

# RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Mustafa Şahin<sup>1</sup>, İlkay Yavrucuk<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
<sup>1</sup>musahin@metu.edu.tr, <sup>2</sup>yavrucuk@metu.edu.tr

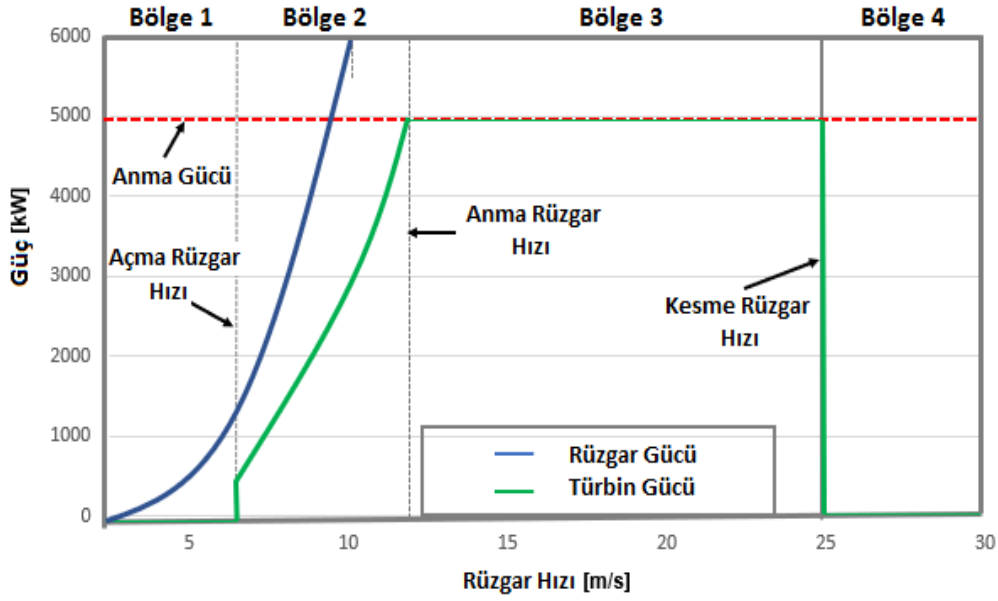
## ÖZET

Bu çalışma, MS (Mustafa ŞAHİN) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli kullanılarak, NREL 5 MW'lık rüzgar türbini için lineer bir kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarımı, türbin kontrollerinde kullanılan bir kazanç çizelgeleme metodunun uygulanması ve performans analizi ile ilgilidir. Tasarımda, tam yük bölgesindeki herhangi bir türbin çalışma noktası için tasarlanan tek bir lineer yunuslama açısı kontrolcüsünün, aynı çalışma bölgesindeki farklı çalışma noktalarında yapılan performans inceleme analizlerinde, performansının azaldığı görülmüştür. Bu sebeple, türbin kontrolünde kullanılan bir kazanç çizelgeleme metodu, 5 MW'lık rüzgar türbini için tasarlanan kontrolcüye uygulanarak, diğer çalışma noktalarında da türbinden benzer performanslar vermesi sağlanmıştır.

## 1. GİRİŞ

Modern rüzgar türbinlerinin kontrol sistemi, en üst, orta ve en düşük seviye olmak üzere, üç temel seviyeden oluşmaktadır. En üst seviye kontrolcü, rüzgar hız bilgisini kullanarak, türbinin ne zaman devreye alınacağına ve ne zaman devreden çıkaracağına karar verir. Türbinin devreye girdiği rüzgar hızı, açma (cut-in) rüzgar hızı olarak isimlendirilirken, devreden çıkma rüzgar hızı ise, kesme rüzgar (cut-out) hızı olarak adlandırılır. Orta seviyedeki kontrolcüler operasyonel kontrolcülerdir. Bunlar, jeneratör tork, kanat yunuslama açısı ve nasel sapma açısı kontrolcüleridir. Jeneratör tork kontrolü vasıtasıyla, türbin rotorundan maksimum aerodinamik güç elde edilir. Kanat yunuslama açısı kontrolcüsü ile de, rotor şaftı anma rotor devrinde döndürülerek, türbinden anma gücünde elektrik alınması sağlanır. Nasel sapma açısı kontrolcüsü de, türbin naselini rüzgarın geldiği yöne doğru döndürerek, türbin rotorunun karşıdan gelen rüzgardan en iyi bir şekilde faydalanmasını sağlar. En düşük kontrol seviyesinde ise, güç elektroniği, kanat yunuslama akçuatörlerinin kontrolü gibi vb. kontroller yer alır[1], [2].

Yukarıda belirtilen kontrol özelliklerine sahip türbinler, değişken rotor devrinde ve değişken yunuslama açısında çalışırlar. Bu türbinler, üç temel çalışma bölgesine sahiptir. Şekil 1'de verilen bu bölgeler, şu şekilde açıklanabilir. Bölge 1, türbininin açma rüzgar hızının altında kalan ve türbin tarafından herhangi bir elektrik enerjisinin üretilmediği bölgedir. Elektrik enerjisinin üretimi, türbinin açma ve kesme rüzgar hızları arasında bulunan Bölge 2 ve 3'te gerçekleşir[1], [3]. Bu bölgeler, sırasıyla kısmi yük ve tam yük bölgeleri olarak da bilinir. Bazen, kesme rüzgar hızının üstünde kalan bölge de, türbinin çalışma bölgelerinden biri olarak sayılır ve Bölge 4 olarak adlandırılır. Çoğu türbinler, Bölge 4'te hiç çalıştırılmazken, en modern türbinler, kesme rüzgar hızının üstündeki, bu bölgede de, çeşitli yumuşak kesme yöntemleri kullanılarak[4], türbin hiç durdurulmadan elektrik üretimlerine devam ettirilirler. Ancak, bu türbinler, bu bölgede anma güçlerinden daha az elektriksel güç üretir.



Şekil 1. Güç eğrileri ve türbin çalışma bölgeleri[5]

Kısmi yük bölgesinde (Bölge 2) amaç, türbini maksimum güç katsayısında çalıştırmaktır. Bu katsayı, türbin rotorunun en uygun uç hız oranı ve kanat yunuslama açısında çalışması ile elde edilir. Maximum güç katsayısında çalışan türbin, anma gücünü elde edemese de, türbine gelen rüzgara göre, üretebileceği maksimum gücü üretir. Bu gücün üretilmesi için, değişen rüzgar hızına göre, jeneratörün torku ayarlanarak, türbin rotor şaft devrinin değişmesi sağlanır. Değişken rotor devri ile türbin, en uygun uç hız oranında çalıştırılır. Bu esnada, rotor kanatlarının yunuslama açısı en uygun değerde olduğundan, türbin maksimum seviyede güç üretmiş olur. Bu işlemi yapan kontrolcü, jeneratör tork kontrolcüsüdür. Değişken devirli rüzgar türbinlerini sabit devirli türbinlerden ayıran özellik budur[1], [3], [6].

Tam yük bölgesinde (Bölge 3) ise, türbin rotoru yüksek hızlı rüzgarlara maruz kaldığından, anma gücünden daha fazla güç üretir. Rotor kanatlarının kontrolü yapılmazsa, türbin üzerinde, aşırı mekanik ve elektriksel yükler meydana gelir. Bu yüzden, türbin rotoru tarafından üretilen güç, kanat yunuslama açısı kontrolcüsü vasıtasıyla jeneratörün anma gücüne eşitlenir. Bu kontrol işlemi esnasında, jeneratörün torku anma tork değerindedir. Tasarlanan kontrolcü ile kanat yunuslama açısı kontrolü yapılarak, türbinin rotor şaftı, türbinin anma devrinde döndürülmesi sağlanır [1], [3], [6]. Böylece, anma devrinde ve anma torkunda çalışan türbin, Bölge 3'te anma gücünde enerji üretir.

Bu çalışmada, MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli kullanılarak, NREL 5 MW'lık rüzgar türbininin Bölge 3'ü için kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarımı ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. İlgili türbine ait özellikler, Ref.[7]'de bulunmaktadır. Kontrolcünün tasarımı ile ilgili detaylara geçmeden önce, MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli, türbin yunuslama açısı kontrolü ile ilgili biraz daha detaylı bilginin verilmesinin yararlı olacağı düşünülmüştür.

## 2. MS BLADED SİMÜLASYON MODELİ

MS (Mustafa ŞAHİN) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli, (kısaca, MS Bladed Modeli) Pal Elemanı Momentum teorisi üzerine kurulu olup, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin simülasyonu için geliştirilmiştir. Modeldeki aerodinamik hesaplamalar, PROP kodu[8], Wt\_Perf[9] ve AeroDyn[10] gibi Pal Elemanı Momentum teorisi içeren programlar ile belirli bir ölçüde benzerlik göstermektedir. MS Bladed Modeli ile yatay eksenli rüzgar türbinlerine ait rotor aerodinamik performans tahminleri (güç ve itki eğrileri gibi vb.) yapılabilir. Türbin kontrolcülerinin tasarım ve simülasyon analizleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca, yeni kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve performans incelemeleri de yapılabilir. Normal ve aşırı türbülanslı rüzgarlar altında türbinin davranışı zamana bağlı olarak izlenebilir. MS Bladed Modeli, daha gerçekçi türbin davranışlarını modelleyebilmek için özel koordinat sistemlerini ve çeşitli aerodinamik düzeltme förmüllerini de içermektedir. Türbin simülasyon modeli, nasel sapma ve kanat yunuslama hareketi yapma özelliklerine sahiptir. Kanatların, yunuslama hareketi bireysel veya kolektif olarak yapılabilmektedir. Ayrıca, MS Bladed Modelinde, kullanıcı istediği rotor koni ve nasel eğim açılarını da modelde tanımlayabilmektedir. MS Bladed Modeli ile ilgili detaylı bilgiler [5], [11], [12] referanslarında yer almaktadır. Türbin modeli, türbinin bütün parçalarını, kanat, rotor şaftı vs. esnemeyen yapı olarak farz etmektedir. Sistemin ana parçaları, türbin rotoru, dişli kutusu ve değişken tork üretebilen jeneratör olup, sistemin dinamik modeli aşağıdaki ilişkiler üzerine kurulmuştur.

$$J_t \dot{\Omega} = \tau_{aero} - \tau_{jen} \quad (1)$$

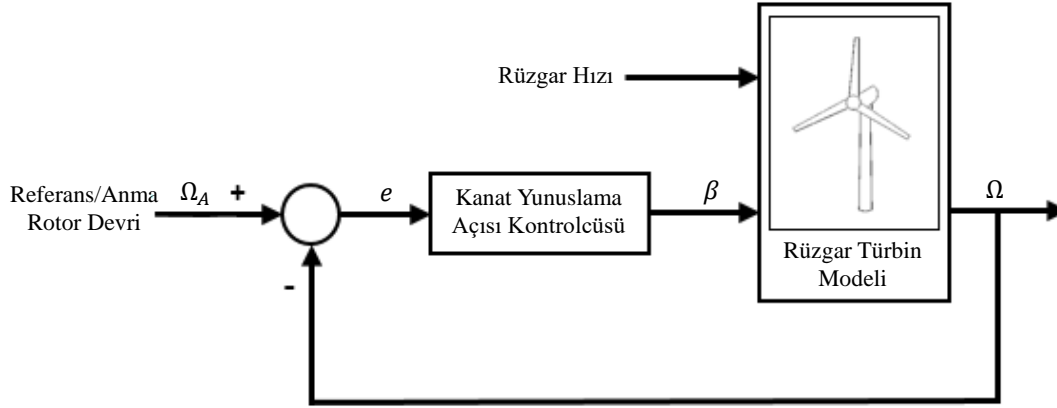
$$J_t = J_r + N_{dişli}^2 J_{jen} \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\tau_{aero}$  aerodinamik torku,  $\tau_{jen}$  jeneratörün türbin rotoru tarafındaki torkunu,  $J_t$ , türbin sisteminin toplam atalet momentini,  $\Omega$  türbin rotor devrini,  $N_{dişli}$  dişli kutusu dönüştürme oranını,  $J_{jen}$  ise jeneratörün atalet momentini temsil etmektedir.

## 3. KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLÜ

Kanat yunuslama açısı kontrolcüsü, rüzgar türbininin rotor şaftından alınan mekaniksel gücün, türbin anma gücüne sınırlandırılmasında kullanılır. Bu işlem, türbin kanadının tamamı ya da bir kısmının yunuslama hareketi yaptırılması ile gerçekleştirilebilir. Günümüz türbinlerinde kanadın tamamının hareket ettirilmesi tercih edilmektedir. Güç sınırlama işlemi, ya türbin kanadının hücum kenarı kısmının rüzgarın geldiği yöne doğru döndürülmesi (pitch to feather), ya da uzaklaştırılması (pitch to stall) ile sağlanır. Birinci yöntemde, rüzgar türbininin kanadı boyunca yerleştirilen airfoiller daha düşük aerodinamik kaldırma ve sürüklenme katsayıları ile çalışması sağlanırken, ikinci durumda ise, düşük kaldırma ve yüksek sürüklenme katsayılarında çalıştırılır. Büyük gövdeli modern türbinlerde, birinci yöntem (pitch to feather) daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tasarlanan yunuslama açısı kontrolcüsü, bütün türbin kanatlarını aynı miktarda ve kolektif olarak hareket ettirmekte ve birinci yöntem (pitch to feather) göre çalışmaktadır.

Yukarıda bahsedilen her iki yöntem, farklı aerodinamik olaylara göre çalışsa da, yunuslama açısı kontrolcüsü açısından, Şekil 2’de verilen aynı blok diyagramına sahiptirler. Her iki kontrol işleminde de, gerekli kanat yunuslama açısının miktarının tespiti için, turbın veya jeneratör rotorunun devir verisi kontrolcüye geri besleme olarak verilir. Yapısal kısıtlamalardan dolayı, yunuslama açısı actüatörleri, ani hareket sınırlayıcıları (rate limiter), üst ve alt değer (min ve max) sınırlayıcılarına ihtiva eder. Bu çalışmada, 5 MW’lık rüzgar türbini için kullanılan alt limit değeri  $-0.875$  derece, üst limit değeri ise  $90$  derecedir. Kanatların ani hareketini önlemek için  $8$  derece/saniye’lik bir ani hareket sınırlayıcısı da kontrol sistemine eklenmiştir.



Şekil 2. Kanat yunuslama açısı kontrolcüsü blok diyagramı

Bu çalışmada, kazanç çizelgeleme yöntemine dayalı oransal-integral (Proportional-Integral, PI) kanat yunuslama açısı kontrolcüsü, Ref.[13]’nden yararlanılarak tasarlanmıştır. Geri besleme sinyali olarak, türbinin rotor şaftdevri kullanılmıştır. Yunuslama açısı bilgisi, rotor şaft devri ile türbin rotorunun dönmesini istediğimiz anma rotor devri arasındaki hataya göre tesbit edilmiştir. Kontrolcünün kazanç değerlerini hesaplamak amacıyla, MS Bladed Modeli kullanılmıştır.

#### 4. RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİNİN LINEERLEŞTİRİLMESİ

Denklem (1)’deki türbin sistemi, lineer gibi görünse de, oldukça lineer olmayan bir sistemdir. Bunun nedeni, hem rotorundan hem de jeneratöründen alınan torkların lineer olmamasıdır. Tam yük bölgesinde, sistemin lineer olmamasının nedeni aerodinamik torktur. Çünkü, bu çalışma bölgesinde, jeneratörden alınan tork sabit değerdedir. Burada, türbin sistemi bir tane durum değişkenine sahip olup, o da türbinin rotor şaftı devridir. MS Bladed Modelinde, kontrol girişleri sadece kanat yunuslama açılarıdır. Rüzgar ise, model için dış etkenlerden kaynaklı olan bozucu bir girişe karşılık gelmektedir.

Lineer bir kontrolcü tasarımı, sistemin belirlenen bir çalışma noktasında lineerleştirilmesini gerektirir. Bu işlem için, perturbasyon yöntemi sıklıkla başvurulan bir yoldur. Türbin rotorundan alınan aerodinamik tork, rotor hızı, kanat yunuslama açısı ve rüzgar hızının sürekli bir fonksiyonudur. O zaman, Ref.[14]’ten yola çıkarak, türbinden alınan tork Taylor serisi olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \tau_{aero}(U, \Omega, \beta) = & \tau_{aero}(U_e, \Omega_e, \beta_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial U}(U - U_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \Omega}(\Omega - \Omega_e) \\ & + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \beta}(\beta - \beta_e) + \text{YMTler} \end{aligned} \quad (3)$$

Burada,  $U_e, \Omega_e, \beta_e$  parametleri seçilen bir çalışma noktasındaki rüzgar hızı, rotor hızı ve kanat yunuslama açılarının değerleridir.  $U - U_e = \Delta U$ ,  $\Omega - \Omega_e = \Delta \Omega$  ve  $\beta - \beta_e = \Delta \beta$  ise, bu çalışma noktalarından perturbasyonlardır. Perturbasyon, herhangi bir kararlı durum değerinden küçük bir miktar sapma anlamına gelir. Klasik ve ileri seviye lineer kontrolcü tasarımında, birinci mertebeden Taylor açılımı lineer olmayan sistemlerin lineerleştirilmesinde yeterli olduğundan, denklem (3)'deki yüksek mertebeden terimler (YMTler) ihmal edilebilir. Daha sonra, Taylor serisi açılımı denklem (1)'deki türbin sistemi için uygulanırsa, denklem (4) elde edilir.

$$\begin{aligned} J_t(\Omega - \Omega_e) = & \tau_{aero}(U_e, \Omega_e, \beta_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial U}(U - U_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \Omega}(\Omega - \Omega_e) \\ & + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \beta}(\beta - \beta_e) - \tau_{jen} \end{aligned} \quad (4)$$

$\tau_{jen}$  ise türbinin rotor şaftından alınan jeneratör tork değeridir. Burada, türbinin tam yük bölgesinde (Bölge 3) çalışacağı düşünüldüğünden, jeneratörün tork değeri anma tork değerine sabitlenir. Bu çalışmada kullanılan 5 MW'lık rüzgar türbininin rotorundan alınan anma tork değeri, 4180074.35Nm olarak belirlenmiştir[7]. Ayrıca, kararlı durum çalışması esnasında, aerodinamik tork ve jeneratör tork değerleri birbirine eşittir ve birbirinin etkisini yok eder. Sonuçta, rotor ivmelenmesi meydana gelmeyip, rotor devrinin türevi sıfır olacağından, sistemin denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$J_t \dot{\Omega} = \gamma \Delta \Omega + \eta \Delta \beta + \mu \Delta U \quad (5)$$

Buradaki  $\gamma, \eta$  ve  $\mu$  ifadeleri, sırasıyla  $\frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \Omega}$ ,  $\frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \beta}$  ve  $\frac{\partial \tau_{aero}}{\partial U}$  kısmi türevlerinin yerini tutmaktadır. Rotor ivmelenmesi tek başına bırakılırsa, sistemin denklemi aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{\Omega} = \frac{\gamma}{J_t} \Delta \Omega + \frac{\eta}{J_t} \Delta \beta + \frac{\mu}{J_t} \Delta U \quad (6)$$

Eğer aşağıdaki ilişkiler de tanımlanırsa,

$$\frac{\gamma}{J_t} = A \quad (7)$$

$$\frac{\eta}{J_t} = B \quad (8)$$

$$\frac{\mu}{J_t} = B_d \quad (9)$$

Açık devre türbin sistemi,

$$\dot{\Omega} = A \Delta \Omega + B \Delta \beta + B_d \Delta U \quad (10)$$

şekline döner. Burada, A, sistem kazancını, B, sistem giriş kazancını, B<sub>d</sub> ise, türbin sistemine bozucu bir giriş kazancı olarak karşımıza çıkar. Bunlar, (7), (8) ve (9)'da görüldüğü üzere, sırasıyla aerodinamik torkun, rotor devrine, kanat yunuslama açısına ve rüzgar hızına göre kısmi türevleri olup, türbin sisteminin toplam atalet momentine oranlarıdır. Bu kazanç değerlerinin elde edilmesinde, türbin simülasyon modeline ihtiyaç olup, bu değerler MS Bladed Modeli ile elde edilmiştir. Burada, amacımız PI tabanlı kolektif kanat yunuslama açısı kontrolcüsü tasarlamaktır. O zaman, Ref.[13]'e göre, yunuslama açısındaki pertürbasyon,  $\Delta\beta$ , doğrudan rotor devrindeki pertürbasyonla,  $\Delta\Omega$  ilişkilendirilebilir.

$$\Delta\beta(t) = K_p\Delta\Omega(t) + K_i \int \Delta\Omega(t)dt \quad (11)$$

Buradaki,  $K_p$  and  $K_i$  parametreleri sırasıyla oransal ve integral kazanç ifadeleridir. Ayrıca, kontrolcü çıkışı,  $\beta = \Delta\beta + \beta_e$  şeklinde yazılabilir. Denklem (11)'deki  $\Delta\beta$  eşitliği denklem (10)'daki yerine konulursa, denklem (12)'daki PI stratejisine sahip kapalı devre türbin sistemi ortaya çıkar.

$$\dot{\Omega} = A\Delta\Omega + B \left( K_p\Delta\Omega(t) + K_i \int \Delta\Omega(t)dt \right) + B_d\Delta U \quad (12)$$

Denklem (12)'ye Laplace dönüşümü uygulandıktan sonra, bazı cebirsel işlemler de gerçekleştirilirse, rotor devri  $\Delta\Omega(s)$  ile rüzgar hızı  $\Delta U(s)$  arasındaki kapalı devre transfer fonksiyonu, denklem (13)'teki gibi olur.

$$G_{CL}(s) = \frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta U(s)} = \frac{B_d s}{s^2 + (-A - BK_p)s + (-BK_i)} \quad (13)$$

Sistemin transfer fonksiyonun paydası (karakteristik denklemi), kontrolcülerin kazanç parametrelerinin de hesaba katılmasıyla sistemin kararlılığı hakkında bilgi verir. O zaman,  $K_p$  ve  $K_i$  değerlerini tasarlayarak/elde ederek, türbin sisteminden arzulanan rotor devri performansı kolaylıkla alınabilir. Kapalı devre sistemin, kararlılığının sağlanabilmesi için karakteristik denklemde bulunan her iki kökünde, en azından negatif değerli olması gerekir. Öyle ise,

$$-A - BK_p > 0 \quad (14)$$

$$-BK_i > 0 \quad (15)$$

olmalıdır. Sistemden arzulanan performansın elde edilmesi, doğal frekansı,  $W_n$  ve sönüm oranı,  $\zeta$  değerlerine bağlıdır. Bir sonraki kısımda, bu değerlerin belirlenmesi ve kazanç değerlerinin elde edilmesinden bahsedilecektir.

## 5. KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜNÜN TASARIMI VE PERFORMANSI

Bu kısımda, NREL 5 MW'lık türbin için PI tabanlı bir kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarlanması tartışılmıştır. İlk olarak, tam yük bölgesinde seçilen bir çalışma noktasında, sönüm oranı değerinin türbinin rotor devri cevabı üzerine etkisi incelenerek, uygun bir sönüm oranı değerinin bulunması irdelenmiştir. Doğal frekans için ise, literatürde verilen bir değer kullanılmıştır[15]. Yapılan incelemelerde, seçilen çalışma noktası için sönüm oranı değerinin

0.8 olarak seçilmesi, sistemin kararlı duruma geçme süresinde en iyi performansı sergilediği görülmüştür. Daha sonra, tasarlanan kontrolcü, türbinin tam yük bölgesindeki diğer çalışma noktalarında da, test edilmiştir. Kontrolcü performansının, farklı çalışma noktalarında azaldığı sonucuna varılmıştır. Benzer bir durum, Wright and Fingersh[13] tarafından NREL'in CART adını verdiği 600 KW'lık rüzgar türbininin kolektif kanat yunuslama açısı kontrolcüsü tasarımı esnasında da görülmüştür. Bu performans azalmasından dolayı, kontrolcü tasarımında kazanç çizelgeleme metodunun da, uygulanması gerektiği anlaşılmıştır. Böylece, türbinden alınan rotor devri cevaplarının türbinin tam yük bölgesindeki bütün çalışma noktalarında benzer sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Aşağıda, tasarımla ilgili detaylar bulunmaktadır.

Yunuslama açısı kontrolcüsünü tasarlamak için, öncelikle  $\gamma$  ve  $\eta$  kısmi türev değerlerinin belirlenmesi gerekir. Çünkü bu değerler, A ve B kazanç değerlerinin seçilen bir çalışma noktasında bulunması için gereklidir. Bu kazanç ifadeleri, (13)'de verilen transfer fonksiyonun karakteristik denkleminde açıkça görülmektedir. Bu kazanç değerlerinin bulunması, MS Bladed Modeli kullanılarak, istenilen bir çalışma noktası etrafında sistemin lineerize edilmesiyle elde edilmiştir. Sistemin lineerleştirilmesi, merkezi farklar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Eğer, (13)'de verilen kapalı devre türbin sisteminin karakteristik denklemi (16)'de verilen Laplace formundaki ikinci derece standart bir sistem olarak düşünülürse,

$$s^2 + 2w_n\zeta s + w_n^2 \quad (16)$$

O zaman, (17) ve (18) numaralı denklemler, doğal frekans, sönüm oranı, türbinin sistem ve giriş kazançları ve kontrolcünün kazanç değerleri arasındaki ilişkileri verir.

$$2w_n\zeta = -A - BK_p \quad (17)$$

$$w_n^2 = -BK_i \quad (18)$$

MS Bladed Modeli ile herhangi bir çalışma noktasındaki, sistem ve giriş kazanç değerleri kolayca tespit edilebildiğinden, doğal frekans ve sönüm oranı değerlerinin bilinmesi ile de, kontrolcü kazanç değerleri,  $K_p$  ve  $K_i$  sırasıyla (19) ve (20) numaralı denklemler kullanılarak tespit edilebilir.

$$K_p = \frac{-2w_n\zeta}{B} - \frac{A}{B} \quad (19)$$

$$K_i = \frac{-w_n^2}{B} \quad (20)$$

Yukarıda yapılan açıklamalar nezdinde, kontrolcü tasarımı ve analizinin tartışılması için Tablo 1 hazırlanmıştır. Çeşitli çalışma noktaları, rüzgar, rotor devri ve kanat yunuslama açısı ve anma rotor torku cinsinden verilmiştir. Tablo 1'deki ÇN terimi, çalışma noktası anlamına gelmektedir.

İlk olarak, ÇN 1 dikkate alınmıştır. Bu çalışma noktası için bir PI tabanlı kanat yunuslama açısı kontrolcüsü tasarlanmıştır. Ref.[15]'de, bir rüzgar türbin kontrolcüsü tasarlanırken, doğal frekansın 0.6, sönüm oranı değerinin ise, 0.6-0.7 olarak seçilmesi, kontrolcüden iyi bir performans alınabileceği belirtilmektedir. Bununla birlikte, Wright and Fingersh[13] NREL CART türbininin yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarlanması esnasında, farklı denemelerden

sonra, sönüm oranı değerinin 1 olması ile daha iyi sonuçlar elde etmiştir. O zaman, bu parametre değerleri, özellikle de sönüm oranı değeri, türbinden türbine değişiklik gösterebilir. Böylece, Ref.[13]'dekine benzer bir yaklaşım, burada da, daha iyi bir sönüm oranı değerinin seçimi için kullanılmıştır. Daha sonra da, elde edilen bu sönüm oranı değeri, kontrolcü tasarımının ileriki aşamalarında da kullanılmaya devam edilmiştir.

**Tablo 1.** Kontrolcü tasarımı ve analizleri için seçilen çalışma noktaları

Çalışma Noktaları	Rüzgar Hızı (m/s), $U_e$	Rotor Hızı (rpm), $\Omega_e$	Yunuslama Açısı (derece), $\beta_e$	Rotor Torku (Nm), $\tau_e$
ÇN 1	18	12.1	14.9525	4180074.35
ÇN 2	16	12.1	10.5521	4180074.35
ÇN 3	13	12.1	6.7206	4180074.35
ÇN 4	11.5	12.1	2.2792	4180074.35
ÇN 5	12.6607	12.1	5.9676	4180074.35
ÇN 6	23	12.1	20.9964	4180074.35

MS Bladed Modeli ile 5 MW'lık türbin sistemi, ÇN 1 etrafında lineerize edilirse, A, B ve  $B_d$  kazanç değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A = -0.2401$$

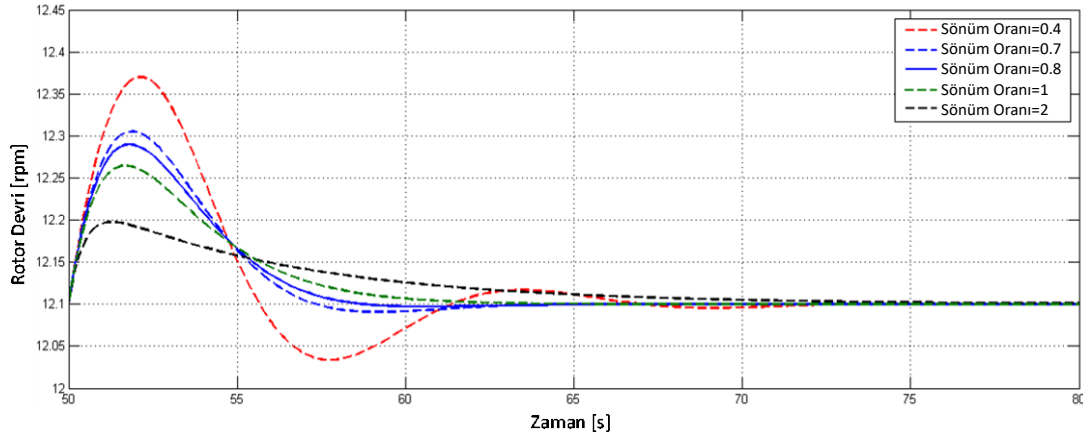
$$B = -1.1672$$

$$B_d = 0.0275$$

Sistem kazancı, A ve giriş kazancı, B değerleri yukarıdaki gibi kullanılır, doğal frekans ve sönüm oranı değerleri sırasıyla 0.6 ve 0.7 seçilirse, oransal,  $K_p$  ve integral,  $K_i$  kontrolcü kazanç değerleri (19) ve (20) numaralı deklemleri kullanılarak, sırayla 0.5140 ve 0.3084 olarak hesaplanır. Şekil 3'de tasarlanan bu kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün, simülasyonun 50. saniyesinde birim basamak olarak, 17'den 18 m/s'ye artan bir rüzgar giriş hızına verdiği rotor devri cevabı kesikli mavi çizgi ile görülmektedir. Bu rotor devri cevabı, simülasyon süresinin 57. saniyesinde, rotor devrinin kalıcı durum değerini az miktarda aşmakta ve yaklaşık 65. saniye civarında kalıcı durum değerine yerleşmektedir. Burada, rotorun kalıcı durum değeri, rotorun anma devri olup, NREL 5 MW'lık türbin için 12.1 rpm'dir. Bu değer, türbin rotorunun dönmesini istediğimiz ve kontrolcüye referans olarak verdiğimiz rotor devridir. Rüzgarın 50. saniyedeki ani değişiminden dolayı, tasarlanan kontrolcünün cevabı kararlı durumuna geçiş süresi bakımından oldukça tatmin edicidir. Çünkü, cevabın kararlı durum değerine yerleşmesi 15 saniyeden daha azdır. Ancak, alınan bu rotor devri cevabından daha iyi bir rotor devri cevabını veren başka bir sönüm oranı değeri olabilir. İyi bir sönüm oranı değerine karar verebilmek için, kapalı devre türbin sistemi için seçilen sönüm oranı değeri azaltıp artırılarak, sönüm oranı değerinin türbinden alınan rotor devri cevabına etkisi incelenmiştir. Bu cevaplar da, Şekil 3'de yer almaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere, sönüm oranı değeri 0.4 olması durumunda, rotor devri cevabı sönümsüz bir osilasyona sahip olup, kararlı durum değerine yerleşmek için oldukça büyük bir zaman almaktadır. 15 saniye içinde bile, rotor devri cevabı kalıcı durum değerine ulaşamamakta ve osilasyon devam etmektedir. Kararlı durum değerine yerleşme süresi açısından, sönüm oranı değerinin 2 olması durumunda da, benzer bir durum geçerlidir. Ancak, 0.7 ve 1 sönüm oranı değerleri, yaklaşık aynı yerleşme sürelerine sahiptir. Sönüm oranı değerinin 1 olması durumunda, türbinden alınan rotor devri cevabı, yaklaşık 64.



saniye civarında kararlı durum değerine ulaşmaktadır. Oysa ki, sönüm oranı değerinin 0.7 olması durumunda, kararlı durum değerine ulaşım daha erken olmakta ve 58. saniye civarındadır. Fakat, kararlı durum değerini hafifçe aşmakta ve 15 saniyeden daha az bir süre de, bu değere yerleşmemektedir. O zaman, sönüm oranı 0.7 olması daha iyi bir sönüm oranı değeri olarak anlaşılabilir.



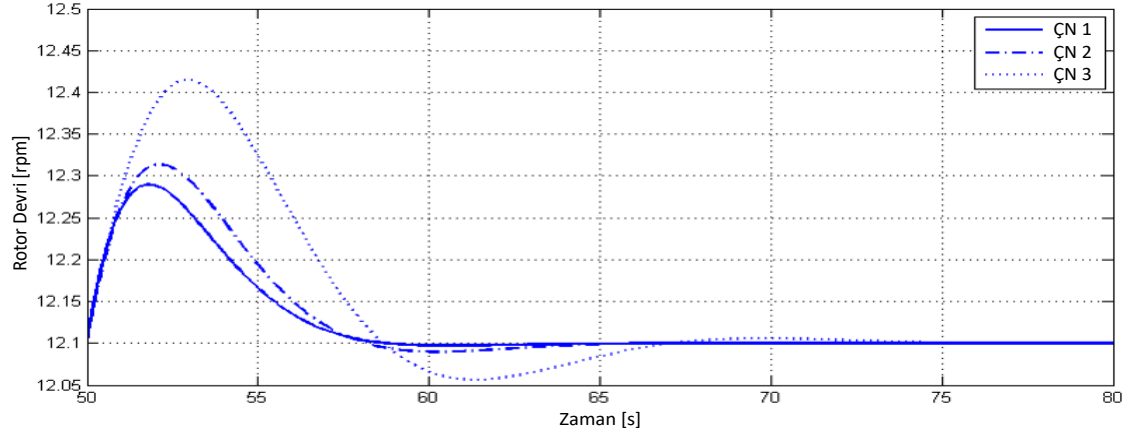
Şekil 3. ÇN 1'deki en iyi rotor cevabı, sönüm oranı, 0.8

Ancak, Şekil 3'ten de görüleceği üzere, 0.8 sönüm oranı değerine sahip kontrolcünün, birim basamak olarak artan rüzgar giriş sinyaline cevabı, diğerleriyle karşılaştırıldığında, yerleşme zamanı açısından en iyi cevaptır. En iyi sönüm oranı değerinin seçilmesi, kontrolcü kazanç değerlerinden oransal kazancı etkilemektedir. Tablo 2'de kontrolcü tasarımı esnasında, yukarıda bahsedilen sönüm oranı değerleri ve mevcut doğal frekansın kullanılması durumunda, kapalı devre türbin sistemin oransal ve integral kazanç değerleri göstermektedir.

Tablo 2. En iyi sönüm oranı değerini belirleme

Sönümlenme Oranı	Doğal Frekans	Oransal Kazanç	Integral Kazanç
$\zeta$	$w_n$	$K_p$	$K_i$
<b>0.4</b>	0.6	0.2055	0.3084
<b>0.7</b>	0.6	0.5140	0.3084
<b>0.8</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6168</b>	<b>0.3084</b>
<b>1</b>	0.6	0.8224	0.3084
<b>2</b>	0.6	1.8505	0.3084

Şu ana kadar, ÇN 1 için PI tabanlı farklı kontrolcü kazançlarına sahip yunuslama açısı kontrolcüsü incelenmiş, sönüm oranı değerinin 0.8 olduğu durumda tasarlanan kontrolcü, en iyi performansı verdiği görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada, sönüm oranı değeri, 0.8 istenilen değer olarak kullanılmıştır. Doğal frekans değeri ise, literatürde olduğu gibi 0.6 olarak kullanılmasına devam edilmiştir. Bu değerler ile tasarlanan kontrolcü, ( $K_p = 0.6168$ ,  $K_i = 0.3084$ ), diğer çalışma noktaları olan ÇN 2 ve 3' de (Tablo 1) test edilirse, ilgili çalışma noktalarında performansları kötüleşmektedir. Bu kötüleşme, Şekil 4'te açıkça görülmekte olup, daha çok ÇN 3'te meydana gelmekte ve rotor devri cevabı, simülasyonun 58.inci saniyesinde kararlı durum değerini büyük miktarda aşmaktadır. Kontrolcü performansının kötüleşmesi, kanat yunuslama açısı ve rüzgar hızındaki değişimle birlikte giriş kazancı, B'de meydana gelen değişimden kaynaklanmaktadır[13]. Bu sebeple, kontrolcü kazançlarının kanat yunuslama açısına bağlı olarak değiştirilmesi/çizelgenmesi gerekir.



**Şekil 4.** Diğer çalışma bölgelerinde kontrolcü performansının bozulması

O zaman, PI tabanlı olarak tasarlanan kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tam yük bölgesinde, performansını artırmak için, kazanç çizelgeleme metodunun kontrolcüye uygulanması gerekir. Literatürde, PI tabanlı kazanç çizelgeleme metodlu kontrolcü iki yöntemle yapılmaktadır. Bunlar, aerodinamik torkun kanat yunuslama açısına göre kısmi türevine [13] ya da rotor aerodinamik gücün kanat yunuslama açısına göre türevine bağlıdır[7]. Kazanç çizelgeleme yönteminin uygulanması, her iki yöntemde de, kazanç düzeltme faktörünün,  $GK(\beta)$  kullanılması ile gerçekleştirilebilir. Literatürde, bu formül, şu şekilde tanımlanmaktadır.[7], [13].

$$GK(\beta) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta}{\beta_K}\right)} \quad (21)$$

Förmüldeki,  $\beta$ , türbinin anma rotor devrinde dönerken, herhangi bir rüzgâr hızında anma torkunu üretebilmesi için gerekli kanat yunuslama açısıdır. Wright and Fingers'e [13] göre,  $\beta_K$  ise, giriş kazancının, B, kısmi yük bölgesinden tam yük bölgesine geçişine yakın bir çalışma noktasındaki değerinin iki katına çıktığı tam yük bölgesindeki başka bir çalışma noktasındaki kanat yunuslama açısının değeridir[13]. Buradaki,  $\beta_K$  değerinin tespiti, MS Bladed Modeli ile gerçekleştirilmiştir.

Öyle ise, kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarımı, Ref.[13]'e göre yapılırsa, ilk olarak kısmi yük bölgesinden tam yük bölgesine geçiş bölgesine yakın bir çalışma noktası seçilir. Burada, bu çalışma noktası, Tablo 1'de verilen ÇN 4'e karşılık gelmektedir. Daha sonra, MS Bladed Modeli ile,  $\beta_K$  değeri tespit edilir. ÇN 4'teki lineerleştirme işleminde, sistem kazancı, A, giriş kazancı, B, ve bozucu giriş kazancı,  $B_d$  değerleri, MS Bladed Modeli kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$A = -0.0554$$

$$B = -0.2658$$

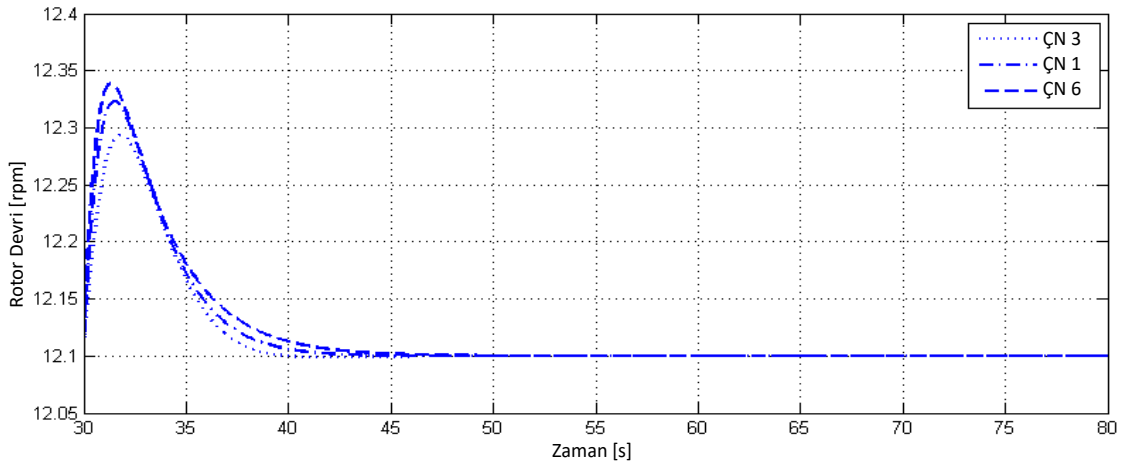
$$B_d = 0.0227$$

Eğer istenilen sönüm oranı ve doğal frekans değerleri sırasıyla 0.8 ve 0.6 olarak kullanılırsa, kontrolcünün oransal ve integral kazanç değerleri, denklem (19) ve (20) ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_p = 3.4033$$

$$K_I = 1.3544$$

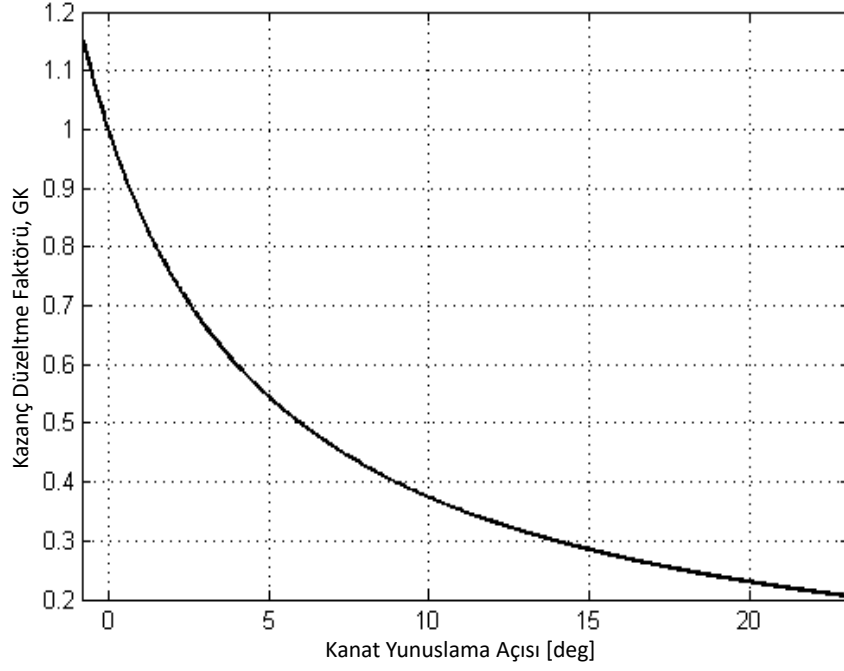
ÇN 5, tam yük bölgesinde (Bölge 3) bulunan ve ÇN 4'teki giriş kazancı, B değerinin iki katına çıktığı kararlı durum çalışma noktasıdır. MS Bladed Modeli ile ÇN 5'teki  $\beta_K$  değeri 5.9676 derece olarak tesbit edilmiştir. O zaman, kazanç düzeltme faktörü,  $GK(\beta)$ ,  $\beta_K$  değerinin de kullanılmasıyla, kolaylıkla elde edilebilir. Burada, (21)'deki  $GK$  formülündeki  $\beta$  değeri, farklı yöntemlerle elde edilebilir. Burada kullandığımız yöntem, rüzgar hızına göre kanat yunuslama açısı değerlerinin interpolasyonundan elde edilmiştir. Kazanç çizelgeleme işlemi, yukarıda hesaplanan oransal,  $K_p$  ve integral,  $K_i$  kazanç değerlerinin kazanç düzeltme (21) faktörüyle,  $GK$  çarpılmasıyla gerçekleşir.



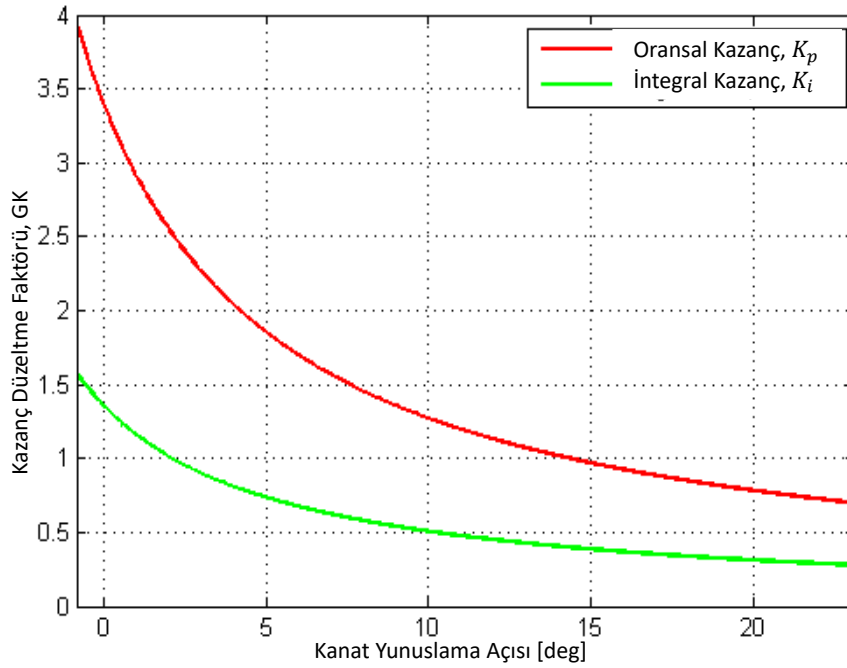
**Şekil 5.** Kazanç çizelgeleme yöntemine sahip PI tabanlı yunuslama açısı kontrolcüsünün performansı, sönüm oranı, 0.8

Şekil 5'de tasarlanan kazanç çizelgeleme metoduna sahip kontrolcünün 3 farklı çalışma noktasındaki performansı verilmiştir. Bu noktalarda, MS Bladed Modelinde uygulanan rüzgar girişleri, 12'den 13 m/s, 17'den 18 m/s ve 22'den 23 m/s'ye birim basamak olarak artan rüzgar hızlarıdır. Bunlar da, sırasıyla Tablo 1'de verilen ÇN 3, ÇN 1 ve yeni eklenen ÇN 6'ya karşılık gelmektedir. Simülasyon sonuçlarından görüleceği üzere, kazanç çizelgelemeli yunuslama açısı kontrolcüsü bu üç farklı çalışma noktasında da, hemen hemen aynı performansı göstermektedir. Bu, Şekil 4'te verilen daha önceki tek bir lineer kontrolcünün farklı çalışma noktalarındaki sergilediği performansın tersine, daha iyidir. Rotor devrinin bu çalışma noktalarındaki kararlı duruma geçme süresi, 22 saniye iken, Şekil 4'de ise, tek bir lineer kontrolcünün farklı çalışma noktalarında, farklı kararlı duruma geçme süresi vardır.

Şekil 6, kazanç düzeltme faktörünün,  $GK$  kanat yunuslama açısına göre değişimini göstermekte iken, Şekil 7'de kontrolcünün oransal ve integral kazanç değerlerinin  $GK$ 'ya bağlı olarak, yunuslama açısına göre değişimini göstermektedir.



Şekil 6. Kazanç düzeltme faktörünün yunuslama açısına göre değişimi



Şekil 7. Oransal,  $K_p$  ve integral,  $K_i$  kazançlarının yunuslama açısına göre değişimi

Şekil 6 ve Şekil 7'den anlaşılacağı üzere, kazanç çizelgeleme metodunun uygulanması ile tam yük bölgesindeki farklı çalışma noktalarında kontrolcü kazançları, benzer performanslar sergilemek adına değişmektedir. Kanat yunuslama açısının artması durumunda, kazanç düzeltme faktörünün değeri azalmakta, buna bağlı olarak da, oransal ve integral kontrolcü kazançlarının değerleri azalmaktadır.

## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, MS Bladed Modeli kullanılarak, NREL 5MW'lık rüzgar türbin sistemi üzerinde, çeşitli çalışma noktalarında sistem, giriş kazancı gibi vb. değerlerin elde edilmesi, yunuslama açısı kontrolcüsü tasarımı, türbin kontrolünde kullanılan bir kazanç çizelgeleme yönteminin uygulanması ve tasarlanan kontrolcünün farklı çalışma noktalarındaki performanslarına yer verilmiştir. Türbinin tam yük bölgesi için tasarlanan tek bir lineer kontrolcünün tam yük bölgesindeki bütün çalışma noktalarında aynı performansı sergilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Kazanç çizelgeleme metoduna sahip PI tabanlı kolektif yunuslama açısı kontrolcüsü ise, türbinin tam yük bölgesindeki farklı çalışma noktalarında benzer performans vermesini sağlayarak, türbinin anma rotor devrinde çalıştırılmıştır. Ayrıca, tam yük bölgesinde, jeneratörün torku anma torkuna eşit olacağından, 5MW'lık türbinden anma gücünde enerji sağlanır.

## KAYNAKLAR

- [1] **K. E. Johnson, L. Y. Pao, M. J. Balas, and L. J. . Fingersh**, 2006, "Control of Variable Speed Wind Turbines-Standard and Adaptive Techniques for Maximizing Energy Capture," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 26, no. 3, pp. 70–81.
- [2] **M. Şahin and İ. Yavrucuk**, 2017, "Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Kısmi ve Tam Yük Bölgeleri için Kontrolcü Tasarımı," in *YEKSEM 2017*, p.12.
- [3] **A. Merabet, J. Thongam, and J. Gu**, 2011, "Torque and Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines in All Operating Regimes," in *10th International Conference on Env. and Electrical Engineering (EEEIC), 2011*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5.
- [4] **B. Fischer and M. Shan**, 2013, "A Survey on Control Methods for the Mitigation of Tower Loads,".
- [5] **M. Sahin**, 2018, "Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, METU, Ankara," Middle East Technical University.
- [6] **K. A. Stol and L. J. . Fingersh**, 2004, "Wind Turbine Field Testing of State-Space Control Designs," *Technical Report NREL/SR-500-35061*, no. September, Golden, Colorado.
- [7] **J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott**, 2009, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development,".
- [8] **R. E. Wilson and P. B. S. Lissaman**, 1974, "Applied Aerodynamics of Wind Power Machines,".
- [9] **A. D. Platt and M. L. Buhl**, 2012, "WT\_Perf User Guide for Version 3.05.00,".
- [10] **P. J. Moriarty and A. C. Hansen**, 2005, "AeroDyn Theory Manual, NREL/TP-500-36881, Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory,".
- [11] **M. Şahin and İ. Yavrucuk**, 2017, "Rüzgar Türbininin Dinamik Modellemesinde Belirli Parametrelerin Güç Eğrisi Tahminine Olan Etkilerinin İncelenmesi," in *YEKSEM 2017*, p. 8.
- [12] **M. Sahin and I. Yavrucuk**, 2017, "Dynamical modelling of a wind turbine system with precone and tilt angles," in *9th Ankara International Aerospace Conference*, no. 20–22 September, pp. 1–11.
- [13] **A. D. Wright and L. J. Fingersh**, 2008, "Advanced Control Design for Wind Turbines Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests," *Tech. Rep. Natl. Renew. Energy Lab.*, no. March, p. 98.
- [14] **A. D. Wright**, 2004, "Modern Control Design for Flexible Wind Turbines," no. July.
- [15] **M. H. Hansen, A. Hansen, T. J. Larsen, S. Øye, P. Sørensen, and P. Fuglsang**, 2005, "Control design for a pitch-regulated , variable speed wind turbine, Risø-R-1500(EN),Risø National Laboratory," Roskilde, Denmark