

# Rüzgar Enerjisi Değişkenliğinin Güç Sistemlerine Etkileri

<sup>1</sup>Eşref DENİZ, <sup>2</sup>Numan S. ÇETİN

<sup>1</sup>Akademi Mühendislik, Muğla  
[deniz@akademimuhendislik.net](mailto:deniz@akademimuhendislik.net)

<sup>2</sup>Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, Bornova, İzmir  
[numan.sabit.cetin@ege.edu.tr](mailto:numan.sabit.cetin@ege.edu.tr)

## Özet:

Rüzgar enerjisinin güç sistemleri içindeki payı arttıkça, rüzgar güç dalgalanmalarının sistem üzerindeki etkileri ve yan hizmet gereksinimleri konuları önem kazanmaktadır. Bu dalgalanmaların analizi için bir çok araştırma ve proje yapılmıştır. Bu çalışmada bu proje ve araştırmalarda elde edilen verilerin istatistiksel bir analizi yapılmaktadır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar ışığında, rüzgar hızındaki değişimlerin sebep olduğu rüzgar gücü dalgalanmalarının nadiren ekstrem değerlere ulaştığı ve bu dalgalanmaların tamamen rastgele gerçekleşmediği görülebilmektedir.

Bir rüzgar çiftliği açısından bu dalgalanmaların şiddeti ve gerçekleşme sıklığı direkt olarak rüzgar türbini sayısına ve bu türbinlerin arazideki dağılımlarına bağlıdır. Bir güç sistemi için de rüzgar gücü dalgalanmaları, rüzgar çiftliği sayısına ve bu çiftliklerin coğrafi dağılımına bağlıdır

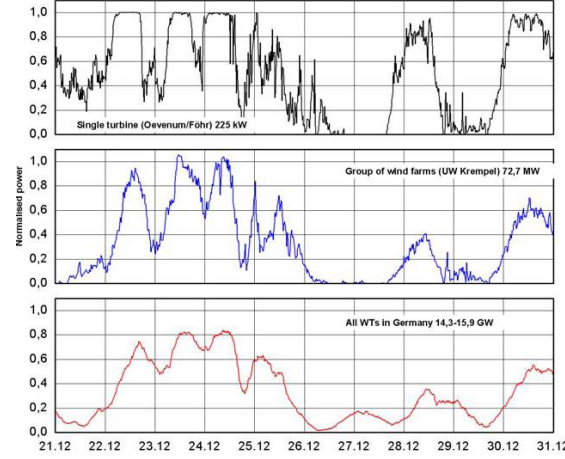
Bu çalışmada ayrıca rüzgar çiftliklerinin güç çıkışları arasındaki ilişkilerin istatistiksel bir analizi yapılmıştır. Bu analizi sonucunda farklı rüzgar çiftliklerinin güç çıkışları arasındaki korelasyonlar ortaya konulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Rüzgar Türbini, Rüzgar Enerjisi, Rüzgar Gücü Dalgalanması,

## 1. Giriş

Rüzgar enerjisinin güç sistemleri içindeki payı arttıkça, rüzgar güç dalgalanmalarının sistem üzerindeki etkileri ve yan hizmet gereksinimleri konuları önem kazanmaktadır. Rüzgardan elde edilen güç zaman içinde genellikle meteorolojik olayların etkisiyle dalgalanır. Dalgalanmalar bütün zaman skalalarında gözlemlenebilir; saniye, dakika, saat, ay, mevsim, yıl. Bu dalgalanmaların anlaşılabilmesi ve tahmin edilebilirliği rüzgar enerjisinin güç sistemlerine entegrasyonu ve rüzgar gücünden en yüksek derecede faydalanılması bakımından oldukça önemlidir.

Güç sistemlerde günlük, saatlik ve dakikalık dalgalanmalar dikkate alınır. Yüksek miktarda rüzgar enerjisi girişinin görüldüğü sistemlerde rüzgar gücündeki aşırı dalgalanmalarla bu dalgalanmaların olasılıkları önem kazanır [1]. Güç sistemlerinin analizinde rüzgarın değişkenliğini doğru yorumlamak gerekir. Eğer rüzgar gücü coğrafi olarak homojen bir biçimde dağıtılmışsa değişkenlik bir ölçüde azaltılabilir ve önemli ölçüde tahmin edilebilir. Rüzgar türbinlerinin geniş coğrafi alanlara dağıtılması sıfır çıkış gücünün görüldüğü zaman diliminin azalmasını sağlar [1,2].



Şekil 1: Tek bir rüzgar türbinin, bir rüzgar çiftliği gurubunun ve Almanya'daki bütün rüzgar çiftliklerinin normalize edilmiş güç çıkışlarının zaman serisi grafikleri (21 – 31.12.2004 tarihleri arası için [3] )

Rüzgar gücü iddia edilenin aksine “kesintili” bir enerji kaynağı değildir. Bir güç sistemi genelinde şebekeye rüzgar gücü girişinin sıfırlandığı zaman aralıkları olabilir. Fakat bu zaman aralıkları önceden tahmin edilebilir. Rüzgar gücünün sıfır seviyesine düşüşü, zaman içinde kademeli olarak gerçekleşir [4]. Tesis sayısının yüksekliği ve bu tesislerin dağıtıldığı alanın genişliği büyüdükçe sıfır seviyesine düşüş daha yumuşak bir şekilde gerçekleşir. Böylece rüzgar enerjisinin baz yüke yaptığı katkı da artar [4,5].

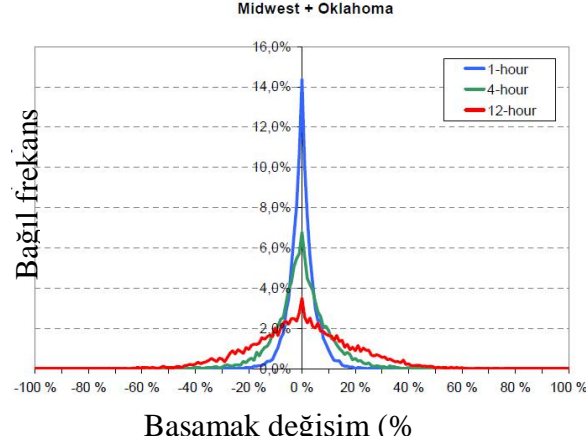
## 2. Kısa Dönem Dalgalanmalar

Rüzgar gücünün şebekeye entegrasyonu bakımından kısa dönemli (saniyeden birkaç saate kadar) dalgalanmalar önemlidir. Çünkü bu dalgalanmalar dengeleme amaçlı güç üretiminin ve yedek rezervlerin programlanmasını büyük oranda etkilerler [6].

Tablo-1. ABD'nin Orta Batısında bulunan büyük bir rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinlerinin artan toplam sayısına göre rüzgar gücü basamak değerlerinin ortalamaları (Ort.) ve standart sapma değerleri (Std.) [4]

		14 türbin		61 türbin		138 türbin		250 + türbin	
		kW	%	kW	%	kW	%	kW	%
1 sn.	Ort.	41	0,4	172	0,2	148	0,1	189	0,1
1 sn.	Std.	56	0,5	203	0,3	203	0,2	257	0,1
1 dk.	Ort.	130	1,2	612	0,8	494	0,5	730	0,3
1 dk.	Std.	225	2,1	1038	1,3	849	0,8	1486	0,6
10 dk.	Ort.	329	3,1	1658	2,1	2243	2,2	3713	1,5
10 dk.	Std.	548	5,2	2750	3,5	3810	3,7	6418	2,7
1 sa.	Ort.	736	7,0	3732	4,7	6582	6,4	12755	5,3
1 sa.	Std.	1124	10,7	5932	7,5	10032	9,7	19213	7,9

Rüzgar gücündeki dalgalanmalarla ilgili bulguları şu şekilde özetleyebiliriz:

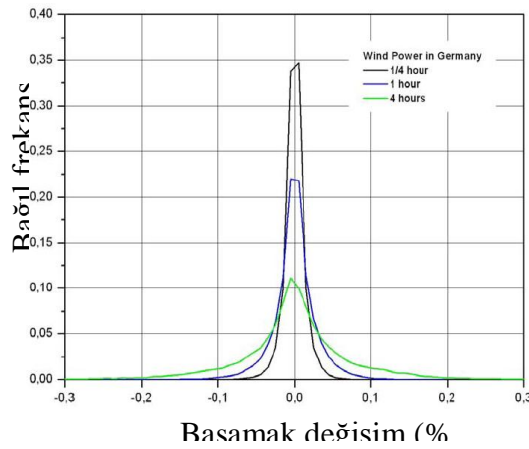


Şekil 2: ABD Orta Batı ve Oklahoma’da kurulu rüzgar çiftliklerinin toplam güç üretiminin saatlik, 4 saatlik ve 12 saatlik basamak değışimlerinin dağılımları [4].

Dağıtılmış rüzgar gücündeki çok hızlı (saniye – dakika seviyesinde) dalgalanmalara nadiren rastlanır. Bu durum tek bir rüzgar çiftliğine ait rüzgar gücü değęerlerinin bulunduğu Tablo-1’de de görülmektedir. Bu tablodaki büyük rüzgar çiftliği için 1 saniyelik dalgalanmaların standart sapması sadece % 0,1’dir. Zaman aralığı arttıkça dalgalanmalar da artmaktadır. Mesela 14 türbin için 10 dk. içerisinde gözlemlenen dalgalanmanın standart sapması nominal kapasitenin % 5,2’ si iken, 1saat için aynı değęer % 10,7’ ye yükselmektedir[4,7,8].

Şekil 2’de de görüldüğü gibi kısa zaman aralıkları için büyük değışimler sıklıkla görülmez. Rüzgar gücü dalgalanmaları gözlem aralıklarıyla artsa da Şekil 2’den şu sonucu çıkarabiliriz; basamak değışimlerinin bir çoğunun şiddeti düşüktür ve rüzgar gücü kısa vadede dar bir bantta dalgalanır, büyük basamak değışimleri nadiren görülür. Şekil 3’te gösterilen farklı bir araştırmaya ait grafik de bu sonuçları doğrulamaktadır.

Türbin sayısındaki artışın dalgalanmalardaki düzeltmeye etkisi Tablo 1’de görülebilir. Bir dakikalık basamak değışimlerinin yer aldığı satırda, 14 türbin için nominal kapasitenin % 2,1 değęerindeki standart sapması 250+ türbin için nominal kapasitenin % 0,6’sına kadar düşmektedir [4].



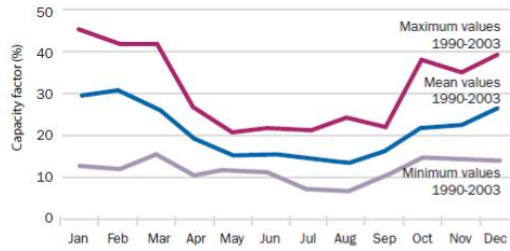
Şekil 3: Almanya’da ¼, 1 ve 4 saatlik aralıklarla ölçülen bağıl güç değışimlerinin frekansları [9].

### 3. Uzun Dönem Dalgalanmalar

Daha yavaş ya da daha uzun dönemde gerçekleşen dalgalanmalar iklimsel değişikliklerin sebep olduğu mevsimsel veya yıllık değişimlerdir. Bu dalgalanmaların şebekenin günlük programlanmasında pek bir önemi yoktur, fakat stratejik planlamada önemli rol oynarlar.

Rüzgar gücünün enterkonnekte sistemin güvenilir bir şekilde işletilmesine olan katkısı, kapasite kredisini olarak adlandırılır. Sistemden çekilen gücün arttığı zaman aralıklarındaki kapasite faktörü düşük rüzgar girişleri için belirlenen kapasite kredisine göre derecelendirilir. Bu yüzden aylık kapasite faktörleri güç sisteminde üretim tahminlerinin yapılması bakımından önemlidir.

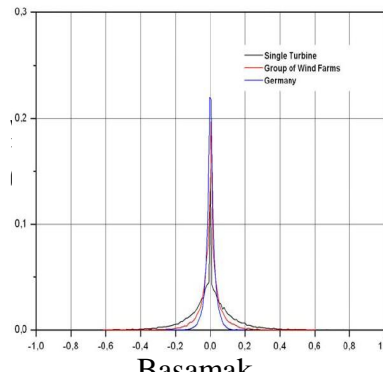
Şekil 4'te görüldüğü gibi rüzgar gücündeki aylık dalgalanmalar özellikle yaz aylarında dar bir bantta hareket etmektedir. Böylece üretim planlamalarında bu dalgalanmaları göz önünde bulundurmamak zor olmamaktadır [3].



Şekil 4: Almanya için 1990 – 2003 yılları arasındaki ortalama, en yüksek ve en düşük aylık kapasite faktörleri [3].

### 4. Coğrafi Dağılımın ve Birleştirmenin Etkileri

Bir rüzgar çiftliğindeki çok sayıdaki rüzgar türbini birbirleriyle senkronize bir şekilde çalışmazlar. Bu rüzgar türbinlerinin çıkış güçleri aynı anda yükselmez ya da düşmez. Bir hava kütlesi çiftliğin üzerinden geçerken bazı türbinlere diğerlerinden daha önce ulaşır. Türbinlerden bazılarının çıkış güçleri düşerken, diğerlerinininde artış gözlenir. Bunun sonucunda tesisin tamamının güç çıkışındaki dalgalanmalar, tek bir türbin ya da bir türbin grubunun çıkış dalgalanmalarına göre azdır. Bu durum Almanya'da yapılan bir çalışmanın sonuçlarına göre hazırlanan Şekil 5'de görülmektedir [4,10].



Şekil 5: Almanya'da tek bir rüzgar türbininin, bir grup rüzgar çiftliğinin ve tüm rüzgar çiftliklerinin 1 saatlik aralıklarla (15 dakikalık ortalama değerlerle) ölçülen güç değişimlerinin grafiği [9]

Geniş alanlara dağılan rüzgar çiftleri için rüzgar çiftliklerinin kısa dönemli ve yerel rüzgar dalgalanmaları birbirleriyle ilişkili değildir, böylece birbirlerini dengeleyebilirler. Böylece güç sisteminde, rüzgar gücünden dolayı görülen dalgalanmaların genlikleri azaltılabilir. Yukarıdaki Şekil 5 için, türbinlerin ve tesislerin dağıldığı alan genişledikçe bağıl frekansın azaldığı görülmektedir. Tek bir rüzgar çiftliğinin çıkışındaki saatlik dalgalanmalar kapasitenin % 60 değerine kadar ulaşırken, bütün Almanya'ya yayılmış 350 MW rüzgar gücündeki dalgalanma toplam kapasitenin % 20' sini aşmamaktadır (ISET). Rüzgar türbinlerinin bir güç sistemi içindeki coğrafi dağılımları kısa dönemli dalgalanmalarla başa çıkmak bakımından oldukça etkili bir metottur. Coğrafi olarak homojen dağıtılmış ne kadar çok rüzgar çiftliği varsa sistemin dalgalanmalardan etkilenmesi o kadar az olur [9].

## 5. Rüzgar Çiftlikleri Arasındaki Korelasyon

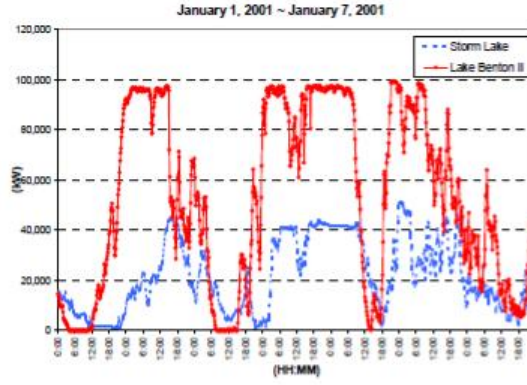
Birbirine yakın türbinlerin çıkış profilleri arasındaki benzerlik, uzak türbinlerin çıkış profilleri arasındaki benzerlikten daha yüksektir. Matematiksel olarak bu çıkış benzerliği korelasyon katsayısı yardımıyla hesaplanabilir. Aynı şekilde farklı rüzgar çiftliklerinin toplam çıkışlarının korelasyon katsayıları, bu rüzgar çiftliklerinin çıkış güç dalgalanmaları hakkında bir fikir verebilir[3,11].

Tablo-2. Storm Lake ve Lake Benton II rüzgar çiftlikleri arasındaki korelasyon katsayıları [3].

Ay	Ortalama	Günlük Değer Aralıkları
Oca. 2001	0,527	-0,528 – 0,780
Şub. 2001	0,568	-0,297 – 0,969
Mar. 2001	0,572	-0,103 – 0,901

Wan'ın çalışmasında, aralarında 200km mesafe bulunan Storm Lake ve Lake Benton II rüzgar çiftliklerinin çıkışları arasındaki korelasyon 2001'in ilk 3 ayı için hesaplanmıştır. Çıkış güçleri arasındaki ilişkinin bulunmasına yönelik veriler Tablo-2'de özetlenmektedir. Bu tabloda aylık ortalama korelasyon katsayıları ve günlük değerlerin aralıkları gösterilmektedir. Ortalama değerlerin küçük olması, bu iki tesisin çıkış güçleri arasındaki ilişkinin zayıf olduğunu göstermektedir [4].

Şekil 6'da Lake Benton II ve Storm Lake rüzgar çiftliklerinin 2001 yılının Ocak ayının ilk 7 günündeki güç çıkışlarının 10 dakikalık ortalamalarının grafiği görülmektedir. Bu zaman aralığında hesaplanan 0,612 değerindeki korelasyon katsayısı iki çıkış rejimi arasında kuvvetli bir ilişkinin bulunmadığına işaret etmektedir. Fakat grafik dikkatlice incelenecek olursa, kısa bir gecikmeyle bu çıkışlar arasında kuvvetli bir benzerliğin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 6: Storm Lake ve Lake Benton II rüzgar çiftliklerinin çıkış profilleri arasındaki ilişki [4]

Storm Lake rüzgar çiftliğinin çıkış pateni, Lake Benton rüzgar çiftliğinininkinin biraz sağa kaymış halinin aynısıdır [4]. Bu durumun sebebi, kış ayları boyunca bu bölgedeki rüzgar rejimine kuzey ve kuzeybatı yönüne hareket eden cephelerin hakim olmasıdır. Rüzgar çiftliklerinin güç çıkışları arasındaki bu tip benzerlikler rüzgar çiftliklerinin güç çıkışlarının yüksek bir doğrulukla tahmin edilebilmesi için önemli ip uçları sunmaktadır. Uygun rüzgar gücü modelleri ve stratejik olarak yerleştirilmiş rüzgar sensörleri yardımıyla uygun maliyetle yüksek çözünürlüklü rüzgar çiftliği güç çıkışı tahminleri yapmak mümkündür.

## 6.SONUÇLAR

Bu bildiri çeşitli ülkelerde yapılan değişik çalışmalardan toplanan, rüzgar türbinlerine ve rüzgar çiftliklerine ait gerçek verilerin istatistiksel analizleri ve rüzgar çıkış gücündeki dalgalanmalar üzerinde durulmuştur. Bu analizlerden çıkarılan sonuçları şu şekilde özetleyebiliriz:

- Rüzgar gücü dalgalanmaları doğası gereği stokastik olsa da rüzgar hızındaki değişimlerden kaynaklanan bu dalgalanmalar aşırı değerlere nadiren ulaşırlar ve asla tamamen rasgele değildirler.
- Bir rüzgar çiftliğindeki türbin sayısı arttıkça rüzgar türbininin çıkışındaki dalgalanmaların genlikleri azalır.
- Bir güç sistemindeki rüzgar çiftliği sayısı ve bu çiftliklerin dağıldığı coğrafi alanın genişliği arttıkça, bu sistemdeki toplam rüzgar gücündeki dalgalanmaların genlikleri azalır.
- Bir rüzgar çiftliğinin çıkış gücü pateni belirli bir gecikmeyle arada yüzlerce kilometrelik mesafeler olsa da başka bir rüzgar çiftliğinde görülebilir. Bu veri bir çiftliğin çıkış gücünün uygun maliyetle yüksek doğrulukla tahmin edilmesine imkan sağlar.

## 7. KAYNAKLAR

[1] Holttinen H et al, State-of-the-art of design and operation of power systems with large amounts of wind power summary of IEA wind collaboration EWEC2007: Proc.European Wind Energy Conf., Milan, May 2007.

[2] Holttinen H, Lemström B, Meibom P, Bindner H, Ortho A, Van Hulle F, Ensslin C, Tiedemann A, Hofmann L, Winter W, Tuohy A, O'Malley M, Smith P, Pierik J, Tande J O,

Estanqueiro A, Gomez E, Söder L, Strbac G, Shakoor A, Smith J C, Parsons P, Milligan M and Wan Y 2007 Design and operation of power systems with large amounts of wind power State-of-the-art Report VTT Working Papers 82, VTT, Espoo, Finland, 2007.

[3] DENA, 2005. Planning of the grid integration of wind energy in Germany onshore and offshore up to the year 2020 (dena Grid study). Deutsche Energie-Agentur Dena, March 2005.

[4] Wan, Y, Fluctuation and Ramping Characteristics of Large Wind Power Plants. Windpower 2005 (Windpower 05) Conference and Exhibition (CD-ROM), 15.18 May 2005,

[5] Giebel, G. 2007. A Variance Analysis of the Capacity Displaced by Wind Energy in Europe. Wind Energy 2007; 10, pp. 69.79.

[6] Ernst, B. Analysis of wind power ancillary services characteristics with German 250 MW wind data. NREL Report No. TP-500-26969. 38 p. 1999.

[7] Sorensen P., A. D. Hansen, and P. A. C. Rosas, "Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms," J. Wind Eng. Ind. Aerodynam., vol. 90, pp. 1381–1402, 2002.

[8] Sorenen P., Cutululis N.A., Rodriguez A. V., Power Fluctuations from Large Wind Farms, IEEE Transactions on Power Systems, VOL.22, NO.3 , pp. 958 - 960. 2007

[9] ISET, 2005. Wind Energy Report Germany 2005, ISET, Kassel. 218

[10] T. Nanahara, M. Asari, T. Sato, K. Yamaguchi, M. Shibata, and T. Maejima, "Smoothing effects of distributed wind turbines. Part 1. Coherence and smoothing effects at a wind farm," Wind Energy, vol. 7, pp. 61–74, 2004.

[11] Parson B., Milligan M., Zavadil B., Brooks D., Kirby B., Dragoon K., and Caldwell J., "Grid impacts of wind power: A summary of recent studies in the united states," Wind Energy, vol. 7, pp. 87–108, Apr./Jun. 2004.

[12] Axelsson, U., Murray, R. & Neimane, V. 4000 MW wind power in Sweden . Impact on regulation and reserve requirements. Elforsk Report 05:19, 2005.

[13] Strbac G, Shakoor A, Black M, Pudjianto D and Bopp T Impact of wind generation on operation and development of the future UK electricity systems Electr. Power Syst. Res. 2007, 77 1143–238