



ODTÜ
ANKARA

RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Öğr. Gör. Dr. Mustafa ŞAHİN
ODTÜ RÜZGEM

Doç. Dr. İlkyay YAVRUCUK
ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü



METUAEROSPACE



RÜZGEM
www.ruzgem.metu.edu.tr

SUNUM BAŐLIKLARI

- Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemi
- Türbin Çalışma Bölgeleri ve Kontrol Amaçları
- MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli
- Modern Türbinlerde Kanat Yunuslama Açısı Kontrolü
- Türbin Sisteminin Linearizasyonu
- Kanat Yunuslama Açısı Kontrolcüsü Tasarımı ve Performansının İncelenmesi



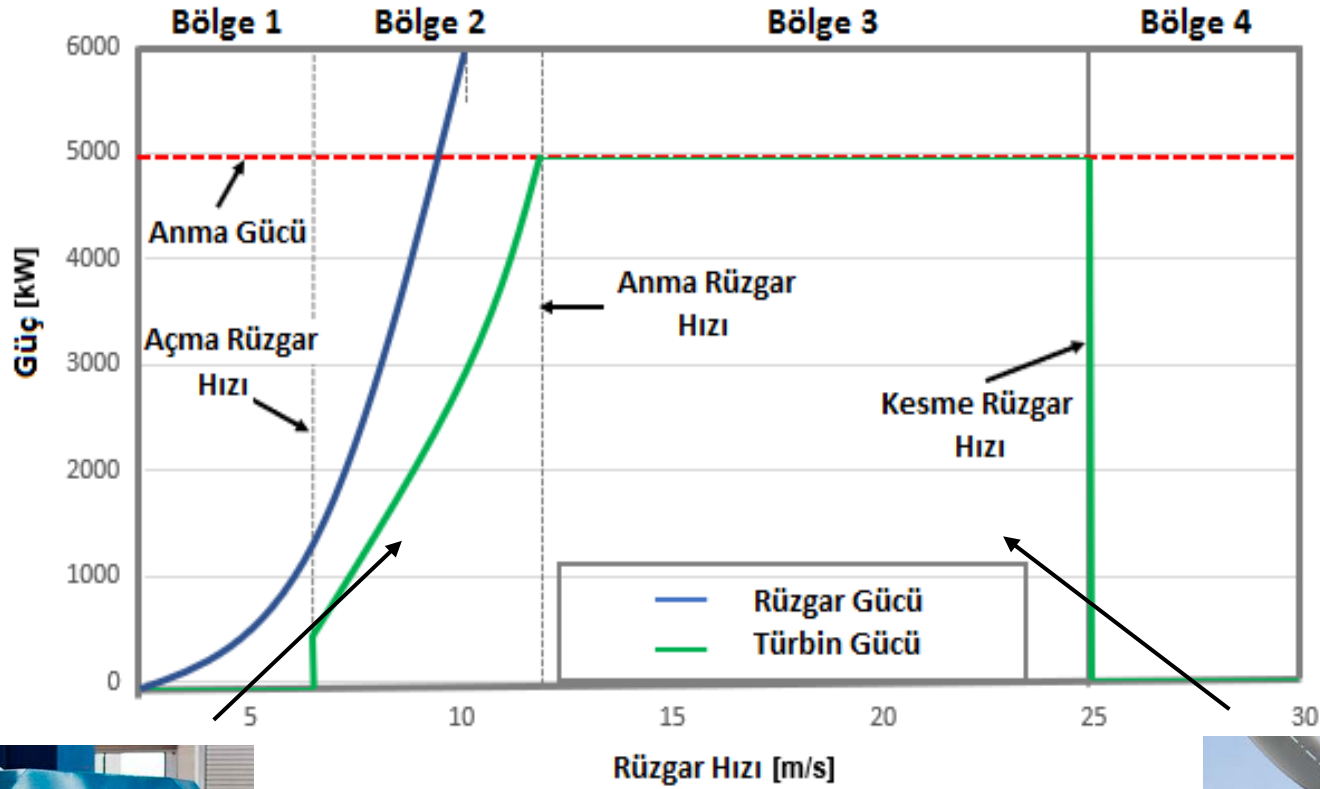
YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KONTROL SİSTEMİ

- En Üst Seviye Kontrol
- Orta Seviye Kontrol
 - Jeneratör Tork Kontrolcüsü
 - **Kanat Yunuslama Açısı Kontrolcüsü**
 - Nasel Sapma Açısı Kontrolcüsü
- En Düşük Seviye Kontrol



Şekil 1: Rüzgar türbini kontrol sistemi

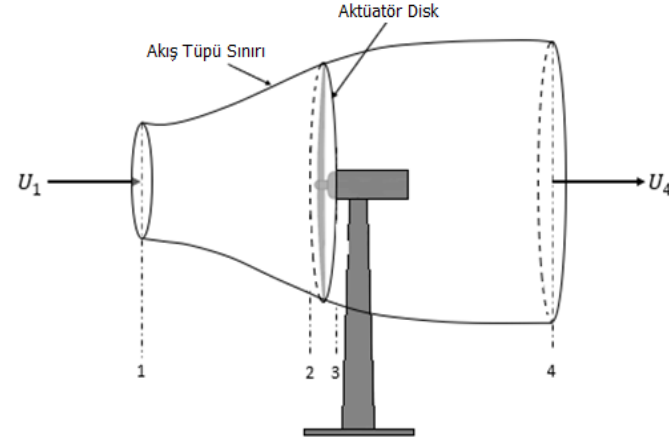
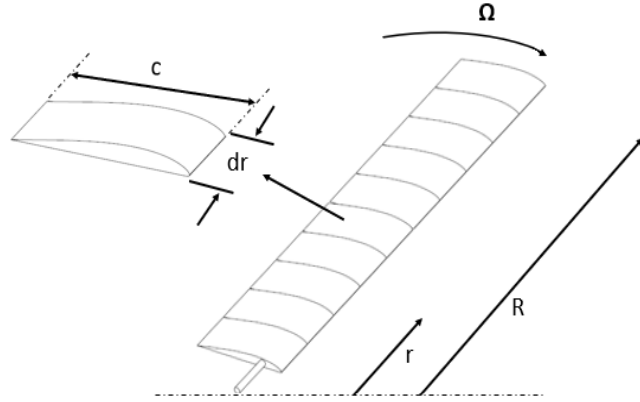
TÜRBİN ÇALIŞMA BÖLGELERİ VE KONTROL AMAÇLARI



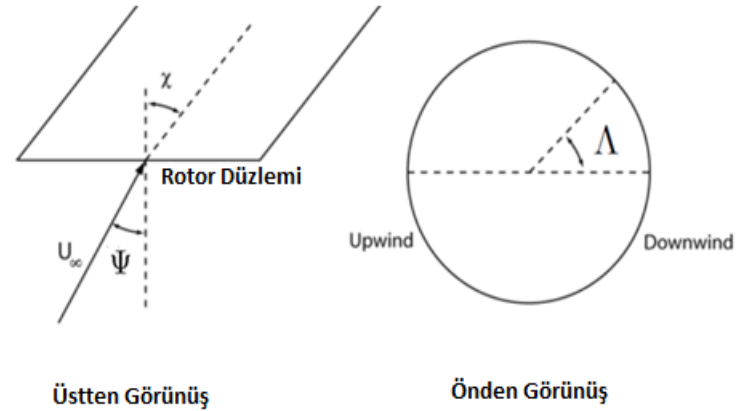
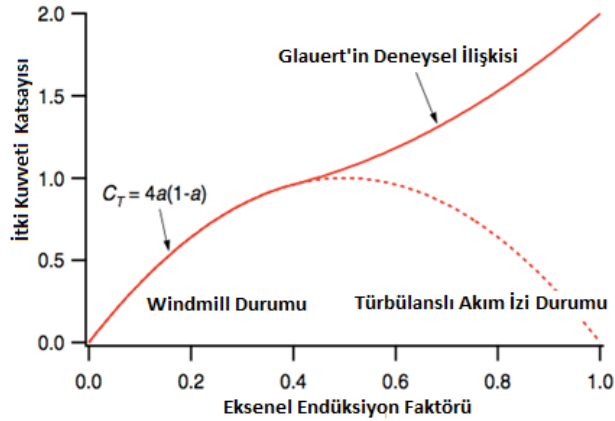
Şekil 2: Türbin çalışma bölgeleri ve kontrolü

MS BLADED RÜZGAR TÜRBİN SİMÜLASYON MODELİ

MS Bladed Modeli, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin simülasyonu için geliştirilmiştir.



Modelde, türbülanslı hava akımı ile çalışma durumu, bükülmüş akım izi düzeltme formülü, kanat kök ve uç kayıpların etkisi de hesaplamalara dahil edilmiştir.

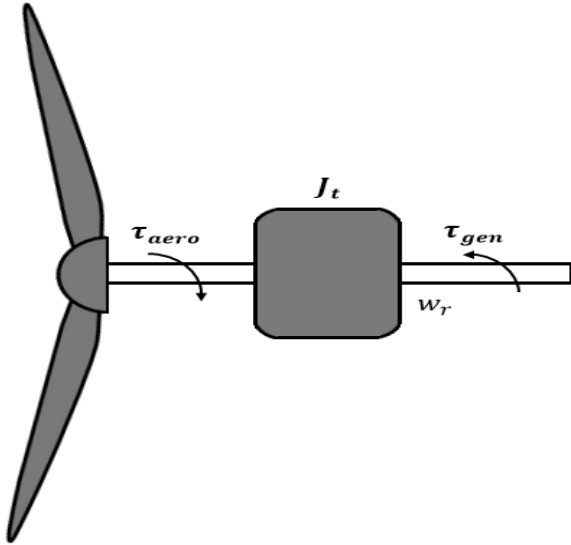


Modelin aerodinamik hesaplamaları, Prop Code, Wt_Perf and Aerodyn programlarıyla büyük ölçüde benzerlik göstermektedir.

MS (MUSTAFA SAHIN) BLADED MODEL

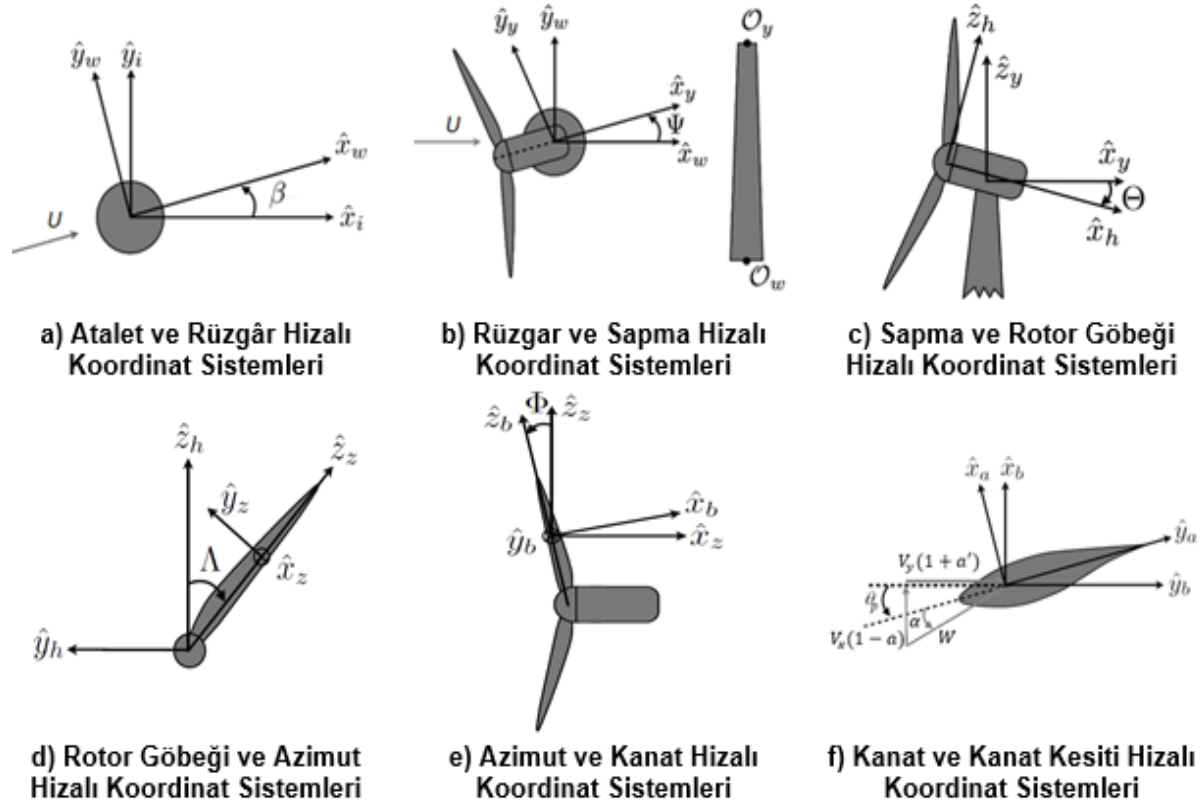
MS Bladed Modelin, türbin nasel sapma, bireysel ve kolektif kanat yunuslama hareketi özelliklerine sahiptir. Modelde, rotor koni ve nasel eğim açısı da tanımlanabilmektedir.

Model, türbin sisteminin parçalarını esnemeyen yapı olarak farz etmektedir. Sistemin ana parçaları, türbin rotor, dişli kutusu, ve değişen bir tork üreten elektrik jeneratörüdür.



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

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

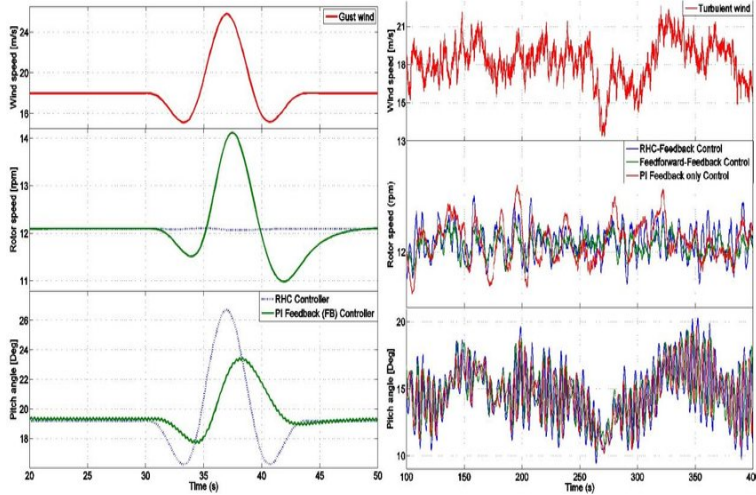


Şekil 3: Tek Kütleli Dinamik Türbin Sistemi

Şekil 4: Özel Koordinat Sistemleri

MS (MUSTAFA SAHIN) BLADED MODEL

- Tasarımı bitmiş rüzgar türbinlerinin performansı üretilmeden detaylı bir şekilde incelenebilir.
- Türbinlerin farklı rüzgar şartlarındaki (normal ve aşırı türbülans) davranışları zamana bağlı olarak görülebilir.
- Türbinler, farklı geometrik açılarda (rotor koni, yunuslama açısı, nasel eğim açısı) ve rüzgara göre belirli bir sapma açısında çalıştırılabilir.
- Türbin kontrolcülere tasarlanabilir, yeni kontrol algoritmaları geliştirilebilir ve bunların simülasyonları yapılabilir.



Şekil 4: Türbin simülasyonları

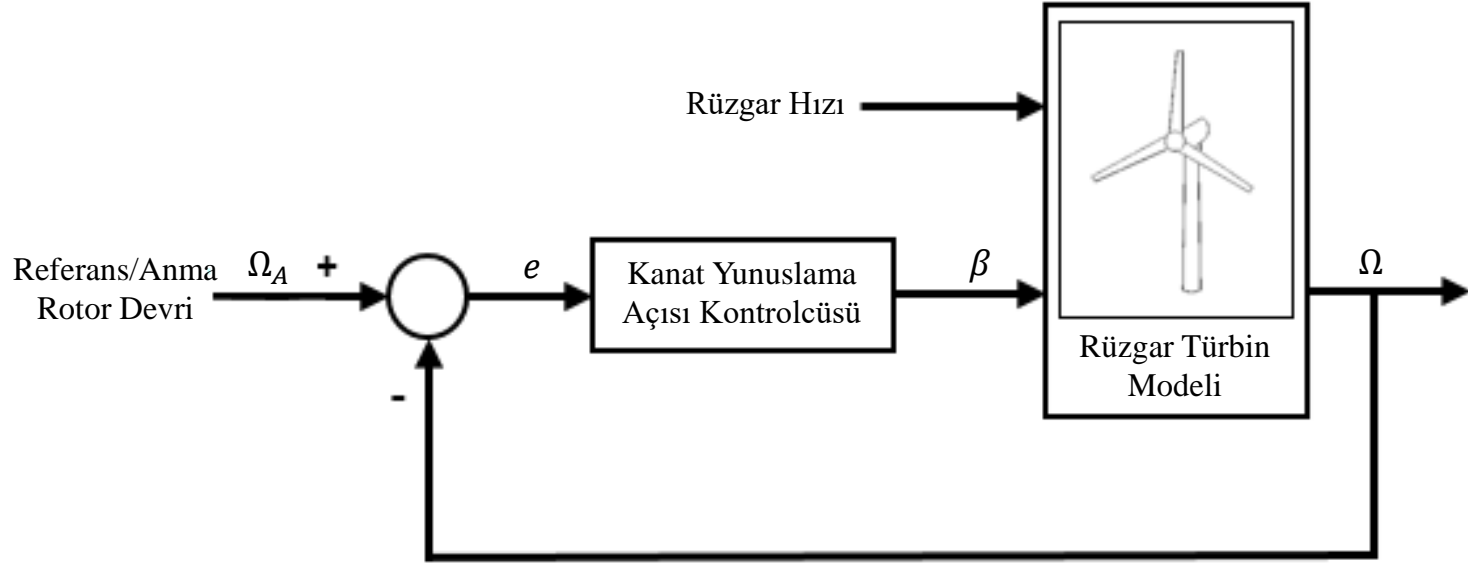


Şekil 5: Türbin üretimi

Sahin, M., & Yavrucuk, I. (2017a). *Dynamical Modeling of a Wind Turbine System with Precone and Tilt Angles.*, 9th Ankara International Aerospace Conference (pp. 1–11). Ankara, Turkey.

Sahin, M. (2018). *Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines*, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, METU, Ankara.

RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLÜ



Şekil 6: Kanat yunuslama açısı blok diyagramı

RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİNİN LİNEERLEŞTİRİLMESİ

$$J_t \dot{\Omega} = \tau_{Aero} - \tau_{Gen} \quad (1)$$

$$\tau_{Aero}(U, \Omega, \beta) = \tau_{Aero}(U_e, \Omega_e, \beta_e) + \frac{\partial \tau_{Aero}}{\partial U} (U - U_e) + \frac{\partial \tau_{Aero}}{\partial \Omega} (\Omega - \Omega_e) + \frac{\partial \tau_{Aero}}{\partial \beta} (\beta - \beta_e) + \text{YMTler} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tau_{Aero}}{\partial \Omega} = \gamma, \frac{\partial \tau_{Aero}}{\partial \beta} = \eta, \frac{\partial \tau_{Aero}}{\partial U} = \mu, \quad (4)$$

$$J_t (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) = \tau_{Aero}(\Omega_e, \beta_e, U_e) + \gamma \Delta \Omega + \eta \Delta \beta + \mu \Delta U - \tau_{Gen} \quad (5)$$

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

$$A = \frac{\gamma}{J_t} \quad (8)$$

$$\dot{\Omega} = \frac{\gamma}{J_t} \Delta \Omega + \frac{\eta}{J_t} \Delta \beta + \frac{\mu}{J_t} \Delta U \quad (7)$$

$$B = \frac{\eta}{J_t} \quad (9)$$

$$\dot{\Omega} = A \Delta \Omega + B \Delta \beta + B_d \Delta U \quad (11)$$

$$B_d = \frac{\mu}{J_t} \quad (10)$$

KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜ TASARIMI

$$\Delta\beta(t) = K_p\Delta\Omega(t) + K_I \int \Delta\Omega(t)dt \quad (12)$$

$$\dot{\Omega} = A\Delta\Omega + B\Delta\beta + B_d\Delta U \quad (11)$$

$$\dot{\Omega} = A\Delta\Omega + B(K_p\Delta\Omega(t) + K_I \int \Delta\Omega(t)dt) + B_d\Delta U \quad (13)$$

$$s\Omega(s) = A\Delta\Omega(s) + B \left(K_p\Delta\Omega(s) + \frac{K_I}{s} \Delta\Omega(s) \right) + B_d\Delta U(s) \quad (14)$$

$$G_{CL}(s) = \frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta U(s)} = \frac{B_d s}{s^2 + (-A - BK_p)s + (-BK_i)} \quad (15)$$

$$-A - BK_p > 0 \quad (16)$$

$$-BK_i > 0 \quad (17)$$

$$s^2 + 2w_n\xi s + w_n^2 \quad (18)$$

$$2w_n\xi = -A - BK_p \quad (19)$$

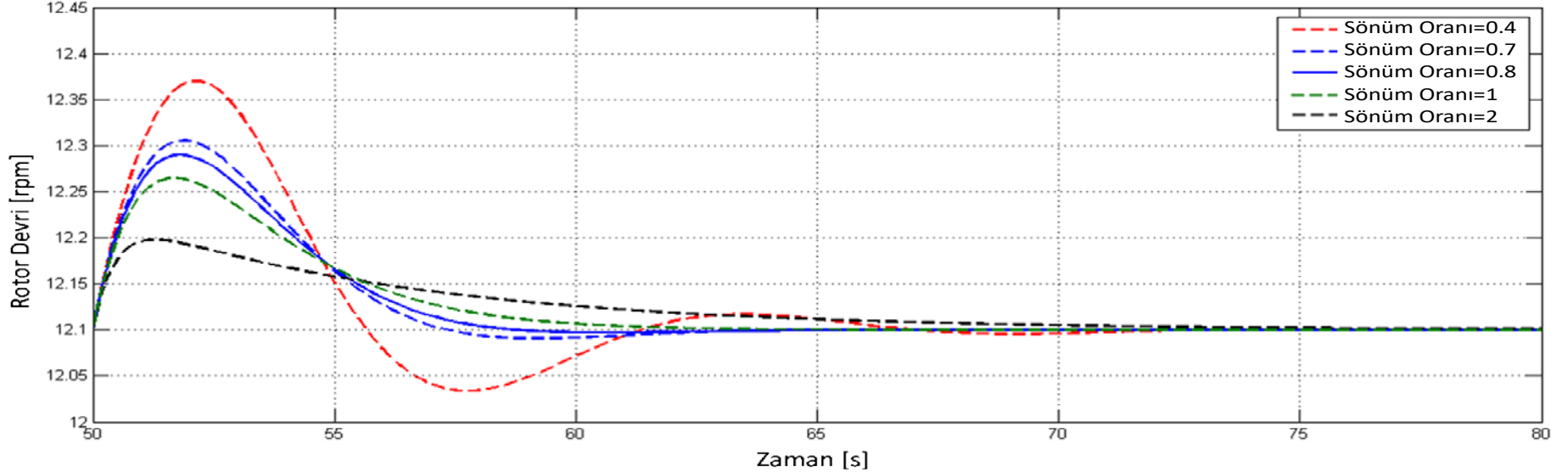
$$w_n^2 = -BK_i \quad (20)$$

$$K_p = \frac{-2w_n\xi}{B} - \frac{A}{B} \quad (21)$$

$$K_i = \frac{-w_n^2}{B} \quad (22)$$

KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜ TASARIMI

Equilibrium Points	Rüzgar Hızı (m/s), U_e	Rotor Devri (rpm), Ω_e	Yunuslama Açısı (der), β_e	Rotor Torku (Nm), τ_e
ÇN 1	18	12.1	14.9525	4180074.35

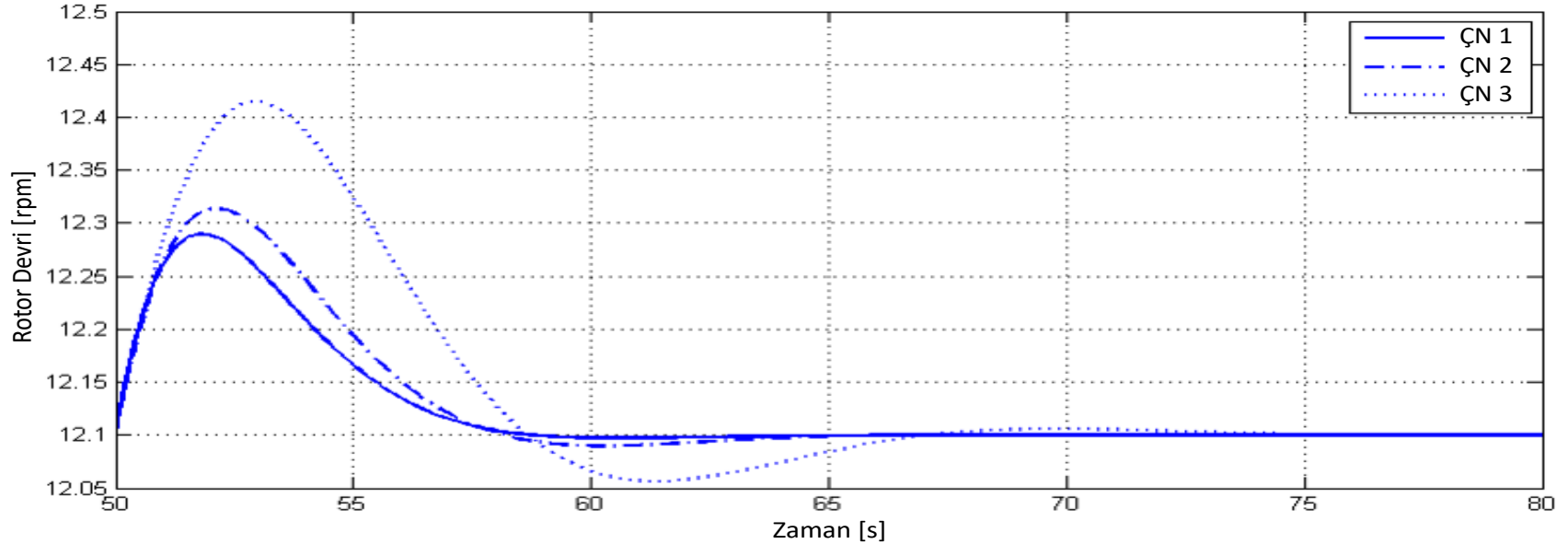


Şekil 7: Birim basamak rüzgar girişine türbininin rotor devri cevabı

Sönümlenme Oranı, ζ	Doğal Frekans, w_n	Oransal Kazanç, K_p	Integral Kazanç, K_I	Sistem Kökü 1	Sistem Kökü 2
0.4	0.6	0.2055	0.3084	-0.24-0.5500i	-0.24+0.5500i
0.7	0.6	0.5140	0.3084	-0.42-0.4285i	-0.42+0.4285i
0.8	0.6	0.6168	0.3084	-0.48-0.3600i	-0.48+0.3600i
1	0.6	0.8224	0.3084	-0.6	-0.6
2	0.6	1.8505	0.3084	-2.2392	-0.1608

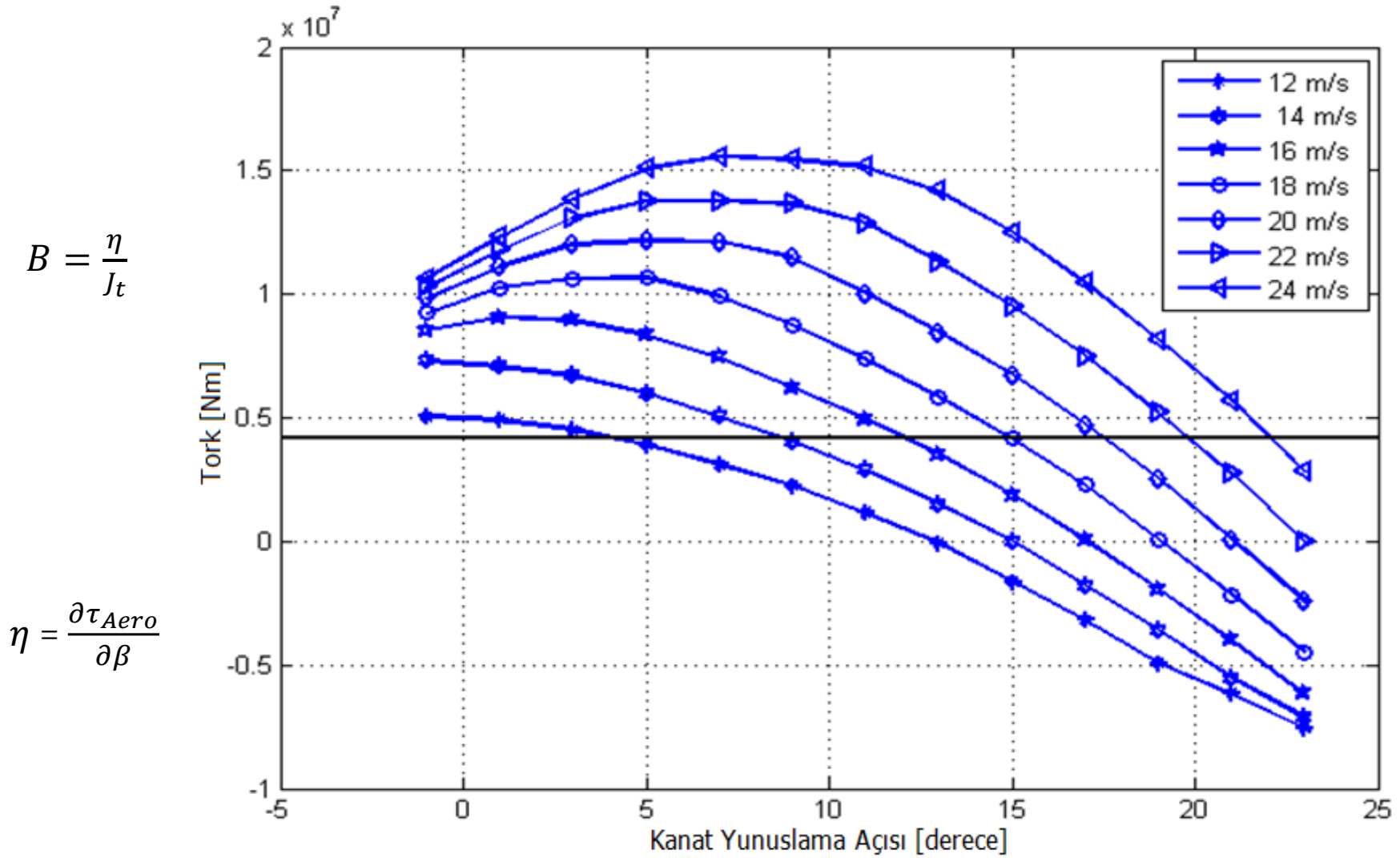
KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜ TASARIMI

Çalışma Noktaları	Rüzgar Hızı (m/s), U_e	Rotor Devri (rpm), Ω_e	Yunuslama Açısı(der), β_e	Rotor Torku (Nm), τ_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



Şekil 8: Lineer kontrolcünün diğer çalışma noktalarında testi

KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜ TASARIMI



Şekil 9: Farklı rüzgar hızlarında aerodinamik torkun kanat yunuslama açısına göre değişimi

KAZANÇ ÇİZELGELEME METODU

Çalışma Noktaları	Rüzgar Hızı (m/s), U_e	Rotor Devri (rpm), Ω_e	Yunuslama Açısı (der), β_e	Rotor Torku (Nm), τ_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

İlk olarak, A, B, ve B_d , kazanç değerleri ÇN 4'te elde edilir.

$$A = -0.0554$$

$$B = -0.2658$$

$$B_d = 0.0227$$

Doğal frekans ve sönümlenme oranı sırasıyla 0.6 and 0.8 seçilirse,

$$K_p = \frac{-2w_n\zeta}{B} - \frac{A}{B} \quad (20)$$

$$K_p = 3.4033$$

$$K_i = \frac{-w_n^2}{B} \quad (21)$$

$$K_i = 1.3544$$

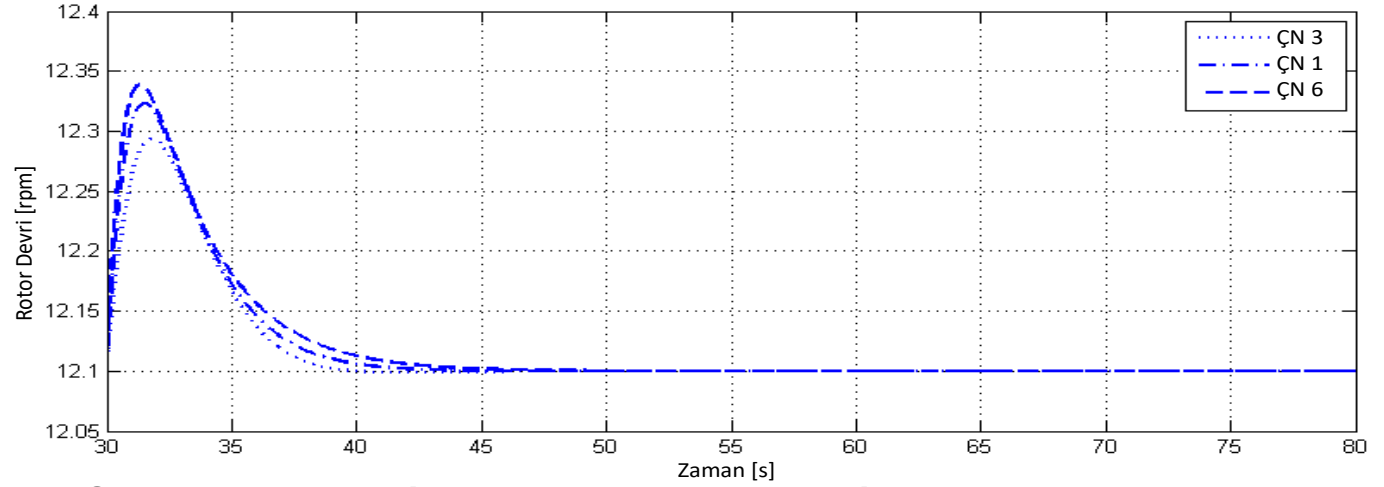
$$GK(\beta) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta}{\beta_K}\right)}$$

ÇN 5'te, $\beta_K=5.9676$ olarak elde edilir.

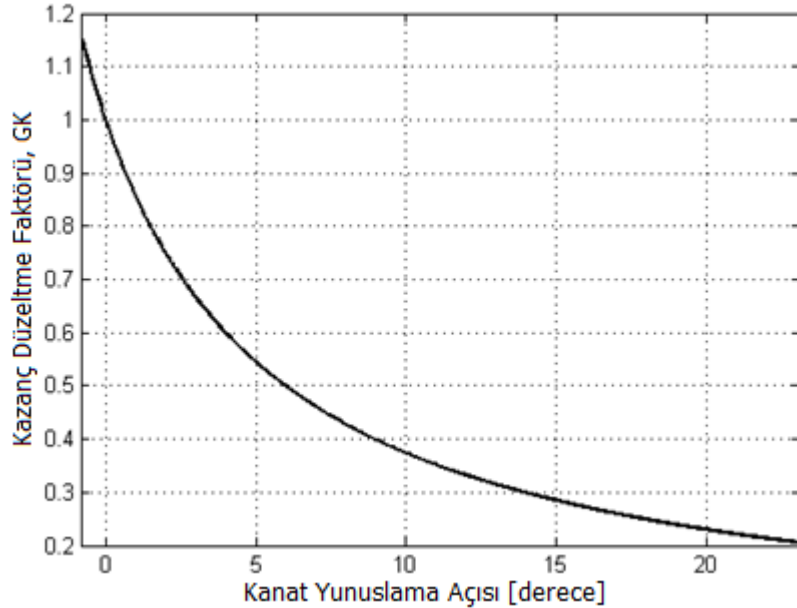
KAZANÇ ÇİZELGELEME METODU

Adım artan rüzgar girişleri

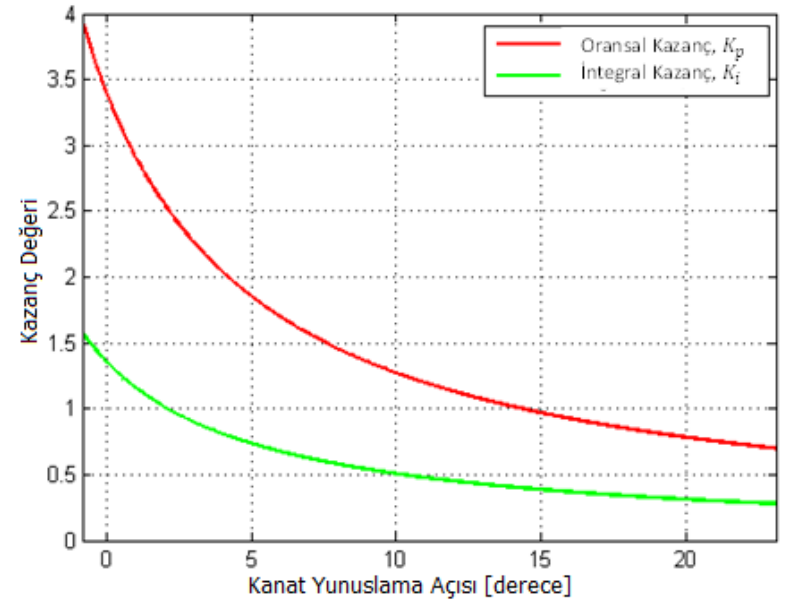
- (ÇN 3) 12 m/s to 13 m/s
- (ÇN 1) 17 m/s to 18 m/s
- (ÇN 6) 22 m/s to 23 m/s



Şekil 10: Kazanç çizelgeleme metoduna sahip PI-tabanlı kontrolcü cevabı



Şekil 11: Kazanç çizelgeleme, düzeltme faktörü



Şekil 12: Kazanç çizelgeleme, kontrolcü kazançları

DİNLEDİĞİNİZ İÇİN TEŞEKKÜRLER!

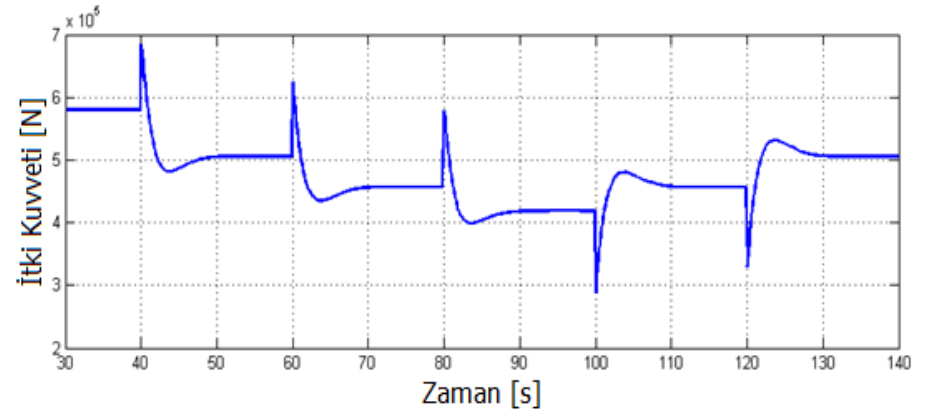
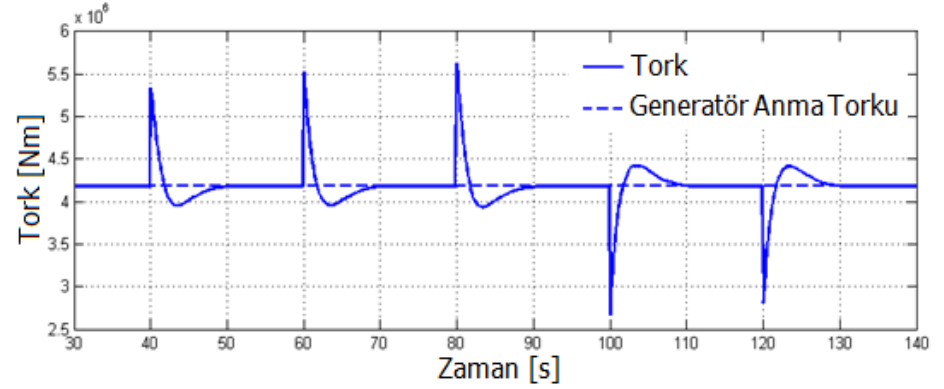
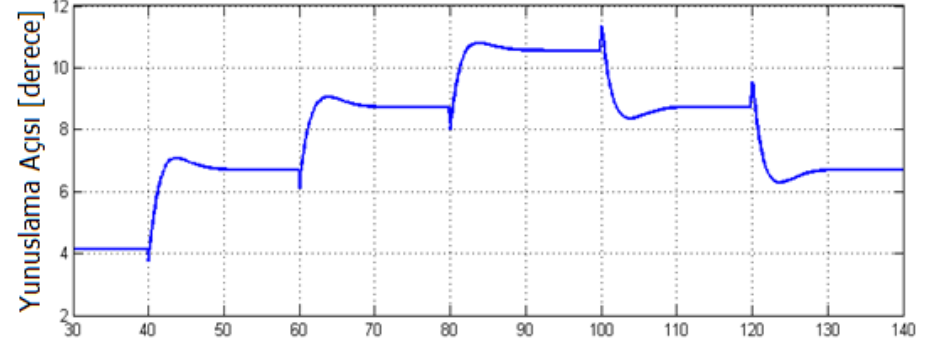
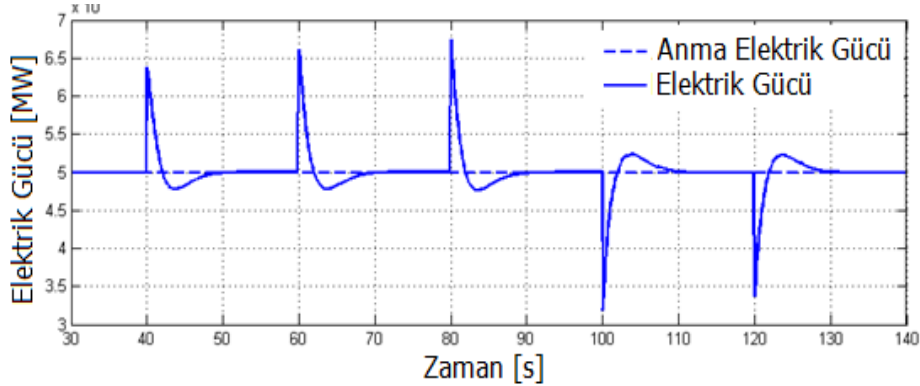
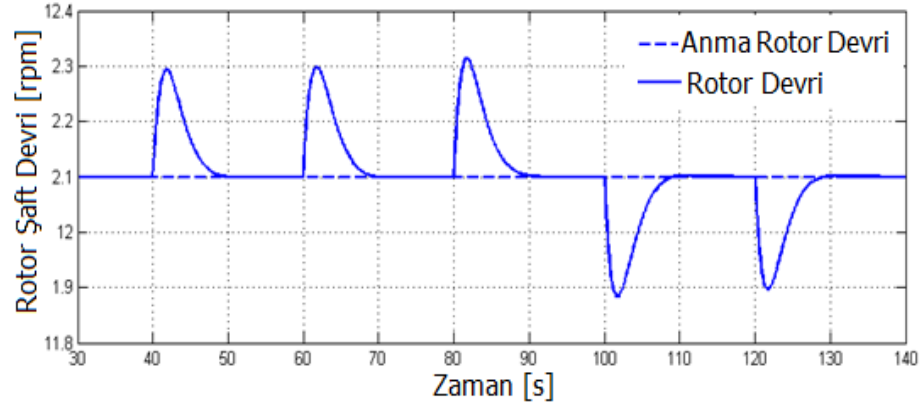
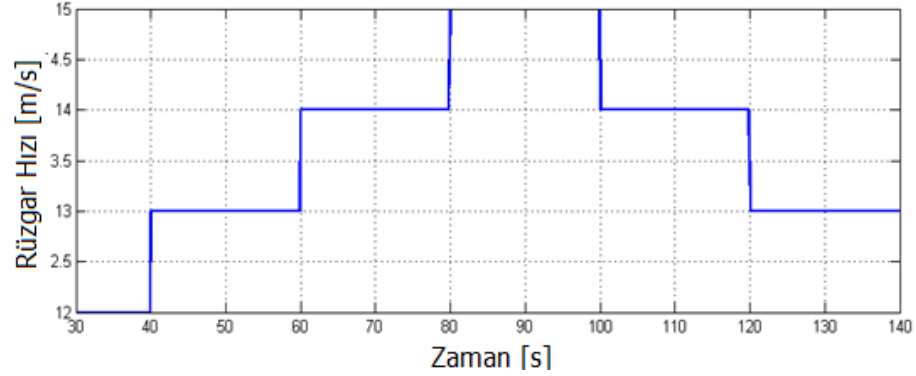


METUAEROSPACE

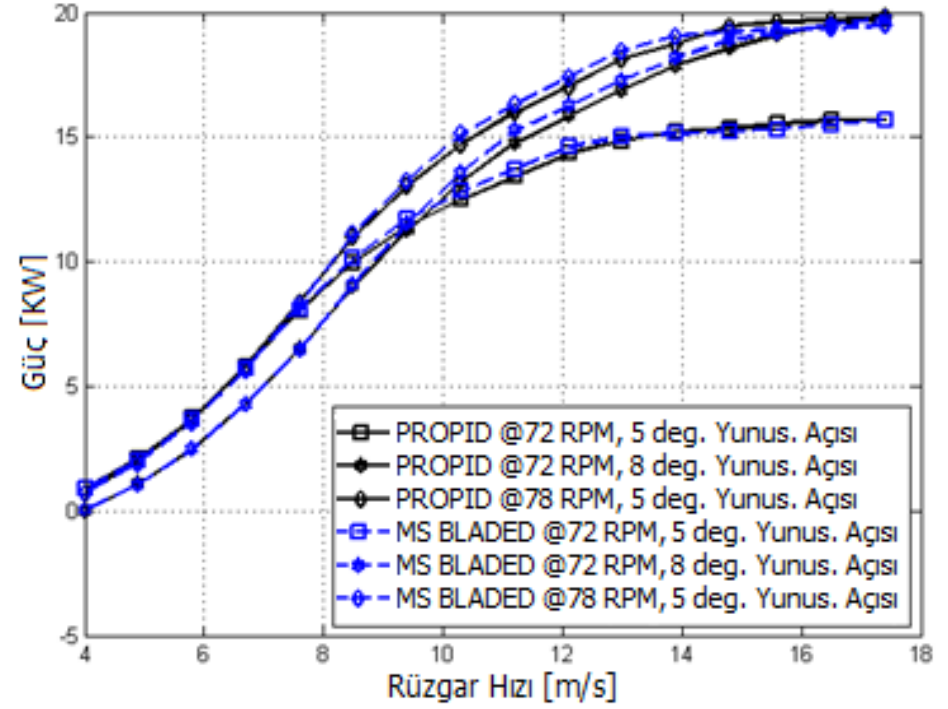
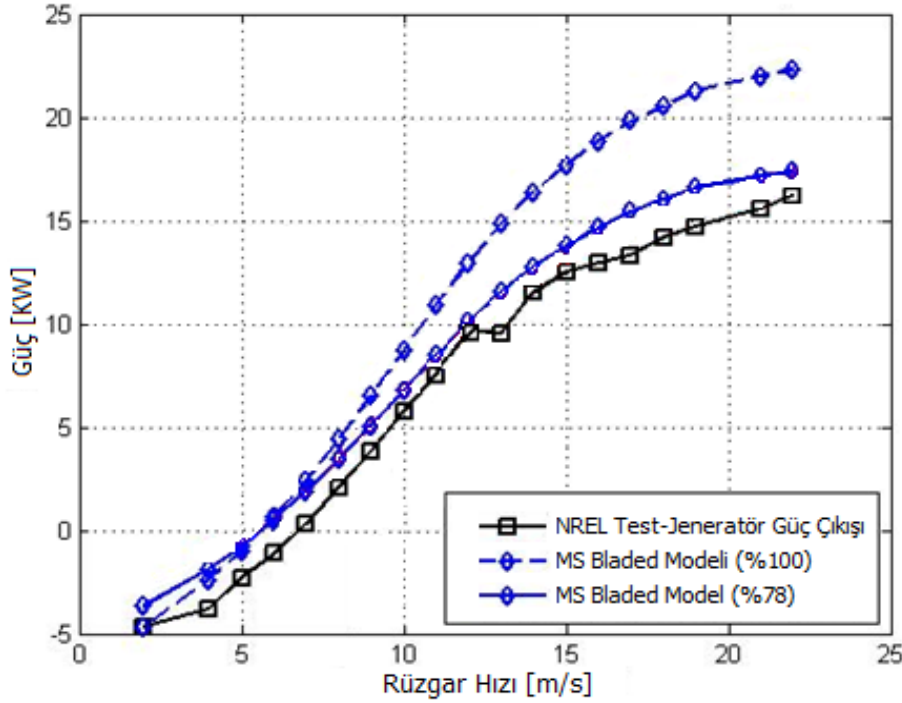
16



SİMÜLASYON SONUÇLARI



MS BLADED MODEL TAHMİNLERİ



Güç Tahminlerinin Karşılaştırılması, a) NREL Deneyleri ve MS Bladed Simülasyon Modelinin Güç Tahminlerinin Karşılaştırılması, b) PROPID ile MS BLADED Modelinin Güç Tahminlerinin Karşılaştırılması