonuçlar	106
KAYNAKLAR	107
EKLER.....	118

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Ziegler-Nichols açık çevrim kontrol katsayı hesapları.....	38
2.2. Ziegler-Nichols kapalı çevrim kontrol katsayı hesabı.....	38
2.3. Kontrol katsayılarının etkilerinin karşılaştırılması.....	39
2.4. Bulanık kurallar için kullanılan bazı anlamlandırma fonksiyonları.....	50
2.5. Bazı bulanık seviyeler.....	51
3.1. Simule edilen rüzgâr enerji sistemleri parametreleri.....	65
3.2. PI kontrolör katsayıları.....	70
3.3. Bulanık mantık kontrolör kural çizelgesi.....	81
3.4. Bulanık mantık kuralları.....	82
3.5. Bulanık PID Kontrolör kural Çizelgesi.....	92
3.6. Bulanık PID kontrolörün kural Çizelgesi.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Rüzgâr enerjisiyle çalışan bir değirmenin temsili resmi	6
2.2. Kanat hız oranına göre rotor verimliliği.....	13
2.3. Değişik β açısı değerleri için C_p - λ eğrisi	14
2.4. Eski bir rüzgâr türbini	15
2.5. Rüzgâr türbini bileşenleri.....	16
2.6. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini.....	18
2.7. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri (a)Darrius (b)Savanius c)Solarwind (d)Helical (e)Noguchi (f)Maglev (g)Cochrane	19
2.8. Rüzgârı önden ve arkadan alan rüzgâr türbinleri	20
2.9. Bir Açık Deniz Rüzgâr Türbini	22
2.10. Bir Açık Deniz Rüzgâr Türbin Tarlası	23
2.11. Alan sargılı senkron jeneratör	24
2.12. Daimi mıknatıslı senkron jeneratör	25
2.13. Daimi mıknatıslı senkron jeneratörün farklı bir yapısı	26
2.14. Çift beslemeli asenkron jeneratör	27
2.15. Sincap kafesli asenkron jeneratör.....	28
2.16. (a). Seri kontrol sistemi blok diyagramı (b). Geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı (c). Durum geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı	30
2.17. Geri beslemeli bir kontrol sistemi	32
2.18. PD kontrolün, kontrol sistemi üzerindeki geçici cevap etkisi.....	33
2.19. PD kontrol etkisi	34
2.20. PI kontrolörlü bir örnek kontrol sistemi.....	35
2.21. PID kontrol sistemi	36

2.22. Kontrol sistemlerinin etkileri	36
2.23. Ziegler-Nichols kriter eğrisi	37
2.24. Ziegler-Nichols PID katsayı ayarı.....	38
2.25. Üyelik fonksiyonu	41
2.26. Üçgen üyelik fonksiyonu	42
2.27. Yamuk üyelik fonksiyonu	42
2.28. s-üyelik fonksiyonu:.....	43
2.29. π -üyelik fonksiyonu	44
2.30. Destek kümesi	44
2.31. Geçiş noktası	45
2.32. Bulanık teklik	45
2.33. α -kesim kümesi	45
2.34. Normalizasyon	46
2.35. Bulanık Mantık Denetleyici Şeması.....	50
2.36. Maksimum-minimum operatörünün kullanımı	53
2.37. Maksimum-çarpım operatörünün kullanımı	54
2.38. Maksimum üyelik yöntemi	55
2.39. Ağırlık merkezi yöntemi	55
2.40. Ağırlıklı ortalama yöntemi.....	56
2.41. Maksimumların ortalaması yöntemi	56
2.42. Bulanık Mantık Denetim Sisteminin Tasarım Usulü	57
3.1. Kontrol olmadan rüzgâr hızı-çıkış gücü eğrisi.....	60
3.2. Güç katsayısı (C_p)-kanat uç hız oranı (λ) eğrisi.....	60
3.3. Değişik β açısı değerleri için C_p -TSR eğrisi.....	62
3.4. Rüzgâr türbini – rotor açısal hızı eğrisi.....	62
3.5. Rüzgâr türbini çalışma bölgeleri	63
3.6. Rüzgâr türbini ve jeneratör sisteminin blok şeması	64

3.7. Rüzgâr türbini ve jeneratör sisteminin iç yapısının blok şeması	64
3.8. Rüzgâr hızı fonksiyonu Matlab bloğu.....	65
3.9. Lamda fonksiyonu Matlab bloğu	66
3.10. Rüzgâr türbin modelindeki subsystem bloğu.....	66
3.11. Rüzgâr türbin modelindeki subsystem bloğunun Fcn fonksiyonu.....	67
3.12. Rüzgâr türbin modelindeki subsystem bloğunun Fcn1 fonksiyonu.....	67
3.13. Matlab servo motor blok şeması	69
3.14. Matlab servo motor blok şeması iç yapısı.....	69
3.15. PI Blok şeması	69
3.16 PI kontrollü rüzgâr enerji sistemi.....	70
3.17. PI kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızı-zaman grafiği.....	71
3.18. PI kontrolörün hata sinyali değişim grafiği.....	72
3.19. PI kontrolör için çıkış gücü-zaman değişimi ve büyütülmüş grafiği	72
3.20. PI kontrolör için hatve açısı-rüzgâr hızı grafiği	73
3.21. PI kontrolör için basamak fonksiyonu şeklindeki rüzgâr hızı grafiği.....	74
3.22. PI kontrolörün basamak rüzgâr hızındaki hata değişim grafiği	74
3.23. PI kontrolörün basamak rüzgâr girişindeki çıkış gücü değişim grafiği	75
3.24. PI kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızı değişim grafiği	75
3.25. Değişik değerlerdeki rüzgâr hızında hata değerindeki değişim grafiği	76
3.26. Değişik değerlerdeki rüzgâr hızında hatve açısındaki değişim grafiği	76
3.27. Değişik değerlerdeki rüzgâr hızında çıkış gücü değişimi	77
3.28. Bulanık mantık kontrolör sistem blok şeması.....	78
3.29. Giriş değişkeni hatanın bulanık kümeleri	78
3.30. Giriş değişkeni hata değişiminin kümeleri.....	79
3.31. Çıkış değişkeni beta açısındaki değişim miktarının bulanık kümeleri.....	79
3.32. Matlab kural çizelgesi kümeleri	81
3.33. Bulanık mantık kontrolör giriş ve çıkış değişkenleri üç boyutlu grafiği	82

3.34. Bulanık mantık kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızı-zaman grafiği ...	82
3.35. Bulanık mantık kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızındaki hata değişimi grafiği	83
3.36. Bulanık mantık kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızındaki hatve açısı değişim grafiği	83
3.37. Bulanık mantık kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızında çıkış gücü grafiği.....	84
3.38. Bulanık mantık kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızı.....	85
3.39. Bulanık mantık kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızındaki hata değişim grafiği	85
3.40. Bulanık mantık kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızındaki çıkış gücü değişim grafiği	86
3.41. Bulanık mantık kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızı değişim grafiği .	86
3.42. Bulanık mantık kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki hata sinyalinin değişim grafiği	87
3.43. Bulanık mantık kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki hatve açısının değişim grafiği.....	87
3.44. Bulanık mantık kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki çıkış gücü değişim grafiği	88
3.45. Bulanık PID Kontrolör hata ve hata değişim grafiği	89
3.46. Bulanık PID Kontrolör sistem blok şeması.....	90
3.47. PID kontrolör iç yapısı	91
3.48. Giriş hata sinyali bulanık kümeleri	92
3.49. Giriş hatanın değişimi sinyali bulanık kümeleri	92
3.50. Çıkış katsayı değişimi bulanık kümeleri	92
3.51. Bulanık PID kontrolör giriş ve çıkış değişkenleri üç boyutlu grafiği	93
3.52. Bulanık PID kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızı-zaman grafiği	94
3.53. Bulanık PID kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızındaki hata değişimi grafiği.....	94
3.54. Bulanık PID kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızındaki hatve açısı değişim grafiği	95

3.55. Bulanık PID kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızında çıkış gücü grafiği	95
3.56. Bulanık PID kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızı.....	96
3.57. Bulanık PID kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızındaki hata değişim grafiği.....	96
3.58. Bulanık PID kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızındaki çıkış gücü değişim grafiği	97
3.59. Bulanık PID kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızı değişim grafiği	97
3.60. Bulanık PID kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki hata sinyalinin değişim grafiği	98
3.61. Bulanık PID kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki hatve açısının değişim grafiği	98
3.62. Bulanık PID kontrolör için değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki çıkış gücü değişim grafiği	99
4.1. PI, Bulanık ve Bulanık PID çıkış güçlerinin karşılaştırılması	101
4.2. PI, Bulanık ve Bulanık-PID kontrolörlerin basamak giriş cevapları	102
4.3. (a) PI kontrolör için büyütülmüş basamak giriş cevabı (b) Bulanık PID kontrolör için büyütülmüş basamak giriş cevabı (c) Bulanık mantık kontrolör için büyütülmüş basamak giriş cevabı	103
4.4. PI, Bulanık ve Bulanık PID çıkış güçleri karşılaştırması ve büyütülmüş şekli	105

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif Akım
ADRC	Aktif Distürbans Koruma Kontrolü
AFSMC	Adaptif Bulanık Kayma Modlu Kontrolör
ASSG	Alan Sargılı Senkron Jeneratörlerin
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör
DA	Doğru Akım
DMSG	Daimi Mıknatıslı Senkron Jeneratörlere
PD	Oransal Türevsel
PI	Oransal İntegral
PID	Oransal İntegral Türevsel
MPC	Çok Değişkenli Prediktif Kontrol
LMI	Doğrusal Matris Eşitsizlikleri
LQG	Doğrusal Quadratik Gaussian
LPE	Doğrusal Parametre Tahmincisi
MÖ	Milattan Önce
MS	Milattan Sonra
NB	Negatif Büyük
NK	Negatif Küçük
PB	Pozitif Büyük
PK	Pozitif Küçük
PWM	Dalga Genişlik Modülasyonu
RES	Rüzgâr enerji sistemi
RNN	Tekrarlayan Yapay Sinir Ağı
RT	Rüzgâr Türbini
S	Sıfır
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör
TSR	Kanat Uç Hız Oranı

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu, endüstriyel sistemlerin yaygınlaşması ve teknolojik gelişmeler enerjiye olan ihtiyacı daha da arttırmıştır. Enerji üretiminde en büyük oranı teşkil eden fosil yakıtlarının gün geçtikçe azalması, enerji üretiminde çevresel faktörlerin korunması gerekliliğinin insanlar tarafından daha iyi anlaşılması, ülkeleri alternatif enerji kaynaklarını araştırmaya ve onlardan istifade etmeye sevk etmiştir. Bu alternatif enerji kaynaklarına örnek olarak evrenin en eski ve en büyük enerji kaynağı olan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji gibi enerji kaynakları verilebilir.

Rüzgâr enerjisi yüzyıllardır çeşitli şekillerde insanlığa hizmet vermiş bir enerjidir. İnsanlar bu enerjiden istifade etmek için onu en menfaatli şekle getirmeye çalışmışlar. Çeşitli mekanik sistemler yardımıyla, su çıkarmakta, tahıl öğütmekte vb. işlerinde bu enerjiyi kullanmışlardır. Son on yılda rüzgâr enerji sistemlerindeki maliyetlerin düşmesi, teknolojik yenilikler ve temiz enerji kaynaklarına ilginin artması bu enerji sistemlerini daha popüler hâle getirmiştir.

Rüzgâr enerjisinden istifade edebilmek için çeşitli boyutlarda rüzgâr türbinleri yapılmış ve bu enerji elektrik enerjisine çevrilip kullanılmaya çalışılmıştır. Küçük, orta ve büyük boyutlarda olmak üzere pek çok çeşit rüzgâr türbini yapılmıştır. Büyük boyutlu rüzgâr enerji sistemlerinin, orta ve küçük boyutlu enerji sistemlerine göre daha verimli olması, maliyet-verim açısından düşünen yatırımcıları daha büyük boyutlu ve daha güçlü rüzgâr enerji sistemleri yapmaya sevk etmiştir. Ancak rüzgâr hızının sabit olmaması ve rüzgârdan elde edilen enerjinin rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olması, rüzgâr enerji sistemlerinin güç çıkışlarında enerji dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Aynı zamanda, belli bir sınırın üstündeki yüksek rüzgâr hızları rüzgâr türbinleri için bir tehlike teşkil etmektedir. Rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerjinin mümkün olduğu kadar kararlı olması ve yüksek rüzgâr hızlarında türbin güvenliğinin sağlanması için kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kontrol sistemleri ile maksimum güç noktasının takibi ve nominâl rüzgâr hızının üzerindeki hızlarda çıkış gücünün kararlılığını sağlamak mümkün olur.

1.1. Literatür taraması

Rüzgâr türbininin kanatlarının hatve açısını kontrol ile ilgili yapılan çalışmalarda; ilk olarak Perales vd., rüzgâr türbin sistemini kararlı hâle getirmek ve maksimum gücü elde etmek için rüzgâr hızı tahmin tabanlı bir bulanık mantık kontrol yöntemi önermişlerdir [1]. Sharma vd., kanat hatve açısı kontrolü ile konvertör/invertör kontrolünü birleştirerek, rüzgâr türbininden elde edilen elektriğin kalitesini araştırmışlardır [2]. Guo, rüzgâr türbininde, hatve açısını kontrol ederek güç kararlılığını ayarlamak için H_{∞} kontrolör tavsiye etmiştir [3]. Dadone ve Dambrosio, rüzgâr türbini çıkış gücünü ayarlama için klasik PI ile bulanık PI'yı karşılaştırarak, bulanık PI kontrolörün daha iyi performans sağladığını söylemişlerdir [4].

Sakamoto vd., adaptif kontrol yöntemiyle hatve açısını kontrol ederek, rüzgâr türbininin çıkış gücünün ayarlanması üzerine bir çalışma yapmışlardır [5]. Sakamoto vd., ortalama rüzgâr hızına ve rüzgâr hızının standart sapmasına dayanan ve rüzgâr türbini jeneratörünün bütün çalışma bölgelerinde kullanılabilen geliştirilmiş prediktif kontrol yöntemi ile hatve açısı kontrol stratejisini kullanmışlardır [6]. Yine Sakamoto vd., rüzgâr tarlalarının çıkış gücündeki dalgalanmayı azaltmak için rüzgâr tarlalarının ortalama çıkış gücüne ve çıkış gücünün standart sapmasına dayanan koordineli bir kontrol stratejisi ve geliştirilmiş prediktif kontrolör ile hatve açısı kontrol yöntemi üzerinde çalışmışlardır [7].

Lescher vd., sistemin doğrusal olmaması ve kontrol nesnelere açılımını dikkate alarak Takagi Sugeno çoklu doğrusal modeline dayanan bir kontrol yapısı yaklaşımı yapmışlardır. Doğrusal kontrolörlerin tasarımında optimal doğrusal kuadratik gausyan (Lineer Quadratic Gaussian-LQG) sentezi kullanmışlardır [8]. Yine Lescher vd., kontrolörün optimizasyonunda doğrusal parametrelerin değişmesine izin veren doğrusal matris eşitsizlik formülasyonu kullanarak, H_2/H_{∞} minimizasyonu ile sistemin mekanik yorgunluğunu azaltmaya çalışmışlardır [9]. Yonggang vd., prediktif kontrolü, vektör regrasyonu ile destekleyerek rüzgâr türbininin hatve açısı kontrolünü iyileştirmeyi önermişlerdir [10]. Hongwei vd., büyük boyutlu rüzgâr türbinlerinin kanat hatve açılarının bireysel kontrolünün hem çıkış gücü kararlılığını hem de kanat titreşimini iyi yönde etkilediğini ifade etmişlerdir [11].

Sakamoto vd., H_{∞} kontrol yöntemi kullanarak rüzgâr türbininin hatve açısını kontrol edip, çıkış gücündeki dalgalanmaları azaltmışlar ve önerdikleri yöntemle PI kontrol yöntemini karşılaştırarak, önerdikleri yöntemin geçerliliğini göstermişlerdir [12]. Guo, rüzgâr türbininden maksimum gücü elde etmek için bir adaptif dekopple kontrolör, çıkış gücünü sabitlemek için de kanat hatve açısı kontrolörü kullanmıştır [13]. Yine Guo, rüzgâr türbininden güç elde etmek ve çıkış gücünü ayarlamak için H_{∞} kontrolör tasarımı tavsiye etmiştir [14]. Kong vd., birkaç MW gibi yüksek güçlü rüzgâr türbinlerinde çıkış gücü kontrolü sağlamada kanat hatve açısının kontrolü için doğrusal olmayan kayma modu kontrol ile bulanık küme teorisini birleştirmeyi önermişlerdir [15]. Zhang vd., rüzgâr türbininin çıkış gücünü ayarlama da bulanık mantık kontrolör üzerinde çalışmışlardır [16].

Amendola ve Gonzaga, rüzgâr türbininden enerji elde etmek için kanat hatve açısını kontrol eden bulanık mantık kontrolör ve jeneratörün hızını kontrol etmek için alan amaçlı bulanık mantık kontrolör kullanmışlardır [17]. Muhandó vd., rüzgâr türbininden maksimum güç elde etme ve jeneratör gücünü sınırlamada kanat hatve açısının kontrolü için LQG, yapay sinir ağı kontrolör ve doğrusal parametre tahmincisinden (Linear Parameter Estimation-LPE) oluşan hibrit bir kontrol sisteminin iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [18]. Yao vd., rüzgâr türbininin hatve açısının kontrolünde adaptif bulanık kayma modlu kontrolör (Adaptive Fuzzy Slide Mode Controller-AFSMC) bulmuşlardır [19]. Camlong, rüzgâr türbininin kanat hatve açısı kontrolünde kutup atamalı sayısal kontrolör tavsiye etmiştir [20]. Zhang vd., rüzgâr türbininin kanat hatve açısı kontrolünde kazançları bulanık kontrolör tarafından ayarlanan Oransal-Türevsel (Proportional-Derivative -PD) kontrolör üzerinde çalışmışlardır [21].

Xingjia vd., rüzgâr türbini kanat hatve açısının kontrolünde kanatlardaki titreşime engel olmak için uzman PID kontrolör ve North filtre kullanmışlardır [22]. Baku vd., iki kontrol yöntemi; (1) hatve açısı değişimi (2) jeneratör alan akımının düzenlenmesi ile 3 kW'lık rüzgâr türbininin performansını iyileştirmeye çalışmışlardır [23]. Ramakrishnan ve Srivatsa, rüzgâr türbini hatve açısı kontrol mekanizmasının hidrolik hareketlendiricisine adım motor yerleştirmeyi teklif etmişlerdir [24]. Takaai vd., hatve açısı kontrol tasarımında standart H_{∞} kontrol

yönteminden daha iyi bir kontrol yöntemi geliştirmeye çalışmışlardır [25]. Musyafa vd., rüzgâr türbininin düşük rüzgâr hızlarında da bulanık mantık kontrolör ile iyi bir performans sağladığını göstermiştir [26]. Jelavic vd., rüzgâr türbininin kanatları ve göbeği üzerindeki periyodik yükü azaltmak için bireysel hatve kontrolünü önermiştir [27].

Jian-jun vd., rüzgâr türbininin kanat hatve açısında bulanık mantık kontrolör kullanmışlardır [28]. Qi ve Liu, kanat hatve açısının kontrolünde bulanık Oransal-İntegral-Türevsel (Proportional-Integral-Derivative-PID) kontrolör kullanımını tavsiye etmişlerdir [29]. Dou vd., hatve açısı kontrolünde bulanık PID kontrol önermişlerdir [30]. Nourdine vd., değişken hızlı yatay eksenli rüzgâr türbininin kanat hatve açısının kontrolünde LQG kontrol metodu üzerinde çalışmışlardır [31]. Jiao ve Wang, yapay sinir ağı (Recurrent Backpropagation Forward-RBF) ile rüzgâr türbini kanat hatve açısının kontrolünde iyi netice verdiğini gözlemlemişlerdir [32]. Ameku ve Uezato, 3 kW'lık küçük rüzgâr türbin sisteminin kanat hatve açısının kontrolünde LQG kontrol metodu önermişlerdir [33]. Kim vd., rüzgâr türbini hatve açısı kontrolünde destekleyici PID kontrol yöntemini tavsiye etmişlerdir [34].

Wenjing ve Hongze, rüzgâr türbini hatve açısı kontrolünde aktif distürbans koruma kontrolü (ADRC) kontrolü üzerinde çalışmışlardır [35]. Anjun vd., büyük boyutlu rüzgâr türbinlerinin kanat hatve açısı kontrolünde uzman PID kontrolörün çalışmasını gözlemlemiştir [36]. Rao ve Laxmi, hatve açısı kontrolünde matris konvertör kullanım yöntemini kullanmışlardır [37]. Bououden vd., çok değişkenli prediktif kontrol (Multivariable Predictive Control-MPC) ve doğrusal matris eşitsizlikleri (Linear Matrix Inequalities-LMI) tasarımlarını birleştirerek, rüzgâr türbini çıkış gücü kontrolünde çok değişkenli prediktif kontrol tabanlı bulanık model yaklaşımını önermişlerdir [38].

Hamane vd., rüzgâr türbininin dinamik performansında klasik PI ve bulanık PI kontrolörleri deneyerek, bulanık PI kontrolörün daha iyi performans gösterdiğini görmüşlerdir [39]. Chen vd., rüzgâr türbininin nominâl rüzgâr hızının altında maksimum güç noktasını takip edebilmesi, nominâl rüzgâr hızının üstünde hatve açısı kontrolü ile güç kararlılığı sağlamak için bulanık mantık ve tekrarlayan yapay

sinir ağı (Recurrent Neural Network-RNN) tabanlı hibrit kontrolör tavsiye etmişlerdir [40]. Hwas ve Katebi, rüzgâr türbini hatve açısı kontrolünde PI kontrolör ve Quadratik kontrolör önermiştir [41].

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tezin kapsamı içine giren konular; başta rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üreten rüzgâr türbinleri ve özellikle hatve açısı değiştirilebilen, jeneratör rotor hızı değişken olan rüzgâr türbinleridir. Ayrıca, bu rüzgâr türbinlerinde kullanılan jeneratörler ve hatve açısını değiştirmek için faydalanılan elektrikli hareketlendiriciler de bu tezin kapsamı içinde düşünülmüştür. Çünkü bu hareketlendiricilerin çalışma şekilleri ve transfer fonksiyonları kontrol işleminin bir parçası olup, incelenmeye geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Ayrıca sistemlerin kontrolü için önerilmiş başta klasik PID kontrol yöntemleri, modern kontrol yöntemlerinden bulanık mantık kontrol yöntemi ve her iki kontrol yönteminin birleştirilmesi ile elde edilen bulanık PID kontrol yöntemi bu tezin kapsamı içinde bulunmaktadır.

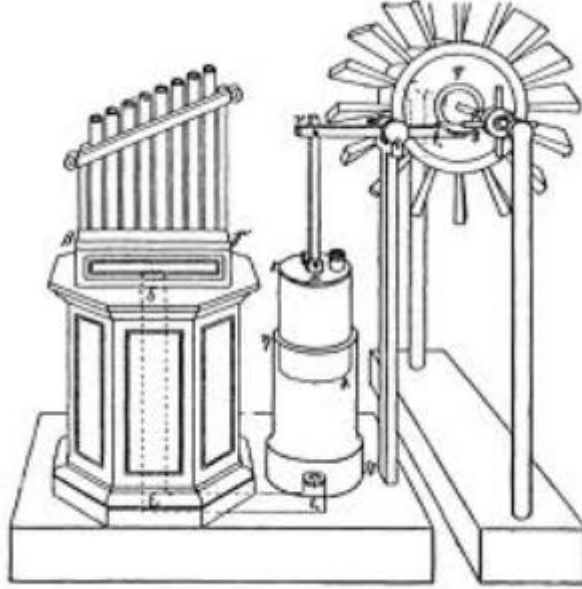
1.3. Tezin Amacı

Bu tezin amacı öncelikli olarak değişken hızlı ve değişken hatve açılı rüzgâr türbinlerinin, rüzgâr hızı ve çıkış gücü arasındaki ilişkiyi inceleyerek, çıkış gücü kalitesinin iyileştirilmesi için çeşitli kontrol mekanizmalarının tatbikini ve analizini sağlamaktır. Hatve açısındaki değişimin çıkış gücü üzerindeki etkisini araştırarak, hem geleneksel kontrol mekanizmaları ile hem de modern kontrol mekanizmaları ile hatve açısı kontrolü sağlayarak daha kararlı ve kaliteli bir çıkış gücü elde etmektir. Rüzgâr türbininin nominâl rüzgâr hızı üzerindeki çalışma bölgesini kontrol mekanizmaları yardımı ile kontrol ederek optimum çıkış gücünü elde etmeye çalışmaktır.

2. MATERYAL

2.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi

İnsanlar rüzgârlara yelken açtığından beri rüzgâr enerjisi kullanıla gelmiştir. İnsanların yelkenli gemileri hareket ettirmek için 5500 yıldan beri rüzgâr gücünden faydalandığı bilinmektedir. Rüzgâr enerjisi ile çalışan makineler tahıl öğütmüş ve su pompalamışlardır. Şekil 2.1’de rüzgar enerjisiyle çalışan bir değirmenin temsili resmi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Rüzgâr enerjisiyle çalışan bir değirmenin temsili resmi

Yel değirmenlerinin ortaya çıkması ise çok daha sonra olmuştur. Dairesel hareketli yel değirmenlerinden yararlanma ilk defa Orta ve Doğu Asya toplumlarında görülmüştür. İlk rüzgâr değirmeninin MÖ 200 yıllarında antik Bağdat’ta inşa edilmiş olduğu sanılmaktadır. Türkler ve İranlılar ilk yel değirmenlerini MS 7. yüzyılda

kullanmışlardır. İnan'da bulunan yel değirmenleri Haçlı seferleri ile batıya taşınmıştır.

MS 10. yüzyıla kadar Doğu İnan ve Afganistan'da rüzgâr yakalama kanatları ve rüzgâr değirmenlerinde tahıl öğütüldüğü bilinmektedir (Şekil 2.1).

Batı dünyası rüzgâr değirmenlerini 12. yüzyılda kullanmaya başlamıştır. Buhar makinasının icad edilmesiyle birlikte, kömür odun gibi yakıtlardan sürekli enerji üretim imkânı rüzgâr enerji üretimini ikinci planda bırakmıştır. 18. yüzyılın sonunda Hollanda'da 10 bin yel değirmeni bulunuyordu. Rüzgâr türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler 1890'ların başlarında Danimarka'da yapılmıştır.

Rüzgâr enerjisinden elektrik elde etme işlemi ilk olarak Danimarkalı meteorolojist Poul la Cour tarafından gerçekleştirildiği bilinmektedir. Poul la Cour, 1897 yılında 89 W gücünde elektrik üretim amaçlı bir rüzgâr türbini yapmıştır. Johannes Joule, 1950 yılında ilk alternatif akım (AC) ile çalışan rüzgâr türbinini geliştirmiştir. 1956 yılında 200 kW kurulu gücünde Gedser rüzgâr türbini Danimarka'nın güneyinde çalışmaya başlamıştır. Modern rüzgâr türbinlerinin öncüsü niteliğindeki bu rüzgâr türbini, elektromekanik dönüş sistemine ve asenkron jeneratöre sahiptir [42].

Aynı dönemde, bu makinaların geliştirilmesi için Almanya'da da önemli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Ancak 19. yüzyılda geliştirilen ilk türbinlerin verimleri düşüktü. Almanya,1961-1966 yılları arasında kanat uzunluğu 35m olan 100kW'lık bir rüzgâr türbin modeli üzerinde çalışmıştır. 1970'lerde Danimarka da gücü 650 kW olan türbinler kurulmuştur. Bu yıllarda İsviçre, Avusturya ve İtalya gibi ülkelerde rüzgâr türbinlerini geliştirmek için çalışmalar yapılmıştır [43].

Çok pervaneli yel değirmenlerinin kullanımı 19. yüzyılın ikinci yarısında ABD'de görülmeye başlamıştır. 19. yüzyılın sonunda ABD'de yüze yakın rüzgâr değirmeni fabrikası vardı ve rüzgâr değirmeni ihracatı ABD ekonomisi için büyük bir kaynaktı.

Dizel motorlar icad edilene kadar, ABD'deki büyük demir yolları çok pervaneli yel değirmenlerini kullanmışlardır. Petrol kullanımı yaygınlaşınca kadar, buhar lokomotifleri için su pompalama işlemi yel değirmenleri ile gerçekleştirilmiştir [42].

20. yüzyılın başlarında ABD'de binlerce, elektrik üreten rüzgâr türbini imal edilmiştir. Bu türbinler rüzgârdan elde ettikleri dönme hareketini dişli çarklar vasıtasıyla yüksek devirli dönme hareketine çeviriyorlardı. Bu dönme hareketi elektrik jeneratörüne iletilip elektrik enerjisi üretiliyordu. Türbinlerin iki veya üç tane kanatları olurdu. Bu türbinler elektrik hatlarının ulaşamadığı ve enerji ihtiyacı olan birçok yerleşim bölgesinde ve işletmelerde kullanılmıştır. Bunlarla çiftliklere enerji sağlanmış, radyo alıcıları çalıştırılmış, aydınlatma vb. işler yapılmıştır [43].

Daha sonraları ki, bu 1950'li yılların başlarına tekabül eder, elektrik şebeke hatları yaygınlaşmaya başlamış ve elektrik üretimini ve kullanımını düzenleyen kanunlar çıkarılmış, bunun neticesinde rüzgâr türbinleri bir miktar duraksama dönemine girmiştir [42].

1973 yılında OPEC petrol ambargosu uyguladıktan sonra enerji fiyatları artmaya başlamıştır. Bu durum petrol enerji kaynağının sınırlı olduğunu insanlara tekrar hatırlatmış ve diğer enerji kaynaklarından istifade etmek için bir gayret uyandırmıştır. Bu gayretin neticesinde, rüzgâr enerji sistemleri tekrar gündeme gelmiştir. 1980'li yılların başlarında enerji üretimi için rüzgâr tarlaları oluşturulmaya başlanmıştır. Birçok ülkelerin katkılarıyla deniz üstlerinde ve karalarda yüksek güçlü rüzgâr tarlaları oluşturulmuştur [43].

2.2. Rüzgâr Türleri

Yer kürenin hava tabakalarından olan troposferde rüzgâr gücü ve yönü belirlenir. Dinamik hava hareketlerinin hepsi bu tabaka içinde oluşur. Bu tabaka içinde değişik kaynaklarla rüzgâr oluşur. Bu kaynaklar; küresel, bölgesel ve yerel olarak üçe ayrılır. Küresel rüzgârın gücünü ve hızını, dünyanın dönme yönü, dünyanın dönme hızı ve Coriolis bükme kuvveti belirlemektedir. Buna göre rüzgâr türleri şu şekilde sınıflandırılabilir:

Küresel Rüzgârlar: Dünyanın 1 km yüksekliği ile Troposferin en dış halkası arasında kalan bölgede esen rüzgârlardır [44].

Yüzey Rüzgârları: Bunlar yerden yüksekliği 100 m'nin altında olan bölgelerde esen rüzgârlardır. Bu rüzgârlar coğrafi yapıdan etkilendiğinden dolayı, yeryüzündeki engeller bu rüzgârları yavaşlatır ve rüzgârın yönünün değişmesine sebep olur [45].

Deniz ve Kara Rüzgârları (Meltemler): Denizlerin ve karaların, ısınma ve soğuma karakteristiklerinden dolayı kıyı meltemleri oluşur. Denizler karalara göre daha geç ısındığından, ısınan hava yükselir, böylece alçak basınç merkezi oluşur. Karalar ısındığında denizler henüz ısınmamış olacağından denizlerde yüksek basınç oluşur. Bu olayın neticesinde gündüzleri denizden karaya doğru, geceleri karadan denize doğru rüzgârlar eser. Sıcak hava hafif olup yükselme, soğuk hava ağır olup çökme özelliklerinden dolayı, yeryüzündeki birçok farklı yükseklikteki coğrafi bölgeler arasında, gece gündüz sıcaklık farkından dolayı rüzgârlar oluşmaktadır [46].

2.3. Rüzgâra Sebep Olan Etkenler

Rüzgâra sebep olan ve rüzgârın hızını etkileyen atmosfer içindeki bazı kuvvetler vardır. Bunlar kısaca şunlardır:

2.3.1. Gradyan Kuvveti

Havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket ettiren kuvvete gradyan kuvveti denir [44]. Gradyan kuvveti Eşitlik 2.1'deki gibi ifade edilir.

$$G = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{h} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'de, G basınç kuvveti (atm), ρ hava yoğunluğu (kg/m^3), ΔP izobarlar arası basınç farkı, h izobarlar arası uzunluk (m) olarak ifade edilmektedir.

2.3.2. Coriolis Kuvveti

Coriolis kuvveti yer dönmesinin saptırıcı kuvvetidir. İki grupta incelenebilir. Birinci yer dönmesi saptırıcı kuvveti enlem dereceleri boyunca meydana gelir ikinci yer dönmesi saptırıcı kuvveti ekvator dan kutuplara doğru veya ters yönde meydana gelir [44].

2.3.3. Merkezkaç Kuvveti

Rüzgârın girdap hareketi esnasında rüzgârın yönü ve hızı üzerinde merkez kaç kuvvetinin etkisi olur. Basınç alanında basınç eğrileri ne kadar yuvarlak ise havanın girdap hareketi o kadar hızlı merkez kaç etkisi de o oranda fazla olur. İzobar eğrilerinin düzleşmesiyle bu etki azalır [47]. Merkezkaç kuvveti Eşitlik 2.2’de ifade edilmiştir.

$$a = \frac{V^2}{R} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de, a merkezkaç kuvvetin birim kütleye etki eden ivmesi (m/sn^2), V rüzgârın hızı (m/sn), R rüzgârın döner yarıçapı (m) olarak ifade edilir.

2.3.4. Sürtünme Kuvveti

Rüzgârın yeryüzüne sürtünmesinden dolayı oluşur, bu sebeple rüzgâr hızı yavaşlar. Sürtünme kuvveti yere yaklaştıkça değeri yükselir. Sürtünmenin etkisinde olup olmamasına göre rüzgârlar iki gruba ayrılır: Bunlar yüksek seviye ve yeryüzü rüzgârlarıdır. Yüksek seviye rüzgârlarını sürtünme kuvveti etkilemez. Yeryüzü rüzgârları ise sürtünme kuvvetinin etkisi altındadır [44].

2.4. Rüzgârın Hızı ve Yönü

Rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılmak üzere gerekli olan meteorolojik büyüklükleri ölçebilecek sensörler vardır. Bunlar; anemometre, yön sensörü, sıcaklık sensörü, basınç sensörü ve nem sensörüdür [48]. Rüzgârın hızı ve yönü ölçüm direkleri vasıtasıyla ölçülür. Ölçüm direklerinde rüzgârın hızını, rüzgârın yönünü, havanın

sıcaklığını, nemini ve basıncını ölçebilecek sensörler bulunur. Rüzgârın hızını ölçmek için anemometre kullanılır. Gelişmiş anemometreler rüzgârın hızı yanında, rüzgârın yönünü de belirleyebilmektedirler [49].

2.5. Rüzgâr Enerji Sistemlerinde Yaygın Olarak Kullanılan Kavramlar

2.5.1. Hava Yoğunluğu

Rüzgâr gücü hava yoğunluğu ile doğrusal olarak değişir. 15 °C sıcaklıkta ve 1 atm basınçta hava yoğunluğu 1.225 kg/m³ dür [50]. İdeal gaz kanunu Eşitlik 2.3’de gösterilmiştir.

$$P.V = n.R.T \quad (2.3)$$

Bu eşitlikde P mutlak basınç (atm), $R = 8,2056.10^{-5} m^3.atm/K.mol$ ideal gaz sabiti, V hacim (m³), n kütle (mol), T kelvin cinsinden mutlak sıcaklık, n ifadesi yerine havanın moleküler ağırlığı mw=28,98 (g/mol) yazılacak olursa, Eşitlik 2.4 şeklinde ifade edilebilir.

$$\rho(kg/m^3) = \frac{n(mol).mw(g/mol).10^{-3}(kg/g)}{V(m^3)} \quad (2.4)$$

Daha genel hâliyle hava yoğunluğu Eşitlik 2.5’de verilmiştir.

$$\rho = \frac{P.mw.10^{-3}}{R.T} \quad (2.5)$$

2.5.2. Rotorun Süpürdüğü Alan

Rüzgâr türbininin ürettiği mekanik güç rotor kanatlarının süpürdüğü alan ile doğru orantılıdır. Yatay eksenli türbin için, rotorun süpürdüğü alan Eşitlik 2.6’da gösterilmiştir. Burada R metre cinsinden kanat yarıçapıdır[51].

$$A = \pi R^2 \quad (2.6)$$

2.5.3. Rüzgârdan Elde Edilebilecek Teorik Güç

Rüzgâr türbininden elde edilecek mekanik güç ile rüzgâr hızı arasındaki bağıntıyı rüzgâr türbininin dinamik güç modelinden çıkarabiliriz. Üretilen mekanik gücün, rüzgâr hızının küpü, kanat çapı ve hava yoğunluğu ile doğru orantılı olduğunu görüyoruz[50]. Mekanik güç Eşitlik 2.7’de gösterilmiştir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p V^3 \quad (2.7)$$

Sürtünme ve diğer kayıplar bu teorik gücü sınırlandırmaktadır. Betz kanunu rüzgârdan alınabilecek maksimum gücün; rüzgâr gücünün 0,593 kadarı olduğunu ifade eder[52]. Rüzgârdan elde edilebilecek tork Eşitlik 2.8’de ifade edilmiştir.

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_w} \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik 2.8’de T_w rüzgârdan elde edilen mekanik tork, P_w rüzgârdan elde edilen mekanik güç, ω_w rüzgâr türbininin rotorunun açısal hızıdır.

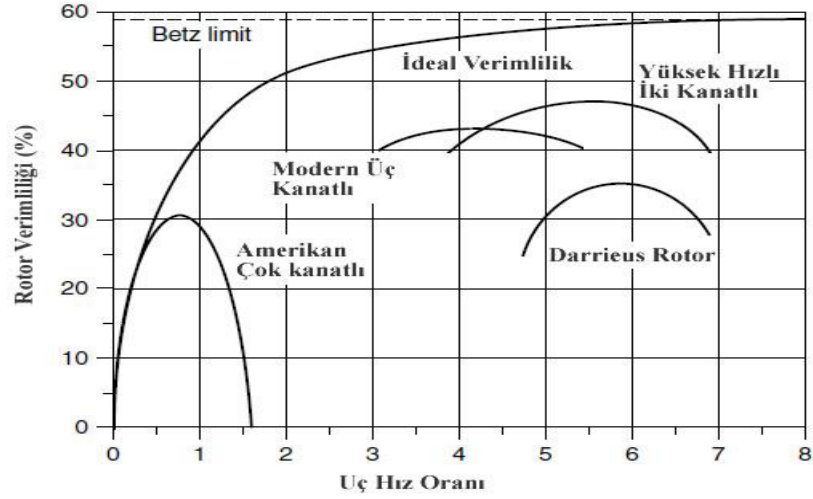
2.5.4. Kanat Hız Oranı

Kanat hız oranı λ (Eşitlik 2.9), rotor açısal hızının $\omega \cdot R$, rüzgâr hızına V oranıdır [52]. Bu büyüklük rüzgâr türbininin performansını belirlemede önemli bir kriterdir.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (2.9)$$

Açısal hız devir olarak ifade edilirse Eşitlik 2.10’daki gibi olur.

$$\omega = \frac{2\pi N_w}{60} \quad (2.10)$$



Şekil 2.2. Kanat hız oranına göre rotor verimliliği

Farklı rotor tiplerinin rotor verimliliği Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekil 2.2’ye göre modern üç kanatlı ve yüksek hızlı iki kanatlı rotor tiplerinin daha yüksek verimle çalıştığı görülmektedir. Amerikan çok kanatlı rotor tipi düşük kanat hız oranları için daha verimli olduğu Şekil 2.2’den anlaşılmaktadır.

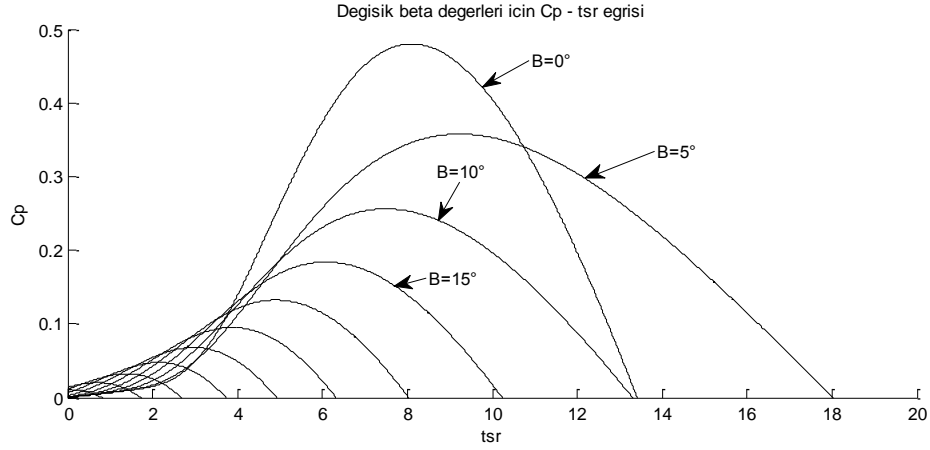
2.5.5. Güç Performans Katsayısı

C_p ile ifade edilen güç katsayısı kanat açısı β ve kanat uç hız oranı λ ‘nın doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Ve Eşitlik 2.11 ve 2.12’deki gibi ifade edilir.

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.12)$$

Şekil 2.3 değişik β açısı değerleri için güç katsayısı C_p ’nin λ ile nasıl değiştiğini göstermektedir.



Şekil 2.3. Değişik β açısı değerleri için C_p - λ eğrisi

Rotoru süren aerodinamik tork Eşitlik 2.13 ve 2.14'de ifade edilmiştir.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2.13)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \frac{C_p(\beta, \lambda)}{\lambda} \quad (2.14)$$

$C_p(\beta, \lambda)$ ve λ arasındaki oran yeni bir birimsiz parametredir ve tork katsayısı olarak bilinir(Eşitlik 2.15) [35].

$$C_Q(\beta, \lambda) = \frac{C_p(\beta, \lambda)}{\lambda} \quad [54] \quad (2.15)$$

2.6. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbini, hareket eden havaya karşı koyan kanatların enerjisi toplamasıyla çalışan bir sistemdir. Havanın aerodinamik kaldırma ve sürüklenme kuvveti kullanılarak rüzgârdan enerji elde edilir. Yüksek hızlı rüzgâr türbinlerinde, kanatlar kaldırma kuvvetiyle hareket eder ve kanatların hızı çoğu zaman rüzgâr hızından fazladır. Düşük hızlı rüzgâr türbinlerinde ise sürüklenme kuvveti kullanılır ve türbin

hızı rüzgâr hızını geçemez. Rüzgâr türbinleri sınıflandırılırken yatay ve dikey eksenli olmak üzere ikiye ayrılırlar [45]. Şekil 2.4’de eski bir rüzgâr türbini gösterilmektedir.

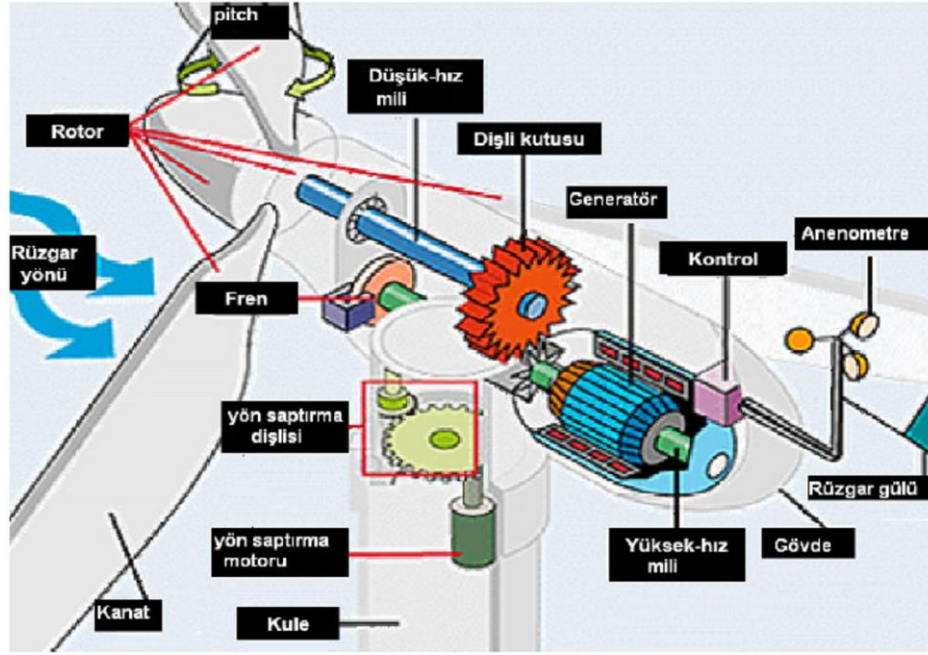


Şekil 2.4. Eski bir rüzgâr türbini

Modern rüzgâr türbinleri 2 veya 3 kanatlıdır. Türbin kanat çapları 30-50 metre civarındadır. Türbin ömürleri ortalama 20 yıldır. Rüzgâr türbininin en ekonomik olanlarının çıkış güçleri 10-30 MW arasındadır. Birden fazla rüzgâr türbini varsa, aralarındaki mesafe yaklaşık 150-300 metre civarında olmalıdır. Türbinler arasındaki mesafeden dolayı arazi başka maksatlar için mesela hayvancılık, tarımcılık gibi kullanılabilir. Rüzgâr hızı yükseklikle doğru orantılı olduğundan, rüzgâr türbin kulesinin yüksekliği arttıkça daha yüksek hızlı rüzgârlar elde edilir. Daha yüksek hızlı rüzgârlar ise daha fazla güç demektir. Türbin gücünün artması ile maliyet azalır. Rüzgâr türbinlerini denizlerin, okyanusların veya göllerin üzerine kurmak mümkündür [54].

2.6.1. Rüzgâr Türbininin Yapısı

Türbinler tasarımlarına göre farklı parçalardan oluşabilir. Fakat her türbinde ortak olan bazı elemanlar vardır [55]. Şekil 2.5’de bir rüzgâr türbininin temel parçaları gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Rüzgâr türbini bileşenleri

Gövde: Rüzgâr türbininin kanatları vasıtasıyla elde edilen rüzgâr enerjisinin mekanik donanım yardımıyla elektrik enerjisine çevrildiği bölümdür.

Kanatlar: Rüzgâr türbininin kanatları rüzgâr gücünü mekanik güce çevirir ve rüzgâr türbininin en önemli parçalarından biridir. Rüzgârdan elde edilebilecek gücü kanat sayısı ve kanat aerodinamiği belirler.

Dişli Kutusu: Rüzgâr türbininin önemli elemanlarından biridir. Kanatlar ile jeneratör arasında bulunur. Düşük olan kanat şaft hızını yükselterek, jeneratörün çalışma hızına çıkarır.

Düşük Hızlı Mil: Kanatların rüzgârdan aldığı mekanik enerjiyi aktardığı mildir.

Yüksek Hızlı Mil: Dişli kutusu vasıtasıyla yükseltelen devir sayısının jeneratöre aktarıldığı mildir.

Elektrik Jeneratörü: Dönme hareketini elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlarlar. Rüzgâr türbinlerinde genelde üç çeşit jeneratör kullanılır; doğru akım jeneratörü, senkron jeneratör ve asenkron jeneratör.

Elektronik Kontrolör: Rüzgâr türbininin çeşitli kısımlarını elektronik kontrol algoritmalarıyla kontrol eden bir kısımdır.

Kule: Rüzgâr türbinini taşır. Değişik yüksekliklerde olabilir.

Yön Saptırma Mekanizması: Rüzgâr türbinini rüzgâr yönüne çevirerek daha fazla güç elde etmeyi sağlar.

Anemometre: Rüzgâr hızını ve yönünü ölçer. Aldığı bilgileri elektronik kontrol birimine iletir.

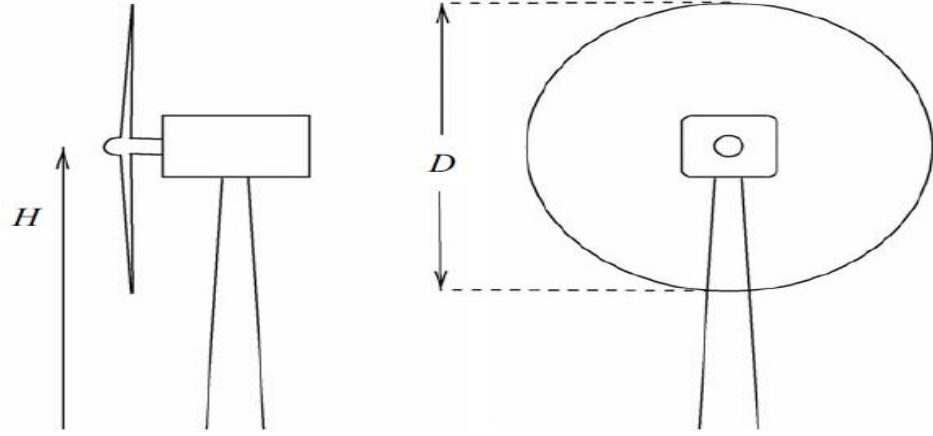
Kanat Hareketlendirici: Kanatların, kendi etrafında dönüşünü sağlayan bir mekanizmadır.

2.6.2. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri, türbin jeneratör konfigrasyonuna, türbin rotoruna bağlı olarak hava akış yoluna, türbin kapasitesine, jeneratör sürme modeline, güç kaynağı moduna ve türbinin yerleştirildiği bölgeye göre sınıflara ayrılabilir.

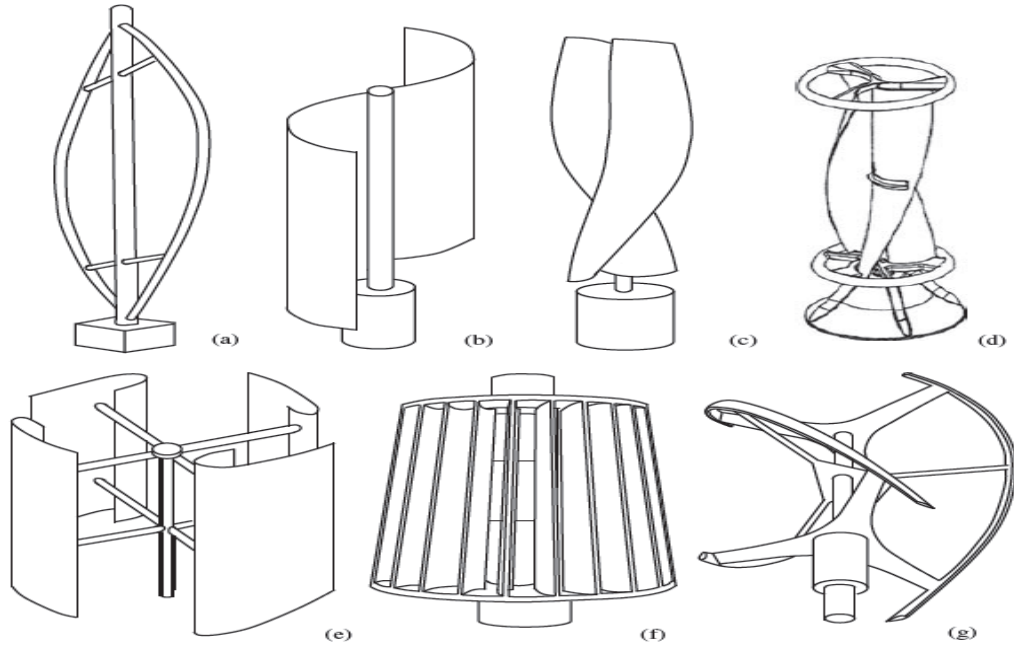
2.6.2.1. Yatay ve Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbininin rotor kanatlarının döndüğü eksen dikkate alındığında modern rüzgâr türbinleri; yatay eksenli ve dikey eksenli olarak sınıflara ayrılır. Birçok ticari rüzgâr türbini yatay eksenli tiptedir ve kanatların dönüş eksenini rüzgâr akımına paraleldir. Bu tipteki rüzgâr türbinlerinin avantajları; yüksek türbin verimi, yüksek güç yoğunluğu, düşük devreye girme rüzgâr hızı ve birim çıkış gücündeki düşük maliyettir. Şekil 2.6'da yatay eksenli bir rüzgâr türbini gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

Şekil 2.7’de dikey eksenli rüzgâr türbinlerinden bazıları gösterilmektedir. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin kanatları yere dik olan eksenlerine uygun olarak döner. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin en büyük avantajı her yönden gelen rüzgârı kabul edebilmesi ve yaw(rüzgarın yönüne göre rotorun yönünü değiştiren sistem) kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymamasıdır. Rüzgâr jeneratörü, dişli kutusu ve diğer ana türbin elemanları yerin üzerine kurulabilir. Bu durum rüzgâr kulesi tasarım ve kurulumunu büyük oranda basitleştirir ve türbin maliyetini düşürür. Bununla birlikte dikey eksenli rüzgâr türbinleri başlangıçta kanatları döndürmek için harici bir enerji kaynağı kullanmak zorundadır. Çünkü rüzgâr türbininin eksenini sadece bir noktadan yere desteklidir ve maksimum yüksekliği bununla sınırlıdır. Daha düşük rüzgâr gücü verimine sahip olduğundan dolayı günümüzde dikey eksenli rüzgâr türbinleri, kurulan rüzgâr türbinlerinin çok az bir yüzdesini teşkil etmektedir.



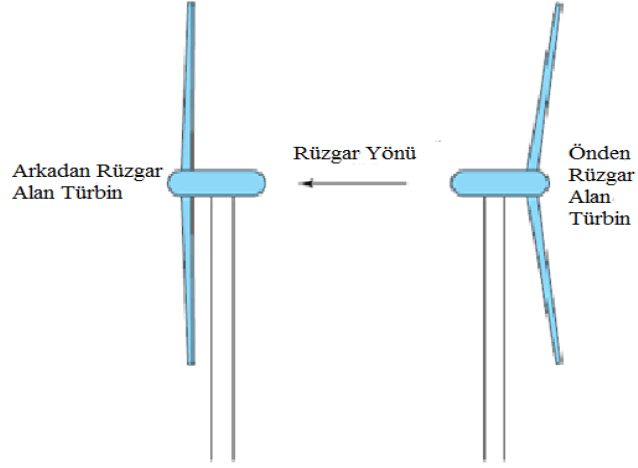
Şekil 2.7. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (a)Darrius (b)Savanius (c)Solarwind[56] (d)Helical[57] (e)Noguchi[58] (f)Maglev[59] (g)Cochrane[60]

2.6.2.2. Önden ve Arkadan Rüzgâr Alan Türbinler

Rüzgâr rotorunun yerleşimine bağlı olarak rüzgârın akış yönüne göre yatay eksenli rüzgâr türbinleri rüzgârı arkadan almasına ve önden almasına göre sınıflandırılır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri günümüzde en çok rüzgârı önden alacak şekilde kullanılmaktadır. Rüzgâr rotorunun yüzü rüzgâra doğrudur. Önden alan tasarımın en büyük avantajı; rüzgâr kuleyi ve naseli geçerken rüzgâr akışı alanı distorsiyonundan korunmasıdır.

Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinlerinde rüzgâr önce nasel ve kuleden geçer sonra rotor kanatlarından geçer. Bu tasarımda rotor kanatlarının kuleye vurma riski olmadığından kanatlar çok esnek yapıda imal edilebilir. Bununla beraber nasel ve kule arkasında hava akımında kararsız titreşimlere sebep olduğundan üretilen rüzgâr çıkış gücünde büyük oranda dalgalanmalar meydana gelir. Buna ek olarak kararsız hava akış alanı daha fazla aerodinamik kayıplara sebep olup türbine daha fazla yük

getirir. Arkadan rüzgâr alan türbinler daha fazla darbe ve gürültüye sahiptir. Şekil 2.8’de rüzgâr alış yönüne göre rüzgâr türbinleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Rüzgârı önden ve arkadan alan rüzgâr türbinleri [61]

2.6.2.3. Rüzgâr Türbini Kapasitesi

Rüzgâr türbinleri kapasitelerine göre mikro, küçük, orta, büyük ve çok büyük olarak kategorize edilebilir. Rüzgâr türbinlerinin nominâl gücü birkaç kilowatt'ın altında ise mikro rüzgâr türbini olarak değerlendirilir [62]. Mikro rüzgâr türbini özellikle elektrik şebekesinin olmadığı yerlerde uygundur. Cadde aydınlatması, su pompalama işlerinde, gelişen ülkelerin merkezden uzak bölgelerinde kullanılabilir. Çünkü mikro rüzgâr türbini düşük devreye girme hızına sahiptir ve orta derecedeki rüzgâr hızlarında çalışabilirler.

Çıkış gücü 100 kW'ın altında olan rüzgâr türbinleri küçük rüzgâr türbinleri olarak adlandırılır [63]. Küçük rüzgâr türbinleri genellikle yerleşim yerleri, çiftlikler, su pompalama istasyonları, haberleşme birimleri gibi bireysel uygulamalarda kullanılabilir.

En çok kullanılan rüzgâr türbinleri orta büyüklüktekilerdir ve güç bölgesi 100 kW'la 1MW arasındadır. Bu rüzgâr türbinleri şebekeye bağlı yada şebekeden bağımsız olarak köylerde, hibrid sistemlerde, güç dağıtımlarında kullanılırlar.

10 MW'a kadar olan rüzgâr türbinleri büyük rüzgâr türbinleridir. Son zamanlarda uluslararası rüzgâr marketlerinde çoklu megawatt rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır.

Çok büyük rüzgâr türbinleri gücü 10 MW'ın üstündedir. Bunlar henüz araştırma ve geliştirme safhasındadırlar.

2.6.2.4. Doğrudan ve Dişlilerle Sürülen Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr jeneratör sisteminin sürülme durumuna bağlı olarak rüzgâr türbinleri doğrudan sürülen ve dişlilerle sürülen olarak sınıflandırılır. Daha yüksek güçler elde etmek için jeneratör rotorunun dönüş hızını arttırmada dişliler kullanılır. Çok katmanlı dişli kutularıyla düşük hızlı kanat rotoru yüksek hızlı jeneratör rotoruna çevrilir. Dişli jeneratör sistemlerinin avantajı daha düşük maliyet, daha küçük boyut ve ağırlıktır. Bununla birlikte dişli kutusunun kullanımı rüzgâr türbinlerinin dayanıklılığını büyük ölçüde azaltır, türbin gürültü seviyesinin ve mekanik yüklerin artmasına sebep olur. Jeneratör sisteminden dişli kutusu çıkarılıp, jeneratör shaftı doğrudan kanat rotoruna bağlanır. Bu doğrudan sürülme, enerji verimliliği, dayanıklılık ve tasarım basitliği açısından çok daha üstündür.

2.6.2.5. Şebekeye Bağımlı ve Şebekeden Bağımsız Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız uygulamalarda kullanılabilir. Birçok orta ve büyük ölçekli rüzgâr türbinleri şebekeye bağlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Şebekeye bağlı olmanın en büyük avantajı enerji depolama probleminin olmamasıdır. Evlerde, çiftliklerde, haberleşme birimlerinde ve diğer uygulamalarda kullanılan birçok küçük ölçekli rüzgâr türbinleri şebekeden bağımsız çalışmaktadır. Şebekeye bağlı olmayan rüzgâr türbinlerinde üretilen enerji kesik kesik ve aralıklı olacaktır. Bundan dolayı bu tarzdaki rüzgâr türbinleri güç üretimindeki kararlılığı iyileştirmek için genellikle batarya grubları, dizel jeneratörler veya fotovoltaik sistemlerle birlikte bağlanır.

2.6.2.6. Deniz Kıyısı ve Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri

Deniz kıyısı rüzgâr türbinleri gelişiminde uzun bir tarihe sahiptir. Deniz kıyısı türbinlerinin birçok avantajları vardır. Bunlar; tesis maliyetlerinin daha düşük oluşu, elektrik şebekesine daha kolay bağlanması, kule inşasının ve türbin kurulumunun daha düşük maliyetli olması, çalışma ve tamir imkânlarının daha uygun olmasıdır.



Şekil 2.9. Bir Açık Deniz Rüzgâr Türbini [64]

Şekil 2.9’da bir açık deniz rüzgâr türbini, Şekil 2.10’da açık deniz rüzgâr türbin tarlası gösterilmektedir. Açık deniz rüzgâr türbinleri, açık deniz rüzgâr kaynaklarının üstün olmasından dolayı 1990’dan beri deniz kıyısı rüzgâr türbinlere göre daha hızlı gelişmiştir. Açık denizlerde rüzgâr daha yoğun ve sürekli. Açık denizde kurulan bir rüzgâr türbini, deniz kıyısında kurulan aynı türbine göre daha yüksek güç üretir ve yıllık çalışma saati daha fazladır. Bununla beraber açık deniz rüzgâr türbinlerinde çevresel kısıtlamalar deniz kıyısı rüzgâr türbinlere göre daha azdır. Mesela türbin gürültüsü açık deniz rüzgâr türbinlerinde bir problem teşkil etmez [65].



Şekil 2.10. Bir Açık Deniz Rüzgâr Türbin Tarlası [64]

2.6.3. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler

Rüzgâr türbinlerinde üretilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için değişik tip, yapı ve boyutlarda jeneratörler kullanılmaktadır. Bunlar kısaca;

- 1- Doğru akım jeneratörleri,
 - 2- Senkron jeneratörler,
 - 3- Asenkron jeneratörler,
- olmak üzere başlıca 3 bölüme ayrılır.

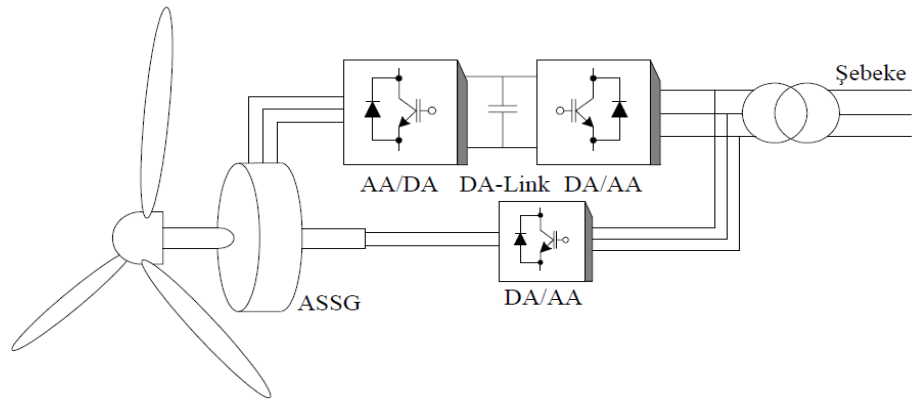
2.6.3.1. Doğru Akım Jeneratörleri

Doğru akım jeneratörlerinin güvenilirliğinin düşük olması ve bakım gereksinimi gibi dezavantajları vardır. Fakat bunlarla birlikte hız kontrollerinin kolay olması endüstrideki kullanımını arttırmıştır. Bu jeneratörler genellikle küçük kapasiteli rüzgâr türbinlerinde tercih edilir. Doğru akım makinalarındaki komütatörlerin mekaniksel temasları istenmeyen bir durum olduğundan mekanik komütatör ihtiyacı olmayan daimi mıknatıslı doğru akım makinaları tasarlanmıştır. Fırçasız doğru akım makinaları olarak adlandırılan bu makinalarda daimi mıknatıslar bulunmaktadır. Bu makinalar daimi mıknatısların kapasitelerine göre küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde

kullanılmaktadır. Bu sistemde üretilen akım yarıiletken doğrultucularla çevrilir ve sisteme faydalı şekle getirilir [66].

2.6.3.2. Senkron Jeneratörler

Senkron jeneratörü; üç fazlı sargılardan oluşan bir stator ve manyetik alan oluşturan bir rotor teşkil eder. Rotordaki manyetik alanın sebebi; ya daimi mıknatıslar yada sargılardaki doğru akımdır. Senkron jeneratörlerin yapısı sabit hızlı rüzgâr türbinleri için daha uygundur. Bu jeneratörler sabit hıza bağlı olarak sabit frekansda çalışırlar. Rüzgâr türbinlerinde iki tip senkron jeneratör kullanılır; (1) Alan sargılı (2) Daimi mıknatıslı [66,67].



Şekil 2.11. Alan sargılı senkron jeneratör

Alan sargılı senkron jeneratörlerin (ASSG) şebekeye bağlanmasında dört bölge bir güç konvertörü kullanılır. Bu konvertör dalga genişlik modülasyonu (PWM) ile anahtarlayan, çift yönlü akım akışına uygun gerilim kaynaklı iki invertörden oluşur. Şekil 2.11 'de devre şeması gösterilmiştir. Stator tarafındaki konvertör elektromanyetik torku kontrol ederken, şebeke tarafındaki konvertörde aktif ve reaktif gücü kontrol eder [67,68].

ASSG'nin başlıca avantajları şunlardır:

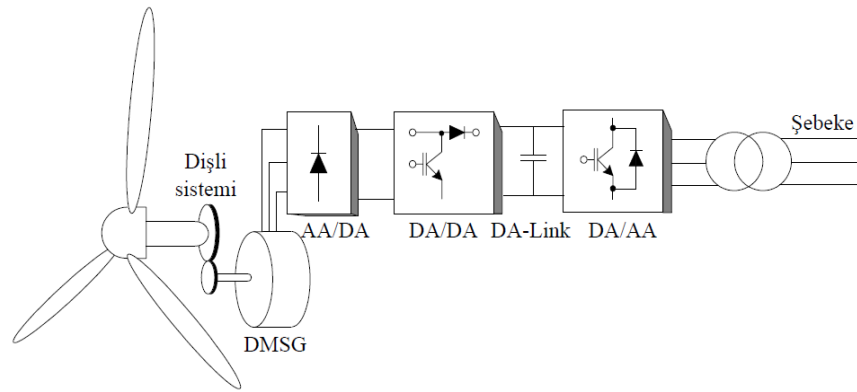
1- Elektromanyetik tork üretiminde stator akımının tamamı kullanılır. Bundan dolayı verim yüksektir.

2- Makinanın güç faktörünün kontrolüne izin verdiği için stator akımı birçok durumda minimize edilebilir.

3- Kutup eğimi küçüktür. Dişli kutusu aradan çıkarılarak düşük hızlı çok kutuplu makinalar yapılabilir.

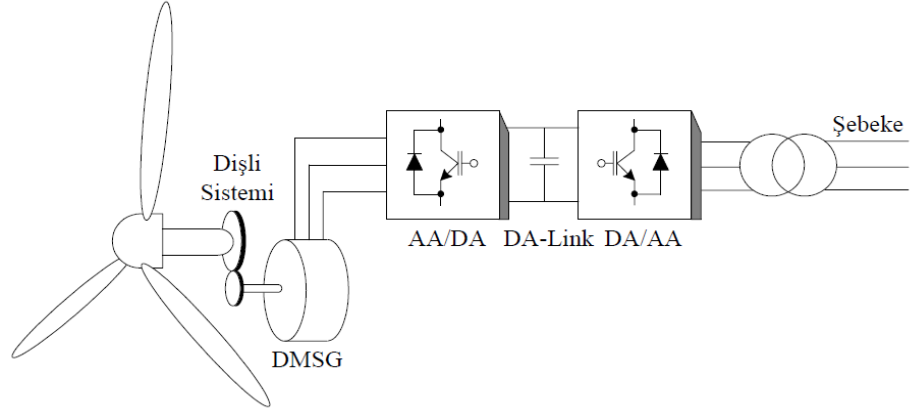
Bu makinaların motorlarında sargı devresinin bulunmaması, daimi mıknatıslı senkron jeneratörlere (DMSG) göre bir dezavantajdır. Üretilen gücü regüle etmek için nominâl rüzgâr gücünün 1,2 katı büyüklüğünde konvertörler kullanılması ise başka bir dezavantajdır [67].

2.6.3.3. Daimi Mıknatıslı Senkron Jeneratör



Şekil 2.12. Daimi mıknatıslı senkron jeneratör

Şekil 2.12 'de daimi mıknatıslı senkron jeneratöre (DMSG) ait rüzgâr güç sistemi verilmiştir. Sistemin üç fazlı doğrultucuyu takip eden yükseltici DA-DA kısıyıcı ile bağlantısı sağlanmıştır. DA-DA kısıyıcı elektromanyetik torku kontrol etmektedir. DA/AA konvertör güç faktörünü kontrol etmekte ve aynı zamanda DA link gerilimini regüle etmektedir. Bu yapı küçük güçlü rüzgâr güç sistemlerinde daha çok uygulanmaktadır [67,69].



Şekil 2.13. Daimi mıknatıslı senkron jeneratörün farklı bir yapısı

Şekil 2.13’de DMSG güç sisteminin farklı bir yapısı görülmektedir. Bu sistemde jeneratör ve DA linki arasına doğrultucu yerleştirilmiştir. PWM tekniğini kullanan bu doğrultucu invertör üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Bu sistemin avantajı; alan yönlendirmeli kontrol kullanılmasıdır. Alan yönlendirmeli kontrol, jeneratör ve güç elektroniği devresindeki kayıpları azaltarak, en iyi çalışma noktasına yakın bir çalışma sağlar. Ancak jeneratör parametreleri sıcaklıkla veya frekansın değişmesiyle değişirse sistemin performansı da değişir [67-69].

DMSG’in dezavantajları ise şöyle sıralanabilir:

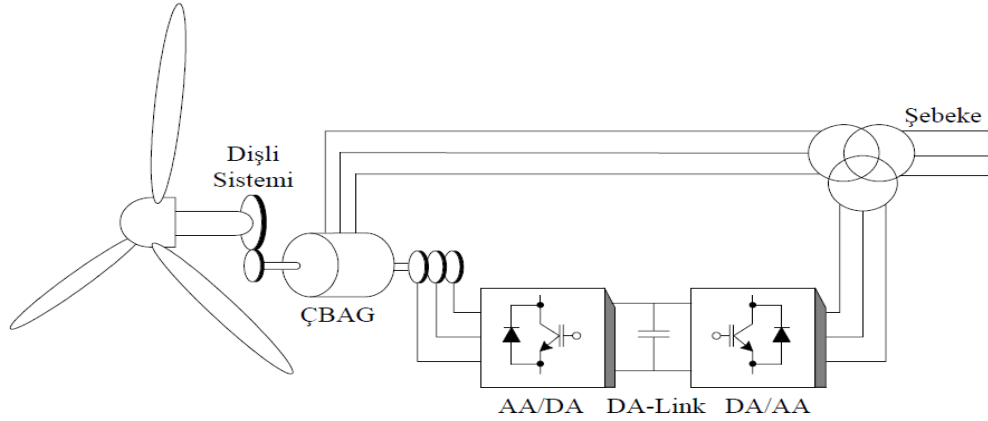
- 1- Daimi mıknatısların maliyetinin yüksek olması,
- 2- Diyotlu doğrultucular akımının genliğini arttırmaktadır,
- 3- Mıknatıs malzemesinin manyetikliği zamanla değişebilmektedir,
- 4- Güç faktörünün kontrol edilememesi.

2.6.3.4. Asenkron Jeneratörler

Rüzgâr türbinlerinde elektrik üretmek için kullanılan diğer bir jeneratör çeşidi de asenkron jeneratördür. Bu tip jeneratörler genellikle rüzgâr türbin endüstrisinde ve küçük hidroelektrik santrallerinde kullanılmaktadır. Bu jeneratörler emniyetli olmalarından ve maliyetlerinin düşük olmasından dolayı tercih edilmektedirler.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan asenkron jeneratörlerin genel olarak iki tipi vardır: (1) Rotoru sargılı asenkron jeneratörler (2) Sincap kafesli asenkron jeneratörler [66].

2.6.3.5. Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörler



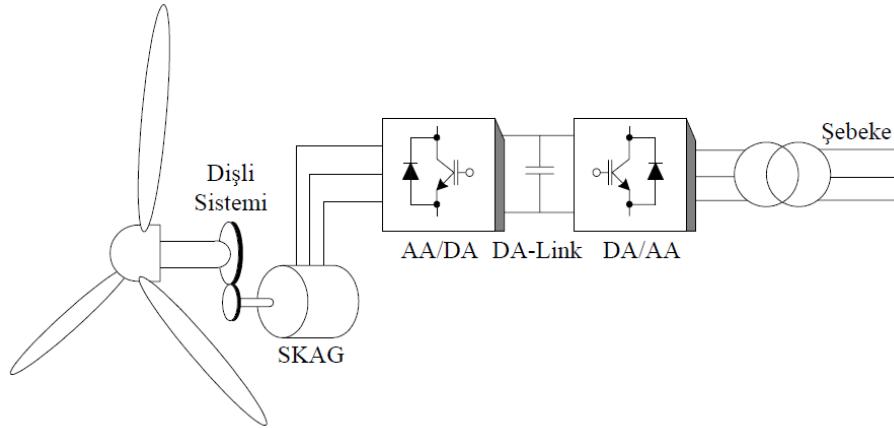
Şekil 2.14. Çift beslemeli asenkron jeneratör

Şekil 2.14'deki rüzgâr güç sisteminde çift beslemeli asenkron jeneratör (ÇBAG) kullanılmaktadır. Stator sargısı şebekeye doğrudan bağlıdır. Rotor sargısı ise dört bölgeli güç konvertörü üzerindeki şebekeye bağlanmıştır. Bu güç konvertörü iki adet back to back gerilim kaynaklı PWM tekniğini kullanan invertörden oluşmuştur. Rotor tarafındaki konvertör elektromanyetik torku regüle eder. Şebeke tarafındaki konvertör ise doğru akım linkini regüle eder [67,69-71]. Çift beslemeli asenkron jeneratörün bazı avantajları vardır [68,72,73].

- 1- Konvertör sadece rotorun kayma gücünü kontrol ettiği için, toplam sistem gücünün %25'inde olan bir invertör yeterli olmaktadır. Böylece invertör maliyeti azalmaktadır.
- 2- Devrede kullanılan filtreler sistem gücünün 0,25 pu'luk kısmı için gereklidir. Bu da invertör filtre maliyetini azaltmaktadır. Ayrıca invertör harmonikleri toplam sistem harmonikleri içinde çok az bir bölümü teşkil etmektedir.
- 3- Bu sistemler harici bozucu etkilere karşı daha dayanıklı ve kararlıdır.

ÇBAG'ün en büyük dezavantajı; jeneratör sisteminde periyodik bakım gerektiren bilezik tertibatının olmasıdır [68,72].

2.6.3.6. Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör



Şekil 2.15. Sincap kafesli asenkron jeneratör

Şekil 2.15'de rüzgâr türbinlerinde kullanılan sincap kafesli asenkron jeneratör (SKAG) bağlantı yapısı görülmektedir. Bu jeneratörün stator sargısı, dört bölgeli güç konvertörü üzerinden şebekeye bağlanır. Bu konvertör doğru akım linkinin iki tarafına back to back bağlı gerilim kaynaklı iki PWM invertörden meydana gelir. Bu konvertör elektromanyetik torku regüle eder ve manyetik alan için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konvertör, jeneratörden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü regüle eder [71,73].

SKAG'ün şöyle avantajları vardır:

- 1- Bu makineler uygulamada yoğun bir şekilde kullanılmaktadır çünkü fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahiptirler.
- 2- Doğrultucu tarafından jeneratöre programlanabilir bir uyarım sağlamak mümkündür.
- 3- İnvörtörü, harmonik kompensatörü olarak çalıştırmak mümkündür.

Bu sistemin dezavantajları ise şunlardır:

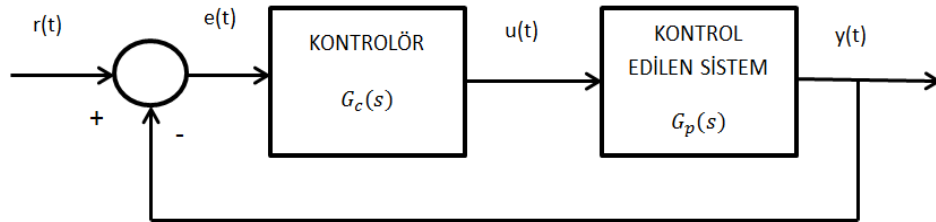
- 1- Sıcaklık ve frekansla jeneratör parametrelerinin değişmesi sistem kontrolünü zorlaştırır.
- 2- Sistemin ihtiyaç duyduğu manyetik alanı sağlamak için stator tarafındaki konvertörün nominâl güce göre %30-%50 daha büyük yapılması gerekir [69].

2.7. Klasik Kontrol Sistemi Tasarımı

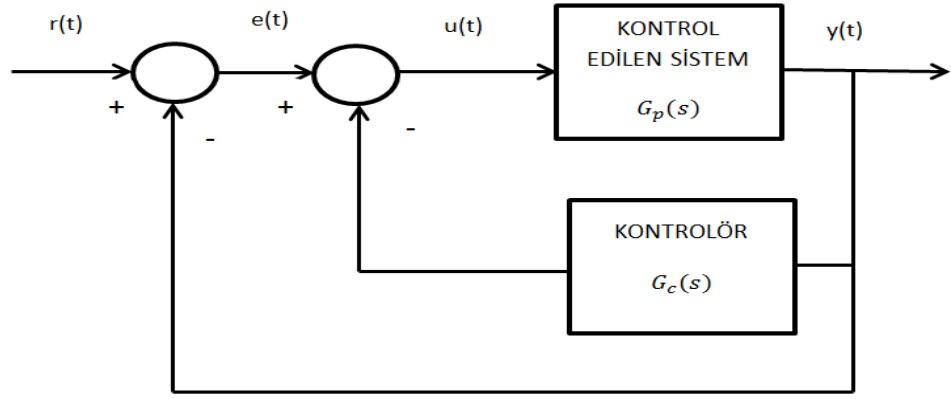
Tasarım kriterleri; bir kontrol sisteminin ne yapması gerektiğini belirtmek ve nasıl yaptığını değerlendirmek amacıyla kullanılır. Bu kriterler her bir uygulamaya göre değişiklik gösterse de, kısaca; bağıl kararlılık, kararlı hâl hatası, geçici cevap gibi kısımlardan oluşur. Bazı durumlarda parametre değişimlerine karşı duyarlılık veya bozucu etkileri etkisiz kılma gibi kriterler de ilave edilebilir.

Doğrusal bir kontrol sistemi değerlendirilirken, sistemin girişine birim basamak, rampa veya parabolik giriş sinyali uygulanır. Bu giriş sinyaline karşı sistem çıkışındaki kararlı hâl hatası, en büyük aşım, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı gibi kriterler değerlendirmeye tabi tutulur. İstenilen tolerans sınırları içinde bir kontrolör sistemi, maliyet ve diğer kriterler de dikkate alınarak tercih edilir.

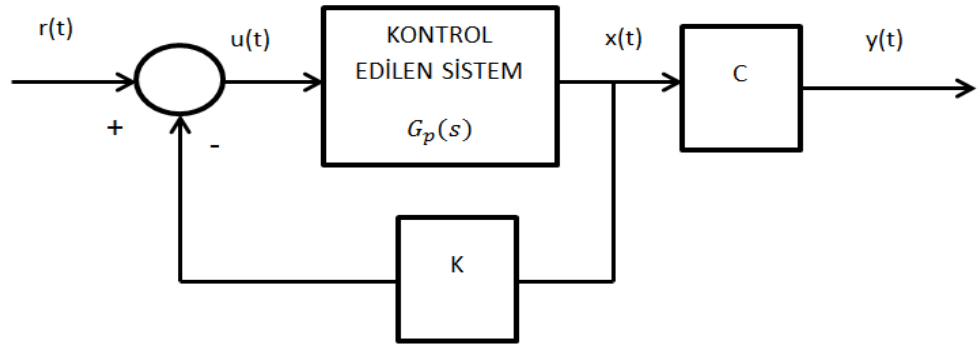
2.7.1. Kontrolör Yapıları



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.16(a). Seri kontrol sistemi blok diyagramı **(b).** Geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı **(c).** Durum geri beslemeli kontrol sistemi blok diyagramı[74]

Kontrol edilmek istenilen doğrusal bir sistem genelde Şekil 2.16 da gösterilen blok diyagramlar ile ifade edilir. Buradaki tasarımın amacı; $y(t)$ ile gösterilen kontrol edilen çıkış değişkeninin davranışlarını kontrol etmektir. Buna göre $u(t)$ kontrol işareti belirlenir. Eğer amaç sistem davranış özelliklerini değiştirmeye yönelikse sabit yapılı bu kontrol tasarımına kompanzasyon ismi verilir.

Seri (kaskat) kompanzasyon: Şekil 2.16 (a) da gösterilmiştir. Kontrolörün kontrol edilen sisteme seri yerleştirildiği en yaygın kontrolör yapısıdır.

Geri beslemeli kompanzasyon: Şekil 2.16 (b) de gösterilmiştir. Kontrolör bir alt çevrime yerleştirilerek, geri besleme yapar.

Durum geri beslemeli kompanzasyon: Şekil 2.16 (c) de gösterilmiştir. Sistem durum değişkenleri sabit kazanç katsayıları ile çarpılarak geri besleme yapılır.

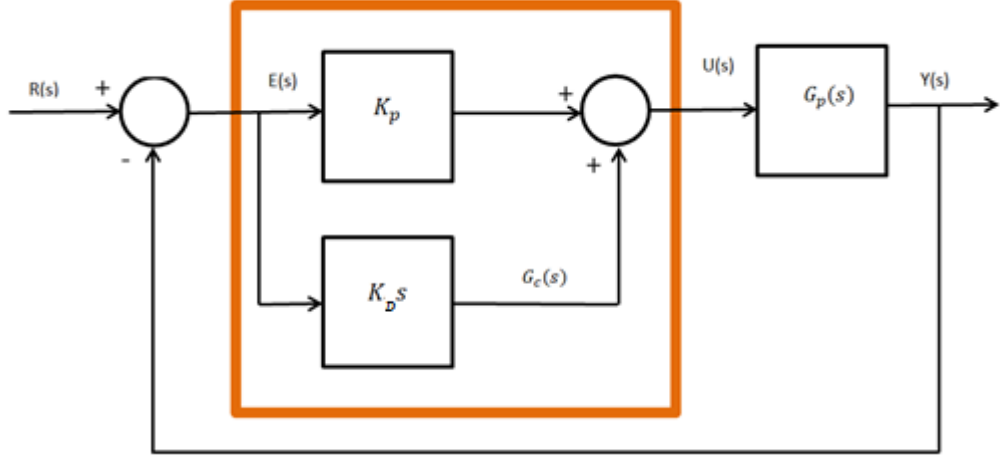
Şekil 2.16 (a),(b) ve (c) yapılarındaki kompanzatörlerde birden fazla değişken parametre bulunsa bile, her sistemde sadece bir tane kontrolör yer aldığından, gerçekleştirilebilir davranış kriterleri sınırlı sayıdadır. Parametre değişikliklerine göre sistemin duyarlılığı fazladır.

Şekil 2.16 (a),(b) ve (c) kompanzasyon yapılarında PID kontrolörü çok sık kullanılır. PID kontrolör, geçerli sinyalin oransal, integral ve türevsel bileşimini sisteme uygulayan bir kontrolördür. PID kontrolör, genellikle zaman tanım bölgesi yöntemleri ile gerçekleştirilir.

Mühendislik uygulamalarında tüm tasarım şartlarını sağlayan en basit yapılı kontrolörü tercih etmek gerekir. Kontrolörün karmaşıklığı arttıkça maliyeti artar, güvenilirliği azalır ve tasarımı zorlaşır.

2.7.1.1. PD Kontrolör

Kontrolör sabit K kazançlı basit bir kuvvetlendiriciden oluşuyorsa buna oransal kontrol denir. Oransal işleme ilave olarak, giriş işaretinin türevinden yada integralinden yararlanılabilir. Bir toplayıcı birim içinde kuvvetlendirici, türev ve integral alıcı elemanlar bulunan genel bir kontrolör tasarlanabilir. Burada tasarımcı, bu elemanlardan hangilerinin hangi oranda ve ne şekilde bağlanacağını belirlemelidir.



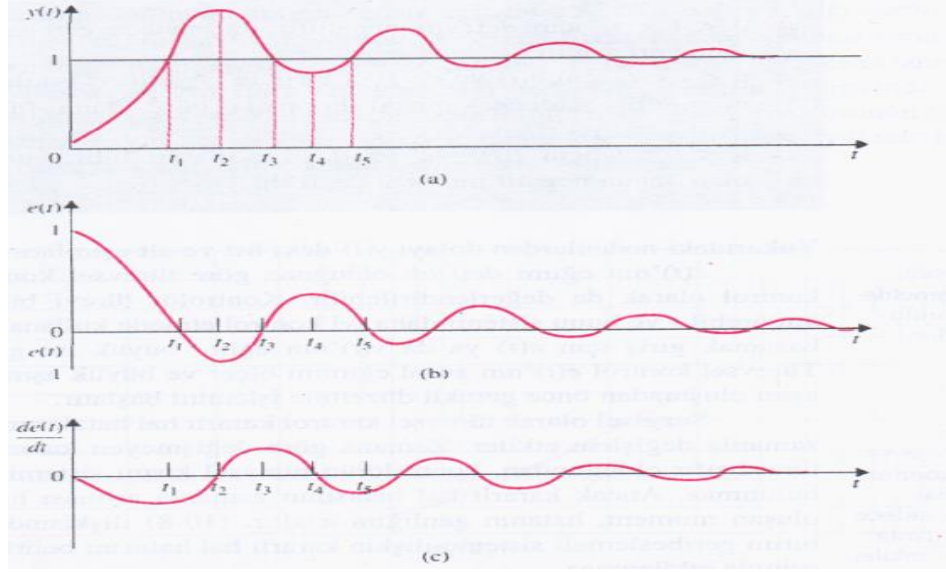
Şekil 2.17. Geri beslemeli bir kontrol sistemi[74]

Şekil 2.17 de geri beslemeli bir kontrol sistemine ait blok diyagram gösterilmiştir. Seri kontrolör transfer fonksiyonu:

$$G_c(s) = K_p + K_D s \quad \text{dir.} \quad (2.16)$$

Bu durumda sisteme uygulanan kontrol işareti; K_p :oransal katsayı, K_D :türevsel katsayı olmak üzere,

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad \text{dir.} \quad (2.17)$$



Şekil 2.18. PD kontrolün, kontrol sistemi üzerindeki geçici cevap etkisi[74]

PD kontrolün, kontrol sistemi üzerindeki geçici cevap etkisi Şekil 2.18 üzerinde incelenebilir. Şekil 2.18(a) da sadece oransal kontrol ile kontrol edilen bir sistemin birim basamak cevabı verilmiştir. Şekil 2.18(b) birim basamak girişi ve $y(t)$ çıkışı arasındaki farkı gösteren $e(t)$ hata sinyalini, Şekil 2.18(c) de $de(t)/dt$ hata sinyalinin zamana göre türevini göstermektedir. Hatanın türevi bize hata değişiminin yönü hakkında bilgi vermektedir. Bu da sistemi daha iyi kontrol etmemizi sağlar. $de(t)/dt$ pozitif ise hata artmakta, negatif ise hata azalmaktadır.

$$e(t)=r(t) - y(t) \text{ olmak üzere,} \quad (2.18)$$

$t_1 - t_2$ arasında hata negatif, hatanın türevi negatiftir. Yani çıkış sinyal değeri referans değer üzerinde ve hata gittikçe azalmaktadır.

$t_2 - t_3$ arasında hata negatif yani hâla çıkış değeri referans sinyalin üzerinde, hatanın türevi pozitif yani hata azalmaya başlamış.

$t_3 - t_4$ arasında hata pozitif yani çıkış değeri referans değer altına düşmüş, hatanın türevi pozitif yani hata değeri artıyor.

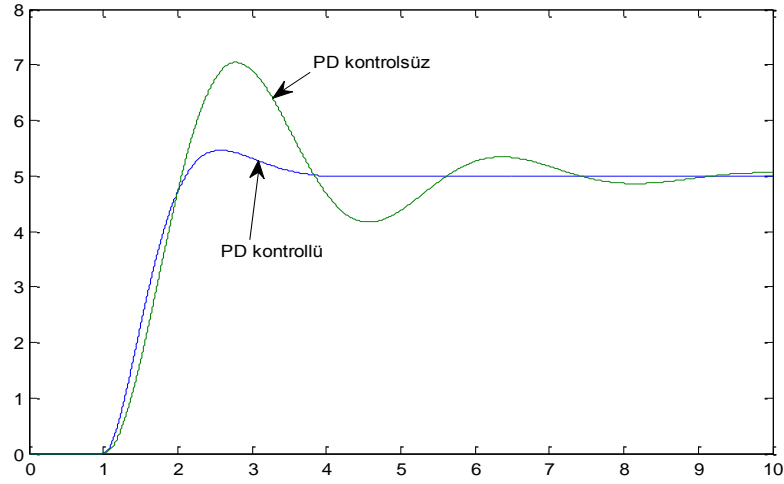
$t_4 - t_5$ arasında hata pozitif yani çıkış değeri referans değer altında, hatanın türevi negatif yani hata azalmaya başlamış demektir.

Türevsel kontrol terimi kararlı hâl hatalarını zamanla değişmesi durumunda etkiler. Zamanla değişmeyen kararlı hâl hatalarının zamana göre türevi sıfır olduğundan,

kontrolörün türevsel kısmı sistemin girişine hiç bir katkıda bulunmaz. Yalnız kararlı hâl hatası zamanla artarsa $de(t)/dt$ ile orantılı olarak hatanın genliği azaltılır.

PD kontrol etkisi şöyle özetlenebilir:

1. Sönümü arttırır ve en büyük aşımı azaltır.
2. Yükselme ve yerleşme zamanlarını azaltır.
3. Bant genişliğini arttırır.
4. Kazanç payı, faz payı ve M_r^* 'yi düzeltir.
5. Yüksek frekans gürültüsünü arttırabilir.
6. Az sönümlü yada kararsız sistemlerde etkili olmaz.

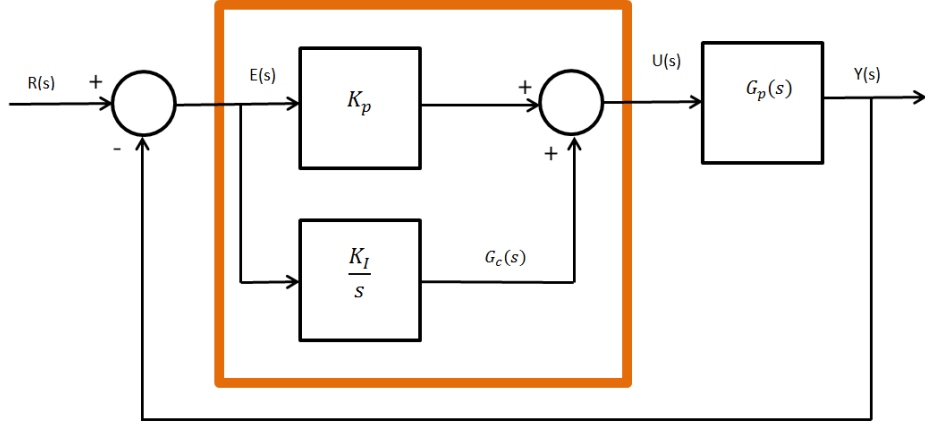


Şekil 2.19. PD kontrol etkisi[74]

Şekil 2.19'da PD kontrolün etkisi görülmektedir.

* M_r : Frekans tanım bölgesi kriterlerinden, rezonans tepesidir. M_r , kapalı çevrimli bir sistemin bağlı kararlılığı hakkında bilgi verir. Uygulamada M_r , rezonans tepesinin 1,1 ile 1,5 arasında bulunması istenir.

2.7.1.2. PI Kontrolör



Şekil 2.20. PI kontrolörlü bir örnek kontrol sistemi[74]

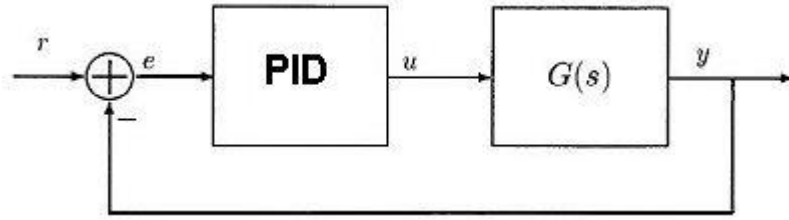
Kontrolörün integral kısmı kontrolör giriş işaretinin zaman integrali ile orantılı bir işaret üretir. Şekil 2.20’de örnek bir kontrol sistemi görülmektedir. PI kontrolörün transfer fonksiyonu:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \text{ dir.} \quad (2.19)$$

PI kontrolör, sistemin kararlı hâl hatasını bir derece iyileştirir. Bu durumda belirli bir giriş için kararlı hâl hatası sabit ise, sistem kararlı durumda kaldığı sürece, PI kontrolör kararlı hâl hatasını sıfırlar. PI kontrolör temelde bir alçak geçiren filtre olduğundan, kontrolörlü sistemin yükselme ve yerleşme zamanı genelde daha uzundur. PI kontrolörün fayda ve sakıncaları şöyle özetlenebilir:

1. Sönümü düzeltir ve aşımı azaltır.
2. Yükselme zamanını arttırır.
3. Band genişliğini azaltır.
4. Kazanç payı, faz payı ve M_r ’yi iyileştirir.
5. Yüksek frekans gürültülerini süzer.

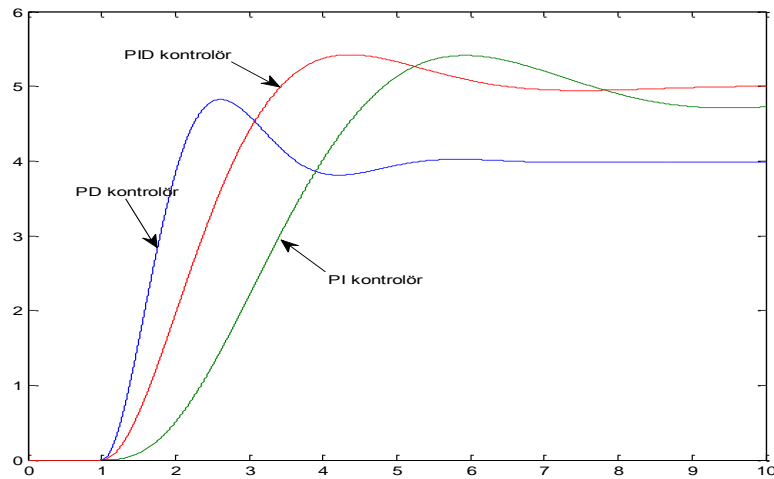
2.7.1.3. PID Kontrolör



Şekil 2.21. PID kontrol sistemi

PI ve PD kontrolörlerin iyi yönleri alınarak PID kontrolör tasarımı yapılır. Blok şema olarak Şekil 2.21’de gösterilmiştir. PID kontrolörü seri bağlı bir PI ve PD kontrolör kısımlarından oluşur. PID kontrolörün transfer fonksiyonu Eşitlik 2.20’de ifade edilmiştir. Şekil 2.22’de kontrol sistemlerinin etkileri verilmiştir.

$$G_c(s) = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad \text{dir.} \quad (2.20)$$

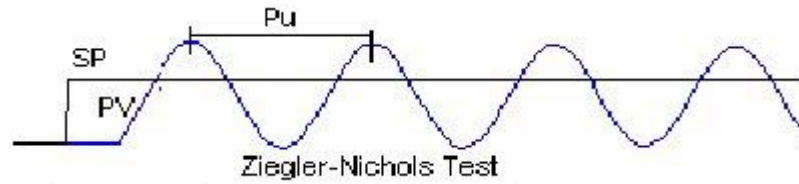


Şekil 2.22. Kontrol sistemlerinin etkileri[74]

Çizelge 2.1. Ziegler-Nichols açık çevrim kontrol katsayı hesapları

Kontrolör	K	T_i	T_d	T_p
P	$0,5K_c$			T_c
PI	$0,45K_c$	$0,83T_c$		$1,4T_c$
PID	$0,6K_c$	$0,5T_c$	$0,125T_c$	$0,85T_c$

2-) PID kontrolörün K_i , K_d katsayıları 0 yapılır. K_p , sistem osilasyona gidene kadar yavaş yavaş artırılır. Sistemin osilasyona gittiği andaki (Şekil 2.24) K_p değerine K_u , osilasyon frekansına P_u denirse, istenen değerler yaklaşık olarak Çizelge 2.2'den bulunur.



Şekil 2.24. Ziegler-Nichols PID katsayı ayarı

Çizelge 2.2. Ziegler-Nichols kapalı çevrim kontrol katsayı hesabı

	K_c	t_I	t_D
P kontrol	$K_u/2$		
PI kontrol	$K_u/2,2$	$P_u/1,2$	
PID kontrol	$K_u/1,7$	$2/P_u$	$P_u/8$

2.7.3. Genel PID Denetleyici Tasarım Kuralları

Oransal denetleyicilerin (K_p), yükselme zamanını azaltmada etkisi vardır ve azaltır, ama asla tamamen yok etmez (kararlı hâl hatası). İntegral denetleyicinin (K_i) kararlı hâl hatasının çıkarılmasında etkisi vardır ancak bu geçici tepkinin daha kötü olmasına sebep olabilir. Türevsel denetleyicinin (K_d) sistemin kararlılığının

artmasında etkisi vardır, aşmayı azaltır ve geçici tepkiyi düzeltir. Kapalı döngülü bir sistemde, her bir denetleyicinin etkisi K_p , K_d ve K_i Çizelge 2.3’de özet olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Kontrol katsayılarının etkilerinin karşılaştırılması

KONTROLÖR TEPKİSİ	YÜKSELME ZAMANI	AŞMA	YERLEŞME ZAMANI	KARARLI HÂL HATASI
K_p	Azalır	Artar	Az Değişir	Azalır
K_i	Azalır	Artar	Artar	Yok olur
K_d	Az Değişir	Azalır	Azalır	Az Değişir

Unutulmamalıdır ki, bu düzeltmeler tam olarak geçerli değildir. Çünkü K_p , K_i ve K_d birbirlerine bağımlıdır. Yani değişkenlerden birinin değişimi diğer ikisinin etkisini değiştirebilir. Bu yüzden Çizelge 2.3, K_i , K_p ve K_d değerlerinin belirlenmesinde sadece bir referanstır.

PID denetleyici tasarımında istenilen tepkiyi elde etmek için aşağıdaki adımlar izlenir:

1. Açık döngü tepkisi bulunur ve ihtiyaçlar belirlenir.
2. Yükselme zamanını düzeltmek için oransal denetleyici eklenir.
3. Aşmayı düzeltmek için türevsel denetleyici eklenir.
4. Kararlı hâl hatasını yok etmek için integral denetleyici eklenir.
5. İstenilen tepki elde edilene kadar K_p , K_i ve K_d ayarlanır. Hangi denetleyicinin hangi karakteristiği kontrol ettiği Çizelge 2.3’den yararlanılarak bulunabilir.

Denetleyici tasarımında mümkün olduğu kadar basit tasarıma gidilmelidir. Eğer PI denetleyici ile istenilen tepki sağlanıyorsa, sisteme türevsel denetleyici eklenip sistem karmaşılaştırılmamalıdır [74,75].

2.8. Modern Kontrol Sistemi Tasarımı

2.8.1. Bulanık Mantık

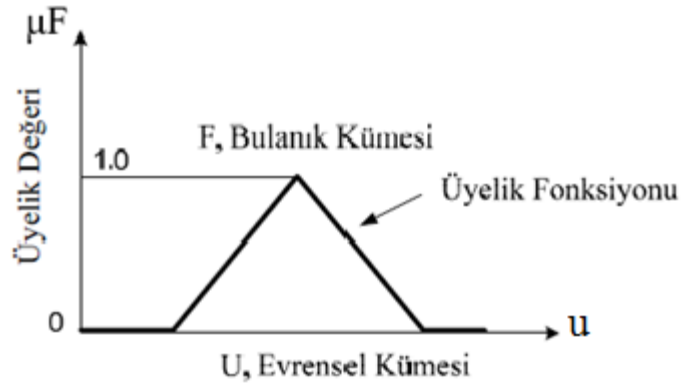
Bulanık küme kavramı ilk defa Azerbeycanlı bir bilim adamı olan Prof. Dr. Lütüfi Askerzade tarafından ortaya atılmıştır [76]. Prof. Dr. Mamdani bu kuramın geliştirilmesine yardımcı olmuş ve bir buhar türbininin kontrolünde uygulamasını başarıyla yapmıştır. Bulanık mantığın ilk önemli uygulaması ise çimento sanayisinde olmuştur. Daha sonra, Japonya'da metro işleyişinin kontrolü bulanık mantıkla yapılmıştır. Bulanık mantık konusunda yapılan çalışmaların artmasıyla bir çok alanda uygulama imkânı bulunmuştur. Bunlardan bazıları; beyaz eşya, tren, asansör, elektronik sanayi vb. sayılabilir.

Klasik mantık iki değerden oluşan (doğru-yanlış) sistemlerle ilgilenir. Eğer bir sistem ikiden fazla değer alıyorsa, klasik mantık bunu ilgi alanının dışında bırakır. Oysa bulanık mantık kuramı iki değerden fazla değerler alan sistemler için algoritmik çıkarım yöntemlerine sahiptir. Bulanık mantık başka bir deyişle insanın düşünme ve karar verme sezgisini kurallı bir şekilde sistemlere uygulayan bir yaklaşımdır. Bulanık mantık da doğru ile yanlış arasında sonsuz değerler vardır.

Bulanıklığın en çok karıştırıldığı kavram olasılıktır. Bulanıklık bir şeydeki belirsizliği gösterir. Bir şeyin olup olmadığını ifade eder. Bulanıklık deterministik, olasılık ise stokastiktir. Bulanıklıkta bir şeyin nitelendirileceği sıfat bir küme ile ifade edilirse, o şeyin o sığata sahip olma miktarı 0 ile 1 arasında bulunan bir üyelik fonksiyonudur. Yani üyelik fonksiyonu 1 ise, o şey bu sığata tam sahip, üyelik fonksiyonu 0 ise o şey bu sığata hiç sahip değil olarak nitelendirilir. Bu hâliyle bulanık mantık, klasik mantık tarafından paradoks olarak ifade edilen, doğru ve yanlıştan başka değerler alan kavramlara çözüm getirmede büyük bir başarı elde etmiştir. Bulanık mantığın karar verme ve değerlendirme süreçlerinde insan mantığına paralel olarak işlemesi birçok karmaşık kontrol sistemlerine çözüm üretebilmesini sağlamıştır.

2.8.1.1. Bulanık Kümeler ve Bulanık İlişkiler

Bulanık kümelerde küme elemanlarının kısmi üyeliğine izin verilir. Üyelik değerleri $[0 - 1]$ aralığındadır. U evrensel kümesinde E ile tanımlanan bir bulanık kümedeki x elemanının üyelik fonksiyonu $\mu_E(x)$ olarak ifade edilir (Şekil 2.25). Bir bulanık küme elemanlarının üyelik değerlerini belirlemek için değişik eğriler kullanılır. Bu eğriler; üçgen, yamuk, çan eğrisi vb. şekillerde olabilir.



Şekil 2.25. Üyelik fonksiyonu

2.8.1.2. Bulanık küme gösterim şekilleri

Burada U , evrensel kümeyi, u ise evrensel küme içerisindeki bir elemanı temsil etmek üzere U evrensel kümesinde, E bulanık kümesi üyelik fonksiyonu Eşitlik 2.25 ve 2.26'daki gibi ifade edilir.

$$\mu_E = U \rightarrow [0,1] \text{ ile tanımlanır.} \quad (2.25)$$

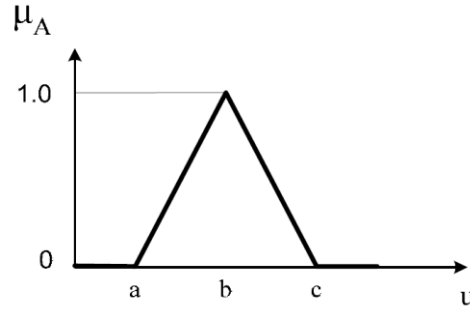
$$E = \{(u, \mu_E(u)) | u \in U\} \quad (2.26)$$

Eğer $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ayrık elemanlı bir evrensel küme ise X evrensel kümesindeki A bulanık kümesi Eşitlik 2.27'deki gibi ifade edilir:

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i = \mu_A(x_1) / x_1 + \mu_A(x_2) / x_2 + \dots + \mu_A(x_n) / x_n \quad (2.27)$$

Bulanık mantıkta sayısal değişkenler yerine sözel değişkenler kullanılır. Bağıntılar bu sözel değişkenlerle ifade edilir. Bu sözel değişkenlerin nicelikleri yine sözel ifadelerle belirtilir. Bulanık mantığı mühendisliğe uygularken kullanılan üyelik fonksiyonları, sebep-sonuç ilişkisini ifade eden kurallar tarafından belirlenir. Üyelik fonksiyonları çeşitli şekilde gösterilebilir. Mesela; üçgen (Şekil 2.26), yamuk (Şekil 2.27), üstel, gausyen, s-fonksiyon (Şekil 2.28), π -fonksiyon (Şekil 2.29) gibi.

üçgen üyelik fonksiyonu:

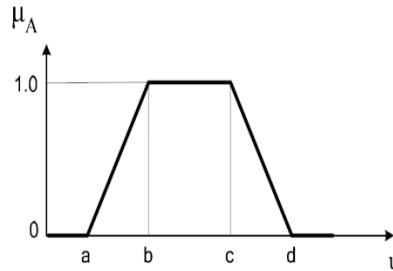


Şekil 2.26. Üçgen üyelik fonksiyonu

Üçgen üyelik fonksiyonu Eşitlik 2.28’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} & \ddot{U}(u; a, b, c) & (2.28) \\ & = \begin{cases} 0 & u < a \\ (u - a)/(b - a) & a \leq u \leq b \\ (c - u)/(c - b) & b < u \leq c \end{cases} \end{aligned}$$

yamuk üyelik fonksiyonu:

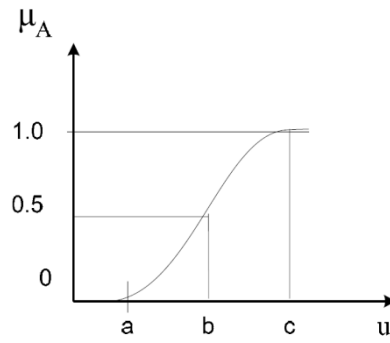


Şekil 2.27. Yamuk üyelik fonksiyonu

Yamuk üyelik fonksiyonu Eşitlik 2.29'da verilmiştir.

$$Y(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ (u - a)/(b - a) & a \leq u \leq b \\ 1 & b \leq u \leq c \\ (d - u)/(d - c) & c < u \leq d \\ 0 & u > d \end{cases} \quad (2.29)$$

s-üyelik fonksiyonu:

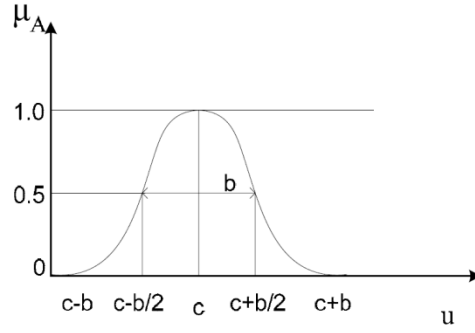


Şekil 2.28. s-üyelik fonksiyonu:

s-üyelik fonksiyonu Eşitlik 2.30'da verilmiştir.

$$S(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ 2[(u - a)/(b - a)]^2 & a \leq u < b \\ 1 - 2[(u - c)/(c - a)]^2 & b \leq u \leq c \\ 1 & u > c \end{cases} \quad (2.30)$$

π -üyelik fonksiyonu:



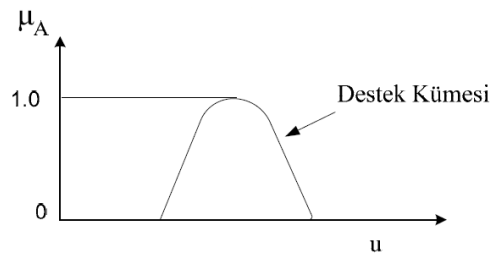
Şekil 2.29. π -üyelik fonksiyonu

π -üyelik fonksiyonu Eşitlik 2.31’de verilmiştir.

$$\pi(u; b, c) = \begin{cases} S(u; c - b, c - b/2, c) & u \leq c \\ 1 - S(u; c - b, c - b/2, c) & u \geq c \end{cases} \quad \text{fonksiyonudur.} \quad (2.31)$$

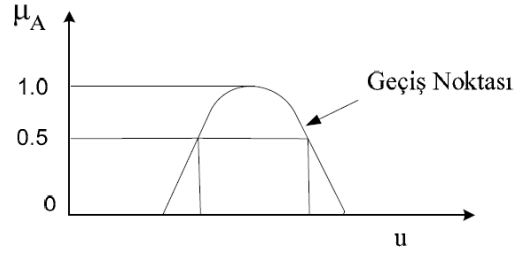
2.8.1.3. Bulanık Kümelerdeki Bazı Kavramlar

Destek Kümesi: Üyelik derecesi 0’den büyük olan elemanların oluşturduğu kümedir (Şekil 2.30). $\mu_A(u) > 0$



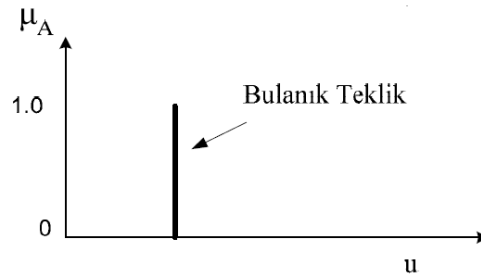
Şekil 2.30. Destek kümesi

Geçiş Noktası: A kümesi içinde üyelik değeri 0,5’e eşit olan noktaya geçiş noktası denir ($\mu_A(u) = 0,5$) (Şekil 2.31).



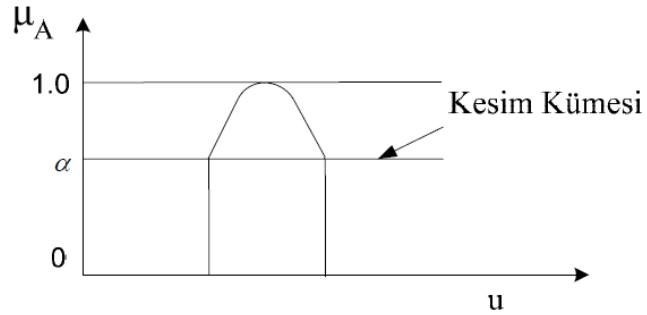
Şekil 2.31. Geçiş noktası

Bulanık Teklik: U evrensel kümesi içindeki bir bulanık kümenin destek bölgesi tek nokta ise buna bulanık teklik (singleton) denir (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Bulanık teklik

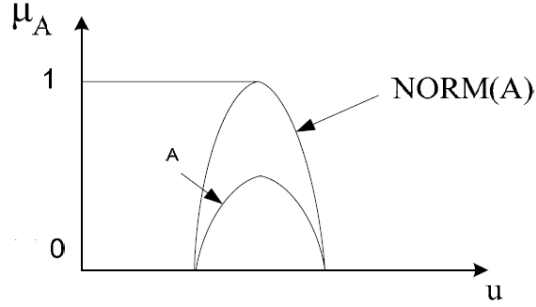
α -Kesim Kümesi: A kümesi içindeki elemanlardan üyelik derecesi α 'dan büyük olanların oluşturduğu küme α -kesim kümesidir ($\mu_A(u) \geq \alpha$) (Şekil 2.33).



Şekil 2.33. α -kesim kümesi

Normalizasyon: Üyelik fonksiyonunun kümenin en büyük üyelik derecesine bölünmesiyle yeniden ölçeklendirilmesine normalizasyon denir (Şekil 2.34). Normalizasyon formülü Eşitlik 2.32’de verilmiştir.

$$\mu_{NORM(A)} = \mu_A(u) / \max(\mu_A(u)) \forall u \in U \quad (2.32)$$



Şekil 2.34. Normalizasyon

Bulanık Kümenin Yüksekliği: Bir bulanık kümedeki en büyük üyelik değeridir. Şayet bir bulanık kümenin yüksekliği 1 ise bu normal bir bulanık kümedir.

Bulanık Kümenin Çekirdeği: Üyelik derecesi 1 olan elemanların oluşturduğu kümeye kümenin çekirdeği denir ($\mu_A(u) = 1$).

2.8.1.4. Bulanık Küme İşlemleri

Bulanık kümelerle birleşme, kesişme ve tümlenme işlemleri yapılırken küme elemanları ile birlikte üyelik fonksiyonları da kullanılır.

Eşitlik: İki bulanık küme eğer aynı evrensel kümede ise ve üyelik fonksiyonları eşit ise bu iki kümenin eşit olduğu söylenir. Eşitlik 2.33’de ifade edilmiştir.

$$A=B \quad \text{eğer} \quad \mu_A(u) = \mu_B(u) \quad \forall u \in U \quad (2.33)$$

Birleşim: İki bulanık kümenin birleşiminden meydana gelen bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonu Eşitlik 2.34'de gösterilmiştir.

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad \forall u \in U \quad (2.34)$$

Kesişim: İki bulanık kümenin kesişiminden meydana gelen bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonu Eşitlik 2.35'de ifade edilmiştir.

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad \forall u \in U \quad (2.35)$$

Tümleyen: Bir A bulanık kümesinin tümleyeni \bar{A} olmak üzere üyelik fonksiyonu Eşitlik 2.36'da gösterilmiştir.

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad \forall u \in U \quad \text{olarak ifade edilir.} \quad (2.36)$$

Keskin küme kavramında geçerli olan bütün kanunlar, zıtlık kanunu(Eşitlik 2.37) ve ayrıcalıklı orta kanunu(Eşitlik 2.38) hariç bulanık küme kavramında da geçerlidir:

$$A \cup \bar{A} = U \quad (2.37)$$

$$A \cap \bar{A} = \emptyset \quad (2.38)$$

Bulanık kümelerde birleşme ve kesişmeyi göstermek için max ve min operatörlerinden başka operatörler de kullanılmaktadır. Mesela: bulanık kesişme için cebirsel çarpım operatörü; A ve B bulanık küme olmak üzere:

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \quad \forall u \in U \quad (2.39)$$

Bulanık birleşme için cebirsel toplam operatörü; A ve B bulanık küme olmak üzere:

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) + \mu_B(u) - \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \quad \forall u \in U \quad (2.40)$$

şeklinde ifade edilir.

2.8.1.5. Bulanık İlişkiler

Kartezyen çarpım: İki veya daha fazla bulanık küme arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılır.

Bulanık İlişki: İki veya daha fazla bulanık kümenin elemanları arasındaki etkileşimi gösterir.

U ve V evrensel iki küme olmak üzere R bulanık ilişkisi $R(U,V)$, $U \times V$ çarpım uzayında bir bulanık altkümedir. Üyelik fonksiyonu $\mu_R(x,y)$ ($x \in U$ ve $y \in V$) ile gösterilir ve Eşitlik 2.41 ile ifade edilir.

$$R(U, V) = \{((x, y), \mu_R(x, y)) | (x, y) \in U \times V\}, \mu_R(x, y) \in [0,1] \text{ dir.} \quad (2.41)$$

Bulanık birleşme, kesişme ve tümlenme işlemleri bulanık ilişkiler için de kullanılabilir. $U \times V$ çarpım uzayında, $R(x, y)$ ve $S(x, y)$ iki bulanık ilişki olsun. İki ilişkinin birleşimi ve kesişimi Eşitlik 2.42 ve 2.43 ile ifade edilebilir.

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) * \mu_S(x, y) \quad (2.42)$$

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) \oplus \mu_S(x, y) \quad (2.43)$$

$*$ → herhangi bir t-norm, \oplus → herhangi bir t-conorm işlemi ifade etmektedir.

$X \times Y$ Kartezyen çarpım uzayında R ve S iki bulanık ilişki olmak üzere:

Birleşme Eşitlik 2.44 ile ifade edilmiştir.

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \max\{\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)\} \quad (2.44)$$

Kesişme Eşitlik 2.45 ile ifade edilmiştir.

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \min\{\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)\} \quad (2.45)$$

Tümlenme Eşitlik 2.46 ile ifade edilmiştir.

$$\mu_{\bar{R}}(x, y) = 1 - \mu_R(x, y) \text{ olarak tanımlanır.} \quad (2.46)$$

2.8.1.6. Bulanık Çıkarım

İki değerli mantık: İkili mantığın değerleri; doğru ve yanlış, 1 ve 0 gibi değerlerle adlandırılır.

Çok değerli mantık: İkiden fazla değere sahip olan mantıktır. 1930 yılında Lukasiewicz N-değerli mantık kuramını geliştirmiştir. N ikiden büyük veya eşit bir tam sayıdır.

Bulanık mantıkta doğruluk değerlerinin oluşturduğu T_N kümesinin $[0, 1]$ kapalı aralığında olduğu kabul edilir.

Bulanık mantık günlük dilde bulunan belirsizlik ve kararsızlıkların matematik kullanılarak yönetilmesidir. Bulanık kontrol kuralları kontrol edilen sistemin giriş-çıkış ilişkisini belirler.

Bulanık mantık kullanımı bazı karmaşık sistemlerin kontrolünü kolaylaştırmıştır. Eğer sistemin anlaşılması karmaşık bir bilgi yorumunu gerektiriyorsa, sistemin kontrolünde insan tecrübesinin önemli bir rolü varsa, elde edilen bilgiler kesin ve tam değilse bulanık mantık ile sistemin kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bulanık çıkarım insan muhakemesine yakın bir sonuç elde eder. Bilgi belirsiz kanaatlerle ifade edilebilir. Bu durum geleneksel mantıktan daha esnekler.

Bulanık çıkarım kurallarında “eğer”, “ise” ifadeleri kullanılır. Temel olarak iki çıkarım kuralı vardır; ileri zincirleme kuralı, geri zincirleme kuralı. İleri zincirleme kuralında verilerden neticeye doğru işlem yapılır. Geri zincirleme kuralında ise mümkün olan bütün sonuçlar değerlendirilerek sistem verileri elde edilir. Genelde iki işlem birleştirilerek bulanık küme ve bulanık ilişki problemleri çözülmektedir. Kontrol uygulamalarında sık kullanılan bu işlemler: max-min, max-çarpım dır. Bulanık ilişkiler bulanık bilgi tabanındaki kurallar ile ifade edilir. Bulanık kurallar

için kullanılan bazı anlamlandırma fonksiyonları vardır. Anlamlandırma fonksiyonlarından bazıları Çizelge 2.4’de verilmiştir.

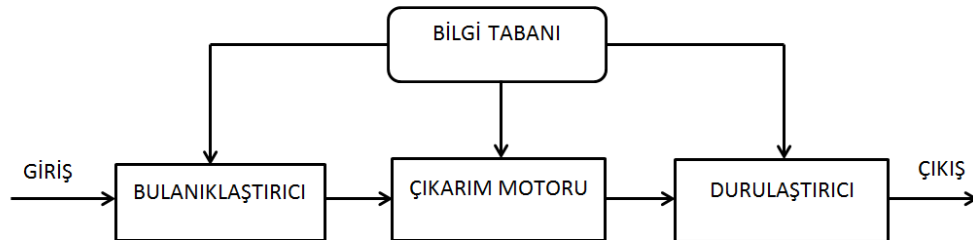
Çizelge 2.4. Bulanık kurallar için kullanılan bazı anlamlandırma fonksiyonları

İşlemin Türü	“EĞER x=A İSE y=B dir”
Minimum Kuralı(Mamdani)	$R_c = A \times B = \int_{u \times v} \mu_A(u) \wedge \mu_B(u) / (u, v)$
Çarpım Kuralı(Product Rule-Larsen)	$R_p = A \times B = \int_{u \times v} \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) / (u, v)$
Aritmetik Kuralı(Zadeh)	$R_a = (notA \times V) \oplus (U \times B)$ $= \int_{u \times v} 1 \wedge (1 - \mu_A(u) + \mu_B(v)) / (u, v)$
Boolean	$R_b = (notA \times V) \cup (U \times B)$ $= \int_{u \times v} 1 \wedge (1 - \mu_A(u) \vee \mu_B(v)) / (u, v)$

Bulanık bilgi tabanında birçok bulanık kural vardır. Bu kurallar “eğer”, “ise” yapısını kullanır. Bu kurallar sayesinde uzman insanlar kolaylıkla bilgi ve tecrübelerini aktarırlar. Kural olarak ifade edilmesi program tasarımcısının işini kolaylaştırır.

2.8.1.7. Bulanık Mantık Kontrol Sistemi

Kontrol sistemi konfigrasyonunda bulanık mantık kontrolör herhangi bir kontrolör gibi sisteme yerleştirilir. Sistemdeki hata ve hatanın değişimini giriş olarak kabul ederek, çıkış değişkenini kontrol eder. Bulanık kontrolör dört ana elemandan oluşur; bulanıklaştırıcı, bulanık bilgi tabanı, çıkarım motoru ve durulaştırıcı (Şekil 2.35).



Şekil 2.35. Bulanık Mantık Denetleyici Şeması

Bulanık mantık kontrolörün girişleri olan hata ve hatanın değişimi keskin değerlere sahiptirler. Bundan dolayı bulanıklaştırıcıya verilerek bu keskin değerlerin bulanık karşılıkları elde edilir. Bilgi tabanına dayalı bulanık kurallar bu bulanık hata ve hatanın değişimini kullanarak bulanık çıkarımda bulunur. Bu bulanık çıkarım durulaştırılarak keskin değerler elde edilir ve denetim sinyali olarak gönderilir.

Bulanıklaştırma: Bulanıklaştırma sayısal değerlerin bulanık değerlere dönüştürülmesidir. Bu değerler bulanık kontrolörde bulanık kümelerle tanımlanır. Aslına bakılırsa bulanıklaştırma giriş ve çıkış değişkenlerinin ilgili bulanık kümelere yerleştirilmesidir.

Seviyelendirme: Seviyelendirme bulanık giriş ve çıkış değişkenlerinin bulanık altkümelere ayrılma işlemidir. Seviyelendirme sayısı değişkenleri temsil edebilecek kadar çok, belleği ve işlem hızını zorlamayacak kadar az olmalıdır. Seviyelendirme sayısının tam olarak standart bir şekli olmamakla birlikte Çizelge 2.5'deki gibi kullanılabilir.

Çizelge 2.5. Bazı bulanık seviyeler

Negatif Orta	NO
Negatif Küçük	NK
Sıfır	SF
Pozitif Küçük	PK
Pozitif Orta	PO

Her bulanık küme için bir üyelik fonksiyonu bulunmalıdır. İşlem hızı ve hesap basitliği için genellikle üçgen üyelik fonksiyonu seçilmektedir. Üyelik fonksiyonlarının $\frac{1}{4}$ oranında birbiri üzerine bindirilmesi bulanıklık açısından tavsiye edilmektedir.

Normalizasyon: Kontrol sistemlerinde normalizasyon; evrensel kümenin sınırlarını $[-1, +1]$ kapalı aralığına taşımakla olur.

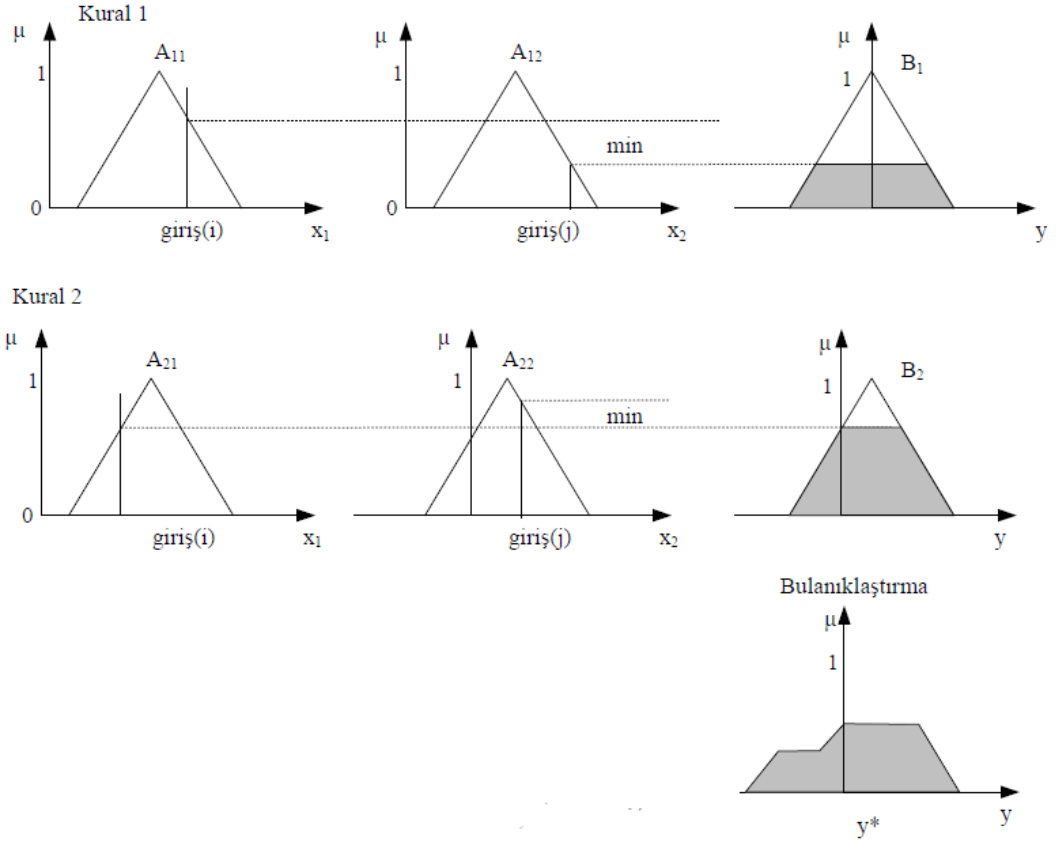
Bilgi Tabanı: Bulanık mantık denetleyicisinin bilgi tabanını veri tabanı ve kural tabanı teşkil eder. Veri tabanının temel görevi; bulanık mantık denetleyicisinin doğru çalışması için gerekli bilgileri toplamaktır.

Kural Tabanı: Kontrol amacını gerçekleştirmek üzere oluşturulmuş bulanık kontrol kurallarını içerir. Bulanık kontrol kurallarını oluşturmak için genelde dört yöntem kullanılır:

1. Uzman tecrübesi ve denetim mühendisliği,
2. Operatörün kontrol hareketlerinin modellenmesi,
3. Kontrol sisteminin bulanık modeli,
4. Öğrenme.

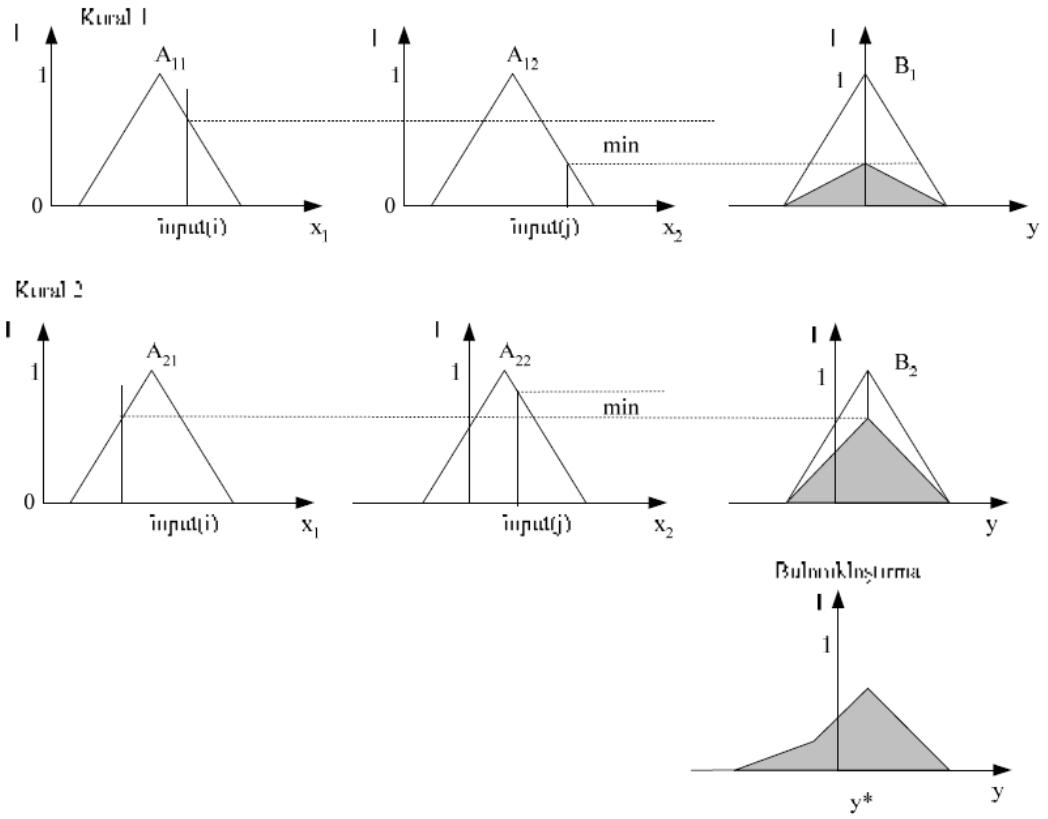
Çıkarım Mekanizması: Girişlerin aldığı değerlere göre kural tabanından uygun kuralları belirleyen bir mekanizmadır. Bulanık mantık denetiminde en çok kullanılan iki yöntem; maksimum-minimum ve maksimum-çarpım yöntemleridir. Çıkarım tüm kural kümesine karşılık gelen bulanık ilişki ile bulanık giriş arasındaki bileşim işlemiyle sağlanır. Bu bileşimin sonucunda toplam denetim çıktısının karşılığı olan bulanık küme elde edilir.

Maksimum-minimum operatörünün kullanımı; Şekil 2.36'da görülmektedir.



Şekil 2.36. Maksimum-minimum operatörünün kullanımı

Maksimum-çarpım operatörünün kullanımı da Şekil 2.37’de gösterilmiştir. Aktif olan her bir kural içinde giriş değişkenlerinin üyelik dereceleri çarpılır. Bu çarpımlardan elde edilen kümeler birleşim operatörüyle maksimum değerleri alınarak birleştirilir.

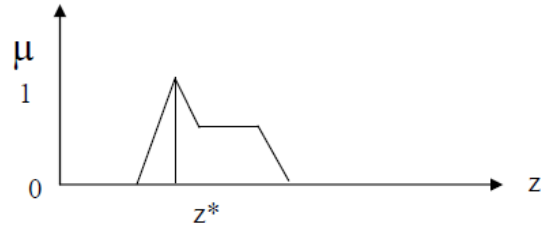


Şekil 2.37. Maksimum-çarpım operatörünün kullanımı

Bu grafiksel çıkarım her bir bulanık kural için uygulanır. Sonra her bulanık kural için elde edilmiş üyelik fonksiyonları kümelenir. Bu kümelenmenin dış çeperinden oluşan bir kümelenmiş üyelik fonksiyonuyla sonuçlandırılır. Kümelenirilmiş bu fonksiyon durulaştırılma tekniği ile keskin değere çevrilir.

Durulaştırma: Bulanık çıkarım sonucu elde edilen bulanık denetim eyleminin, keskin denetim eylemine çevrilmesine durulaştırma denir. Birçok kontrol sistemi keskin denetim sistemine ihtiyaç duyar. En çok kullanılan durulaştırma yöntemleri şunlardır:

Maksimum üyelik yöntemi Şekil 2.38'de görülmektedir.

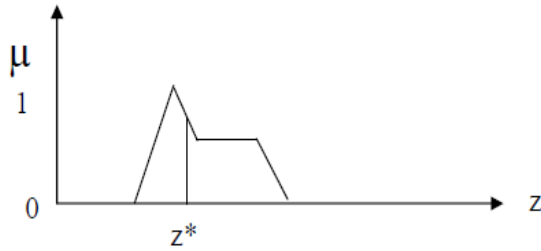


Şekil 2.38. Maksimum üyelik yöntemi

Hesaplanması Eşitlik 2.47'deki gibi yapılır.

$$\mu_c(z^*) \geq \mu_c(z), \quad z \in Z \quad (2.47)$$

Ağırlık merkezi yöntemi Şekil 2.39'da gösterilmektedir.



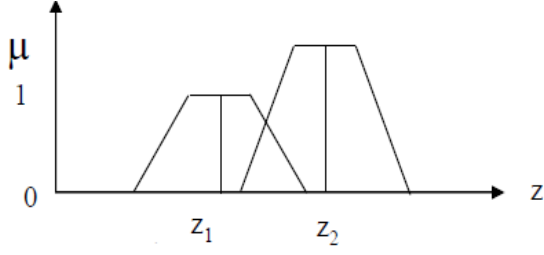
Bu yöntem en yaygın olan durulaştırma yöntemidir.

Şekil 2.39. Ağırlık merkezi yöntemi

Hesaplanması Eşitlik 2.48'deki gibi yapılır.

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(z) \cdot z}{\sum \mu_c(z)} \quad (2.48)$$

Ağırlıklı ortalama yöntemi Şekil 2.40'da gösterilmektedir.



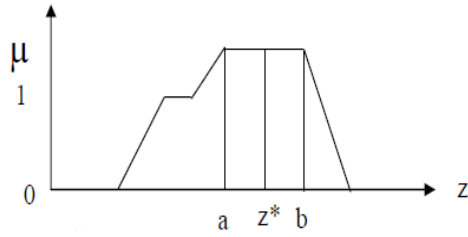
Bu yöntem sadece simetrik çıktısı olan üyelik fonksiyonları için geçerlidir.

Şekil 2.40. Ağırlıklı ortalama yöntemi

Hesaplanması Eşitlik 2.49'daki gibi yapılır.

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \mu_c(\bar{z})} \quad (2.49)$$

Maksimumların ortalaması yöntemi Şekil 2.41'de gösterilmektedir.



Şekil 2.41. Maksimumların ortalaması yöntemi

Hesaplanması Eşitlik 2.50'deki gibi yapılır.

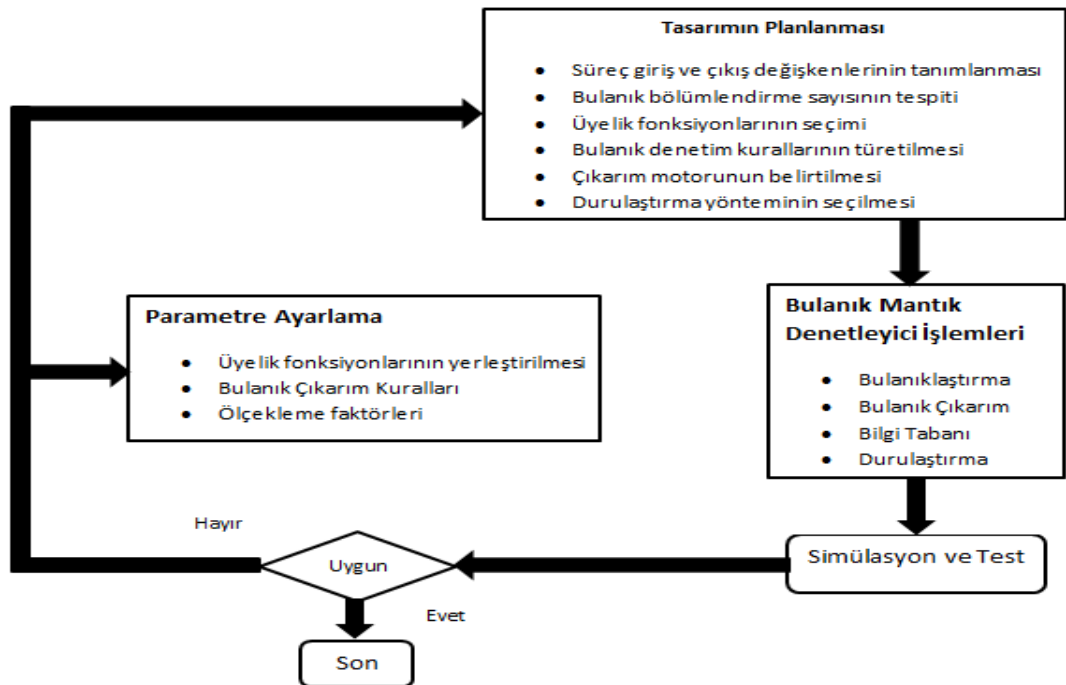
$$z^* = \frac{a + b}{2} \quad (2.50)$$

2.8.1.8. Bulanık Mantık Kontrolör Tasarımı

Bulanık mantık kontrolör tasarımında şu noktalar dikkate alınmalıdır:

1. Giriş ve çıkış değişkenleri tam olarak tanımlanmalıdır. Bunun için tasarımcı sistemi çok iyi bilmelidir.
2. Giriş ve çıkış değişkenleri için bulanık altkümelerin sayısına karar verilmelidir.
3. Giriş ve çıkış değişkenleri için üyelik fonksiyonları seçilmelidir. En çok kullanılan üyelik fonksiyonları üçgen ve yamuk fonksiyonlardır.
4. Bulanık denetim kuralları belirlenmelidir.
5. Çıkarım motoru tanımlanmalıdır.
6. Durulaştırma yöntemi seçilmelidir.

Bulanık kontrol sistemi oluşturulduktan sonra çeşitli yöntemlerle sistem performansı ölçülür. Eğer performans istenilen seviyede değilse bulanık küme sayılarında veya üyelik fonksiyonlarında değişiklikler yapıp sistem tekrar test edilir (Şekil 2.42).



Şekil 2.42. Bulanık Mantık Denetim Sisteminin Tasarım Usulü [77-80]

3. YÖNTEM

3.1. Giriş

İnsanların eskiden beri kullandıkları bir enerji çeşidi olan rüzgâr enerjisi, son yıllarda rüzgâr enerji sistemlerindeki maliyetlerin düşmesi, teknolojik yenilikler ve temiz enerji kaynaklarına ilginin artması sebebiyle popüler hâle gelmiştir. Günümüzde küçük, orta ve büyük boyutlarda rüzgâr enerji sistemleri (RES=WES) yapılmaktadır. Büyük boyutlu rüzgâr enerji sistemlerinin, orta ve küçük boyutlu enerji sistemlerine göre daha verimli olması, maliyet-verim açısından düşünen yatırımcıları daha büyük boyutlu ve güçlü rüzgâr enerji sistemleri yapmaya sevk etmiştir. Ancak rüzgâr hızının sabit olmaması ve rüzgâr türbinlerinin çıkışlarının rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olarak değişmesi nedeniyle, çıkış güçlerinde dalgalanmalar söz konusu olmaktadır [81].

Büyük güçlerdeki rüzgâr enerji sistemlerinde, nominâl rüzgâr hızının üzerine çıkıldıkça sistemin zarar görmemesi ve maksimum güç eldesi için, kontrol edilecek en önemli parametrelerden birisi kanatların hatve açılarıdır [53]. Böylece sabit hıza göre çalışan rüzgâr enerji sistemlerinden daha verimli sistemler elde edilmiş olmaktadır.

Ayrıca, rüzgâr hızındaki dalgalanmalardan dolayı enerji kalitesini belirleyen; çıkış gücü, gerilim ve frekans parametrelerinin kontrolü de önemli hâle gelmiştir. Bu amaçla sistem içerisinde uygun kontrol yöntemleri kullanılmalıdır [2,27]. Kontrol yöntemlerinin en bilinenleri; pasif (stall) kontrol mekanizması ve hatve (pitch) kontrol mekanizmasıdır [48]. Bunlar arasında en etkili olanı ise, kanat hatve açısının kontrol edilmesidir [2,27].

Kanat hatve açısının kontrolünde uygulanabilecek yöntemlerden birisi PI kontrol yöntemidir. PI kontrol; endüstride oldukça geniş kullanım alanı olan basit yapıda, kullanımı kolay bir kontrol yöntemidir. Daha çok doğrusal sistemlerin kontrolünde kullanılan bu yöntem, doğrusal olmayan rüzgâr enerji sistemleri için çok fazla uygulanabilir gözükmemektedir [29].

Diğer bir yöntem ise; bulanık mantık kontrol yöntemidir. Bu yöntemde en önemli avantaj; kontrol edilen nesnenin matematiksel modelinin bilinmek zorunda olunmamasıdır [29]. Burada amaç; düşük rüzgâr hızlarında elde edilen gücü optimize etmek, yüksek rüzgâr hızlarında elde edilen gücü sınırlamaktır [82]. Yapılan bir çalışmada, 4-6 m/s gibi düşük rüzgâr hızında rüzgâr türbininin bulanık mantık hatve açısı kontrolü %3 gibi bir enerji kazancı sağladığı ifade edilmiştir [26]. Enerji Bakanlığının 2023 yılı kurulu gücün %10'unun rüzgâr enerji sistemlerinden karşılanması hedefi düşünüldüğünde, bu değer ne kadar büyük olduğu görülmektedir. Diğer bir çalışmada ise bulanık mantık ile yapılan hatve kontrol mekanizması ile rüzgâr türbininin çıkışı 4 sn içerisinde kararlı hâle geldiği ifade edilmiştir [28]. Bir diğer çalışmada ise; kazancı değişebilir PD kontrolör ile klasik PI metodu karşılaştırılmış ve kazancı değişebilir PD kontrolör ile daha iyi sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir [21].

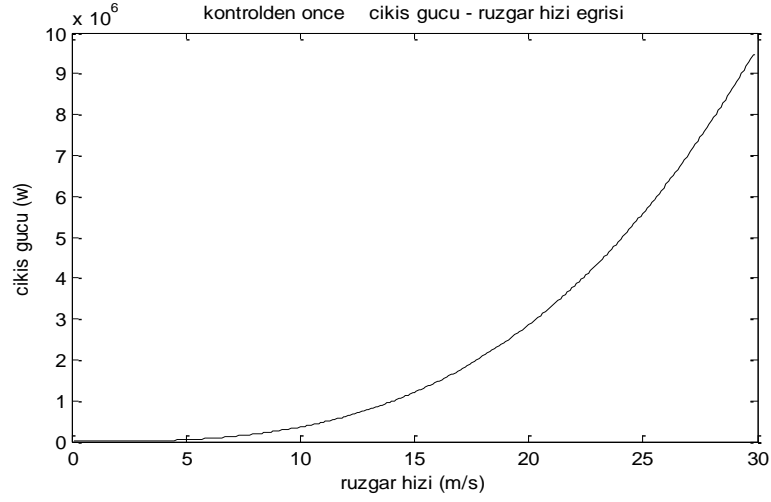
Pozitif kontrol kazancında türevsel terim, sürücünün eylemsizlik etkinliğini arttıracığından dolayı PID kontrolör yerine PI kontrolör kullanmayı tavsiye eden çalışmalar mevcuttur [83,84].

3.2. Rüzgâr Türbini Kontrol Eşitlikleri

Rüzgâr gücü (P); rüzgâr hızının küpü ile orantılıdır ve Eşitlik 3.1'de verilmiştir.

$$P = 0.5\rho Av^3 \quad (3.1)$$

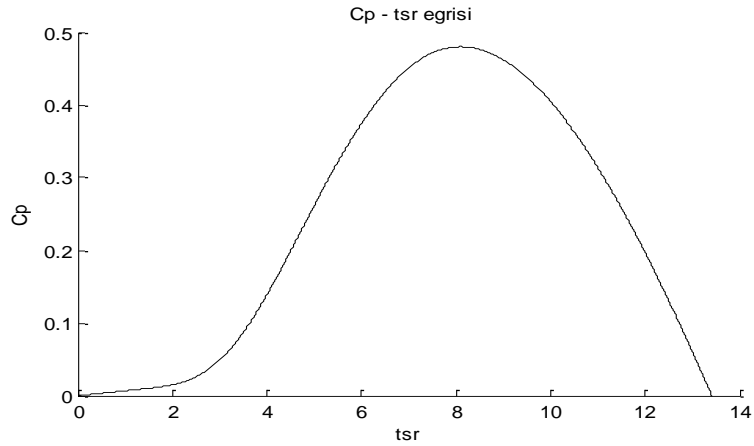
burada; ρ hava yoğunluğu (kg/m^3), A kanatlar tarafından süpürülen alan (m^2), v rüzgâr hızıdır (m/s). Şekil 3.1'de rüzgâr hızı ile güç değişiminin grafiği verilmiştir.



Şekil 3.1. Kontrol olmadan rüzgâr hızı-çıkış gücü eğrisi

Rüzgâr türbini, rüzgâr gücünün bir kısmını enerjiye çevirebilir ve Betz limiti ile sınırlı olan bu oran %59'u geçemez [66]. Rüzgâr türbininden alınabilecek güç miktarı, kanat hatve açısının (β) ve kanat uç hız oranının (λ) bir fonksiyonu olan rüzgâr türbininin güç katsayısı (C_p) tarafından belirlenir [62].

Şekil 3.2'de güç katsayısı (C_p)'nın kanat uç hız oranı'na göre değişimi eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.2. Güç katsayısı (C_p)-kanat uç hız oranı (λ) eğrisi

Rüzgâr türbininin rüzgârdan elde edebileceği mekanik güç Eşitlik 3.2’de verilmiştir.

$$P_{\omega t} = P C_p(\beta, \lambda) \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.1’i Eşitlik 3.2’ye ilave edersek, Eşitlik 3.3’ü buluruz.

$$P_{\omega t} = 0.5\rho A v^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (3.3)$$

burada; $C_p(\beta, \lambda)$ türbinin güç katsayısı, β kanat hatve açısı, λ kanat uç hız oranı (TSR).

Yüksek oranda doğrusal olmayan ve rüzgâr hızıyla değişen C_p , Eşitlik 3.4’te verilmiştir.

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.5 teki λ_i değeri, Eşitlik 3.4’te yerine konarak C_p değeri hesaplanır.

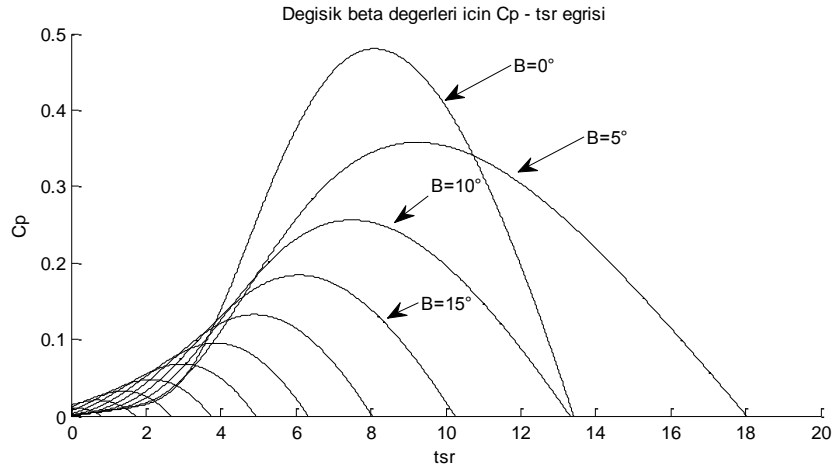
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{3\beta + 1} \quad (3.5)$$

Kanat uç hız oranı-TSR; kanat açısal hızı ile rüzgâr hızı oranıdır ve Eşitlik 3.6’da verilmiştir.

$$\lambda = \frac{\omega_{\omega t} R}{v} \quad (3.6)$$

burada; $\omega_{\omega t}$ türbin rotoru açısal hızı(rad/s), R rüzgâr türbini kanat yarı çapıdır (m).

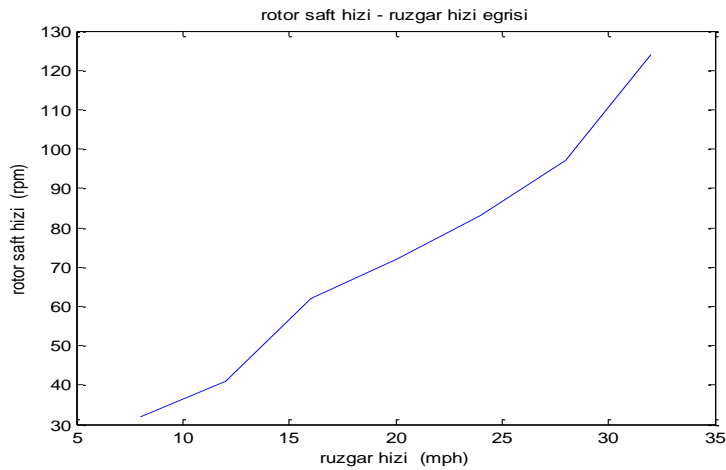
Şekil 3.3, β açısının değişimiyle C_p -TSR oranının nasıl değiştiğini göstermektedir.



Şekil 3.3. Değişik β açısı değerleri için C_p -TSR eğrisi

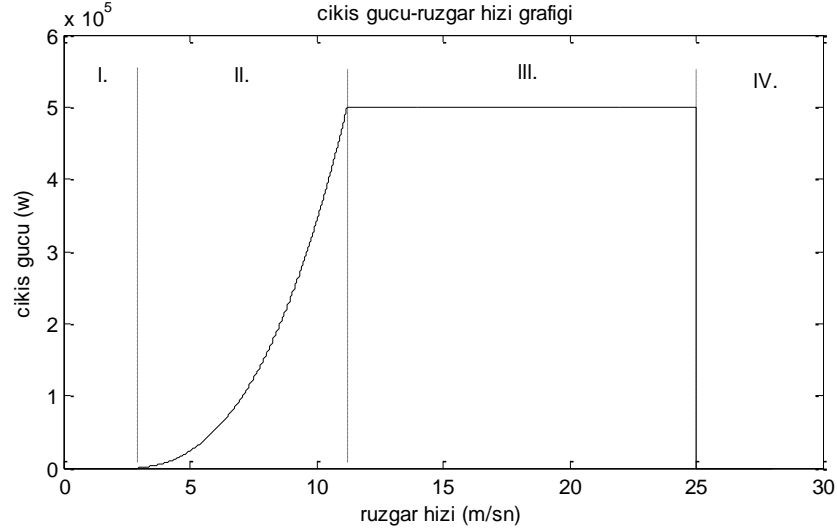
Rüzgâr türbini rotor hızındaki veya rüzgâr hızındaki herhangi bir değişim, kanat uç hız oranını değiştirir, bu da güç katsayısını değiştirir. Güç katsayısı da rüzgârdan elde edilen güç miktarını değiştirecektir.

Deneysel sonuçlara göre rüzgâr hızı ile rotor açısal hızı arasında Şekil 3.4 de gösterildiği gibi bir bağıntı vardır [85].



Şekil 3.4. Rüzgâr türbini – rotor açısal hızı eğrisi

Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5'e göre β açısı değiştirilerek C_p , güç katsayısı değiştirilir. Rüzgâr türbini güç kontrolü bu prensibe göre çalışır.



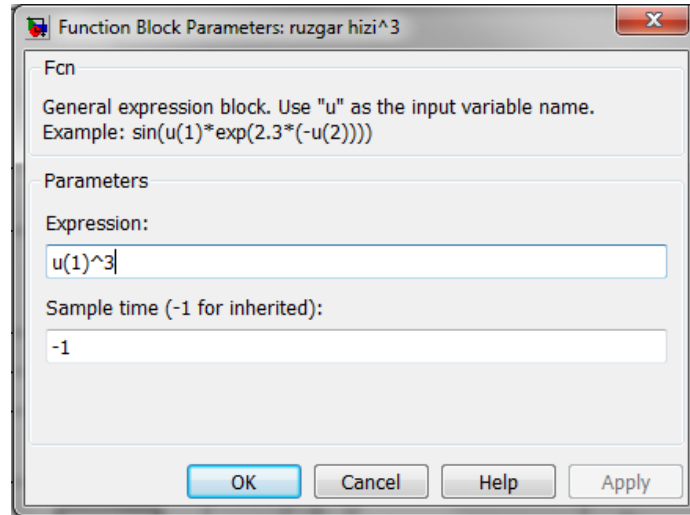
Şekil 3.5. Rüzgâr türbini çalışma bölgeleri

Değişken hızlı bir rüzgâr türbininde mekanik çıkış gücü de değişkendir [40]. Şekil 3.5 de görüldüğü gibi değişken hızlı, değişken hatve açılı rüzgâr türbinlerinin rüzgâr hızı – çıkış gücü eğrisinde dört çalışma bölgesi vardır. I. bölge rüzgâr hızının devreye girme değerinden küçük olduğu bölgedir, burada çıkış gücü 0 dır. II. bölge devreye girme ile nominâl hız arasındaki bölgedir. III. bölge nominâl hız ile cut-out arasındaki bölgedir. IV. bölge cut-out değeri üzerindeki rüzgâr hızlarıdır ki bu bölgede güvenlik açısından rüzgâr türbini durdurulur [41]. II. bölgede maksimum güç takibi istenir. Maksimum rüzgâr enerjisini elde etmek için; rüzgâr türbini jeneratörü ile grid arasına frekansı sabit tutacak güç elektroniği devrelerinin yerleştirilmesi gerekmektedir [35]. III. bölgenin başlangıcında, nominâl rüzgâr hızında türbin nominâl güce ulaşırken, rüzgâr hızı artmaya devam ederse, çıkış gücü de artacaktır. Bundan dolayı, çıkış gücünü tasarım sınırları içinde sabit tutabilmek için bir kontrol sistemine ihtiyaç vardır. Bu kontrol sistemi; kanat hatve açısının değiştirilmesi ile güç katsayısının, dolayısıyla çıkış gücünün değiştirilmesidir. Kanat hatve açısı β arttırılarak, çıkış gücü P sabit tutulmaya çalışılır [62].

girişinden alınan rüzgâr hızının üçüncü dereceden kuvveti alınır. Bu fonksiyon Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Simule edilen rüzgâr enerji sistemleri parametreleri

Simule Edilen Sistemin Parametreleri	
Nominâl çıkış gücü	500 kw
Çalışma modu	Şebeke bağlantılı
Devreye girmerüzgâr hızı	3 m/s
Nominâl rüzgâr hızı	12 m/s
Devreden çıkma rüzgâr hızı	25 m/s
Rotor çapı	48 m
Süpürme alanı	1810m ²
Kanat sayısı	3
Nominâl rotor hızı	30 rpm
Rotor hız aralığı	10-30 rpm
Dişli kutusu oranı	1:50
Jeneratör adedi	2
Jeneratör tipi	Asenkron sincap kafes
Jeneratör nominâl çıkış	250 kw
Jeneratör nominâl devir	1500 rpm
Jeneratör gerilimi	690 v

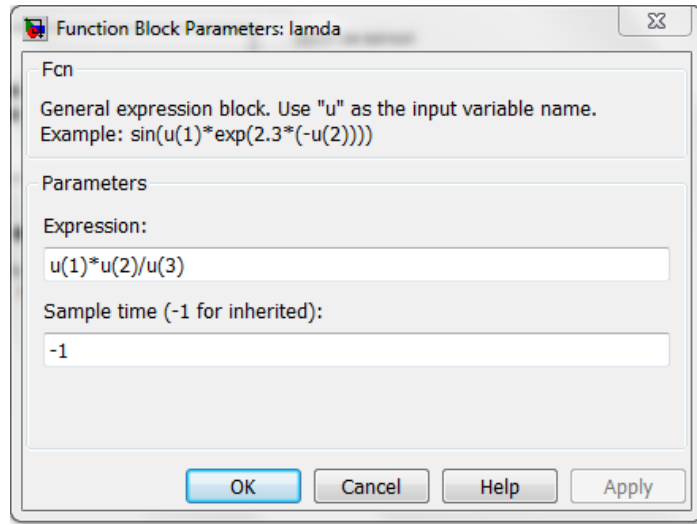


Şekil 3.8. Rüzgâr hızı fonksiyonu Matlab bloğu

Rüzgâr türbininin kanat uzunluğu 24 m. olduğundan blok içerisinde sabit olarak

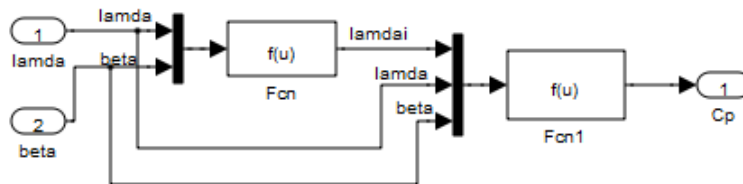
gösterilmiştir. “rotorhizi” isimli Matlab fonksiyonu ile rüzgâr hızı ve rotor çapından rüzgâr rotor milinin açisal hızı hesaplanır. Fonksiyonun C dilinde yazılmış programı EK’de verilmiştir.

“lamda” isimli fonksiyonda λ kanat uç hız oranı hesaplanır. Bu fonksiyonun Matlab bloğu Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

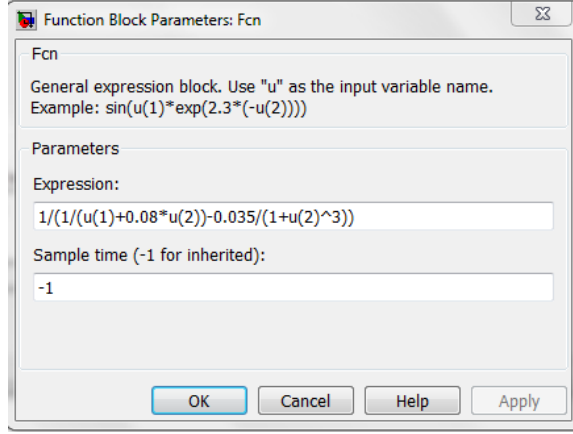


Şekil 3.9. Lamda fonksiyonu Matlab bloğu

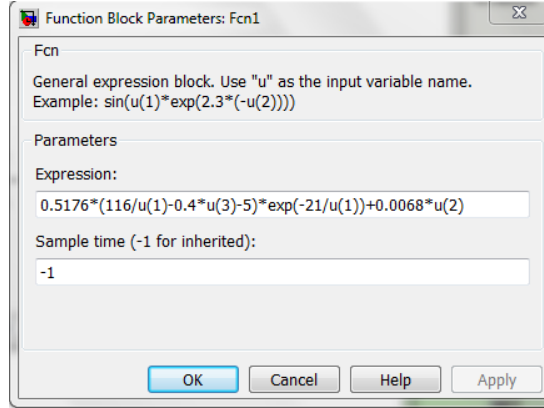
Bir subsystem bloğu ile lamda ve beta değerleri alınarak, C_p güç katsayısı hesaplanır. Subsystem bloğu şekil 3.10’da, bloğa ait fonksiyonlar da Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Rüzgâr türbin modelindeki subsystem bloğu



Şekil 3.11. Rüzgâr türbin modelindeki subsystem bloğunun Fcn fonksiyonu



Şekil 3.12. Rüzgâr türbin modelindeki subsystem bloğunun Fcn1 fonksiyonu

“guc1” isimli Matlab fonksiyonu ile rüzgâr türbininin devreye girme ve devreden çıkma hızları belirlenmektedir. Matlab fonksiyonunun C dilinde yazılmış programı EK’de verilmiştir.

3.4. Hareketlendirici Modeli

Hatve hareketlendirici sistemler hidrolik veya elektrik kumandalı olabilmektedir. Hidrolik hareketlendiricilerin avantajları; pozisyon doğruluğu ve hızlı dinamik tepkidir. Elektrik hareketlendiricide ise; her bir kanat bireysel olarak bir servo motor

tarafından ayarlanabilmektedir. Bu çalışmada hareketlendirici olarak; dc servo motor kullanılmıştır.

Kanatların, hem hatve açısı hem de hatve oranı noktasında dinamik davranışları doğrusal değildir [86]. Bu çalışmada bu durum dikkate alınmamış, hatve açısı ile kanat dinamik davranışının doğrusal olduğu kabul edilmiştir.

Servo motor tasarımında; hız kontrolünde motorun transfer fonksiyonu Eşitlik 3.7 de verilmiştir.

$$G_s(s) = \frac{\alpha}{\tau s + \beta} \quad (3.7)$$

burada; α ve β motorun sabitleri, τ ise zaman sabitidir.

Pozisyon kontrolünde motorun transfer fonksiyonu Eşitlik 3.8 deki gibi ifade edilir.

$$G_p(s) = \frac{\alpha}{s(\tau s + \beta)} \quad (3.8)$$

Transfer fonksiyonunu basitleştirerek Eşitlik 3.9 daki gibi yazabiliriz.

$$G_p(s) = \frac{1}{s(s + 1)} \quad (3.9)$$

Açısal hızın integralini alındığında, açısal yer değiştirme elde edilmiş olur. Açısal hız ile açısal yer değiştirme arasındaki bağıntı Eşitlik 3.10 da verilmiştir.

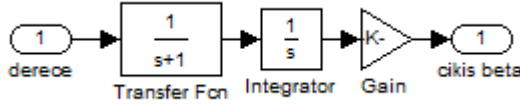
Hız-pozisyon çevrimi :

$$G_p(s) = G_s(s) \frac{1}{s} \quad [85] \quad (3.10)$$

Matlab servo motor blok şeması Şekil 3.13'de, blok şemanın iç yapısı Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



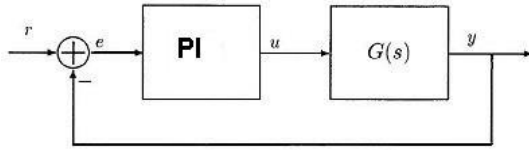
Şekil 3.13. Matlab servo motor blok şeması



Şekil 3.14. Matlab servo motor blok şeması iç yapısı

3.5. Rüzgâr Türbini için PI kontrolör Dizaynı

PI kontrollü bir sistem basit olarak Şekil 3.15 deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.15. PI Blok şeması

PI (Proportional-Integral) günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemidir. Çok geniş bir uygulama alanının olmasına rağmen PI uygulamaları için standart bir tanımlama yoktur. Karl Astrom'a göre PI algoritması Eşitlik 3.11 de ifade edildiği gibidir.

$$u(t) = K \left[e(t) + 1/T_i \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (3.11)$$

Sistem hatası Eşitlik 3.12 te verilmiştir.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.12)$$

Burada $u(t)$ kontrol değişkeni, $e(t)$ toplam hata, $y(t)$ çıkıştan ölçülen değerdir. K_p , T_i , T_d PI parametreleridir. Eşitlik 3.11'deki formülü biraz daha basite indirgersek, Eşitlik 3.13 elde edilir.

$$u(t) = P(t) + I(t) \quad (3.13)$$

burada, P : Oransal I : İntegral dir ve Eşitlik 3.14 ve 3.15'de ifade edilmiştir.

$$P_s = K_{p_s} S(t) \quad (3.14)$$

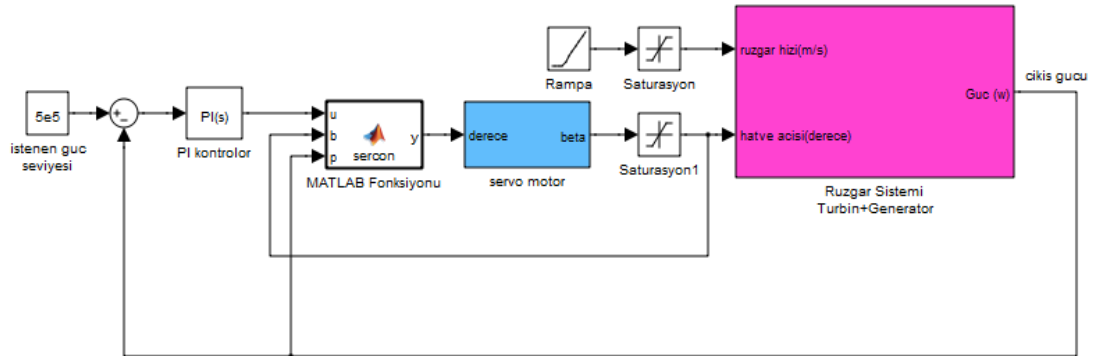
$$I_s = K_{i_s} \int_0^t S(\tau) d\tau \quad (3.15)$$

[74,75]

PI kontrolörün K_p ve K_i katsayıları Ziegler-Nichols metoduyla yaklaşık olarak hesaplanmış ve izelge 3.2 de gsterilmiştir.

izelge 3.2. PI kontrolör katsayıları

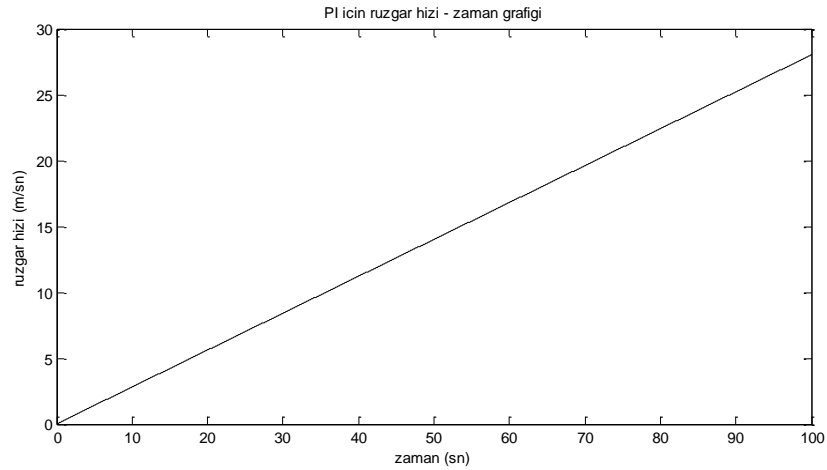
Kontrolör	K_p	K_i
PI	-1	-0.00001



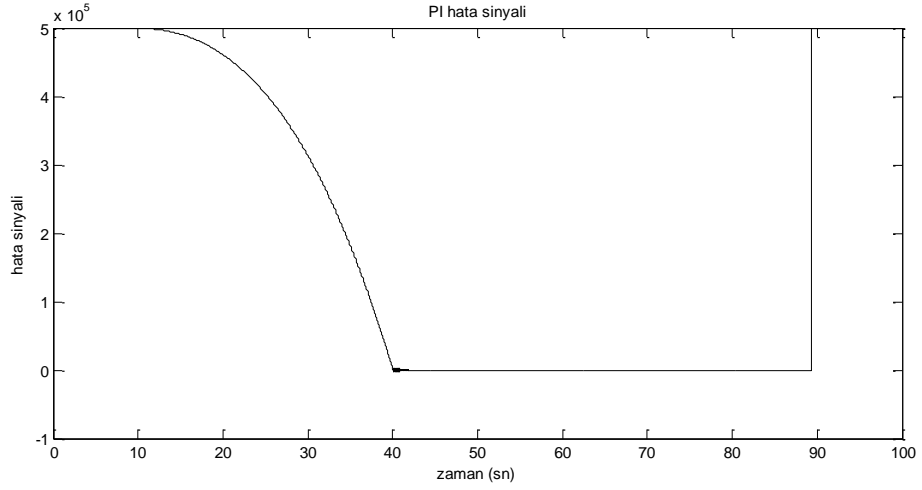
şekil 3.16 PI kontrollü rüzgâr enerji sistemi

Şekil 3.16’da PI kontrollü rüzgâr enerji sisteminin blok diyagramı görülmektedir. PI kontrolörden gelen kontrol sinyali “sercon” isimli Matlab fonksiyon bloğunda çıkış gücü ve mevcut beta açısı değeri ile karşılaştırılarak doğru akım servo motoru kumanda edecek sinyali üretmektedir. “sercon” fonksiyonunun C dilinde yazılmış programı EK’de verilmiştir.

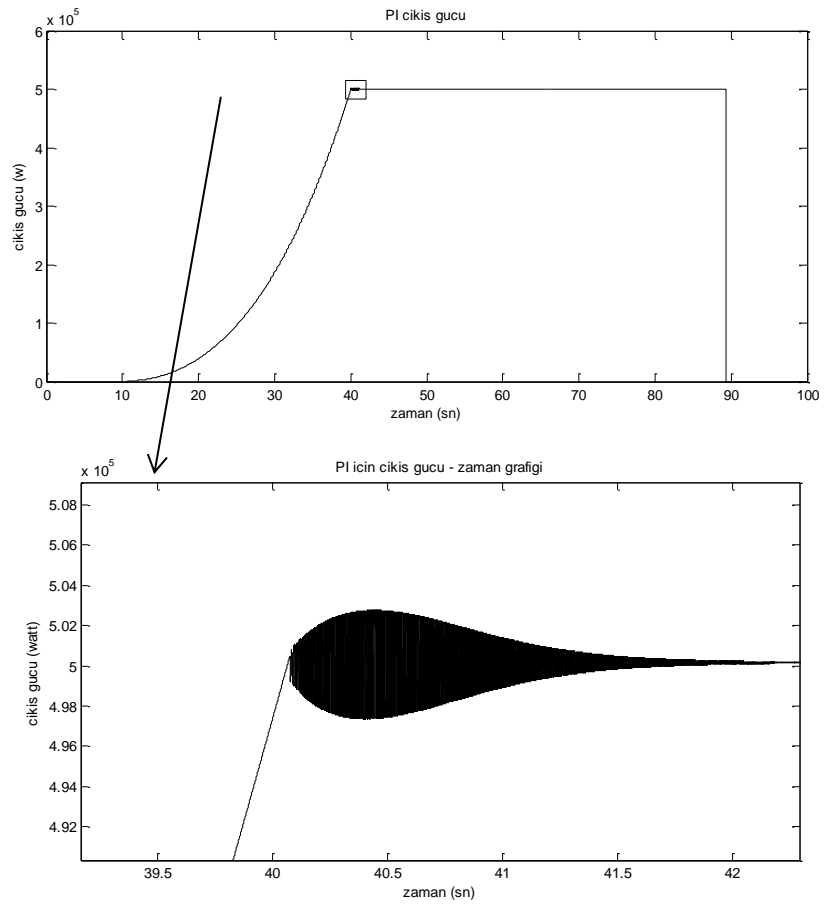
PI kontrol yönteminin rüzgâr türbini üzerindeki etkisini ölçebilmek için çeşitli fonksiyonlar şeklinde rüzgâr hızı türbine uygulanmıştır. İlk önce rampa fonksiyonu şeklinde bir rüzgâr hızı türbin girişine uygulanmıştır. 100 sn süre ile 0 m/sn’den 27 m/sn’ye kadar rüzgâr hızı arttırılmıştır. Rüzgâr hızının değişim grafiği Şekil 3.17’de gösterilmiştir. PI kontrolörün, istenen güç ile mevcut çıkış gücü arasındaki farkı gösteren hata değerinin değişimi Şekil 3.18’deki grafikte gösterilmiştir. Çıkış gücündeki değişim büyütülmüş haliyle birlikte Şekil 3.19’da, gösterilmiştir.



Şekil 3.17. PI kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızı-zaman grafiği

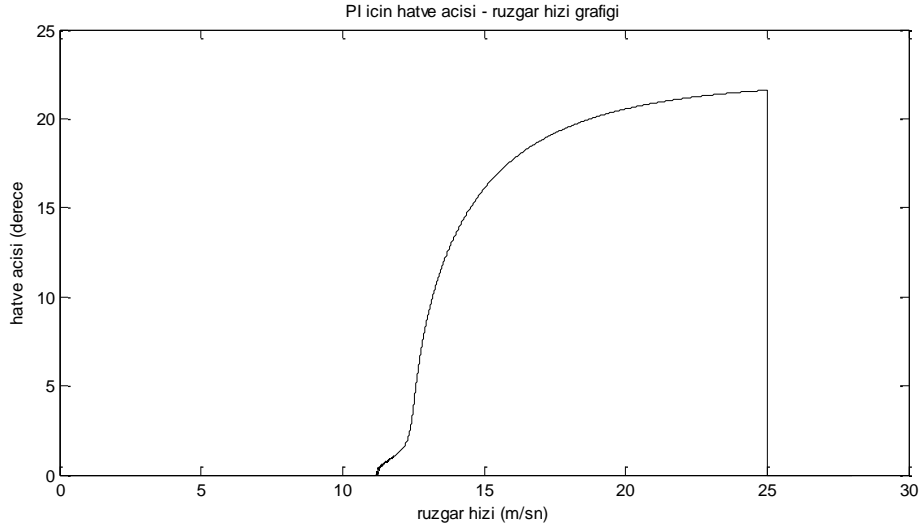


Şekil 3.18.PI kontrolörün hata sinyali değişim grafiği



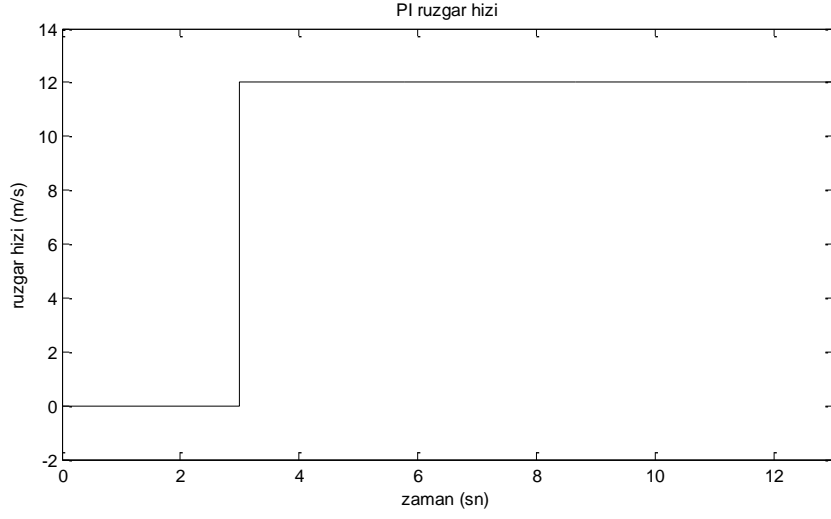
Şekil 3.19. PI kontrolör için çıkış gücü-zaman değişimi ve büyütülmüş grafiği

Rüzgâr türbininin devreye girmesi rüzgâr hızının 3 m/sn'ye ulaştığı zaman olmaktadır. Çıkış gücü, rüzgâr hızının üçüncü dereceden kuvveti ile orantılı olarak artmıştır. Şekil 3.19'daki grafikten de görüldüğü gibi çıkış gücü sabit tutulmak istenen değer olan 5 MWatt'a gelince hatve açısı değişerek, çıkış gücünü 5 MWatt'ta sabit tutmuştur. Hatve açısının değişimi Şekil 3.20'de gösterilmektedir.

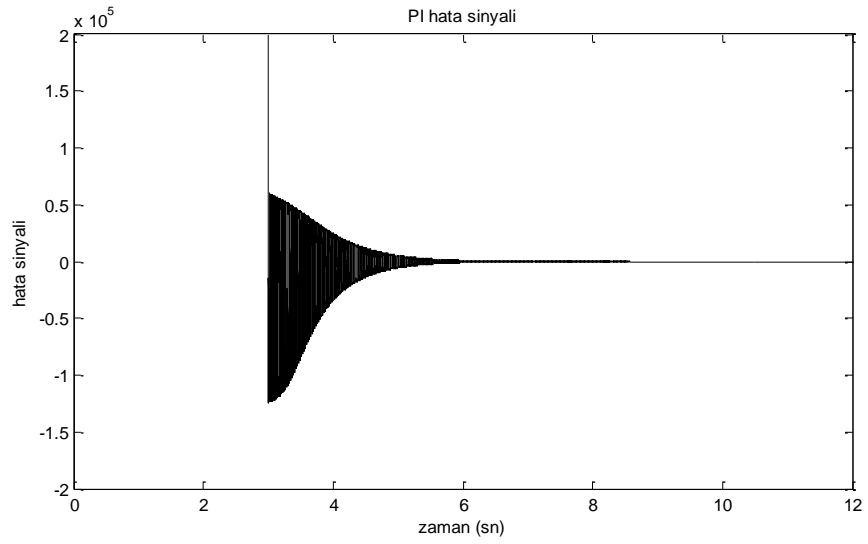


Şekil 3.20. PI kontrolör için hatve açısı-rüzgâr hızı grafiği

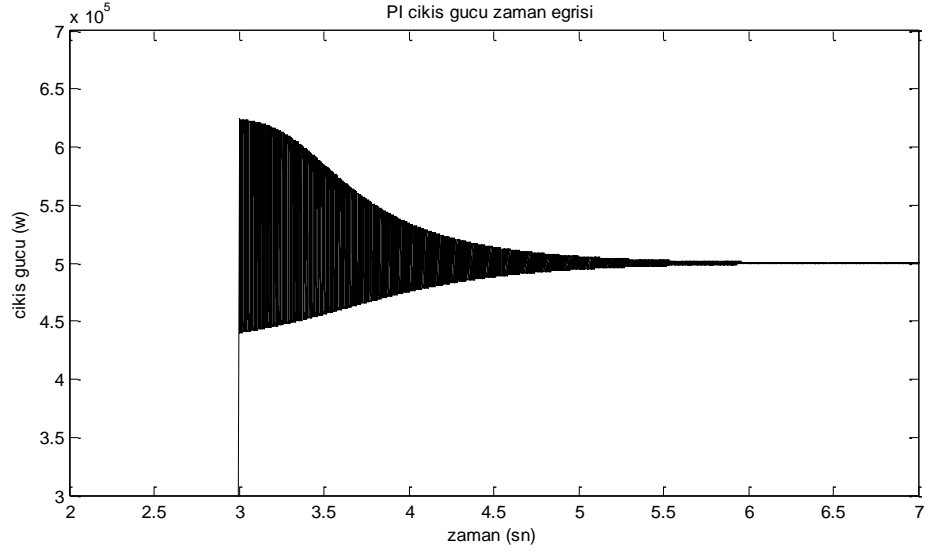
Simulasyonun ikinci kısmında rüzgâr hızı girişine basamak fonksiyonu şeklinde bir rüzgâr hızı değişimi uygulanmıştır. Bu Şekil 3.21'de gösterilmektedir. Bu giriş sinyaline PI kontrolörün cevabı; Şekil 3.22'de hata sinyali ve Şekil 3.23'de sistemin çıkış gücündeki değişim olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.21.PI kontrolör için basamak fonksiyonu şeklindeki rüzgâr hızı grafiği

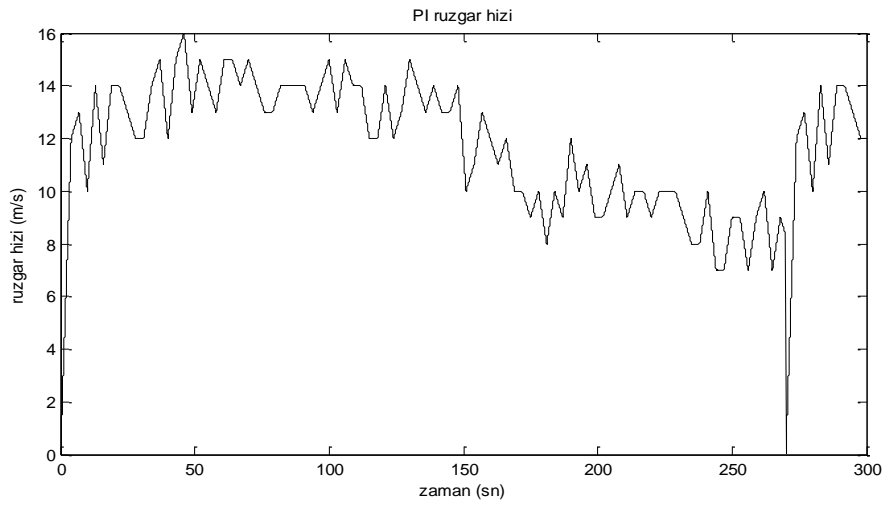


Şekil 3.22. PI kontrolörün basamak rüzgâr hızındaki hata değişim grafiği

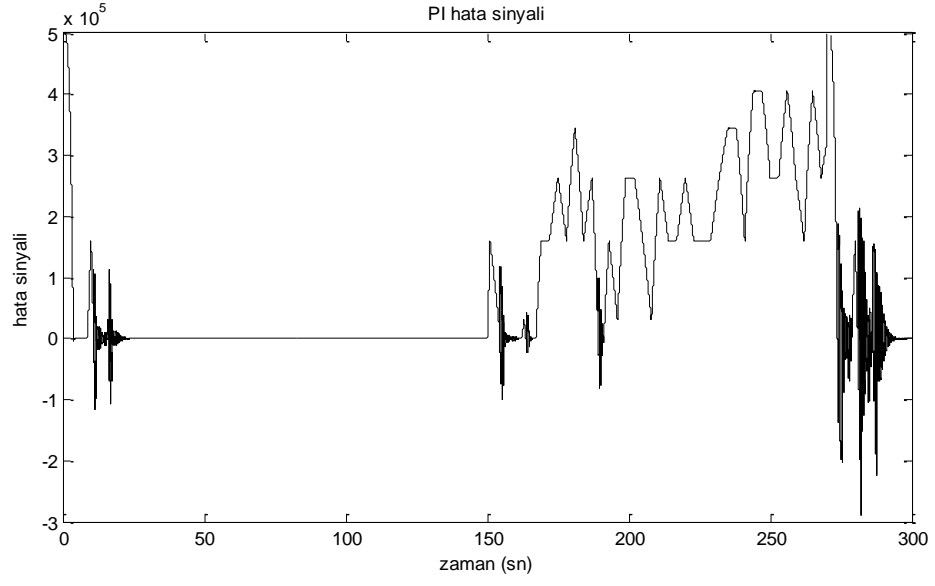


Şekil 3.23. PI kontrolörün basamak rüzgâr girişindeki çıkış gücü değişim grafiği

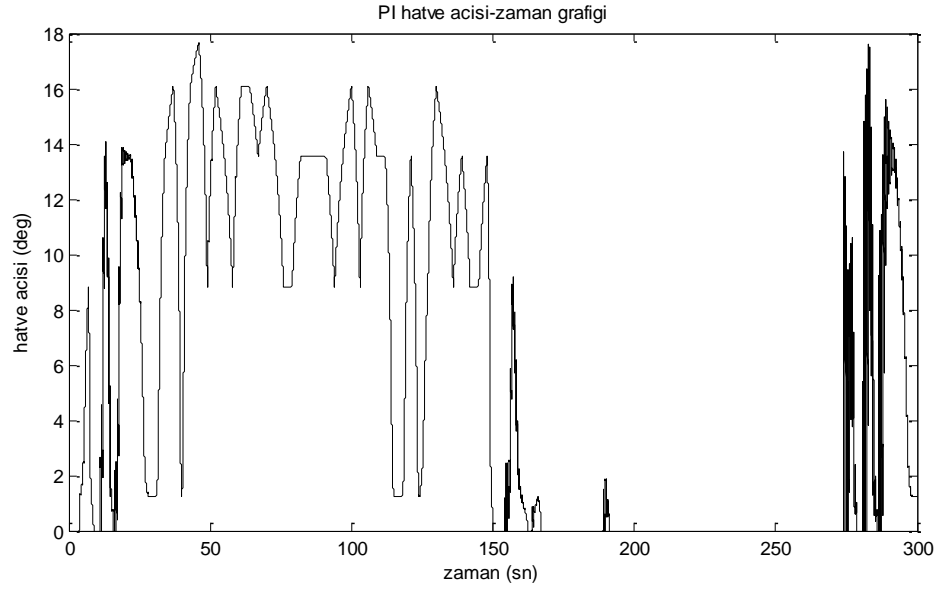
Daha sonra simülasyonun üçüncü kısmında, rüzgâr türbinine değişik rüzgâr hızları rastgele olarak uygulanmıştır. 300 sn boyunca 7 m/sn ile 16 m/sn arasında değişen rüzgâr hızları Şekil 3.24'de gösterilmiştir. PI kontrolörün bu rüzgâr hızı değişimine karşı tepkisi, hata değerindeki değişim Şekil 3.25'de, hatve açısındaki değişim Şekil 3.26'da, çıkış gücündeki değişim ise Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



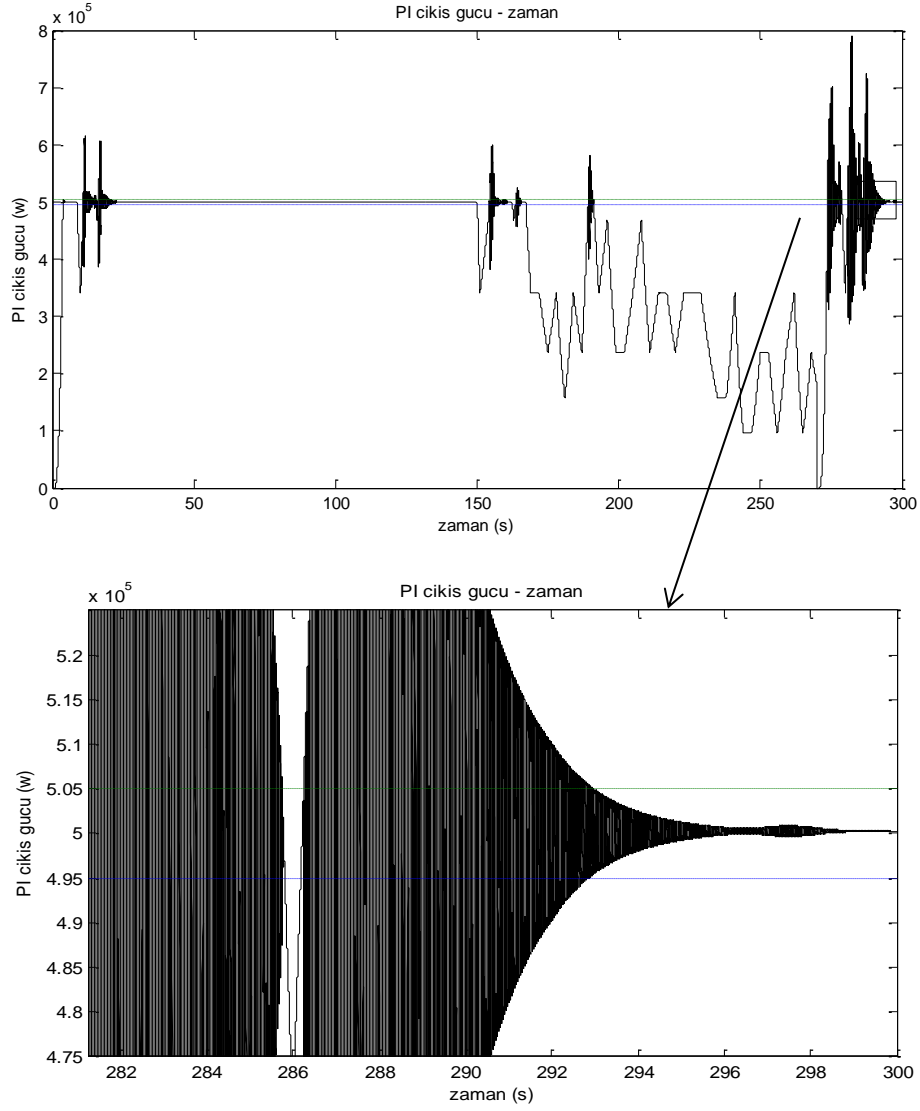
Şekil 3.24. PI kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızı değişim grafiği



Şekil 3.25. Değişik değerlerdeki rüzgâr hızında hata değerindeki değişim grafiği



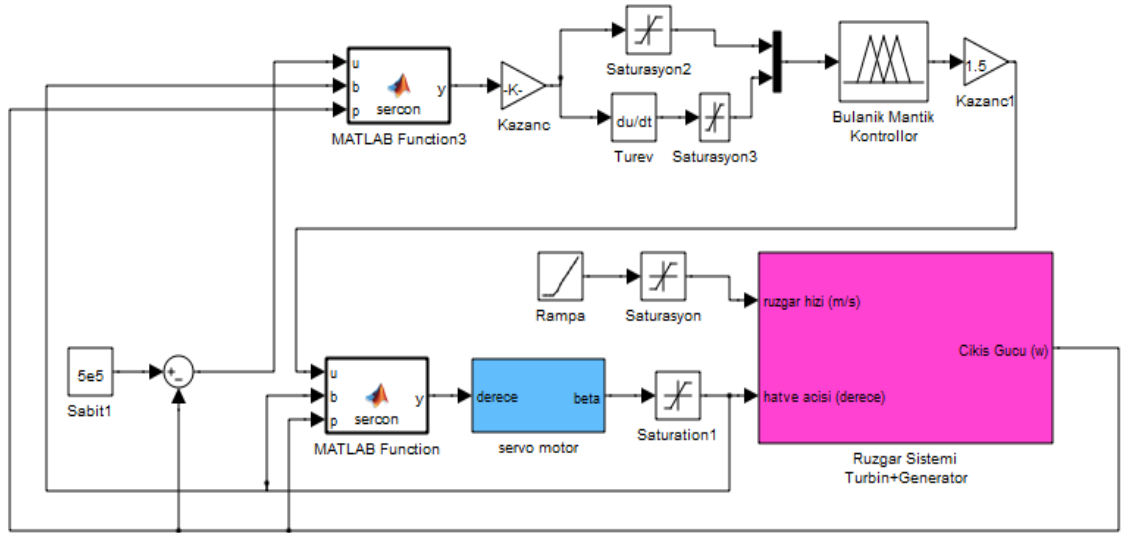
Şekil 3.26. Değişik değerlerdeki rüzgâr hızında hatve açısındaki değişim grafiği



Şekil 3.27. Değişik değerlerdeki rüzgâr hızında çıkış gücü değişimi

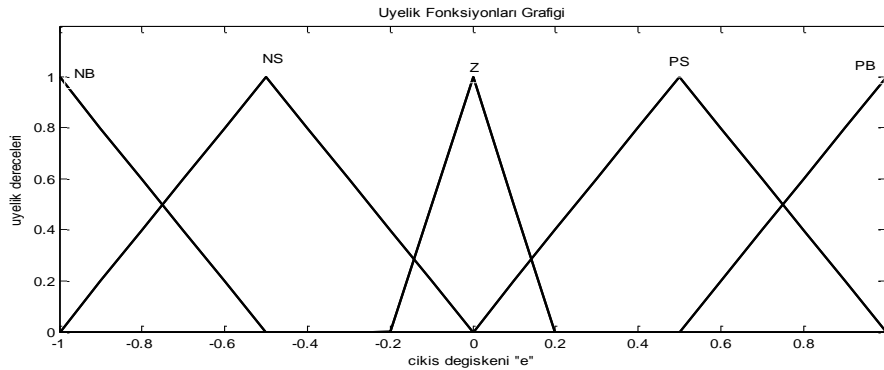
3.6. Rüzgâr Türbini için Bulanık Mantık Kontrolör Dizaynı

Modern kontrol yöntemleri içinde önemli yer tutan bulanık mantık kontrol sistemi ilk olarak 1965'te L. Zadeh tarafından önerilmiştir[76]. Bu çalışmada da, doğrusal olmayan rüzgâr enerji sistemleri için, bulanık mantık tabanlı bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Tasarlanan kontrolörde bulanık giriş değişkeni olarak hata ve hatanın değişimi alınmıştır. Kural tabanı ve bulanık çıkarım motoru olarak Mamdani yöntemi ve durulaştırma yöntemi olarak sentroid kullanılmıştır. Çıkış değişkeni β açısındaki değişim miktarıdır. Bulanık mantık kontrol sisteminin blok şeması Şekil 3.28'de verilmiştir.

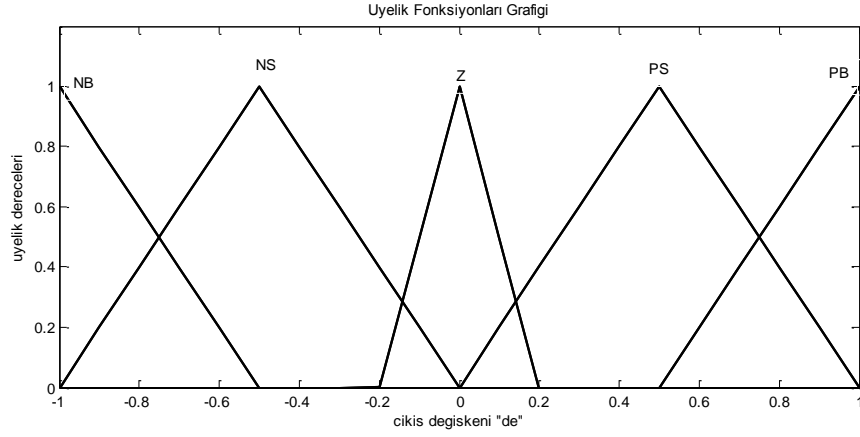


Şekil 3.28. Bulanık mantık kontrolör sistem blok şeması

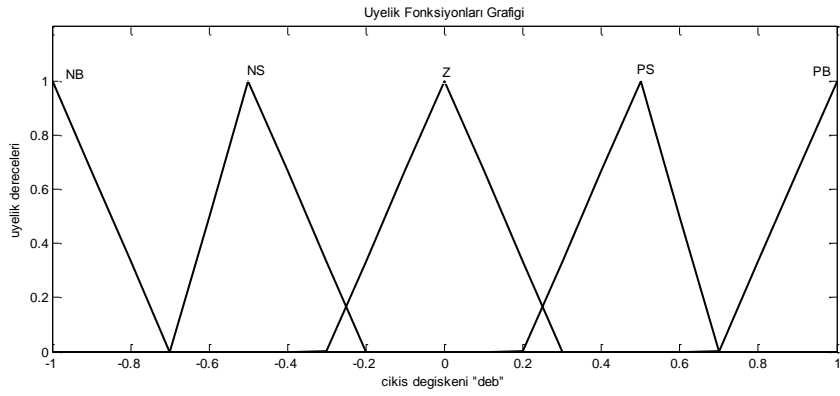
Sistemde sırasıyla, bulanıklaştırma, kural tabanına uygulama ve durulaştırma işlemleri yapılmaktadır. Bulanık mantık kontrolörün çıkışı dc servo motora giriş olmak üzere gönderilir. Servo motorun girişinde kontrolörün çalışma bölgesi kontrol edilip, gerekirse hatve açısı değiştirilir. Böylece çıkış gücü istenilen değerde sabit tutulmuş olur. Bu işlemlerde kullanılan hata girişi üyelik fonksiyonları Şekil 3.29’da, hatanın değişimi üyelik fonksiyonları Şekil 3.30’da gösterilmiştir. Aynı şekilde, çıkış değişkeni β açısındaki değişim miktarının üyelik fonksiyonları da Şekil 3.31’de verilmiştir.



Şekil 3.29. Giriş değişkeni hatanın bulanık kümeleri



Şekil 3.30. Giriş değişkeni hata değişiminin kümeleri



Şekil 3.31. Çıkış değişkeni beta açısındaki değişim miktarının bulanık kümeleri

Giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki bağıntıyı gösteren kural çizelgesi Çizelge 3.3'de ve bulanık mantık kural tablosu Çizelge 3.4'de gösterilmiştir. Burada NB: Negatif Büyük; NK: Negatif Küçük; S:Sıfır; PK: Pozitif Küçük ve PB: Pozitif Büyük olmaktadır.

Çizelge 3.3. Bulanık mantık kontrolör kural çizelgesi

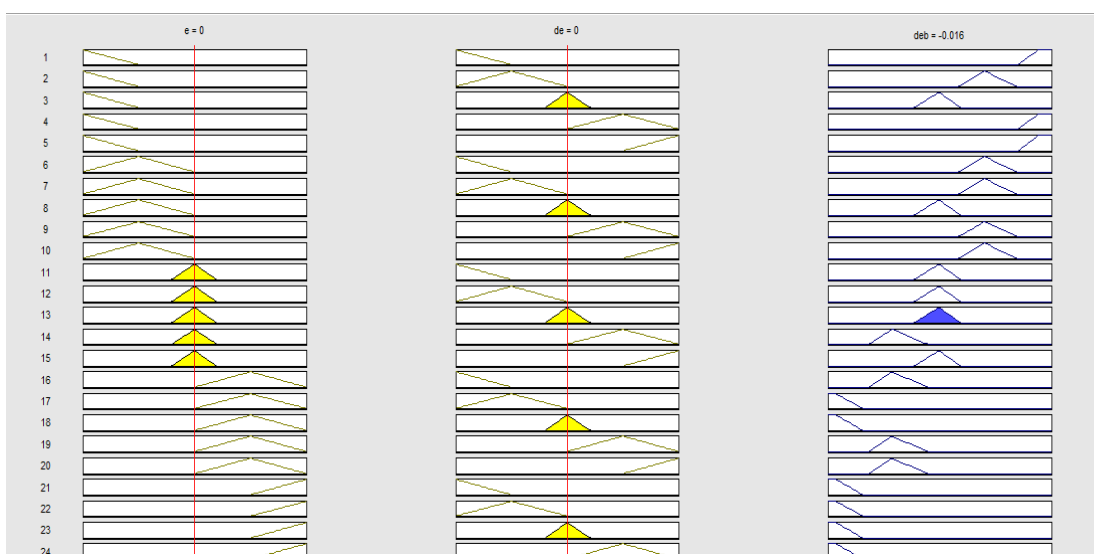
		de				
		NB	NK	S	PK	PB
e	NB	PB	PK	S	PB	PB
	NK	PK	PK	S	PK	PK
	S	S	S	S	NK	S
	PK	NK	NB	NB	NK	NK
	PB	NB	NB	NB	NB	NB

Çizelge 3.4. Bulanık mantık kuralları

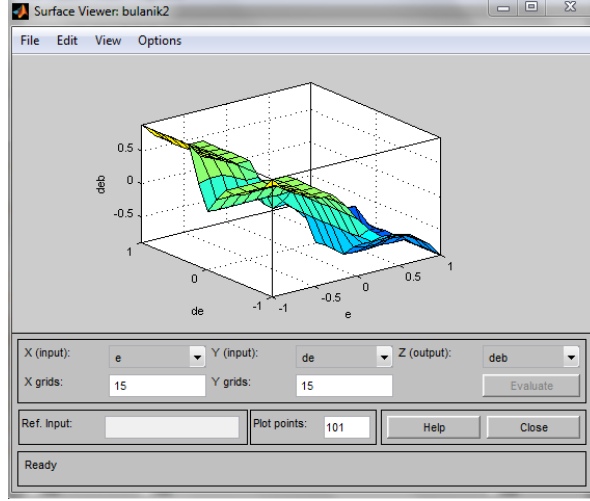
Bulanık Mantık Kural Tablosu
1. Eğer e= nb ise ve de= nb ise, deb= pb yap.
2. Eğer e= nb ise ve de= nk ise, deb= pk yap.
3. Eğer e= nb ise ve de= s ise, deb= s yap.
4. Eğer e= nb ise ve de= pk ise, deb= pb yap.
5. Eğer e= nb ise ve de= pb ise, deb= pb yap.
6. Eğer e= nk ise ve de= nb ise, deb= ps yap.
7. Eğer e= nk ise ve de= nk ise, deb= ps yap.
8. Eğer e= nk ise ve de= s ise, deb= s yap.
9. Eğer e= nk ise ve de= pk ise, deb= ps yap.
10. Eğer e= nk ise ve de= spb ise, deb= ps yap.
11. Eğer e= s ise ve de= nb ise, deb= s yap.
12. Eğer e= s ise ve de= nk ise, deb= s yap.
13. Eğer e= s ise ve de= s ise, deb= s yap.
14. Eğer e= s ise ve de= pk ise, deb= ns yap.
15. Eğer e= s ise ve de= pb ise, deb= s yap.
16. Eğer e= pk ise ve de= nb ise, deb= ns yap.
17. Eğer e= pk ise ve de= nk ise, deb= nb yap.
18. Eğer e= pk ise ve de= s ise, deb= nb yap.
19. Eğer e= pk ise ve de= pk ise, deb= ns yap.
20. Eğer e= pk ise ve de= pb ise, deb= ns yap.
21. Eğer e= pb ise ve de= nb ise, deb= nb yap.

- | |
|---|
| 22. Eğer $e = pb$ ise ve $de = nk$ ise, $deb = nb$ yap. |
| 23. Eğer $e = pb$ ise ve $de = s$ ise, $deb = nb$ yap. |
| 24. Eğer $e = pb$ ise ve $de = pk$ ise, $deb = nb$ yap. |
| 25. Eğer $e = pb$ ise ve $de = pb$ ise, $deb = nb$ yap. |

Matlab kural çizelgesi kümeleri Şekil 3.32’de, bulanık mantık kontrolör giriş ve çıkış değişkenleri üç boyutlu grafiği Şekil 3.33’de gösterilmiştir.

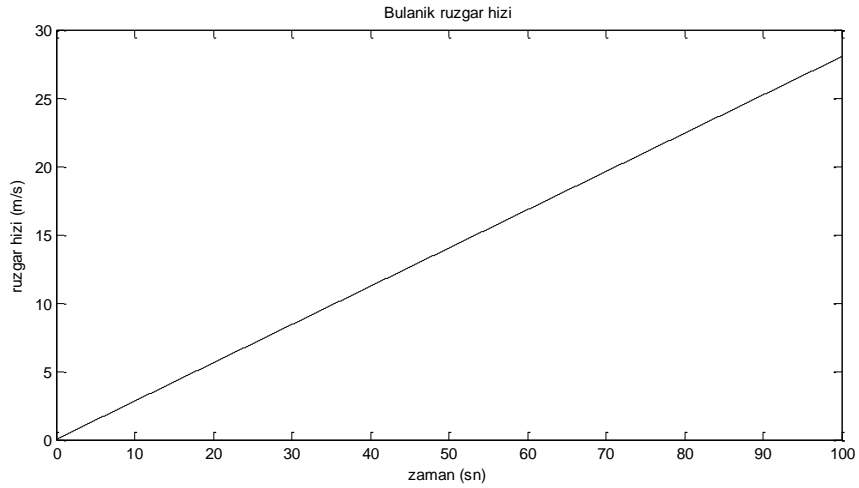


Şekil 3.32. Matlab kural çizelgesi kümeleri

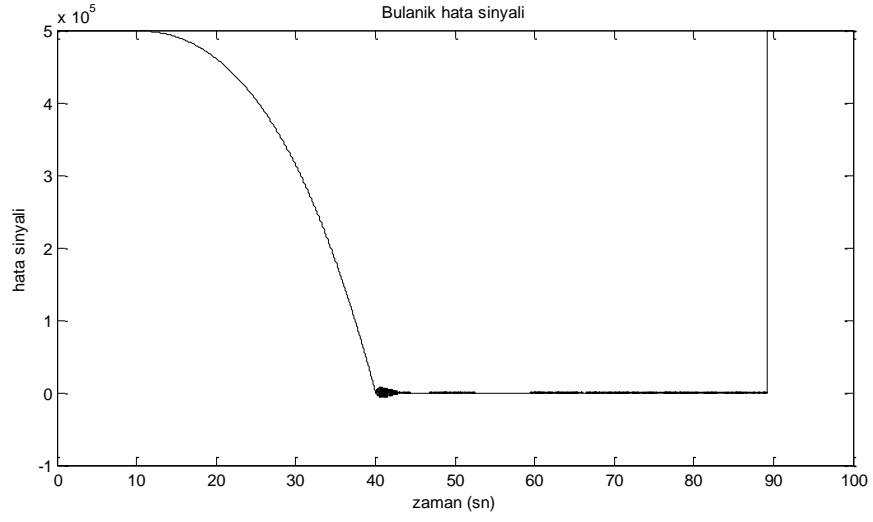


Şekil 3.33. Bulanık mantık kontrolör giriş ve çıkış değişkenleri üç boyutlu grafiği

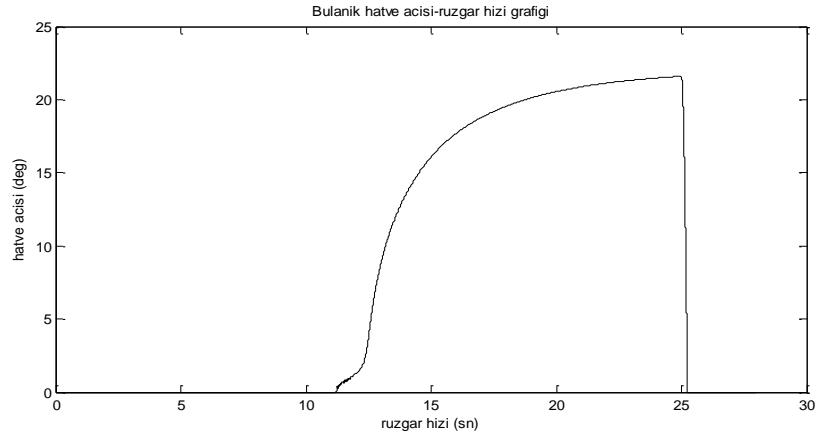
Bulanık mantık denetleyici ile rüzgâr türbininin çıkış gücünün denetlenmesi simülasyonunda PI kontrolörde olduğu gibi üç çeşit rüzgâr hızı fonksiyonu kullanılmıştır. İlk önce Şekil 3.34’de gösterildiği gibi bir rampa fonksiyonu kullanılmış. Alınan simülasyon sonuçları hata sinyali değişimi Şekil 3.35’de, hatve açısı değişimi Şekil 3.36’da, çıkış gücündeki değişim Şekil 3.37’de gösterilmiştir.



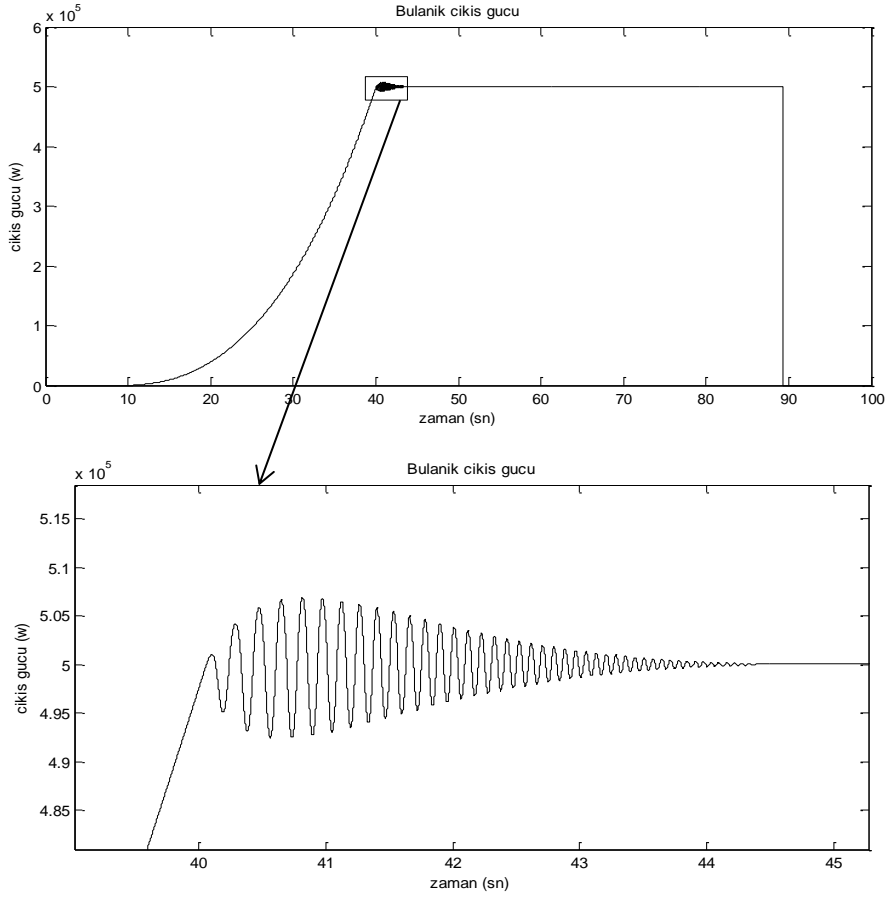
Şekil 3.34. Bulanık mantık kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızı-zaman grafiği



Şekil 3.35. Bulanik mantık kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızındaki hata değişimi grafiği

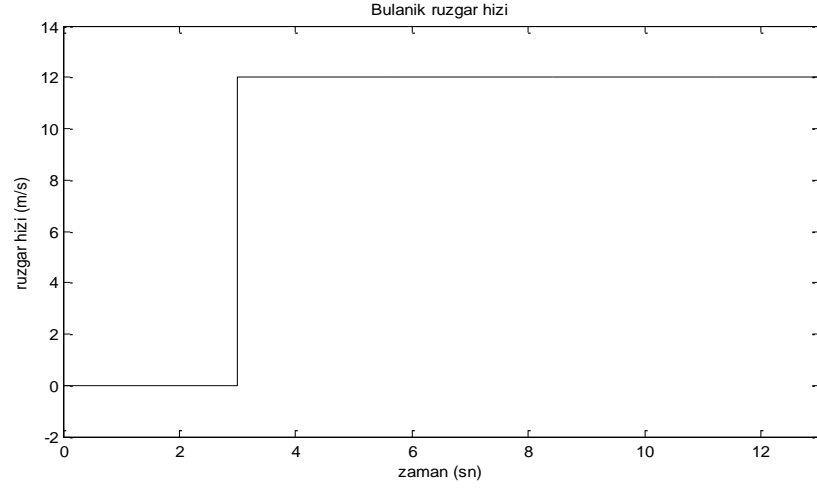


Şekil 3.36. Bulanik mantık kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızındaki hatve açısı değişim grafiği

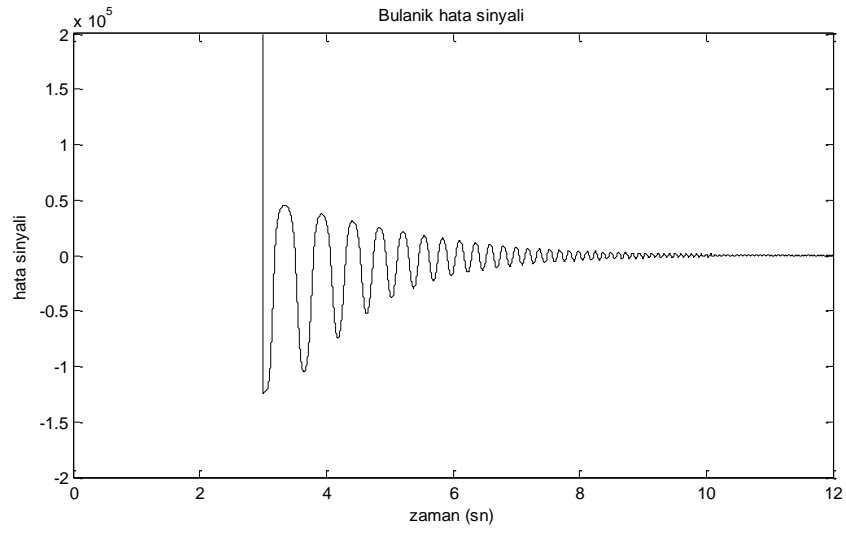


Şekil 3.37. Bulanık mantık kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızında çıkış gücü grafiği

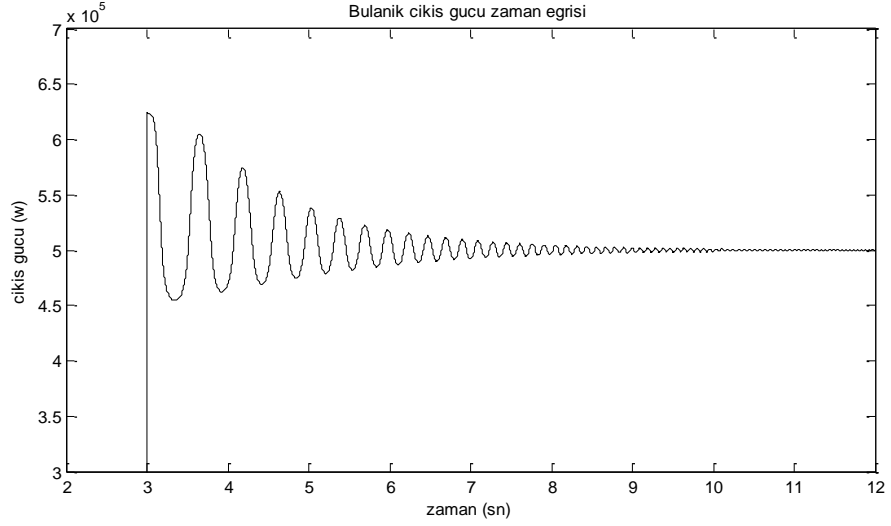
Daha sonra simülasyon, basamak fonksiyonu şeklindeki rüzgâr hızı için de yapılmıştır. Rüzgâr hızı Şekil 3.38’de gösterilmiştir. Bulanık mantık kontrolörün hata değişimi Şekil 3.39’da, çıkış gücü Şekil 3.40’da gösterilmiştir.



Şekil 3.38. Bulanık mantık kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızı

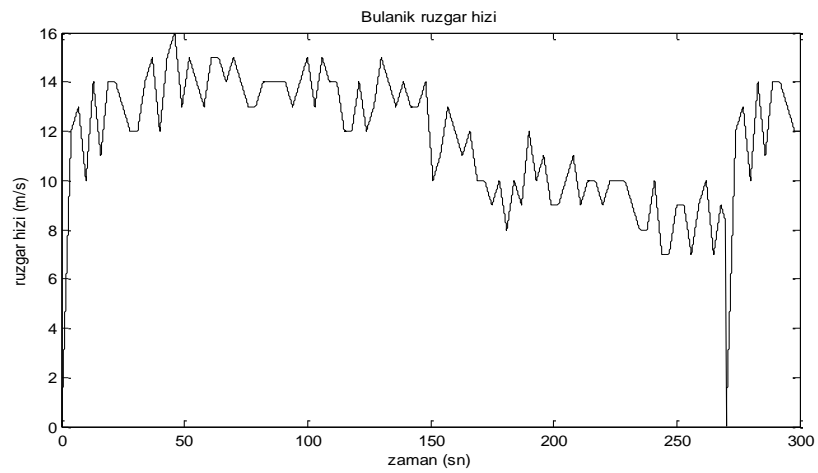


Şekil 3.39. Bulanık mantık kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızındaki hata değişim grafiği

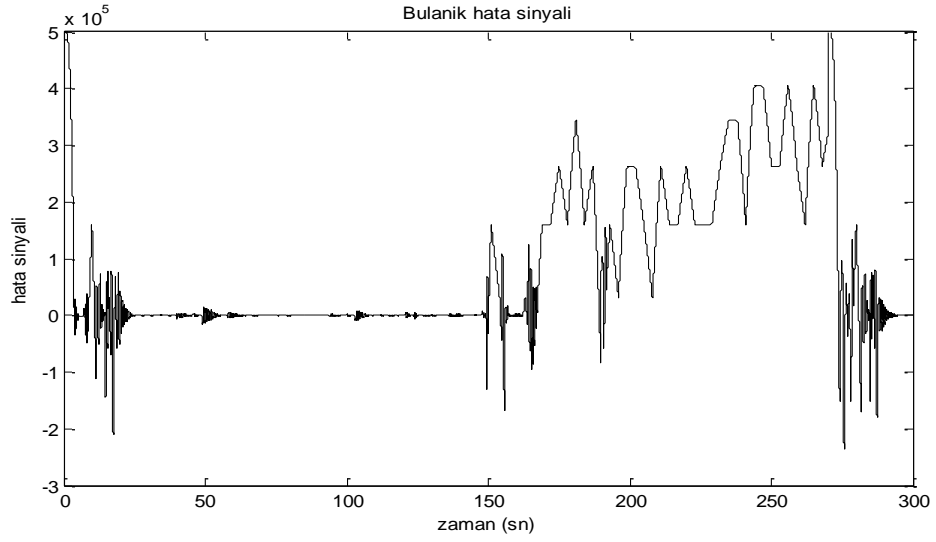


Şekil 3.40. Bulanık mantık kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızındaki çıkış gücü değişim grafiği

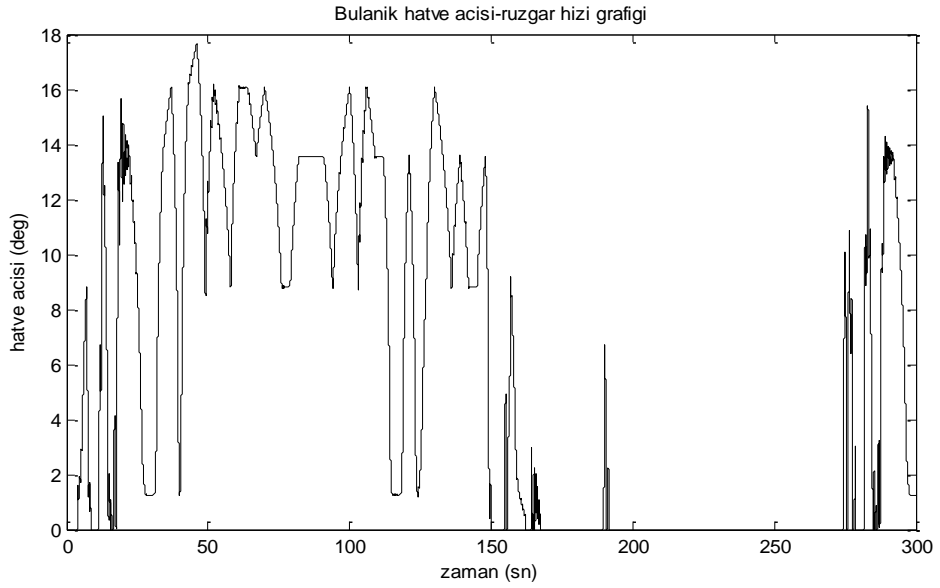
Simülasyonun üçüncü kısmında rüzgâr türbininin girişine Şekil 3.41'deki gibi rüzgâr hızı değişim sinyali uygulanmıştır. Bulanık mantık kontrolörün hata sinyali değişimi Şekil 3.42'de, hatve açısındaki değişim Şekil 3.43'de, çıkış gücü değişimi Şekil 3.44'de gösterilmiştir.



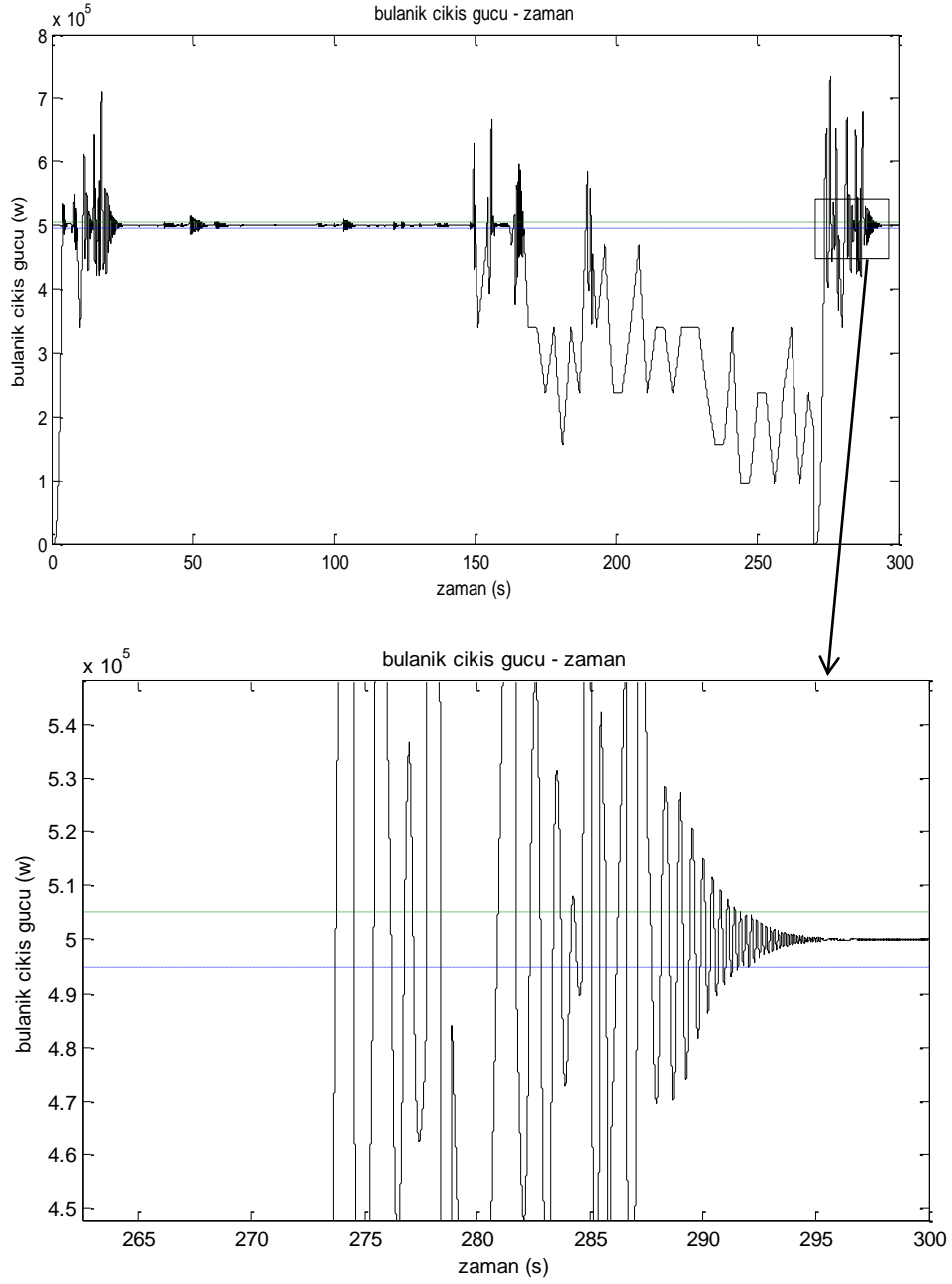
Şekil 3.41. Bulanık mantık kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızı değişim grafiği



Şekil 3.42. Bulanık mantık kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki hata sinyalinin değişim grafiği



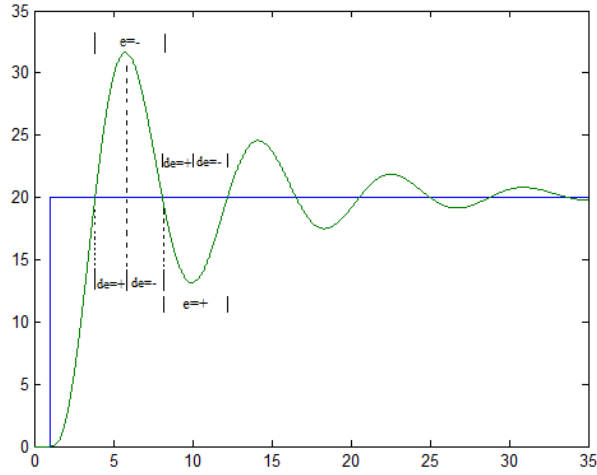
Şekil 3.43. Bulanık mantık kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki hatve açısının değişim grafiği



Şekil 3.44. Bulanık mantık kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki çıkış gücü değişim grafiği

3.7. Rüzgâr Türbini için Bulanık PID Kontrolör Dizaynı

Bulanık PID kontrol yönteminde katsayıların bulanık mantık ile ayarlanmasında referans olarak alınan grafik yapı Şekil 3.45’de gösterilmiştir.



Şekil 3.45. Bulanık PID Kontrolör hata ve hata değişim grafiği

Hatanın negatif olduğu yerde ölçülen değer referans sinyalini büyük ölçüde geçmiş demektir. Bu durumda K_p azaltılır, K_i ve K_d değerleri küçük tutulur. Hatanın türevinin pozitif olduğu yerde K_p 'nin azaltılması hızlandırılırken, hatanın türevinin negatif olduğu yerde K_p 'nin azaltılması yavaşlatılır.

Hatanın pozitif olduğu yerde referans sinyali, ölçülen değerden büyüktür. Dolayısıyla ölçülen değeri büyütecek şekilde katsayılar ayarlanmalıdır. Bu da K_p 'nin daha büyük K_d 'nin ise daha küçük olmasıyla olur. Bu arada hatanın türevinin pozitif olduğu yerde K_p 'nin büyümesi hızlandırılırken, hatanın türevinin negatif olduğu yerde aşmaları önlemek için K_p 'nin büyümesi yavaşlatılır.

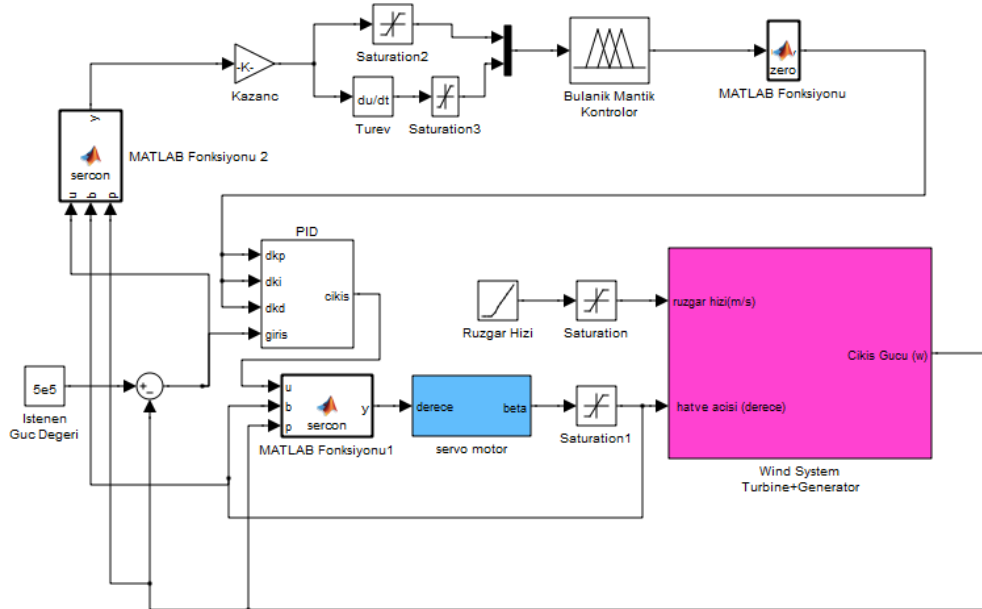
Bulanık mantık PID kontrolör dizaynında en önemli kısım kazançların çizelgeler yardımıyla hesaplanmasıdır. Burada temel mantık şöyledir: hatanın negatif olduğu yerde ölçülen değer referans sinyalini büyük ölçüde geçmiş demektir. Bu durumda K_p azaltılır, K_i ve K_d değerleri küçük tutulur. Hatanın türevinin pozitif olduğu yerde K_p 'nin azaltılması hızlandırılırken, hatanın türevinin negatif olduğu yerde K_p 'nin azaltılması yavaşlatılır. Hatanın pozitif olduğu yerde referans sinyali, ölçülen değerden büyüktür. Dolayısıyla ölçülen değeri büyütecek şekilde katsayılar ayarlanmalıdır. Bu da K_p 'nin daha büyük K_d 'nin ise daha küçük olmasıyla olur. Bu

arada hatanın türevinin pozitif olduğu yerde K_p 'nin büyümesi hızlandırılırken, hatanın türevinin negatif olduğu yerde aşmaları önlemek için K_p 'nin büyümesi yavaşlatılır. Çizelge 3.5'de bu duruma ait kural çizelgesi gösterilmektedir.

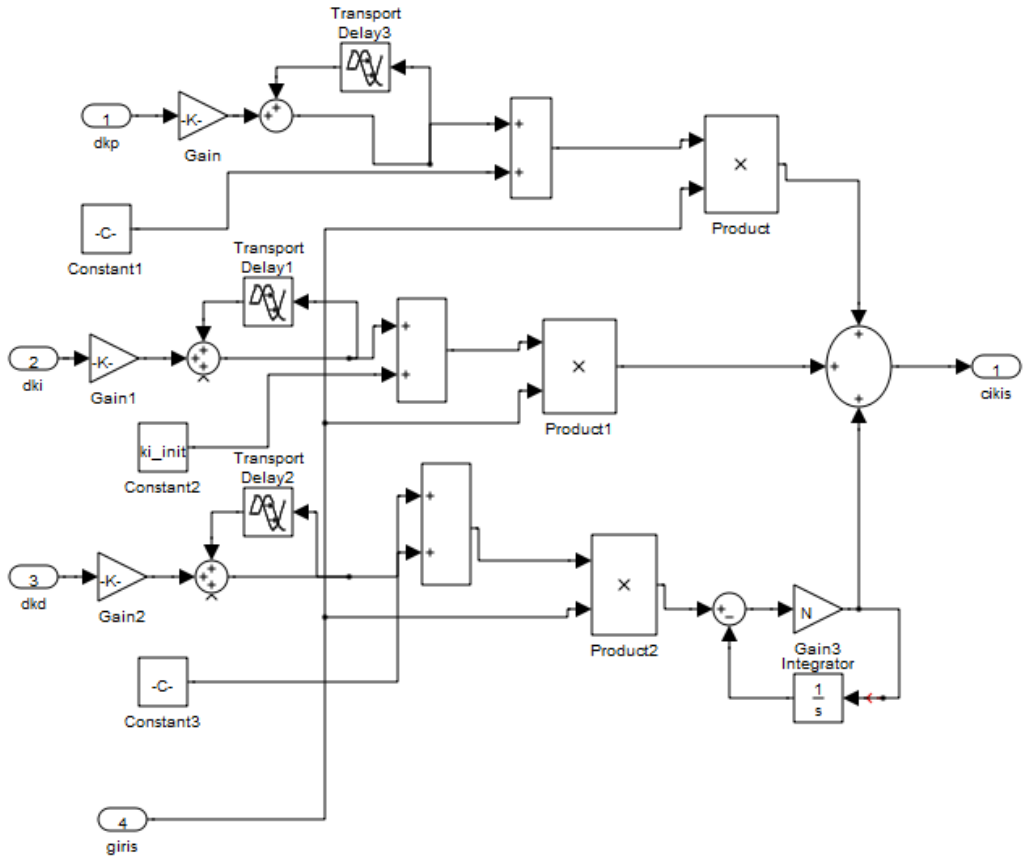
Çizelge 3.5. Bulanık PID Kontrolör kural Çizelgesi

		de		
		P	S	N
e	P	NB	NM	NS
	S	S	S	S
	N	PS	PM	PB

Matlab/Simulink bulanık PID kontrolör sisteminin blok şeması Şekil 3.46, PID kontrol bloğunun iç yapısı Şekil 3.47'de gösterilmiştir.

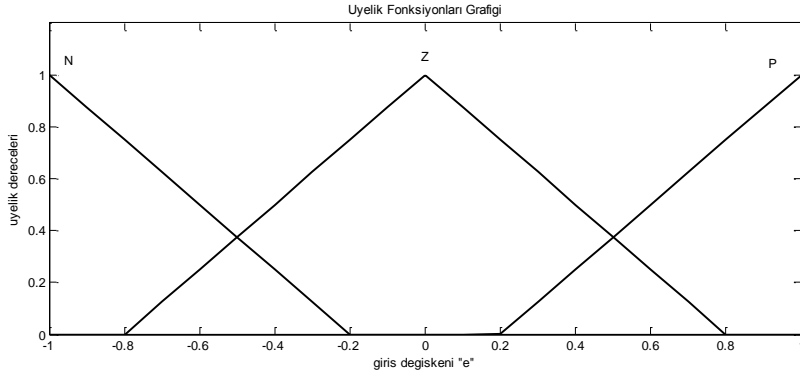


Şekil 3.46. Bulanık PID Kontrolör sistem blok şeması

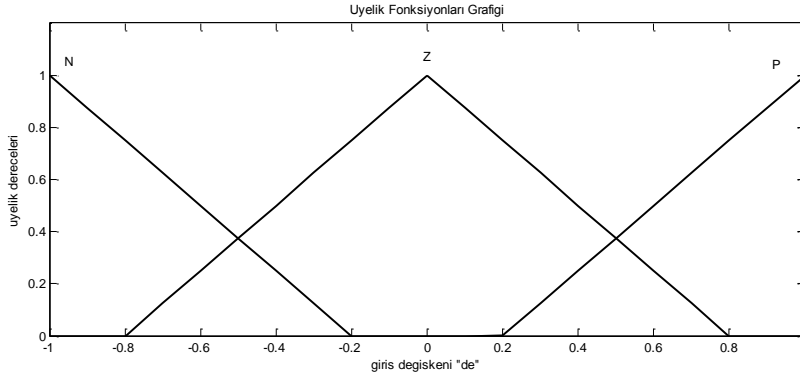


Şekil 3.47. PID kontrolör iç yapısı

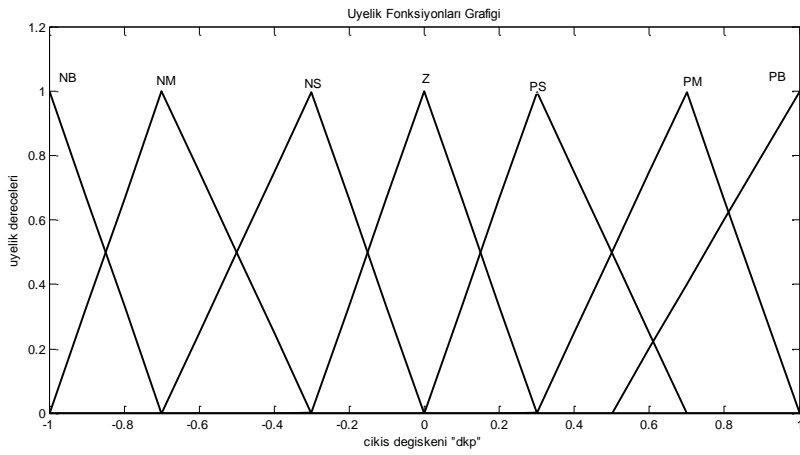
Bulanık mantık kontrolör, çıkış sinyalindeki hatayı referans olarak, belirlenen bulanık mantık kural tabanına göre PID katsayılarının değişim miktarını belirler. Şekil 3.48’de giriş hata sinyalinin bulanık kümeleri, Şekil 3.49’da giriş hatanın değişimi sinyalinin bulanık kümeleri, Şekil 3.50’de PID katsayılarının değişimini gösteren çıkış bulanık kümeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.48. Giriş hata sinyali bulanık kümeleri



Şekil 3.49. Giriş hatanın değışimi sinyali bulanık kümeleri



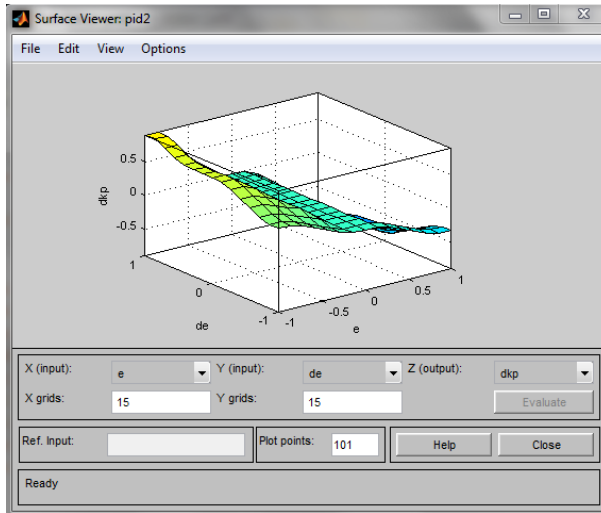
Şekil 3.50. Çıkış katsayı değışimi bulanık kümeleri

Çizelge 3.6'da ise bulanık PID kontrolörün giriş ve çıkışları arasındaki bulanık bağıntıyı gösteren kural çizelgesi verilmiştir.

Çizelge 3.6. Bulanık PID kontrolörün kural Çizelgesi

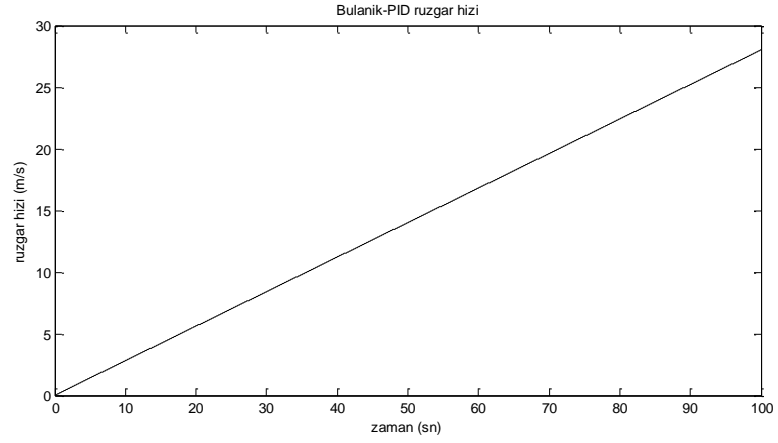
1	Eğer $e = P$ ise ve $de = P$ ise, $dkp = NB$ yap.
2	Eğer $e = P$ ise ve $de = Z$ ise, $dkp = NM$ yap.
3	Eğer $e = P$ ise ve $de = N$ ise, $dkp = NS$ yap.
4	Eğer $e = Z$ ise ve $de = P$ ise, $dkp = Z$ yap.
5	Eğer $e = Z$ ise ve $de = Z$ ise, $dkp = Z$ yap.
6	Eğer $e = Z$ ise ve $de = N$ ise, $dkp = Z$ yap.
7	Eğer $e = N$ ise ve $de = P$ ise, $dkp = PS$ yap.
8	Eğer $e = N$ ise ve $de = Z$ ise, $dkp = PM$ yap.
9	Eğer $e = N$ ise ve $de = N$ ise, $dkp = PB$ yap.

Matlab/Simulink bulanık PID kontrolör giriş ve çıkış değişkenleri üç boyutlu grafiği Şekil 3.51'de gösterilmiştir.

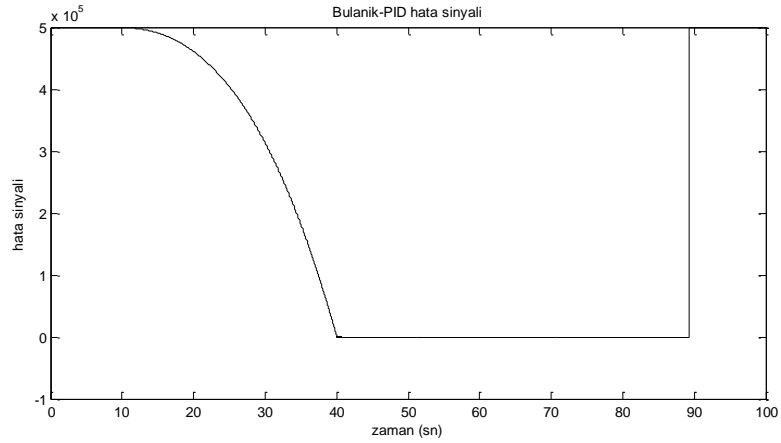


Şekil 3.51. Bulanık PID kontrolör giriş ve çıkış değişkenleri üç boyutlu grafiği

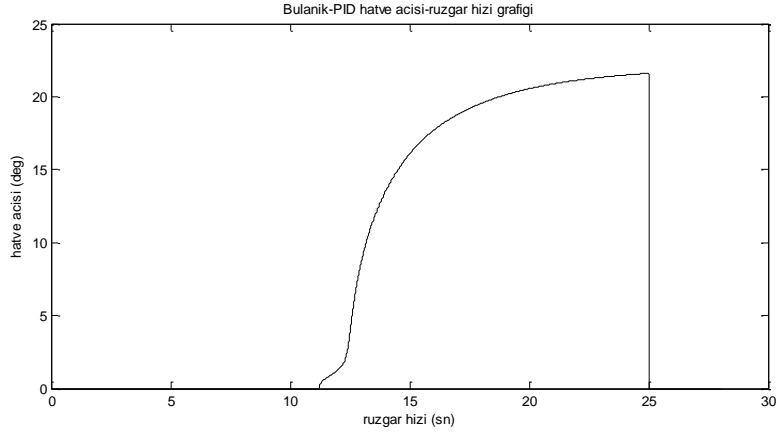
Bulanık PID kontrollü rüzgâr sisteminin rüzgâr hızı girişine Şekil 3.52'deki gibi bir rampa fonksiyonu uygulanmıştır. Bulanık PID hata sinyal değişimi Şekil 3.53'de, hatve açısının değişimi Şekil 3.54'de, çıkış gücü değişimi Şekil 3.55'de gösterilmiştir.



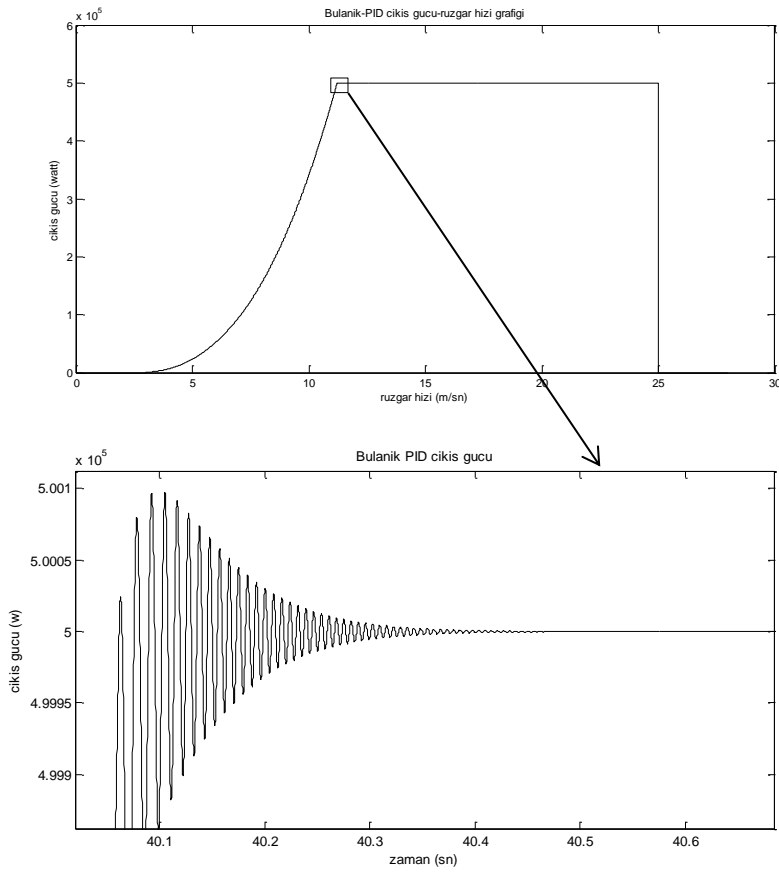
Şekil 3.52. Bulanık PID kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızı-zaman grafiği



Şekil 3.53. Bulanık PID kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızındaki hata değişimi grafiği

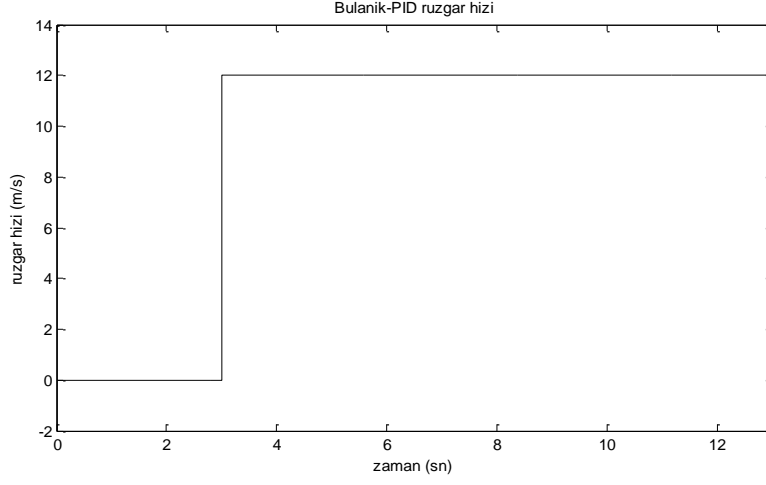


Şekil 3.54. Bulanık PID kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızındaki hatve açısı değişim grafiği

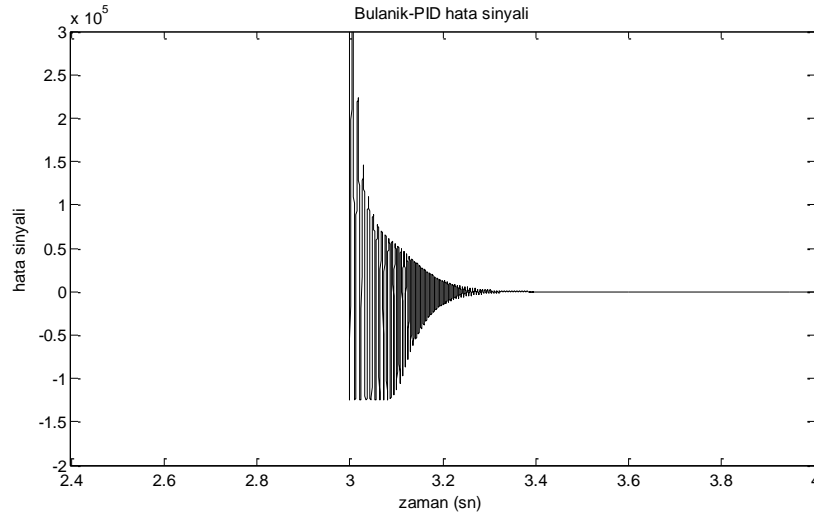


Şekil 3.55. Bulanık PID kontrolör için rampa fonksiyonu rüzgâr hızında çıkış gücü grafiği

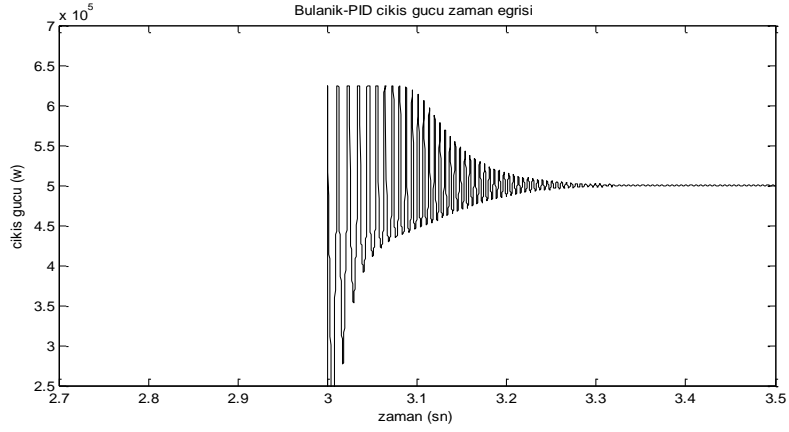
İkinci olarak; bulanık PID kontrollü rüzgâr sisteminin rüzgâr hızı girişine Şekil 3.56'daki gibi bir adım fonksiyonu uygulanmıştır. Bulanık PID hata sinyal değişimi Şekil 3.57'de, çıkış gücü değişimi Şekil 3.58'de gösterilmiştir.



Şekil 3.56. Bulanık PID kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızı

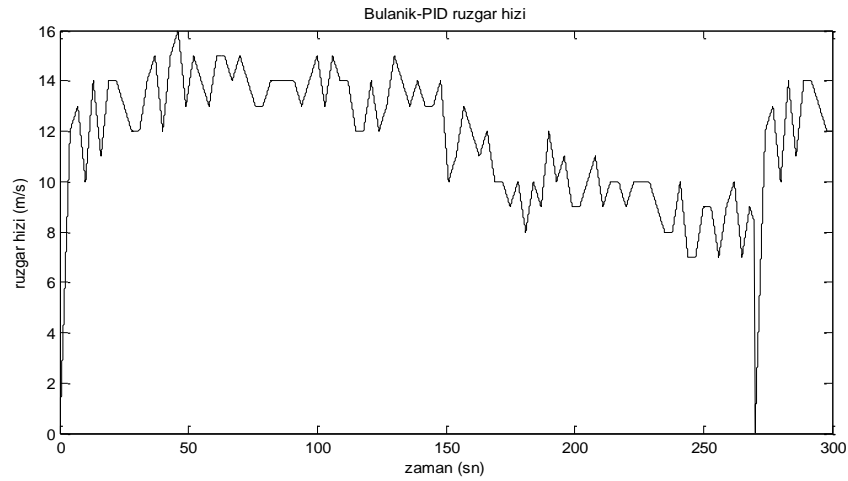


Şekil 3.57. Bulanık PID kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızındaki hata değişim grafiği

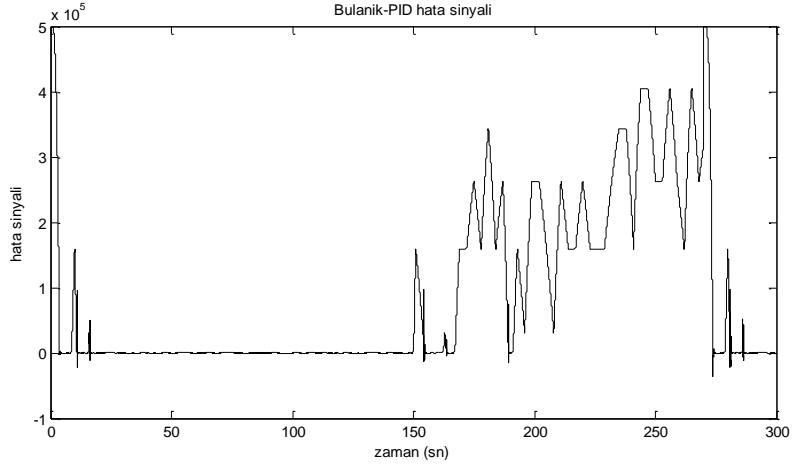


Şekil 3.58. Bulanık PID kontrolör için basamak fonksiyonu rüzgâr hızındaki çıkış gücü değişim grafiği

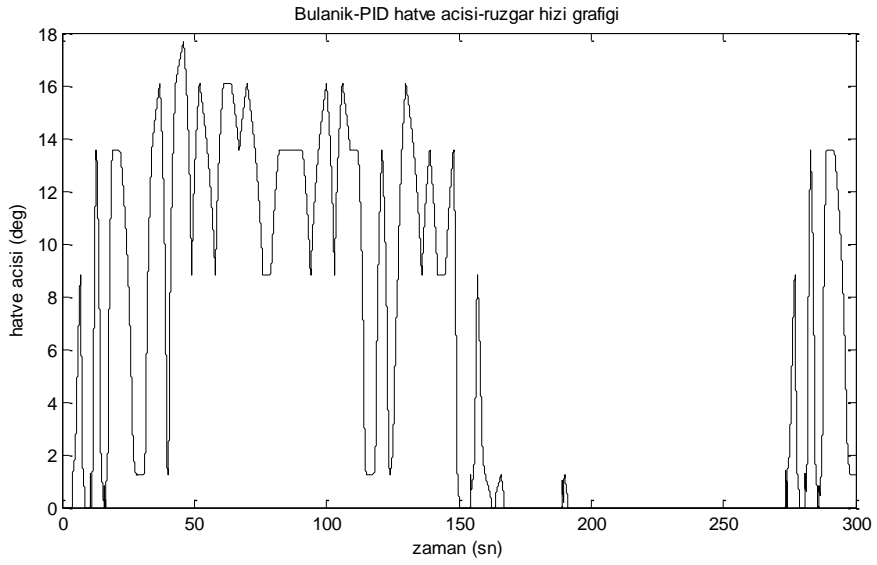
Üçüncü olarak bulanık PID kontrollü rüzgâr sisteminin rüzgâr hızı girişine Şekil 3.59'daki gibi bir rüzgâr hızı fonksiyonu uygulanmıştır. Bulanık PID hata sinyal değişimi Şekil 3.60'da, hatve açısının değişimi Şekil 3.61'de, çıkış gücü değişimi Şekil 3.62'de gösterilmiştir.



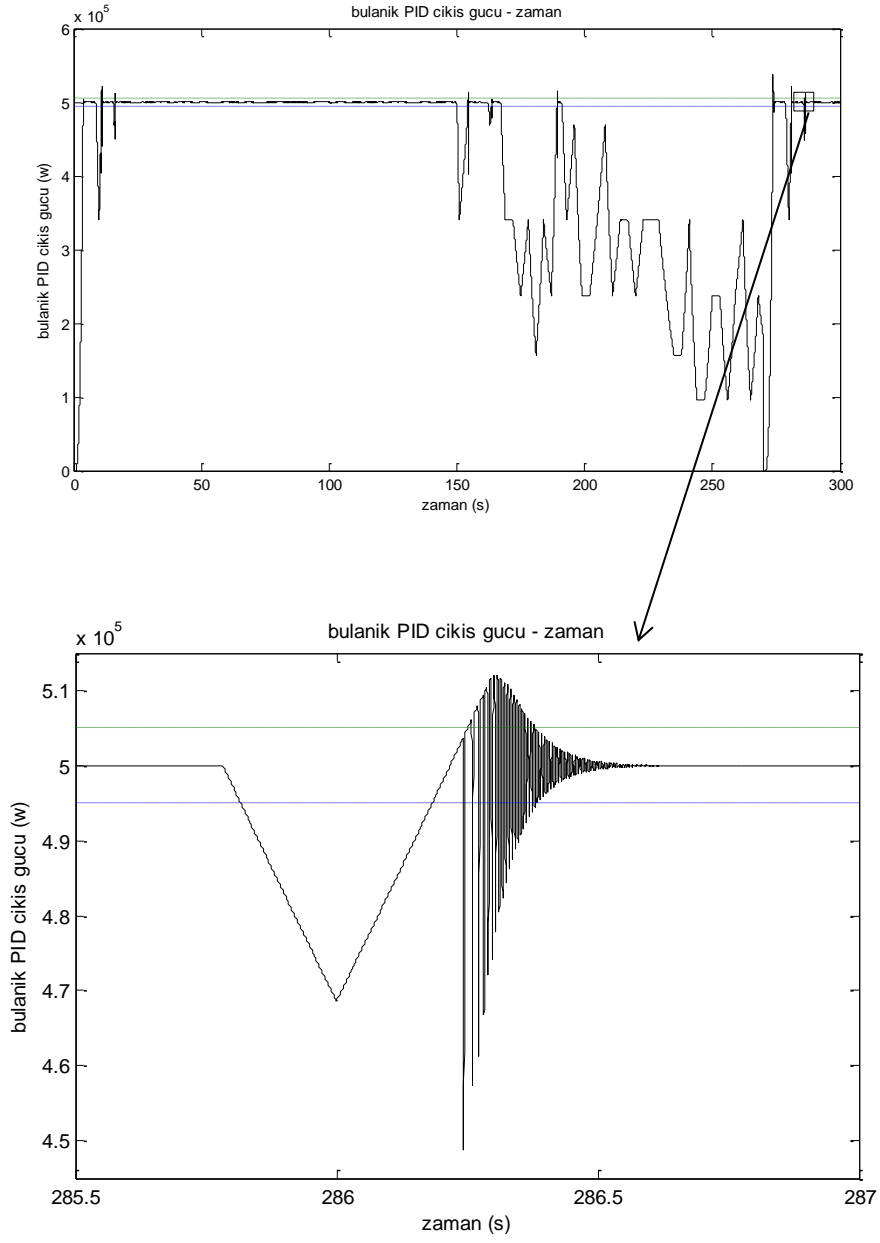
Şekil 3.59. Bulanık PID kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızı değişim grafiği



Şekil 3.60. Bulanık PID kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki hata sinyalinin değişim grafiği



Şekil 3.61. Bulanık PID kontrolörde değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki hatve açısının değişim grafiği



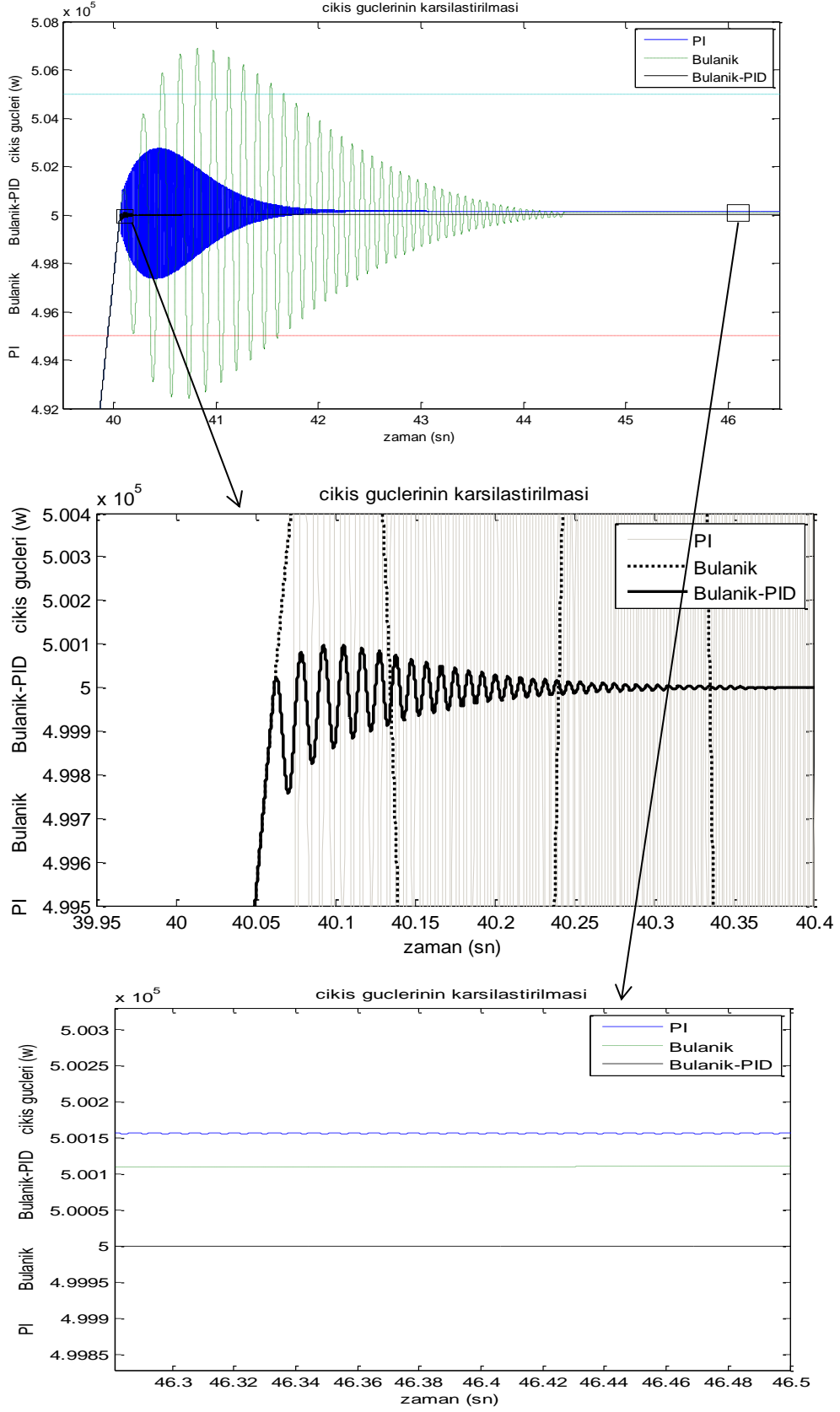
Şekil 3.62. Bulanık PID kontrolör için değişik değerlerdeki rüzgâr hızındaki çıkış gücü değişim grafiği

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Matlab Simülasyon Sonuçları

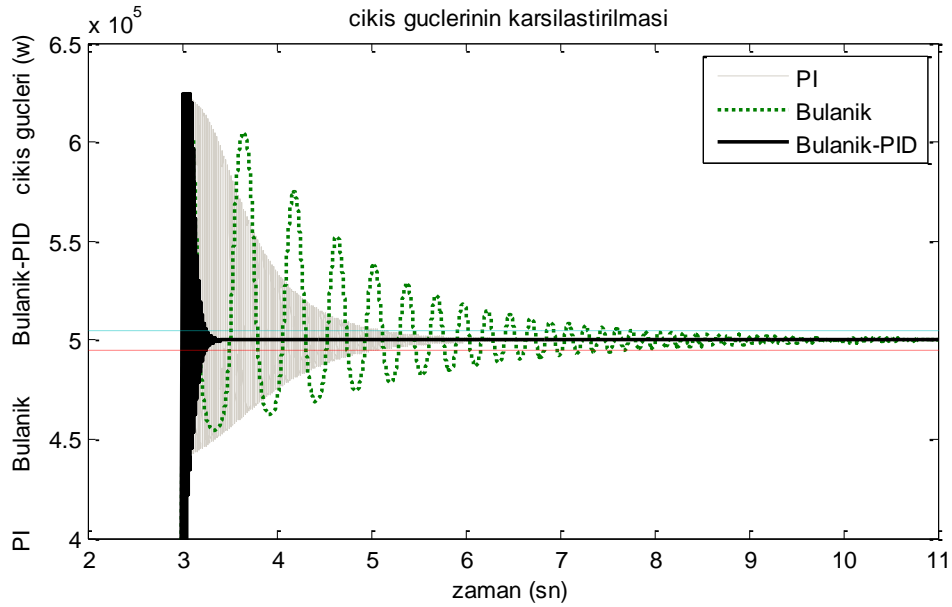
Simülasyon üç bölümde gerçekleştirilmiştir. Her bölümün altında üç değişik rüzgâr hızı fonksiyonu ile simülasyon yapılmıştır. Birinci olarak bütün sistemlere Şekil 3.17'deki gibi bir rampa fonksiyonu rüzgâr hızı olarak verilmiş, $t=0$ sn anında 0 m/sn ile başlayarak, 100. sn'de 27 m/sn'ye ulaşmıştır. Sistem devreye girme hızı olan 3 m/s'de enerji üretmeye başlamıştır. Nominâl rüzgâr hızı olan 12 m/s'ye kadar sistem çıkış gücü, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olarak Şekil 3.19'da gösterildiği gibi artmıştır. Sistemlerin hata sinyalleri Şekil 3.18, Şekil 3.35 ve Şekil 3.53'de gösterildiği gibi güç eğrisinin tam tersidir. Sistem yaklaşık 40. saniyede nominâl çıkış gücü olan 500 kW'a ulaşmıştır. Rüzgâr hızı artmaya devam ederken, kontrolörler çıkış gücünü 500 kW'da tutabilmek için Şekil 3.20, Şekil 3.36 ve Şekil 3.54'de gösterildiği gibi hatve açısını arttırmaya başlarlar. Böylece kontrolörler, rüzgâr türbin sisteminin çıkış gücünü nominâl güç değeri olan 500 kW'da sabit tutarlar.

Kontrolörlerin performansının karşılaştırılmasında, sistem kararlı hâl hatasının, çıkış gücünün % 1'ine düştüğü zaman referans olarak alınmıştır. 500 kw çıkış gücü olan bir sistem için %1'lik kabul edilebilir hata sınırları 495 kw ile 505 kw arasındadır. Buna göre Şekil 4.1'de gösterildiği gibi klasik PI kontrolör, %0,57'lik aşma değeri ile %1'lik sınırın altında kalmıştır. Bulanık mantık kontrolör, %1,61 aşma değeri ile bu sınırın üstüne çıkıp 1,7 sn içerisinde %1'lik sınırın altına düşmüştür. Bulanık PID kontrolör ise %0,02'lik aşma değeri ile en iyi performansı göstermiştir. Şekil 4.1'in büyütülmüş hâllerinde de görüldüğü gibi bulanık PID kontrolörün hem aşma hem kararlı hale oturma performansı PI ve bulanık kontrolörden daha iyidir. Bulanık kontrolörün aşma değeri PI kontrolöre göre daha fazla olmasına rağmen kararlı hâl hatası daha düşüktür.

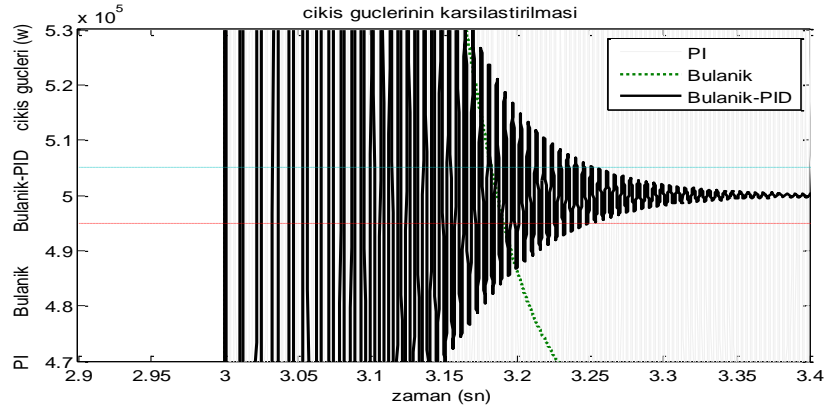


Şekil 4.1. PI, Bulanık ve Bulanık PID çıkış güçlerinin karşılaştırılması

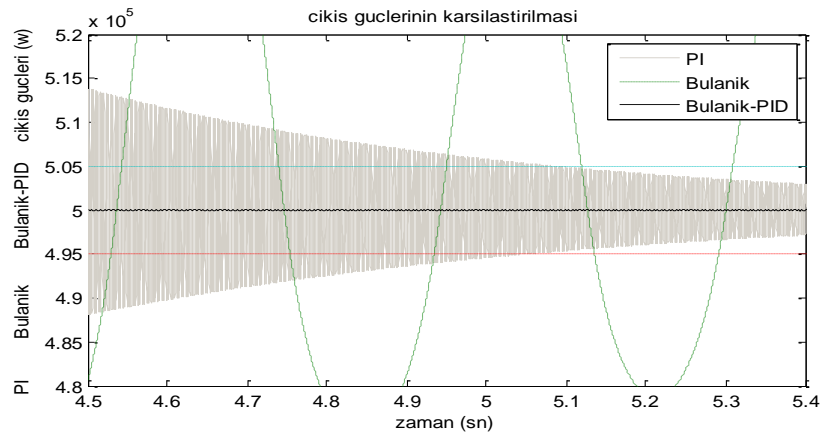
Daha sonra rüzgâr türbini + jeneratör sistemine rüzgâr hızı girişi olarak basamak fonksiyon şeklinde rüzgâr hızı uygulanmıştır. Rüzgâr hızı 3. saniyede 0m/s'den 12m/s'ye çıkarılmış ve sistemin rüzgâr hızı girişine uygulanmıştır. Kontrol sistemlerinin simülasyonu sonucundaki cevapları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'deki grafiklerde ortak olarak verilmiştir. PI kontrolör, %1'lik kararlı hâl hatasının altına 2,1 sn sonra düşmüştür. Bulanık mantık kontrolör 4,7 sn sonra %1'lik sınırın altına düşmüş, bulanık PID kontrolör ise 0,25 sn sonra %1'lik sınırın altına düşmüştür. Bulanık PID ve PI kontrolörlerin kararlı hâl hataları bulanık mantık kontrolörden daha iyidir.



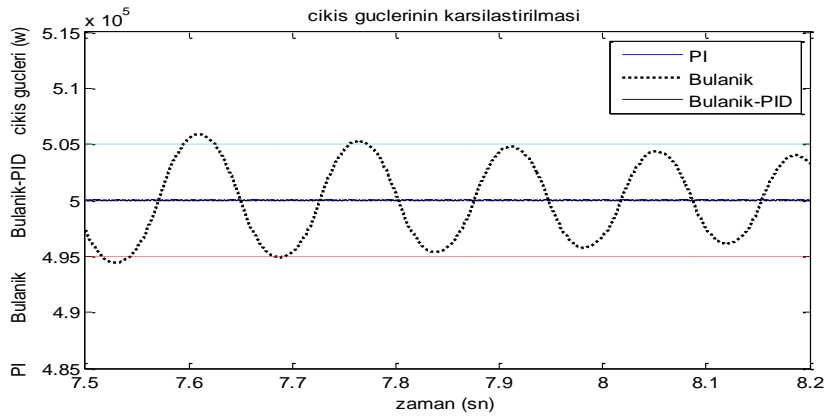
Şekil 4.2. PI, Bulanık ve Bulanık-PID kontrolörlerin basamak giriş cevapları



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3. (a) PI kontrolör için büyütülmüş basamak giriş cevabı (b) Bulanik PID kontrolör için büyütülmüş basamak giriş cevabı (c) Bulanik mantık kontrolör için büyütülmüş basamak giriş cevabı

Üçüncü olarak; Şekil 3.17, Şekil 3.34 ve Şekil 3.38'de gösterilen rüzgâr hızları, içinde değişik kontrolörlerin bulunduğu rüzgâr enerji sistemlerine uygulanmıştır. 286. saniyede rüzgâr hızı 11 m/sn'den 3 sn içinde 14 m/sn'ye yükselmiş ve 3 sn süre ile sabit kalmıştır. Rüzgâr hızındaki bu değişime karşı kontrolörlerin tepkisi incelenmiştir.

Şekil 3.20'de görüldüğü gibi, PI kontrolörün bulunduğu rüzgâr enerji sisteminde çıkış gücü 725 kW'a çıkmıştır. Bu %45'lik bir aşımır. %1'lik tolerans sınırının altına 292,85. sn'de düşmektedir. Yani PI kontrol sisteminin toparlanıp kontrol edilen değişkeni istenilen tolerans sınırının altına çekmesi için 6,85 sn gerekmektedir.

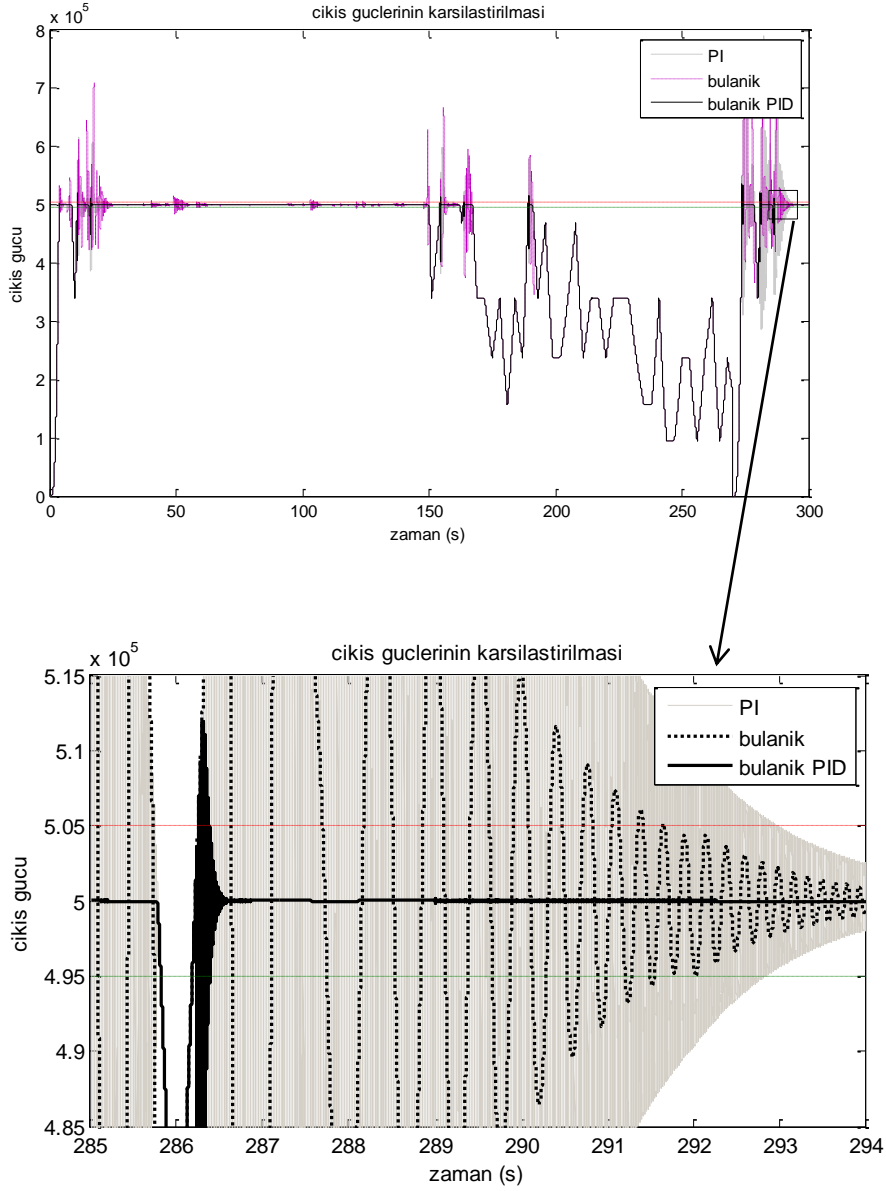
Şekil 3.37'de görüldüğü gibi, bulanık kontrolörün bulunduğu rüzgâr enerji sisteminde çıkış gücü 680 kW'a çıkmıştır. Bu %36'lık bir aşmadır. %1'lik toleransın altına 291,75. sn'de düşüyor. Kontrol sistemi 5,75 sn'de toparlanmaktadır.

Şekil 3.64'de görüldüğü gibi, bulanık PID kontrolörün bulunduğu rüzgâr enerji sisteminde çıkış gücü 512 kW'a çıkmıştır. Bulanık PID kontrolör %2,4'lük bir aşma gösteriyor. %1'lik toleransın altına 286,38. sn'de düşüyor. Yani kontrol sistemi 0,38 sn'de toparlanıyor.

Şekil 4.4'de üç kontrolörün tepkileri birlikte gösterilmiştir. Üç simülasyon sonuçları gösteriyor ki; rüzgâr türbinlerinde hatve açısı değiştirilerek yapılan çıkış gücü kontrolünde bulanık PID kontrolör, klasik PI ve bulanık kontrolörden daha iyi performans göstermektedir.

İki simülasyonda PI kontrolör performansı arasında fark olduğu görülmektedir. Bu farkın sebebi; PI kontrolörün doğrusal olmayan sistemlerde kararlı bir performans gösterememesidir. Bulanık kontrolörün PI kontrolöre göre tepki süresi daha uzundur. Fakat bulanık kontrolörün performansı kontrol edilen sistemin parametrelerinden bağımsızdır. Bu nedenle genel olarak bakıldığında bulanık mantık ile yapılmış kontrolörün, PI kontrolöre göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Bulanık PID kontrolörde ise PID kontrolün hızı ile bulanık kontrolün sistem

parametrelerinden bağımsız yaklaşımı birleştirilerek, yüksek performanslı bir kontrol sistemi elde edilmiştir. Bu durum simülasyon sonuçlarında görülmektedir.



Şekil 4.4. PI, Bulanık ve Bulanık PID çıkış güçleri karşılaştırması ve büyütülmüş şekli

4.2. Sonuçlar

Rüzgâr türbinlerinde hatve açısının değiştirilmesi; nominâl rüzgâr hızının üzerindeki rüzgâr hızlarında önemli bir kontrol mekanizmasıdır. Hatve açısı kontrolü ile rüzgârdan elde edilen güç miktarı değiştirilebilir. Böylece nominâl rüzgâr hızının üzerindeki hızlarda jeneratörün çıkış gücü sabit tutulur. Bu kontrol sistemi için jeneratörün çıkışının ölçülmesi gereklidir. Ölçülen çıkış; jeneratörün çıkış gücü veya jeneratör rotorunun açısal hızıdır.

Bununla birlikte rüzgâr hızı da ölçülmelidir. Çünkü Hatve açısı kontrol sistemimiz, nominâl rüzgâr hızının üzerindeki hızlarda devreye girecektir. Kanat hatve açısının kontrolü için bir hareketlendirici seçilmelidir. Bu hareketlendirici rüzgâr kanatlarını kendi eksenini etrafında döndürerek hatve açısını değiştirir. Rüzgâr türbini sistemimizde hareketlendirici olarak dc servo motor seçilmiştir. Kontrolörler, servo motorunu kumanda ederek hatve açısının değerini değiştirirler.

Kontrolör olarak üç ayrı tip kontrolör denenmiştir. Bunlar; klasik PI, bulanık kontrolör ve bulanık PID kontrolör. Simülasyon sonuçlarına göre bulanık PID kontrolör en iyi performansı göstermiştir.

Bu çalışmada önerilen bulanık mantık PID kontrolör, klasik PI ve bulanık mantık kontrolöre göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla rüzgâr enerji sistemlerinde kontrol amacıyla önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Perales M., Ptrez J., Barrero F., Mora J.L., GalvBn E., Carrasco J.M., Franquelo L.G., Fuzzy Logic Control of A Variable Speed Variable Pitch Wind Turbine. *Grupo de Tecnologia Electrónica*. 7 (83): 614-618, 1999.
- [2] Sharma H., Pryor T., Islam S., Effect of Pitch Control and Power Conditioning on Power Quality of Variable Speed Wind Turbine Generators. *Centre for Renewable Energy and Sustainable Technologies*. 81 (6): 642-647, 2001.
- [3] Guo H., Guo Q., H_{∞} Control of Variable-Speed Adjustable-Pitch Wind Turbine Adjustable-Pitch System. *Electrical Engineering of Technology*. 86 (24): 266-269, 2003.
- [4] Dadone, A., Dambrosio, L., Estimator based adaptive fuzzy logic control technique for a wind turbine-generator system. *Energy Conversion and Management*. 44 (1): 135-153, 2003.
- [5] Sakamoto R., Senjyu, T., Kinjo, T., Urasaki, N., Funabashi, T., Output Power Leveling of Wind Turbine Generator by Pitch Angle Control Using Adaptive Control Method. *2004 International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004*, 21-24 Kasım 2004, Singapore, s. 83-89, 2004.
- [6] Sakamoto R., Senjyu, T., Kinjo, T., Urasaki, N., Funabashi, T., Output Power Leveling of Wind Turbine Generator for All Operating Regions by Pitch Angle Control. *Electrical Engineering*. 78 (03): 915-921, 2005
- [7] Ryosei Sakamoto, Senjyu, T., Kinjo, T., Urasaki, N., Funabashi, T., Output Power Leveling of Wind Turbine Generators Using Pitch Angle Control for All Operating Regions in Wind Farm. *Control Engineering*. 59 (05): 367-372, 2005

- [8] Lescher, F., Zhao J., Martinez A., LQG Multiple Model Control of a Variable Speed Pitch Regulated Wind Turbine. La Rochelle, 17th IMACS World Congress, Paris, France, 170 (41): 234-242, 2005
- [9] Lescher, F., Zhao J., Martinez A., Multiobjective H_2/H_∞ Control of a Pitch Regulated Wind Turbine for Mechanical Load Reduction. Electric and Control Engineering. 23 (12): 234-241, 2006
- [10] Yonggang L., Wei L., Baoling C., Hongwei L., Two Models Switched Predictive Pitch Control for Wind Turbine Based on Improved Incremental SVR. 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Haziran 21 - 23, Dalian, China, s. 7498-7502, 2006
- [11] Liu H., Lin Y., Li W., Study on Control Strategy of Individual Blade Pitch-Controlled Wind Turbine. 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Haziran 21-23, Dalian, China, s. 7235-7241, 2006
- [12] Sakamoto R., Senjyu T., Kaneko T., Urasaki N., Takagi T., Sugimoto S., Sekine H., Output Power Leveling of Wind Turbine Generator by Pitch Angle Control Using H_∞ Control. 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Haziran 21 - 23, Dalian, China, s. 2044-2049, 2006
- [13] Guo H., Guo Q., Research on Synchrodrive Control Technology for Wind Turbine Adjustable-Pitch System Based on Adaptive decoupling Control, IPEMC , (42) 44: 449-455, 2006
- [14] Guo H., Guo Q., H_∞ Control of Adjustable-Pitch Wind Turbine Adjustable-Pitch System, IPEMC , (42) 44: 600-605, 2006
- [15] Kong Y., Wang Z, Yuan H., A New Fuzzy Sliding-mode Control for MW Variable Speed-Variable Pitch Wind Turbine, 6th World Congress on

Intelligent Control and Automation. Haziran 21 - 23, Dalian, China, s. 2003-2007, 2006

- [16] Zhang X., Wang W., Cheng L. J., Fuzzy Control of Variable Speed Wind Turbine, 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Haziran 21 - 23, Dalian, China, s. 3872-3876, 2006
- [17] Amendola, C. A. M., Gonzaga, D. P., Fuzzy-Logic Control System of a Variable-Speed Variable-Pitch Wind-Turbine and a Double-Fed Induction Generator. Seventh International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, IEEE Computer Society, s. 252-257, 2007
- [18] Muhando E. B., Senjyu T., Yona A., Kinjo H., Funabashi T., Disturbance rejection by dual pitch control and self-tuning regulator for wind turbine generator parametric uncertainty compensation. IET Control Theory Appl. (5) 16: 1431–1440, 2007
- [19] Yao X., Liu Y., Guo C., Adaptive Fuzzy Sliding-mode Control in Variable Speed Adjustable Pitch Wind Turbine. International Conference on Automation and Logistics. Ağustos 18 - 21, Jinan, China, s. 313-318, 2007
- [20] Camblong H., Digital robust control of a variable speed pitch regulated wind turbine for above rated wind speeds. Control Engineering Practice. Elsevier 16, 946–958, 2008
- [21] Zhang L., Li H., Chunliang E., Jianlin L., Honghua X., Pitch Control of Large Scale Wind Turbine Based on Fuzzy-PD Method. DRPT2008. 6-9 Nisan 2008 Nanjing China, s. 2447-2452, 2008
- [22] Xingjia Y., Yingming L., Zuoxia X., Chunming Z., Active Vibration Control Strategy based on Expert PID Pitch control of Variable Speed Wind Turbine, DRPT2008. 6-9 Nisan 2008 Nanjing, China, s. 635-639, 2008

- [23] Baku M. N., Ameku K., Roy J. N., Performance of a 3 kW wind turbine generator with variable pitch control system. *Applied Energy*. Elsevier 86, 1774–1782, 2009
- [24] Ramakrishnan V., Srivatsa S. K., Pitch Control of Wind Turbine Generator by using New Mechanism, *J. Electrical Systems*, Regular paper 5, 1-15, 2009
- [25] Takaai H., Chida Y., Sakurai K., Isobe T., Pitch Angle Control of Wind Turbine Generator using Less Conservative Robust Control. 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control. Saint Petersburg, Russia, Temmuz 8-10, s. 542-547, 2009
- [26] Musyafa A., Harika A., Negara I. M. Y., Robandi I., Pitch Angle Control of Variable Low Rated Speed Wind Turbine Using Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Engineering & Technology*. 5 (10): 21-24, 2009
- [27] Jelavic M., Petrovic V., Peric N., Estimation based Individual Pitch Control of Wind Turbine, *AUTOMATIKA*. 2 (51): 181–192, 2010
- [28] Jian-jun X., Li-mei Y., Xiao-ning Q., Chun-lei J., Jian-ren W., Study of variable-pitch wind Turbine Based on Fuzzy Control. 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication, 978-1-4244-5824 IEEE, s. 235-239, 2010
- [29] Qi J., Liu Y., PID control in adjustable-pitch wind turbine system based on Fuzzy control. 2010 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation., 978-1-4244-656, s. 341-346, 2010
- [30] Dou Z. L., Cheng M. Z., Ling Z. B., Cai X., An Adjustable Pitch Control System in a Large Wind Turbine Based on a Fuzzy-PID Controller. *SPEEDAM 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical*

Drives, Automation and Motion. 978-1-4244-4987 2010 IEEE, s. 391-395, 2010

- [31] Nourdine S., Camblong H., Vechiu I., Tapia G., Comparison of Wind Turbine LQG Controllers Using Individual Pitch Control to Alleviate Fatigue Loads. 18th Mediterranean Conference on Control & Automation Congress, 978-1-4244-8092, Marrakech, Morocco June 23-25, s. 1591-1596, 2010

- [32] Jiao B., Wang L., RBF neural network sliding mode control for variable-speed adjustable-pitch system of wind turbine. 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering IEEE Computer Society. 978-0-7695-4031, s. 3998-4002, 2010

- [33] Ameku K., Uezato E., Study on a 3kW Small Wind Turbine Generator with Variable Pitch LQG Control System. Journal of Fluid Science and Technology. (6) 3: 322-332, 2011

- [34] Kim J. S., Jeon J., Heo H., Design of adaptive PID for pitch control of large wind turbine generator, 978-1-4244-8782-2011 IEEE, 2011

- [35] Zhang W., Xu H., Active Disturbance Rejection Based Pitch Control of Variable Speed Wind Turbine, 30th Chinese Control Conference : July 22-24, Yantai, China, s. 5094-5098, 2011

- [36] Anjun X., Hao X., Shuju H., Honghua X., Pitch Control of Large Scale Wind Turbine Based on Expert PID Control, 978-1-4577-0321-8©2011 IEEE , 3836-3839, 2011

- [37] Rao Y.S., Laxmi A.J., Modeling and Control of Variable Pitch and Variable Speed Wind Turbine by using Matrix Converter. 2nd International Conference and workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET) 2011, International Journal of Computer Applications® (IJCA), 30-40, 2011

- [38] Bououden S., Chadli M., Filali S., El Hajjaji A., Fuzzy model based multivariable predictive control of a variable speed wind turbine: LMI approach. *Renewable Energy* 37 (2012) Elsevier, 434-439, 2012
- [39] Hamane B., Benghanem M., Bouzid A.M., Belabbes A., Bouhamida M., Draou A., Control for Variable Speed Wind Turbine Driving a Doubly Fed Induction Generator using Fuzzy-PI Control. *Energy Procedia* 18 (2012) Elsevier, 476 – 485, 2012
- [40] Chena C.H., Hongb C.M., Ou T.C., Hybrid fuzzy control of wind turbine generator by pitch control using RNN. *International Journal of Ambient Energy*, Taylor & Francis. (33) 2, June :56–64, 2012
- [41] Hwas A., Katebi R., Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller. *IFAC Conference on Advances in PID Control*, Brescia (Italy), March 28-30, 2012
- [42] [<http://arsiv.indigodergisi.com/52/nd004.htm>] (Erişim tarihi: 25.04.2013)
- [43] [<http://forumdas.net/odev-ve-tezler/ruzgar-enerjisi-tarihi-gelişimi-38802/>] (Erişim tarihi: 25.04.2013)
- [44] Öztürk, H. H. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı*. Teknik Yayınevi, Ankara, 2008.
- [45] Şen, Ç. *Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgâr Enerjisi İle Karşılanması*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos, İzmir, 2003.
- [46] Çelik. S. *İlköğretim Öğrencileri İçin Meteoroloji*. Telekomünikasyon Şube Müdürlüğü, Ankara, 2008.

- [47] Toklu, M. Rüzgâr Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgâr Santrali Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Feb Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2002.
- [48] Durak M., Özer S., Rüzgâr Enerjisi: Teori ve Uygulama, Ankara, Türkiye, 241-242, 2008.
- [49] Fıçıcı, F., Dursun B., Gökçöl C. Rüzgâr Enerji Sistemlerinden Kaynaklanan Gürültünün İncelenmesi. SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 1. Sayı, 11. Cilt, ss.54-62, 2007.
- [50] Masters, G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
- [51] Patel, M. R. Wind and Solar Power Systems. CRC Press, Boca Raton, Second Edition, London, 2006.
- [52] Shepherd, W., Shepherd, D. W. Energy Studies. Imperial College Press, Second Edition, London, 2003.
- [53] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [54] Seyoum, D. The Dynamic Analysis And Control Of A Self-Excited Induction Generator By A Wind Turbine. Doktora Tezi, School of Electrical Engineering and Telecommunications, The University of New South Wales, Wales, 2003.
- [55] Yerebakan, M. Rüzgâr Enerjisi. İstanbul Ticaret Odası, Yayın No:2001-33, 2001.
- [56] Blueenergy, Solarwind™ turbine, <http://www.blueenergyusa.com> (Erişim tarihi: 25.04.2013)

- [57] Naskali, P.H., MacLean A., Gray, N.C.C., Lewis, J.H. & Newall, A.P., Helical wind turbine, US Patent 7,344,353, 2005.
- [58] Noguchi, T., Windmill for wind power generation, US Patent 7,084,523, 2006.
- [59] Thomas, J., Colossal magnetic levitation wind turbine proposed, Science & Technology, July 27, 2007.
- [60] Cochrane, R.C., Vertical-axis wind turbine with LED display, GB patent 2415750, 2006.
- [61] Wind Turbine Technology Ahmad Hemami, 2012
- [62] European Wind Energy Association. Wind energy – the facts, part I: Technology, 2009, <http://www.wind-energy-the-facts.org/en> (Erişim tarihi: 25.04.2013)
- [63] Doran, A., Classification of wind turbines, <http://www.articlesbase.com/electronics-articles/classification-of-wind-turbines-429469.html> (Erişim tarihi: 25.04.2013)
- [64] Süleyman Tolun, Prof. Dr., Uçak Müh., Bölümü Uçak ve Uzay, Bilimleri Fakültesi, İTÜ, Bilim ve Teknik Mayıs, 2009.
- [65] Wind Power Generation and Wind Turbine Design, Edited by: Wei Tong, Kollmorgen Corp., USA, WIT Press 2010, 25 Bridge Street, Billerica, MA 01821, USA
- [66] Patel, M.R., “Wind and Solar Power Systems” CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, 1999. Turbines,” IEEE Industry Applications Magazine, 8, 3, s. 26-33, 2002.

- [67] Marques, J., Pinheiro, H., Gründling, A., Pinheiro, J.R., Hey, H.L., “A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System,” 2003, CE. 7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP'03, Fortaleza, Brazil, 1, s. 732-738, 2003.
- [68] Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U., Eskildsen, K. “Generators and Power Electronics Technology For Wind Turbines,” The 27th Annual Conference of the IEEE, IECON 2001, 3, s. 2000 -2005, 2001.
- [69] Nicolás, C.V, Lafoz, M. And Iglesias, J. Guidelines For the Design and Control of Electrical Generator Systems for New Grid Connected Wind Turbine Generator. IECON 2002.
- [70] Muller, S. Deicke ve M. De Doncker, R.W., Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind
- [71] Polinder, H., Haan S.W.H., Dubois, M.R., Sootweg, J.G., Basic Operation Principles and Electrical Conversion of Wind Turbines, NORPIE 2004, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 2004, Trondheim, Norway, 2004.
- [72] http://practicalaction.org/docs/technical_information_service/wind_electricity_generation.pdf (Erişim tarihi: 25.04.2013)
- [73] Wind Turbine Grid Connection and Interaction. Deutsches Windenergie-Institut Technische A/S, DM Energy, 2001. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/eu_wind_energy_en.pdf (Erişim tarihi: 25.04.2013)
- [74] Kuo B.C., Otomatik Kontrol Sistemleri. Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2009

- [75] Warwick K., Control Systems An Introduction , 1989
- [76] Zadeh L. A., "Fuzzy Sets", Information and Control , 8, 338-353,1965
- [77] Bay, Ö.F., Bulanık Mantık Ders Notları, Ankara, 2011
- [78] Şen Z., Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme. Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 2009
- [79] Timothy J.R., Fuzzy Logic with Engineering Application. John Wiley and Sons Ltd.,United Kingdom, 2004
- [80] Elmas Ç., Yapay Zeka Uygulamaları. Seçkin Yayınevi, Ankara, 2007
- [81] Senjyu T.,Sakamoto R., Urasaki N., Higa H., Uezato K. and Funabashi T.,Output Power Control of Wind Turbine Generator by Pitch Angle Control Using Minimum Variance Control, Electrical Engineering in Japan, cilt 154, No 2, 1455–1463
- [82] Prats M.M.,Carrasco J.M., Galvan E., Sanchez J.A., Franquelo L.G. A, New FuzzyLogic Controller to Improve the Captured Wind Energy in a Real 800 kW Variable Speed-Variable Pitch Wind Turbine, Power Electronics Specialists Conference, Cilt 1, 101 – 105, 2002.
- [83] Hansen H. and Larsen L., Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine. Riso, National Laboratory Roskilde, Denmark,19,72-91, 2005.
- [84] Boukhezzara, B., Lupua, L., Siguerdidjanea, H., and Hand, M., Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines. Renewable Energy. Cilt 32, 1273–1287, 2007
- [85] Wind Turbine Technology, A.R. Jha, CRC press, Taylor and Francis Group,USA, 2011.

- [86] Tang J., PID Controller Using the TMS320C31 DSK with on-line Parameter Adjustment for Real-time DC motor Speed and Position Control. *Industrial Electronics*, 2001. ISIE 2001. IEEE International Symposium. _ vol.2, s. 786 - 791, 2001.

EKLER

rüzgâr rotor milinin açılma hızı hesaplama programı

```
function [wwt,lamda]= rotorhizi(v,r)
%#codegen

if v<2
    wwt=0;
else
    wwt=pi*v/10-pi/5;
end

lamda=wwt*r/v;
```

rüzgâr türbininin devreye girme ve devreden çıkma hızları programı

```
function y =guc1(v,p)

if v<3||v>25
    y=1e-15;
else
    y=p;
end
```

servo motoru kumanda programı

```
function y = sercon(u,b,p)
%#codegen
if p>=4.9999e5
```

```
    y=u;  
else  
    if b>0  
        y=u;  
    else  
        y=0;  
    end  
end  
end
```