



## PID ve Bulanık Mantık Denetleyiciyle Kollektif Kanat Hatve Açısı Kontrolü

### Collective Blade Pitch Angle Control with PID and Fuzzy Logic Controller

Murat Lüy<sup>1</sup>, Nuri Alper Metin<sup>\*2</sup>, Zafer Civelek<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kırıkkale Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, 71100, Kırıkkale, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadırlı Meslek Yüksekokulu, 807060, Osmaniye, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Çankırı Karatekin Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 18100, Çankırı, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 08/11/2022

Kabul / Accepted: 30/12/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/12/2022

#### Öz

Değişken hızlı rüzgâr türbini jeneratörleri, sabit hızlı rüzgâr türbinlerine göre daha güçlüdür. Ancak kararsız rüzgâr hızı, değişken hızlı makinenin gerilim ve frekansında değişimlere neden olmaktadır. Uygun bir kontrol tekniği ile gücün kalitesi iyileştirilebilir. Sistemde kullanıldığında, dalgalanan rüzgâr jeneratörü çıkışının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle kombine rüzgâr jeneratörü sisteminin dinamik özelliklerinin incelenmesi ve daha dinamik performans için daha iyi denetleyici tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, MATLAB/Simulink ortamında rüzgâr türbini tasarlanmış ve hatve açısı denetim işlemi gerçekleştirilmiştir. Hatve açısı denetimi için PID ve Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) kullanılmıştır. Bu denetim algoritmaları referans güç değerinde salınım miktarı, referans değere ulaşım süreleri ve kanat hatve açısındaki değişimler benzetim çalışmasında incelenmiştir.

#### Anahtar Kelimeler

“Kanat Hatve Açısı Denetimi, PID Denetleyici, Bulanık Mantık Denetleyici (BMD), Rüzgâr Türbini”

#### Abstract

Generators for wind turbines with variable speeds are more potent than those with set speeds. However, the variable speed machine's voltage and frequency shift as a result of erratic wind speed. A proper control method raises the power's quality. The dynamic properties of the combined wind generator system must be researched in order to regulate the fluctuating wind generator output when it is employed in the system. More dynamic performance can be achieved by designing better controllers. Pitch angle control was carried out in this study's wind turbine design using the MATLAB/Simulink environment Pitch angle control is accomplished using PID and a fuzzy logic controller (FLC). The simulation research looked at these control techniques, the amount of oscillation in the reference power value, the duration to achieve the reference value, and the variations in blade pitch angle.

#### Key Words

“Blade Pitch Angle Control, PID Controller, Fuzzy Logic Controller (FLC), Wind Turbine”

## 1. Giriş

Rüzgâr enerjisi, kamu elektrik şebekesine sağlanan enerjinin artan bir yüzdesidir. Son on yılda kurulu rüzgâr gücü kapasitesinde yıllık ortalama %30'un üzerinde bir büyüme oranı gözlenmiştir. Artan büyüme oranı, enerji üretiminde çeşitli ulusal hükümetlerin çevre politikaları ve vergi teşviklerini düzenlemesinde etkili olmuştur. Bu duruma ek olarak rüzgâr enerjisinin düşen üretim maliyeti de teşvik için belirleyici bir faktör olmuştur. Rüzgâr enerjisi artık kömür, gaz ve nükleer üretim gibi diğer daha geleneksel elektrik enerjisi kaynaklarıyla rekabet haline girmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle, rüzgâr enerjisi elektrik enerjisi üretiminde daha uygun maliyetli hale gelmeye devam etmektedir (BTM, (2001), EWE (1999)).

European Green Deal, Avrupa Birliği'nin elektrik üretimini 2050 yılına kadar iklim açısından etkisiz hale getirmeyi hedeflemektedir. Bu hedefe ulaşmak için karadan ve denizden gelen rüzgâr önemli bir rol oynamaktadır. Avrupa Birliği, son yıllarda, özellikle açık denizden olmak üzere, rüzgâr enerjisi teknolojisini geliştirmesinde ön saflarda yer almıştır; Avrupalı enerji şirketleri, açık deniz küresel pazarının etkileyici bir şekilde %90'ını temsil etmektedir. Gelecekteki elektrik talebinin %30'unun, (yaklaşık 450 GW) açık deniz rüzgarlarından sağlanması hedeflenen AB'de, tüm Avrupalılar için Temiz Enerji paketinde açık deniz rüzgâr gelişimine özel bir odaklanma vardır. Amerika Birleşik Devletleri'nde, rüzgâr enerjisi santrallerinin 2050 yılına kadar denizdeki kurulu gücünün 86 GW'a ulaşması ile ABD elektrik talebinin %35'ini karşılayabileceği tahmin edilmektedir. Kara tabanlı türbinlerden açık deniz türbinlerine geçiş, rüzgâr türbini ve santralının boyutunu ve gücünü artırma olasılıklarını da beraberinde getirmiştir. Açık denizdeki daha derin su konumları, 2017'den beri faaliyette olan ilk yüzer rüzgâr santrali ile yüzer türbinler tarafından da kullanılmaktadır. Bu tür gelişmeler, endüstrinin teknolojik sınırlarını ve mevcut bilgi tabanını zorlamaktadır. İnsanoğlu değişken çevre koşullarında bu kadar büyük makinelerle ilgili sınırlı deneyime sahiptir. Bu nedenle en iyi uygulamalar ve standartlar henüz tam olarak olgunlaşmamıştır (Nejad, vd (2022)).

Rüzgâr türbinleri, sabit hızlı veya değişken hızlı mekanik girdi ile yapılabilir. Son yıllarda teknolojik gelişmelerin önemli rol oynadığı alanlardan biri de yenilikçi değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesidir. Değişken hızlı rüzgâr türbini, rüzgârdan daha yüksek enerji çıkışı, düşük rüzgâr hızında daha düşük gürültü ve şebekeye daha temiz güç aktarımı gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Bu nedenlerle, değişken hızlı rüzgâr türbininin günümüzde artan bir eğilimi vardır. Değişken hız birkaç yolla elde edilebilir. Bununla birlikte, günümüzde değişken hızlı elektromekanik dönüştürücülerin iki konfigürasyonu dikkat çekmektedir: Güç elektroniği doğrudan tahrikli senkron jeneratör ve çift beslemeli endüksiyon jeneratördür (Ahmad (2009), Nejad vd (2022)).

Bir rüzgâr türbini tarafından üretilen elektrik enerjisi esas olarak rüzgârın hızına bağlıdır. Rüzgâr hızının nominal rüzgâr hızından düşük olduğu durumlarda maksimum güç aktarım yöntemleri tercih edilirken, rüzgâr hızının nominal rüzgâr hızından düşük olması durumunda hatve açısı kontrol edilerek rüzgâr türbini çıkışından nominal güç değerine yakın değerler elde edilebilir. Rüzgâr türbininin uzun yıllar dayanıklılığını ve sürdürülebilir elektrik enerjisi üretimini sağlamak için hatve açı kontrolü uygulanmaktadır (Ahmad, (2009), Nejad, vd (2022)).

Bu çalışmada rüzgâr türbininde hatve açısı kontrolü, doğru akım servo makine ve rüzgâr türbini matematiksel modelleri oluşturularak tasarlanmıştır. Denetim algoritması olarak geleneksel PID denetleyici ve Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) kullanılmıştır. PID denetleyici yapısal olarak basit, düşük maliyet ve tasarım kolaylığı açısından tercih edilmiştir. PID parametreleri Ziegler-Nichols teoremiyle hesaplanmıştır. Tasarım esnasında PID denetleyicileri sistem parametreleri açısından yetersiz kalmakta ve çıkışından alınan değerler bozulmalardan yüksek oranda etkilenmektedir. Buna ek olarak tasarlanan BMD, sistem parametrelerinden etkilenmeyen kararlı bir denetleyici olduğu gözlenmiştir. BMD tasarımının gerçekleştirilmesiyle kolektif hatve açısı kontrolü için literatüre katkı sağlanmıştır. PID ve BMD ile rüzgâr türbinin kolektif hatve açısı kontrolü işlemi MATLAB/ Simulink ortamında simülasyonu yapılmıştır. Karşılaştırma işlemi tasarlanan rüzgâr türbini ve değişken rüzgâr hızlarında, hatve açısı ve rüzgâr türbini güç kontrolü için gerçekleştirilmiştir.

### 1.1. Literatür Taraması

Poureh ve arkadaşları, kazanç çizelgeleme yönteminin endüstriyel uygulamalardaki çalışma noktası değişimlerine karşı rüzgâr türbini denetleyici performansını ayarlamak için geleneksel bir yaklaşım haline geldiğini vurgulamışlardır. Programlama fikri karmaşık görünmese de araştırma makalelerinde ve teknik raporlarda bulunan çeşitli konfigürasyonlar yanlışlık göstermektedir. Bu makale, literatürde bulunan rüzgâr türbini olan NREL 5-MW'yi seçerek ve literatürde mevcut çeşitli kontrolör konfigürasyonlarına atıfta bulunarak hatalı kontrolör gerçekleştirmenin etkisini anlatmaktadır. Doğrusal olmayan bir analiz gerçekleştirerek, denetleyici performansını bozabilecek veya orijinal tasarımdan farklı performans indekslerine sahip denetleyici yapılarına yol açabilecek yanlış gerçekleştirmelerden gizli terimlerin ortaya çıktığı gösterilmiştir. Bu sorunu çözmek için, kazanç programlı denetleyicinin amaçlanan performansını korumak için dört uygulama değişikliği sunulmuştur. Makale temel kazanç programlı PI denetleyicisine odaklanmış olsa da modifikasyonlar keyfi adım kontrol sistemlerine genelleştirilmiştir. Hatve açısı tabanlı ve rüzgâr hızı tabanlı kazanç programlı temel kontrolörler için FAST kodunun tam sıralı dinamikleri ile simülasyonlar ve daha karmaşık kazanç programlı kesirli sıralı PI kontrolörü sunulan analiz sonuçları elde edilmiştir (Poureh, vd (2023)).

Jiang ve arkadaşları, Arşimet Optimizasyon Algoritması (AOA) isimli, birkaç parametre, anlaşılması kolay bir arayüz ve kolay uygulama dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunan yeni bir meta sezgisel algoritma sunmuşlardır. Yine de bazı dezavantajlar mevcuttur, keşif kapasitesi için çeşitlilik eksikliği, yerel optimum noktası bulunmasında zorluk bunlara örnek verilebilir. Bu çalışma,

küresel optimizasyon problemleri ve rüzgâr türbini parametre ayarlama- değişken hatve kontrolör problemi için paralel ve Taguchi yöntemine (TPAOA) dayalı yeni bir AOA varyantı önermektedir. İletişim stratejisine sahip paralel mekanizma ve Taguchi ortogonal kombinasyonu, AOA'nın dezavantajlarıyla ilgilendir. Deneysel sonuçlar, önerilen algoritmanın CEC2017 test takımı altındaki diğer algoritmalarından daha rekabetçi olduğunu göstermektedir. Değişken hatveli kontrolörün parametre ayarlama zorluğunun rüzgâr türbini problemi TPAOA uygulanarak çözülmüştür. Karşılaştırılan çözüm sonuçları, TPAOA'nın fizibilitesinin, rüzgâr türbinlerinin çıkış gücünü pürüzsüz hale getirdiğini ve rüzgâr hızı dalgalanmalarının yüksek fizibiliteye sahip elektrik şebekesi üzerindeki etkisini azalttığını kanıtladığını göstermektedir (Jiang, vd (2023)).

Shen ve arkadaşları, değişen rüzgâr ortamında küçük kaldırma tahrikli dikey eksenli rüzgâr türbinleri için yüksek güç üretiminin sürdürülmesi, öngörülemeyen türbülanslı akış-kanat etkileşiminden ve karmaşık kanat müdahalelerinden miras alınan zorluklar nedeniyle henüz iyi çalışmadığı belirtmişlerdir. Burada, etkin bir programlanabilir dört çubuk bağlantı mekanizması kullanılan hızlı bir çevrimiçi takviye öğrenme adım kontrolü önerilmiştir, bu da türbinlerin rüzgâr değişikliklerine hızlı bir şekilde uyum sağlamasını ve operasyonda yüksek güç çıkışını korumasını mümkün kılmaktadır. Atış mekanizmasını, değişken çerçeve bağlantı uzunluğuna sahip bir sürükle-bağlantı konfigürasyonu kullanarak bir optimizasyon problemine formüle edilmiş ve bunu geniş bir uç hız oranları aralığında iç nokta algoritması ile çözülmüştür. Ardından, türbinin çerçeve bağlantı uzunluğunu uyarlamalı olarak ayarlaması için bir parametre keşfedicisiyle gradyan takviye öğrenme yöntemi tasarlanmıştır. Tasarım, bütün bir eğim yörüngesini tasvir etmek için gereken parametre sayısını önemli ölçüde azalttığından, önerilen çevrimiçi öğrenme süreci hızlı bir şekilde birleşebilir ve bu da onu kentsel bir ortamda karmaşık rüzgâr koşullarının üstesinden gelebilecek hale getirebilir. Yapılan karşılaştırmalarda, önerilen sistemimizin üstün bir performansa sahip olduğunu göstermiştir (Shen, vd (2023)).

Yuan ve arkadaşları, büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinin sürdürülebilir operasyonlarına yönelik talep, kanat açısı kontrolü yoluyla güç düzenlemesi ve yük azaltmanın eşzamanlı olarak ilerlemesi gerektiğini belirtmişlerdir. Geleneksel toplu adım kontrolü (CPC) mekanizmaları yalnızca simetrik bozulmalarla başa çıkabilir. Bireysel hatve kontrolünün (IPC) ortaya çıkışı, kanatlar üzerindeki asimetrik veya periyodik yükleri azaltmak için yeni fırsatlar sunar. Bununla birlikte, kontrol sentezindeki zorluklar devam etmektedir. IPC'nin gerçekten etkili olması için türbin bileşenleri arasındaki karmaşık dinamik bağlantının hesaba katılması gerekir. Ayrıca, rüzgâr türbini dinamiği oldukça doğrusal değildir ve önemli modelleme belirsizlikleri mevcuttur. Bu çalışmada, periyodik yükleri reddetmeyi amaçlayan çok değişkenli sağlam bir IPC çerçevesi geliştirilmiştir. Bıçaklar arası kuplaj, frekans alanında yanıt özellikleri sağlamak için açıkça modellenmiştir. Daha sonra, periyodik yüklerle başa çıkma konusunda belirgin yetenek gösterdiği için yapılandırılmış tekil değerler (m)-sentez stratejisi benimsenmiştir. Özellikle, moment işlevleri, garantili sağlamlık ile periyodik frekanslarda yanıt zirvelerini bastırmak için uyarlanabilir. Sistematik vaka incelemeleri, önerilen IPC stratejisiyle, hızla değişen rüzgâr alanlarında önemli periyodik yük azaltmanın yanı sıra yorulma azaltmanın sağlanabileceğini göstermektedir (Yuan, vd (2020)).

Civelek, son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin arttığını ve popüler bir çalışma alanı haline geldiğini ifade etmiştir. Nominal rüzgâr hızlarının üzerindeki rüzgâr hızlarında, rüzgâr türbinlerinin güvenli çalışmasını ve çıkış gücünün sabit olmasını sağlamak için kanat hatve açısı kontrolü önermektedir. Rüzgâr türbinleri doğrusal olmayan sistemler olduğundan, kanat hatve açısı denetleyicisi de bu gibi durumlar için uygun olmalıdır. Bu açıdan, bulanık mantık denetleyicisi bu tür doğrusal olmayan sistemleri denetleyebilir ve rüzgâr türbini kanat kontrolleri için uygun bir denetleyici sistemidir. Bu çalışmada, rüzgâr türbini kanatlarını kontrol etmek için tasarlanmış bulanık mantık denetleyicisi geliştirilmiş bir genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Gelişmiş Akıllı Genetik Algoritma'nın (AIGA) performansını artırmak için yeni özellikler eklenmiştir. Bunlardan biri kabul edilebilir hata kavramının (AEC) eklenmesidir. İkiliden ondalık ve ondalıktan ikiliye dönüştürme, bu kabul edilebilir hatanın miktarına göre gerçekleştirilir. Yaklaşık bir değer elde edilebilse de, ondalıktan ikiliye dönüştürme, özellikle ondalık değeri izleyen basamaklar için doğru bir şekilde gerçekleştirilmeyebilir. Bu yanlışlıklar, özellikle ikili geri IGA'da ondalıktan ondalık dönüştürme sırasında küçük hatalara neden olabilir. Bu, AIGA'da uygulanan AEC tarafından kaldırılır. Ayrıca, AIGA'daki maksimum geçiş noktası sayısı kromozom uzunluğunun bir fonksiyonu olarak belirlenir. Simülasyon sonuçları, optimizasyonun çıkış gücünü daha da iyi hale getirdiği gözlemlenmiştir (Civelek, vd (2020)).

Chang ve arkadaşları bütünleşik bir tahmine dayalı ileri ve geri bildirim kontrol stratejisi önermiş ve tahmin edilen değeri ileri yönde kontrol cihazının referans değeri olarak kullanmıştır. Rüzgâr koşullarında büyük değişikliklere sahip rüzgâr türbininde, hatve açısı gerçek zamanlı olarak değişmemiş ve geri bildirim kontrol sinyali sorunu oluşmuştur. Tasarlanan denetleyici stratejisi, dağıtılmış paralel ateş böceği algoritması (DPFA) tarafından optimize edilen geri bildirim denetleyicisi ile birlikte tahmine dayalı bir denetleyici sistemidir. Değişken hatve açısı, rüzgâr türbininin düşük dalgalanma seviyesinde güç çıkışına ulaşmak için hatve açısını değiştirmiştir. Son olarak, bu makalede önerilen algoritmalar ve kontrol stratejileri Megawatt seviyesindeki rüzgâr türbinlerine uygulanmış ve geleneksel kontrol stratejileri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, tahmine dayalı ileri ve geri yönde kontrol stratejisinin daha iyi bir denetim etkisine sahip olduğunu göstermektedir (Chang vd, (2021)).

Elsisi ve arkadaşları, rüzgâr hızı dalgalanmaları ve yük talebi değişimlerinin rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerine (WECS) büyük zorluklar çıkardığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, verimsiz ölçüm cihazları ve çevresel etkiler (örneğin sıcaklık, nem ve gürültü sinyalleri) sistem ekipmanlarını etkiler ve sistem belirsizliği sorunlarının artmasına neden olmaktadır. Buna ek olarak, iletişim kanalları nedeniyle zaman gecikmesi, iletilen kontrol sinyali ile WECS işlemleri için kararsızlığa neden olan sistem ve WECS arasında bir iletişimsizlik problemi oluşturabilmektedir. Bu sorunları çözmek için makalede geleneksel denetleyiciler yerine WECS'in hatve açısı kontrolü için etkili bir denetleyici tekniği olarak uyarlanabilir bir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) önermektedir. Bununla birlikte, ANFIS

etkili performans sağlaması için üyelik işlevlerini ayarlamak, eğitim ve test için uygun bir veri kümesi gerektirmektedir. Bu bağlamda, makale çalışması ayrıca ANFIS denetleyicisinin eğitimi ve testinin gerçekleştirilmesi amacıyla yeterli bir veri kümesi hazırlamak için etkili bir strateji önermiştir (Elsisi vd, (2021)).

## 2. Rüzgâr Türbini

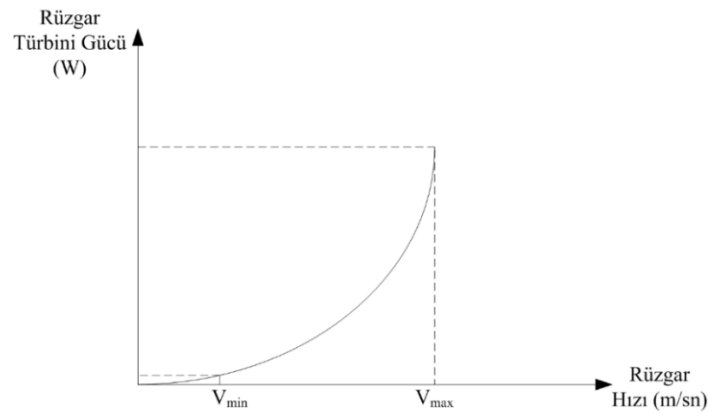
Bir rüzgâr türbini tarafından elde edilen güç oranı, rüzgâr türbini kanatları ile rüzgârın etkileşimine bağlıdır. Bu nedenle, bir rüzgâr türbininden elde edilen güç, rüzgâr hızındaki değişimlere değil, sabit rüzgâr hızına bağlıdır. Rüzgâr türbinin gücünün performansının hava yoğunluğuna, rüzgâr hızına ve kanat tarafından süpürülen alana bağlı olduğu Eşitlik (1)'de verilmiştir. Literatür taramaları, maksimum performans katsayısının %50'den yüksek olduğunu göstermektedir. Güç faktörü ( $C_p$ ) olarak ifade edilir. Kanat hızı, kanat ucunun doğrusal hızı ile rüzgâr hızı arasındaki ilişki olarak tanımlanır (Phasa vd., (2016), Lüy vd., (2022)).

$$P_{max} = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho * A * v_m^3 \quad (1)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(\beta) * \lambda^2 + c_2(\beta) * \lambda^3 + c_3(\beta) * \lambda^4 \quad (2)$$

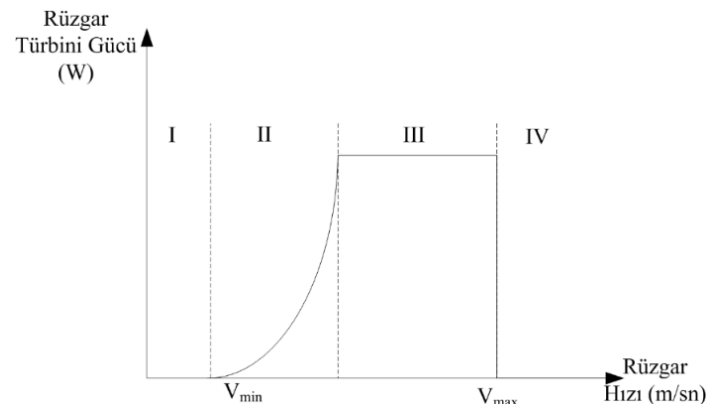
$$\lambda(\omega, V_w) = \frac{R * \omega}{V_w} \quad (3)$$

Eşitlik (2) ve Eşitlik (3)'te  $V_w$  rüzgâr hızı,  $\rho$  hava yoğunluğu,  $A$  rüzgâr türbinin rotorun kesiti,  $\beta$  hatve açısı,  $\lambda$  ise uç hız oranı,  $C_p$  güç katsayısıdır,  $R$  rüzgâr türbinin kanadının yarıçapı,  $\omega$  rüzgâr türbini için açısal rotor hızı olarak tanımlanır. Hatve açısı kontrolü olmadan rüzgâr hızına göre rüzgâr türbinin güç değişimi Şekil-1'de gösterilmiştir (Phasa vd., (2016), Lüy vd., (2022)).



Şekil 1. Hatve Açısı Kontrolü Olmadan Rüzgâr Hızı ve Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi

Rüzgâr türbini güç üretimi dört bölge ile karakterize edilir. Birinci bölgede rüzgâr hızı başlangıç hızından düşük olduğu için türbin güç üretmez. Türbin tarafından ikinci bölgede üretilen güç, kanatların yakaladığı rüzgâr hızına bağlıdır; bu bölge maksimum rüzgâr gücünü üretmek için türbinin kontrol edilmesi gereken alandır. Üçüncü bölgede, türbin tarafından sağlanan gücün nominal güce eşit olması için şaftın dönüş hızı sabit kalmalıdır. Türbin 4. bölgeye ulaşırsa koruma koşulları için durdurulmalıdır. Rüzgâr türbinin çalışma bölgeleri Şekil-2'de gösterilmiştir (Bakdi vd., (2019), Lüy vd., (2022)).



Şekil 2. Rüzgâr Türbini Çalışma Bölgeleri

## 2.1. Hatve Açısı Denetimi

Değişken rüzgâr hızı türbin jeneratörünün çıkış gücü rüzgâr hızına göre değişir, bu nedenle çıkış voltajı ve frekansı değişir. Değişken hızlı rüzgâr jeneratörü çıkışının var olan yükü beslemeye uygun hale getirilmesi için kontrol edilmesi gerekmektedir. Yüksek rüzgâr hızlarının sık olmadığı yerlerde, rüzgâr türbininin çıkış gücünü sabit olarak tutmak sürdürülebilir enerji için oldukça önemlidir. Bu gücü sınırlandırmak ve istenen seviyede tutmak için hareketlendirici sistemler için doğru akım servo makine tercih edilir. Doğru akım servo motorun transfer fonksiyonu Eşitlik (4)'te verilmiştir (Lüy vd., (2022), Civelek., (2014)).

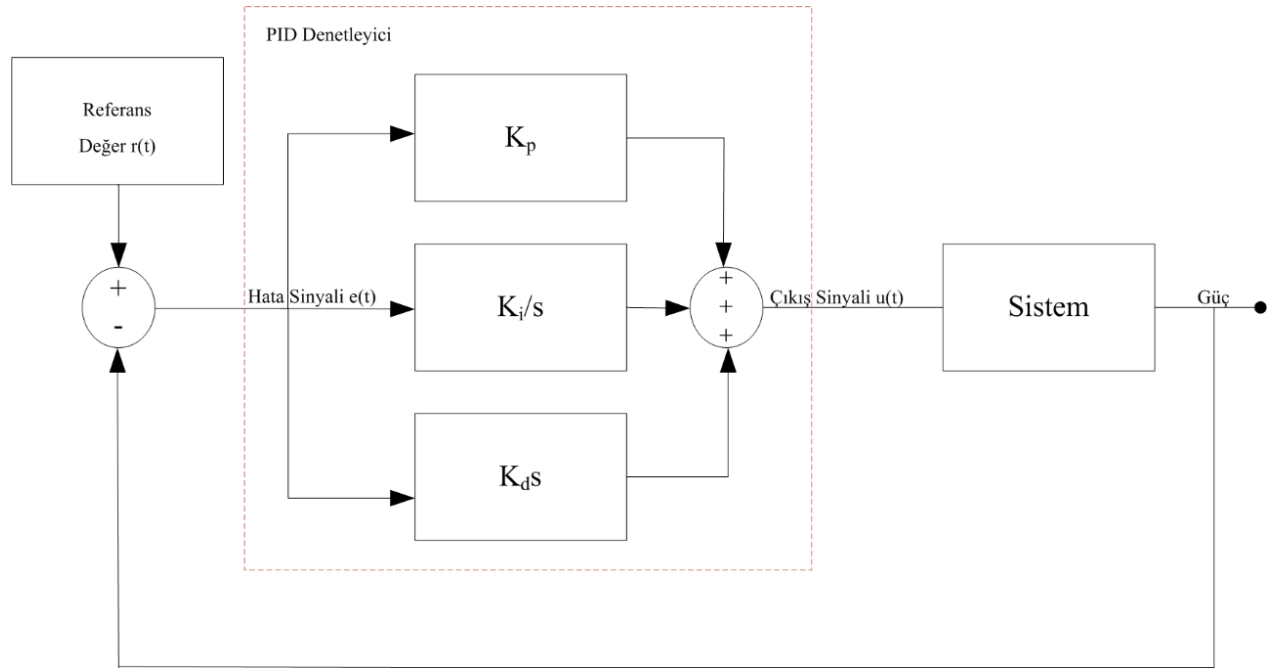
$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)} \quad (4)$$

## 3. PID Denetleyici

PID kontrolör endüstriyel alanlarda ve enerji üretim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir denetleyici yöntemidir. Bu yöntem, sistemde çıkışından devamlı olarak geri bildirim sinyali almaktadır. Tasarlanan denetleyici belirlenen süre zarfında referans değer ile kontrol edilen değer arasındaki hata değeri ( $e(t)$ ) hesaplanır ve hatayı sıfıra indirmek için çıkış sinyali üretir. Genel olarak, bir kapalı döngü denetleyici yapısında, sistem çıkış sinyalinin ( $u(t)$ ), minimum yükselme ile mümkün olan en kısa zaman zarfında bir referans değerine ( $r(t)$ ) çıkması amaçlanır. Ayrıca çıkış sinyali ( $u(t)$ ) bu referans değerinde ( $r(t)$ ) harici bozulmalara rağmen dayanabilmelidir. Bu durum denetleyicinin dayanıklılığı olarak tanımlanır. PID denetleyicisi hata değerini girdi olarak alır ve oransal (P), integral (I) ve türev (D) operatörlerini kullanarak elde edilen sonuçları toplayarak denetleyici sinyalini ( $u(t)$ ) bulur. Son olarak, denetleyici sinyali sisteme uygulanır. Böylece hata değerinin sıfıra yaklaşması amaçlanmaktadır. PID denetleyicinin transfer fonksiyonu Eşitlik (5)'te verilmiştir (Lüy vd., (2022), Civelek., (2014)).

$$K(s) = K_p * \left[ 1 + \frac{1}{T_i(s)} + T_d(s) \right] \quad (5)$$

Şekil 3, bir kapalı döngü PID denetleyici blok şemasını göstermektedir.



Şekil 3. PID Denetleyici Blok Şeması

### 3.1. Ziegler-Nichols PID Katsayısı Ayarlama Yöntemi

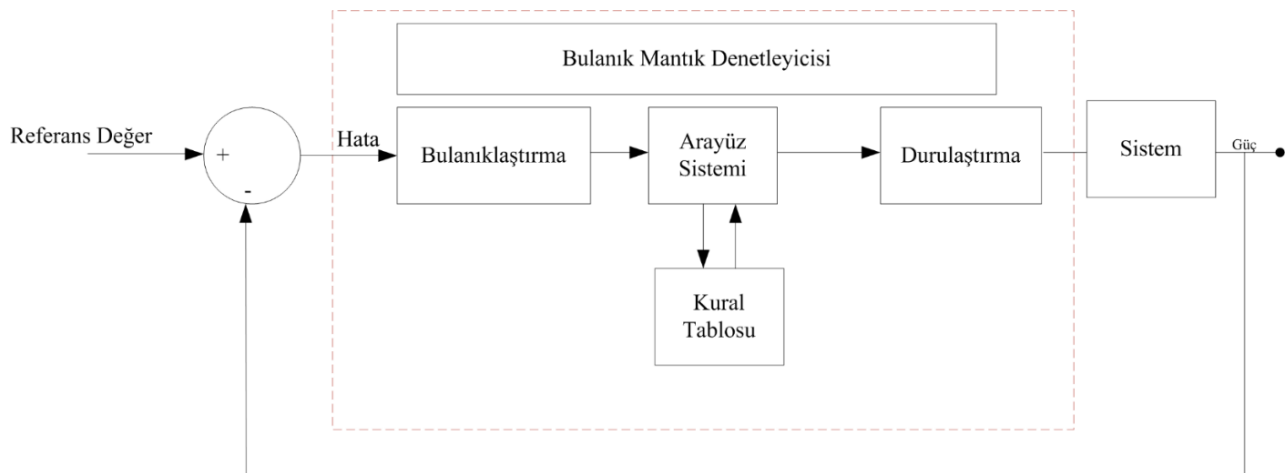
Ziegler ve Nichols tarafından sunulan yöntem, çarpışma testlerinden alınan açık döngü adım yanıtları biçimindeki süreç bilgilerine dayanmaktadır. Bu yöntem, modelleme ve kontrole dayalı geleneksel bir yöntem olarak kabul edilir. Ziegler-Nichols denetleyici katsayı ayarlama kuralı, kapalı döngü sistem referans değerine göre sistem yükü bozulmalarını ve varyasyonlarını optimum şekilde ayarlamak için geliştirilmiştir. Bir sistem modeli fiziksel olarak türetilmiyorsa, yaklaşım modelinin parametrelerini ayarlamayı deneyebilirsiniz. Sistemin birim adım yanıtı deneysel olarak ölçülebiliyorsa, k, sağlama süresi (L) ve geçiş süresi (T) parametreleri kullanılarak PID katsayıları ayarlanmaktadır. Tablo 1, Ziegler-Nichols katsayı ayarlama yöntemi için denetim parametrelerinin belirlenmesini göstermektedir (Lüy vd., (2022), Civelek., (2014)).

**Tablo 1.** Ziegler Nichols yöntemiyle P-PI-PID Parametre Ayarlama

Kontrolcü Seçimi	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	T/L	-	-
PI	0.9T/L	L/0.3	-
PID	1.2T/L	2L	0.5L

#### 4. Bulanık Mantık Denetleyici (BMD)

Bulanık mantık ilk olarak 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Bulanık sistem, insanın muhakemesine benzer bir yaklaşımı olan bulanık mantığa dayanmaktadır. Temel özelliği, denetimli sistem için karmaşık bir matematiksel model gerektirmemesidir. BMD'nin endüstride kullanılması geleneksel denetleyicilere göre faydalı olmuştur. BMD geleneksel denetleyicilere göre benzer sonuçları verebilir. BMD'nin özellik değiştirme kapasitesi, onu geleneksel kontrol tekniklerine bir alternatif olarak kapsamlı bir denetleyici yapısı sunmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, bulanık denetleyici dört bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler bulanıklaştırma, bulanık kurallar, ara yüz ve durulaştırma olarak adlandırılır. Bulanıklaştırma alınan dijital sinyali dilbilimsel işaretlere dönüştürür. BMD sistemlerinde üyelik fonksiyonlarının belirlendiği kısım bulanıklaştırma kısmı olarak tanımlanır. Kural tablosu giriş ve çıkış için belirlenen üyelik fonksiyonları arasında ilişki kurmaya yarar. Ara yüz girişi ve çıkışların arasında kurulan bağlantının tek bir davranış yapısına ait olmasını sağlayan yapıya denir. Ara yüze örnek olarak Mamdani ve Tagaki-Sugeno tipleri örnek verilebilir. Durulaştırma ise sistemden alınan dilbilimsel işaretlerin sistemin denetlenebilmesi için dijital sinyallere dönüştürüldüğü kısımdır (Mastacan vd., (2018), Saihi vd., (2019), Elfergani vd., (2018), Kharchouf vd., (2018)).

**Şekil 4.** BMD Blok Şeması

##### 4.1 Mamdani Bulanık Ara Yüzü

Birincil olarak Mamdani bulanık ara yüzü kullanım açısından diğer ara yüzlere göre kolay tasarlanır. Tasarım kolaylığından BMD kullanımı yaygındır. Bu kullanım yaygınlığı diğer ara yüzlere göre avantaj sağlamaktadır. İkincisi göz önüne alındığında, Mamdani tipi bulanık ara yüzlerin yapısının birkaç ilginç özellik gösterdiği açıkça fark edilmektedir. Bir yandan, dilbilimsel işaretli bulanık kurallar belirlenmesine uzman bilgisini dahil etmek için olanak sağlar. Bu bilgi, sistem girişi ve çıkışı arasındaki ilişkiyi tanımlayan veri kümelerinden otomatik olarak oluşturulan kurullarla kolayca birleştirilebilir. Öte yandan, tek ve basitleştirilmiş bir tür bulanık çıkarım uygulayan Tagaki-Sugeno bulanık ara yüzünün aksine, bulanık mantık temelli muhakemenin gücünden tam olarak yararlanan bulanık çıkarım mekanizması için birçok farklı tasarım sorunu vardır. Ayrıca, Mamdani tipi bulanık ara yüzler bilgiyi formüle etmek için oldukça esnek bir araç sağlarken, aynı zamanda uygun bir tasarım geliştirildiği sürece yorumlanabilir kalırlar. Bununla birlikte, Mamdani bulanık ara yüzler çeşitli avantajlara sahip olsalar da bazı dezavantajlara da sahiptirler. Ana dezavantajlarından biri, bazı karmaşık, yüksek boyutlu sistemleri modellerken doğruluk eksikliğidir. Bu, bulanık kural yapısına katı kısıtlamalar getiren dilbilimsel değişken kavramının esnek olmamasından kaynaklanmaktadır. Tanımlayıcı, artan model karmaşıklığı pahasına elde edilir. Bu, girdi ve çıktı uzaylarının katı bir şekilde bölünmesinin bir sonucu olarak, bir sistemi belirli bir doğruluk derecesine (özellikle birçok girdi değişkeni ile) yaklaşmak için birçok kuralın gerekebileceği anlamına gelir (Mastacan vd., (2018), Saihi vd., (2019), Elfergani vd., (2018), Kharchouf vd., (2018)).

İkinci nedenlerden dolayı, Mamdani tipi bulanık ara yüzlerin doğruluğunu artırmak amacıyla klasik dilbilimsel bulanık kural yapısında onu esnetmek için bazı uzantılar düşünülmüştür. En aşırı genişleme, klasik ızgara tabanlı olanlar yerine dağınık bulanık bölümlerin kullanımını içerir, öyle ki her bir kuralın kendi anlamı vardır (kendi bulanık kümeleriyle ilişkilidir). Dağılımlı bulanık bölümler, ızgara tabanlı olanların katı girdi alanı bölümlenmelerine tabi olmadıklarından, doğru bulanık modeller oluşturmak için elbette daha uygundur. Bu nedenle, gerçek bir sistemi istenen doğruluk derecesine yaklaştırmak için gereken bulanık kuralların sayısı daha az olabilir. Bununla birlikte, her kuraldaki her bulanık kümeye farklı bir dilsel terim atanması gerektiğinden, güçlü bir yorumlanabilirlik azalması taşır,lar,

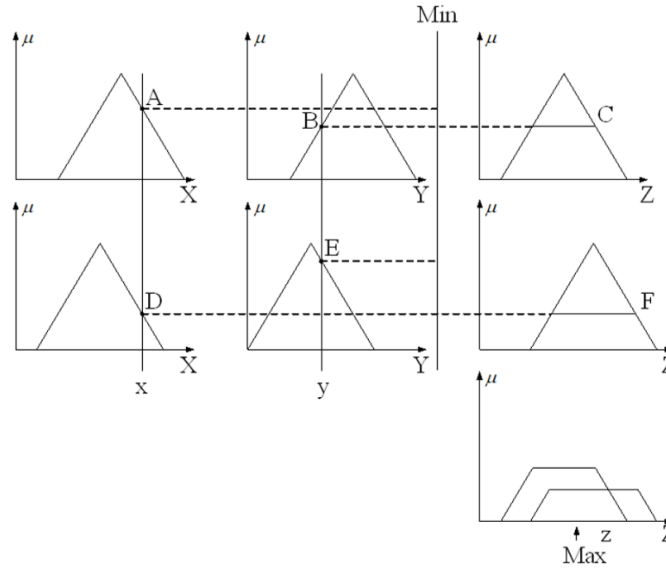
böylece klasik Mamdani bulanık ara yüzler küresel anlamını kaybederler. Bu nedenle, okunabilir ve ayırt edilebilir kurallar ancak kompakt bulanık kurallar göz önüne alındığında ve onları oluşturan çok sayıda benzer bulanık küme olmadığında elde edilebilir. Mamdani tipi bulanık kural yapısının bazı diğer uzantıları, küresel anlambilimini koruyarak ve dolayısıyla genel anlamda daha yorumlanabilir olarak önerilmiştir. Bunlar çift sonuçlu kurallar, ağırlıklı kurallar ve dilsel korumalara sahip kurallar içerir. Tüm durumlarda, dilsel değişken kısıtlamaları, elde edilen dilsel bulanık işlemlerin doğruluğunu artırmak için daha yüksek serbestlik dereceleri elde edilerek esnetilebilirler. Eşitlik (6) ve Eşitlik (7)' de iki kurallı Mamdani bulanık ara yüzü eşitlik çıkış denklemi verilmiştir (Mastacan vd., (2018), Saihi vd., (2019), Elfergani vd., (2018), Kharchouf vd., (2018)).

$$\text{Eğer } X = A \text{ ve } Y = B, \quad f_1 = C \quad (6)$$

$$\text{Eğer } X = D \text{ ve } Y = E, \quad f_1 = F \quad (7)$$

Kural tablosu Eşitlik (6) ve Eşitlik (7)' deki gibi tanımlanırsa

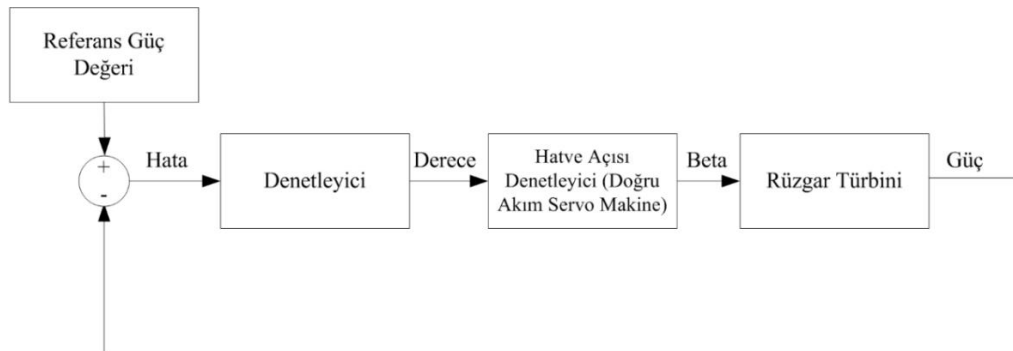
İki girişli Mamdani bulanık arayüzü kullanılarak maksimum ve minimum işlemlerinin gerçekleştirilmesi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. İki girişli Mamdani bulanık arayüzü kullanılarak maksimum ve minimum işlemlerinin gerçekleştirilmesi

## 5. Sistem Tasarımı

Sistem temel olarak 3 ana bölgeden oluşmaktadır. Bunlar Denetleyici, Hatve Açısı Denetimi ve Rüzgâr Türbini olarak adlandırılmaktadır. Sistemde rüzgâr türbininden alınan çıkış gücü referans değeri ile karşılaştırılarak hata sinyali elde edilir. Elde edilen bu hata sinyali denetleyiciye iletilerek derece elde edilir. Elde edilen derece servo motora iletilerek hatve açısı denetim işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemler sonucunda Rüzgâr Türbini 3. Bölgede çalıştırılması amaçlanmaktadır. Sistem tasarımı blok şeması Şekil 6'da gösterilmiştir.

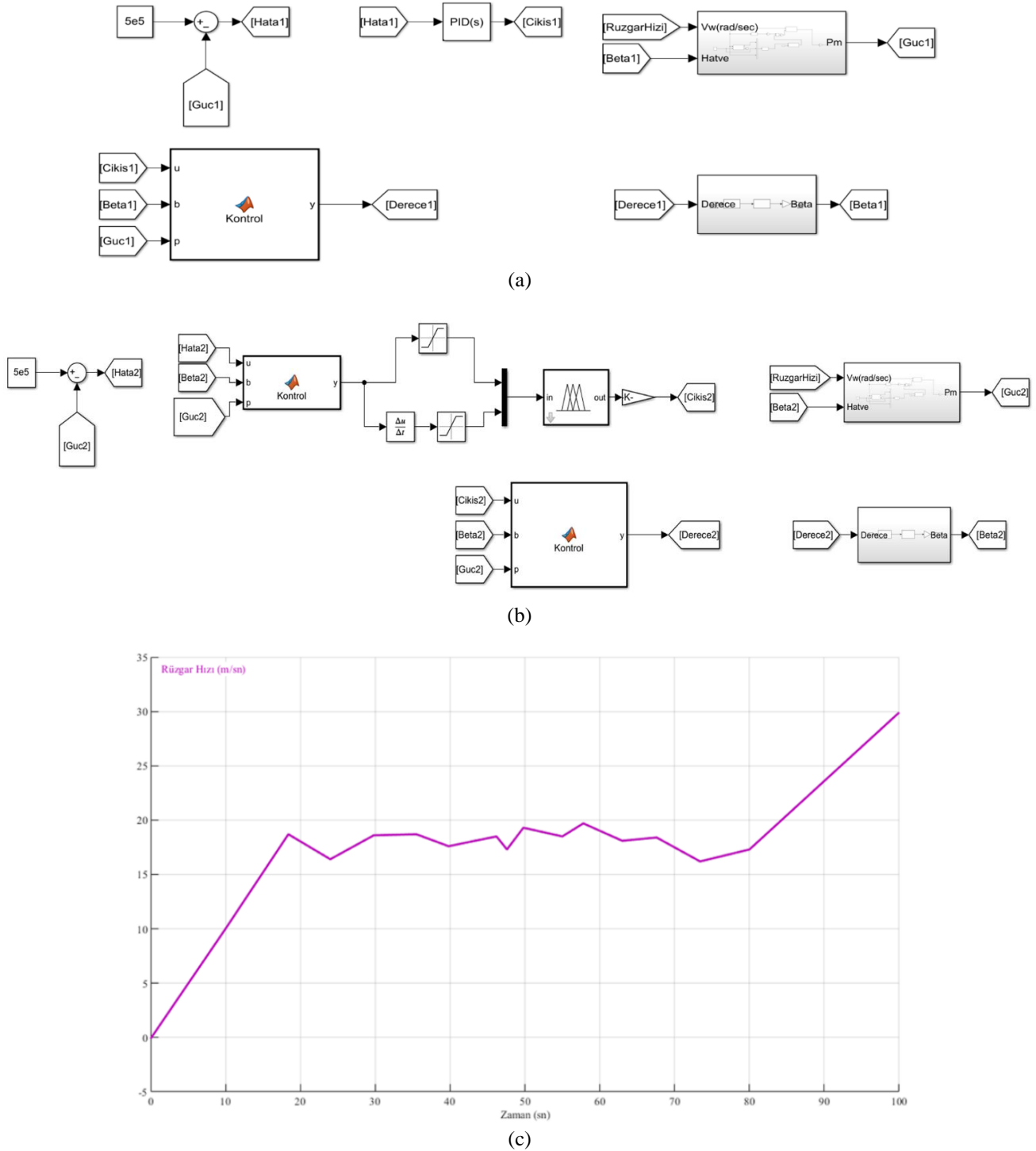


Şekil 6. Sistem Tasarımı Blok Şeması

## 6. Benzetim Sonuçları

Bu çalışmada değişken rüzgâr hızı uygulanan rüzgâr türbinin çıkışından istenen referans değerinde güç elde edilmesi amaçlanmaktadır. Değişken rüzgâr hızının istenen değere ulaşma süresi, değer üzerindeki dalgalanma miktarı Ziegler-Nichols ile katsayısı ayarlanan PID

ve BMD için alınarak MATLAB/ Simulink ortamında karşılaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’de sistemlerin ve sistemlere uygulanan rüzgâr hızı MATLAB/Simulink şemaları gösterilmektedir.



Şekil 7. a) PID MATLAB/Simulink Şeması b) BMD MATLAB/Simulink Şeması c) Rüzgâr Hızı

Ziegler Nichols tablosundan hesaplanan PID denetleyici katsayıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. PID Denetleyici Katsayıları

Kontrolcü Seçimi	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PID	-1	-0.000001	-0.000001

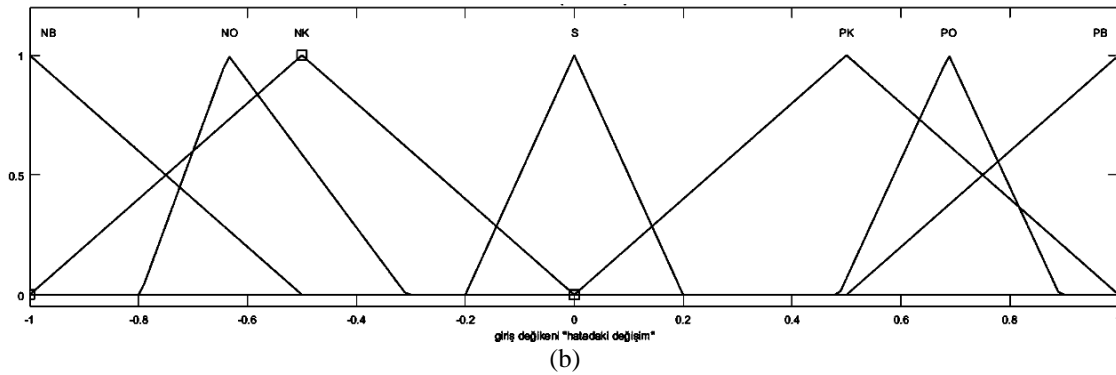
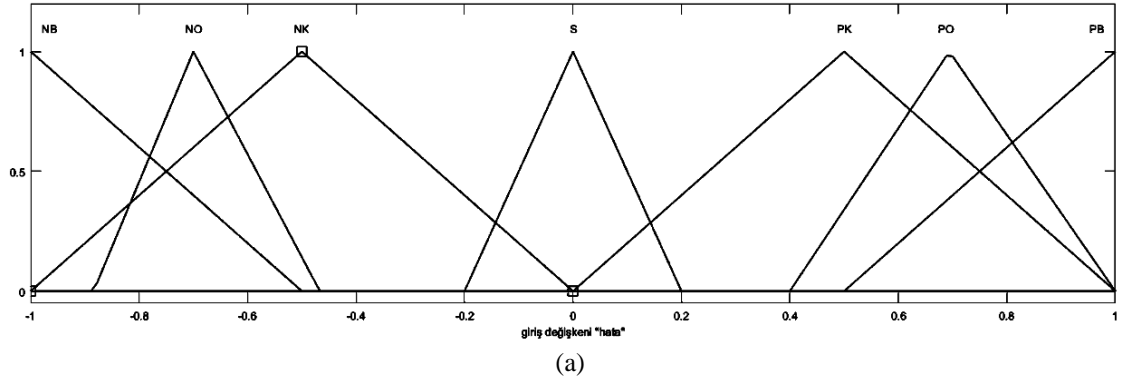


Rüzgâr türbini matematiksel ifadeler yardımıyla MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Rüzgâr Türbinine giriş olarak belirlenen rüzgâr hızı ve hatve açısı, çıkış olarak belirlenen rüzgâr türbininin güç değeri belirlenmiştir. MATLAB/Simlink ortamında tasarlanan rüzgâr türbininin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

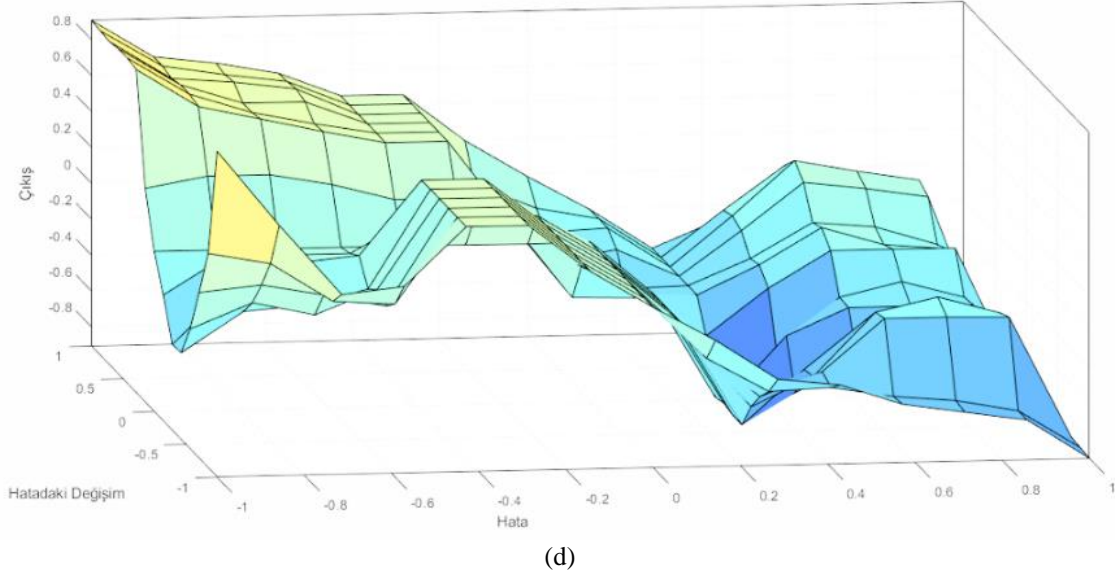
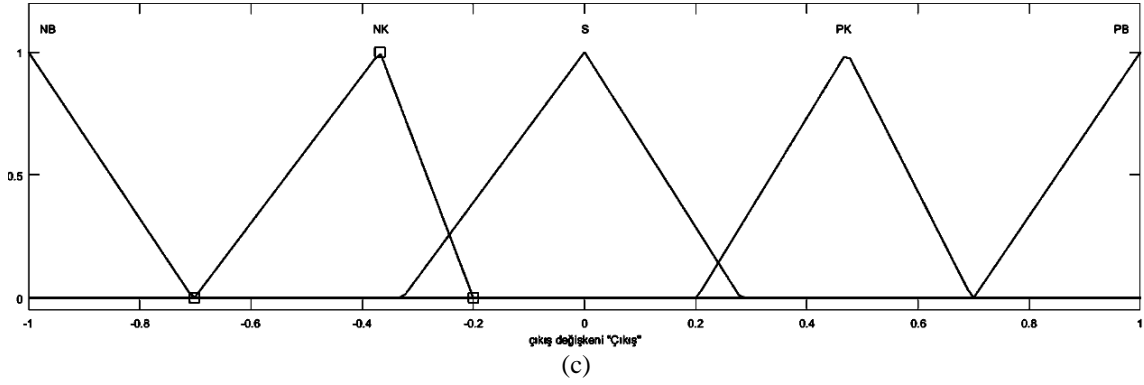
**Tablo 3. Tasarlanan Rüzgâr Türbini Özellikleri**

<b>Tasarlanan Rüzgâr Türbini Özellikleri</b>	
Nominal Çıkış Gücü	500 kW
Çalışma Durumu	Şebekeye entegreli
Rüzgâr türbinin çalışması için gerekli minimum rüzgâr hız	3 m/sn
Nominal rüzgâr hızı	12 m/sn
Rüzgâr türbinin çalışması için gerekli maksimum rüzgâr hız	25 m/sn
Rotor yarı çapı	24 m
Süpürme alanı	1810 m <sup>2</sup>
Kanat Sayısı	3
Nominal rotor hızı	30 rpm
Rotor hızı aralığı	10-30 rpm
Dişli kutusu oranı	1:50
Jeneratör sayısı	2
Jeneratör Tipi	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratör
Jeneratör nominal çıkış gücü	250 kW
Jeneratör nominal devri	1500 rpm
Jeneratör gerilimi	690 V

Bu giriş işlevleri, üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak dilsel ifadelerle dönüştürülür. Sistem hatası ve hata değişimi -1 ile 1 arasında değişir. Çıkış değeri 0 ile 1 arasında değişir. Giriş üyelik fonksiyonları değişken aralıklarla 7 üyelik fonksiyonuna ayrılırken, çıkış üyelik fonksiyonları değişken aralıklarla 5 parçaya bölünmüştür. Bu üyelik fonksiyonları NB (Negatif Büyük), NO (Negatif Orta), NK (Negatif Küçük), S (Sıfır), PK (Pozitif Küçük), PO (Pozitif Orta), PB (Pozitif Büyük) olarak adlandırılır. Üyelik fonksiyonları ve BMD kural yüzeyi Şekil 8'de gösterilmiştir.



**Şekil 8. a) Hata b) Hatadaki Değişim c) Yüzey**



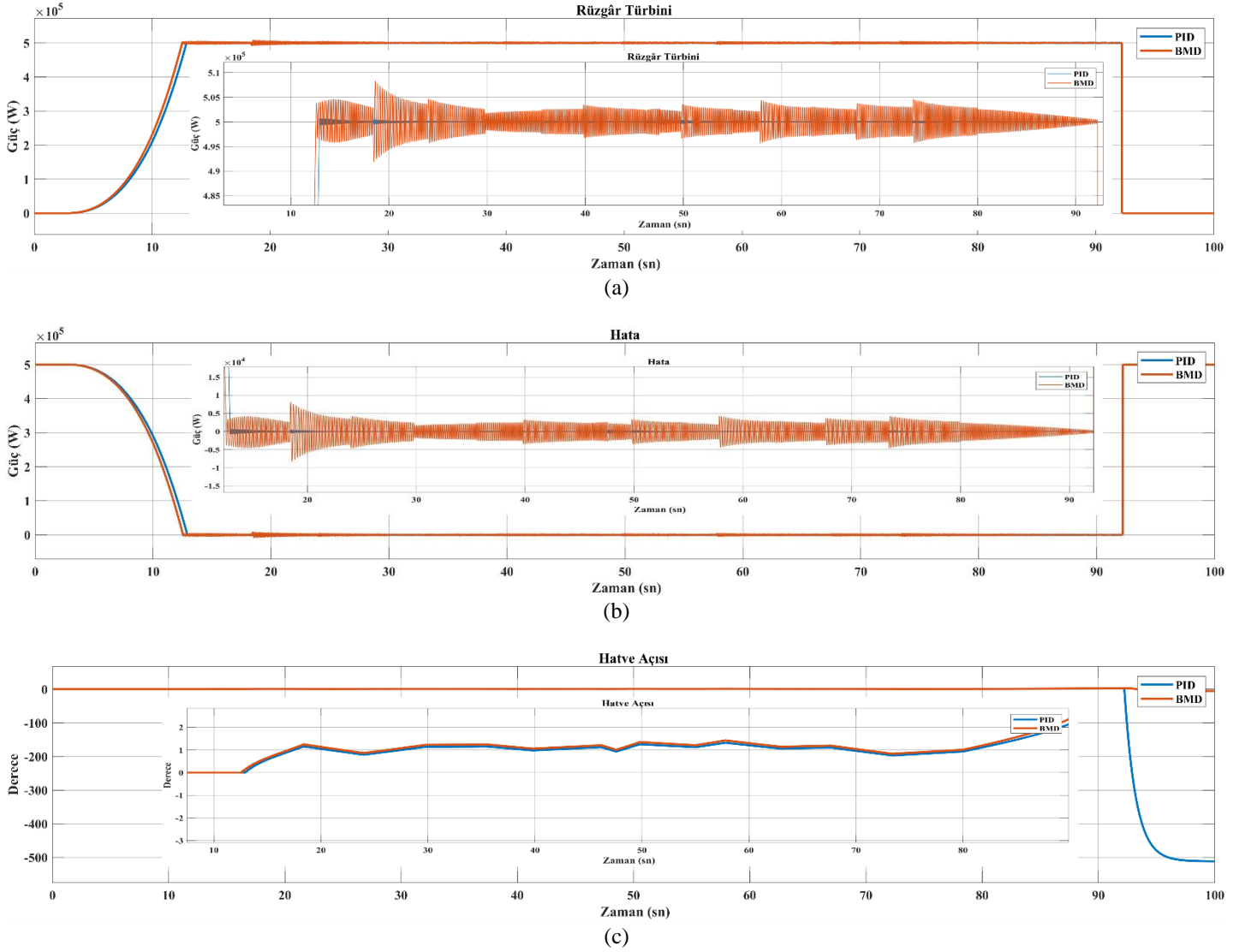
Şekil 9 (devam). a) Hata b) Hatadaki Değişim c) Yüzey

BMD kural tablosu Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. BMD kural tablosu

Error/Change of error	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	NB	NO	-	S	PB	-	PB
NO	PK	PK	-	S	PK	-	PK
NK	NB	NO	NK	S	PK	PB	PB
S	S	S	-	S	NO	NO	S
PK	NO	NB	-	NB	NO	-	NO
PO	NB	NO	PB	S	PK	PB	PB
PB	NB	NB	-	NB	NB	-	NB

Benzetim sonuçlarında, rüzgâr türbini gücünden elde edilen güç değeri ile referans değeri ile karşılaştırıldığında hata değeri oluşmaktadır. Bu hata değeri denetleyicilere gönderilir ve denetleyicilerin çıktısından gerekli ölçümler elde edilir. Elde edilen bu ölçüm doğru akım servo motora gönderilir. Bu işlemin sonucunda kanat hatve açısı oluşur. Kanat Hatve açısının değiştirilmesi, rüzgâra maruz kalan kanatların yüzeyini ayarlar ve rüzgâr türbininin güç çıkışını kontrol eder. Rüzgâr hızı, rüzgâr türbini gücü, hata değerleri ve hatve açıları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 10. a) Rüzgâr Türbini Gücü b) Hata Değeri c) Kanat Hatve Açısı

## 7. Sonuç

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji alanlarında güç çıkış kontrolünde yaygın olarak kullanılan geleneksel bir PID denetleyici ve kanat hatve açısı kontrolünde uzmanlık gerektiren BMD tasarımı gerçekleştirilmiştir. PID denetleyicide katsayıların değerlerinin ayarlanması, sistem çıkışının referans değerine yaklaştırılmasında önemli rol oynar. Birincil olarak, PID katsayı parametreleri Ziegler Nichols kullanılarak belirlenmiştir. İkincil olarak, BMD giriş ve çıkışları belirlenip üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur. Benzetim çalışması sonucunda rüzgâr türbini kanat açısı kontrol edilerek rüzgâr türbininden istenilen güç seviyesi elde edilmiştir. Tasarlanan rüzgâr türbini, rüzgâr hızı 3 m/s olduğunda herhangi bir güç üretimi gözlenmez. Rüzgâr 3m/s ile 25m/s arasında olduğu sürece 500kW elektrik üretir, 25m/sn üzerinde olduğunda denetleyici sistemler türbinin çalışmasını engelleyerek rüzgâr türbinini güç üretimini durduğu benzetim sonuçlarında gözlemlenmektedir. BMD, PID denetleyiciye göre referans güç değerinde yüksek salımlı değeri göstermektedir. Ancak referans güç değerine ulaşma süresinde daha kısa sürede ulaştığı benzetim sonuçlarından elde edilmiştir. BMD kanat hatve açısındaki değişimin PID denetleyiciye göre yüksek olması kanatların rüzgâra olan yönelimini artırarak rüzgâr türbinin sürdürülebilir güç üretimini arttırdığı benzetim sonuçlarında gözlemlenmiştir.

## Bilgilendirme

Bu çalışma mühendislik bilimleri araştırma ve geliştirme uygulamaları özel sayısı çağırısı kapsamında değerlendirilmiştir.

## Kaynaklar

Ahmed, R. T. (2009). "Design a position control of the blade pitch angle for variable speed wind turbine generators. Engineering and Technology Journal", 27(1681-6900).

- Bakdi, A., Kouadri, A., & Mekhilef, S. (2019). A data-driven algorithm for online detection of component and system faults in modern wind turbines at different operating zones. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 546-555, 10.1016/j.rser.2019.01.013.
- BTM Consult, (2001) "International Wind Energy Development; World Market Update 2000,".
- C. -K. Chang and S. -G. Zheng, (2021) "Combined Predictive Feedforward and Feedback Control for Blade Pitch of Wind Turbine," International Automatic Control Conference (CACCS), 2021, pp. 1-6, 10.1109/CACCS52606.2021.9639044.
- Civelek Z., Lüy M., Çam E., Barışçı N. (2014) "PI Kontrolör ile Rüzgâr Türbininin Hatve Açısının Kontrolü" ISEM2014, , Akademik Platform.
- Civelek, Z. (2020). "Optimization of fuzzy logic (Takagi-Sugeno) blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*", 23(1), 1-9, 201904010.
- Elfergani, A., Elsharif, M. A., Hamd, R. H., Saad, S. M., El Nailly, N., & Mohamed, F. A. (2018). Advanced self-tuned pitch angle control based on fuzzy logic for grid connected variable-speed wind turbine system. In 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC) (pp. 1-6). IEEE.
- EWE, (1999) "Wind energy - The Facts. "European Wind Energy Association, Brussels, Belgium".
- Jiang, S. J., Chu, S. C., Zou, F. M., Shan, J., Zheng, S. G., & Pan, J. S. (2023). A parallel Archimedes optimization algorithm based on Taguchi method for application in the control of variable pitch wind turbine. *Mathematics and Computers in Simulation*, 203, 306-327.
- Kharchouf, I., Essadki, A., Fdaili, M., & Nasser, T. (2018). Comparative study of MPPT and pitch angle using PI and fuzzy logic controllers. In 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 1-6). IEEE.
- Lüy, M. & Metin, N. A. (2022). PID Control Medium Size Wind Turbine Control with Integrated Blade Pitch Angle . *International Scientific and Vocational Studies Journal* , 6 (1) , 22-31, 10.47897/bilmes.1091968.
- M. Elsisı, M.-Q. Tran, K. Mahmoud, M. Lehtonen and M. M. F. Darwish, (2021) "Robust Design of ANFIS-Based Blade Pitch Controller for Wind Energy Conversion Systems Against Wind Speed Fluctuations," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37894-37904, 10.1109/ACCESS.2021.3063053.
- Mastacan, L., & Dosoftei, C. C. (2018). Temperature fuzzy control system with Mamdani controller. In 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE) (pp. 0352-0356). IEEE, ICEPE.2018.8559861.
- Nejad, A. R., Keller, J., Guo, Y., Sheng, S., Polinder, H., Watson, S., ... & Helsen, J. (2022). "Wind turbine drivetrains: state-of-the-art technologies and future development trends". *Wind Energy Science*, 7(1), 387-411.
- Pahasa, J., & Ngamroo, I. (2016). Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid. *IEEE Systems Journal*, 10(1), 97-105, 10.1109/JSYST.2014.2313810.
- Poureh, A., Chamani, M., & Bahri, A. (2023). "Nonlinear analysis of gain scheduled controllers for the NREL 5-MW turbine blade pitch control system." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 145, 108578.
- Saihi, L., Bakou, Y., Ferroudji, F., Berbaoui, B., & Djilali, L. (2019). MPPTF & pitch fuzzy controller of a wind turbine system using DFIG. In 2019 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications (ICSRESA) (pp. 1-6). IEEE.
- Shen, H., Ruiz, A., & Li, N. (2023). Fast online reinforcement learning control of small lift-driven vertical axis wind turbines with an active programmable four bar linkage mechanism. *Energy*, 262, 125350.
- Yuan, Y., Chen, X., & Tang, J. (2020). Multivariable robust blade pitch control design to reject periodic loads on wind turbines. *Renewable Energy*, 146, 329-341.