I. OTURUM

- ANEMOMETRE KALİBRASYONU İÇİN PROTOTİP RÜZGAR TÜNELİ TASARIMI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ
  Mehmet KURTOĞLU - Gaziantep Üniversitesi
  Vedat Mehmet KARSLI - Gaziantep Üniversitesi

- RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE ÇİFTLİKLERİ İÇİN ÜÇ BOYUTLU TOPRAKLAMA AĞI TASARIMI
  Semih GÜNDEN - İstanbul Teknik Üniversitesi
  Aytuğ FONT - İstanbul Teknik Üniversitesi
  Özcan KALENDERLİ - İstanbul Teknik Üniversitesi

- BİLECİK İLİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİNDE WEIBULL DAĞILIM PARAMETRELERİNİ BELİRLEME METOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI
  Emrah DOKUR - Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
  Mehmet KURBAN - Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
  Salim CEYHAN - Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

- DEĞİŞKEN-HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNİ SİSTEMLERİNİN ÇIKIŞ GÜCÜ HESABI İÇİN GELİŞTİRİLEN MATEMATİKSEL MODELLERİN GEÇERLİLİKLERİNİN ANALİZ EDİLMESİ
  Ömer TÜRKSOY - İskenderun Teknik Üniversitesi
  Ulaş EMİNOĞLU - Niğde Üniversitesi

- KAIMAL SPEKTRUMU TABANLI RÜZGAR HIZI MODELİ İLE KANAT AÇISININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KONTROLÜ
  Oğuzhan ÖZER - Sütçü İmam Üniversitesi Elbistan Meslek Yüksekokulu
  Kadir ABACI - Mersin Üniversitesi
  Zafer ÖZER - Mersin Meslek Yüksekokulu

Anemometre Kalibrasyonu için Prototip Rüzgar Tüneli Tasarımı ve Performans Değerlendirmesi

Mehmet KURTOĞLU[1], Vedat Mehmet KARSLI[2]

[1]Gaziantep Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gaziantep, mkurtoglu@gantep.edu.tr
[2]Gaziantep Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gaziantep, vkarsli@gantep.edu.tr

ÖZET

Anemometre (rüzgar hız ölçer) rüzgar türbinleri için en önemli cihazlardan birisidir. Tespit edilmek istenen rüzgar hız bilgisinin güvenilirliği adına bu cihazlar ölçüme başlamadan önce mutlaka kalibre edilmelidir. Bu çalışmada, anemometrelerin kalibrasyon işlemi için basit bir rüzgar tüneli tasarlanmış ve performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma, anemometre kalibrasyonunu ekonomik anlamda örneklerine göre daha avantajlı olan prototip tünel sistemiyle yapılabileceğini göstermektedir. Test anemometresi tünel sisteminde kalibre edilmiş ve Plint & Partners TE 54 model farklı bir rüzgar tünelinde de kalibre edildikten sonra alınan verilerle karşılaştırma yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilerle sistemin hata oranı tespit edilmiştir. Tünel sisteminin hata oranı 0.54 % olarak belirlenmiştir. Deneysel veriler tasarlanan tünel sisteminin kritik olmayan uygulamalarda kullanılabilirliğini göstermekte olup ekonomik olarak uygun çözüm sunabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Anemometre, Kalibrasyon, Rüzgar Tüneli*

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji sistemleri enerji ihtiyacının gün geçtikçe artmasıyla fakat mevcut kaynakların sınırlı miktarda olması sebebiyle dikkatleri daha da üzerine çekmektedir. Günümüzde jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisi popüler yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Bu kaynaklar arasında en cazip olan rüzgar enerjisidir [1]. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de Rüzgar Enerji Santralleri (RES) sayısı gün geçtikçe artmakta ve gündemdeki yerini korumaktadır. Rüzgar enerji santrallerinde hız bilgisini doğru almak en kritik işlemlerden biridir. Bu amaçla kullanılan rüzgar hız ölçerler (anemometre) kalibrasyon sürecinden geçmek durumundadırlar.

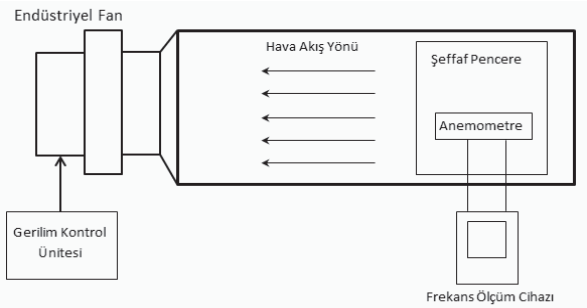
Rüzgar ölçüm tesislerinde fincan tip anemometreler (cup anemometer) yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Kullanılan bu anemometreler uluslararası alanda kabul görmüş yöntemlere göre kalibre edilmelidirler. MEASNET (Measuring Network of Wind Energy Institutes) rüzgar ölçüm konularında danışmanlık hizmetleri veren enstitüleri kapsayan uluslararası akreditasyon kuruluşudur. Bu kuruluş, anemometre kalibrasyon işlemi içinde hizmet vermektedir. Söz konusu anemometre kalibrasyon işlemi, uluslararası platformda kabul edilmiş olup MEASNET Programı kapsamında ölçüm kalitesinin daha iyi seviyeye gelmesini amaçlamaktadır [2]. Rüzgar türbinlerinde rüzgarın hızını ölçmek amacıyla kullanılan anemometreler ölçüm işlemine başlamadan önce kalibre edilmelidirler. Bununla birlikte, kalibrasyonu yapılmış anemometrelerin yıllar içindeki ölçüm hassasiyeti net bir şekilde bilinmemektedir [3].

Bu çalışmada, anemometrelerin kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için prototip rüzgar tüneli tasarlanmıştır. Hava akımı oluşumu için endüstriyel tip havalandırma fanı kullanılmış olup gerilim kontrolü yoluyla farklı hızlarda hava akımları oluşturularak Şekil 1'de gösterilen NRG Maximum #40 anemometresi kalibre edilmiştir. Tünel sisteminden elde edilen veriler referans olarak alınan Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinden elde edilen verilerle karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Tasarlanan rüzgar tüneli örneklerine göre çok daha ucuza imal edilmiş olup ekonomik olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 1: NRG Maximum #40 Anemometre [4]

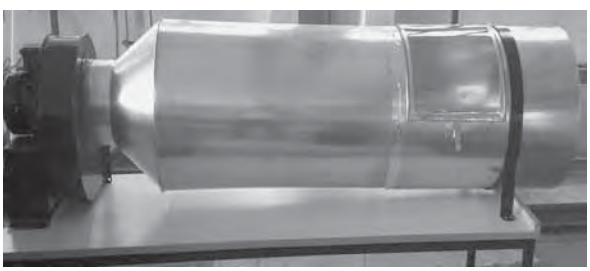
2. SİSTEM TANITIMI

Şekil 2'de tasarlanan rüzgar tüneli için taslak çalışma şeması verilmiştir. Rüzgar tünelinde en kritik noktalardan biri kullanılan fanın motor gücünün olabildiğince yüksek olmasıdır. Bu sayede birim zamanda taşınan hava akışı daha fazla olacaktır.



Şekil 2: Tasarlanan rüzgar tüneli için ön çalışma modeli

Tasarlanan tünel başlangıçta yaklaşık olarak 180 cm uzunluğunda düşünülmüştür. Tünelin dairesel çapı 40 cm olarak gerçekleştirilmiş olup havanın tünele girdiği dış kesitin alanı ise yaklaşık olarak 1256 cm^2'dir. Tünelde kullanılan endüstriyel tip fan 230V/50 Hz, 1000W, 4.75 A, 2700 rpm, IP 54 tip etiket değerlerine sahip olup tek faz asenkron motordan oluşmaktadır. Tünelin boru sistemi için galvanizli sac malzemesi öngörülmüştür ve sistem bu şekilde tasarlanmıştır. Tünelde ölçümü yapılacak anemometrenin yerleştirilmesi ve gözlemlenebilmesi amacıyla şeffaf pencere ilave edilmiştir. Tünelde kullanılan motorun hızı gerilim kontrolü yoluyla tek faz varyak yardımıyla yapılmıştır ve bu sayede farklı şiddetlerde hava akışı sağlanmıştır. Tasarlanan tünel sisteminin başlangıçtaki görünümü Ş ekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3: Tasarlanan rüzgar tünelinin görünümü

Hava akışının beklenmeyen şekilde homojen olmaması üzerine sistem tekrar gözden geçirilerek fan tarafından gerçekleştirilen hava emişinin daha rahat ve güvenli olabilmesi için sistem Şekil 4'de olduğu gibi tekrar düzenlenmiştir. Tünelin uzunluğu arttırılarak 230 cm civarına yaklaştırılmıştır. Ayrıca havanın girdiği yüzey alanı yaklaşık 1800 cm^2'ye yükseltilmiştir.

Şekil 4: Tasarlanan rüzgar tünelinin son halinden bir görünüm

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

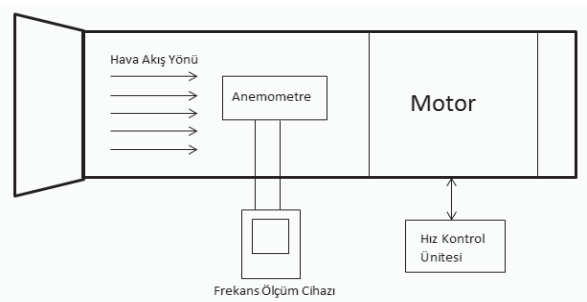
Fincan tip anemometre kalibrasyonu için kullanılan transfer fonksiyonu aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [5].

$$v = A.f + B \tag{1}$$

Verilen 1 numaralı denklemde v hava akış hızını, A doğru denkleminin eğimini, f anemometre çıkış frekansını ve B ise çıkış frekansının sıfıra eşit olduğu durumdaki hava akış hızına karşılık gelen değeri göstermektedir.
Bu çalışmada hava akış hızı Şekil 5'de gösterilen Lutron AM-4220 dijital anemometre kullanılarak tespit edilmiştir [6].

Şekil 5: Lutron AM-4220 Dijital Anemometre [6]

Şekil 1'de gösterilen anemometrenin kalibrasyonu öncelikle prensip şeması Ş ekil 6'da gösterilen Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında yer alan Plint & Partners TE 54 model gerçek hali Şekil 7'de verilen rüzgar tünelinde yapılmıştır.



Şekil 6: Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinin prensip şeması

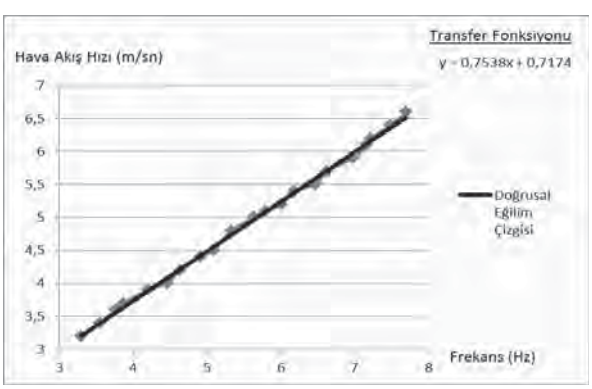
Şekil 7: Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinin görünümü

Referans alınan Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinin uzunluğu yaklaşık olarak 4 m'dir. Bu tünelde hava akış hızı üç faz motorla sağlanmaktadır. Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinde yapılan ölçüm sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen verilerle ortaya çıkan doğru denklemi grafiği ve transfer fonksiyonu değeri Şekil 8'de gösterilmiştir.
Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinde yapılan ölçümler sonucunda eşitlik (2)'de elde edilen transfer fonksiyonu yardımıyla sistemin 10 Hz. frekansa karşılık hava akış hızı cevabı 8.2554 m/sn olarak ortaya çıkar.

$$v[m/sn] = 0.7538f[Hz] + 0.7174 \qquad (2)$$

Tablo 1: Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinden elde edilen veriler

NRG Maximum #40 Anemometre Çıkış Frekansı (Hz)	Dijital Anemometreyle Ölçülen Hava Akış Hızı (m/sn)
3,297	3,2
3,552	3,4
3,766	3,6
3,868	3,7
4,207	3,9
4,464	4
4,64	4,2
4,916	4,4
5,089	4,5
5,327	4,8
5,64	5
5,792	5,1
6,011	5,2
6,179	5,4
6,471	5,5
6,621	5,7
6,98	5,9
7,169	6,1
7,217	6,2
7,482	6,4
7,696	6,6



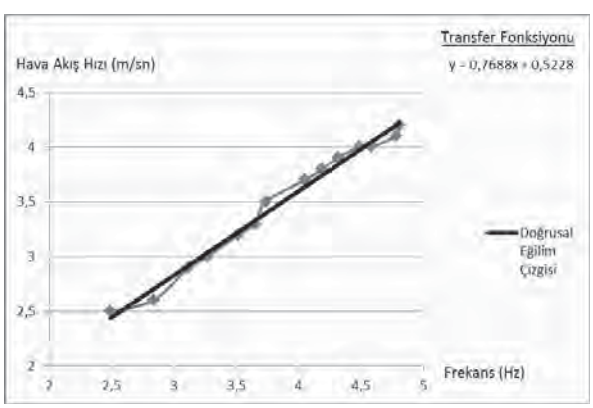
Şekil 8: Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinden elde edilen verilerle ortaya çıkan doğru denklemi grafiği ve transfer fonksiyonu değeri

Tasarlanan rüzgar tüneli içerisinde kalibrasyonu yapılacak NRG Maximum #40 anemometrenin test edilmesi sonucunda elde edilen veriler Tablo 2'de verilmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla ortaya çıkan doğru denklemi grafiği ve transfer fonksiyonu Şekil 9'da gösterilmiştir.
Tasarlanan rüzgar tünelinde yapılan ölçümler sonucunda eşitlik (3)'de elde edilen transfer fonksiyonu yardımıyla sistemin 10 Hz. frekansa karşılık hava akış hızı cevabı 8.2108 m/sn olarak ortaya çıkar.

$$v[m/sn] = 0.7688f[Hz] + 0.5228 \qquad (3)$$

Tablo 2: Tasarlanan rüzgar tünelinden elde edilen veriler

NRG Maximum #40 Anemometre Çıkış Frekansı (Hz)	Dijital Anemometreyle Ölçülen Hava Akış Hızı (m/sn)
2,492	2,5
2,836	2,6
3,12	2,9
3,271	3
3,515	3,2
3,652	3,3
3,735	3,5
4,051	3,7
4,189	3,8
4,311	3,9
4,489	4
4,579	4
4,779	4,1
4,806	4,2



Şekil 9: Tasarlanan rüzgar tünelinden elde edilen verilerle ortaya çıkan doğru denklemi grafiği ve transfer fonksiyonu değeri

Kalibrasyonda önemli olan elde edilen transfer fonksiyonu değeridir. Ortaya çıkan transfer fonksiyonlarının matematiksel olarak karşılaştırılması sonucunda tasarlanan rüzgar tünelinin hata oranı belirlenir ve sistemin performansı ortaya çıkar. Deneysel çalışma sonucunda; tasarlanan rüzgar tünelinin karşılaştırması Tablo 3'de verilmiştir. Referans olarak alınan Plint & Partners TE 54 model rüzgar tüneline göre tasarlanan sistemin hata oranı 0.54 % olarak belirlenmiştir.

Tablo 3: 10 Hz frekans değerinde rüzgar tünellerinin karşılaştırılması

NRG Maximum #40 Anemometre				
Rüzgar Tüneli	**Eğim (A)**	**Kesişim (B)**	**Hava Akış Hızı (m/sn)**	**% Fark**
Plint & Partners TE 54	0.7538	0.7174	8.2554	0.54
Tasarlanan	0.7688	0.5228	8.2108	

4. SONUÇLAR

Rüzgar hız ölçümünde kullanılan fincan tip anemometreler, ölçümlere başlamadan önce mutlaka kalibrasyon işleminden geçmelidirler. Bu çalışmada anemometre kalibrasyonu için rüzgar tüneli tasarlanmış ve referans alınan Plint & Partners TE 54 model farklı bir rüzgar tüneliyle karşılaştırma yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Her iki tünelde de aynı NRG Maximum #40 Anemometre için yapılan kalibrasyon işlemlerinin sonucunda çok fazla hassasiyet gerektirmeyen çalışmalarda tasarlanan rüzgar tünelinin güvenilirliğinin ve kullanılabilirliğinin uygun olabileceği sonucuna varılmıştır.
Gerçekleştirilen prototip rüzgar tüneli, örneklerine göre çok daha ekonomik olup anemometre kalibrasyonu için uygun çözüm sunabilmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Çalışmada referans olarak alınan Plint & Partners TE 54 model rüzgar tünelinin kullanımı hususunda desteklerini esirgemeyen Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederiz.

6. KAYNAKÇA

[1]. İncecik S., Erdoğmuş F., "An Investigation of The Wind Power Potential on The Western Coast of Anatolia", Renewable Energy, Vol. 6, No. 7, pp. 863-865, 1995.

[2]. MEASNET Document, Anemometer Calibration Procedure v.2, October 2009.

[3]. Ronsten G., Dahlberg J-A., "Calibration of Anemometers in FFA-L2 Wind Tunnel Including Twin Calibration and Tests of Sensitivity to Wind Velocity Gradient and Tilt", The Aeronautical Research Institute of Sweden, FFA TN 1996-51.

[4]. https://www.renewablenrgsystems.com/products/met-sensors/anemometers/detail/40c-anemometer

[5]. Can H., "Multi Point Wind Speed and Direction Measurement and Data Logging of Remote Sites Using Microcontrollers", Master's Thesis, University of Gaziantep, Gaziantep, Turkey, July 2006.

[6]. http://www.instrumentcatalog.com.au/images/s/1421/352-datasheet.pdf

RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE ÇİFTLİKLERİ İÇİN ÜÇ BOYUTLU TOPRAKLAMA AĞI TASARIMI

Semih Günden[1], Aytuğ Font[1], Özcan Kalenderli[1]

[1]İstanbul Teknik Üniversitesi, Maslak, İstanbul
semih.gunden@gmail.com, font@itu.edu.tr, kalenderli@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, CYMGRD yazılımı kullanarak rüzgar türbini çiftlikleri için üç boyutlu topraklama tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımın Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği ve IEEE 80-2000 standardına uygunluğa dikkat edilmiştir. Topraklama sistemi tasarımı farklı toprak özdirenç değerleri için incelenerek bazı durumlarda tasarımda topraklayıcı şekil ve boyutlar değiştirilmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen toprak özdirenç değeri kullanılarak ilk önce tekil türbinler için iki farklı tasarım yapılmıştır. Tekil sistem için uygun tasarım belirlendikten sonra seçilmiş tasarım, çok türbinli rüzgar çiftliklerine uygulanmış, topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimindeki değişimler hesaplanmıştır. Yapılan dört farklı tasarımın karşılaştırması yapılmış ve topraklama sistemindeki türbin sayısının topraklamanın kalitesine olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbinleri, Topraklama, Topraklama direnci, Adım gerilimi, CYMGRD

1. Giriş

Artan dünya nüfusuyla birlikte enerji ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Artan enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi devam etmektedir. Genellikle yüksek yerlere kurulan rüzgar türbinleri ve çiftliklerinin sayısı giderek artmaktadır. Yüksek alanlara kurulan rüzgar türbinlerinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri yıldırım çarpma riskidir. Rüzgar türbinlerine isabet eden yıldırım akımları kanatlar, rotor ve türbin kulesi üzerinden akmaktadır. Rüzgar türbinlerinde arıza veya yıldırım darbesi sonucu oluşan tehlikeli gerilimlerin türbin bileşenleri ve canlılara zarar vermesini engellemek adına topraklama sistemi tasarımları yapılır [1, 2].

Topraklama sistemi analizinde topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimleri önemli bileşenlerdir. Ulusal topraklama yönetmeliği [3] ve IEEE 80-2000 standardına [4] göre topraklama tasarımı içinde aranacak koşullardan biri adım ve dokunma gerilimlerinin izin verilen değerlerden küçük olmasıdır. Topraklama direnci ise yine belirtilen değerden küçük olmalıdır. Böylece arıza akımı kolayca dağıtılabilmelidir.

Topraklama sistemi tasarlanırken kullanılan deneyime dayalı formüller doğruluk ve süre açışından yetersiz kalmaktadır. Günümüzde kullanılan kompleks yapılı topraklama sistemlerinde bu yetersizlikleri gidermek için bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır [5-7]. Kullanılan bilgisayar yazılımları sayesinde gerçeğe uygun üç boyutlu modeller üzerinde çalışılabilmektedir [8]. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapan CYMGDR topraklama hesaplama yazılımı kullanılmıştır [9]. Farklı tabakalı toprak modellerinde uygun tabaka özdirenç ve kalınlıkları belirlenmiştir. Farklı geometrik şekilli topraklama sistemi tasarlanarak CYMGRD yazılımında topraklama dirençleri, toprak potansiyel yükselmesi, adım ve dokunma gerilimleri hesaplanmıştır. Son olarak rüzgar türbinlerinin topraklama ağları birbirlerine bağlanarak rüzgar çiftliklerinin adım ve dokunma gerilimleri incelenmiştir.

2. Topraklama Hesabı

CYMGRD yazılımı güvenlik değerlendirmelerini IEEE 80-2000 standardında yer alan formüllere göre yapmaktadır. Bunlar adım ve dokunma gerilimleridir. Bu standarda göre 50 kg ve 70 kg vücut ağırlıkları için maksimum adım ve dokunma gerilimleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır [4]:

50 kg vücut ağırlığı için dokunma gerilimi

$$E_{dokunma-50} = \frac{(1000 + 1.5C_s\rho_s)0.116}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

ve adım gerilimi;

$$E_{adım-50} = \frac{(1000 + 6C_s\rho_s)0.116}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

70 kg vücut ağırlığı için dokunma gerilimi

$$E_{dokunma-70} = \frac{(1000 + 1.5C_s\rho_s)0.157}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

ve adım gerilimi;

$$E_{adım-70} = \frac{(1000 + 6C_s\rho_s)0.157}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

Bu denklemlerde, t arıza süresi, ρ_s yüzey malzemesinin özdirenci ve C_s yüzey tabakasının azaltma katsayısıdır [4]. C_s katsayısı; h_s kalınlığındaki ve ρ özdirençli, yüksek dirençli yüzey malzemesinin altındaki toprak için formül 5 ile hesaplanır:

$$C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (5)$$

3. Rüzgar Türbinleri Topraklama Sisteminin Üç Boyutlu Tasarımı

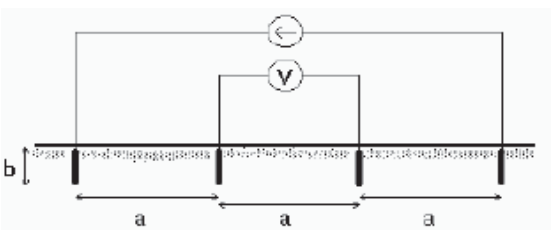
Bu bölümde CYMGRD yazılımı sayesinde rüzgar türbinleri topraklama tasarımı incelenmiştir. Yazılım bir veya iki tabakadan oluşan topraklarda, topraklama ağlarının analizini yaparak IEEE 80-2000 standartına göre adım ve dokunma gerilimlerini hesaplar [4].

CYMGRD yazılımı [9] ile topraklama tasarımı yapılmadan önce M. I. Lorentzou ve diğerlerinin çalışması dikkate alınmıştır [1]. Bu çalışmaya göre tasarım yapılırken izlenecek metodoloji belirlenmiştir.

Bu metodolojiye göre ilk önce topraklama alanının özdirenci ölçümlerle hesaplanır. Daha sonra rüzgar türbini baralarında oluşabilecek tek fazlı kısa devre akımı hesaplanır ve bu akıma göre izin verilen maksimum adım ve dokunma gerilimleri bulunur. Tek bir rüzgar türbininin topraklama tasarımı yapılır ve topraklama direnci ile bir kişinin tehlikeye maruz kalabileceği toprak yüzeyindeki adım ve dokunma gerilimlerinin hesaplanır.

3.1. Toprak Özdirenç Ölçümü ve Toprak Katmanlarının Modellenmesi

Topraklama alanının özdirenç ölçümleri Wenner dört kazık yöntemine göre yapılmıştır. Şekil 1'de Wenner yönteminin prensibi görülmektedir [3, 4].



Şekil 1: Wenner dört kazık yöntemi.

Özdirenci ölçülecek toprak üzerinde dört adet elektrot eşit aralıklarla istenilen derinliğe saplanır. En dıştaki elektrotlara akım uygulanır ve içteki elektrotlar arasında oluşan potansiyel farkı bir voltmetre ile ölçülür. Bu ölçüm değerlerinden denklem (6) yardımıyla toprağın özdirenci her derinlik için hesaplanır [3, 4].

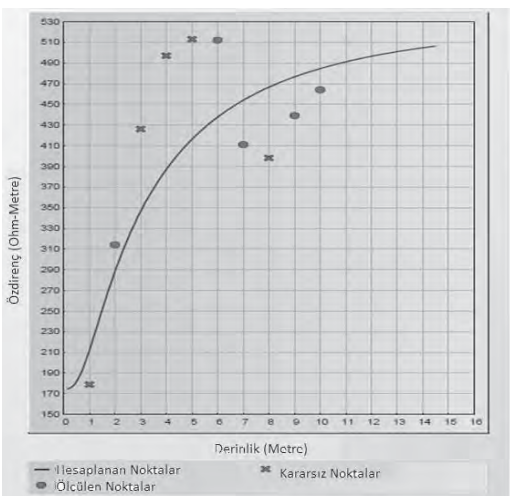
$$\rho = \frac{4.\pi.a.\left(\frac{V}{I}\right)}{\left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\right]} \qquad (6)$$

Bu denklemde a elektrotlar arası uzaklık, b elektrotların boyu, I uygulanan akım ve V oluşan gerilimdir. Bu denklem ile 10 farklı a ve b = 2,5 m için ölçülen V, I değerleriyle hesaplanan toprak özdirenç değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerler söz konusu programa girildiğinde istenen toprak modeline göre tabaka kalınlıkları ve bu tabakaların özdirençleri belirlenir. M. I. Lorentzou [1] çalışmasında da belirtildiği gibi gerçek toprak modeline en yakın kabul edilen model iki tabakalı toprak modeli olduğu için hesaplamalar buna göre yapılmıştır.

Tablo 1: Hesaplanan toprak özdirenç değerleri

Ölçüm Sırası	Açıklık, a (m)	Özdirenç ρ (Ω.m)
1	1	178,7
2	2	314
3	3	426
4	4	497
5	5	513
6	6	512
7	7	411
8	8	398
9	9	439
10	10	464
Ortalama		415,27

Şekil 2'de farklı elektot açıklıkları için hesaplanmış toprak özdirençlerinin topraklama yazılımına girilmiş hali görülmektedir. Yazılım bu değerlerden yanlış ölçüm nedeniyle oluşan kararsız noktaları atarak derinliğe bağlı toprak özdirenç değişimini kendi elde eder. Bu eğri yardımıyla da kullanılacak toprak modelini oluşturur.



Şekil 2: Özdirencin elektrot açıklığıyla değişimi.

Tablo 1'deki değerler yardımıyla program iki tabakalı bir toprak modeli oluşturmuştur. Bu modele göre toprak, üst katmanı 1 m kalınlığında, 174,37 Ω.m özdirence sahip ve alt katman 535,1 Ω.m özdirence sahip olacak şekilde modellenmiştir. Yapılan benzetimlerde toprağın bu modeli kullanılmıştır.

3.2. Topraklama Ağı, Elektrotlar ve İletkenlerin Tasarımı

Tasarımın bu bölümünde sistemin tek fazlı kısa devre arıza akımı hesaplanmıştır. Arıza akımı olarak topraklama tasarımının yapılacağı tesisin kısa devre arıza akımı dikkate alınmıştır. Buna göre maksimum toprak arıza akımı 5 kA olarak, maksimum kısa devre süresi 0,5 saniye olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde maksimum ağ sıcaklığı (bakırın ergime sıcaklığı olan) 1083 °C ve maksimum çevre sıcaklığı

40°C olarak belirtilmiştir. Bu koşullar dikkate alınarak rüzgar türbini temel topraklama elektrotları ve iletkenlerinin boyutları seçilirken yüksek arıza akımı ve mekanik zorlanmaya dayanım göz önünde tutulmuş ve Tablo 2'deki değerler belirlenmiştir.

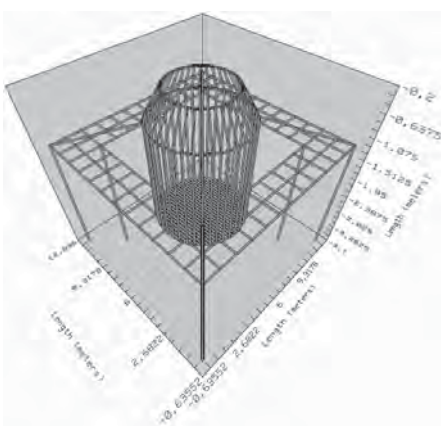
Tablo 2: Topraklama elektrotunun özellikleri

Topraklama Elektrodu Çapı	16 mm
Topraklama İletkeni Çapı	16 mm
Topraklama Elektrodu Uzunluğu	2.5 m
Temel Boyutları (Yarıçap × Yükseklik)	2 m × 2 m
Topraklama Ağı Çevre Uzunluğu	4 × 12 m = 48 m

Bu veriler kullanılarak dört farklı topraklama modeli oluşturulmuş ve standarda göre gerekli hesaplamaları bilgisayar ortamında yapılmıştır. İlk model tekil rüzgar türbini için 1 m^2 gözlere sahip ağ tasarımına sahiptir. İkinci modelde gözlerin alanı 0,25 m^2 olacak şekilde küçültülmüştür. Üçüncü modelde, ikinci modelde kullanılan topraklama yapısı dört rüzgar türbininden oluşan bir çiftlik için birlikte tasarlanmıştır. Son model ise üçüncü modeldeki türbin sayısının iki katı olması durumunu kapsamaktadır.

4. Tek Bir Rüzgar Türbininin Topraklama Tasarımının Yapılması

Birinci modele göre tek bir rüzgar türbininin temel topraklaması Şekil 3'de görüldüğü gibi yapılmıştır. Çevre topraklama ağının aralıkları 1 m × 1 m olacak şekilde gözlerden oluşturulmuştur. Çevre topraklama ağının iç kısımlarının dört köşesine boyları 2,5 m olan çubuk topraklama elektrodu yerleştirilmiştir.



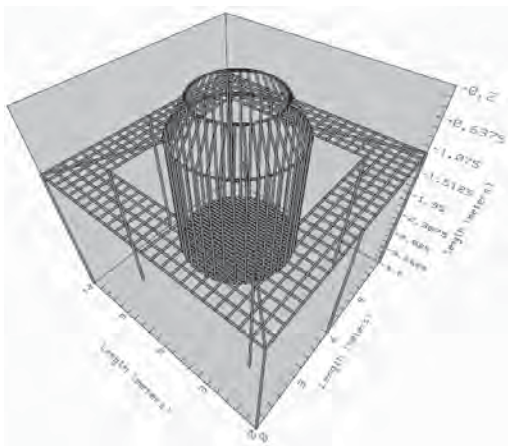
Şekil 3: Tek türbin için oluşturulmuş topraklama modeli I.

Bu şekilde oluşturulmuş modelde Tablo 3'deki parametreler kullanılarak topraklama direnci ve potansiyel yükselmeleri (GPR: Ground Potential Rise) hesaplanmıştır. Benzetim sonucunda topraklama direnci 13,438 Ω ve potansiyel yükselmesi 69202,8 V olarak bulunmuştur. Hesaplanan topraklama direnci 10 Ω değerini aştığı için tasarlanan topraklama ağı tek başına kullanılamaz. Tasarım izin verilen değerleri aşmayacak şekilde yeniden tasarlanmıştır.

Tablo 3: Topraklama hesabında kullanılan değerler

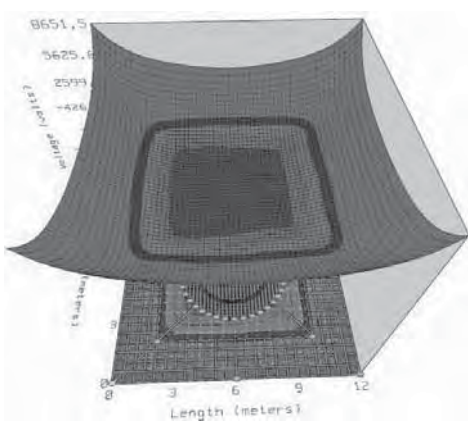
Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci	1000 Ω
Yüzey tabakasının özdirenci	3000 Ω.m
Yüzey tabakasının kalınlığı	0,2 m
Arıza açma süresi, t_s	0,5 s

Topraklama direncinin değeri olması gereken değerin üzerinde çıktığı için topraklama ağında tasarım değişikliğine gidilmiştir. çevre topraklama ağı aralıkları 0,5 m × 0,5 m yapılarak ilk durumdaki tasarıma ek olarak eklenen topraklama çubuklarıyla beraber toplam 10 adet 2,5 m boyunda çubuk topraklama çubuğu kullanılarak Şekil 4'teki tasarım elde edilmiştir.



Şekil 4: Tek türbin için oluşturulmuş topraklama modeli II.

Yeni tasarım için yazılım tarafından Tablo 3'e göre yapılan hesaplanan topraklama direnci 8,1309 Ω'dur. Bu direnç değeri standartlara uygundur. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise 43786,6 V'dur. Ayrıca IEEE 80-2000 standardına dayanılarak hesaplanan en yüksek adım ve dokunma gerilimleri sırasıyla 2983,45 V ve 912,39 V'dur.



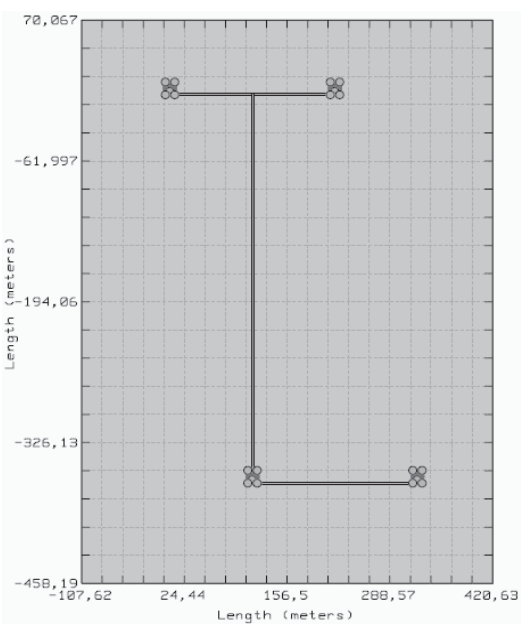
Şekil 5: Model II için potansiyel dağılımı.

Şekil 5'de tasarlanan topraklama ağının üç boyutlu potansiyel dağılımı görülmektedir. Potansiyel dağılımında kırmızı ve tonları adım geriliminin izin verilen değerlerden yüksek olduğu değerleri, mavi ve tonları ise izin verilen sınırların altında olduğunu göstermektedir. Şekil 5'den de görüleceği gibi rüzgar türbini ve çevresinde izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimi değerleri aşılmadığı için tasarım güvenli bir topraklama sistemidir.

5. Rüzgar Çiftliğinin Topraklama Tasarımı

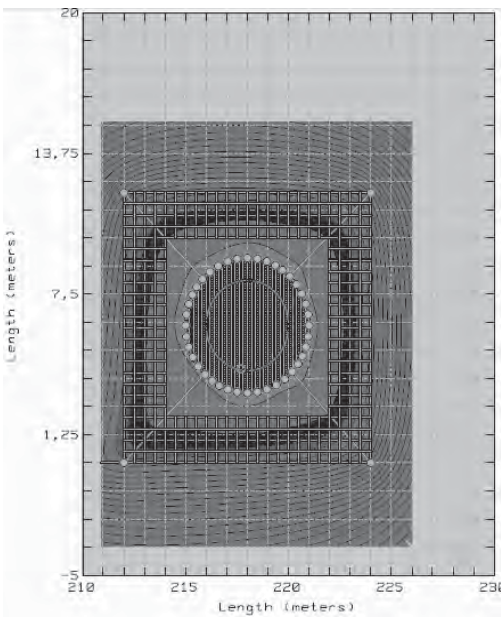
Bir rüzgar türbini için yapılan hesabın istenilen toprak direnci ve gerilim değerlerini sağladıktan sonra birbirine bağlı rüzgar türbinlerinin oluşturduğu rüzgar çiftlikleri için tümleşik topraklama sistemleri tasarlanmış ve elde edilen değerler tekil topraklama tasarımı değerleri ile karşılaştırılarak çiftlikler için optimum topraklama tasarımı belirlenmiştir.

İlk olarak dört türbinden oluşan bir sistem için tasarım yapılmıştır. Rüzgar türbinleri rüzgardaki enerjiyi elektrik enerjisine çevirirken rüzgarı yavaşlattığından dolayı türbin yerleşim planında türbinler arasında yeteri kadar mesafe bırakılmalıdır. Bu plana göre türbinler arasında hakim rüzgar yönünde kanat çapının 5 veya 9 katı kadar, düşey yönde ise 3 veya 5 katı kadar mesafe bırakılır. Tasarımda ise kanat çapı 50 m olan Nordex N50 rüzgar türbini baz alınarak aynı sıradaki türbinler arasında kanat çapının 4 katı (200 m) sıralar arasında ise rotor çapının 7 katı (350 m) mesafe bırakılmıştır.



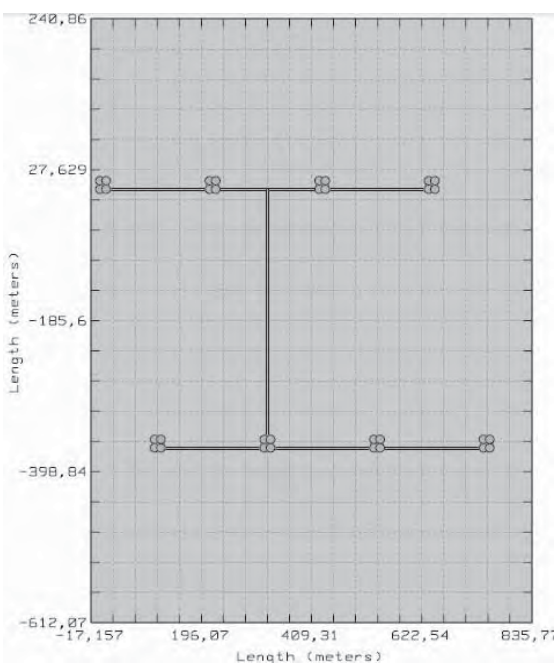
Şekil 6: Dört türbinden oluşan sistemin topraklaması.

Belirtilen açıklıklara sahip rüzgar çiftliği bölümü için tasarlanan topraklama sisteminin kuşbakışı görünüşü Şekil 6'da görülmektedir. her bir rüzgar türbini Şekil 4'deki topraklama tasarımına sadık kalınacak şekilde yapılmış ve birbirlerine bağlanmıştır. Bu şekilde yapılan sisteme ilişkin potansiyel dağılımı –tek bir türbin için- Şekil 7'de verilmiştir. Yeni rüzgar çiftliği için yazılım tarafından hesaplanan topraklama direnci 5,11017 Ω'dur. Rüzgar türbini sayısının artması topraklama direncinin değerini azaltmıştır. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise 26338,1 V'dur. Rüzgar türbini ve çevresinde adım ve dokunma gerilimi değerleri sırasıyla 3185,47 V ve 962,89 V hesaplanmıştır.



Şekil 7: Dört türbinden oluşan sistemde türbin çevresinde potansiyel dağılımı.

İncelenen son tasarımda rüzgar çiftliğindeki türbin sayısı iki katına çıkartılarak sekiz türbin için topraklama modeli tasarlanmıştır. Türbinler arası mesafeler önceki sistemle aynı alınmıştır.



Şekil 8: Sekiz türbinden oluşan sistemin topraklaması.

Tek türbin için kullanılacak topraklama modeli üzerinde değişiklik yapılmadan Şekil 8'de görülen sistem için topraklama sistemi tasarlanmıştır. Bu durumda elde edilen topraklama direnci 3,03138 Ω'dur. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise 15627,2 V'dur.

Tablo 4'de topraklama tasarımı yapılan dört farklı modelin sonuçları görülmektedir. Topraklama modellerinin sonuçlarının karşılaştırılması hesaplanan topraklama direnci ve toprak potansiyel yükselmelerine (GPR) göre yapılmıştır. Tablo 4'ten görüleceği gibi topraklama ağını oluşturan gözlerin alanı küçüldükçe daha fazla iletken kullanılmasından dolayı topraklama direnci ve buna bağlı olarak GPR değerleri azalmaktadır. Ayrıca topraklama sistemi genişletilip çok sayıda türbini içine alacak şekle getirildiğinde topraklama direncinde büyük ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Bu azalış topraklama sistemine dahil edilen türbin sayısı ile orantılı olacak şekilde azalmaktadır.

Tablo 4: Topraklama modellerinin karşılaştırılması

Topraklama modeli	Topraklama direnci (Ω)	Toprak Potansiyel Yüksekmesi (GPR) (V)
1	13,438	69202,8
2	8,1309	43788,6
3	5,11017	26338,1
4	3,03138	15627,2

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, dört farklı durum için rüzgar türbinleri topraklama tasarımı incelenmiştir. Türbin temel donatıları dikkate alınarak tasarlanan topraklama sisteminde toprak özdirenç değeri sabit tutulmuş ve iki toprak modeli kullanılmıştır. Her bir durumda kullanılan topraklama tasarımında elektrot boyları ve topraklama ağı boyutları değiştirilerek standartlara [4] uygun topraklamalar oluşturulmuştur. Oluşturulan farklı durumlar topraklama analizi için kullanılan CYMGRD programı ile topraklama direnci, toprak potansiyel yükselmesi (GPR), adım ve dokunma gerilimleri ve yüzey potansiyelleri bakımından karşılaştırılmıştır. Tasarımda güvenlik ölçütleri olarak IEEE 80-2000 standardı sınır değerleri alınmıştır.

Yapılan benzetimler sonucunda tek başlarına kullanılan rüzgar türbinlerinin topraklama tasarımından temel donatılarının yanında ek elektrot ve iletkenlerle topraklamayı iyileştirme gereği duyulmuştur. Ağ topraklama sisteminin göz büyüklükleri küçültülerek topraklama direnci ve GPR değeri azaltılmıştır. Topraklama direnci tek başına 10 Ω'dan yüksek olan rüzgar türbini uygun sayıda rüzgar türbini ile rüzgar çiftliği oluşturunca topraklama direnç değeri uygun güvenlik ölçütlerini sağlamıştır.

7. Kaynaklar

[1] Lorentzou, I. M., Hatziargyriou, N. D., Manos, G. A., and Sietis, T., "Integrated Grounding System of Wind-Farms for Lightning and Fault Protection" *Proceedings of the Mediterranean Power Conference (Med Power)* , Lemesos, Cyprus, 14-17 November 2004

[2] Esmaeilian, A., Akmal, S. A. A. and Naderi, S. M., "Wind Farm Grounding Systems Design Regarding the Maximum Permissible Touch & Step Voltage", *Environment and Electrical Engineering International Conference* (*EEEIC*), Tehran, Iran, 18-25 May 2012

[3] "Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği", *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,* Ankara, 2001.

[4] IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", *IEEE Standard Board,* New york, USA, 2000.

[5] Yıldırım, H., Kalenderli, Ö., Türkay, B., Çelikyay, M. "Topraklama ağlarının bilgisayar destekli analizi", Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Bursa, s. 130-133, 11-17 Eylül 1995.

[6] Kalenderli, Ö., Şentürk, E., Öztürk, O. I., "Bir Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının Sonlu Farklar Yöntemi ile Hesabı", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, İstanbul, s. 197-200, 18-21 Eylül 2003.

[7] Öztürk, O. I., Kalenderli, Ö., "Bir Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımına Toprak Özelliklerinin Etkisi", EVK 2005 Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, s. 223-227, 17-18 Mayıs 2005.

[8] Uzunlar, F. B., Kalenderli, Ö., "Topraklama Ağlarının Üç Boyutlu Tasarımı", EVK 2009 Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, s. 307-312, 21-22 Mayıs 2009.

[9] CYMGRD: Substation grounding grid design and analysis program, CYME International T&D Inc., Canada, http://www.cyme.com/software/cymgrd/

Bilecik İli Rüzgar Enerjisi Potansiyel Analizinde Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metotlarının Karşılaştırılması

Emrah DOKUR[1], Mehmet KURBAN[2], Salim CEYHAN[3],

[1,2] Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilecik
emrah.dokur@bilecik.edu.tr[1] ,*mehmet.kurban@bilecik.edu.tr*[2]
[3] Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilecik
salim.ceyhan@bilecik.edu.tr[3]

Özet

Dünyada ki enerji ihtiyacının giderek artması ve temiz enerji elde etme çabaları yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmaları gün geçtikçe arttırmaktadır. Rüzgar enerjisi de yenilenebilir enerji kaynakları arasında büyük öneme sahiptir. Rüzgar enerjisi santrali tesis edilmeden önce bölgenin rüzgar enerji potansiyeli analiz edilmelidir. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu da rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde en çok kullanılan istatistiksel dağılımlardan biridir. Bu çalışmada, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2013-2014 yılları arasında Bilecik meteoroloji istasyonunda 10 metre yükseklikte ölçülen saatlik ortalama rüzgar şiddeti verileri kullanılarak, Bilecik bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli iki parametreli Weibull dağılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda Weibull fonksiyonunda yer alan şekil parametresi k, ölçek parametresi c ve bunlara bağlı olarak ortalama hız, standart sapma ve güç yoğunluğu en yüksek olabilirlik yöntemi ve grafik metodu ile Matlab (Matrix Laboratory) yazılım ortamında hesaplanarak analiz edilmiştir. Aylık ve yıllık olarak rüzgar hızları Weibull dağılımına göre istatistiksel olarak modellenmiştir. Yine modelin doğruluğu Ortalama Hatanın Kareleri Toplamının Karekökü, RMSE (Root Mean Square Error) ile hesaplanarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Weibull dağılımı, Rüzgar enerjisi, En yüksek olabilirlik metodu, Grafik metodu, Enerji potansiyeli.

I. GİRİŞ

Enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan fosil yakıtların zararlı etkilerinden ötürü dünyada yeni enerji kaynakları arayışına gidilmiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi bu kapsamda hızla artmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi de gerek ülkemiz gerekse dünya da büyük öneme sahiptir. Rüzgar enerji santrallerinin kurulumu öncesi bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin iyi araştırılması gerekmektedir. Bir bölgenin rüzgar hızı potansiyeli belirlenerek, o bölge için en uygun rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi belirlenebilir. Rüzgar hızının frekans dağılımı Gama, log normal, Rayleigh ve Weibull gibi farklı dağılımlar kullanılarak gösterilebilmektedir. İki parametreli Weibull dağılımı son yıllarda dünyanın bir çok bölgesinin rüzgar dağılımını temsil etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin kullanılma nedeni, rüzgar dağılımına çok iyi uyması, dağılımın esnek bir yapıya sahip olması, parametrelerinin belirlenmesindeki kolaylık, parametre sayısının az olması, parametrelerin bir yükseklik için belirlenmesinin ardından farklı yükseklikler için tahmin edilebilmesi gibi faktörlerdir [1].

Literatür de yapılan çalışmalarda farklı bölgeler için rüzgar enerjisi potansiyeli iki parametreli Weibull dağılımı ile modellenmiştir [2-4]. Yine Weibull dağılımının model parametrelerinin farklı metotlarla belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalarda literatürde yer almaktadır [5, 6]

Bu çalışmada da Bilecik ili için 2013-2014 yıllarını içeren rüzgar hızı verilerini kullanılarak bölgenin rüzgar enerjisi profili iki parametreli Weibull dağılımı kullanılarak modellenmiştir. Modelin şekil ve ölçek parametreleri en yüksek olabilirlik yöntemi ve grafik metodu ile ayrı ayrı belirlenerek, tüm analizler Matlab (Matrix Laboratory) ortamında gerçeklenmiştir. İki farklı metot ile belirlenen ölçek ve şekil parametrelerinin doğruluğu model performans kriteri RMSE ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Bu kapsamda tüm analizler aylık ve yıllık olarak hesaplanmıştır.

II. WEİBULL DAĞILIMI

Rüzgar hızı frekans eğrisinin belirlenmesinde bir çok farklı yöntem bulunmaktadır. Literatür de enerjisi potansiyeli hesaplanmasında en yaygın kullanılan yaklaşım iki parametreli Weibull dağılımıdır. Weibull dağılımının genel formu Denklem 1 'de verilmiştir.

$$f(\mathrm{v}) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} \quad (1)$$

şeklindedir. Burada olasılık yoğunluk fonksiyonu olan f (v), rüzgar hızının (v) gözlemlenme olasılığını göstermektedir. k ve c ise sırasıyla iki parametreli Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametrelerini ifade eder. Literatür çalışmalarına bakıldığında, rüzgarın mevcut dağılımına göre k şekil parametresi 1.2 ile 2.75 aralığında değiştiği görülmektedir. Weibull dağılımının kümülatif olasılık fonksiyonu ise Denklem 2' de verilmiştir.

$$\mathrm{F(v)} = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} \quad (2)$$

şeklindedir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının, belli bir v değerinden küçük ya da eşit gerçekleşme olasılığını verir. Weibull dağılında en yüksek sıklığa sahip rüzgar hızı Denklem 3'e göre belirlenir.

$$v_{\mathrm{mod}} = c\left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k} \quad (3)$$

Maksimum rüzgar hızı ise Denklem 4'e göre hesaplanabilir [7].

$$v_{\mathrm{maks}} = c\left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k} \quad (4)$$

En yaygın kullanılan rüzgar gücü formülü ise Denklem 5'de verilmiştir.

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (5)$$

Burada (kg/m3) hava yoğunluğu olup, A (m2) ise rüzgar türbininin süpürme alanıdır. Weibull dağılımı için ortalama güç yoğunluğu Denklem 6 ile gösterilmiştir.

$$P_w = \frac{1}{2}\rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (6)$$

Burada Γ, gamma fonksiyonudur. Burada, 15.6 C° ve 1 atmosfer basınçta deniz seviyesindeki havanın yoğunluğu ρ0=1.225 kg/m3 değeri dikkate alınarak deniz seviyesinden yüksekliği (Hm) ve diğer konum bilgilerine göre düzeltilmiş hava yoğunluğu Denklem 7'ye göre bulunur [8]. Analizlerde Bilecik ili hava yoğunluğu Denklem 7'ye göre 1.1235 kg/m3 olarak bulunmuştur.Yine rüzgar hızının standart sapması , Denklem 8'e göre hesaplanmıştır.

$$\rho = \rho_0 - 1.194.10^{-4} H_m \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{c^2[\Gamma(1+\frac{2}{k}) - \Gamma^2(1+\frac{2}{k})]} \quad (8)$$

Görüldüğü gibi, güç potansiyelini belirlemek için en önemli girdi rüzgar hızıdır. Rüzgar yönü, potansiyel için etkili olmamakla birlikte rüzgar enerjisi çevrim sistemlerinin yerleştirilmesinde önemli bir rol oynar.

III. PARAMETRE TAHMİN METOTLARI

Weibull dağılımı parametre belirleme metotları arasında en yüksek olabilirlik, grafik ve moment metotları kullanılmaktadır. Çalışmamız kapsamında en yüksek olabilirlik ve grafik metotu analizler de kullanılacaktır. En yüksek olabilirlik yöntemi likelihood fonksiyonunun maksimizasyonu temeline dayanmaktadır. Fakat bu yöntemin en önemli zorluğu likelihood fonksiyonun çözümü ile ilişkili bazı problemlerdir. Bu durumda denklem şekline göre bazı iteratif teknikler çözüm için uygulanır. Grafik metodu ise geniş örnek sayısında iyi sonuçlar verirken dar ölçekli verilerde yetersiz kalabilmektedir.

A. Grafik Metotu

Weibull dağılımı şekil ve ölçek parametrelerinin belirleme yöntemlerinden biri olan grafik metotunda, Denklem 2'de ki kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonunun her iki tarafının iki defa doğal logaritmasının alınması ile Denklem 9 elde edilir.

$$ln\left[-ln\left[1 - F(v)\right]\right] = klnv - klnc \quad (9)$$

$ln\left[-ln\left[1 - F(v)\right]\right]$ nin lnv'ye göre grafiği uzayda doğruyu gösterir ve k parametresi bu doğrunun eğimidir. Doğrunun ordinat değerlerinin hesaplanması için ilk olarak frekans dağılımının ve birikimli frekans dağılımının hesaplanması gerekmektedir. En küçük kareler problemi hesaplanan bu değerler ile çözülerek k ve c parametreleri bulunur [6] .

B. En Yüksek Olabilirlik Metodu

Weibull parametrelerinin belirleme yöntemlerinden biri olan en yüksek olabilirlik metodu Steven ve Smulders tarafından önerilmiştir [9]. En yüksek olabilirlik yöntemi geniş iterasyon adımları içermektedir. Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametreleri Denklem 10 ve Denklem 11'e göre hesaplanmaktadır.

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^k \ln(\mathrm{v}_i)}{\sum_{i=1}^{n} v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^{n} \ln(\mathrm{v}_i)}{n}\right)^{-1} \quad (10)$$

$$c = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (v_i)^k}{\sum_{i=1}^{n} v_i^k} \right)^{\frac{1}{k}} \qquad (11)$$

v_i rüzgar hızını belirtirken, n ise rüzgar hızı sayısıdır.

IV. KARŞILAŞTIRMALI RÜZGAR ENERJİ POTANSİYELİ ANALİZİ

Bir bölgeye rüzgar enerjisi dönüştürme sisteminin kurulumunda mevcut ve gelecekteki rüzgar potansiyeli oldukça önemlidir. Bu sebepten dağılımın parametre tahmin değerlerinin aylık dönemi çalışılmalı ve model performans kriterlerine göre en uygun model seçimi yapılmalıdır. Bu çalışmada da Bilecik ili 2013-2014 rüzgar hızı verileri kullanılarak bölgenin aylık ve yıllık parametre kestirimi grafik (GM) ve en yüksek olabilirlik metotları (EYO) ile ayrı ayrı belirlenmiştir. 2013-2014 yılları Weibull dağılımı parametreleri olan şekil ve ölçek parametrelerinin aylara göre ve yıllık değişimi her iki yöntem için Tablo 1'de gösterilmiştir.

Analizlerin hata performans kriteri Denklem 12'de gösterilen ortalama hata kareleri toplamının karekökü olan RMSE ile gösterilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - x_i)^2} \qquad (12)$$

Burada n, gözlem sayısı y, gerçek değerler olmak üzere, x ise Weibull dağılımı ile hesaplanan değerleri göstermektedir.

Tablo1'de grafik (GM) ve en yüksek olabilirlik metodu (EYO) için Weibull dağılım parametreleri hesaplanmış ve Denklem 12 de gösterilen hata performans kriteri ile iki yöntem karşılaştırılmıştır. 10 m yükseklikte ölçülen Bilecik ili rüzgar hızı verileri için en yüksek olabilirlik yöntemi ile hesaplan parametrelerin hata performansı yönünden daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Rüzgar hızı profili Weibull dağılımına uyan bölgenin rüzgar hızı değişimleri ve ikinci bölümde ele alınan değişkenlerin bölge için değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

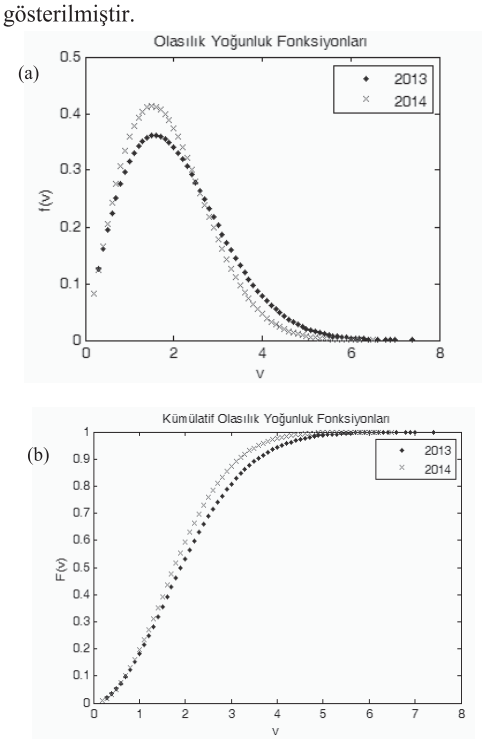
Tablo1 : Karşılaştırmalı Weibull Dağılımı Parametreleri

Aylar	Metot	2013			2014		
		k	c	RMSE	k	c	RMSE
Ocak	EYO	2.2400	2.4860	0.0284	2.1885	2.0545	0.0328
	GM	2.5054	2.4956	0.0413	2.6455	2.1682	0.0685
Şubat	EYO	2.1236	2.2914	0.0387	1.9435	1.8455	0.0406
	GM	2.5603	2.3799	0.0689	2.2698	1.9850	0.0754
Mart	EYO	2.0730	1.2524	0.0364	2.2748	2.1660	0.0261
	GM	2.1849	1.2465	0.0385	2.4473	2.1824	0.0348
Nisan	EYO	2.3111	2.3331	0.0267	2.0241	2.0614	0.0320
	GM	2.6233	2.3432	0.0403	2.4410	2.1843	0.0679
Mayıs	EYO	1.9387	2.3502	0.0322	2.0202	2.0965	0.0258
	GM	2.1924	2.3857	0.0491	2.1813	2.3252	0.0296
Haziran	EYO	1.9435	2.6441	0.0322	2.1401	2.3132	0.0294
	GM	2.2101	2.6745	0.0482	2.5904	2.4307	0.0640
Temmuz	EYO	2.3567	3.1580	0.0247	2.2348	2.5420	0.0301
	GM	2.6460	3.0771	0.0387	2.5028	2.5295	0.0416
Ağustos	EYO	2.1287	2.8553	0.0362	2.0093	2.5030	0.0324
	GM	2.5243	2.8809	0.0564	2.1933	2.4921	0.0403
Eylül	EYO	2.0093	2.3163	0.0291	2.1629	2.1439	0.0353
	GM	2.1600	2.2962	0.0351	2.4546	2.1897	0.0534
Ekim	EYO	1.8692	2.0347	0.0367	2.2758	1.8371	0.0390
	GM	2.1222	2.1434	0.0620	2.5608	1.8384	0.0508
Kasım	EYO	2.2285	1.7290	0.0391	2.1381	1.8864	0.0371
	GM	2.7083	1.8124	0.0720	2.5457	1.8916	0.0583
Aralık	EYO	2.1275	2.2904	0.0321	1.9591	1.7732	0.0347
	GM	2.5455	2.2748	0.0551	2.2776	1.8744	0.0638
Yıllık	EYO	1.9156	2.3089	0.0268	2.0466	2.1061	0.0284
	GM	2.2063	2.4226	0.0526	2.6196	2.3537	0.0856

*Tablo 2:*Güç yoğunlukları ve hız değerleri

Aylar	2013					2014				
	v_m	σ	v_{mod}	v_{maks}	P_w	v_m	σ	v_{mod}	v_{maks}	P_w
Ocak	2.2018	1.0396	1.9091	3.3053	10.31	1.8195	0.8772	1.5544	2.7639	5.93
Şubat	2.0294	1.0051	1.6980	3.1320	8.46	1.6365	0.8778	1.2724	2.6559	4.84
Mart	1.1094	0.5615	0.9115	1.7348	10.41	1.9186	0.8934	1.6791	2.8582	6.73
Nisan	2.0671	0.9490	1.8256	3.0557	8.31	1.8265	0.9445	1.4723	2.8948	6.46
Mayıs	2.0842	1.1225	1.6167	3.3876	10.02	1.9368	1.0050	1.8425	3.1246	8.50
Haziran	2.3448	1.2577	1.8230	3.8054	14.24	2.0486	1.0076	1.7236	3.1487	8.64
Temmuz	2.7986	1.2625	2.4983	4.0986	20.31	2.2514	1.0652	1.9494	3.3837	11.04
Ağustos	2.5287	1.2497	2.1194	3.8976	16.34	2.2180	1.1546	1.7768	3.5300	11.65
Eylül	2.0526	1.0685	1.6443	3.2668	9.23	1.8987	0.9250	1.6092	2.9019	6.81
Ekim	1.8065	1.0037	1.3508	3.0029	6.79	1.6273	0.7575	1.4246	2.4237	4.10
Kasım	1.5313	0.7263	1.3235	2.3047	3.48	1.6706	0.8224	1.4046	2.5690	4.69
Aralık	2.0285	1.0030	1.6994	3.1275	8.43	1.5722	0.8373	1.2315	2.5394	4.25
Yıllık	2.0483	1.1131	1.5705	3.3535	9.63	1.8658	0.9553	1.5177	2.9396	6.81

2013-2014 yılları rüzgar hızlarının Weibull dağılımlarının olasılık yoğunluk ve kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonları sırasıyla, Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Yıllara göre olasılık yoğunluk (a)ve Kümülatif Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları (b)

Bilecik bölgesi için 2013-2014 yılları için en düşük güç yoğunluğu kış ve sonbahar aylarında gözlenmektedir. Genel olarak 2013-2014 yılları arası ortalama hız ve güç yoğunluğu değerleri yaz aylarında yüksek görülmüştür. Fakat enerji üretimine geçilecek olursa sadece ortalama hız ve enerji yoğunluğu değil bunun yanında verilerin nasıl dağıldığı da önem taşımaktadır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu f (V) , herhangi bir anda v hızının gözlenme olasılığını, kümülatif dağılım fonksiyonu F(V) ise herhangi bir anda gözlenen hızın v hızına eşit veya daha küçük olma olasılığını belirtmektedir. Bu dağılım fonksiyonlarının yıllara göre değişimi de çalışmamızda ele alınmıştır.

IV. SONUÇLAR

2013-2014 yıllarına ait 10 m yükseklikte saatlik olarak ölçülen rüzgar hızı verileri Devlet Meteoroloji İşleri Müdürlüğünün Bilecik Meteoroloji istasyonundan sağlanarak bölgenin rüzgar hızlarının esme saatlerinin Weibull fonksiyonuna uyumu araştırılmıştır. Bu uyum araştırılırken Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametreleri grafik ve en yüksek olabilirlik yöntemleri ile iki farklı metotta Matlab yazılım ortamında hesaplanmıştır.

Grafik ve en yüksek olabilirlik metotları doğruluk performans kriterleri ile karşılaştırıldığında, en yüksek olabilirlik metodu ile hesaplanan şekil ve

ölçek parametreleri ile daha iyi doğrulukta rüzgar hızını modellendiği görülmüştür.

Yapılan çalışmaların sürdürülerek ölçümlerin farklı bölgelerde ve yüksekliklerde uzun dönemli alınarak tüm bölgenin detaylı araştırılması, bölge özelliklerinin çıkarılması ve maliyet analizi yapılması sonucunda daha doğru ve kesin değerlendirmeler yapılabileceği açıktır. Bölgemizin yenilenebilir enerji potansiyelinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi konusunda tarafımızca yapılan çalışmalar devam edecektir. Ülkemizde bu tür enerji kaynaklarına yönelimi hızlandıracak benzer çalışmaların yapılması ve üretime katılması geleceğimiz için büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Akdağ, S. A., & Güler, Ö. (2008) Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metodlarının Karşılaştırılması. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008 17-19 Aralık 2008, İstanbul,707-714.

[2] Mert, İ., Karakuş, C., & Peker, F. (2014). Antakya bölgesi rüzgar karakteristiğinin incelenmesi. DÜ Mühendislik Dergisi, 5(1), 13-22.

[3] Gülersoy, T., & Çetin, N. S. (2010). Menemen bölgesinde rüzgar türbinleri için Rayleigh ve Weibull dağılımlarının kullanılması. Politeknik Dergisi, 13(3).

[4] Kurban, M., Kantar, Y. M., & Hocaoğlu, F. O. (2006). Rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılmasında Weibull ve rayleıgh dağılımının kullanılması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(1), 14-21.

[5] Genc, A., Erisoglu, M., Pekgor, A., Oturanc, G., Hepbasli, A., & Ulgen, K. (2005). Estimation of wind power potential using Weibull distribution. Energy Sources, 27(9), 809-822.

[6] Akdağ, S. A., & Güler, Ö. (2008) Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metodlarının Karşılaştırılması. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008 17-19 Aralık 2008, İstanbul,707-714

[7] Cheng, R. C. H., & Amin, N. A. K. (1983). Estimating parameters in continuous univariate distributions with a shifted origin. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 394-403.

[8] Patel, M. R. (2005). Wind and solar power systems: design, analysis, and operation. CRC press

[9] Stevens, M. J. M., & Smulders, P. T. (1979). The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes. Wind engineering, 3, 132-145.

Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbini Sistemlerinin Çıkış Gücü Hesabı için Geliştirilen Matematiksel Modellerin Geçerliliklerinin Analiz Edilmesi

Ömer TÜRKSOY
İskenderun Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü
oturksoy@mku.edu.tr

Ulaş EMİNOĞLU
Niğde Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü
ueminoglu@nigde.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda rüzgâr enerjisi sistemlerindeki teknolojik gelişmeler, Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbini Sistemlerinin (RTS'lerin) kullanımını ve dolayısıyla da rüzgâr enerjisinin Elektrik üretim profilindeki payını artırmaktadır. Değişken-Hızlı RTS'ler üretilen elektrik enerjisi miktarı açısından sabit hızlı RTS'lere nazaran daha avantajlı olup bu tip RTS'lerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu tip RTS'lerin rüzgâr hızına bağlı olarak çıkış gücü hesabı (güç eğrisi); tasarım, maliyet ve üretilen yıllık enerji miktarı hesabı açısından büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada Değişken-Hızlı RTS'lerin çıkış gücü hesabı ve çıkış (güç) karakteristiğini oluşturmak için geliştirilen matematiksel modellerin geçerlilikleri RTS'lerin gerçek verileri kullanılarak test edilmektedir. Modellerin performansları; türbin sistemlerinin gerçek çıkış gücü kullanılarak Karekök Ortalama Hata (Root Mean Square Error) değerleri, Belirli bölgelerde çalışma durumunda Kapasite Faktörü için Bağıl Hata değerleri (Relative Error) hesaplanarak değerlendirilmektedir. Belirtilen performans indisleri ile matematiksel modeller farklı tipte ve büyüklükte RTS'ler için uygulanarak indis değerlerine göre en iyi performansa sahip modeller belirlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbini Sistemleri, Enerji üretimi ve maliyet, Güç Karakteristiği, Matematiksel Model

1. GİRİŞ

Rüzgâr Türbini Sistemleri (RTS'ler), rüzgârdaki hareket enerjisini önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Türbinlerin ürettikleri enerjinin beraberinde, genelde tüketiciye yakın yerde kurulu olmaları taşımadan kaynaklanan giderleri de önlemektedir [1]. Rüzgâr hızının değişken olmasından dolayı hemen hemen tüm RTS'ler güç kontrolü içerirler. Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinleri kanat açısı kontrolü (pitch kontrol) veya güç elektroniği sistemlerini kullanarak değişken hızda çalışabilecek şekilde tasarlanırlar. Dolayısıyla RTS'ler hızlarına göre;

- Sabit-Hızlı RTS'ler
- Değişken-Hızlı RTS'ler

olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. Sabit-Hızlı RTS'lerde rotor hızı sabit değerde tutulmakta veya çok küçük değişimlere müsaade edilmektedir. Değişken hızlı RTS'lerde ise rotor hızı kontrol edilerek kanat uç hızı oranı en uygun değerde tutulmaktadır. Dolayısıyla bu tip sistemde rüzgâr enerjisinden olası en yüksek oranda faydalanılmakta ve türbin çıkış gücü artmaktadır [2].

Coğrafik özellikler ve rüzgâr hızı göz önünde bulundurularak yıl boyunca maksimum enerji üretimi için RTS tasarım optimizasyonu çalışmaları son zamanlarda artmaktadır [3-8]. Yapılan bu çalışmalarda enerji üretimini maksimum değerde tutmak ve/veya maliyeti minimum değerde tutmak için bölgesel rüzgâr potansiyeli göz önünde bulundurularak RTS elemanlarının büyüklükleri belirlenmektedir. Bu büyüklükler belirlenirken toplam maliyet, birim enerji maliyeti ve Yıllık Enerji Üretim miktarı hesabı için RTS'nin çıkış (güç) eğrisi kullanılmakta ve bunun içinde gerçek veriler veya gerçekçi bir matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır [4,7-14].

Değişik rüzgâr hızı durumlarında olası en büyük gücü üretebilme kapasitesi nedeniyle Değişken-Hızlı RTS'lerin kullanımı son yıllarda önemli oranda artmış ve her geçen yıl daha da artmaktadır. Bu çalışmada bu tip RTS'lerin maliyet, güç ve enerji üretimi analizleri ve aynı zamanda kurulacak bölgeye en uygun büyüklükte tasarımı çalışmalarında kullanılan çıkış karakteristiği (güç eğrisi) için geliştirilmiş matematiksel modeller incelenmektir. İlk olarak modellere ilişkin matematiksel formüller verilmekte ve daha sonra bu modellerin çok sayıda RTS çıkış karakteristiği verileri kullanılarak performansları analiz edilmektedir. Performans analizleri için RTS'lerin gerçek çıkış gücü verileri kullanılarak Karekök Ortalama Hata değerleri, güç büyüklüğüne göre iki farklı bölgede çalışma durumuna göre belirlenen Kapasite Faktörü için Bağıl Hata değerleri kullanılmaktadır. Elde edilen hata değerlerine göre matematiksel modellerin geçerlilikleri değerlendirilerek analiz ve tasarım optimizasyonu çalışmaları için hangilerinin kullanımının daha elverişli olacağı verilmektedir.

2. RÜZGÂR TÜRBİNİ SİSTEMLERİ

RTS'ler, rüzgârda mevcut olan kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye sonrada bu enerjiyi jeneratör vasıtası ile elektrik enerjisine dönüştüren elektromekanik sistemlerdir [1]. Rotor miline aktarılan mekanik güç:

$$P_m(u) \quad \frac{1}{2}\rho A u^3 \; C_p(\quad ,v) \tag{1}$$

şeklinde ifade edilir [1]. Burada, A rotor süpürme alanı, ρ havanın yoğunluğu, λ kanat uç hızı oranı ve u ise rüzgâr hızını göstermektedir. $C_p(\lambda,v)$ güç katsayısı (rotor verimliliği), kanat uç hızı oranı ve kanat açısına (θ) bağlı olarak;

$$C_p(\quad ,v) \quad c_1(c_2 \frac{1}{} \quad c_3 \quad c_4 \; {}^{x} \quad c_5)e^{(\frac{c_6}{})} \tag{2-a}$$

$$\frac{1}{\Lambda} \quad \frac{1}{\lambda \quad 0.08\theta} \quad \frac{0.035}{1 \quad \theta^3} \tag{2-b}$$

şeklinde ifade edilmektedir [1]. Burada c_1-c_6 türbin tasarım sabitleridir. RTS'ler, değişken rüzgar hızlarında maksimum güç üretimi için Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) veya Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (SMSG) kullanılarak değişken hızda çalıştırılmaktadır [2]. Bu tip RTS'ler Değişken-Hızlı RTS'ler olarak adlandırılmakta olup [2], değişen rüzgâr hızına göre kanat açısı kontrol edilerek türbin hızının değiştirilmesi ile rotor kanat uç hızı oranı en uygun değerde veya buna yakın değerde tutulmakta ve maksimum değerde güç üretimine olanak sağlanmaktadır. Denklem (2)'den görüleceği üzere rotor verimliliği türbin tasarım sabitleri, kanat açısı ve kanat uç hızı oranına göre değişmektedir. Tasarım sabitleri türbinden türbine göre değişken olup üretici firma bilgileri veya sahada türbin test edilerek belirlenebilir. Ayrıca tüm rüzgâr hızı değerleri için kanat açısının ve kanat uç hızı oranının değerlerinin bilinmesini gerektirmektedir. Bu nedenle çıkış gücü kontrol edilen değişken hızlı RTS'lerin güç eğrisinin oluşturulması için birçok matematiksel model geliştirilerek çalışmalarda kullanılmaktadır. Bunlar;

- Temel denklem (Rüzgâr gücü) temelli modeller
- Güç eğrisi temelli modeller

olmak üzere iki gurupta incelenir.

2.1 Temel Denklem Temelli Modeller

Bu modeller rotor verimliliği dikkate alınarak geliştirilmiş modeller olup Denklem (1)'de verilen rotor verimliliği için $C_{p,eq}$ (Sabit eşdeğer güç katsayısı) [9], $C_{p\text{-}max}$ (Sabit maksimum rotor verimliliği) [9] ve C_pEff_{ad} (Eff_{ad} genelde %95) [10] gibi katsayılar kullanılmaktadır.

2.2 Güç Eğrisi Temelli Modeller

Temel Denklem temelli modellerde rüzgâr hızı ile değişen rotor verimliliği için yaklaşık sabit değerlerin kullanılması nedeniyle RTS'lerin rüzgar hızına göre çıkış gücü eğrisi yaklaşık olarak elde edilmekte ve hata bazı RTS'ler için yüksek değerli olabilmektedir. Bu nedenle bu tip RTS'lerin çıkış gücü eğrisi dikkate alınarak eğri uydurma prensibine dayalı birçok matematiksel model geliştirilmiştir [4, 10-11]. Bu modellerin önemli bir kısmı RTS'nin başlangıç rüzgar hızı (u_{ci}) ve nominal rüzgar hızı (u_n) değişkenlerine bağlı 1., 2. ve 3. dereceden denklemler olup çıkış gücü eğrisinde bu rüzgar hızı aralığı için ($u_{ci} \leq u \leq u_n$) kullanılmaktadır [10-11, 14]. Bu modellere ilişkin denklemler;

$$M_{1,2,3} \quad P_n \frac{u \quad u_{ci}}{u_n \quad u_{ci}}^{1,2,3} \tag{3-a}$$

$$M_4 \quad P_n \frac{u^2 \quad u_{ci}^2}{u_n^2 \quad u_{ci}^2} \tag{3-b}$$

$$M_5 \quad P_n \frac{u^3 \quad u_{ci}^3}{u_n^3 \quad u_{ci}^3} \tag{3-c}$$

şeklindedir. Burada P_n, kW cinsinden RTS'nin nominal (rated) gücünü göstermektedir. Enerji ve maliyet hesabı analizlerinde kullanılmak üzere bir diğer polinom modeli Weibull parametreleri kullanılarak geliştirilmiş olup $u_{ci} \leq u \leq u_n$ rüzgâr hızı aralığı için çıkış gücü [10];

$$M_6 \quad a \quad bu^k \tag{4-a}$$

$$a \quad P_n u_{ci}^k / u_{ci}^k \quad u_n^k \tag{4-b}$$

$$b \quad P_n / u_n^k \quad u_{ci}^k \tag{4-c}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada k, Weibull şekil parametresi olup bölgesiz analizler (yalnızca çıkış gücü hesabı) için $k=2$ alınmaktadır. Çalışmalarda geniş olarak kullanılan bir diğer model polinom modelidir [9]. Modele ilişkin matematiksel denklem;

$$M_7 \quad P_n(c_1 \quad c_2 \quad c_3) \tag{5-a}$$

$$c_1 \quad \frac{1}{u_{ci} \quad u_n^2} u_{ci}(u_{ci} \quad u_n) \quad \frac{1}{u_{ci} \quad u_n^2} 4u_{ci}u_n(\frac{u_{ci} \quad u_n}{2u_n})^3 \tag{5-b}$$

$$c_2 \quad \frac{1}{u_{ci} \quad u_n^2} 4(u_{ci} \quad u_n)(\frac{u_{ci} \quad u_n}{2u_n})^3 \quad \frac{1}{u_{ci} \quad u_n^2}(3u_{ci} - u_n) \tag{5-c}$$

$$c_3 \quad \frac{1}{u_{ci} \quad u_n^2} \; 2 - 4(\frac{u_{ci} \quad u_n}{2u_n})^3 \tag{5-d}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Benzer şekilde 2. dereceden polinom modeli referans [12]'de verilmektedir. Model ile çıkış gücü;

$$M_8 \quad P_n(a \quad bu \quad cu^2) \tag{6-a}$$

$$a \quad u_{ci} \; u_a \quad 2u_n \; u_a / u_n \;^{3} \; \frac{0.5}{u_n \quad u^{2}} \tag{6-b}$$

$$b \quad u_n \quad 3u_a \quad 4u_a \; u_a / u_n \;^{3} \; \frac{0.5}{u_n \quad u_a^{2}} \tag{6-c}$$

$$c \quad 1 \quad 2 \; u_a / u_n \;^{3} \; \frac{0.5}{u_n \quad u^{2}} \tag{6-d}$$

$$u_a \quad \frac{1}{2} \; u_{ci} \quad u_n \tag{6-e}$$

denklemi ile hesaplanmaktadır. Denklem (3)-(6)'da verilen modeller (M_1-M_8) başlangıç rüzgar hızı ve nominal rüzgar hızı aralığı değerleri için RTS'çıkış karakteristiğinin (güç eğrisinin) modellenmesinde kullanılmakta, eğrinin nominal rüzgar hızı değerinden sonraki kısmı için geçersiz kalmaktadırlar. Bu nedenle referans [4]'de güç eğrisini tüm çalışma rüzgâr hızı değerleri için hesaplamak amacıyla yeni bir model geliştirilmiştir. Model popülasyonların çoğalma eğrisinden faydalanılarak geliştirilmiş olup, çıkış gücü;

$$M_9 \quad \frac{P_n}{1 \quad e^{(bu \quad 7.5)}} \tag{7-a}$$

$$b \quad 5.822e^{0.3398u_n} \quad 1.79e^{0.0548u_n} \tag{7-b}$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır [4]. Benzer bir model kapasitör şarj denklemi kullanılarak referans [13]'de geliştirilmiştir. Modele ilişkin rüzgâr hızına bağlı olarak çıkış gücü denklemi;

$$M_{10} \quad P_n(1 \quad e^{\frac{u}{a}^{b}}) \tag{8-a}$$

$$a \quad 0.7033598667 \, x \, u_n \quad 0.0004999591 \tag{8-b}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Verilen son iki model ile RTS'nin nominal rüzgar hızı kullanılarak çıkış gücü tüm çalışma rüzgar hızı değerleri için hesaplanabilmekte ve çıkış karakteristiği oluşturulabilmektedir. Verilen tüm modellerin (M_1-M_{10}) yanı sıra RTS çıkış gücünü matematiksel olarak modellemek için RTS'nin gerçek çıkış gücü değerlerini (gerçek güç eğrisini) gerektiren modellerde literatürde mevcuttur. Bunlardan biri "Üssel Güç Eğrisi" modeli olup ifadesi;

$$M_{11} \quad \frac{1}{2} \; AK_p \; u \quad u_{ci} \tag{9}$$

şeklindedir. Burada K_p ve β sabitleri RTS'nin güç eğrisi kullanılarak belirlenmektedir. Bir diğer eğri uydurma gerektiren model ise referans [14]'de tanımlanmıştır. Model ile çıkış gücü;

$$M_{12} \quad P_n \; 1 \quad \frac{1 \quad u}{1 \quad u_{ci}}^{(1 \quad u_{ci})} \quad e^{(u \quad u_{ci})} \tag{10}$$

denklemi ile hesaplanmaktadır. Burada β sabiti RTS güç eğrisi kullanılarak belirlenmekte olup bazı RTS'ler için bu değer [14]'de verilmiştir.

3. MODELLERİN TEST EDİLMESİ

RTS'lerin çıkış gücü eğrisi Yıllık Enerji Üretim (YEÜ) miktarı, Toplam Maliyet ve Birim Enerji Maliyeti hesabında kullanılmaktadır. Dolayısıyla gerçekçi analiz ve tasarım çalışmaları için çıkış gücü modelleri önem teşkil etmektedir. Bu bölümde 2. Bölümde denklemleri verilen ve bu tür çalışmalarda geniş olarak kullanılan matematiksel modellerin (M_1-M_{10}) geçerlilikleri literatürden elde edilen 52 adet değişken hızlı RTS'nin çıkış karakteristiği kullanılarak test edilmektedir. Geçerlilik testi ilk olarak RTS'lerin 1'e normalize edilmiş (P/P_n) gerçek güç eğrisi ile modeller kullanılarak elde edilen güç eğrisi değerleri arasındaki Karekök Ortalama Hata (RMSE) değerleri belirlenerek gerçekleştirilmiştir. RMSE değerleri;

$$RMSE \quad \frac{1}{N} \quad {}_{i \; 1}^{N} (y_{i,m} \quad x_{i,m})^2 \;^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

ifadesi ile hesaplanmıştır. Burada $y_{i,m}$ RTS'nin gerçek çıkış gücü verileri, $x_{i,m}$ modeller kullanılarak elde edilen çıkış gücü değeri ve N ise eğride başlangıç rüzgar hızı ile nominal rüzgar hızı arasındaki alınan nokta sayısını göstermektedir. Analizlerde nokta sayısını (N'yi) arttırmak için RTS'lerin gerçek güç eğrisine Matlab Curve Fitting Toolbax [15] en uygun denklemler uydurulmuş ve bu denklemler ile elde edilen değerler gerçek değerler olarak kullanılmıştır. Kullanılan RTS'ler için her bir model ile elde edilen RMSE değerleri Şekil 1'de ve bu hata değerlerinin büyüklüğüne göre modellerin sıralanması Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 1 ve Tablo 1'den görüleceği üzere 52 Adet RTS için Ortalama Karekök Hata değerinin en küçük ilk üç sıralamasında Kapasitör Şarz Modeli (M_{10}) [13], Weibull Model (M_6) [10] ve daha sonra Lineer Model (M_1) gelmektedir. Dolayısıyla bu tip RTS'lerin çıkış gücü eğrisinin modellenmesinde bu modellerin çalışmalarda kullanılması gerçekçi veya gerçeğe yakın analizlerin yapılmasına olanak sağlayacağını söylemek mümkündür. Diğer taraftan 2. Dereceden Üssel Model (M_2), 3. Dereceden Modeller (M_3, M_5) diğerlerine nazaran yüksek değerli hataya sahip olup değişken hızlı RTS'lerin çıkış gücü hesabı için elverişli olmadığını söylemek mümkündür. Bunların yanı sıra Denklem (3-b) ile verilen Model (M_4), $k=2$ değeri için Weibull Model ile ve M_7 ile M_8 polinom modelleri bu analizde aynı hata değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Denklem (9) ve (10) da verilen modeller (M_{11} ve M_{12}) uygulanacak RTS'nin güç eğrisini gerektirdiği için analizlerde dikkate alınmamıştır.

Çalışmada ikinci olarak Modeller, YEÜ miktarı ve birim enerji maliyetinin hesabı için gerekli olan [3] RTS'lerin Ortalama Güç Hesabında çıkış gücü $P_m(u)$

için kullanılarak performansları test edilmiştir. Bu analiz için RTS'lerin 1500 kW ve daha büyük güce sahip olanlarının Güney Avrupa bölgelerinde (*k=1.2*, *c=8 m/sn*) [4] ve 1500 kW'tan küçük RTS'lerin ise Kuzey Avrupa bölgesine (*k=2*, *c=6 m/sn*) [4] kurulduğu varsayımı yapılmıştır. Bu bölgeler için RTS'lerin hem gerçek çıkış gücü ile hem de Modeller ile ortalama gücü ve Kapasite Faktörü (KF);

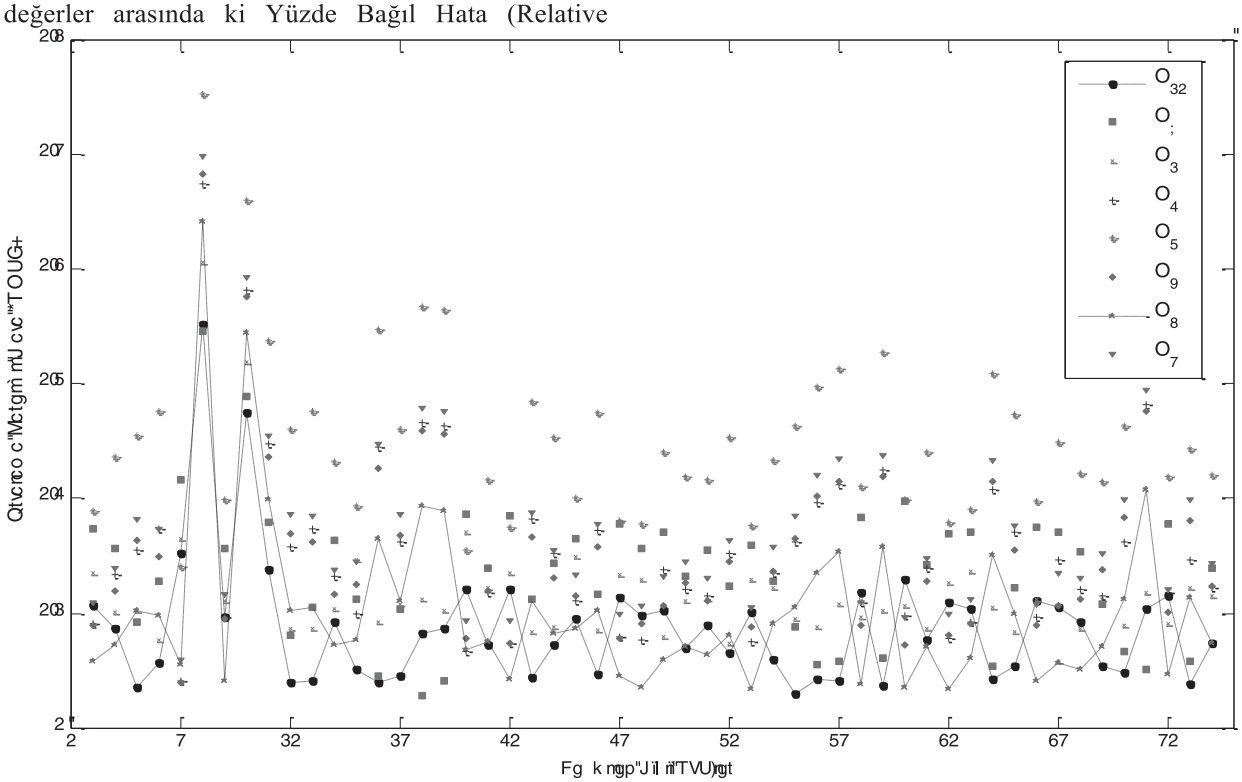
$$P_{ort} \quad P_m(u)W(u)du \qquad (12\text{-a})$$

$$KF \quad \frac{Ortalama\ güç}{Nominal\ güç} \quad \frac{P_{ort}}{P_n} \qquad (12\text{-b})$$

ifadeleri ile belirlenmiştir. Burada *W(u)*, Rüzgâr hızı için Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonudur. Gerçek güç eğrileri ve modeller kullanılarak elde edilen değerler arasında ki Yüzde Bağıl Hata (Relative Persentage Error);

$$\%RPE \quad \left| \frac{KF_g \quad KF_m}{KF_g} \right| \quad 100 \qquad (13)$$

ifadesi ile belirlenerek her bir Model için hata değerleri Şekil 2'de ve her bir modele ilişkin 52 RTS için ortalama bağıl hata değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere Lineer Model (M_1), 2. Dereceden Üssel Model (M_4), Weibull Model (M_6) ve Kapasitör Şarz Modeli (M_{10}) sırasıyla en küçük ortalama hata değerlerine sahip olup hata değerleri %10'un altındadır. Dolayısıyla enerji üretimi ve maliyet analizlerinde bu modellerin kullanımının diğer modellere nazaran daha avantajlı olacağını ve düşük hata değerli sonuçlar elde edilebileceğini söylemek mümkündür.



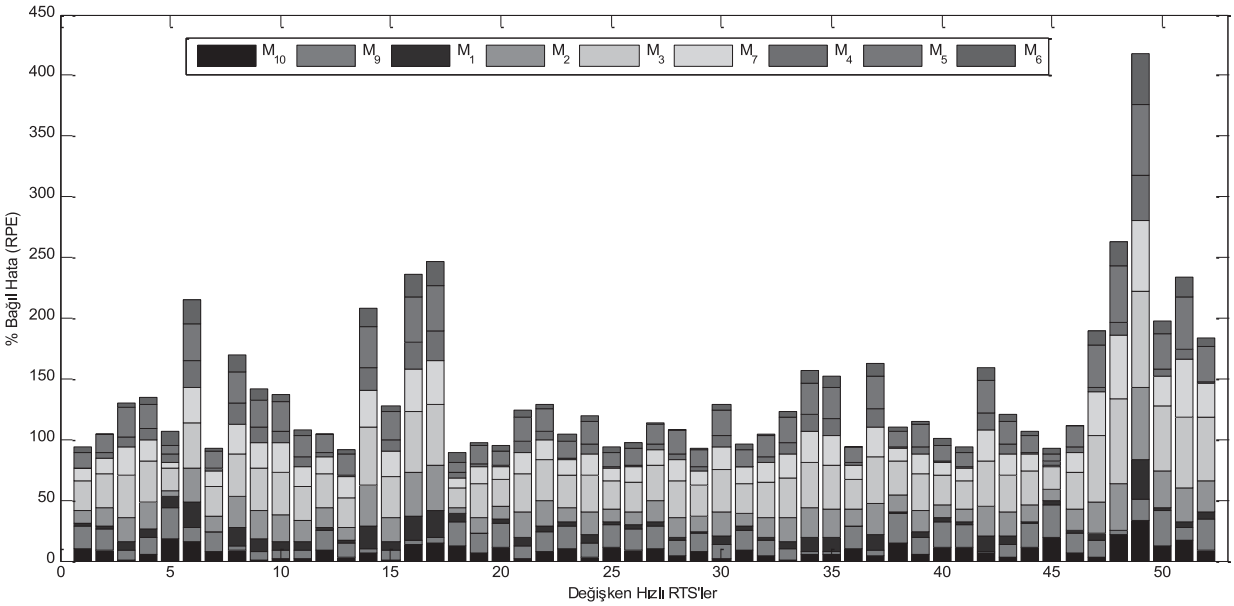
Şekil 1. Her bir RTS'nin güç eğrisi için Modeller kullanılarak elde edilen RMSE değerleri

Tablo 1. RTS'ler için en küçük RMSE değerine göre modellerin sıralanması

Güç Eğrisi Modeli	1. S	2. S	3. S	4. S	5. S	6. S	7. S	8. S
M_{10}	26	10	3	5	5	3	-	-
M_9	4	13	1	8	1	4	18	3
M_1	-	10	24	3	2	9	4	-
M_2	1	4	8	5	18	15	1	-
M_3	-	-	-	-	1	1	1	49
M_7	1	8	6	9	16	12	-	-
M_6	20	8	8	16	-	-	-	-
M_5	-	-	2	6	9	8	28	-

Tablo 2. Modeller için RTS'lerin Kapasite Faktörü değerlerine ilişkin ortalama bağıl hata

Model	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
Ortalama %RPE	7.11	19.36	33.97	7.98	20.88	7.62	19.71	19.78	9.32	14.72



Şekil 2. RTS'lerin Kapasite faktörü için Modeller kullanılarak elde edilen %RPE değerleri

3. SONUÇ

Bu çalışmada kullanımı her geçen gün artan Değişken-Hızlı RTS'lerin çıkış gücü hesabı (güç eğrisi) için geliştirilen matematiksel modeller verilerek modellerin geçerlilikleri 52 adet farklı tipte RTS için analiz edilmiştir. Analizler; güç eğrisi için ortalama karekök hata ve eğrinin kullanılarak elde edilen kapasite faktörü için bağıl hata değerlerine göre yapılmış olup, analizler sonucunda;

- Lineer Model (M_1)
- 2. Dereceden Üssel Model (M_4)
- Weibull Model (M_6)
- Kapasitör Şarz Modeli (M_{10})

güç eğrisi modellerinin diğer modellere nazaran daha düşük hata değerlerine sahip olduğu ve değişken hızlı rüzgar türbinlerinin güç, enerji ve maliyet analizlerinde gerekli olan çıkış gücü hesabında kullanımına daha elverişli oldukları görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 114E961 Nolu proje kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Heier, S., Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. Wiley: Newyork, 1998.

[2] Koç, E., Güven, N., Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi, EMO Bilimsel Dergi, Vol.1, pp.51-55, 2011.

[3] Fingersh, L., Hand, M., Laxson, A., Wind Turbine Design Cost and Scaling Model, National Renewable Energy Laboratory (TP-500-40566), USA, 2006.

[4] Eminoglu, U., Ayasun, S., Modeling and Design Optimization of Variable-Speed Wind Turbine Systems, Energies, Vol. 7, pp. 402-419, 2014.

[5] Fuglsang, P., Bak C., Schepers, J.G., Bulder, B., Olesen, A., Rossen, RV., Cockerill, T., Site Specific Design Optimization of Wind Turbines, National Laboratory Risø (JOR3-CT98-0273), Denmark, 2010.

[6] Kongam, C., Nuchprayoon, S., A particle swarm optimization for wind energy control problem, Renewable Energy, Vol.35, pp.2431-2438, 2010.

[7] Li, H., Chen, Z., Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind power generator systems, Renewable Energy, Vol.34, pp.1174-1185, 2009.

[8] Eminoglu, U., Site specific design optimization of horizontal axis wind turbine systems, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, (DOI: 10.3906/elk-1306-19).

[9] Carillo, C., Montano Obando, A.F., Cidras, J. and Diaz-Dorado, E., Review of power curve modeling for wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews 21, pp.572-581, 2013.

[10] Thapar, V., Agnihotri, G. and Sethi, V.K., Critical analysis of methods for mathematical modeling of wind turbines, Renewable Energy 36, pp.3166-3177, 2011.

[11] Akdag S.A., Guler O., Comparison of wind turbine power curve models, International Renewable Energy Congress, pp.215-219, November 5-7, 2010, Sousse, Tunisia.

[12] Richard Powell, W., An analytical expression for the average output power of a wind machine, Solar Energy Vol. 26, pp. 77-80.

[13] Eminoglu, U., A New Model for Output Power Calculation of Variable-Speed Wind Turbine Systems, Accepted for publication in IEEE International Conference on ACEMP-OPTIM-ELECTROMOTION, 2-4 Sept. 2015, Side-Turkey.

[14] Das A.K., An empirical model of power curve of a wind türbine, Energy Systems, pp.507-518, 2014.

[15] Matlab R2010b Enterprise, Copyright©2010.

KAIMAL SPEKTRUMU TABANLI RÜZGAR HIZI MODELİ İLE KANAT AÇISININ YAPAY SİNİR AĞILARI İLE KONTROLÜ

Oğuzhan ÖZER[1] Kadir ABACI[2] Zafer ÖZER[3]
[1]Elbistan Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş
[2]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin Üniversitesi, Çiftlikköy Kampüsü, Mersin
[3]Mersin Meslek Yüksekokulu, Mersin Üniversitesi, Tece Kampüsü, Mersin
e-posta[1] oguzhanozer@ksu.edu.tr e-posta[2] kabaci@mersin.edu.tr e-posta[3] zaferozer@hotmail.com
Anahtar kelimeler: Rüzgar hızı, Kaimal spektrumu, YSA, Kanat açısı denetimi

Özet

Bir güç sisteminde rüzgar enerjisinin sisteme dahil edilmesi, rüzgar generatörlerinin karakteristiği ve rüzgarın doğal yapısı yüzünden önemli problemlere neden olmaktadır. Rüzgar hızının ortama ve zamana göre sürekli değişken bir yapıya sahip olması nedeniyle modellenmesi çok zordur. Rüzgar gücünün güç sistemlerine entegrasyonuna ilişkin yapılan çalışmalarda rüzgar hızının modellenmesi önem kazanmaktadır. Rüzgar hızının sürekli değişmesi mekanik ve elektriksel hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle türbin momentinin uygun kontrol yöntemleri ile sürekli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan denetim yöntemlerinden biriside türbin kanat açısının değiştirilmesi ile yapılan denetimdir. Bu çalışmada rüzgar hızının gerçek zamanlı değişimi MATLAB/ SIMULINK' te gerçekleştirilen bir model ile rüzgar türbinine uygulanmış ve Yapay sinir ağı ile rüzgar türbininin kanat açısı denetimi amaçlanmıştır.

1. Giriş

Rüzgar enerjisi, çevre dostu olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve sürekli artan enerji ihtiyacını karşılamak için son yıllarda önemi gittikçe artmaktadır. Dünya üzerindeki rüzgar enerjisi potansiyelinin elektrik enerjisi üretimine katkısı çok büyüktür. Hava şartlarına bağlı olan rüzgar gücü, mevcut dağıtım şebekesi ile birleşmesiyle ekonomik olarak çekici olabilmektedir [1].
Günümüzde gerçekleşmekte olan teknolojik, ekonomik ve toplumsal gelişmelere paralel olarak, ihtiyaç duyulan elektrik enerjinin kesintisiz, kaliteli, güvenilir ve ekonomik koşullarda, çevresel etkileri dikkate alınarak üretilmesi zorunluluğu vardır [2].

Su, gaz veya buhar türbinleri ile tahrik edilen santrallerde üretilen enerji son kullanıcı talebine göre düzenlenebilir ve ayarlanabilir. Bunun aksine rüzgar türbinleri harici güce bağımlıdır. Şebekeye verilen enerji, rüzgar hızı, türbin kulesi etrafındaki elverişsiz hava akımları veya yük değişimlerinden ve şebeke zayıflamalarından etkilenir.

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde generatör sistemi seçimi, şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız, değişken hız/sabit hız, dişli kutulu/dişli kutusuz, kara/ kıyı ötesi vb. gibi uygulamanın türüne göre çeşitlilik gösterir [3].

Değişken hızlı rüzgar türbini generatörleri, optimal kanat uç hız oranı değerinde çalıştırılabildikleri ve dolayısıyla rüzgardan maksimum enerjiyi yakalayabildikleri için sabit hızlı türbinlere oranla daha verimlidirler. Ancak, değişken hızlı makinaların kutup gerilimleri ve frekansı, rüzgar salınımlarında etkilenir. Eğer sistemde uygun kontrol yöntemleri kullanılırsa, enerji kalitesi arttırılabilir. Bu amaçla rüzgar türbinin çıkışı kontrol edilmelidir. Rüzgar generatörleri zayıf şebekelerde, gerilim, frekans ve güç salınımları oluşturur. Bu salınımları en aza indirmek için kanat açısı kontrolü 'pitch kontrolü' ile doğrultucu-evirici veya her ikisi de kullanılarak enerji kalitesi arttırılabilir [4,5].

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, iklim ve hava şartlarından etkilenmektedir. Rüzgar hızı sürekli değişmektedir. Rüzgar hızındaki ani değişiklikler mekanik ve elektriksel hasarlara neden olabilmektedir. Rüzgar hızının ortama ve zamana göre sürekli değişken bir yapıya sahip olması nedeniyle modellenmesi çok zordur. Rüzgar gücünün güç sistemlerine entegrasyonuna ilişkin yapılan çalışmalarda rüzgar hızının modellenmesi önem kazanmaktadır. Rüzgar hızı ve enerjisinin dikey verileri için çok fazla yeni çalışma vardır fakat bunlar genellikle kabul edilebilir değildir. Ölçüm yerinin bölgesel özellikleri ve alçak atmosfersel denge böyle dikey genişlemelerde önemli rol oynamaktadır. Bütün denge şartları için geçerli olan yükseklikle rüzgar hızı değişimi için tekdüze analitik bir ifade bulmak mümkün değildir. Bu zorluklara rağmen rüzgar hızını ortaya koyan çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan bir tanesinin temeli süper pozisyon teoremine dayanır. Yani siteme etki eden tüm bileşenler ayrı ayrı hesaplanarak toplanır. Bir diğer yöntem ise Van Der Hoven ve Von Karman'ın geliştirmiş olduğu modeldir [6,7].

Bu çalışmada rüzgar hızının modellenmesi için Van Der Hoven spekturumunu esas alan Kaimal spekturum modeli kullanılmıştır. Rüzgar hızının

gerçek zamanlı değişimi MATLAB/ SIMULINK' te gerçekleştirilen model ile güç sistemine entegre olan bir rüzgar türbinine uygulanmış ve yapay sinir ağı ile rüzgar türbininin kanat açısı denetimi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

2. Rüzgar Hızı Modeli

Rüzgar türbinleri, karakteristikleriyle elde edilen aerodinamik model esas alınarak modellenmektedir. Buna göre P_{AERO} aerodinamik gücü aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_{AERO} \quad \frac{1}{2}\rho A C_p V^3 \qquad (2.1)$$

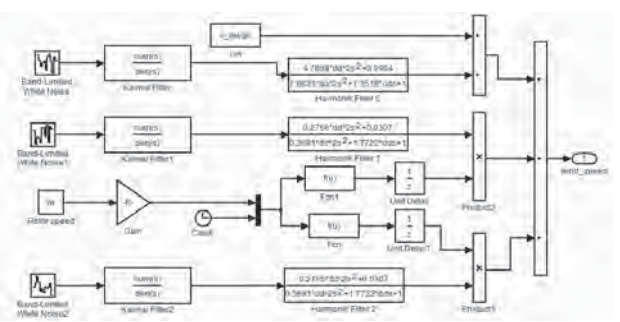
Bu eşitlikteki V rüzgar hızını, C_p performans katsayısını, A türbin rotorlarının süpürdüğü alanı, □ ise hava yoğunluğunu belirtmektedir. Performans katsayısı olan Cp, uç hız oranının (TSR) bir fonksiyonu olarak tanımlanır. TSR oranı aşağıdaki denklem ile bulunur. Bu eşitlikteki w_r açısal rotor hızını, R rotor yarıçapını göstermektedir.

$$TSR \quad \frac{w_r . R}{V_m} \qquad (2.2)$$

Gerçeğe yakın bir rüzgar hızı elde etmek için literatürde yer alan Van der Hoven spekturumu temelli Kaimal spekturum modeli kullanılmıştır[8].

$$\varphi(\omega) \quad \frac{K_v}{(1 \quad \omega . T_v)^{5/3}} \qquad (2.3)$$

(2.3) nolu denklemde yeralan yerel özelliklere göre değişen K_v ve T_v sırasıyla türbülans uzunluk skalası, türbülans yoğunluğunu göstermektedir. Gerçeğe yakın bir rüzgar hızı elde edilmesi için MATLAB/ SIMULINK'te gerçekleştirilen Kaimal spekturumu blok modeli Şekil 1. de verilmiştir. Yaygın olarak kullanılan bu modelde giriş olarak beyaz gürültü ve rotor açısal hızı kullanılmıştır. Bu girişler sırasıyla Kaimal ve admittans filtrelerinden geçirilerek rüzgar hızı elde edilmiştir.

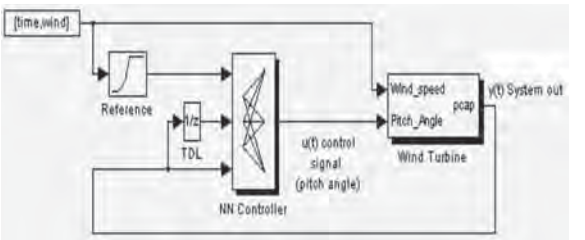


Şekil 1. Kaimal spekturumu rüzgar hızı modeli

3. Yapay Sinir Ağları

a. Denetleyici Mimarisi

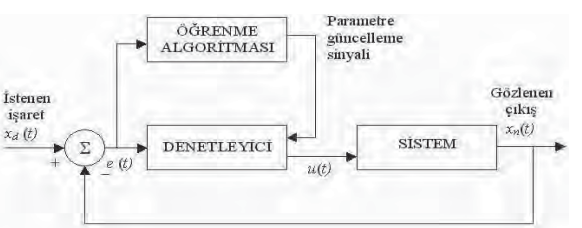
Kullanılan yapay sinir ağı (YSA) denetleyicisi iki girişli, bir çıkışlıdır. Girişler, denetlenen sistemin bir önceki çıkışı ve aynı sistemin iki önceki çıkışıdır. Denetleyici gerçek zamanlı olarak sürekli eğitilmekte ve sistemin denetimi için uygun açı değerini çıkış olarak vermektedir. Denetleyici mimarisi Şekil 2.'deki yapıda olup gizli katmanda beş adet nöron vardır. Gizli katmanda doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonu, çıkış katmanında ise doğrusal aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Fonksiyon her giriş değerine karşılık bir çıkış üretmekte elde edilen çıkış ile referans değer karşılaştırılarak hata değeri bulunmaktadır. YSA'ya ait parametre güncelleme işlemi ise bu hata değerine göre gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2. Yapay sinir ağı denetleyici mimarisi

b. Yapay Sinir Ağları ile Sistem Tanılanması ve Denetimi

Sistem denetiminde Şekil 3. de gösterilen yapı kullanılmaktadır. Sistem çıkışları ile istenen işaret arasındaki fark denetleyiciye uygulanır. Denetleyicinin ürettiği çıkış ise sistemi izlenen işarete doğru zorlayacak şekilde hesaplanır. Bu döngü içerisinde, sistem çıkışının istenen işarete doğru zorlanması ise denetleyici parametrelerinin hata bilgisinin kullanımı ile güncellenmesi yoluyla gerçekleşir. Tanılama ve denetim problemlerinin ilk aşaması, öğrenme şeklinin eşzamanlı ya da zamandan bağımsız olması durumlarından birine karar verilmesidir. Sistemin hangi girişlere cevaben hangi çıkışları ürettiğine dair herhangi bir bilgi yoksa ve uygulama gerçek zamanda tanılamayı gerektiriyorsa her bir gözlem anında tanılayıcı ağ yapısı, gözlemlenen bir adet giriş/çıkış çifti için anlık hatanın minimizasyonuna dayalı çalışacaktır. Bu ise eşzamanlı öğrenme yaklaşımına denk düşmektedir [9, 10].

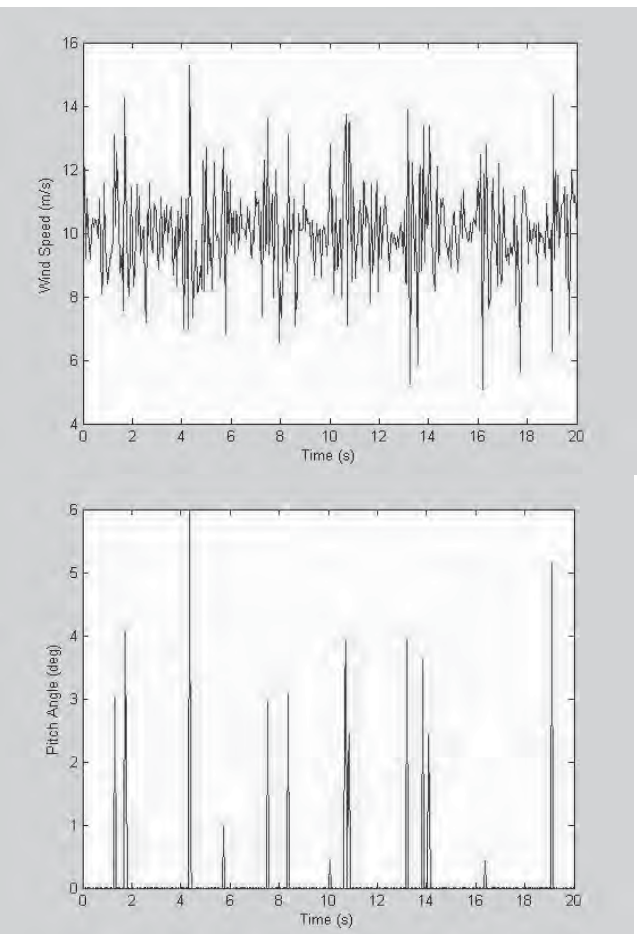


Şekil 3. Sistem denetimi modeli

c. Kanat Açısı Denetimi

Kanat açısı denetimli rüzgar türbinlerinde uygun denetim yöntemleri kullanılarak, rüzgardan en

verimli şekilde enerji elde edilebilir. Kanat açısı denetimi, pratikte yüksek rüzgar hızlarında rüzgar türbinini aşırı yüklenmelerden korumak amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemle türbinin ürettiği moment etkin bir şekilde denetlenmektedir. Yaygın olarak kullanılan iki denetim yöntemi vardır, bunlar aktif ve pasif denetimdir. Pasif denetimde, rüzgar hızı belli bir hıza eriştiğinde, çıkış gücünü nominal değerde sabitlemek için, türbin kanat açısı değişir. Aktif kanat açısı denetiminde gerekli olan çıkış gücünü sağlamak için, ölçülen değerlere göre sürekli olarak değiştirilir. Bazı durumlarda, aşırı değişken rüzgar şartlarında aktif kanat açısı ayarının sistemi karasız hale getirdiği gözlemlenmiştir. Kanat açısı denetimi moment veya güç hatasına göre çalışır. Bu denetim sinyali gerçek mil hızı ile istenen mil hızı arasındaki hata kullanılarak da elde edilebilir. [11]



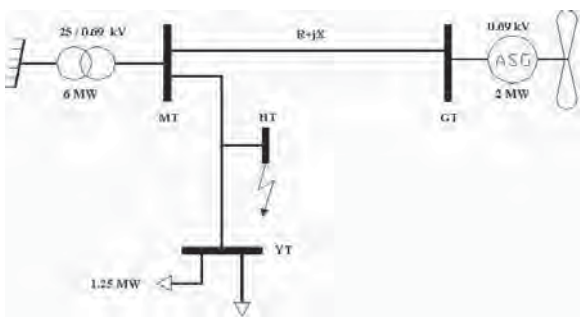
Şekil 4. Kaimal spektrumu rüzgar modeli çıkışı ve kanat açısının değişimi

Şekil 4.'te YSA tabanlı kanat açısı denetleyicisinin Kaimal spekturum modeline göre oluşturulmuş gerçeğe yakın bir rüzgar hızı değişimine karşı cevabı gözükmektedir. Şekilden açıkça görülmektedir ki rüzgar hızının ani değişimlerine karşı denetleyici başarılı bir performans göstermiştir.

4. Rüzgar Türbini Entegre Edilmiş Güç Sistemi

Şekil 5.'te rüzgar türbini entegre edilmiş güç sisteminin tek hat ş eması görülmektedir. Rüzgar türbini 6 MW'lık şebekeye bağlı olarak çalışmaktadır. Generatörün statoru doğrudan şebekeye bağlıdır. YT barasına iki adet yük bağlı olup ana yük 750 kW devreye girip çıkan yük ise 1.25 MW gücündedir. 2. bölümde verilen Kaimal spekturumu rüzgar hızı modeli türbine rüzgar girişi olarak uygulanmıştır. Kullanılan rüzgar hızı modelinde Rotor yarıçapı 40 m, ortalama rüzgar hızı 10 m/s alınmıştır. Sistemde kanat açısı denetleyici olarak kullanılan yapay sinir ağı denetleyicisi iki girişli ve tek çıkışlıdır ve gizli katmanında beş adet nöron vardır. Yapay sinir ağında geri yayılım algoritması kullanılmıştır.

Matlab V6.5 ve SIMULINK programı kullanılarak sistem bilgisayar ortamında simule edilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan yapı EK.A'da verilmiştir.

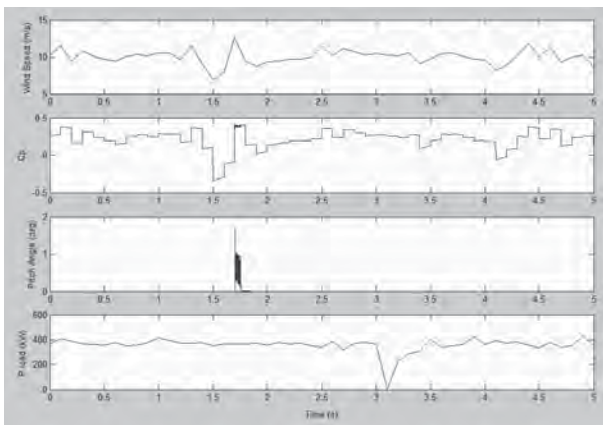


Şekil 5. Örnek güç sistemi

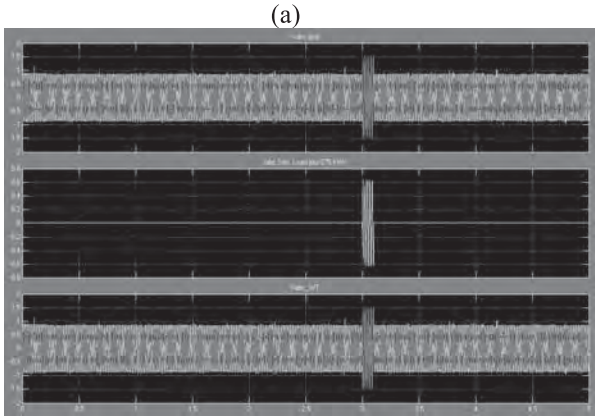
4. 1 Simülasyon Çalışmaları

Bu bildiride, Şekil 5'te verilen örnek güç sisteminde değişken rüzgar hızına maruz bırakılan rüzgar türbininin Matlab V6.5 ve SIMULINK programı kullanılarak bilgisayar ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle Van der Hoven spekturumu temelli Kaimal spekturum kullanılarak gerçeğe yakın bir rüzgar hızı modeli elde edilmiştir. Bu rüzgar modeli, kanat açısı YSA ile denetlenen bir rüzgar türbini modeline uygulanmıştır. Denetleyicinin performansı, 1-faz toprak ve 3-faz toprak kısa devre hataları ile test edilmiştir. Şekil 6 (a)'da örnek güç sisteminde HT barasına 3. Saniyede 100ms'lik 1-faz toprak kısa devre hatası uygulanmıştır. Bu şekilden görüldüğü gibi gerçeğe yakın rüzgar hızına karşı YSA tabanlı denetleyicinin, kanat açısı ile performans katsayısı (C_p) üzerindeki denetim etkisi gözükmektedir. YSA denetleyici referans ile türbin çıkışını karşılaştırarak bir hata değeri elde etmiş ve bu hatayı azaltmak suretiyle parametre güncelleyerek kanat açısını arzu edilen referans değere getirmeyi başarmıştır. Şeklin en alt kısmında bozucu etki sonrasında aktif gücün değişimi gözükmektedir. Şekil 6 (b)'de yukarıdan

aşağıya doğru rüzgar türbininin entegre olduğu üç fazlı güç sisteminde generatörün per unit olarak terminal gerilimi, yük akımı ve asenkron generatörün çıkış gerilimi görülmektedir. Şekil 6(b)'de 1-faz toprak kısa devre hatası sonrasında YSA tabanlı denetleyicinin kısa sürede cevap vererek sistemi denge konumuna getirdiği açık olarak görülmektedir.



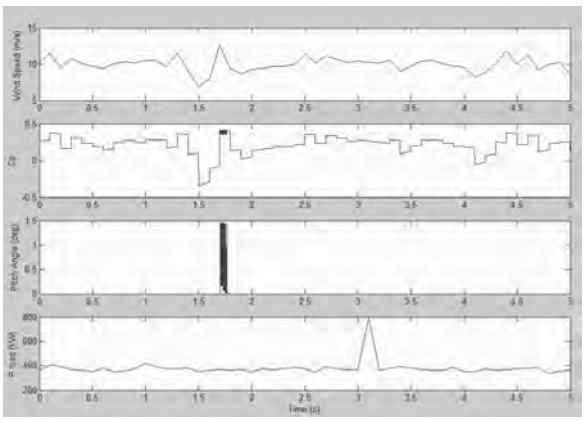
(a)



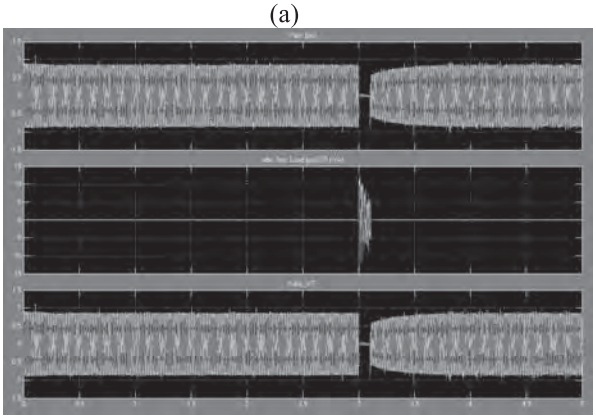
(b)

Şekil 6. 1-faz toprak kısa devre hatası (a) *rüzgar hızı, performans katsayısı, kanat açısı, aktif güç değişimleri* (b) *üç faz bara gerilimi, yük akımı, generatör gerilimi*

Şekil 7 (a)'da örnek güç sisteminde HT barasına 3. Saniyede 100ms'lik 3-faz toprak kısa devre hatası uygulanmıştır. Bu şekilde de gerçeğe yakın rüzgar hızı modelinin uygulandığı YSA tabanlı denetleyicinin, kanat açısı ile performans katsayısı (C_p) üzerindeki kontrol etkisi gözükmektedir. YSA denetleyici referans ile türbin çıkışını karşılaştırarak bir hata değeri elde etmekte ve bu hatayı azaltmak için sistemi referans değere yaklaştıracak kanat açısını ayarlamasını parametre güncelleyerek yapmaktadır. Şeklin en son kısmında bozucu etki sonrasında aktif gücün değişimi görülmektedir. Şekil 7 (b)'de yukarıdan aşağıya doğru rüzgar türbininin entegre olduğu üç fazlı güç sisteminde generatörün per unit olarak terminal gerilimi, yük akımı ve asenkron generatörün çıkış gerilimi görülmektedir. Şekil 7 (b)'de 3-faz toprak kısa devre hatası sonrasında YSA tabanlı denetleyicinin kısa sürede cevap vererek sistemi denge konumuna getirdiği açık olarak görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7. 3-faz toprak kısa devre hatası (a) *rüzgar hızı, performans katsayısı, kanat açısı, aktif güç değişimleri* (b) *üç faz bara gerilimi, yük akımı, generatör gerilimi*

5. Sonuçlar

Bu çalışmada gerçeğe yakın bir rüzgar hızının zamana göre değişimi Kaimal spektrum modeli ile elde edilmiştir. Elde edilen rüzgar hızı güç sistemine entegre olmuş rüzgar türbininin girişine uygulanmıştır. YSA tabanlı bir kontrolör tasarlanarak türbinin kanat açısı kontrol edilmiştir. Rüzgar enerjisine dayalı sistemlerin verimliliği, kanat açısı ayarı, çevirici/evirici yada ikisinin olduğu kontrol yöntemleri ile arttırılabilir. Rüzgar türbininin mekanik verimi güç (performans) katsayısına bağlıdır. Modellenen sistemde istenen güçle gerçek güç arasındaki hata kullanılarak açı değişim işareti elde edilmiştir. Hatanın azaltılması, YSA tabanlı bir kontrolör ile sağlanmıştır. Rüzgar türbini entegre edilmiş güç sisteminde, 1-faz toprak ve 3-faz toprak kısa devre olayları incelenmiştir. Rüzgar türbini şebekeye bağlı olarak çalıştığı için yukarıda bahsedilen olaylar sırasında kararsızlık yaşanmamıştır. Sonuç olarak türbinin çıkış gücü, rüzgar hızının nominal değerlerin altında olduğu bölgeler haricinde sabit kalmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Özer, Z. Yılmaz, A. Serdar. Rüzgar türbinlerinin kanat açılarının yapay sinir ağı tabanlı denetimi, YEKSEM 2005, Mersin.

[2] Ackerman, T., and Söder, L., An overview of wind energy status 2002, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 6, pp 67-128, Pergamon Press, 2002.

[3] Copçuoğlu, O., Önbilgin, G., Yel enerjisi dönüşüm sistemleri için uygun generatör türlerinin değerlendirilmesi, Sayfa 5-17 Yeksem 2007, Gaziantep.

[4] Vural, A. Rüzgar Türbinleri İçin Kanat Açısı Ve Rotor Hız Kontrolü Yaparak Verimliliğin Sağlanması, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. 2011, İstanbul.

[5] Özer, Z. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan generatörlerin denetimi, K.Maraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. 2005. K.Maraş.

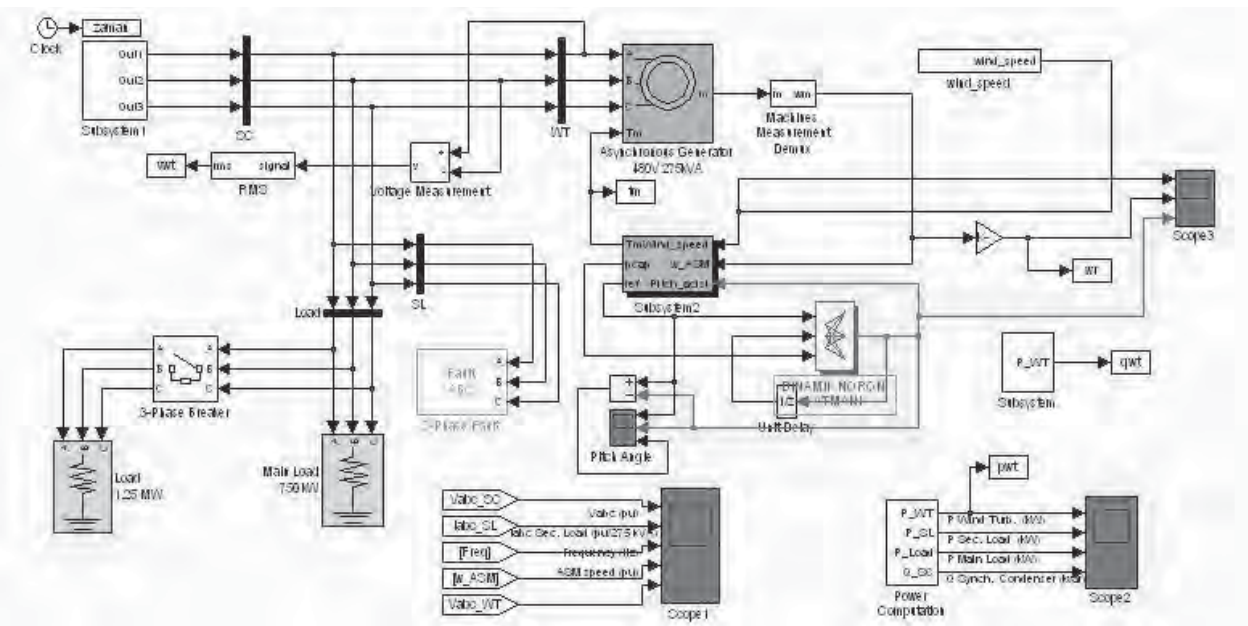
[6] Şipar E., Rüzgar türbin sistemin modellenmesi , http://www.emo.org.tr/

[7] Gelberi H., Uyaroğlu Y., Abacı K., Yalçın M. A., Pehlivan İ., Onduk A. Rüzgar türbinlerinin dağıtım şebekelerine bağlanması ve dinamik simülasyonu, Sayfa 18-22 Yeksem 2007, Gaziantep.

[8] Gavriluta C.,S. Spataru, I. Mosincat, C. Citro, I. Candela, P. Rodriguez. Complete methodology on generating realistic wind speed profiles based on measurements. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), March, 2012, Spain

[9] Karadeniz M. and et al, Adaptive neural network control of a DCmotor, Proc. Of Eleco 2003, Bursa, Turkey.

[10] Efe, M, Ö., Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları, Boğaziçi Üniversitesi, 2000, İstanbul.

[11] Sharma H., and et al..Effect of Pitch Control and Power Conditioning on Power System Quality of Variable Speed Wind Turbine Generators. Murdoch University Energy Research Institute (MUERI), Murdoch University, WA.2001.

EK.A Simülasyonda Kullanılan Yapı