

İSKENDERUN BÖLGESİNE AİT RÜZGAR HIZI VE GÜÇ YOĞUNLUĞUNUN ÇEŞİTLİ MODELLER KULLANARAK İSTATİSTİKSEL OLARAK ANALİZİ

Ali Naci ÇELİK

Yrd. Doç. Dr., Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bl. Tayfur Sökmen kampusu, Antakya/HATAY, Tel: 0532-2277353; Fax: 0326-2455499; E-Mail: ancelik@mku.edu.tr

OZET

Türkiye, şu andaki elektrik enerji ihtiyacı artma oranı olan %8'in devam etmesi durumunda, elektrik enerji ihtiyacını karşılayabilmek için 2010 yılına kadar üretim kapasitesini üç kat artırmak zorunda kalacaktır.. Türkiye yenilenebilir enerji kaynaklarını sadece bu artışı karşılamak için değil gevresen etkenleri de göz önüne alarak daha fazla kullanmalıdır. Yapılan çalışmalar Akdeniz kıyısında bulunan İskenderun (36.35oN; 36.10oE) yöresinin Türkiye'de bulunan potansiyel kullanım alanına sahip yörelerden birisi olduğunu göstermektedir. Bu bildiride, İskenderun yöresine ait bir yıllık saatlik rüzgar hızı ve yönü verileri kullanılarak, rüzgar enerji potansiyeli analiz edilecektir. Rüzgar hızı dağılım eğrilerinin yani sıra önemli parametreler saatlik verilerden derlenecektir. Yörenin rüzgar enerji potansiyeli, Weibull ve Rayleigh olmak üzere, iki farklı dağılım fonksiyonu kullanılarak araştırılacaktır.

ANAHTAR KELİMELER: rüzgar enerjisi; rüzgar hızı dağılımları; rüzgar hızı dağılım fonksiyonları

1. GIRIS

Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına göre (ETKB) 1999 yılı itibari ile Türkiye'nin elektrik üretim kapasitesi yaklaşık 26 GWe dir [1]. Türkiye %8lik artış oranının devam etmesi halinde, elektrik üretim kapasitesini 2010 yılına kadar 65 GWe düzeyine çıkarmak zorundadır. 2010 yılı itibari ile, tüm elektrik kapasitesinin %40 ini hidroelektrik ve geri kalan %60 in büyük bir kısmını da geleneksel termal santraller oluşturmaktadır. Şimdiki 4 GWe doğal gaz santrallerinin kapasitesi 2010 yılında yapımı devam eden veya düşünülen santraller ile 2010 yılında 18.5 GWe olması beklenmektedir. Ancak bu, yerli doğal gazın oranının çok düşük olması nedeni ile, Türkiye'nin ithal edilen doğal gaza zamanla daha fazla bağımlı olmasına yol açacaktır. Elektrik enerjisinin %2lik bir kısmını rüzgardan karşılama hedefi olan Türkiye, 2000 yılında toplam gücü 390 MWe gücünde olacak santralleri ihaleye çıkartmıştır. Bu program içerisinde 25 farklı yöreye ait proje incelemeye alınmışsa da, ihale yasana ekonomik kriz nedeni ile IMF'nin isteği üzerine iptal edilmiştir.

Türkiye rüzgar enerjisi konusunda yap-işlet-devret (YID) modelini benimsemiştir. Türkiye'nin kurulu rüzgar enerjisi gücü 3 santral olmak üzere toplam 19.1 MWe'dir. Türkiye'nin ilk rüzgar enerji santrali olan ve Ege Denizi kıyısında bulunan Çeşme yöresinde kurulan rüzgar santrali Şubat 1998 de faaliyete başlamıştır. Toplam 3 türbin içeren bu santralin gücü 1.7 MWe olup bir özel teşebbüs girişimidir. İkinci rüzgar santrali Kasım 1998 de işletmeye alınmış olup toplam gücü 7.2 MWe olan 12 rüzgar türbini içermektedir. Çanakkale, Bozcada yöresinde bulunan üçüncü rüzgar santrali Haziran 2000 den beri faaliyette olup toplam 17 türbin içermektedir. Bu santralin toplam kurulu gücü 10.2 MWe dir.

Türkiye rüzgar, güneş, jeotermal gibi yenilenebilir kaynaklarını daha fazla kullanmalıdır. Bu sadece artan enerji ihtiyacı için gerekli olmayıp, çevresel bakış açısından da gereklidir. Türkiye Avrupa Topluluğuna (AT) girmeye çalışmakta ve bu bağlamda AT'nin çevresel standartlarını da yakalamak zorundadır. Bunun yanında bağımsız çevresel kuruluşların ve Air Pollution, Antartctic Treaty gibi çevresel anlaşmaların standartlarını da karşılamaya çalışmaktadır.

Tablo 1. Türkiye'nin en önemli rüzgar potansiyeline sahip yöreleri

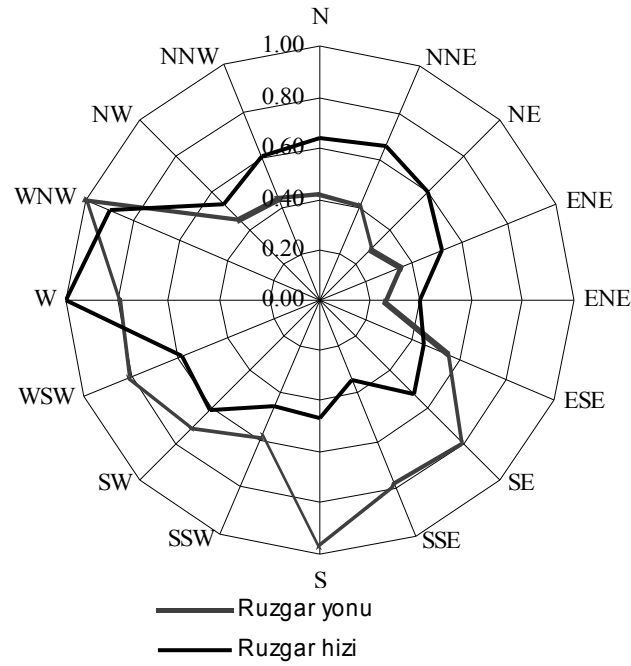
Yöre	Bölge	Enlem (oN)	Boylam m (oE)	Rakım (m)	Ortalama rüzgar hızı (m/ s)		Ortalama rüzgar gücü yoğunluğu (W/m ²)
					at 5m	at 50m	
Gökçeada	Ege	40o12'	25o54'	72	3.5	5.5	70
Bandırma	Marmara	40o21'	27o58'	58	5.8	6.9	301
Sinop	Karadeniz	42o02'	35o10'	32	3.6	5.1	84
Diyarbakır	Güneydoğu Anadolu	37o54'	40o14'	677	-	-	-

Kaynak: Öztopal et al. [2].

Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli yönünden zengin bölgelere sahiptir. Öztopal et al. [2] toplam 42 rüzgar hızı ölçüm istasyonundan alınan veriler doğrultusunda hazırladığı rüzgar haritasında Ege Denizi kıyısı en önemli potansiyele sahip bölge olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer önemli bir potansiyel bölgede Türkiye'nin güney batısına düşen Akdeniz kıyısı boyuncadır. Buradaki yörelerden bir tanesi de İskenderun'dur. Rüzgar enerjisi potansiyeline sahip diğer önemli yerlerde bu bölgelere ait coğrafi, topografik ve bazı rüzgar parametreleri ile Tablo 1'de görülebilir. Durak ve Sen Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelini morfolojik ve hava kütlelerinin hareketleri yönünden incelemiştir. Türkiye'nin rüzgar enerjisi üretim potansiyeli Ege Denizi kıyısında bulunan Akhisar yöresi örneğinde özetlenmektedir. Söz konusu çalışmada aktarılan bir çalışmaya göre Ege Bölgesinde toplam 10 bölgede yapılan çalışmalarda 319 MWe lik bir potansiyel olduğu belirtilmektedir. Şahin [4] 68 rüzgar hızı ölçüm istasyonundan alınan veriler doğrultusunda hazırladığı rüzgar hızı-aşımı haritasında 10, 12, 15, ve 20 m/s üzerindeki rüzgar hızlarının sıklığını ve potansiyel olarak tehlikeli bölgelere yönelik gerekli uyarıları vermektedir. Söz konusu çalışmada Şahin, Türkiye'nin özellikle batı bölgeleri ile kıyıların yapı güvenliği ve rüzgar erozyonu yönlerinden riskli bölgeler olduğunu belirtmektedir.

2. İSKENDERUNA AİT RÜZGAR HIZI KARAKTERİSTİKLERİ

Bu bildiriye İskenderun'da (36.35oN; 36.10oE) 1996 yılı boyunca ölçülen saatlik rüzgar hızı verileri istatistiksel olarak analiz edilmektedir. Rüzgar hızı verileri 10 m yükseklikte R Fuess tipi bir anemograf cihazı ile İskenderun şehri içerisinde (Akdeniz kıyısında, 2 m rakım) Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğüne ait olan bir sinoptik istasyonda ölçülmüştür. Anemograf cihazı ile sürekli kaydedilen rüzgar hız ve yön verileri saatlik ortalama olarak kaydedilmektedir. Denklem (1) ve (2) den hesaplanan aylık ortalama saatlik rüzgar hızı ve standart sapma değerleri Tablo 2 de görülmektedir. Tablo da görülebileceği gibi yüksek rüzgar hızları yaz aylarına denk gelen Haziran ve Temmuz aylarında olmaktadır. Şubat ve Eylül ayları ise 1.62 ve 1.87 m/s gibi düşük rüzgar hızlarına sahiptir.



Şekil 1. Normalize edilmiş yönsel dağılım ve yönsel ortalama rüzgar hızı

$$v_m = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N v_i \right] \quad (1)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - v_m)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Alternatif olarak eğer rüzgar dağılım yoğunluk fonksiyonu biliniyor ise ortalama rüzgar hızı Denklem (3) ile hesaplanabilir.

$$v_m = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (3)$$

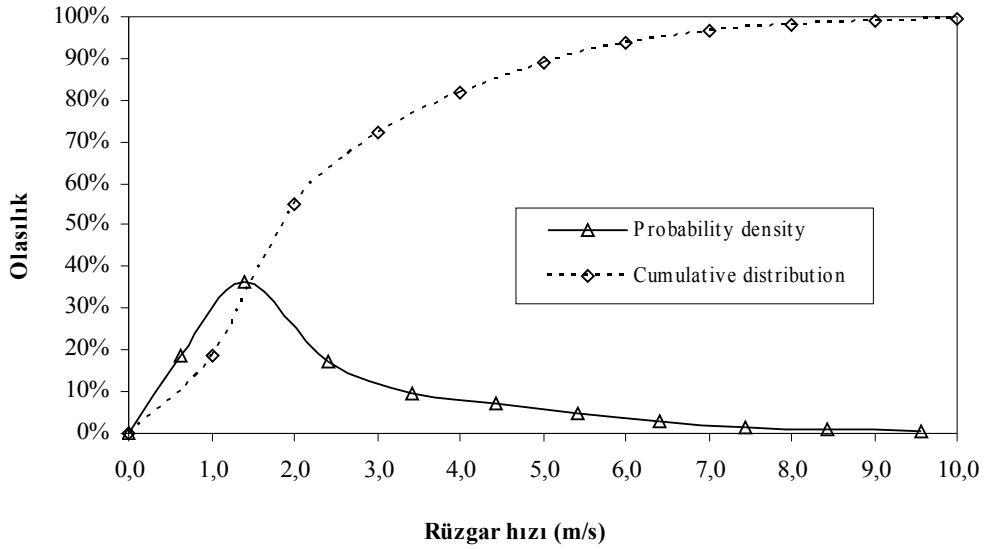
Normalize edilmiş yönsel dağılım ve yönsel ortalama rüzgar hızı verileri Şekil 1 de görülmektedir. Buna göre egemen rüzgar yönleri batı/kuzey-batı ve güney'dir. Rüzgarın en güçlü estiği yönler ise batı ve batı/kuzey-batı yönleridir.

Tablo 2. Aylık rüzgar karakteristikleri

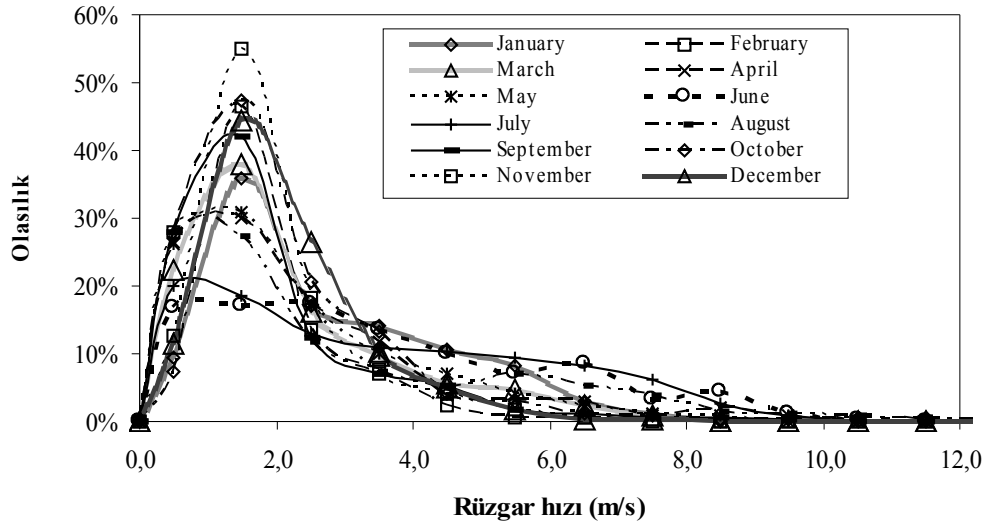
Aylar	v_m (m/s)	σ (m/s)	c (m/s)	k -
Ocak	2.71	1.69	3.04	1.66
Şubat	1.62	1.12	1.80	1.49
Mart	2.14	1.60	2.35	1.37
Nisan	2.28	1.97	2.41	1.17
Mayıs	2.22	1.85	2.37	1.21
Haziran	3.38	2.37	3.73	1.46
Temmuz	3.35	2.41	3.69	1.42
Ağustos	2.74	2.51	2.84	1.10
Eylül	1.87	1.53	2.00	1.23
Ekim	2.43	1.82	2.66	1.36
Kasım	1.91	1.12	2.15	1.79
Aralık	2.07	1.16	2.34	1.89

3. RÜZGAR HIZI DAĞILIM FONKSİYONLARI

Zaman-seri formatındaki rüzgar hızı verileri genellikle incelenmesi daha kolay olan sıklık-dağılım formatına çevrilir. Sıklık-dağılım formatı olasılık-yoğunluk veya kümülatif dağılım olarak verilebilir. Saatlik zaman-seri formatındaki rüzgar hızı verilerinden derlenen olasılık-yoğunluk veya kümülatif dağılımlar Şekil 2 de yıllık bazda verilmektedir.



Şekil 2. Rüzgar hızının yıllık olasılık-yoğunluk ve kümülatif dağılımları



Şekil 3. Aylık olasılık-yoğunluk dağılımları

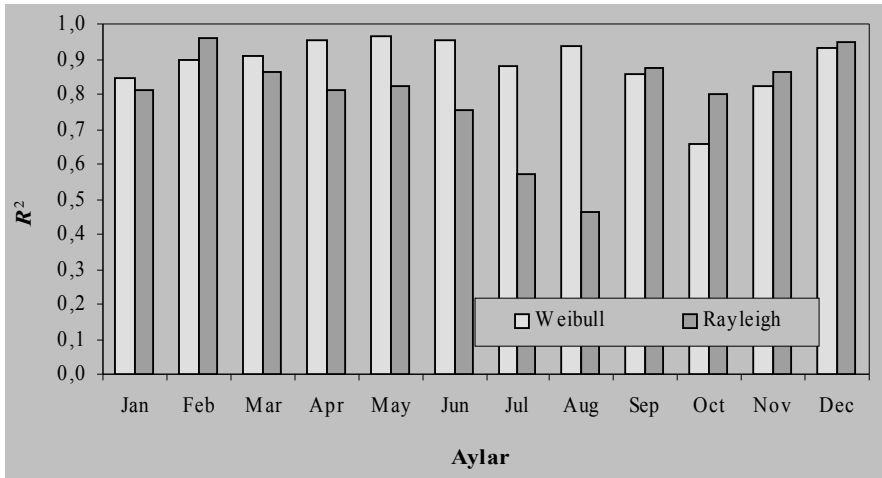
Zaman-seri formatındaki saatlik rüzgar verisinden elde edilen sıklık-dağılım formatında elde edilen olasılık-yoğunluk dağılımları Şekil 3 de aylık bazda verilmektedir.

Rüzgar hızı olasılık dağılımları ve bunları matematiksel olarak modellemekte kullanılan fonksiyonlar rüzgar ile ilgili alanlarda en çok kullanılan kaynaklardır. Özellikle, dağılım fonksiyonlarının parametrelerini tespit etmekte [5], bir bölgedeki rüzgar hızı ve enerjisini analiz etme işlemlerinde yoğunlukla kullanılmaktadırlar [6], [7]. Literatürde en çok kullanılan fonksiyonlardan ikisi Weibull ve Rayleigh dir. Bunlar belirli bir zaman ve yerde ölçülmüş olan rüzgar hızı olasılık dağılımlarını modellemek için kullanılırlar. İki parametrelili Weibull olasılık dağılım yoğunluk fonksiyonu şu denklem ile verilir,

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

Buna karşılık gelen kümülatif dağılımı da aşağıdaki denklem ile verilir,

$$F_w(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (5)$$



Şekil 4. Aylık korelasyon katsayıları (R2)

Jamil tarafından verilen analitik yöntemi kullanarak hesaplanan parametreler aylık bazda Tablo 2 de verilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi skala faktörü 1.80 ile 3.73 m/s arasında değişirken şekil faktörü 1.1 ile 1.89 arasında değişmektedir. Jamil'in verdiği yöntemin dışında Weibull parametrelerini tespit etmek için kullanılabilir literatürde verilen farklı yöntemler de vardır [5], [10] ve [11].

Rayleigh fonksiyonu Weibull'un basitleştirilmiş bir versiyonu olarak düşünülebilir. Weibull fonksiyonunda şekil parametresi olan c 2'ye eşitlenirse Rayleigh fonksiyonu elde edilir. Rayleigh olasılık dağılım yoğunluk fonksiyonu şu denklem ile verilir,

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{v_m^2} \exp \left[- \left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Buna karşılık gelen Rayleigh kümülatif dağılımı da aşağıdaki denklem ile verilir,

$$F_R(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Rayleigh fonksiyonunun en önemli avantajı sadece ortalama rüzgar hızı verisinin bilinmesi halinde dağılımın elde ediliyor olmasıdır. Rayleigh fonksiyonu da yaygın bir şekilde kullanılmış ve geçerliliği birçok bölge için kanıtlanmıştır [12]; [13] ve [14]. Bir sonraki adım modellerden elde edilen dağılım ile zaman-serisinden elde edilen dağılımlar arasındaki farkı belirleyebilmektir. Bunun için dağılımlar arasındaki fark ve dolayısı ile de her bir modelden elde edilen dağılımın yeterliliği korelasyon katsayısı (R2) ile belirlenmiştir. İskenderun rüzgar hızı verileri için aylık bazda elde edilen korelasyon katsayıları Şekil 4'te verilmiştir. Korelasyon katsayıları Weibull modeli için 0.66 ile 0.96 arasında değişirken Rayleigh modeli için bu değerler 0.46 ile 0.96 arasında değişmektedir. Aylık ortalama değerler ise sırası ile 0.88 ve 0.80 dir. Ay-ay analiz, 12 ayın 7 sinde Weibull modelinin ölçülen olasılık yoğunluk dağılımlarına daha yakın sonuçlar verdiği gözlenmektedir.

4. GUC YOGUNLUK DAGILIMI VE ORTALAMA GUC YOGUNLUGU

Birim alan için rüzgar gücü

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (8)$$

ise, ölçülmüş bir olasılık yoğunluk dağılımına karşılık gelen rüzgar gücü yoğunluğu, ki bu 'referans güç yoğunluğu' olarak adlandırılacaktır, aşağıdaki formülden hesaplanabilir,

$$P_{m,R} = \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} \rho v_{m,j}^3 f(v_j) \right] \quad (9)$$

Ortalama rüzgar gücü yoğunluğu en genel halde aşağıdaki formülden hesaplanabilir,

$$P_m = \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \quad (10)$$

Eğer ara işlemler atlanırsa, Weibull fonksiyonuna karşılık gelen ortalama güç yoğunluğu şu formülden hesaplanabilir,

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left[1 + \frac{3}{k} \right] \quad (11)$$

Benzer şekilde, Rayleigh fonksiyonuna karşılık gelen ortalama güç yoğunluğu su formülünden hesaplanabilir, $P_R = \frac{3}{\pi} \rho v_m^3$

(12)

Tablo 3. Zaman-serisi ve modellerden elde edilen aylık ortalama rüzgar gücü yoğunlukları ve modellerde elde edilen hata oranları

Aylar	Ortalama güç yoğunluğu			Hata (%)	
	Zaman-seri	Weibull	Rayleigh	Weibull	Rayleigh
Ocak	28.46	29.58	23.21	3.9	-18.4
Şubat	7.54	7.34	4.98	-2.7	-34.0
Mart	18.79	19.35	11.53	3.0	-38.6
Nisan	31.02	31.00	13.85	-0.1	-55.4
Mayıs	25.38	26.89	12.84	5.9	-49.4
Haziran	63.69	68.39	45.03	7.4	-29.3
Temmuz	62.84	70.00	44.17	11.4	-29.7
Ağustos	56.74	61.22	24.00	7.9	-57.7
Eylül	16.35	15.43	7.60	-5.6	-53.5
Ekim	30.23	28.52	16.79	-5.7	-44.5
Kasım	9.77	9.45	8.10	-3.3	-17.1
Aralık	11.63	11.37	10.31	-2.2	-11.3

Ölçülmüş ve modellerden elde edilen veriler doğrultusunda hesaplanan aylık ortalama güç yoğunlukları Tablo 3 de verilmektedir. Ortalama güç yoğunluğu aylık bazda büyük değişiklikler göstermektedir. Minimum güç yoğunluğu değerleri 7.54 ve 9.77 W/m² sırasıyla Şubat ve Kasım aylarında görülmektedir. En yüksek 3 güç yoğunluk değeri yaz aylarına denk gelen Haziran, Temmuz, Ağustos aylarına denk gelmekte, bunlardan Haziran ayındaki 63.69 W/m² değeri de maksimum aylık değer olmaktadır. Geri kalan aylardaki güç yoğunluk değerleri bu maksimum ve minimum değerler arasındadır. Aşağıdaki formül kullanılarak modellerden elde edilen ortalama güç yoğunluk değerleri ile referans güç yoğunluk değerleri arasındaki fark, diğer bir deyişle modellerin hata oranları Tablo 5 de verilmektedir.

$$Error (\%) = \frac{P_{W,R} - P_{m,R}}{P_{m,R}}$$

(13)

İki model karşılaştırıldığında, Weibull modelinin referans güç yoğunluğu değerlerini daha az hata oranı ile verdiğini görmekteyiz. Weibull modeli ile elde edilen en düşük hata oranı 0.1% Nisan ayında, en yüksek hata oranı %11.4 ise Temmuz ayında gözlenmektedir. Denklem (14) kullanılarak bulunana aylık ortalama hata oranı Weibull modeli için %4.9 seviyesindedir.

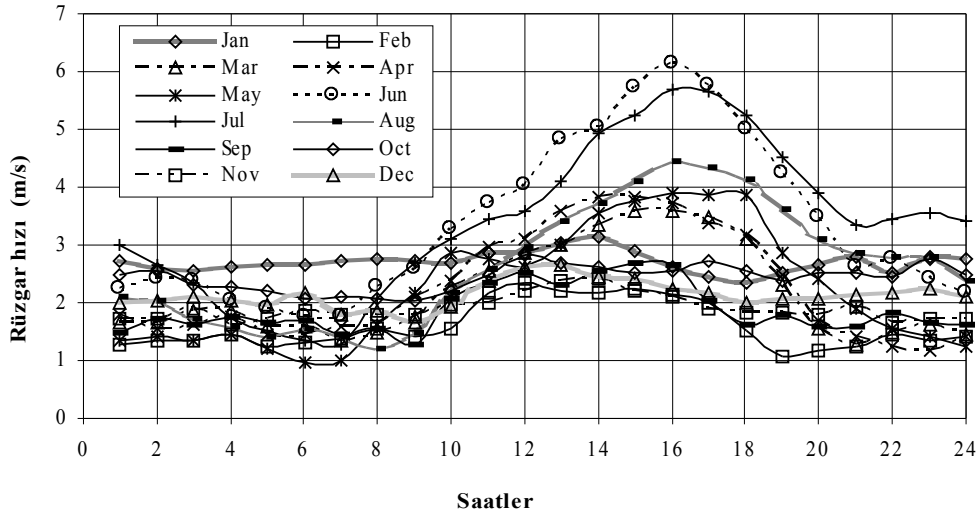
$$Error (\%) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \left| \frac{P_{W,R} - P_{m,R}}{P_{m,R}} \right|$$

(14)

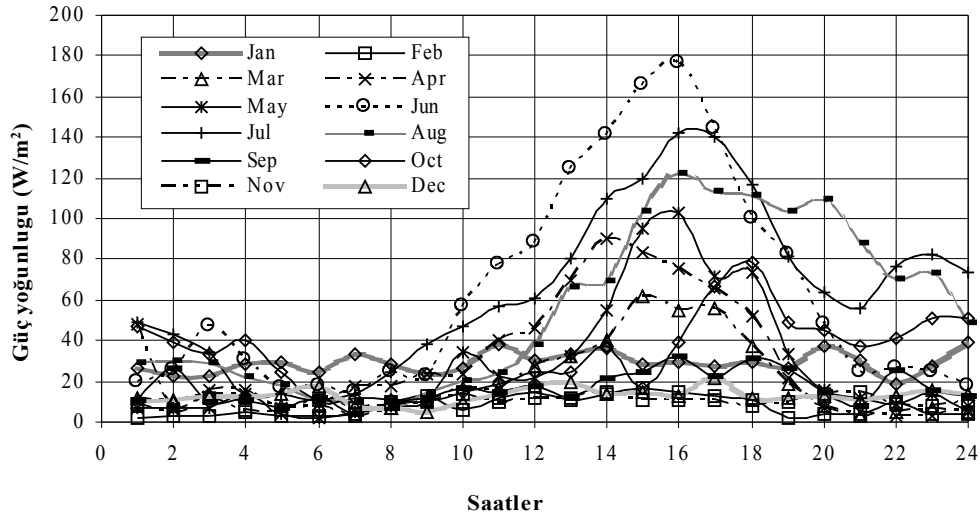
Rayleigh modelinin referans güç yoğunluğu değerlerini oldukça yüksek bir hata oranı ile verdiğini görmekteyiz. Öyle ki Nisan, Ağustos ve Eylül aylarında referans güç yoğunluğu değerleri %50 nin üzerinde bir hata ile bulunmaktadır. En küçük hata oranı %11.3 olurken aylık ortalama hata oranı %36.5 dir.

5. SAATLİK ANALİZ

Oldukça küçük bir potansiyele işaret eden düşük aylık ortalama güç yoğunluğu değerlerinin yanında, aylık ortalama saatlik rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerlerinin analizi bir zorunluluktur. İskenderun verilerinden elde edilen aylık ortalama saatlik rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerleri sırasıyla Şekil 5 ve 6 da verilmektedir. Şekil 5 ten görülebileceği gibi, birçok ayda öğleden sonraya denk gelen saatlerde (12 ve 20 saatleri arası ortalama rüzgar hızı aylık ortalamanın çok üzerine çıkmaktadır. Doğal olarak, potansiyeldeki bu artmayı güç yoğunluğu değerlerinde daha belirgin olarak görüyoruz. Bilindiği gibi rüzgar gücü rüzgar hızının küpü ile artmaktadır. Şekil 6'da görülebileceği gibi bazı aylarda 12 ve 20 saatleri arasına denk gelen güç yoğunluğu değerleri 100 W/m² nin üzerine çıkmaktadır.



Şekil 5. Aylara göre saatlik rüzgar hızı profilleri



Şekil 6. Aylara göre saatlik ortalama güç yoğunlukları

6. SONUCLAR

Bu bildiriye, İskenderun yöresine ait bir yıllık saatlik rüzgar hızı verileri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Aylık bazda rüzgar hızı olasılık dağılımları ve önemli rüzgar parametreleri saatlik zaman-serisi verilerinden elde edilmiştir. İki farklı olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu rüzgar hızı ve güç yoğunluğunu belirlemek amacı ile kullanılmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir,

1. İskenderun yöresi Türkiye’de rüzgar enerji potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerden birisi olmakla beraber, rüzgar hızı verilerinin toplandığı ve Meteoroloji İşleri Müdürlüğüne ait olan sinoptik istasyonun bulunduğu yerdeki rüzgar potansiyeli düşüktür. Bu düşük aylık rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerlerinden gözükmektedir.
2. Aylık ortalama güç yoğunluğu değerlerine göre (30.20 W/m²) şu değerlendirme yapılabilir: bu değer 100 W/m² den küçük olduğu için rüzgar gücü sınıflanmasında en düşük potansiyeli gösteren Sınıf 1 grubuna girmektedir. Dolayısı ile bu bölge şebekeye bağlanacak bir enerji sistemine uygun değildir. Bu güç sınıfı akü şarj etme veya su pompalamak gibi küçük enerji sistemleri için uygun olabilmektedir.
3. Aylık ortalama saatlik rüzgar hızı ve güç yoğunluğu değerleri özellikle öğleden sonraki saatlerde ortalamanın oldukça üzerinde bir potansiyeli işaret etmektedir. Bu da, özellikle bu saatlerde olan yüksek enerji ihtiyacının olası bir rüzgar enerji sisteminden ekonomik koşullarda karşılanabileceği yönünde bir potansiyeli göstermektedir.
4. İskenderun rüzgar hızı verileri için, Weibull fonksiyonunun olasılık yoğunluk dağılımlarını Rayleigh ye oranla daha iyi modellediği görülmektedir.
5. İncelenen tüm aylarda Weibull modelinin aylık güç yoğunluğu değerlerini Rayleigh modeline oranla daha küçük bir hata oranı ile hesapladığı görülmektedir.

Referanslar

- [1] Lynch R. An energy overview of the Republic of Turkey, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, [http. //www.fe.doe.gov/international/turkover.html](http://www.fe.doe.gov/international/turkover.html).
- [2] Oztopal A, Sahin AD, Akgun N, Sen Z. On the regional wind energy potential of Turkey. *Energy* 2000;25:189-200.
- [3] Durak M, Sen Z. Wind power potential in Turkey and Akhisar case study. *Renewable energy* 2002;25:463-472.
- [4] Sahin AD. Hourly wind velocity exceedence maps of Turkey, *Energy Conversion and Management* 2003;44:549-557.
- [5] Seguro JV, Lambert TW. Modern estimation of the parameters of the Weibull probability density distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2000;85:75-84.
- [6] Pallabazzer R, Gabow A. Wind resources of Somalia. *Solar Energy* 1991;46(5):313-322.
- [7] Pashardes S, Christofides C. Statistical analysis of wind speed and direction in Cyprus. *Solar Energy* 1995;55(5):405-414.
- [8] Jamil M, Parsa S, Majidi M. Wind power statistics and evaluation of wind energy density. *Renewable Energy* 1995;6(5):623-628.
- [9] Hennessey JP. Some aspects of wind power statistics. *Journal of Applied Meteorology* 1977;16(2):119-128.
- [10] Dorvlo ASS. Estimating wind speed distribution. *Energy Conversion and Management* 2002;43:2311-2318.
- [11] Garcia A, Torres JL, Prieto E, De Francisco A. Fitting probability density distributions: A case study. *Solar Energy* 1998;62(2):139-144.

- [12] Corotis RB, Sigl AB, Klein J. Probability models for wind velocity magnitude and persistence. Solar Energy 1978;20:483-493.
- [13] Hennessey Jr JP. A comparison of the Weibull and Rayleigh distributions for estimating wind power potential. Wind Engineering 1978;2(3):156-164.
- [14] Mathew S, Pandey KP, Kumar AV. Analysis of wind regimes for energy estimation. Renewable Energy 2002;25:381-399.

ρ	Hava yoğunluğu (kg/m ³)
σ	Standart sapma (m/s)
Γ	Gamma fonksiyonu
c	Weibull scala parametresi (m/s)
f(v)	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
f _j	Her bir rüzgar hızı sınıfının oluş sıklığı
f _R (v)	Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu
f _W (v)	Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu
FR(v)	Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu
FW(v)	Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu
k	Weibull şekil parametresi
n	Rüzgar hızı sınıflarının sayısı
N	Belli bir zaman periyodundaki saat sayısı
P(v)	Birim alan başına rüzgar gücü (W/m ²)
P _m	Ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)
P _{m,R}	Referans ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)
PR	Rayleigh fonksiyonu ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)
PW	Weibull fonksiyonu ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)
PW,R	Hata hesaplarında kullanılan Weibull veya Rayleigh fonksiyonları ortalama güç yoğunluğu değerleri (W/m ²)
R ₂	Korelasyon katsayısı
v	Rüzgar hızı (m/s)
v _m	Ortalama rüzgar hızı (m/s)