

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**İSTANBUL BÖLGESİ İÇİN RÜZGAR ŞİDDETİNİN SPEKTRAL
YOĞUNLUK ANALİZİ VE ÖNGÖRÜ SERİLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif KAYA

(301081010)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Bihrat ÖNÖZ (İTÜ)
Doç. Dr. Sibel MENTEŞ (İTÜ)

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam boyunca sahip olduğu tüm bilgi, deneyim ve olanakları ile bana her açıdan yol gösteren sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Burak BARUTÇU'ya çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamın yapılandırılmasından sonuçlandırılmasına kadar, her aşamada bilgisi ve desteği ile sağladığı büyük katkılarından dolayı Doç.Dr. Ş. Sibel MENTEŞ'e minnettarım.

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim süresince bana güvenen ve beni yüreklendiren değerli hocam Prof.Dr. Cenap Ş. ÖZBEN'e çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan dostum Semiha BAYLAN'a sonsuz teşekkürler.

Tüm hayatım boyunca benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, bana karşı gösterdikleri sevgi, sabır, anlayış ve sağlamış oldukları maddi, manevi destekleriyle her zaman yanımda olan geniş aileme minnettarım.

Haziran 2010

Elif KAYA

Fizik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR METEOROLOJİSİ	7
2.1 Rüzgar Oluşumu	7
2.1.1 Basınç Gradyeni (Eğimi) Kuvveti	7
2.1.2 Koriolis Etkisi	8
2.1.3 Küresel Ölçek Sürkülasyonu	10
2.1.4 Yüzey Basıncı ve Rüzgar	10
2.1.5 Mevsim (Muson) Rüzgarları	12
2.1.6 Günlük Rüzgarlar	12
2.1.7 Yerel Rüzgarlar	14
3. VAN DER HOVEN SPEKTRUMU	17
3.1 Giriş	17
3.2 Van der Hoven'ın Çalışması	19
4. WEIBULL OLASILIK YOĞUNLUK FONKSİYONU	25
4.1 Giriş	25
5. ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜSÜ	29
5.1 Zaman Serisi.....	29
5.2 Öz-Bağımlı (Auto-Regressive: AR) Model	29
5.3 Yapay Sinir Ağları.....	30
5.3.1Yapay Sinir Ağının Temel Özellikleri	32
5.4 Yapay Sinir Ağlarının Zaman Serisi Öngörüsünde Kullanımı	32
5.5 Model ile Analiz Sonrası Gerçek Veriler Arasındaki Uygunluk Derecesinin Ölçüsü: R^2	33
6. SONUÇLAR	35
6.1 Hesaplamalar	35
6.1.1Weibull Katsayıları	35
6.1.2 AR modeli Sonuçları.....	35
6.1.2Yapay Sinir Ağı Sonuçları	37
6.2 Sonuçlar	38
KAYNAKLAR	43

KISALTMALAR

ABK	: Akaike Bilgi Kriteri
AR	: Auto Regressive
SBK	: Schwarz Bilgi Kriteri
SÖH	: Son Öngörü Hatası
WMO	: Dünya Meteoroloji Örgütü
YSA	: Yapay Sinir Ağı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Şekil 3.2 deki yatay rüzgar şiddeti spektrumun bölümleri.....21

Çizelge 3.2 : Yatay rüzgar şiddeti spektral boşluğunun karakteristikleri.....24

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Van der Hoven spektrumu	3
Şekil 2.1 : Basınç gradyan kuvvetinin oluşumu.....	8
Şekil 2.2 : Koriolis etkisi	9
Şekil 2.3 : Basit dolaşım	9
Şekil 2.4 : Üç hücre teorisi.....	10
Şekil 2.5 : Deniz ve kara meltemleri	13
Şekil 2.6 : Vadi ve dağ meltemleri.....	14
Şekil 3.1 : Atmosferdeki geniş ölçekli quasi-2 boyutlu girdap hareketlerinin kinetik enerji spektrumu E_{cc} (10^{-4} rad ² gün ⁻²).....	19
Şekil 3.2 : Van der Hoven Spektrumu	22
Şekil 4.1 : Boyut parametresi $c=10$, şekil parametresi $k=1, 2$ ve 3 iken Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu.....	26
Şekil 4.2 : Şekil parametresi $k=2$ ve ölçek parametresi $c= 8$ ile 6 mil/sa arasında değişken iken Weibull (Rayleigh) olasılık yoğunluk fonksiyonu dağılımı.....	27
Şekil 5.1 : Bir nöron hücresinin matematiksel modeli	32
Şekil 5.2 : Zaman serisi tahmini için YSA metodu.....	33
Şekil 6.1 : 1'den 100'e kadar model mertebeleri için ABK değerleri.....	36
Şekil 6.2 : Rüzgar işareti ve AR modeliyle elde edilen öngörü serisi.....	36
Şekil 6.3 : Logaritmik sigmoid fonksiyonu	37
Şekil 6.4 : Rüzgar işareti ve YSA ile elde edilen öngörü serisi	38
Şekil 6.5 : Gerçek işaretin özgüç spektral yoğunluğu	40
Şekil 6.6 : AR modeli ile elde edilen özgüç spektral yoğunluğu	40

Şekil 6.7 : YSA ile elde edilen özgüç spektral yoğunluğu.....41

İSTANBUL BÖLGESİ İÇİN RÜZGAR ŞİDDETİNİN SPEKTRAL YOĞUNLUK ANALİZİ VE ÖNGÖRÜ SERİLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

ÖZET

Enerji kaynakları yenilenemeyen ve yenilenebilir olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Uzun yıllar yenilenemeyen enerji kaynakları emre amadelikleri ile özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin vazgeçilmezi olmuştur. Fakat yenilenemeyen enerji kaynaklarının sınırı, kontrol edilemeyen fiyatları ve çevreye olan etkileri, günümüz ekonomilerini yenilenebilir enerjiye yatırım yapmaya zorlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından Rüzgar Enerjisi özellikle 1990 sonrası sektörel olarak en çok gelişimi sağlayan kaynaklardandır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgarın en çok dikkati çeken karakteristiği ise değişkenliğidir. Rüzgardan elde edilecek enerjinin öngörülebilmesi için bu değişkenliğin tahmin edilebilir olması çok önemlidir. Van der Hoven spektrumu rüzgar işaretinin belirli frekans bileşenlerini taşıdığını göstermektedir. Dolayısıyla rüzgar şiddetinin öngörülmesinde kullanılan zaman serisi öngörü metotlarının tahmin serilerinin bu spektral bileşenleri taşıyıp taşıyamaması durumu metotların yeterliliği açısından bir ip ucu oluşturacaktır. Bu tez çalışmasında Atatürk Havalimanı'nda bulunan otomatik meteorolojik gözlem sisteminden (AWOS) elde edilen 10m'de 2005-2009 yılları arasında bir dakikalık aralıklarla örneklenmiş rüzgar şiddeti verisi kullanılmıştır.

Bu çalışmada rüzgar şiddetinin öngörüsü için bir lineer bir de non-lineer, sırasıyla AR Modeli ve Yapay Sinir Ağı metotları zaman serisi öngörüsünde denenerek işaretin içerdiği karakteristik frekans bileşenlerinin öngörü serilerinde ne kadar iyi modellenebildiği araştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre rüzgar verisinin öngörüsünde Yapay Sinir Ağı'nın denenen bu iki metod içinde üstün bir başarı gösterdiği görülmektedir. Buna rağmen AR modeli de spektral karakteristiği bir yere kadar yansıtılabilmektedir.

ANALYSIS OF SPECTRAL DENSITY OF WIND INTENSITY FOR THE ISTANBUL REGION AND EFFECTS ON THE PREVISION SERIES

SUMMARY

Energy sources are divided into two groups as non-renewable and renewable energy sources. Especially for developed and developing countries, with order ready-non-renewable energy sources has been indispensable for many years. But today's economies are forced to invest in renewable energy because of the limit of non-renewable energy resources, uncontrolled prices and their effects on the environment. Wind energy is one of the renewable energy sources that providing as an industry the most improvement, especially after 1990. The most conspicuous features of the wind as a renewable energy resource is its variation. Estimation of this variation is very important to preplan produce of wind energy. Spectrum of Van der Hoven indicates that wind signature has the specific frequency components. Thus, if prediction series of time series that using in estimation of wind intensity respects the similar spectral components, this will creates a clue for an adequacy of methods. In this study, from located at Ataturk Airport by an automatic weather observation system (AWOS) between the years 2005 to 2009, in 10 m, a minute intervals sampled of wind data were used.

In this thesis, for wind data prediction a linear and non-linear two prediction methods, respectively, AR Model and Artificial Neural Network methods applied to time signature. And then with the results of predictions series, prediction methods were evaluated in terms of how well contained the characteristic frequency components in projected series. According to the results of analysis in prediction of wind data, Artificial Neural Networks have an excellent success. Despite this, AR model is able to reflect the spectral characteristics up to a point.

1. GİRİŞ

Sanayi devrimiyle birlikte değişen dünyanın, enerji kaynaklarına ulaşımı ve bu kaynakların verimli olarak kullanımı birinci problemi haline gelmiştir. Enerji kaynakları yenilenemeyen ve yenilenebilir olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Uzun yıllar yenilenemeyen enerji kaynakları emre amadelikleri ile özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin vazgeçilmezi olmuştur. Fakat yenilenemeyen enerji kaynaklarının sınırı -dünya petrol üretimindeki düşüş, doğal gaz kaynaklarındaki azalma-, kontrol edilemeyen fiyatları ve çevreye olan etkileri -küresel iklim değişikliği ve onun pahalı etkileri- günümüz ekonomilerini yenilenebilir enerjiye yatırım yapmaya zorlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında ise Rüzgar Enerjisi özellikle 1990 sonrası sektörel olarak en çok gelişimi sağlayan kaynaklardandır (Chiras, 2009).

2009 yılında (%31.7 büyüme oranıyla) eklenen 38,312 MW rüzgar santralıyla dünya genelinde toplam kurulu rüzgar gücü 159,213 MW'a ulaşmıştır. 2010 yılında 203,500 MW ve 2020 yılında 1,900,000 MW kurulu güce ulaşılacağı öngörülmektedir. Rüzgar gücü kapasitesi her üç yılda bir ikiye katlanmaktadır. Rüzgar enerjisinin hacmi 2009 itibari ile 50 milyar Avro'ya ulaşmıştır 2001 yılında kurulan 6,282 MW'lık rüzgâr türbini kapasitesi 2009 yılı itibariyle yaklaşık 6 kat artmıştır (<http://www.wwindea.org/home/index.php>, 22.04.2010).

Türkiye'de ise 1998 yılında ilk Rüzgar Enerji Santrali İzmir Çeşme'de üretime geçmiştir. Türkiye rüzgâr piyasasında atılım 2006 yılı itibariyle başlamış, Şubat 2009'da işletmedeki toplam kapasite 433.35 MW, inşa halindeki kapasite 402.4 MW ve türbin tedarik sözleşmesi imzalı proje toplamı 667.6 MW'a ulaşmıştır. Rüzgâr potansiyeli açısından 2008'de %61.2 ve 2009'da %138.9 büyüme hızıyla Türkiye dünya genelinde en yüksek büyüme hızı gösteren on ülke arasında (2009 itibariyle) 2. sırada yer almıştır (<http://www.wwindea.org/home/index.php>, 22.04.2010).

Rüzgardan elde edilen enerji rüzgarın şiddetinin küpü ile değişmektedir. Rüzgar enerjisi işletmesi, uygun yerin tanımlanması ve projelerin ekonomik açıdan gelecek

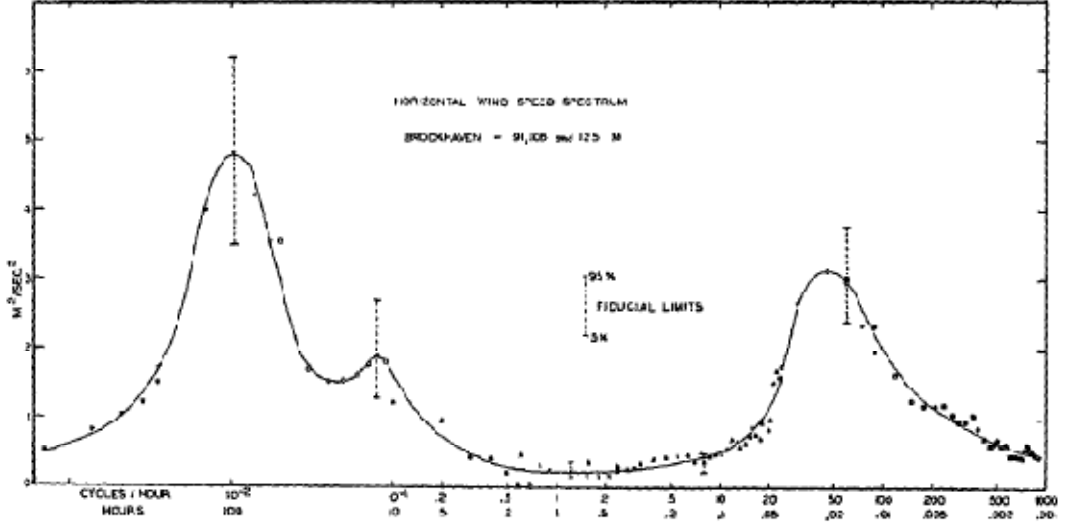
vaat edebilirliği açısından rüzgar kaynaklarının karakteristiklerini bilmek çok önemlidir (Burton ve diğerleri, 2001).

Bu açıdan bakıldığında rüzgar kaynaklarının en çok dikkati çeken karakteristiği değişkenliğidir. Ayrıca bu değişkenlik konum ve zaman boyutunda geniş bir ölçek aralığında devamlıdır (Burton ve diğerleri, 2001). Dünyanın yüzeyine yakın bölgelerde oluşan rüzgarlar jeostrofik ve yerel rüzgarların kombinasyonudur. Bu rüzgarlar coğrafik bölgeye, iklime, yeryüzünden ykseklіđe, arazinin engebeliğine ve etraftaki engellere bağlı olarak değişkendirler (Bianchi ve diğerleri, 2007).

Kısa süreli zaman aralıklarında elektrik ağına katılacak rüzgar gücünün tahmin edilebilir olması çok önemlidir. Yine kısa zaman aralıklarında dakikalardan saniyelere hatta daha da azı göz önüne alındığında türbülansın rüzgar türbinlerinin dizayn ve performansı üzerine etkileri çok fazladır (Burton ve diğerleri, 2001).

şekil 1.1'de görüldüğü üzere Van der Hoven'ın 1957 yılında New York Brookhaven'da kaydedilen kısa ve uzun süreli datalarla oluşturduğu rüzgar şiddeti spektrumu; sinoptik, günlük ve türbülans etkilerine işaret eden açık pikleri içermektedir (Hoven, 1957). Van der Hoven spektrumu atmosferik sınır tabakadaki rüzgar ve hava sistemlerinin bileşenlerinin ve karakteristiklerinin kapsamlı bir şekilde frekans bazında gösterildiği ilk spektrumdur (Straw, 2000). Bu spektrumda günlük ve türbülans piklerinin arasında spektral boşluk denilen bir aralık bulunmaktadır. Geniş ve derin boşluğun varlığı 0.1 ile 10 saat periyotlu osilasyonlara (meso-meteorolojik minimum) denk gelmektedir. Bu boşluk iki iyi biçimlenmiş maksimumu ayırır (sağda mikro meteorolojik maximum, solda sinoptik maximum) (Panchev,1985). Spektrumun 2 saat ve 10 dakikalık aralığında çok az bir enerji bulunmaktadır (Burton ve diğ., 2001).

Van der Hoven spektrumu rüzgar şiddetlerinin değişken olduğu üç farklı zaman dilimini içermektedir. Bu bölümlerden ilki 1 dakika aralığında ani rüzgarlar nedeniyle oluşmaktadır. İkincisi ise rüzgar hızındaki gece gündüz değişkenliğinden kaynaklı 12 saatlik dilimi göstermektedir. Yaklaşık 4 günlük bir zamanda oluşan en yüksek pik ise bir fırtına sisteminin rüzgar çiftliğini geçeceği ortalama zamanla ilgilidir (<http://www.ruzgarenerjisibirliği.org.tr/yayinlar/bilimsel/diger/makale/Yenilebilirlerin-Entegrasyonu.pdf>).



Şekil 1.1: Van Der Hoven spektrumu.

1970'lerde quasi-2 boyutlu sinoptik rüzgar değişimlerine denk gelen spektrumun sinoptik bölümü incelenmiştir. İstatistikler hem gerçek gözleme hem de nümerik GAC modelleri ile önceden tahmin edilen rüzgar değerlerine dayandırılmıştır. Elde edilen sonuçların bir kısmı Leith tarafından 1971'de analiz edilmiştir (Panchev, 1985)

Panofsky ve McCormick'in yaklaşık 100 m yükseklikte yatay ve düşey türbülansın spektrumlarının ve çapraz spektrumlarının analizinden elde ettikleri sonuçlar şöyledir (Panofsky ve McCormick, 1954):

- 100 çevrim/saatlik ve üstündeki frekanslarda spektral şiddet ortalama rüzgar şiddetinin karesi ile ışınım şiddetinden bağımsız olarak orantılıdır. Düşük frekanslarda ise spektral şiddet ortalama rüzgar şiddetine oranı gelen ışınım ile orantılı olarak artmaktadır.
- Yatay ve düşey rüzgar hızlarının birlikte spektrumlarının düşey spektrumlara oranında şiddet rüzgar artışı ile arttığı gözlenmiştir.
- Düşük frekanslarda yatay hız şiddetlerinin bileşenleri genellikle düşey hız şiddet bileşenlerinden daha büyüktür. Yüksek frekanslarda ise bileşenler aynı mertebe ve genliktedirler.
- Girdaplar düşük ışınımlarda düşük ve geniş, yüksek ışınımlarda ise uzundur.
- Ortalama enerjiye göre türbülansın oranı, bir dereceye kadar ağaçsız arazi geçitlerindeki hava akımlarında okyanus geçitlerindeki hava akımlarından daha büyüktür.

Griffith ve diğ. (1956)'nin çalışmasında ise Van der Hoven'ın çalışmasında olduğu gibi farklı zaman aralıklarında (2 günden 7300 güne kadar bir periyotta) Pennsylvania'da Universty Park'dan alınan sıcaklık dataları tek bir spektruma oturtulmuştur. Spektrumda 4 günlük ana bir pik ve bir çok küçük pik belirlenmiştir. 1967 yılında Hwang Palmyra adasında yaptığı çalışmada yüzey rüzgarlarının güç yoğunluk spektrumunu Van der Hoven spektrumundan daha dar bir frekans aralığında oluşturmuş, sonuç olarak girdap enerjisinin dağılımını orta ve yüksek frekanslarda orta enlemde bulunan bölgelerle benzer bulmuştur (Hwang, 1967). Oort ve Taylor (1969) ABD'nin kuzey doğusundaki altı meteoroloji istasyonundan alınan 10 yıllık 1 dakika ortalamalı, saatte bir alınan yüzey raporlarını yatay rüzgar şiddeti spektrumunun analizi için kullanmışlardır. 1 çevrim/2 saat ve 1 çevrim/2 yıl frekans aralıklarında spektrumun tahmini için hızlı Fourier dönüşümü tekniği kullanılmıştır. Kinetik enerji spektrumunda 24 saatlik ve 1 yıllık periyotlarda iki ana pike rastlanmıştır. Frye ve diğ. (1972)'nin Oregon'un sahil kesiminde yaptığı çalışmada ise rüzgar şiddeti spektrumunun analizi sonucu büyük günlük pik 24 saatlik periyotta, ve küçük mikro ölçekli pik ise yaklaşık 50 saniyelik periyotta görülmüştür. Günlük pikin, kara-deniz arasındaki sıcaklık dağılımının günlük değişimiyle ilişkisi vurgulanmıştır. Eggleston ve Clark (2000)'in ABD'nin Texas, Bushland bölgesinde yaptıkları çalışmada ise, 10 m yükseklikten saatte bir 13 yıllık, 5 dakikada bir 1 yıllık ve özel olarak 2 fırtınalı günde alınan saniyelik datalar ile oluşturulan güç spektrumunun analizi yapılmıştır. Spektrumun genel görünümünün Van der Hoven spektrumu ile uyumuna rağmen, daha az pik gözlenmiştir.

Bu çalışmada ise Van Der Hoven'ın 1957 yılında kısa periyotlu rüzgar öngörüsü için yaptığı çalışmadan yola çıkılmış, rüzgar öngörüsü için zaman serisi analiz metodları kullanılmıştır. Atatürk Havalimanı'nda bulunan meteorolojik ölçüm direklerinin 10m'deki 2005-2009 yılları arasında kaydedilen 5 yıllık rüzgar şiddeti verilerinin öngörü analizleri Öz-Bağlanımlı (Auto-Regressive: AR) model ve Yapay Sinir Ağları ile yapılmıştır.

Tezin amacı, spektral karakteristikleri belirlenip AR Modeli ve Yapay Sinir Ağı tabanlı iki öngörü metodunun zaman işaretine uygulanması sonucu elde edilen öngörü serisinin gerçek işaretin frekans karakteristiklerini taşıyıp taşımadığının belirlenmesi ve böylece kullanılmakta olan bu öngörü metodlarının ne kadar uygun olduğunun değerlendirilmesidir.

Bir zaman serisi, modellenmek istenen bir değişkenin belirli zaman aralıklarındaki hareketini gözlemler, değişkenin fiziksel yapısı hakkında herhangi bir ön bilgiye gereksinim duymaz. Zaman serilerini $x(t)$ vektör dizisi olarak tanımlayabiliriz. Burada $t = 0, 1, \dots$ şeklinde geçen zamanı temsil etmektedir. x t 'ye bağlı olarak değişken ve sürekli değerler almaktadır. Herhangi bir fiziksel sistemde zaman uzayında x değişkeni ayrık veriler elde edilebilecek biçimde örneklenebilir (Frank ve diğ., 2000).

Bu çalışmada öngörü analizine AR modeli ile başlanmıştır. AR-modeli basitliği ve model katsayılarının belirlenmesinde kullanılan etkin algoritmaların varlığı sebebiyle çok kullanılan bir metottur (Cohen, 1986). Verilerin AR modeli ile öngörüsü yapılırken model mertebesi ABK (Akaike Bilgi Kriteri) ile 11 olarak bulunmuştur. AR modelinin katsayıları ise Yule-Walker metodu ile belirlenmiştir.

Kullanılan ikinci öngörü metodu ise yapay sinir ağlarıdır. Yapay sinir ağları (YSA) bir nöron hücresinin yapısı ve öğrenme özellikleri temel alınarak geliştirilmiş bir hesaplama sistemidir. YSA modelinde de AR modeli ile karşılaştırma yapabilmek için aynı mertebeden bir aę kurulmuştur.

Girişinde 11 tane nod bulunan, bir gizli tabakaya sahip, çıkışında bir nöron bulunan bir YSA kullanılmıştır. YSA gizli tabakasındaki nöron sayısı giriş nodları ile çıkış nöronlarının toplamının yarısı (6) alınmıştır. YSA Levenberg Marquardt algoritması kullanılarak 500 adımda eğitilmiştir (Levenberg, 1944); (Marquardt, 1963). Gizli tabaka ve çıkış tabakasinda logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre rüzgar verisi öngörüsünde YSA'nın denenen bu iki metod içinde üstün bir başarı gösterdiği görülmektedir. Buna rağmen AR modeli de spektral karakteristiği bir yere kadar yansıtılabilmektedir.

2. RÜZGAR METEOROLOJİSİ

2.1 Rüzgar Oluşumu

Atmosfer devasa büyüklükte bir ısı makinesi olarak düşünüldüğünde, yüksek sıcaklıktaki rezervuar olarak güneşten çektiği ısıyı düşük sıcaklıktaki diğer bir rezervuar olan yeryüzüne iletimi sırasında, atmosferin içindeki gazların ve sınır bölgelerinin üzerinde yapılan işten kaynaklı, ortalama atmosfer basıncından yüksek veya düşük basınçlı yüzlerce kilometre çaplı geçici bölgeler oluşur (Johnson, 2001). Hava basıncındaki bu farklar atmosferik gazların yüksek hava basınçlı bölgeden alçak hava basıncı bölgesine doğru akışını sağlar, böylece rüzgar oluşur (Johnson, 2001). Dünya yüzeyinin homojen olmaması sebebiyle güneşten emilen enerjinin değişkenliği coğrafi dağılım, günlük ve yıllık dağılım zamanları ile ilişiktir (Hau, 2006).

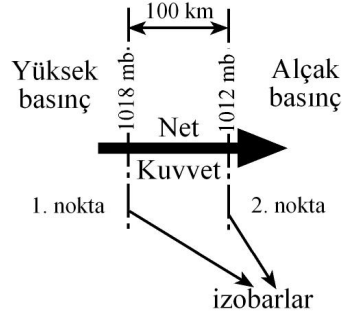
Rüzgarın şiddetine etkiyen faktörler merkezler arası basınç gradyeni, dünyanın dönüşü (Koriolis etkisi), eylemsizlik kuvvetleri ve coğrafi yapıdan kaynaklı sürtünmelerdir . Rüzgarın yönü ise basınç merkezlerinin konumu, yeryüzü şekilleri ve dünyanın dönüşü gibi etkenlere bağlı olarak değişir (http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_speed). Basınç merkezleri değiştikçe rüzgarın yönü de değişir.

Yeryüzü şekilleri rüzgarın esiş yönü üzerinde ise rüzgarın yönünü değiştirebilir, bir bölgede rüzgarın yıl içinde en fazla estiği yöne hakim rüzgar yönü denir. Dünyanın dönmesi sonucu rüzgarlar basınç merkezleri arasındaki en kısa yolu izleyemezler, rüzgarlar kuzey yarım kürede hareket yönünün sağına güney yarım kürede soluna saparlar (http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_speed).

2.1.1 Basınç Gradyeni (Eğimi) Kuvveti

Basınç gradyanı, basıncın belirli bir mesafedeki değişimi olarak tanımlanmaktadır. Aşağıdaki Şekil 2.1’de sol tarafta yüksek basınç alanı, sağ tarafta ise alçak basınç alanı görülmektedir. İzobarlar basınç değişimini vermektedir. Basınç değerlerindeki

farklılık, hava akımı üzerinde net bir kuvvetin oluşumunu sağlamakta olup, bu kuvvet *basınç gradyan kuvveti*'dir. Basınç gradyan kuvveti izobarlara dik olarak yüksek basınçtan alçak basınca doğru yönlenmiştir. Basınç gradyanı arttıkça, basınç gradyan kuvveti ve bunun sonucu olarak rüzgâr şiddeti artmaktadır. Hava haritaları incelendiğinde, birbirine yakın izobarların bulunduğu yerlerde daha büyük basınç gradyanı ve şiddetli rüzgâr görülmektedir.



Şekil 2.1: Basınç gradyan kuvvetinin oluşumu.

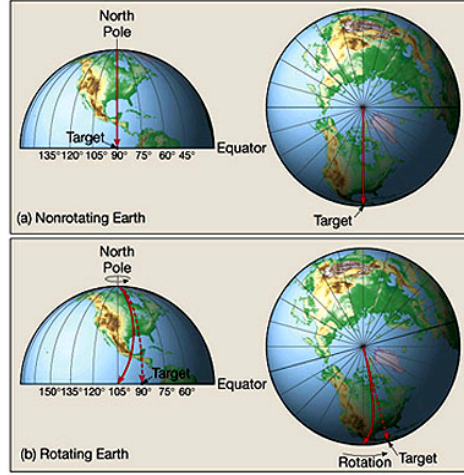
2.1.2 Koriolis Etkisi

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere Koriolis kuvveti dünyanın dönüşü nedeni ile ortaya çıkan bir kuvvettir ve dört temel karakteristik özelliği vardır.

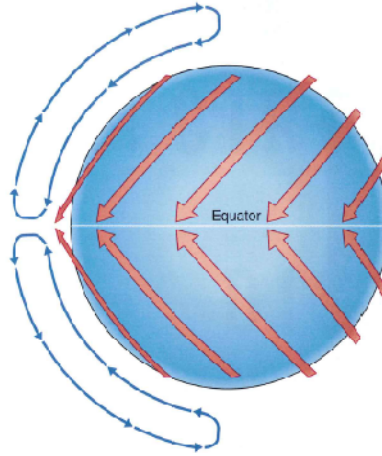
- Koriolis kuvveti hareketin yönüne bakmaksızın hareket eden bütün nesnelere açık bir sapma meydana getirir.
- Koriolis kuvveti ekvator bölgesinde sıfırken artan enlemle artar ve kutuplarda maksimum seviyeye ulaşır.
- Koriolis kuvvetinin etkisi hareket eden nesnenin hızı arttıkça artar.
- Koriolis kuvveti nesnenin sadece yönünü değiştirir, hızını değiştirmez (Aguado ve Burt, 2007).

Eğer bu etki göz ardı edilirse rüzgarların yeryüzü çevresindeki dolaşımı basit dolaşım (tek hücre teorisi) ile açıklanabilir. Tek hücre teorisi 1735 yılında İngiliz fizikçi Georgy Hadley tarafından atmosferin genel hareketlerini tanımlamak için önerilmiştir. Hadley, ekvator ve çevresinin güneş ışınları ile diğer enlemlere göre daha çok ısınmasının havanın genişlerken yükselmesine ve sıcaklık farkı sebebiyle oluşan basınç gradyan kuvveti etkisi ile de şekil 2.3’de görüldüğü gibi ikiye ayrılarak

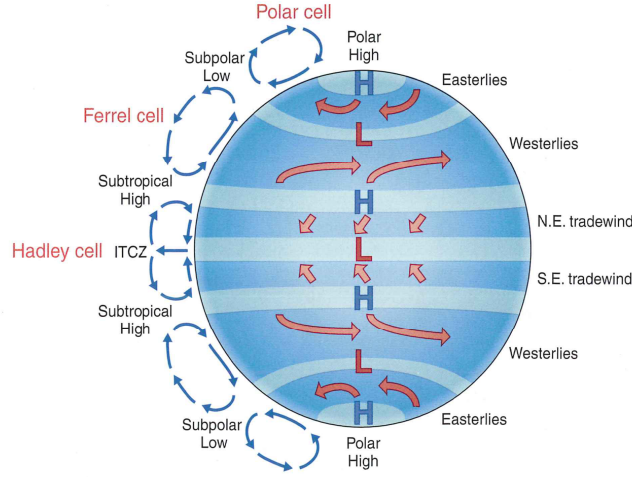
kuzey ve güney kutuplarına doğru hareketine sebep olduğunu ve kutuplarda soğuyan havanın çökerek tekrar ekvatora doğru hareket ettiğini ileri sürmüştür (Aguado ve Burt, 2007). Şekil 2.4’de görüldüğü üzere bu basit dolaşım prensibi Koriolis etkisi ile karmaşıklaşır ve rüzgarların yeryüzü etrefindeki dolaşımının daha doğru ifadesi olan üç hücre teorisine ulaşılır.



Şekil 2.2: Koriolis etkisi.



Şekil 2.3: Basit dolaşım (Aguado ve Burt, 2007).



Şekil 2.4: Üç hücre teorisi (Aguado ve Burt, 2007).

2.1.3 Küresel Ölçek Sirkülasyonu

Yeryüzü üzerindeki havanın sirkülasyonu, yüzeyin eşit olmayan ısınmasına bağlı olarak gelişir. Basıncın ve rüzgarın küresel sirkülasyonu dünyanın ısı dengesinde bütünleyici bir rol oynar.

Atmosferin küresel sirkülasyonu düşük enlemlerden yukarı enlemlere sıcak havayı, yüksek enlemlerden düşük enlemlere ise soğuk havayı transfer eder. Aşağı enlemlerde bu dönüşüm devam eder. Burada sürekli ısınıp yükselme ile yıl boyunca net bir enerji kazancı oluşur. Yüksek enlemlerde işe devam eden soğumadan net bir enerji kaybı vardır.

2.1.4 Yüzey Basıncı ve Rüzgar

Dünyanın ekvator bölgesinde yıl boyunca net bir enerji kazancı vardır. Aşağı enlemlerde güneş ışınlarının dik gelmesi ve yıl boyunca gün uzunluğunun hemen hemen eşit olması nedeniyle kuvvetli bir ısınma vardır. Yeryüzeyi tarafından kazanılan ısı radyasyon ve hissedilir ısı transferi yoluyla havaya transfer edilir. Yoğuşan su buharı ısıya ilave olur. Isıtılan hava yükselme kabiliyeti kazanır ve nemli tropikal atmosfere doğru kolaylıkla yükselir. Yüzey üzerinde yükselen hava, tropopoz seviyesinde yayılarak (diverge) kutba doğru hareket eder. İlerleyen hava ~ 25 ve 35° kuzey ve güney enlemleri arasında sıkışır (konverge). Radyasyonal soğuma havanın subtropiklerde çökmesine neden olur. Hava yüzeye ulaştığında, atmosferik basınç subtropikal yüksekleri oluşturarak artar. Subtropikal yüksekler

Yerkürenin iklimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüze doğru süsüdsans, geniş ölçekli yoğuşma, bulut oluşumu ve yağış üretmek için gerekli olan havanın yukarı yükselmesini önler. Çöken havanın adyabatik ısınması, bağıl neminde bir azalmaya neden olur. Sahra Çölü gibi ana çöller subtropikal yükseklerin varlığı ile ızah edilebilir. Yüzeyde hava subtropikal yükseklerin merkezinden dışa doğru yayılır. Subtropikal yükseklerin ekvator tarafında rüzgarlar genellikle hafif ve değışkendir. İspanyol gemiciler tarafından adlandırılan “at enlemleri” gemiler için sakın bölgelerdir.

Kuzey yarımkürede korolis kuvvetinin etkisi ile subtropikal yüksek ile ekvator alçağı arasında akış sağı sapar ve bu iki bölge arasındaki basınç gradyanı kuzeydoğı ticaret rüzgarlarını oluşturur. Güney yarımkürede hava subtropikal yüksekten ekvatorial alçağı doğru hareketi esnasında sola saptırılır. Güneydoğı ticaret rüzgarları oluşur. Ekvatorda kuzeydoğı ticaret rüzgarları ve güneydoğı ticaret rüzgarları arasında Intertropikal Konverjans Zonu oluşturan konverjans meydana gelir. Ticaret rüzgarlarının sıkışması (konverge) 5°kuzey ve güney enlemleri arasında “doldurumlar” olarak adlandırılan rüzgar yönünün olmadığı sakın ve zayıf rüzgarlar zonu oluşturur.

Subtropikal yükseklerin kutup tarafında hava kutba doğru yönlenir. Fakat kuzey yarımkürede 30°N ve 60°N enlemleri arasında sağı sapma ile batılı rüzgar kuşağı oluşur. Benzer bir batılı rüzgar kuşağı güney yarımkürede 30° ve 60°S enlemleri arasında bulunur.

Kutuplarda enerji kaybı yüze doğru çöken çok soğuk havayı oluşturur. Bu bölgede polar (kutupsal) yüksek olarak adlandırılan yüksek basınç takkeleri oluşur. Ekvatora hareket eden doğulu bileşen kazanır. Kutupsal doğuluları oluşturur. Kutupsal doğulu rüzgarlar ~60°N ve S enlemlerinde batılı rüzgarlar ile karşılaşır. Subpolar alçak olarak adlandırılan alçak basınç kuşağı oluşur. Bu bölge fırtınaların ve göçebe basınç sistemlerinin zonudur.

Küresel rüzgar ve basınç kuşakları dünyanın iklim sistemlerinin oldukça önemli elemanlarıdır.

2.1.5 Mevsim (Muson) Rüzgarları

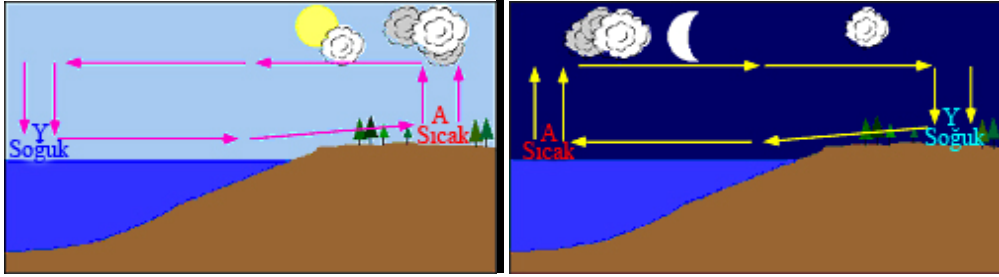
Muson rüzgarları, bütün yaz boyunca denizlerden karalara; bütün bir kış boyunca da karalardan denizlere esen bir rüzgar sistemidir. Esas itibariyle yeryüzündeki denizlerle karaların mevsimlere göre değişik şekilde ısınması sonucunda yüksek basınç merkezlerinin kışın karalarda yazın ise denizlerde bulunmasından ileri gelmektedirler. Muson rüzgarları bazı şartların bulunduğu yerlerde görülürler. Yeryüzünde Muson rüzgarlarını gerektiren şartların bulunduğu yerler özellikle Hint Okyanusu, Meksika ve Gine Körfezi, Çin ve Avustralya arasındaki denizler ve Brezilya ile Şili arasındadır. Bu rüzgarların en fazla estiği yönler ise kuzeydoğu, kuzeybatı, güneydoğu ve güneybatıdır.

2.1.6 Günlük Rüzgarlar

Günlük rüzgarlar, gün esnasındaki basınç farklılıkları, diğer rüzgar sistemlerine oranla çok daha kısa sürede kendini gösteren rüzgarları oluştururlar. Gün içerisindeki basınç değişimleri daha çok karalarla denizler ve dağlarla vadiler arasında kendilerini gösterirler. Çünkü bu gibi yerler gün içerisinde farklı ısınıp farklı soğumaktadırlar. Bu rüzgarlar kara ile deniz arasında meydana geliyorsa *kara ve deniz meltemleri*, dağ ile vadi arasında meydana geliyorsa *dağ ve vadi meltemleri* adını alırlar. Bu tür rüzgarlar oluşumları bakımından musonlara benzerler. Fakat musonlar mevsimlik değişimlerden meydana gelirler ve daha geniş bir alanı etkileyebilirler. Meltemler ise günlük değişimlerden meydana gelir ve daha küçük bir alanı etkilerler. Meltemler hemen hemen her yerde eserler. Yalnız kutuplarda günlük sıcaklık değişimleri az olduğu için orada görülmezler.

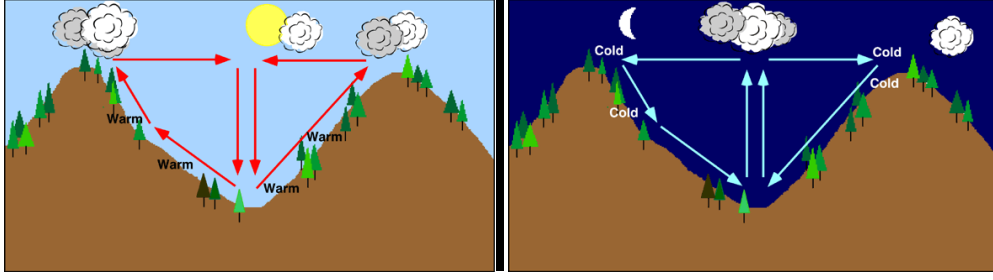
Şekil 2.5’de tasvir edildiği üzere *Kara ve deniz meltemleri* daha çok ekvator kuşağında ve orta enlemlerde yaz mevsiminde görülür. Bu rüzgarların denizlerden karalara doğru esenlerine *deniz meltemleri* denir. Bilindiği gibi karalar gündüzleri denizlere oranla daha çabuk dolayısıyla daha fazla ısınırlar; geceleri de daha çabuk, yani daha fazla soğurlar. Bunun sonucu olarak karalar gündüzleri alçak basınç, geceleri de yüksek basınç alanlarıdır. Denizler ise bunun tersine olarak gündüzleri yüksek basınç, geceleri ise alçak basınç alanlarıdır. Basınç merkezlerinin bu şekilde oluşu rüzgârların gündüzleri denizden karaya doğru, geceleri de karalardan denizlere doğru esmesine yol açmaktadır. Bunlar denizden estikleri için nemli ve serindirler. Deniz meltemleri, günlük sıcaklığın en yüksek olduğu zamanlarda hissedilmeye

başlar. Bu rüzgârlar estikleri kıyı bölgelerinin ikliminde serinletici rol oynarlar. Yerel sebeplerden meydana geldikleri için etki sahaları kıyıdan içeriye doğru en fazla 20-40 km arasında, yükseklerle doğru ise 300- 400 m arasındadır. Akşama doğru karaların soğumasıyla basınç şartları değişir ve deniz meltemleri kesilir. Genellikle gece yarısına doğru, rüzgar bu defa karadan denize doğru esmeye başlar, bu rüzgarlar da *kara meltemi* olarak adlandırılır. Kara meltemi en şiddetli halini sabaha karşı alır, fakat güneşin doğmasıyla kesilir. Karadan estikleri için kurudurlar; deniz meltemlerine oranla daha zayıf rüzgarlardır. Ülkemizde kara ve deniz meltemlerinin kendini en iyi hissettirdiği yer İzmir ve çevresidir. İzmir kıyılarında, denizden karaya doğru esen ve imbat adı verilen deniz meltemi, yazın sıcak günlerinde İzmir'e denizin serin ve nemli havasını getirir.



Şekil 2.5: Deniz ve kara meltemleri.

Şekil 2.6'da tasvir edildiği üzere *Dağ ve vadi meltemleri*, dağlık bölgelerde gün esnasındaki sıcaklık farklılığından dolayı meydana gelmektedir. Dağın güneşe bakan yamacı gündüzleri vadiye nazaran daha çabuk ısınır ve alçak basınç sahası oluşturur; vadi ise bir yüksek basınç sahası oluşturur. Bu durum rüzgarın vadiden dağa doğru esmesine yol açar; bu rüzgara *vadi meltemi* denir. Vadi meltemi, hava sıcaklığının en yüksek olduğu zamanlarda şiddetini artırır. Sonra yavaş yavaş hafifler ve güneşin batışına doğru kesilir. Geceleyin ise tam tersine olarak dağ yamaçları yüksek basınç, vadiler ise alçak basınç sahaları oluştururlar. Bu yüzden rüzgarlar da dağdan vadilere doğru eserler; bu rüzgara da *dağ meltemi* adı verilir. Dağ meltemi bütün gece devam eder ve sabaha doğru kesilir. Vadi meltemi, aşağı kısımların nemli havasını yukarı doğru taşır. Dağ zirvelerinin çoğunlukla bulutlarla örtülü oluşu bu yüzdendir. Geceleyin esen dağ meltemi ise soğuk havayı getirerek aşağı tabakalardaki nemin yoğunlaşmasına ve yer yer sis oluşumuna neden olur.



Şekil 2.6: Vadi ve dağ meltemleri.

2.1.7 Yerel Rüzgarlar

Bir bölgede belirli zamanlarda meydana gelen alçak ve yüksek basınç sahaları *yerel rüzgarları* meydana getirirler. Bunların esiş yerleri ve zamanları genellikle bellidir. Bazen birkaç gün bazen de birkaç hafta eserler. Yerel rüzgarlara özel karakter kazandıran estikleri yerin topografik şartlarıdır. Yerel rüzgarlar doğdukları yerlere göre sıcak ve soğuk karakterli olabilirler. Örneğin, *Sam Yeli*, Güney Akdeniz'e veya Afrika'ya doğru hareket eden alçak basınç merkezlerinin önünde görülen sıcak, güney ve güneybatılı rüzgarlardır. Hava doğrudan doğruya Büyük Sahra'dan geldiği için kuru ve tozludur. Akdeniz'i geçerken çok sıcak olması nedeniyle fazla miktarda nem kazanır. Malta, Sicilya ve Güney İtalya'ya gelerek burada sis ve yağışları meydana getirirler. Bu rüzgarlar daha kuru olarak Yunanistan, Türkiye ve hatta Volga kıyılarına kadar etkili olurlar. Ülkemizde genellikle ilkbahar aylarında görülür. Ülkemizde özellikle bitkileri kurutması bakımından çok önemlidir. Yazın belirli zamanlarda esen bu rüzgara Sam Yeli veya Zehirli Yel denir. Zehirli Yel denmesinin sebebi bütün bitkileri kavurup öldürmesidir. Sam Yeli Mısır'da, Hamsin; İtalya'da ise Sirokko olarak adlandırılır.

Fön ise, bütün dağlık bölgelerde görülebilir. Yüksek dağların yamaçlarından aşağıya doğru esen sıcak ve kuru rüzgarlardır. Alplerin kuzey yamaçlarından Avrupa'ya inen bu tip rüzgarlara Fön, Amerika'nın kuzeyinden ovaya inen aynı tip rüzgarlara da *Şinok* denir. Bu rüzgarların oluşum sebebi; dağa çarpan hava kütlelerinin yamaçta yükselmesi ve bu yükselme sonucu yağış ve bulutlanma yüzünden nemini kaybederek dağın diğer yüzüne kuru ve sıcak bir şekilde akmasıdır. Bu rüzgarlar da estikleri yerlerde bitkilere zarar verirler.

Bora, Adriya Denizi, Dalmaçya ve İstirya kıyılarında esen kuvvetli, soğuk ve kuru bir rüzgardır. Orta ve Doğu Avrupa üzerinde bir yüksek basınç, Tiren Denizi

üzerinde bir alçak basınç oluştuğunda veya Orta İtalya'dan Adriyatik'e geçen bir alçak basınç görüldüğünde meydana gelir. Bu şartlar kendini daha çok kışın ve ilkbaharda gösterir. Bora estiği zaman özellikle İstirya kıyılarında şiddetli soğuklar hüküm sürer.

Mistral, Fransa'da kuzey-kuzeybatıdan esen soğuk, kuru ve şiddetli rüzgardır. Mistralin en şiddetli olarak görüldüğü yer Rhone vadisidir. Bu rüzgar kışın ve ilkbaharda, Lyon körfezinde bir alçak basınç, Fransa'nın kuzeyinde ise yüksek bir basınç sahası olduğu zaman meydana gelir. Kuzeyde Massif Central'in karlı yüksek yaylalarını geçerek geldiği için soğuktur.

Krivetz, Romanya'da aşağı Tuna ovalarında kuzeydoğudan esen soğuk ve şiddetli bir rüzgardır. Bu rüzgar, Rusya üzerinde bir yüksek basınç, İtalya üzerinde ise bir alçak basınç olduğu zaman kendini gösterir. Krivetz, Bora gibi genellikle kışın ve ilkbaharda eser. Güney Rusya'nın karlı ovalarını geçerken çok soğur ve geçtiği bölgelerde birkaç saat içinde 10-15 derecelik sıcaklık düşmesine neden olabilir.

Poyraz, Karadeniz ve Marmara havzalarında kuzeydoğudan esen soğuk ve şiddetli bir rüzgardır. Poyraz, özellikle İstanbul ve çevresinin hakim rüzgarıdır. Buralarda senenin yaklaşık 120-130 gününde eser. Poyraz kış mevsiminde Bora gibi şiddetli ve soğuktur. Bu mevsimde yağış ve kar getirir. Yazın ise sıcak bölgelere doğru estiği için kuru fakat estiği yerlere serinlik getiren bir rüzgardır. Gündüzleri oldukça şiddetli esen poyraz, akşama doğru hafifleyerek kesilir.

3. VAN DER HOVEN SPEKTRUMU

3.1 Giriş

Rüzgardan elde edilen enerji rüzgarın şiddetinin küpü ile değişmektedir. Bu sebeple rüzgar kaynaklarının karakteristiklerini bilmek rüzgar enerjisi işletmesi, uygun sitenin tanımlanması ve projelerin ekonomik açıdan gelecek vaat edebilirliği açısından çok önemlidir (Burton ve diğ., 2001).

Bu açıdan bakıldığında rüzgar kaynaklarının en çok dikkati çeken karakteristiği değişkenliğidir. Ayrıca bu değişkenlik konum ve zaman boyutunda geniş bir ölçek aralığında devamlıdır. Dünyanın yüzeyine yakın bölgelerde oluşan rüzgarlar jeostrofik ve yerel rüzgarların kombinasyonudur. Bu rüzgarlar coğrafik bölgeye, iklime, yeryüzünden yüksekliğe, arazinin engebeliğine ve etraftaki setlere bağlı olarak değişkendirler (Bianchi ve diğ., 2007).

Bir yıldan daha kısa sürelerle, kısa süreli zaman aralıklarında büyük değişimler olmasına rağmen mevsimlik değişimler birkaç günlük değişimlerden daha iyi tahmin edilebilir. Bu zaman sürelerinde elektrik ağına katılacak rüzgar gücünün tahmin edilebilir olması çok önemlidir. Yine kısa zaman aralıklarında dakikalardan saniyelere hatta daha da azı göz önüne alındığında türbülansın rüzgar türbinlerinin dizayn ve performansı üzerine etkileri çok fazladır (Burton ve diğ., 2001).

Van der Hoven'ın 1957 yılında New York Brookhaven'da kaydedilen kısa ve uzun süreli datalarla kurduğu rüzgar şiddeti spektrumu sinoptik, günlük ve türbülans etkilerine işaret eden açık pikleri içermektedir (Burton ve diğ., 2001). Van der Hoven spektrumu atmosferik sınır tabakadaki rüzgar ve hava sistemlerinin bileşenlerinin ve karakteristiklerinin kapsamlı bir şekilde frekans bazında gösterildiği ilk spektrumdur (Straw, 2000). Bu spektrumda günlük ve türbülans piklerinin arasında spektral boşluk denilen bir aralık bulunmaktadır. Geniş ve derin boşluğun varlığı 0.1 ile 10 saat periyotlu osilasyonlara (meso-meteorolojik minimum) denk gelmektedir. Bu boşluk iki iyi biçimlenmiş maksimumu ayırır (sağda mikro meteorolojik maximum, solda

sinoptik maksimum) (Panchev, 1985). Spektrumun 2 saat ile 10 dakikalık aralığında çok az bir enerji bulunmaktadır (Burton ve diğ., 2001).

Van der Hoven spektrumu rüzgar şiddetlerinin değişken olduğu üç farklı zaman dilimini içermektedir. Bu bölümlerden ilki 1 dakika aralığında ani rüzgarlar nedeniyle oluşmaktadır. İkincisi ise rüzgar hızındaki gece gündüz değişkenliğinden kaynaklı 12 saatlik dilimi göstermektedir. Yaklaşık 4 günlük bir zamanda oluşan en yüksek pik ise bir cephesel sistemin rüzgar çiftliğini geçeceği ortalama zamanla ilgilidir (<http://www.ruzgarenerjisibirli.org.tr/yayinlar/bilimsel/diger/makale/Yenilebilirleri-n-Entegrasyonu.pdf>).

- 0.01 devir/saat'lik ana pik tamamen gelişmiş geniş ölçekli hava sistemlerinin 4 günlük transit periyotlarına denk gelmektedir, bu pike genelde makro-meteorolojik pik denmektedir.
- İkinci pik ise 10 dakika ile 3 saniyeden daha az bir periyot aralığından sınır tabakadaki türbülansla ilişik daha yüksek frekanslı bir aralığı kapsamaktadır. Bu pikin bulunduğu bölgeye ise mikro-meteorolojik bölge denmektedir.
- Bu iki pikle sınırlanan az bir dalgalanmanın görüldüğü boşluğa ise spektral boşluk denmektedir. Spektral boşluk makro-meteorolojik ve mikro-meteorolojik dalgalanmaları diğer etkilerin bir karışımı olmaksızın analiz edebilmek için önemli bir özelliktir (Straw, 2000).

1970'lerde quasi-2 boyutlu sinoptik rüzgar değişimlerine denk gelen spektrumun sinoptik bölümü incelenmiştir. İstatistikler hem gerçek gözleme hem de nümerik GAC modelleri ile önceden tahmin edilen rüzgar değerlerine dayandırılmıştır. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere elde edilen sonuçların bir kısmı Leith tarafından 1971'de analiz edilmiştir (Panchev, 1985)

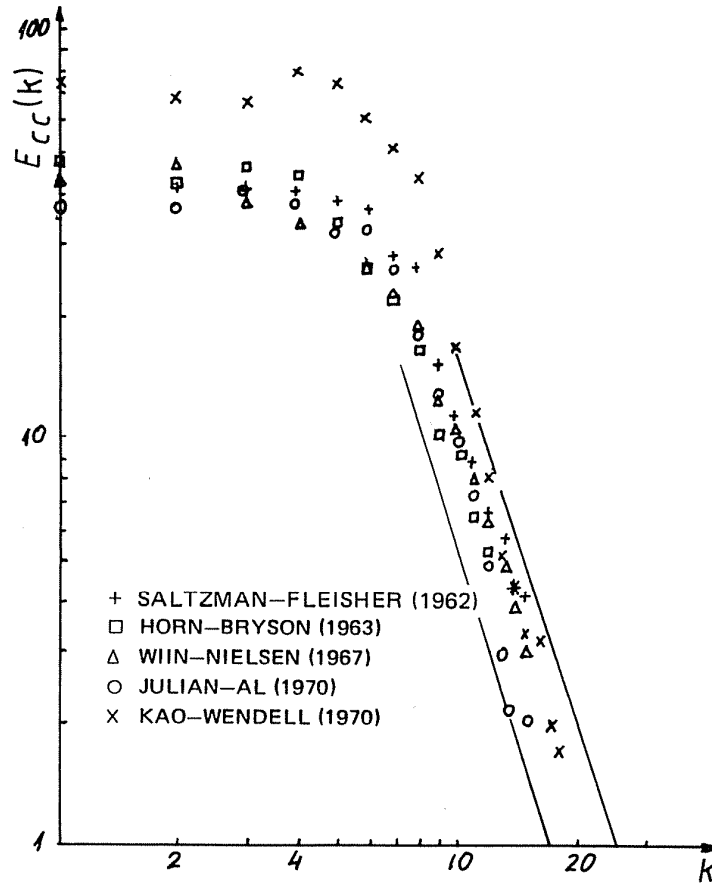
İki açıkça ayrılmış frekans etrafında toplanmış enerji rüzgar şiddeti işareti v 'yi iki bileşene ayırır,

$$v = v_m + u \quad (3.1)$$

burada v_m ortalama rüzgar şiddeti, t_p aralığı boyunca anlık rüzgar şiddeti ortalamasıdır (Bianchi ve diğ., 2007).

$$v_m = \frac{1}{t_p} \int_{t_0 - t_p/2}^{t_0 + t_p/2} v(t) dt \quad (3.2)$$

Genellikle ortalama periyot 10 dakika ve 20 dakika civarında spektral boşlukla uyumlu olarak seçilir. Bu durumda makro-meteorolojik değişimler rüzgar şiddetinde yavaş dalgalanmalar olarak gözlenir ve (3.1) denkleminde u atmosferik türbülansı gösterir (Bianchi ve diğ., 2007).



Şekil 3.1: Atmosferdeki geniş ölçekli quasi-2 boyutlu girdap hareketlerinin kinetik enerji spektrumu E_{cc} ($10^{-4} \text{ rad}^2 \text{ gün}^{-2}$).

3.2 Van der Hoven'ın Çalışması

Isaac Van der Hoven 1957 yılında yayınlamış olduğu “Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 cycles per Hour” adlı makalesinde rüzgarın coğrafi ve mevsimsel farklılıklara rağmen değişmeyen karakteristiklerini ortaya koymuştur.

Panofsky ile yaptığı başka bir çalışmasında Van der Hoven yeryüzüne yakın düşey rüzgar hareketinin ana toplamının varyansının 10 ile 1000 devir/saat frekans aralığında olduğunu göstermiştir. Yatay harekette ise bu aralıktaki varyans toplam varyansın küçük bir kısmını oluşturmuştur. Bir haftalık zaman aralığında 5 dakikalık ortalama yatay rüzgar şiddeti bileşenlerinin spektral analizi yapıldığında 10^{-2} ve 10^{-1} devir/saat'lik frekans aralıklarında yüksek miktarda girdap enerjisinin varlığı tespit edilmiştir.

Van der Hoven'ın bu makalesinin iki temel sonucu vardır; birincisi yatay rüzgar şiddeti spektrumunun yeteri kadar genel frekans aralığını kapsayarak toplam varyansa katkı sağlayan tüm katkıları içermesi, ikincisi ise değişik arazi ve sinoptik koşullar altında ana piklerin ve geniş spektral boşluğun spektrumda görülüp görülmediğini test etmesidir.

Güç spektrumu analizi bir değişkenin varyansına, frekansları sürekli değişen salınım katkısının bir ölçüsüdür. Rüzgar şiddetinin değişken olduğu yerlerde, varyans hız dalgalanmalarının kinetik enerjisiyle doğru orantılıdır.

Geniş frekans aralığında spektral tahminleri elde etmek için iki yöntem uygulanabilir. Birincisi, uzunca zaman serileri ile aylar süren frekans okumaları sonucu analiz, bu bize tek seferde bir spektrum sunar. İkincisi ise, spektrum parçalanarak analizler yapılır ve toplam spektrum için parçalar tekrar bir araya getirilir. Hoven çalışmasında içerdiği data miktarı açısından ikinci metodu daha pratik bulurak tercih etmiştir.

Geniş frekans aralıklarında güç spektrumun analizi ile ilgili prosedür ve problemler Hoven'ın Griffith ve diğ. (1956) ile yaptığı çalışmasında bulunmaktadır. Çeşitli oranlarda parçalanmış güç spektrumunu bir araya getirme işi öncelikle birbirinden ayrı okumalardan kaynaklı ortalama etkilerin düzeltilmesini içermelidir. Özellikle yüksek frekanslar düşük frekanslara kıyasla önemli enerjiler içerdiğinden, yüksek frekanslarda anlık okumalardan kaynaklı sahte sonuçları gidermek için ortalama alınır. Yüksek frekanslardaki aliasing ve düşük frekanslardaki zayıf rezolüsyondan kaynaklı sahte sonuçlar elendiğinde spektral parçalar doğru bir şekilde birleştirilir.

Hoven'ın çalışmasında yatay rüzgar şiddeti analizinde kullanılan datalar, Brookhaven Ulusal Laboratuvarlarının 125 m'lik üç meteoroloji direğinin üzerinde bulunan hız okuyucularından elde edilmiştir. Data analiz aralığı, yaklaşık bir yılı

kapsayan 5 günlük ortalama hızlardan, bir saati kapsayan 2 saniyelik ortalama hızlara kadardır.

Çizelge 3.1 sonradan bir araya getirilen her spektral parça için, yükseklik, tarih, zaman aralığı, farklı zamanlarda örneklenen işaretlerin ortalama periyodunu, frekans aralığını, analizde geri kalma korelasyonlarının sayısını ve serbestlik derecelerini göstermektedir.

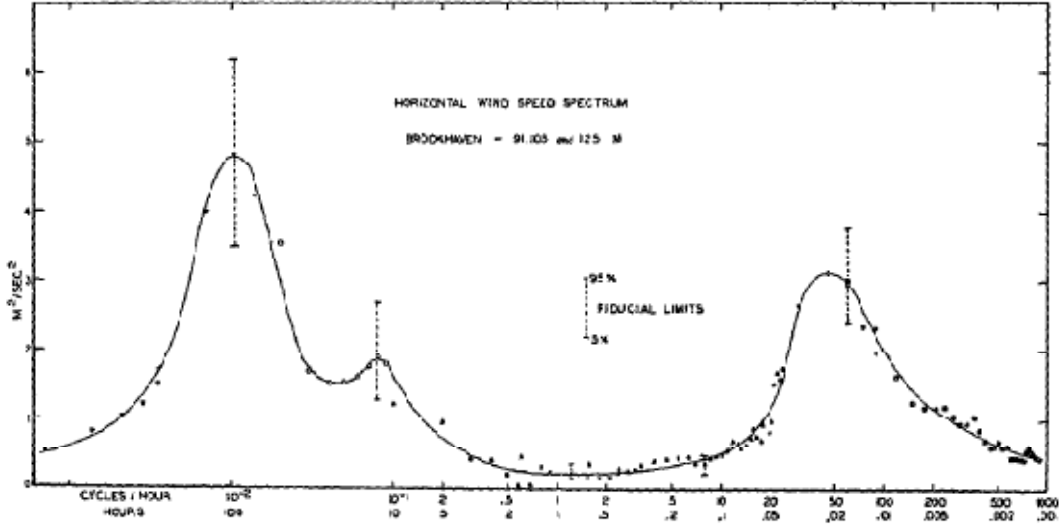
Çizelge 3.1: Şekil 3.2’deki yatay rüzgar şiddeti spektrumunun bölümleri (Hoven, 1957).

Yükseklik (m)	Tarih ve süre	Ortalama okuma	Frekans aralığı (devir/saat)	Gecikme sayısı	Serbestlik derecesi
108	6/25/55-4/30/56	5 gün	0.0007-0.0042	6	19
108	8/9/55-2/25/55	1 gün	0.0035-0.021	6	65
108	8/9/55-9/18/55	5 saat	0.01-0.1	10	38
108	0000,8/20/55-200,8/22/55	½ saat	0.1-1.0	10	19
108	0000,8/20/55-200,8/22/55	10 dakika	0.5-3.0	10	58
125	0730,8/13/55-1400,8/14/55	75 saniye	0.8-24	30	96
91	0730,8/13/55-0830,8/13/55	20 saniye	15-24	6	58
91	0730,8/13/55-0830,8/13/55	2 saniye	30-900	30	118

Şekil 3.2 çeşitli spektrumların toplam çizimidir, her spektrum farklı bir sembolle temsil edilmiştir. x-ekseni, logaritmiktir. Frekans saat başına çevrim ve saat başına periyot olarak tanımlanmıştır. Spektral piklerin altında kalan alanı hesaplariken, frekansların katkıları ve varyansın özelliğini kaybetmemek için spektrumun y-ekseni frekans ile çarpılır. Ana piklerin ve çukurların istatistiksel işaretinin spektrumu % 5-95 ölçü birimi limitleri ile çizilmiştir.

Düşük frekanstaki ilk ana pik 100 saatlik bir periyotta (4 günlük) görülür. Bu pik, Griffith ve diğ. (1956)’nde gösterildiği üzere güç spektrumunun sıcaklık pikine karşı gelmektedir. Ayrıca Estoque (1955), en önemli momentum ve ısı transferinin 4 günlük periyodun komşu bölgelerinde gerçekleştiğini bulmuştur. 4 günlük periyotlu pik, büyük sinoptik ölçekli basınç sistemlerinin bir geçit oluşturmasıyla meydana gelen rüzgarların şiddetlerindeki dalgalanmalar sonucu oluşmaktadır. Spektrumun bu parçası 24 saatlik ortalama rüzgar şiddetlerinin 200 gün boyunca analizi sonucu elde

edilmiştir. 100 günlük eşit parçalara bölündüğünde her bir data seti yine 5.1 ve 4.2 m^2/s^2 'lik spektral pikleri 4 günlük periyotta göstermiştir.



Şekil 3.2: Van der Hoven spektrumu.

Mevsimsel etkiler büyük ölçekli rüzgar dalgalanmaları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. 4 günlük enerji pikinin 100 günlük analizi yaz mevsimine denk gelseydi bu pik bu kadar belirgin olmazdı.

12 saatlik periyotlarla oluşan zayıf pik ise istatistiksel dalgalanmalar sonucu oluşmuştur. Hellmann'ın (1915) sonuçlarına göre rüzgar şiddetinin günlük dağılımlarında, yer seviyesinde ve bir kaç yüz metrede yapılan 24 saatlik rüzgar şiddeti ölçümlerinde tek maksimum görülürken, 70 metre yükseklikte çifte maksimum görülür. Sürpriz bir şekilde 1 günlük spektral pikin kaybı sebebiyle bu çalışma için yükseklik 100 metre olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.2 deki 12 saatlik pik 5 saatlik ortalama rüzgar şiddetinin 40 gün boyunca analizi sonucu elde edilmiştir. Eğer data 20 günlük parçalar halinde analiz edilirse zayıf pik sadece bir parçada görülür, bunun dışında geri kalan tüm spektral genlikler birbiri ile benzer özelliktedir.

Şekil 3.2 deki spektral boşluğun sebebi ise atmosferdeki girdap enerjisinin varlığı ile desteklenen fiziksel bir sürecin yokluğudur. Bu bölgedeki spektral boşluk ½ saatlik ve 10 dakikalık ortalama rüzgar şiddetinin 2 gün boyunca analizi sonucu elde edilmiştir.

Şekil 3.2 de anormal bir rüzgar durumu yüksek frekanslarda spektrumun sonuna doğru yer alır. Datalar Connie kasırgası sırasında, ortalama rüzgar şiddeti 13 m/s iken

30 saat boyunca ve ortalama rüzgar şiddeti 20 m/s iken yine 30 saat boyunca alınmıştır. Yüksek rüzgar şiddetleri, yüksek frekans genliğinin fazlasıyla yükselmesine sebep olmuştur.

Şekil 3.2 iki tane girdap enerjisi pikine 4 günlük ve 1 dakikalık periyotlarla ve 1 saat periyotlu spektral bir boşluğa sahip yatay hareketli rüzgar şiddeti spektrumunu temsil etmektedir. Spektrumdaki gösterim dışında çok az bir enerjinin olduğu düşünülmektedir. Spektral eğrinin altında kalan alanlar hesaplandığında toplam varyansın %60'nın 1 devir/saatlik frekansların altında, %40'nın 1devir/saatlik frekanslarda olduğu görülür. Ayrıca görel olarak yüksek yüzdelli yüksek frekanslar çok rüzgarlı günlere özeldir.

Kısa süreli ölçümler sonucu elde edilen datalar spektral boşluğu tanımlamak üzere kullanıldığından, boşluk istatistiksel dalgalanmalar sonucu oluşmamaktadır. Spektral boşluk bu çalışmada Brookhaven dışında farklı ölçüm alanları ile de test edilmiştir.

Panofsky ve Hoven yatay hareketli rüzgar şiddeti spektral boşluğunun varlığı Brookhaven'dan başka, Aerovane'da 30-ft'lik, Pennsylvania'da 60-ft'lik direklerdeki ölçümlerle de göstermişlerdir. Spektral analizler 1.25, 5 ve 20 dakikalık ortalama frekans aralıkları ile 48 saat boyunca yapılmıştır. Appaladians bölgesinin tipik dağ sıraları ve vadi bölümünün yanı sıra Idaho'dan Oak Ridge, Tennessee ve Idaho Falls'dan da 0.4'den 24 devir/saatlik periyotlarla ek datalar alınmıştır.

Tüm durumlarda 1'den 10 devir/saat'lik frekans aralıklarında 0.1 ve 0.2 m²/s²'lik değer genlikli spektral boşluklar vardır. Bu Şekil 3.2' deki Van der Hoven Spektrumu ile eşleşen bir durum olmuştur.

Sonuç olarak 1 dakikalık ve 4 günlük periyotlarla iki pike sahip (iki ana girdap enerjisi katkısı ile) yatay rüzgar şiddeti spektrumu mevcuttur.

İlk pik, sinoptik hava harita ölçeklerinin göçebe basınç sistemleri sebebiyle meydana gelen rüzgar şiddeti dalgalanmaları sebebiyledir. Sonraki pik ise mikro-meteorolojik bölgede ve türbülansın mekanik ve ısı ileten tipidir.

İki spektral pikin arasında geniş bir spektral aralık 1 devir/saat'ten 10 devir/saat frekansına kadar yer almaktadır. Bu boşluğun nedeni bu frekans aralığındaki rüzgar şiddeti salınımlarının fiziksel bir süreç içermemesidir. Atmosferde bu zaman aralığında görülen sürekli hareket sistemlerinin yokluğuna karşı gelmektedir. Zaman zaman, gök gürültülü sağnak yağışla birlikte fırtına (*thunder storms*) daha geniş bir

zaman aralığında önemli enerji katkısı olan çok nadir olaylar olup, bu aralık mezo ölçek aralık olarak da adlandırılmaktadır (10-100 km).

Çizelge 3.2: Yatay rüzgar şiddeti spektral boşluğunun karakteristikleri (Hoven, 1957).

Konum	Tarih	Yükseklik (m)	V (m/s)	Boşluk frekans (dev/saat)	Boşluk dalga sayısı (dev/km)	Boşluk genliği (m ² /s ²)	Datanın uzunluğu (saat)	Serbestlik derecesi
Brookhaven	8/20-22/55	108	6.2	1	.04	.20	50	58
Brookhaven	12/14-16/55	125	7.8	3	.11	.15	43	114
Penn. State	6/4-6/55	30	1.8	2	.31	.15	48	114
Oak Ridge	12/21-23/55	100	4.1	6	.41	.10	43	137
Oak Ridge	12/23-25/55	100	5.2	3	.16	.15	43	137
Idaho Falls	2/23-25/56	76	12.8	5	.11	.20	60	190
Idaho Falls	2/25-28/56	76	8.9	9	.28	.10	60	190

Çizelge 3.2’de spektral boşluğun arazi ve sinoptik koşullar altındaki özellikleri verilmiştir. Bu karakteristikler spektral boşluğun konumunun ortalama rüzgar şiddetine veya sabit bir dalga sayısına bağlı olmadığını göstermektedir. Spektral boşluğun konumu arazinin sertliğine bağlı olduğu işaret edilmektedir. Engebeli arazilerde spektral boşluk yüksek frekanslara kaymaktadır. Buna rağmen spektral boşluk için fiziksel bir ilişki var ise bu açık değildir. Buna karşılık geniş aralıklı ortalama hızlarda ve tüm arazi koşullarında, boşluğun genliği 0.1-0.2 m²/s² değerdedir. Boşluğun genliği tutarlı bir şekilde düşük ve boşluk oldukça geniş ve düzdür, böylece boşluğun merkezini belirlemekte çok önemli hale gelmemektedir.

4. WEIBULL OLASILIK YOĞUNLUK FONKSİYONU

4.1 Giriş

Rüzgar datasının analizi için kullanılan bir çok yoğunluk fonksiyonundan en çok kullanılan ikisi Weibull ve Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarıdır. Rayleigh dağılımı Weibull dağılımının bir alt kümesi, Weibull dağılımı ise genelleştirilmiş Gama fonksiyonun özel bir halidir. Weibull dağılımı çok yönlü kullanıma sahipken Rayleigh dağılımının ise kullanımı daha kolaydır (Johnson, 2001). Rayleigh dağılımı bir parametre kullanırken Weibull dağılımı iki parametreye dayalıdır. Bu parametreler c ve k olarak tanımlanan sırası ile boyut ve şekil parametreleridir. Her iki dağılımda sadece sıfırdan büyük değerler için tanımlanır (Manwell, 2002).

$$\text{Weibull dağılımı } f^W(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (k > 0, v > 0, c > 1) \quad (4.1)$$

$$\text{Ortalama hız } \bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.2)$$

$$\text{Gama fonksiyonu } \Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-x} t^{x-1} \quad (4.3)$$

Gama fonksiyonu cinsinden Weibull dağılımı ise

$$\sigma_v^2 = (\bar{v})^2 \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right] \quad (4.4)$$

c ve k katsayılarını bulmak için bir çok metod kullanılmaktadır. Bunlar analitik (ya da deneysel metod), deneysel ve grafiksel olarak tanımlanabilirler (Manwell, 2002).

Analitik metod ile boyut ve şekil parametreleri;

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (4.5)$$

$$(4.2) \text{ den } c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (4.6)$$

denklemleri ile hesaplanır.

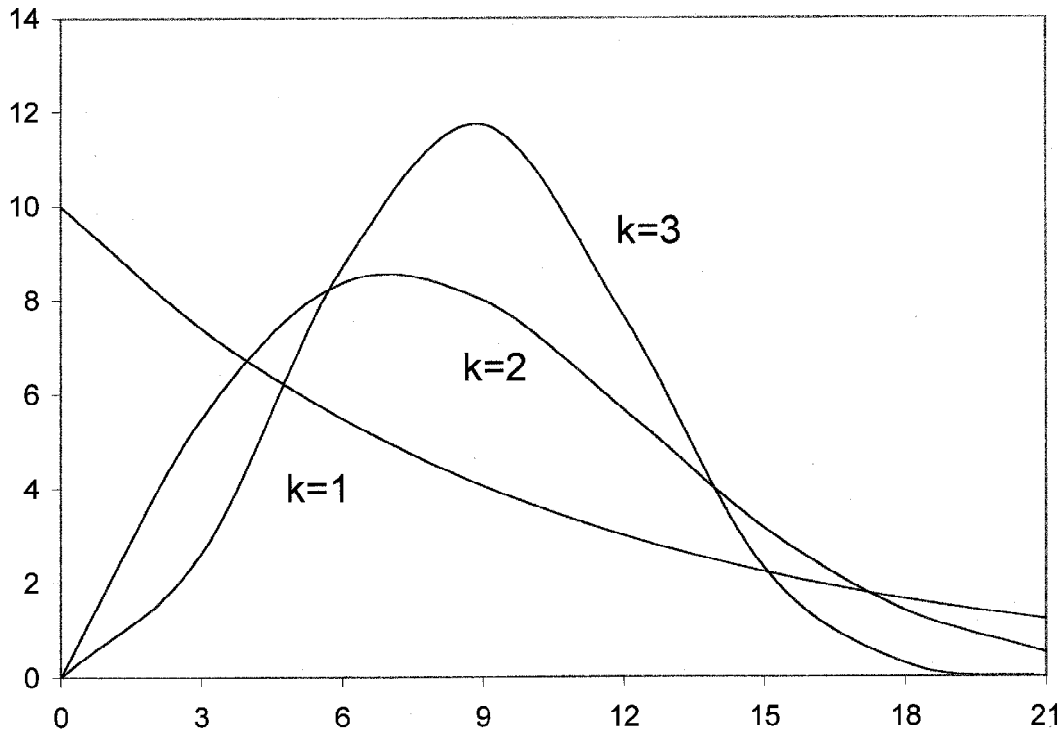
Boyut parametresini 10 ($c = 10$) kabul edip artan k değerleri için Weibull dağılımının grafiği Şekil 4.1 de gösterilmiştir. k değeri büyüdükçe Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu daralır ve pik daha belirgin hale gelir ayrıca pik daha büyük rüzgar hızı değerlerine doğru kayar (Johnson, 2001).

Weibull dağılımda,

$k = 1$ alındığında eksponansiyel dağılım,

$k = 2$ alındığında Rayleigh dağılımı,

$k > 3$ alındığında ise gauss (normal çan eğrisi) dağılımı elde edilir.



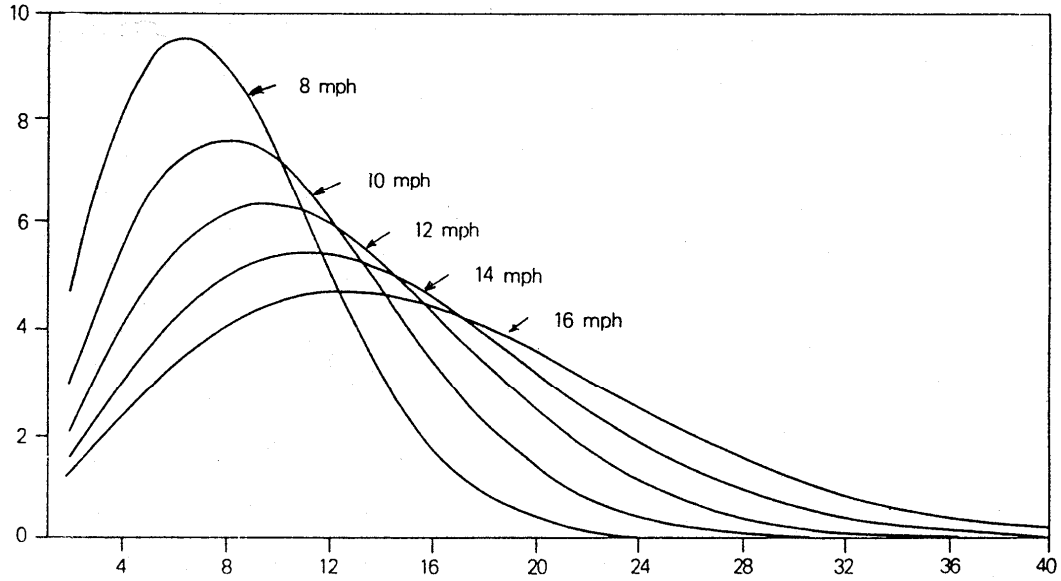
Şekil 4.1: Boyut parametresi $c = 10$, şekil parametresi $k = 1, 2$ ve 3 iken Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu (Patel, 1999).

Zaman periyodu çok kısa olmadığı sürece her hangi bir bölgeden elde edilen rüzgar hızı dataları Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile iyi bir şekilde tanımlanabilir (Johnson, 2001).

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere Weibull dağılımında şekil parametresi $k = 2$ alındığında dağılım Rayleigh dağılımı olarak adlandırılır. Rayleigh dağılımı tek parametre ile yeteri kadar doğru ve kolay bir biçimde rüzgar hızını tanımlanabilir (Patel, 1999).

$$f^W(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad k = 2, c = \sqrt{2b} \quad (4.7)$$

$$\text{ise Rayleigh dağılımı } f^R(v) = \frac{v}{b^2} e^{-\frac{v^2}{2b^2}} \quad (4.8)$$



Şekil 4.2: Şekil parametresi $k = 2$ ve ölçek parametresi $c = 8$ ile 16 mil/sa arasında değişken iken Weibull (Rayleigh) olasılık yoğunluk fonksiyonu dağılımı (Patel, 1999).

5. ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜSÜ

5.1 Zaman Serisi

Bir zaman serisi, bir değişkenin belirli zaman aralıklarındaki hareketini gözlemler. Zaman serilerini $x(t)$ vektör dizisi olarak tanımlayabiliriz. Burada $t = 0, 1, \dots$ şeklinde geçen zamanı temsil etmektedir. x t 'ye bağlı olarak değişken ve sürekli değerler almaktadır. Herhangi bir fiziksel sistemde zaman uzayında x değişkeni ayrık veriler elde edilebilecek biçimde örneklenebilir (Frank ve diğ., 2000).

Bağımlı değişken x 'in ileride alacağı değerleri belirlemek için bir çok öngörü modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada rüzgar şiddetlerinin 5 yıllık verilerinin öngörü analizleri Öz-Bağlanımlı (Auto-Regressive: AR) model ve Yapay Sinir Ağları ile yapılmıştır.

5.2 Öz-Bağlanımlı (Auto-Regressive: AR) Model

AR-modeli basitliği ve model katsayılarının belirlenmesinde kullanılan etkin algoritmaların varlığı sebebiyle çok kullanılan bir metottur (Cohen, 1986). Ancak buradaki istatistiksel problem modelin mertebesinin, yani modeldeki değişkenlerin gecikme sayılarının belirlenmesinde ortaya çıkmaktadır. Modelin mertebesi olması gerektiğinden daha küçük seçildiğinde parametrelerin tahmini tutarlı olmamakta, olması gerektiğinden daha büyük seçildiğinde ise parametrelerin tahmininin varyansı büyük çıkmaktadır. Bu iki durumda da modelden elde edilen sonuçlar güvenilir olmamaktadır. Güvenilir, doğru sonuçlar veren bir model kurabilmek için model mertebelerini hatasız bir şekilde belirlemek gerekmektedir (Shibata, 1976). Model mertebesinin seçiminde en büyük olabilirlik yöntemi her zaman model için olabilecek en büyük dereceyi seçmektedir. Dolayısıyla bu yöntem ile derece seçimi hatalı sonuçlara neden olmaktadır. En büyük olabilirlik yönteminin geliştirilmiş biçimi Akaike (1974) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde farklı sayıda parametreye sahip olan farklı modeller arasından seçim yapılmaktadır. Bu yöntem, her bir modelin ayrı ayrı en büyük olabilirlik fonksiyonunu bulup, olabilirlik fonksiyonunun değeri en büyük olan modeli en uygun model olarak seçmektedir (Schwarz, 1978).

AR-modellerinde kullanılan bu tür model seçim kriterlerinin en yaygın kullanılanları, Akaike Bilgi Kriteri (ABK), Schwarz Bilgi Kriteri (SBK) ve Son Öngörü Hatası'dır (SÖH) (Kadılar ve Erdemir, 2000).

Bir rastgele (random) $y(t)$ işaretini, işaretin t anından önce aldığı değerler ve işaretle ilintili olmayan, sabit spektral güç yoğunluklu bir beyaz gürültünün ($x(t)$) kombinasyonu şeklinde ifade etmek mümkündür. y işareti Δt zaman aralıklarıyla örneklenmiş olsun:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t - i\Delta t) + x(t) \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. n değerine modelin mertebesi denir (Thie, 1981).

Düşük model mertebeleri yumuşatılmış (smooth) bir spektral öngörü yapar. Çok yüksek mertebeden modeller spektral öngöründe gerçek olmayan (suni: spurious) detayların ortaya çıkmasına sebep olurlar. AR-model mertebesinin arttırılması öngörü hatasının düşmesini sağlar. Genelde öngörü hatası artan model mertebeleriyle monoton olarak azalır. Bu nedenle optimal model mertebesinin seçimi bir problemdir.

AR-modelinin mertebesinin seçimi için Akaike (1969; 1974) iki farklı kriter önermiştir. Birincisi, Son Öngörü Hatası Kriteridir. Bir AR-modeli için SÖH:

$$SÖH_n = \hat{\sigma}_x^2 \left(\frac{N+n-1}{N-n-1} \right) \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N alınan örnek sayısı, n AR-modeli mertebesi ve $\hat{\sigma}_x^2$ de öngörü hatasının varyansıdır. Model mertebesi arttıkça varyans monoton olarak küçülür ikinci terim ise büyür.

İkinci kriter de Akaike Bilgi Kriteridir:

$$ABK_n = \ln(\hat{\sigma}_x^2) + \frac{2n}{N} \quad (5.3)$$

şeklinde tanımlanır. Model mertebesi arttıkça, ifadenin ikinci terimi ABK'nın büyümesine sebep olurken birinci terimi de monoton olarak azalır (Mitra ve Kaiser, 1993).

5.3 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları bir nöron hücresinin yapısı ve öğrenme özellikleri temel alınarak geliştirilmiş bir hesaplama sistemidir. YSA (yapay sinir ağları)'nın, mühendislik

uygulamalarındaki kullanımı bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile paralel olmuştur. YSA'lar günümüzde bir çok probleme de uygulanmaktadır. Bunlar arasında örüntü öngörüsü yapma, örneğin el yazısının otomatik okunması, konuşmaların akustik ve görsel yüz ifadelerinin özellikleri ile öngörülmesi sayılabilir. YSA'lar giriş setlerinin çıkış setleri ile lineer olmayan bir biçimde bağlantısı olarak da düşünülebilir. Girişler ve çıkışlar arasındaki bağlantı bir veya daha fazla gizli nöron (işlem birimi ya da nod) tabakasından oluşabilir (Chatfield,1995).

Şekil 5.1'de görüldüğü üzere YSA'lar birbirine bağlı çok fazla işlem elemanından oluşur, bağlantı ağırlıkları ile bilgiyi tutar, işlem elemanı giriş uyarılarına dinamik bir tepki verebilir ve bu tepki tamamen yerel bilgilere dayanır. Eğitim verisi ile düzenlenen bağlantı ağırlıkları sayesinde öğrenme, hatırlama ve genelleme yeteneklerine sahiptir YSA'nın mimarisini (yapısını) giriş verilerinin başlangıç koşulları belirler. Mimarinin belirlenmesi gizli tabaka sayısını ve her tabakada ne kadar nöron olacağını içerir (Chatfield, 1995).

Şekil 5.1'de sinir hücresi nöronun basit bir matematiksel modeli gösterilmektedir. Bu modelde, j . işlem elemanının çıkışı şöyledir;

$$y_k = \varphi\left(\sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k\right) \quad (5.4)$$

Burada φ aktivasyon fonksiyonu, b_k ise bias terimidir. Bir işlem elemanı x_j giriş bilgilerini bağlı buldukları w_{kj} ağırlıkları üzerinden birleştirir ve bir aktivasyon fonksiyonundan geçirerek çıkış değerini üretir.

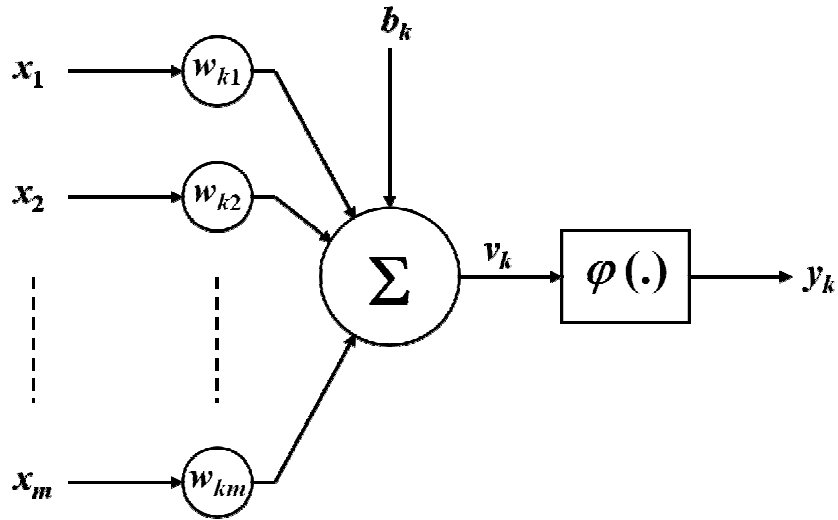
Aktivasyon fonsiyonları çıkış değerinin daha dar bir aralığa çekilmesini sağlar. Birim basamak, signum, rampa, tek ve çift yönlü sigmoid aktivasyon fonksiyonları kullanılarak yapay sinir ağının eğitim sürecinde hata değişimlerinin ıraksaması önlenir (http://perweb.firat.edu.tr/personel/yayinlar/fua_69/69_22586.pdf).

5.3.1 Yapay Sinir Ağının Temel Özellikleri

Yapay sinir ağı modelini diğer geleneksel modellerden ayıran temel özellikler şöyle sıralanabilir:

- *Öğrenme* : YSA örüntüler arasındaki ilişkiyi örüntü örneklerini inceleyerek kavramaya çalışır, her yeni örnek ağın öğrenme sürecini ilerletir.

- *Genelleme* : YSA'nın girişinde değişimler olsa bile, tam olmayan ya da kısmen hatalı girişlerle de doğru sonuca varılabilir. Yani YSA yeni bir örüntüyü öğrendikleri ile mukayese ederek benzerlikleri bulabilir ve genelleme yapabilir.
- *Çıkarım yapma* : YSA hatalı bir eğitim seti ile de doğru sonuca ulaşabilir.
- *Hata toleransı* : YSA'lar geleneksel sistemlerin aksine verilerde eksiklik olsa bile çalışmasına devam ederek bir sonuca ulaşır. Verilerdeki eksiklik ve yapısal bozukluklar arttıkça YSA'nın performansı düşer. Çünkü YSA'da bir bağlantı ve sahip olduğu bilginin hatası, YSA'nın grup halinde çalışması ve tüm bağlantıların değerlendirilmesi sayesinde sonucu etkilemeyebilir. Diğer bağlantılar işleme devam eder, eksik veriler sadece işlemi yavaşlatır.
- *Hız* : YSA'lar birbirlerine bağlı ve paralel işlem elemanlarından oluştuğundan verileri hızlı bir şekilde işlerler (http://perweb.firat.edu.tr/personel/yayinlar/fua_69/69_22586.pdf).



Şekil 5.1: Bir nöron hücresinin matematiksel modeli.

5.4 Yapay Sinir Ağlarının Zaman Serisi Öngörüsünde Kullanımı

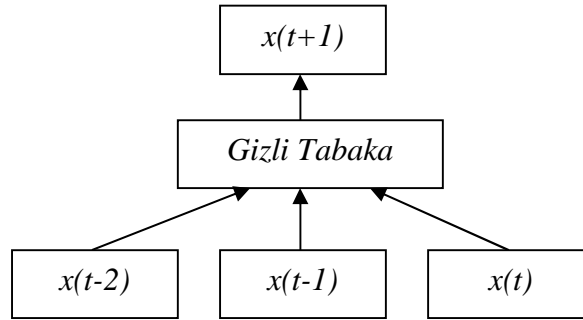
Şekil 5.2'de görüldüğü üzere yapay sinir ağları bir zaman serisinin şu ana kadarki değerlerinden yola çıkarak gelecekteki değerlerini öngörmek için de kullanılabilir.

YSA genel olarak x 'in $t + d$ zamanındaki değerini, $t + d$ 'den önceki N sayıda tekrarlarla tahmin etmeye çalışır.

$$x(t + d) = f(x(t), x(t - 1), \dots, x(t - N + 1)), \quad (5.5)$$

$$x(t + d) = f(y(t)) \quad (5.6)$$

Burda $y(t)$, gecikmeli x değerlerinin N dizi vektörüdür. Genelde d , 1 olacak ve f bir sonraki değeri hesaplayabilecektir (Frank ve diğ.,2000).



Şekil 5. 2: Zaman serisi tahmini için YSA metodu (Frank ve diğ., 2000).

5.5 Model İle Analiz Sonrası Gerçek Veriler Arasındaki Uygunluk Derecesinin Ölçüsü: R^2

R^2 değeri herhangi bir modelin gerçek veriler ile arasındaki uyumluluğun bir derecesidir. R^2 , 0 ile 1 arasında değerler alır ve bu değer 1'e ne kadar yakın olursa model o kadar başarılıdır.

TSS : Kareler toplamı

RSS : Kareler toplamının gerilemesi

ESS : Kareler toplamının hatası

$$TSS = \sum_i^n [y_i]^2 \quad (5.7)$$

$$ESS = \sum_i^n [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (5.8)$$

$$RSS = \sum_i^n [ax_i + b]^2 \quad (5.9)$$

$$R^2 = \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{ESS}{TSS} \quad (5.10)$$

6. SONUÇLAR

6.1 Hesaplamalar

Bu çalışmada Atatürk Havalimanı'nda bulunan otomatik meteorolojik gözlem sisteminden (AWOS) elde edilen 10m'de 2005-2009 yılları arasında bir dakikalık aralıklarla örneklenmiş rüzgar şiddeti verisi kullanılmıştır.

6.1.1 Weibull Katsayıları

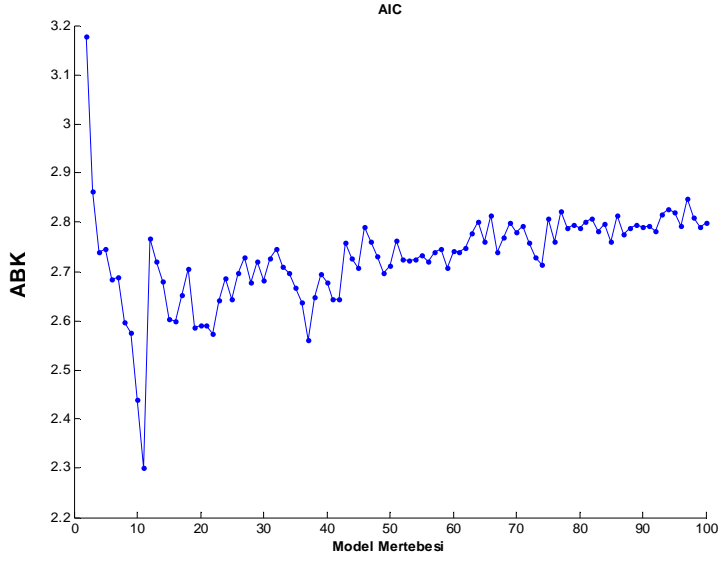
Rüzgar şiddeti verilerinin Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonun katsayıları şöyle belirlenmiştir.

Şekil parametresi, k : 2.1546

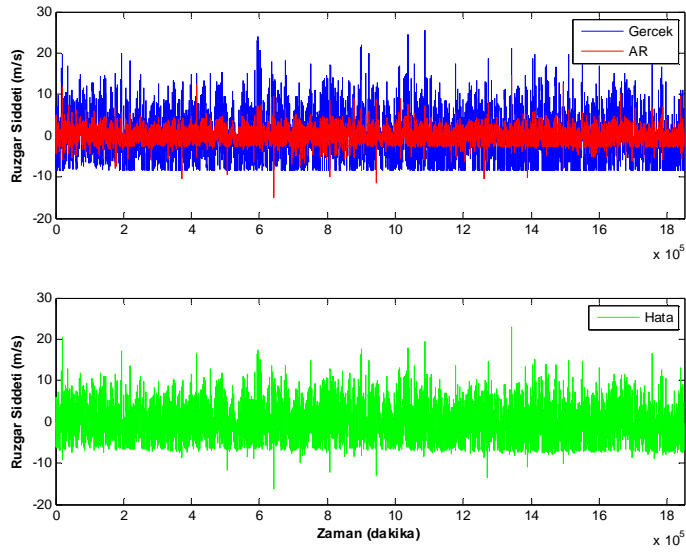
Boyut parametresi, c : 10.149 m/s

6.1.2 AR Modeli Sonuçları

Verilerin AR modeli ile öngörüsü yapılırken ABK (Akaike Bilgi Kriteri) ile optimal model mertebesi 11 olarak hesaplanmıştır. ABK'nin katsayıları Yule-Walker metodu ile belirlenmiştir. Tüm veri üzerinden 1'den 100'e kadar mertebeler için hesaplanan ABK değerleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir. 11. mertebeden AR modeli ile elde edilen zaman serisi için $R^2=0.4795$ bulunmuştur. Şekil 6.2'de AR modeli ile hesaplanan öngörü serisi, gerçek işaret ve hata serisi görülmektedir.



Şekil 6.1: 1'den 100'e kadar model mertebeleri için ABK değerleri.



Şekil 6.2: Rüzgar işareti ve AR modeliyle elde edilen öngörü serisi.

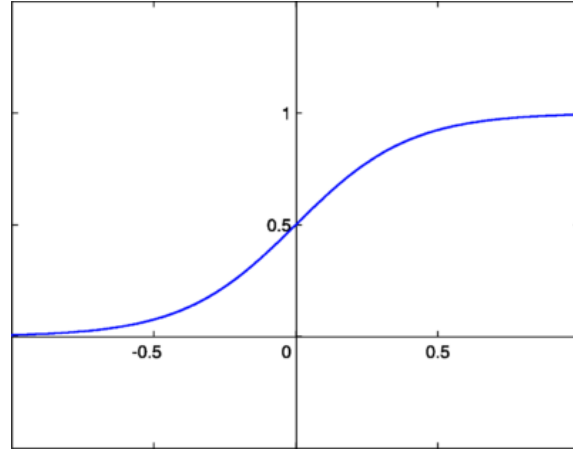
6.1.3 Yapay Sinir Ağı Sonuçları

AR modeli ile karşılaştırma yapabilmek için YSA ile de aynı mertebeden bir model yapma yoluna gidilmiştir.

Girişinde 11 tane nod bulunan, bir gizli tabakaya sahip çıkışında bir nöron bulunan bir YSA kullanılmıştır. YSA gizli tabakasındaki nöron sayısı giriş nodları ile çıkış nöronlarının toplamının yarısı (6) alınmıştır.

YSA, Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak 500 adımda eğitilmiştir (Levenberg, 1944); (Marquardt, 1963). Gizli tabaka ve çıkış tabakasinda Şekil 6.3'de gösterilen logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

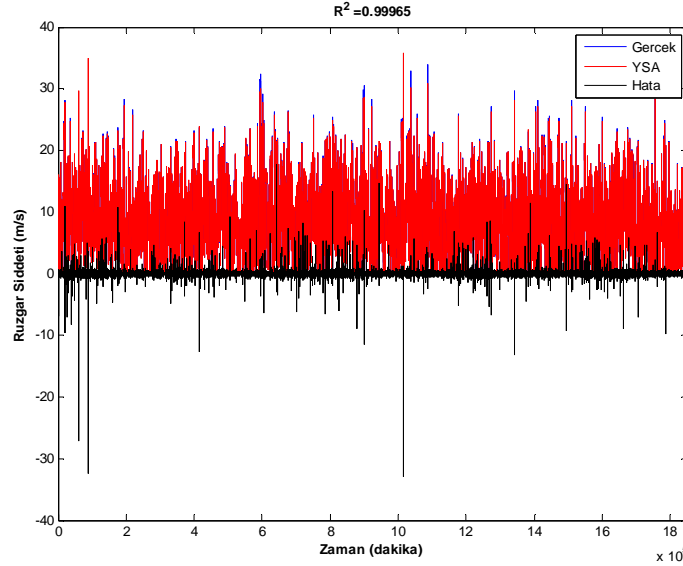
YSA ile elde edilen öngörü serisi için $R^2 = 0.99965$ bulunmuştur. YSA ile hesaplanan öngörü verilerinin, gerçek işaretle ile karşılaştırılması Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.3: Logaritmik sigmoid fonksiyonu.

Logaritmik Sigmoid fonksiyonu;

$$a_t = \frac{1}{(1+e^{-t})} \quad (6.1)$$



Şekil 6.4: Rüzgar şiddeti ve YSA ile elde edilen öngörü serisi.

6.2 Sonuçlar

2005-2009 yılları arasında dakikalık ortalama rüzgar şiddeti değerleri spektral analiz için 4 günlük, 1 günlük, 4 saatlik, 1 saatlik, 30 dakikalık, 10 dakikalık ve 1 dakikalık ortalamalar şeklinde gruplandırılarak spektral yoğunlukları belirlenmiştir (Şekil 6.5).

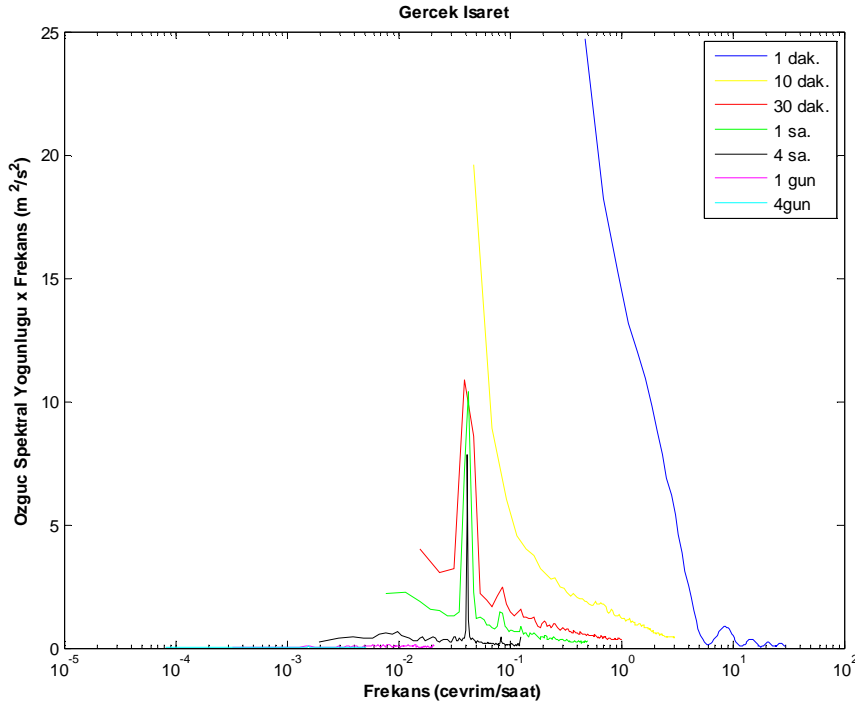
Buna göre maksimum enerji yoğunluğunu gösteren maksimum pik sinoptik ölçekli basınç paternlerinin ve cephesel sistemlerin İstanbul'da etkili olduğu süreyi kapsamaktadır. Genelde bir bölge üzerinden sinoptik ölçekli bir sistemin geçiş periyodu 3-5 günlük süreyi kapsamaktadır. Özellikle sonbahardan itibaren bölge üzerinde kuzey, kuzey batı, güney batıdan etkili olan bu sistemler rüzgar yön ve şiddetinde önemli değişimlere neden olmakta ve bu geçiş sürecinde rüzgar şiddeti artmaktadır. Bu geçiş ilk baharın ortalarına kadar devam etmektedir. İkinci pik değerinin oluştuğu spektral bant 12 saatlik bir periyodu kapsamaktadır. Bu ise bölge üzerinde etkili olan meltem etkisini göstermektedir, Kuzey ve güneyi denizlerle çevrili bulunan ve tepelik bir topografik yapı gösteren İstanbul üzerinde sabah saatlerinde başlayıp, ısınmanın maksimum olduğu saatte en yüksek değerine ulaşan deniz meltemleri ve gece ise karadan denize doğru esen kara meltemlerine ilave olarak tepelerden inen dağ meltemleri rüzgar şiddetindeki artışın yanı sıra yönde de anlamlı değişimlere neden olmaktadır. Özellikle yaz ayları dikkate alınarak yapılacak analiz daha anlamlı sonuçlar verebilir. Birkaç saatlik pikler ise meso ölçek sistemleri ve akışı temsil etmektedir. İstanbul üzerinde konvektivite nedeni ile tanderstorm oluşumu özellikle ilkbahar sonu ile yaz başlangıcında gerçekleşmekte, bu süreçte ise

rüzgar şiddeti değerleri fırtına limitlerine yükselmektedir. Ancak bölgede tanderstorm oluşumu sık gerçekleşmemektedir. Şekil irdelendiğinde birkaç dakikalık piklerinde anlamlı olduğu görülmektedir. Özellikle geniş ölçekli sistemlerin bölge üzerinde etkili olduğu süreçte kuvvetli sıcaklık ve basınç gradyanının oluşması, günlük ısınma etkisi ile oluşan konveksiyon, rüzgar şiddetinin ortalama değere göre artış göstererek squall veya hamle (gust) oluşumuna neden olmaktadır. Bölgedeki spektral boşluk rüzgar şiddetinin birkaç saat süren periyot içinde sakin geçen döneme karşı gelmektedir. Özellikle kararlı atmosfer yapısının etkili olduğu gece periyodu spektral boşluk dönemi ile uyumludur.

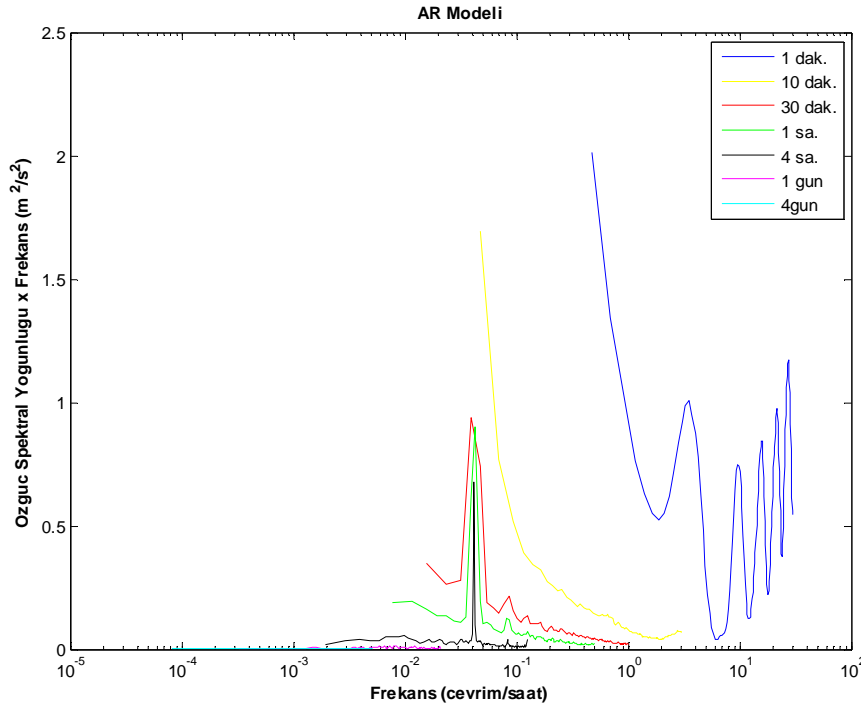
George Udny Yule'un 1927'de AR modelini ortaya koymasıyla zaman serisi öngörüsü, örnek serisine zaman domeninde bir eğri uydurup bunu ekstrapole etmenin önüne geçmiştir. Yule'un en küçük kareler metoduna getirdiği bu yeni kullanımı takip eden yarım asır boyunca zaman serisi öngörüsünde gürültüyle sürülen lineer modeller hakim olmuştur. Lineer öngörü metotlarıyla modellenemeyecek zaman serilerinin varlığı (ki bunlar Lojistik fonksiyon gibi çok basit eşitliklerle bile üretilebilmektedir) zaman serisi analizi ve öngörüsünde daha genel teorik yaklaşımların gerekliliğini göstermiştir. Bu yönde atılan en ilginç adımlardan biri de yapay sinir ağlarının zaman serisi öngörüsünde kullanımı olmuştur (Weigend ve Gershenfeld, 1992).

Bu çalışmada rüzgar şiddetinin öngörüsü için bir lineer bir de non-lineer zaman serisi öngörü metodu denenerek işaretin içerdiği karakteristik frekans bileşenlerinin öngörü serilerinde ne kadar iyi modellenbildiği araştırılmıştır. Başarımları denenen AR Modeli ve Yapay Sinir Ağının zaman işaretine uygulanması sonucu elde edilen öngörü serisinin, gerçek işaretin frekans karakteristikleri ile karşılaştırılması sırasıyla Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de verilmiştir. AR modeli ile elde edilen zaman serisinde düşük frekanslı piklerin gerçek işaretle uyumlu olduğu; yüksek frekanslarda ise piklerde kaymalar ve enerji artışı olduğu görülmektedir. YSA ise bütün frekanslarda gerçek işarete yakın sonuçlar veren bir tahmin serisi üretmektedir. YSA'nın üstün başarısı non-lineer yapısından kaynaklanmaktadır. Buna rağmen AR modeli de spektral karakteristiği bir yere kadar yansıtabilmektedir. Lineer zaman serisi modelleri çok iyi bilinmeleri ve uygulamadaki kolaylıkları nedeniyle tercih edilirler. En büyük dezavantajları ise karmaşık sistemleri modellenmesinde başarısız olmalarıdır. Yüksek başarımının yanı sıra YSA işaretin ortalama değerinin çıkarılmasına da gerek duymadığından diğer metoda tercih edilmelidir. Tek sorun

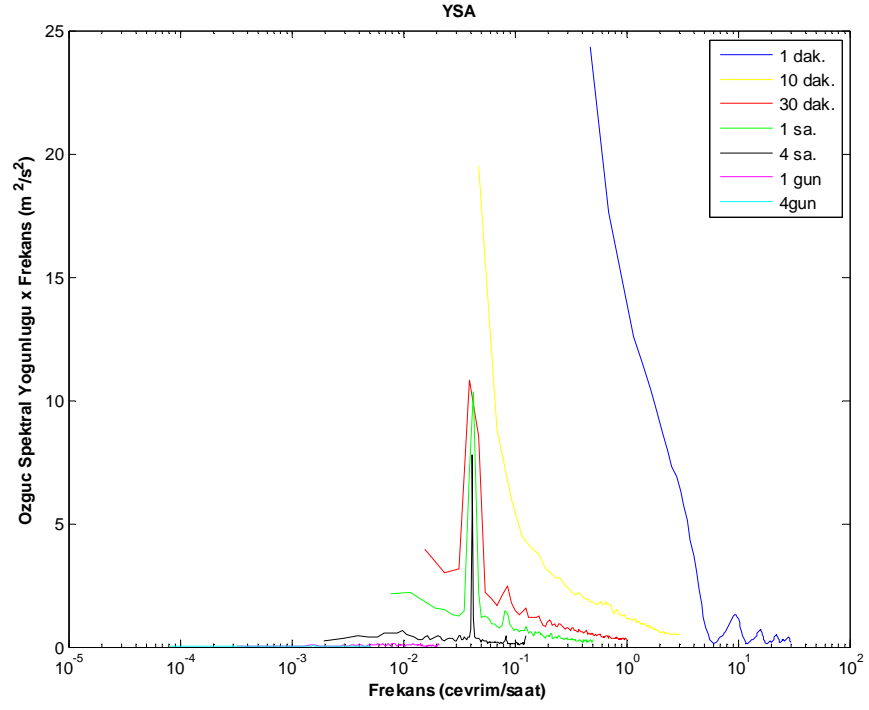
YSA ile yapılacak olan modelin optimal mertebesini belirlemek için ABK gibi bir metodun bulunmamasıdır.



Şekil 6.5: Gerçek işaretin özgül spektral yoğunluğu.



Şekil 6.6: AR modeli ile elde edilen özgül spektral yoğunluğu.



Şekil 6.7: YSA ile elde edilen özguç spektral yoğunluğu.

KAYNAKLAR

- Aguado, E. and Burt, J. E.**, 2007: Understanding Weather and Climate, 4th Edition, , New Jersey USA, p.107-108-214.
- Akaike, H.**, 1974: A New Look at the Statistical Model Identification, *IEEE Trans. Autom. Control.*, **19**, Issue 6, p.716-723.
- Akaike, H.**, 1969: Power Spectrum Estimation Through Autoregressive Model Fitting, *Ann. Inst. Stat. Math.*, **21**, p.407-419.
- Bianchi, F. D., Battista, H. D. and Mantz, R. J.**, 2007: Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design, La Plata Argentina, p. 8-9.
- Brown, A. B.**, 1991: Fluid Mechanics of Atmosphere, p , Academic Press, San Diego.
- Burton T., Sharpe D., Jenkins N. and Bossanyi E.**, 2007: Wind Energy Handbook, England, p.11-12.
- Chatfield, C.**, 1996: The Analysis of Time Series an Introduction, 5th Edition, Reader in Statistics The Universty of Bath UK, Chapman and Hall/CRC, London.
- Cohen, A.**, 1986: Biomedical Signal Processing I, CRC Press Inc., Florida.
- Eggleston, E. D. and Clark R. N.**, 2000: Wind Speed Power Spectrum Analysis for Bushland, Texas,USA,*Wind Engineering*, **24**, 1, p.49-52.
- Estoque,M. A.**, 1955: The Spectrum of Large Scale Turbulent transfer of Momentum and heat, *Tellus*, **7**, p.177-185.
- Frank, R. J., Davey, N. and Hunt, S. P.**, 2001: *Time Series Prediction and Neural Networks*, *Journal of Intelligent and Robatic Systems* 31:91-103, The Netherlands, p.91,92.
- Frye, D. E., Pond, S. and Elliott, W.P.**, 1972. Note on the Kinetic Energy Spectrum of Coastal Winds.
- Griffith, H. L., Panofsky H. A., and Hoven I. V. D.**, 1956: Power-Spectrum Analysis Over Large Ranges of Frequency, *J.Meteor.*, **13**, p.279-282.
- Hau, E.**, 2006: Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd Edition, Germany, p.1,2,451,452,472.

- Hellman, G.**, 1915: Über die Bewegung der Luft in den Untersen Schichten der Atmosphäre, *Meteor.Z.*, **32**, p.1-16.
- Hoven, I. V. D.**, 1957: Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in The Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour, *Journal of Meteorology*,**14**, p.160-164.
- Hwang, H. J.**, 1967: Power Spectrum Density of Surface Wind Speed on Palmyra Island, *Monthly Weather Review*, **98**, 1, p.70-74.
- Johnson, G. L.**, 2001: Wind Energy Systems, *Electronic Edition*, Manhattan, KS p.1-2, 2-1,2-30,2-31,2-32, 3-1, 3-2, 3-3,3-4.
- Kadılar, C. ve Erdemir, C.** 2000: Vektör Otoregresyon Modellerinin Derecesinin Seçiminde Kullanılan İstatistiksel Kriterler, *Uludağ Ün. İktisadi ve İdari Bil. Fak. Dergisi*, **18**, 2.
- Levenberg, K.**, 1944: A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares, *Quarterly Applied Math.*, **2**, p.164-168.
- Manwell, J. F., McGowan, J.G. and Rogers, A. L.**, 2002: Wind Energy Explained-Theory, Design and Application, John Wiley & Sons Ltd University of Massachusetts, Amherst, USA, p.56-60.
- Marquardt, D.**, 1963: An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *SIAM Journal Applied Math.*, **11**, p.431-441.
- Mitra, S.K. and Kaiser, J.F. (ed.)**, 1993: Handbook for Digital Signal Processing, John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Oort, A. H., and Taylor, A.**, 1969: On the Kinetic Energy Spectrum Near the Ground, *Monthly Weather Review*, **97**, 9, p.623-636.
- Panchev, S.**, 1985: Dynamic Meteorology, The Netherlands, p.325-326.
- Panofsky, H. A. and McCormick, R. A.**, 1954: Properties of Spectra of Atmospheric Turbulence at 100 Metres, p.546-564.
- Patel, M. R.**, 1999: Wind and Solar Power Systems, U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, CRC Press, p.58-61.
- Schwarz, G.**, 1978: Estimating the Dimension of a Model, *Ann. of Stat.*, **6**, p.461-464.
- Shibata, R.**, 1976: Selection of the Order of an Autoregressive Model by Akaike's Information Criterion, *Biometrika*, **63**, 1, p.117-126.

Straw M. P., 2000: Computation and Measurement of Wind Induced Ventilation, *Universty of Nottingham*, United Kingdom.

Thie, J.A., 1981: Power Reactor Noise, American Nuclear Society, Illinois, USA.

Url-1: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_speed> , alındığı tarih 31.10.2009.

Url-2: <http://www.ruzgarenerjisibirli.org.tr/yayinlar/bilimsel/diger/makale/Yenile_bilirlerin-Entegrasyonu.pdf> alındığı tarih 31.10.2009.

Url-3: <<http://www.wwindea.org/home/index.php>>, alındığı tarih 22.04.2010.

Url-4: <http://perweb.firat.edu.tr/personel/yayinlar/fua_69/69_22586.pdf> , alındığı tarih 25.04.2010.

Weigend, A.S. and Gershenfeld, N.A., 1992: Time Series Prediction: Forecasting The Future and Understanding The Past, *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Comparative Time Series Analysis* held in Santa Fe, New Mexico, May 14-17.

Yule, G.U., 1927: On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special reference to Wolfer's sunspot numbers, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, Vol. 226, pp. 267-298

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Elif KAYA

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 22.04.1982

Adres: İstinye – Sarıyer / İstanbul

Lisans Üniversite: Fizik Mühendisi, İstanbul Teknik Üniversitesi