

# PID Control Medium Size Wind Turbine Control with Integrated Blade Pitch Angle

Murat Lüy<sup>a</sup>, Nuri Alper Metin<sup>b,1</sup>

<sup>a</sup> Kırıkkale Üniversitesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği, Kırıkkale, 71100, Türkiye  
ORCID ID: 0000-0002-2378-0009

<sup>b</sup> Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Meslek Yüksekokulu, Osmaniye, 80750, Türkiye  
ORCID ID: 0000-0002-9962-917X

## Abstract

Due to the increase in electricity consumption in the world, the tendency to increase resource diversity in the electricity generation section has increased. With the decrease in the reserves of petroleum and derivative products used in traditional energy production systems, energy production has turned to renewable energy sources. Examples of renewable energy sources are the sun, wind turbines, and fuel cells. In order to provide sustainable energy production in wind turbines, the blades and body must be protected. In this study, the blade pitch angle control of the wind turbine is realized with the PID controller and the wind turbine is protected from high speeds. The coefficient control of the PID controller is determined by the PSO (Particle Swarm Optimization) and Ziegler Nichols method. Simulation was carried out in MATLAB/Simulink environment. It has been observed that the PID coefficient parameters optimized with PSO in the pitch angle control process reach the reference power value in a shorter time compared to the PID parameter values calculated with Ziegler Nichols. In addition, it was observed that the oscillation value was less at the reference power reached and the pitch angle increased.

**Keywords:** “Wind turbines, renewable energy, PID control, pitch angle control.”

## 1. Giriş

Günümüzde petrol ve türevi ürünlerin kullanımının artmasıyla küresel iklim değişikliği yaşanmaktadır. Dünyada karbon salınımının azaltılması amacıyla rüzgâr, güneş, yakıt pilleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimine ilgi gittikçe artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ilk kurulum maliyetinin yüksekliği ve dayanıklılık açısından sınırlı kullanım alanlarına sahip olmalarına rağmen enerji üretimi açısından uygun maliyetlidir. Rüzgâr gücü, tarımsal faaliyetler, su taşımacılığı ve elektrik üretimi gibi alanlarda gittikçe artan oranlarda kullanılmaktadır. Güç üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliği geleneksel güç üretim kaynaklarına göre düşüktür. Rüzgâr türbinlerinin verimliliğinin artırılması ile daha fazla güç üretilebilecek ve yüksek üretim maliyeti olan güç jeneratörlerine olan ihtiyaç azalacaktır. Böylece tüketilen gücün üretim maliyetlerinin azalmasıyla son kullanıcı maliyetleri de azalacaktır [1-3].

Rüzgâr türbinleri düzenli rüzgârın bulunduğu yerlerde serbestçe kullanılabilir ve herhangi bir ilave maliyete sebep olmazlar. Çok az veya hiç çevre kirliliği içermeyen bir rüzgâr türbini tarafından üretilen güç aynı zamanda depolanabilmektedir. Standart rüzgâr türbininin verimliliği artırılırsa ve yaygınlaştırılırsa, üretilen güç maliyetleri de büyük ölçüde azaltılabilecektir. Üretilen ilk rüzgâr türbinleri çok güvenilir olmamakla birlikte enerji üretiminde de verimli değildiler [1-3].

Enerji üretiminde rüzgâr gücünün sadece yarısı kullanılabilir. Genellikle yavaşlar ve düşük uç hız oranına sahiptirler ancak tork için faydalıdır. Rüzgâr türbinlerinin kullanımı çok eski yıllara dayanmaktadır ve sürekli bir gelişim içerisinde. Bu durumun sonucu olarak yıllar geçtikçe rüzgâr türbinlerindeki kanatların sayısı da azalmıştır. Modern rüzgâr türbinlerinin çoğunda 3-6 kanat bulunurken ilk rüzgâr türbinlerinde ise 4-8 kanat bulunmaktadır. Geçmiş yıllarda rüzgâr türbinleri el ile rüzgâra yönlendirilirken, modern rüzgâr türbinleri otomatik olarak rüzgâr yönünü tespit edip rüzgâr yönüne dönebilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin tasarımı ve üretimi için kullanılan malzemeler de yıllar içinde değişiklik göstermiştir [4-6].

Rüzgâr türbinlerinden üretilen elektrik enerjisi temelde rüzgârın hızına bağlıdır. Rüzgâr hızı nominal rüzgâr hızından düşük olduğunda maksimum güç transferi yöntemleri tercih edilirken, rüzgâr hızı nominal değerler arasındaysa hatve açısı kontrolü

<sup>1</sup> Corresponding Author  
E-mail Address: alper-metin@hotmail.com

yapılarak rüzgâr türbini çıkışından nominal güç değerine yakın değerler elde edilebilmektedir. Hatve açısı kontrolü, rüzgâr türbinin uzun yıllar boyunca dayanımını ve sürdürülebilir elektrik enerjisi üretimini sağlamak amacıyla yapılır [3-6].

Literatürde yapılan çalışmalar yeni nesil kontrolör içeren yapay zekâ, bulanık mantık, kayma kipli kontrol gibi yöntemler kullanılmaktadır. Önerilen yöntemler çok fazla işlem yükü ve konuyla ilgili uzmanlık gerektirmektedir. Buna ek olarak sistemlerde maliyet artışı oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlar ise geleneksel sistemlerden çok daha iyi olmadığı ancak bir miktar üstünlük sağladığı görülmektedir. Önerdiğimiz yöntem de ise düşük maliyetli, basit yapıda ve geleneksel olarak iyi derecede bilinen bir kontrolcünün optimizasyon yöntemi ile geliştirilmesidir.

Bu çalışmada geleneksel bir yöntem olarak PID kullanılmıştır. PID denetleyiciler sağlam yapısı, basitliği, maliyetinin düşüklüğü ve kullanım kolaylığından dolayı çok tercih edilmektedir. Ancak sistemlerin değişen şartlarından dolayı ilk ayarlanan parametreler yetersiz kalmakta ve sistemlerin çıkış parametrelerinde bozulmalar meydana gelmektedir. Önerilen çalışmada ilk olarak PID parametreleri geleneksel bir yöntem olan Ziegler Nichols yöntemi ile ayarlanmıştır. Daha sonra çalışma şartlarında oluşacak parametre değişikliklerine uyum sağlaması açısından Parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması ile PID katsayı parametreleri ayarlanmakta ve düşük maliyetli, kararlı, sistem parametrelerinin değişiminden etkilenmeyen bir kontrolör geliştirilerek literatüre katkı sağlanmıştır. Uyarlanabilir PID kontrolör ile güç kontrolü gerçekleştirmek için rüzgâr güç santrallerinin kollektif hatve açısının kontrolü MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile yapılmıştır. Karşılaştırmalar sistem parametrelerinin ayarlandığı iki yöntem ile gerçekleştirilmiş ve rüzgâr türbininin güç kararlılığının sağlanması için hatve açısı kontrolü gerçekleştirilmiştir.

## 1.1. Literatür Taraması

Bansal ve arkadaşları, sürekli güç üretimi elde etmek için kanat hatve açısına ve Rüzgâr Türbini (RT) çalışmasındaki diğer uç hızı oranına dayalı mekanik kontrol şemaları sistemi önermişlerdir. Bu nedenle sabit olması gereken torku elde etmek için etkili kontrolörler kullanmak gerekir. Uygun ve etkili kontrol metodolojileri olan Orantılı-İntegral (PI), Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı kanat hatve açısı, uç hızı oranı kontrolörleri, tork stabilitesi ve tepki süresi ile ilgili performans araştırması için tasarlanmış ve dikkate alınmıştır [7].

El-Okda ve arkadaşları, çalışmalarında Kanat Elemanı Momentum Teorisini (BEMT), küçük yatay eksenli rüzgâr türbinleri (HAWT) tasarlamak ve HAWT'lerin performansını incelemek için kullanmışlardır. Optimum rotor tasarımında BEMT, üç kanatlı ve beş kanatlı HAWT'ler için Schmitz formülleriyle birlikte kullanılmıştır. Bu çalışmada SG6043 kanat profili kullanılmış olup, 6 m/sn'lik düşük rüzgâr hızı kullanılmıştır. Kanat elemanları üzerindeki kıvrım dağılımlarının uzunluğunu ve açısını yinelemeli olarak hesaplamak için bir MATLAB kodu geliştirilmiştir. Kanat elemanı momentum teorisi, bir dizi tasarım dışı rüzgâr hızı için kanat eğimi etkisini incelemek için de kullanılır. Küçük HAWT'ler için kanat eğiminin, tasarım rüzgâr hızından uzak rüzgâr hızları için maksimum sergilenen güç katsayısını iyileştirdiği ve tasarım rüzgâr hızı etrafındaki  $C_p$  üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur [8].

Ayadi ve arkadaşları, rüzgâr türbini sisteminin dinamik performanslarını artırmak için bir saha kontrol sistemi tasarlamayı amaçlamışlardır. Rüzgâr türbinleri doğrusal olmayan güçlü kavrama sistemleri olduğundan, kayma kipli kontrolünün iyi bir yaklaşım olduğunu ifade etmişlerdir. İlk başta, türbin üzerinde basit bir kayma kipli denetleyicisi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Daha sonra, titreşim etkisini azaltmak için iyileştirici bir kayma kipli denetleyicisi uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrol yönteminin iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir [9].

Kumar ve arkadaşları rüzgâr türbinindeki kanat hatve açısı kontrolünün, rüzgâr türbininin kararlılığını sağlamak ve sabit bir çıkış torku elde etmek için önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle, doğru ve etkili kontrol teknikleri yardımıyla sabit çıkış torku elde etmek için tasarımlar yapılmıştır. Tork kararlılığı ve tepki süresi açısından kontrol teknikleri uygulanmıştır. Bu kapsamda Oransal-İntegral (PI) ve Bulanık Mantık (FL) tabanlı kanat hatve açısı kontrolü olmak üzere iki kontrol tekniği uygulanarak performansları analiz edilmiştir. Önerilen sistem MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Kontrol teknikleri küçük ve büyük süreli değişimler, rüzgâr hızının artması ve azalması gibi değişken rüzgâr hızı koşullarında test edilmiştir. Bununla birlikte, her iki kontrol sisteminin performans sonucu yaklaşık olarak aynıdır. Karşılaştırma sonucunda bulanık mantık denetleyicisi kullanılan sistemde, yerleşme süresi açısından PI tabanlı sisteme kıyasla daha iyi performans elde edildiği gözlemlenmiştir [10].

Sreenivas ve arkadaşları, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sektöründe önemli bir rol oynadığını, geleneksel fosil yakıtlı enerji santrallerinin çevreye zarar vermekle birlikte fosil yakıtla dayalı enerji santralleri için kaynak kullanılabilirliğinin hızla azaldığını ifade etmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, gelgit ve biokütledir. Bunlar arasında, rüzgâr potansiyeline sahip dünya yüzeyinin elverişli olması nedeniyle rüzgâr enerjisi santrallerinden elektrik enerjisi üretim oranı hızla artmaktadır. Bununla birlikte, rüzgâr enerjisi santralleri şehirlerden uzakta kurulan karmaşık mekanik yapılara sahiptir. Bu nedenle, rüzgâr santrallerinin enerji verim potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için sürdürülebilir bir izleme tekniği gereklidir. Rüzgâr türbini santrallerinin çıkış gücü, rüzgâr kanadının süpürdüğü alana bağlıdır. Rüzgâr yönü iklim durumuna bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu nedenle, rüzgâr kanatlarının konumunu değiştirmek için rüzgâr yönünü sezme gerekir. Bu araştırma çalışması, rüzgâr türbinlerinin torkunu düşük ve yüksek rüzgâr senaryoları altında kontrol etmek için bir eğim açısı kontrol

tekniki önermektedir. Düşük rüzgâr hızlarında güç kaybının meydana geldiği ve yüksek rüzgâr hızlarında rüzgâr türbini ve jeneratörün zarar gördüğü bilinen bir gerçektir. Birincil olarak, iki ana sürücü dizisi birleştirilmiş kanat hatve açısı modellenmiş ardından kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlü bir rüzgâr türbini modeli geliştirilmiştir. Model, MATLAB kullanılarak benzetim işlemi gerçekleştirilmiştir. Hatve açısı kontrolünün rüzgâr santralının enerji verim potansiyelini arttırdığı gözlemlenmiştir [11].

Wang ve arkadaşları, çift beslemeli büyük indüksiyon jeneratörlerinin rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemini tasarlamıştır. Sistem bir rüzgâr türbini, bir dişli kutusu, bir çift beslemeli endüksiyon jeneratörü, bir arka arkaya dönüştürücü ve bir transformatörden oluşmaktadır. TurbSim, NREL firması tarafından doğal rüzgâr hızını dizayn etmek için geliştirilmiş, rüzgâr hızı, rüzgâr kesmesi ve kule gölge efekti vb. türbülansını iyi bir şekilde somutlaştırabilen açık kaynaklı bir pakettir ve rüzgâr hızını modellemek için kullanılmıştır. Rüzgâr türbinini yapısal dinamik karakteristiklerini modellemek için FAST kullanılmıştır. Çift beslemeli rüzgâr türbinlerinde çift beslemeli jeneratörleri, elektrik sistemlerini ve diğer elektrik sistemleri olan dönüştürücü kontrolünü, hatve tahrik sistemlerini ve hatve açısı kontrolünü modellemek için MATLAB / Simulink kullanılmıştır. 1P, 2P ve 4P kanat köklerindeki eğilme momentini azaltmak için PR IPC kontrol stratejisi uygulanmıştır. Benzetim çalışmaları sonuçları, bağımsız kanat açılarının kontrolünün bağımsız olmayan kanat açısı kontrolüne göre daha iyi olduğu ve rüzgâr türbini ünitelerinin hizmet ömrünü uzatmak için etkili bir kontrol yöntemi olduğunu göstermektedir [12].

Sarkar ve arkadaşları, geleneksel olarak yalnızca güç üretimini optimize etmek için kullanılan kanat hatve açısı kontrolörünü, güç üretimini 1P (devir başına bir kez) düzenlemenin yanında aerodinamik yükleri azaltmak için doğrusal-ikinci dereceden (LQ) denetleyiciye entegre bir durumda kullanılmışlardır. Önerilen kontrolör, yüksek kaliteli bir aeroelastik açık deniz rüzgâr türbini modelinde kullanılarak rüzgâr türbini simülatörü FAST tarafından kullanılan temel kontrol cihazı (BC) ile karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar, önerilen kontrol cihazının güç üretimini optimize etme ve rüzgâr türbinindeki yükleri azaltmada iyi bir performans elde ettiğini göstermektedir [13].

Elbeji ve arkadaşları, rüzgâr hızı nominal değeri aştığında rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde sorunlar ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Yaptıkları makale çalışmasının amacı, rüzgâr türbininin mekanik olarak korunması ve kanat hatve açısının yüksek rüzgâr hızında kontrol edilmesidir. PI denetleyici, hatve açısını düzenlemek için geleneksel bir yöntem olarak kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarında, hatve açısı kontrolü sisteminin yüksek rüzgâr hızlarında rüzgâr türbinlerinin korunması için kullanılabilirliği gözlemlenmiştir [14].

Rüzgâr türbini hatve açısı kontrolünde yapılan çalışmalar ve kullanılan yöntemlerin özeti Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1. Literatür taraması özeti.**

Yapılan Çalışma	Kullanılan Yöntem
Baransal vd. (2016) [7]	PI kontrol ve yapay sinir ağları
El Okda vd. (2020) [8]	Kanat elemanları teorisi (BEMT)
Ayadi vd. (2015) [9]	Kayan Kipli Denetleyici
Kumar vd. (2015) [10]	Bulanık Mantık ve PI denetleyici
Sreenivas vd. (2021) [11]	Rüzgâr türbini tasarımı ve hatve açısı tasarımı ve kontrol kart tasarımı
Wang vd. (2020) [12]	PR ve IPC kontrolcüsü
Sarkar vd. (2021) [13]	İkinci dereceden LQ denetleyici
Elbeji vd. (2020) [14]	PI kontrolcü

## 2. Rüzgâr Türbini

Rüzgâr türbinlerinden elde edilen güç oranı, rüzgâr türbinleri kanatları ile rüzgâr arasındaki etkileşime bağlıdır. Bu nedenle, rüzgâr türbinlerinden elde edilen güç rüzgâr hızının değişimine değil, sabit rüzgâr hızına bağlıdır. Eşitlik (1)'de gücün hava yoğunluğuna, rüzgâr hızına ve kanatlarının süpürdüğü alana bağlı olduğu görülmektedir. Literatürde çalışmalar maksimum güç katsayısının %59,26 civarında olduğunu göstermektedir. Güç katsayısı ( $C_p$ ) olarak ifade edilmiştir. Kanat ucu doğrusal hızları ile rüzgâr hızı arasındaki ilişki uç hızı olarak tanımlanır [11].

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

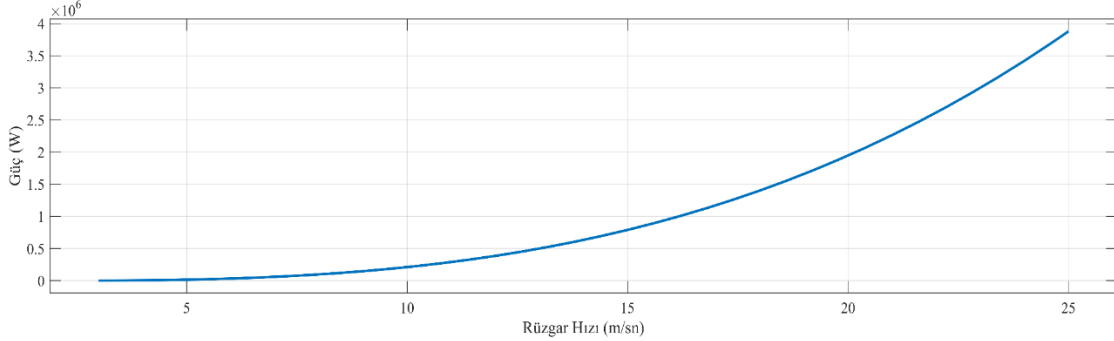
Güç katsayısı Eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \times \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \times \beta - C_4 \times \beta^2 - C_5 \right) \times \exp\left( \frac{C_6}{\lambda_i} \right) \quad (2)$$

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

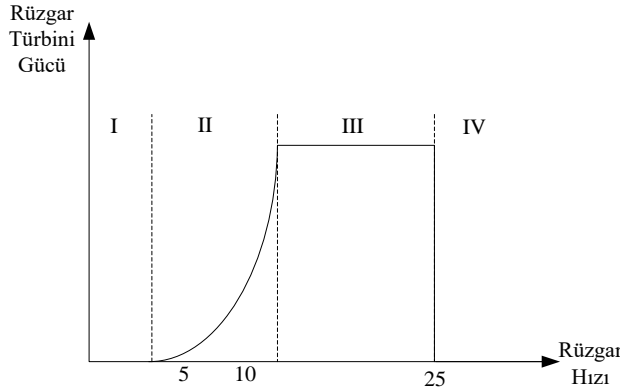
$$\lambda_i = \frac{\omega_R}{V_w} \quad (4)$$

Eşitlik (1-4)'de verilen değişkenler  $P_{max}$ , rüzgâr gücü,  $C_p$ , rüzgâr türbininin güç katsayısı,  $\rho$ , hava yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),  $v_m$ , rüzgâr hızı (m/s),  $\lambda$ , uç hızı oranı,  $\beta$ , kanat eğim açısı (deg),  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  sabitler,  $A$ , türbin kanatlarının süpürdüğü alan ve  $R$ , Radius olarak isimlendirilir. Şekil-1'de hatve kontrolü olmadan, rüzgâr türbinin rüzgâr hızına göre güç değişimi verilmiştir [11].



Şekil 1. Kontrolsüz güç-rüzgâr hızı eğrisi.

Rüzgâr hızının değişken olduğu rüzgâr türbinlerinde çıkış gücünde değişiklik gösterir. Değişken rüzgâr hızına göre rüzgâr türbininin dört farklı çalışma bölgesi Şekil-2'de gösterilmiştir. I. çalışma bölgesinde, rüzgâr hızı kesim değerinden daha küçük olduğu için, rüzgâr türbinin çıkış gücü sıfırdır. II. çalışma bölgesinde rüzgâr hızı nominal hız ile kesme hızı arasındadır. III. çalışma bölgesinde rüzgâr hızı nominal çalışma hızındadır. IV. bölgede, rüzgâr hızı nominal rüzgâr hızından yüksektir. Bu bölgede rüzgâr türbini güvenlik ve sürdürülebilir enerji üretimi için durdurulur. III. bölgede, rüzgâr hızı nominal değerdeyken rüzgâr türbininin güç değeri nominal güç değerine ulaşır. Rüzgâr hızı değiştikçe, rüzgâr türbinin çıkış gücü de değişiklik gösterecektir. Bu sebeple, sistemin istenen güç değerine ulaşması ve o değerde tutulması gerekmektedir. Bu durumu sağlayabilmek için kontrol sistemi kanat hatve açısının kontrol edilmesi gereklidir [15-17].



Şekil 2. Rüzgâr türbini çalışma bölgeleri.

## 2.1. Hareketlendirme Sistemi

Kanat hatve açısı kontrolü, bir rüzgâr türbini rotorunun kanatlarının açısını, gücün üretimini kontrol etmek için rüzgâra veya rüzgâr dışına yönelme olarak tanımlanır. Kanat hatve kontrolü, neredeyse tüm büyük modern yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin bir özelliğidir. Kanat hatve kontrol sisteminin temel işlevi, rüzgâr hızına göre değişen eğim açısını kontrol ederek rotor hızını çalışma sınırları içinde tutmaktır. Bu kontrol işlemini gerçekleştirmek için hareketlendirici sistemler kullanılır. Bu hareketlendirici sistemleri genelde elektriksel olarak doğru akım servo motor tercih edilir. Doğru akım servo motorunun kullanım amacı her kanat için ayrı ayrı tasarlanıp kolay bir şekilde kontrol edilmesidir. Doğru akım servo motorun transfer fonksiyonu Eşitlik (5)'de verilmiştir [18,19].

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \left[ \frac{K_m}{s \times (s^2 \times J_{eff} \times L + (L \times f_{eff} + R \times J_{eff}) \times s + R \times J_{eff} + K_m \times K_b)} \right] \quad (5)$$

Verilen denklemde R, armatür direnci, L, armatür indüksiyonu,  $K_m$ , DC motor sabiti,  $K_b$ , geri gerilim sabiti,  $V_a$ , uygulanan armatür voltajı,  $\theta(s)$ ,geri bildirim voltajı,  $J_{eff}$ , motorun atalet momenti,  $f_{eff}$ , yük ve motorun viskoz sabiti olarak tanımlanır [19].

### 3. PID Kontrol

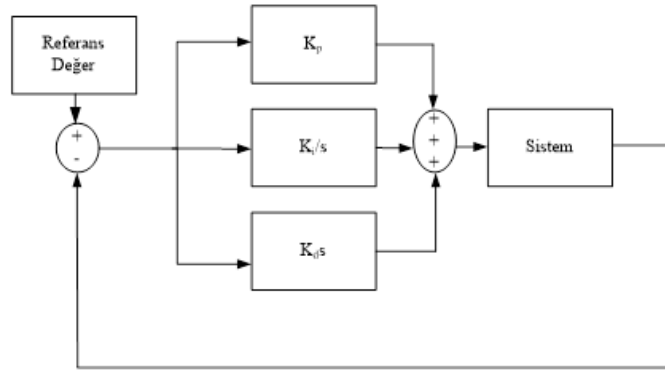
Oransal İntegral Türev (PID) kontrolörleri, ayarlanacak parametre sayısının az olması nedeniyle endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Referans sinyali ile gerçek çıktı arasındaki hatanın oranına (orantılı eylem), hatanın integraline (integral eylem) ve hatanın türevine (türev eylem) göre orantılı kontrol sinyalleri sağlarlar. PID'nin matematiksel denklemi Eşitlik (6)'da verilmiştir [20, 21].

$$U(t) = K_p \times \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (6)$$

Burada  $u(t)$  ve  $e(t)$  sırasıyla denetim ve hata sinyallerini gösterir,  $K_p$ ,  $T_i$  ve  $T_d$  ayarlanacak parametrelerdir. Eşitlik (6)'da belirtilen denklemin transfer fonksiyonu Eşitlik (7)'de verilmiştir [20, 21].

$$K(s) = K_p \times \left[ 1 + \frac{1}{T_i(s)} + T_d(s) \right] \quad (7)$$

PID kontrol yapısı basit olduğundan, şimdiye kadar endüstride kullanılan en kapsamlı kontrol yöntemlerinden biri olmuştur. PID kontrolcüsünde optimum çalışma noktasını yakalamak ve daha iyi kontrol performansını elde etmek için oransal kazancı ( $K_p$ ), integral kazancını ( $K_i$ ) ve diferansiyel kazancı ( $K_d$ ) ayarlamak gerekmektedir. PID kontrolcüsü sistemi blok diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir [20, 21].



Şekil 3. PID kontrolcü devre şeması.

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

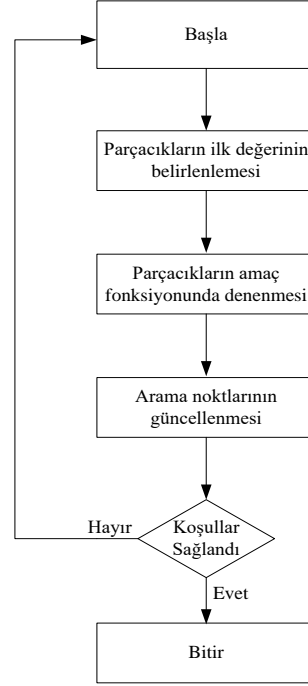
Ziegler ve Nichols tarafından sunulan bu yöntem, bir çarpma testinden elde edilen açık döngü adımı yanıtı şeklindeki işlem bilgilerine dayanmaktadır. Bu yöntem modelleme ve denetime dayalı geleneksel bir yöntem olarak görülür. Ziegler Nichols kontrolcü ayarlama kuralları, kapalı döngü sistemlerinde yük bozukluklarının ve sistemin referans değere göre değişimini optimum bir şekilde ayarlamak için geliştirilmiştir. Sistem modeli fiziksel olarak türetilmezse, yaklaşık modelin parametrelerini ayarlamak için denemeler yapılabilir. Bir sistemin birim basamak yanıtı deneyle ölçülebiliyorsa, gösterilen basit bir yaklaşımla kontrolcü parametreleri  $k$ ,  $L$  ve  $T$  parametreleri bulunur. Ziegler-Nichols formülü kontrolcü parametrelerin belirlenmesi Tablo 2'de verilmiştir [20, 21].

Tablo 2. Ziegler Nichols kontrolcü parametresi ayarlama.

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

### 3.2. PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) ile PID Katsayı Denetimi

PSO algoritması bir problemi yinelemeli olarak optimize etmeye çalışan sezgisel algoritmalarındandır. Bu algoritma, hayvanların birbiriyle olan davranışlarından evrilerek tasarlanan optimizasyon tekniğidir. PSO algoritmasında, arama uzayına dağıtılan parçacıkların boyutunu optimize edecek parametre değeri ve arama uzayında dolaşan parçacıklar tanımlanır. Bu parçacıklar, arama uzayındaki yönelimlerini, aynı kuş sürülerinde olduğu gibi hem kendi uçuş doğrultusunda hem de sürünün uçuş doğrultusunda belirlemektedir. PSO algoritmasının akış şeması Şekil-4'te gösterilmiştir [22, 23].



Şekil 4. PSO akış şeması.

Tekil olarak parçacıkların arama uzayında ulaştığı en iyi konum, o parçacığın lokal en iyi konumu olarak tanımlanır. Bu konum, o parçacığın bir önceki deneyimi olarak ifade edilir. Tüm parçacıkların arama uzayından elde ettikleri en iyi konum, global olarak elde ettiği en iyi konumdur. Bu konum ise oluşturulan sürünün bir önceki deneyimi olarak ifade edilir. Optimizasyon kavramı tekil ve sürü parçacıklarının lokal ve global olarak en iyi konumuna ulaşması temeline dayanmaktadır [24, 25].

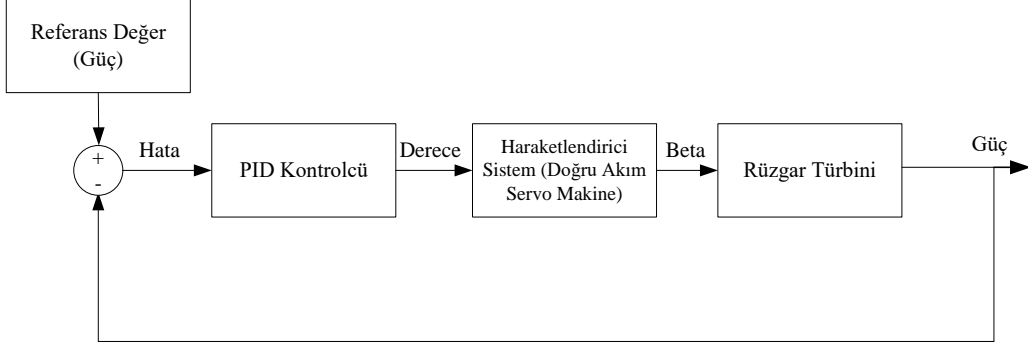
$$V_i^k = w_i \cdot V_i^{k-1} + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (P_{\text{best}_i}^k - X_i^{k-1}) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (G_{\text{best}_i}^k - X_i^{k-1}) \quad (8)$$

$$X_i^k = X_i^{k-1} + V_i^k \quad (9)$$

PID kontrolcü tasarımında önemli kriterlerden biri sistemin matematiksel olarak tanımının yapılması gerekliliğidir. Sistemde kararlı hal hatalarını engellemek amacıyla PID denetleyicinin  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  değerlerinin optimize şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

## 4. Sistem Tasarımı

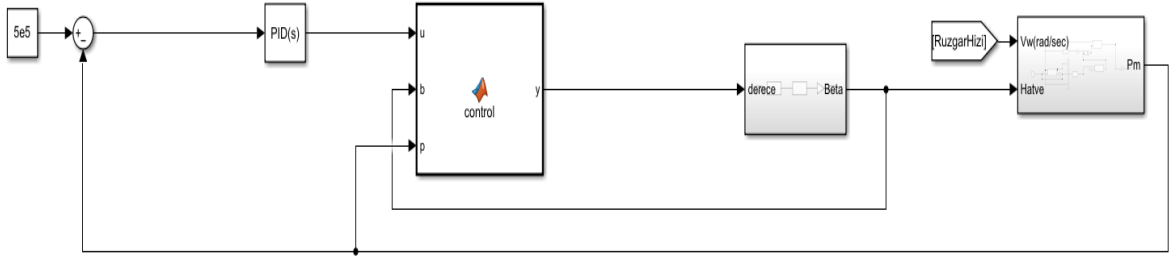
Sistem, rüzgâr türbini, PID kontrolcü ve hareketlendirme sistemi olarak 3 bölümden oluşmaktadır. Sistemde rüzgâr türbininden elde edilen çıkış gücü ile referans değer karşılaştırılarak hata değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu hata değeri PID kontrolcüye verilmiştir. PID kontrolcü çıkışından elde edilen değer, hareketlendirici sisteme iletilerek hatve açısı kontrolcü sağlanmıştır. Sistem tasarım şeması Şekil-5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Sistem tasarım şeması.

#### 4.1. Benzetim Sonuçları

Bu çalışmada sürekli olarak değişen rüzgâr hızına karşı sistemde hatve açısının kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Sistemde rüzgâr türbini çıkış gücünü istenen referans güç değerine yaklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Referans güç değerine yaklaştırma işlemi gerçekleştirilirken rüzgâr türbinin hatve açısı kontrolü işlemi gerçekleştirilmiştir. Kontrol işlemi, katsayıları Ziegler Nichols ile hesaplanan ve Pso ile optimize edilen PID ile gerçekleştirilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen sistemin devre şeması Şekil-6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Sistemin MATLAB/Simulink ortamında tasarımı.

MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan rüzgâr türbinine giriş olarak rüzgâr hızı ve hatve açısı verilmiş, çıkış olarak rüzgâr türbininin güç değeri alınmıştır. Tasarlanan rüzgâr türbini özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Tasarlanan rüzgâr türbini özellikleri.

Tasarlanan Rüzgâr Türbini Özellikleri	
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 yarıçapı	24 m
Süpürme alanı	1810 m <sup>2</sup>
Kanat adedi	3
Nominal rotor hızı	30 rpm
Rotor hız bölgesi	10-30 rpm
Dişli kutusu oranı	1:50
Jeneratör sayısı	2
Jeneratör Tipi	Asenkron sincap kafes makine
Jeneratör nominal çıkış gücü	250 kW
Jeneratör nominal devri	1500 rpm
Jeneratör gerilimi	690 V

Ziegler Nichols teoremine göre hesaplanan PID katsayıları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. PID (Ziegler Nichols) katsayı değerleri.

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

PSO (Parçacık sürü optimizasyonu) PID katsayı optimizasyonu için tasarım kriterleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5 PSO parametreleri ve değerleri.

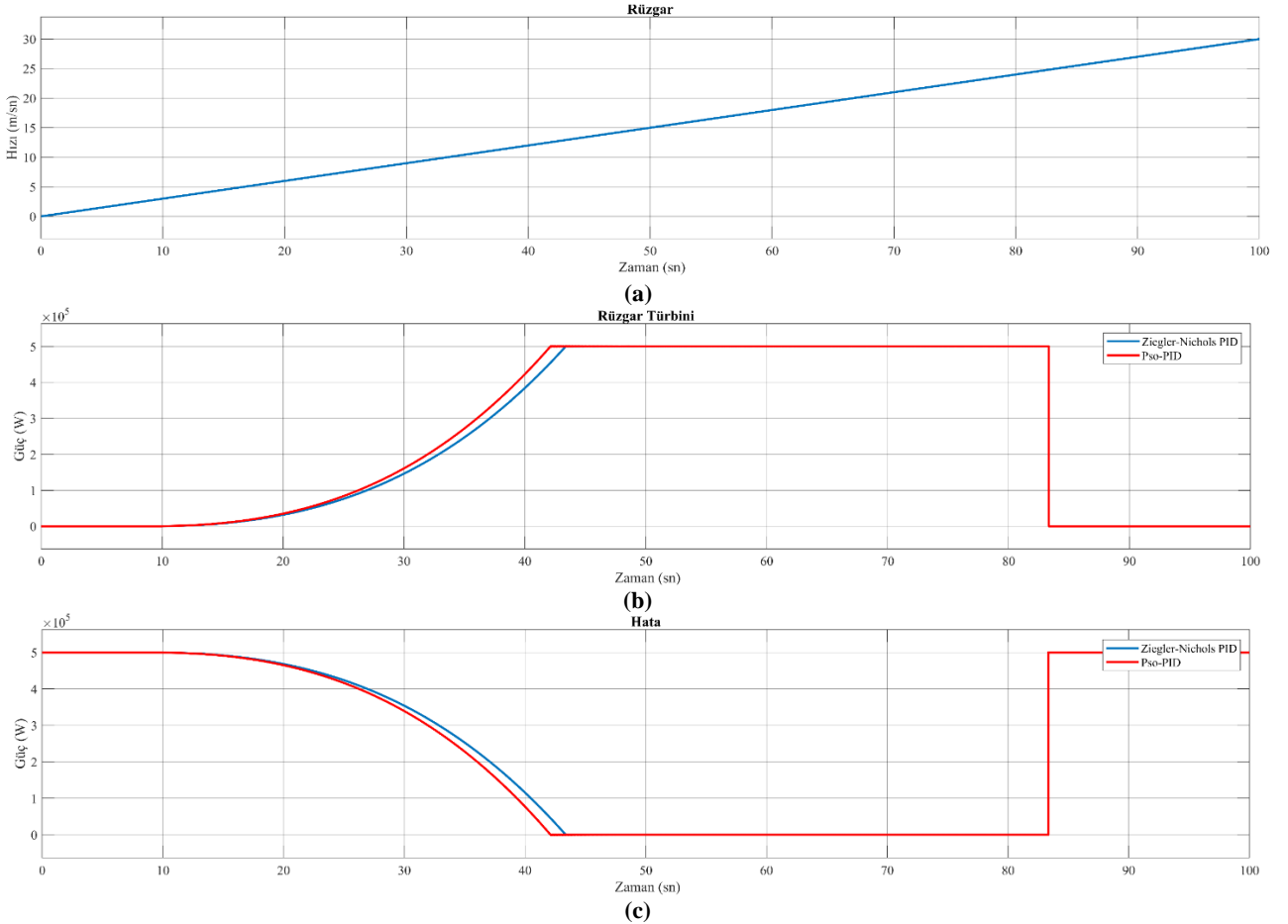
PSO parametreleri	Değerleri
Sürü Sayısı	20
İterasyon Sayısı	100
Maksimum Ağırlık	0.3
Minimum Ağırlık	0.2
c1	1.2
c2	2

Tasarım kriterlerine göre optimize edilen PID katsayı değerleri Tablo 6’da verilmiştir.

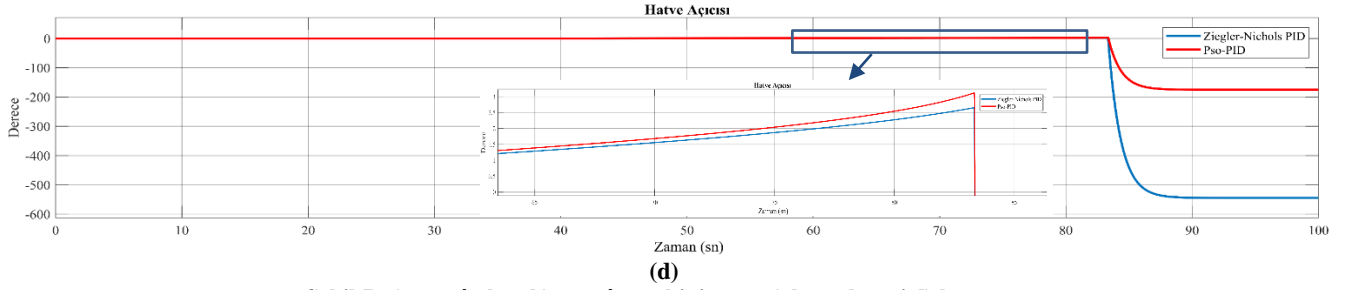
Tablo 6 PID (PSO) katsayı değerleri.

Kontrolcü Tipi	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PID	-1.0464	$-1.2897 \cdot 10^{-5}$	$-1.5224 \cdot 10^{-6}$

Benzetim sonuçlarında rüzgâr türbinin çıkışından alınan güç değeri ile referans değeri karşılaştırılmış ve hata değeri üretilmiştir. Üretilen hata değeri PID kontrolcüye iletilerek çıkışından kanadın olması gereken derecesi elde edilmektedir. Elde edilen bu derece hareketlendirici sisteme iletilerek, hareketlendirici sistem çıkışından kanat hatve açısı oluşturulmaktadır. Hatve açısı değişimi ile kanatların rüzgâr alma yüzeyi ayarlanmakta ve rüzgâr türbininin çıkış gücü kontrolü gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr hızı, rüzgâr türbini çıkış gücü, hata değeri ve hatve açısı Şekil 7’de gösterilmiştir.







Şekil 7. a) rüzgâr hızı b) rüzgâr türbini gücü c) hata değeri d) hatve açısı.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji alanlarındaki çıkış gücü kontrolünde sıklıkla kullanılan geleneksel PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. PID kontrolcünde katsayı değerlerinin ayarlanması, sistem çıkışının referans değere yaklaşmasında önemli bir yere sahiptir. PID katsayılarının belirlenmesinde ilk olarak Ziegler Nichols kullanılarak katsayı parametreleri belirlenmiştir. İkincil olarak PSO ile PID kontrolcünün katsayıları optimize edilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda rüzgâr türbinin hatve açısı kontrolü yapılmış ve rüzgâr türbininden istenen güç seviyesi elde edilmiştir. Rüzgâr türbini, rüzgâr hızı 3 m/sn düşük olduğu durumda 500 kW altında güç üretmekte ve bu durumda maksimum güç takibi yapılmaktadır. Rüzgâr 3 m/sn ile 25m/sn arasında iken 500 kW seviyesinde güç üretirken, 25 m/sn üzerinde olduğu durumda ise PID denetleyici rüzgâr türbininin zarar görmesini engellemek için türbinin çalışmasını engellemekte ve rüzgâr türbini güç üretmemektedir. Rüzgâr hızı 25 m/sn altında olduğu durumlarda sürdürülebilir güç üretimi sağlanmaktadır. Hatve açısı kontrolü işleminde PSO ile optimize edilen PID katsayı parametreleri, Ziegler Nichols ile hesaplanan PID parametre değerlerine göre referans güç değerine daha kısa sürede eriştiği gözlemlenmiştir. Buna ilaveten ulaşılan referans güçte salınım değerinin daha az olduğu ve hatve açısının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumda PSO ile ayarlanan PID parametreleri Ziegler Nichols ile hesaplanan PID parametrelerine göre düşük maliyetli, kararlı, referans güç değerine hızlı ulaştığı benzetim sonuçlarından elde edilmiştir.

## Kaynakça

- [1] J. Taghinezhad, E. Mahmoodi, M. Masdari and R. Alimardani, "Spectral Analyses of an Optimized Ducted Wind Turbine using Hot-Wire Anemometry," 7th Iran Wind Energy Conference (IWEC2021), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/IWEC52400.2021.9467033.
- [2] M. S. Davis, A. Jafarian, F. Ferdowsi and M. R. Madani, "Wind Energy Harvesting Capability of a Novel Cascaded Dual-Rotor Horizontal-Axis Wind Turbine," 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), 2021, pp. 01-05, doi: 10.1109/ICECCME52200.2021.9590963.
- [3] A. Hesami and A. H. Nikseresht, "Performance Enhancements of Savonius Wind Turbine using a Hybrid Augmentation System," 7th Iran Wind Energy Conference (IWEC2021), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/IWEC52400.2021.9466964.
- [4] IQBAL, Atif, et al. Efficacious pitch angle control of variable-speed wind turbine using fuzzy based predictive controller. Energy Reports, 2020, 6: 423-427.
- [5] EROL, Halil. Stability analysis of pitch angle control of large wind turbines with fractional order PID controller. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2021, 26: 100430.
- [6] HOSSEINI, Ehsan; AGHADAVOODI, Ehsan; RAMÍREZ, Luis M. Fernández. Improving response of wind turbines by pitch angle controller based on gain-scheduled recurrent ANFIS type 2 with passive reinforcement learning. Renewable Energy, 2020, 157: 897-910.
- [7] D. Bansal and K. Pandey, "Blade pitch angle and tip speed ratio control schemes for constant power generation of WECS," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853498.
- [8] Y. El-Okda, M. S. Emeara, N. Abdelkarim, K. Adref and H. A. Hajjar, "Performance of a Small Horizontal Axis Wind Turbine with Blade Pitching," 2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ASET48392.2020.9118196.
- [9] M. Ayadi, F. Ben Salem and N. Derbel, "Sliding mode approach for blade pitch angle control wind turbine using PMSG under DTC," 2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2015, pp. 758-762, doi: 10.1109/STA.2015.7505131.

- [10] H. Kumar, A. Gupta, R. K. Pachauri and Y. K. Chauhan, "PI/FL based blade pitch angle control for wind turbine used in wind energy conversion system," 2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), 2015, pp. 15-20, doi: 10.1109/RDCAPE.2015.7281362.
- [11] Sreenivas, P., et al. Design and analysis of new pitch angle controller for enhancing the performance of wind turbine coupled with PMSG. *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [12] X. Wang, Z. Jiang, H. Lu, X. Wang, Y. Meng and S. Li, "Independent Pitch Control Strategy and Simulation for Reducing Unbalanced Load of Wind Turbine," 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2020, pp. 5535-5539, doi: 10.1109/CCDC49329.2020.9164293.
- [13] S. Sarkar, B. Fitzgerald and B. Basu, "Individual Blade Pitch Control of Floating Offshore Wind Turbines for Load Mitigation and Power Regulation," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 305-315, Jan. 2021, doi: 10.1109/TCST.2020.2975148.
- [14] O. Elbeji, M. Hannachi, M. Benhamed and L. Sbita, "Pitch Angle Control of a Wind Turbine Conversion System at High Wind Speed," 2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2020, pp. 819-823, doi: 10.1109/SSD49366.2020.9364174.
- [15] Zafer Civelek., Murat Lüy, Ertuğrul Çam., Necaattin Barışçı. "PI Kontrolör ile Rüzgâr Türbininin Hatve Açısının Kontrolü" ISEM2014, 2014, Akademik Platform.
- [16] Zafer Civelek, et al. "A new fuzzy logic proportional controller approach applied to individual pitch angle for wind turbine load mitigation". *Renewable Energy*, 2017, 111: 708-717.
- [17] Murat Lüy, Zafer Civelek; Ertuğrul Çam. "Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgâr türbinlerinde bireysel hatve açısı kontrolü ile çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılması. " *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2017, 23.5: 504-511.
- [18] I. Khanam and G. Parmar, "Application of SFS algorithm in control of DC motor and comparative analysis," 2017 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics (UPCON), 2017, pp. 256-261, doi: 10.1109/UPCON.2017.8251057.
- [19] Widhiada, W., N. S. Kumara, and T. G. T. Nindhia. "Analysis of control force grasping for a multifunctional five fingered robot to pick-up various of components." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 59. EDP Sciences, 2016.
- [20] Yucelen, T., O. Kaymakci, and S. Kurtulan. "Self-tuning PID controller using Ziegler-Nichols method for programmable logic controllers." *IFAC Proceedings volumes 39.14 (2006)*: 11-16.
- [21] P. M. Meshram and R. G. Kanojiya, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor," *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012)*, 2012, pp. 117-122.
- [22] Pain, S., & Acharjee, P. 2016. Solution to security constrained LFC system using chaos based exponential PSO algorithm.
- [23] Kılıç, E., & Özdemir, M. T. 2019. Güç sistemlerindeki optimum otomatik gerilim regülasyonu için çoklu amaç fonksiyonunun belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(1), 1-12.
- [24] Furat, M., & Gidemem, G. 2016. PSO ile PID Parametrelerinin Optimizasyonunda Uygunluk Fonksiyonu Seçiminin Tekrarlama Sayısına Etkisi. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK*, 29, 298-302.
- [25] Hajisalm, A., & İsmail, H. A. 2014. Hibrit Rüzgâr/FV Enerji Sistemleri İçin PID Denetleyici Parametrelerinin PSO ve GA ile Optimizasyonu Optimization of PID Controller Parameters in Wind. *PV Energy Systems Using PSO and GA Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik-Elektronik*, 27-29.